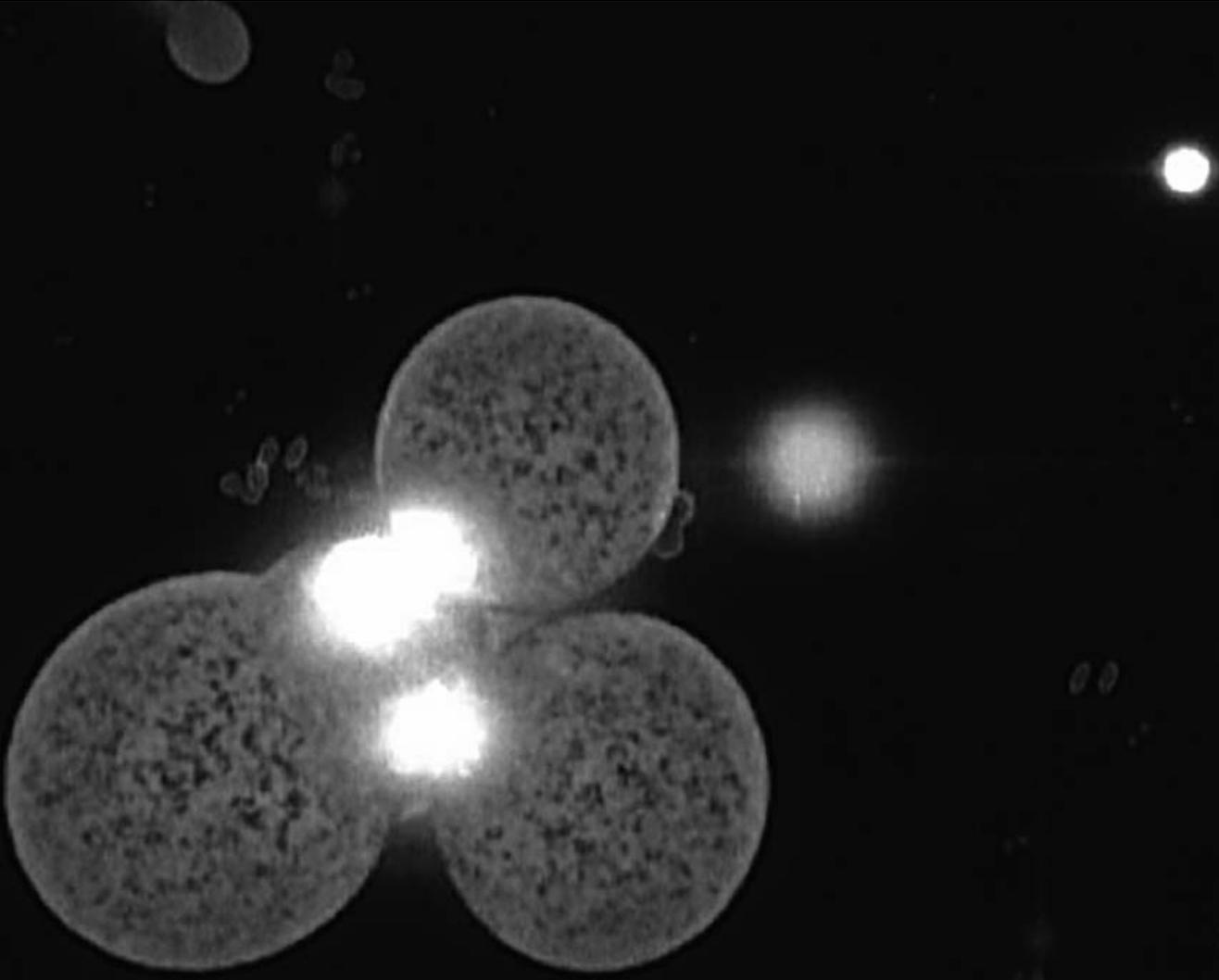


FWU – Schule und Unterricht

VHS 42 10443 / DVD 46 10443 17 min, Farbe



Albert Einsteins spezielle Relativitätstheorie Teil 2

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 verstehen, dass die Geschwindigkeit des Lichts dadurch zu einer natürlichen Grenze für alle bewegten Massen wird. Als Konsequenz erkennen sie das Auftreten der relativistischen Massenzunahme. Die Schüler lernen, dass Masse und Energie äquivalente Größen sind und gewinnen einen Eindruck von der großen Energiemenge, die in der Masse gebunden ist.

