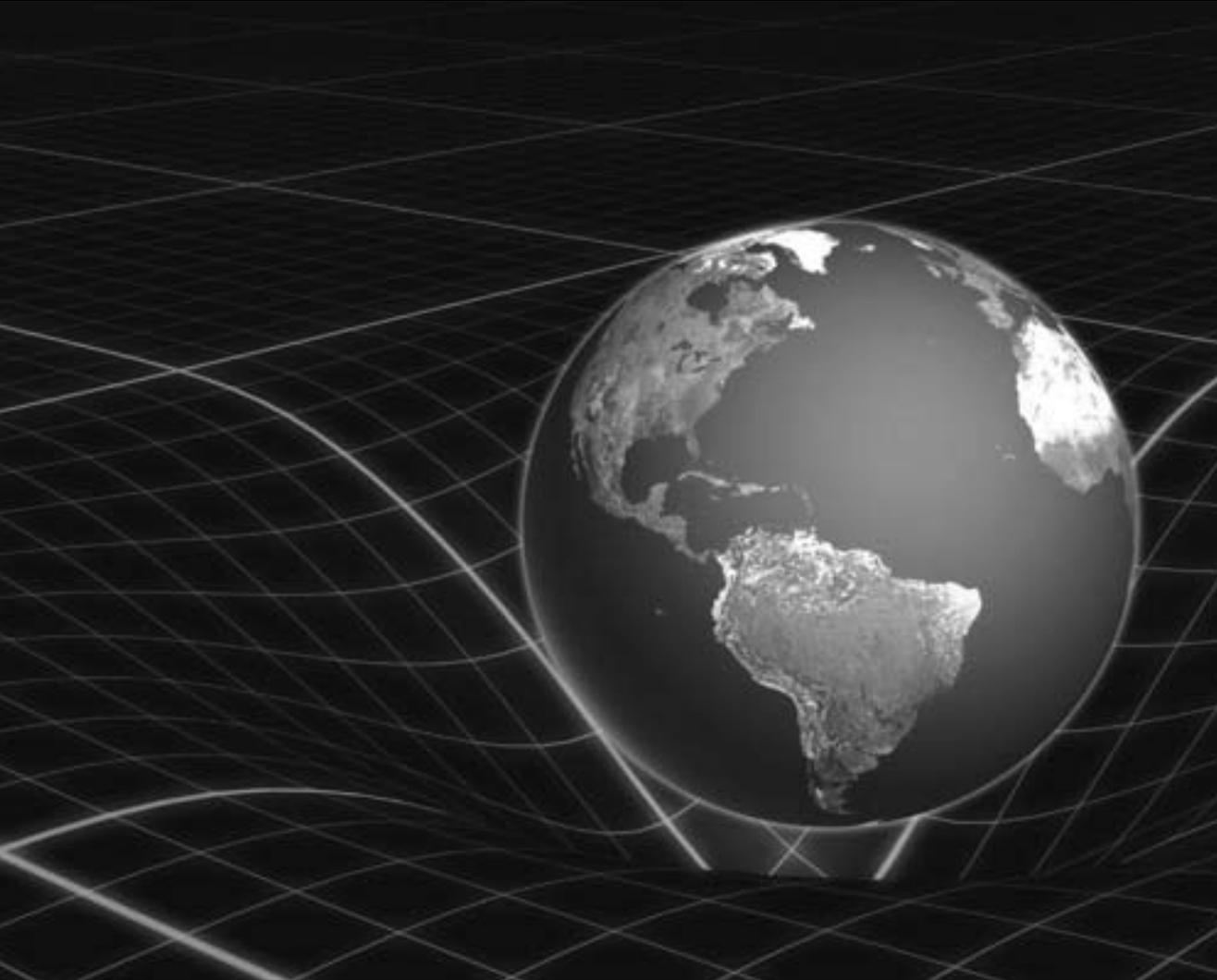


**FWU – Schule und Unterricht**

VHS 42 10444 / DVD 46 10444 24 min, Farbe



# **Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie**

FWU –  
das Medieninstitut  
der Länder



## **Lernziele**

*Die Schüler wiederholen die Eigenschaften eines Inertialsystems. Sie erkennen, dass es im Universum kein perfektes Inertialsystem gibt und die spezielle Relativitätstheorie deshalb erweitert werden muss. Die Schüler können die Äquivalenz von freiem Fall und Schwerelosigkeit bzw. Trägheit und Schwere nachvollziehen. Als Folge verstehen sie, warum die Zeitdilatation auch durch die Gravitation bedingt wird und sich Längenmaßstäbe unter dem Einfluss der Schwerkraft verkürzen. Sie gewinnen einen modellhaften Einblick in die Vorstellung einer gekrümmten Raumzeit.*

## **Vorkenntnisse**

*Die Zuschauer müssen bereits Vorkenntnisse über die Phänomene Zeitdilatation, Längenkontraktion und relativistische Massenzunahme besitzen. Der Begriff Inertialsystem sollte bekannt sein.*

## **Zum Inhalt**

Der Unterrichtsfilm ist der 3. Teil einer dreiteiligen Reihe über Einsteins Relativitätstheorie. Darin wird speziell auf die Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie eingegangen.

Die Effekte der Zeitdilatation, Längenkontraktion und relativistischen Massenzunahme, die in den ersten beiden Teilen thematisiert wurden, werden kurz wiederholt. Diese