Vorkenntnisse

Die Zuschauer sollten den Effekt und die Ursache der Zeitdilatation kennen. Wissen über den grundlegenden Atomkernaufbau ist nötig.

Zum Inhalt

Der Unterrichtsfilm ist der 2. Teil einer dreiteiligen Reihe über Einsteins Relativitätstheorie. Darin wird speziell auf den Effekt der relativistischen Massenzunahme eingegangen.

Die Effekte der Zeitdilatation und Längenkontraktion, die im 1. Teil thematisiert wurden, werden kurz wiederholt.

Durch die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in jedem Bezugssystem wird begründet, warum die Lichtgeschwindigkeit eine Grenzgeschwindigkeit darstellt und die Masse eines Körpers mit zunehmender Geschwindigkeit ansteigt. Der Film erklärt die relativistische Massenzunahme anhand eines Asteroideneinschlags auf einem Planeten, der sowohl von einem auf dem Planeten befindlichen Beobachter als auch von einem vorbeifliegenden Raumschiff aus betrachtet wird. Aus der Sicht des Raumschiffpiloten bewegt sich der Asteroid wegen der Zeitdilatation mit geringerer Geschwindigkeit als vom Planeten aus betrachtet. Da beide Beobachter aber

die gleiche Einschlagswirkung sehen, muss der Asteroid im Inertialsystem des Raumschiffs eine größere Masse als im System des Planeten besitzen.

Der Film erläutert die Äquivalenz von Masse und Energie. In einer Trickaufnahme wird durch das Anheben eines großen österreichischen Alpensees auf sehr spektakuläre Art die große Energiemenge veranschaulicht, die einem Kilogramm Masse entspricht. Eine Animation erklärt, wie ein großer Teil der in der Masse gebundenen Energie als Bindungsenergie im Atomkern vorliegt. Die Atombombe und die Kernfusion in der Sonne werden als Beispiele für Vorgänge vorgestellt, bei denen Masse in Energie umgewandelt wird.

Ergänzende Informationen

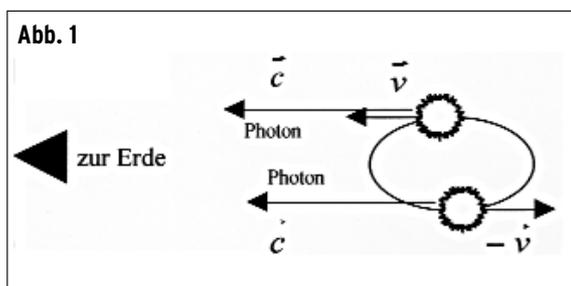
Die Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie und ihre Auswirkungen auf Raum, Zeit und Masse

Albert 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 diese



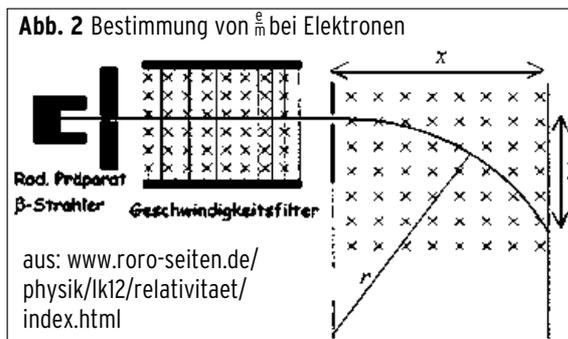
beiden Annahmen aufbauend führte Einstein Gedankenexperimente durch, die ihn zwingen, die bisherige Vorstellung eines starren Raumes und einer festen Zeit grundlegend zu revidieren. So ergaben sich die Phänomene, die wir unter dem Begriff Zeitdilatation und Längenkontraktion kennen. Durch die konsequente Weiterverfolgung der Prinzipien seiner Relativitätstheorie erkannte Einstein außerdem, dass sich neben der Länge und Zeit auch noch die Masse als höchst veränderliche Größe erweist.

Gemäß Einsteins zweiter Annahme wird in allen Inertialsystemen der gleiche Wert für die Lichtgeschwindigkeit gemessen, so dass sich kein derartiges System schneller als das

Licht bewegen kann. Dies würde sonst auch zu physikalischen Widersprüchen im Hinblick auf unser Verständnis von Ursache und Wirkung führen. Nähert sich also die Geschwindigkeit eines Körpers der des Lichts, muss sich beim Beschleunigen ein erhöhter Widerstand bemerkbar machen, der eine weitere Geschwindigkeitszunahme erschwert und schließlich die Überschreitung der Lichtgeschwindigkeit verhindert. Folglich vermutete Einstein, dass die Trägheit des Körpers in Gestalt seiner Masse mit der Geschwindigkeit anwächst. Die relativistische Massenzunahme wird damit genau wie die Zeitdilatation und Längenkontraktion umso deutlicher, je größer die Relativbewegung der Beobachter zueinander ist.

Der experimentelle Nachweis der relativistischen Massenzunahme

Bereits vor 1900, also noch vor Einsteins Formulierung der speziellen Relativitätstheorie, wurde über mögliche Erklärungen für die zunehmende Steifigkeit von Elektronenstrahlen bei sehr hohen Geschwindigkeiten diskutiert. Der Physiker *Walter Kaufmann* untersuchte anhand der β -Strahlung von Radium die spezifische Ladung und Masse sehr schneller Elektronen und entdeckte 1901 die Zunahme der Elektronenmasse mit ihrer Geschwindigkeit (siehe Abb.2). Nach Einsteins Veröffentlichung der speziellen Relativitätstheorie konnte Kaufmann im Jahr 1906 bei Elektronen auch den funktionellen Zusammenhang $m(v)$ nachweisen, den *Alfred H.*



Bucherer 1909 bestätigte. Später wurden noch weitere Experimente (*Neumann, Schaefer*, u.a.) unternommen, die alle eine sehr gute Übereinstimmung mit der von Einstein hergeleiteten Gleichung für die relativistische Massenzunahme ergaben.

Die Bedeutung der Äquivalenz von Masse und Energie

Als Einstein in seiner letzten von insgesamt fünf wissenschaftlichen Arbeiten des Jahres 1905 seine berühmte Formel $E = m c^2$ unter dem Titel „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“ veröffentlichte, war noch niemandem ihre große Bedeutung bewusst. Zwar ist bei jeder exothermen Reaktion die Gesamtmasse der Ausgangsstoffe größer als die Masse der Endprodukte. Diese als Massendefekt bezeichnete Massendifferenz äußert sich dann als freiwerdende Energie. Doch ist der Massendefekt bei chemischen Reaktionen, die sich innerhalb der Atomhülle abspielen, unmessbar klein. Erst als die Physiker in den Bereich der Atomkerne vordrangen und die Kernkräfte entdeckten, wurde deutlich, welche extrem große Energie bereits in einer geringen Menge Materie gebunden ist. Der Menschheit wurde die in der Kernkraft verborgene Energie auf dramatische Weise offenbart, als am 16. Juli 1945 eine riesige, pilzförmige Wolke ihn Los Alamos in der Wüste New Mexicos erschien. An der Entwicklung der Atombombe waren damals in den USA u.a. die Physiker *Oppenheimer, Fermi, Bethe* und *Teller* beteiligt. Die Realisierung der Umwandlung von Masse in Energie fand ihren traurigen Höhepunkt in dem Abwurf der zwei Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki am 6. und 9. August 1945, durch die unmittelbar mehr als 100 000 Menschen getötet wurden. Die Sprengkraft der Bomben entsprach 20kt des herkömmlichen Sprengstoffs TNT,

obwohl nur etwa 1kg Uran bzw. Plutonium vollständig gespalten und dabei 1g vollständig in Energie umgewandelt wurde. Als überzeugter Pazifist hatte sich Einstein nie an der wissenschaftlichen Arbeit, die zur Kernspaltung oder zu Kernwaffen führte, beteiligt. Jedoch forderte er 1939 Präsident Roosevelt in einem Brief auf, ein Forschungsprojekt zur Entwicklung der Atombombe zu initiieren, aus der Sorge heraus, es könne den Nationalsozialisten in Deutschland gelingen, solch eine Waffe zu bauen. Schließlich gelang es bereits 1938 den deutschen Physikern *Otto Hahn* und *Fritz Strassmann* als erste, einen Urankern zu spalten. Er selbst glaubte, dass die Konstruktion einer Kernwaffe während seiner Lebenszeit noch nicht möglich sei. Ausgerechnet darin aber hatte sich Albert Einstein, ein Mann mit außerordentlicher Intuition, gründlich getäuscht. Bei einer Kernspaltung, wie sie bei der Explosion einer Kernwaffe oder in einem Kernreaktor abläuft, wird ein kleiner Bruchteil der Materie in Energie umgewandelt. Die Differenz aus der Summe der Bindungsenergien der Spaltkerne (wie z.B. Barium und Krypton) und der Bindungsenergie des Ausgangskerns (z. B. Uran) ist positiv und wird u. a. in der Bewegungsenergie der sich gegenseitig abstoßenden Spaltkerne sichtbar. Diese Energie wird bei Kernreaktoren in Form von Reibungswärme genutzt. Doch auch der umgekehrte Prozess der Kernverschmelzung leichter Kerne ermöglicht Energieerzeugung. Die Energieausbeute ist dabei sogar noch größer, da der Massendefekt noch ausgeprägter ist. Bedauerlicherweise wurde wieder einmal zuerst die militärische Nutzung in Form der Wasserstoffbombe verwirklicht. Inzwischen wird aber auch an der Konstruktion von Kernfusionsreaktoren gearbeitet, deren Vorbilder die in der Sonne ablaufenden Energieerzeugungsprozesse darstellen.

Die Sonne erzeugt bereits seit Jahrmillionen Energie aus der Verschmelzung von Protonen zu Heliumkernen. Pro Kern wird dabei Energie in der Größenordnung von ca. 10^5 kWh frei, von der jedoch wieder ein Teil nötig ist, um weitere Kernverschmelzungen zu ermöglichen. Durch die Abstrahlung von Energie verliert die Sonne gemäß der Masse-Energie-Relation täglich rund $3,7 \cdot 10^{34} \text{ kg}$ ihrer Masse.

Die Äquivalenz von Masse und Energie geht so weit, dass Materie sogar vollständig in Energie umgewandelt werden kann. Zunächst nur theoretisch schien auch der umgekehrte Vorgang möglich, bei dem aus Energie Masse erzeugt wird. Im Jahr 1928 sagte *Paul Dirac* die Existenz des Antiteilchens des Elektrons, des Positrons, voraus, das paarweise mit einem Elektron aus Energie erzeugt werden sollte. *Carl Anderson*

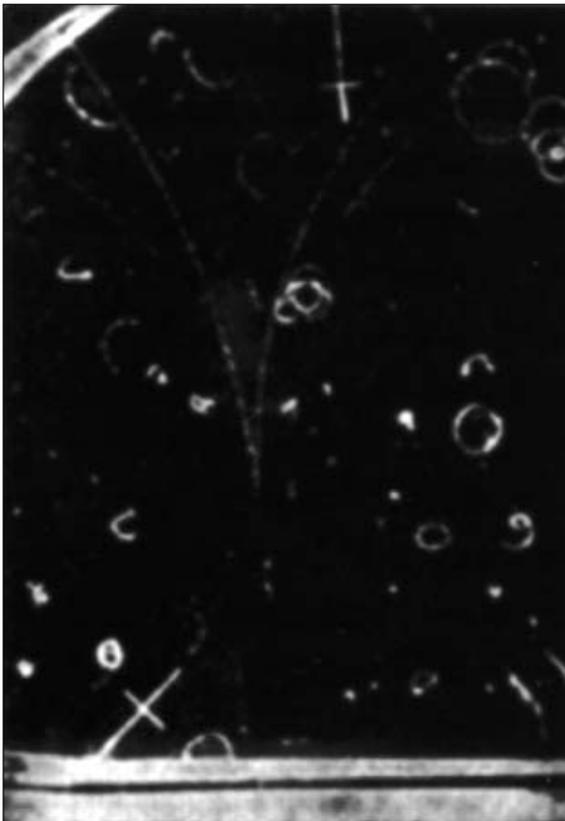


Abb. 3 Nebelkammeraufnahme einer Elektron-Positron-Paarbildung (aus: Gerthsen: Physik)

gelang 1932 der Nachweis des Positrons in der kosmischen Strahlung und bestätigte später Diracs Vermutung, als in einer Nebelkammer die Entstehung eines Elektron-Positron-Paares aus einem γ -Quant beobachtet werden konnte (Abb. 3). Die komplette Umformung einer Masse in Energie wird bei der Paarvernichtung realisiert. Dabei zerstrahlen Elektron und Positron bzw. Teilchen und Antiteilchen zu zwei oder mehr Photonen. Inzwischen ist die Erzeugung von Elementarteilchen in Teilchenbeschleunigern eine nahezu alltägliche Angelegenheit geworden. In großen Zentren wie DESY, CERN werden in sogenannten Collidern Teilchenenergien im Bereich von mehreren 100 GeV erreicht. Collider bestehen aus einem Beschleuniger und einem Speicherring. Dadurch ist es möglich, z. B. ein zuvor beschleunigtes Proton aus dem Speicherring auf ein Antiproton mit nahezu gleichem Impuls zu schießen. Dies minimiert die Rückstoßenergie der Stoßpartner und nutzt die Beschleunigerenergie voll aus. Bei bestimmten Stoßenergien können neue Elementarteilchen entstehen. Anstelle ihrer Ruhemasse wird in der Teilchenphysik üblicherweise nur noch ihre Ruheenergie angegeben. Dies mag verdeutlichen, wie stark Masse und Energie zusammenhängen, die doch im Grunde nur verschiedene Erscheinungsformen der gleichen physikalischen Struktur darstellen. Masse ist somit nur eine spezielle Form von konzentrierter Energie, genauso wie reine Energie z. B. Licht als substanziiell betrachtet werden kann.

Zum Einsatz im Unterricht

In der Oberstufe wird die relativistische Massenzunahme und die Masse-Energie-Beziehung behandelt, um die Bewegung elektrisch geladener Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern bei hohen Geschwindig-

keiten beschreiben zu können. Auch in der Kernphysik finden beide Themen häufig Verwendung. Der Film eignet sich als Einleitung wie auch als Zusammenfassung der beiden relativistischen Aspekte. Wird der Film zum Einstieg in die relativistische Massenzunahme genutzt, so ist zu beachten, dass der Film den Effekt der Zeitdilatation zur Erklärung der Massenzunahme verwendet. Aber auch in der Sekundarstufe 2 kann der Film eventuell verwendet werden, wenn der Lehrer etwas vertiefter auf das Thema Kernenergie und den Massendefekt eingehen möchte. Anhand der Informationen im Film können sich die Schüler die Grundlagen dieses speziellen Aspekts der Relativitätstheorie selbstständig erarbeiten.

Fragen zum Film:

1. Welche besonderen Effekte entdeckte Albert Einstein in seiner speziellen Relativitätstheorie bei schnellen Bewegungen im Bereich der Lichtgeschwindigkeit?
2. Aus welcher physikalischen Tatsache kann gefolgert werden, dass die Lichtgeschwindigkeit eine Grenzgeschwindigkeit darstellt und warum?
3. Durch welche Eigenschaft der trägen Masse kann ein Körper niemals auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden?
4. Warum kann der Astronaut, der im Film mit hoher Geschwindigkeit an dem Asteroidenaufprall vorbeifliegt, bei dem Asteroiden auf eine Massenzunahme schließen?
5. Bei welchen Vorgängen kann in der heutigen Zeit die relativistische Massenzunahme beobachtet werden?
6. Welche grundlegende Entdeckung hatte Einstein bei der Untersuchung der Massenveränderlichkeit gemacht?

7. Bestätigen Sie durch Rechnung, dass 1 kg Ruhemasse einer Energie von ca. 100 Trillionen Joule entsprechen. Überprüfen Sie auch die Aussage, dass mit dieser Energie etwa 8 km^3 Wasser um 1 km gehoben werden könnten.
8. Woher stammt die Energie, die bei der Kernspaltung oder -verschmelzung frei wird?

Zur Anwendung der im Film gezeigten Informationen kann abhängig vom jeweiligen Kenntnisstand der Schüler auf das Experiment von Kaufmann-Bucherer (siehe Abb.2) oder auch auf die Energieerzeugung durch Kernspaltung und -verschmelzung eingegangen werden.

Die Antworten zu den Fragen und ergänzende Aufgaben finden Sie im *Begleitmaterial* zu diesem Film auf unserer Website www.fwu.de.

Infos im Internet

<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.

<http://alephwww.physik.uni-siegen.de/~brandt/abend/sld076.html>

Eine sehr informative Präsentation über die Kern- und Teilchenphysik anlässlich eines Abendvortrags von Siegmund Brandt (Universität Siegen, Fachbereich Physik).

Literatur

Hänsel Horst, Werner Neumann: Physik, Atome, Atomkerne, Elementarteilchen, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 1995

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 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.

Fritzsch 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
Geiseltalstraße 3
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

Geiseltalsteig
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: 17 min
Kapitelwahl 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/ genehmigte
Nutzungen werden zivil- und/oder
strafrechtlich verfolgt.

**LEHR-
Programm
gemäß
§ 14 JuSchG**

FWU - Schule und Unterricht

- VHS 42 10443
- DVD-VIDEO 46 10443
- ■ **Paket 50 10443** (VHS 42 10443 + DVD 46 10443)

17 min, Farbe

Albert Einsteins spezielle Relativitätstheorie Teil 2

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 zweite Teil der dreiteiligen Serie zur Relativitätstheorie widmet sich der relativistischen Massenzunahme und der Beziehung von Masse und Energie, wonach die Masse nur eine andere Erscheinungsform der Energie darstellt.

Schlagwörter

Lichtgeschwindigkeit, Inertialsystem, Zeitdilatation, Längenkontraktion, relativistische Massenzunahme, Masse-Energie-Relation

Physik

Relativitätstheorie - Kernphysik - Elementarteilchenphysik -
Astronomie - Astrophysik, Geophysik - Weltraumfahrt - Kinetik, Dynamik

Allgemeinbildende Schulen (11-13)
Erwachsenenbildung

Weitere Medien

42 02895 Vom Bezugssystem zur speziellen
Relativitätstheorie VHS, 30 min, f
42 10442/46 10442/50 10442 Albert Einsteins spezielle
Relativitätstheorie Teil 1. VHS/DVD-VIDEO, 20 min, f
42 10444/46 10444/50 10444 Albert Einsteins allgemeine
Relativitätstheorie. VHS/DVD-VIDEO, 24 min, f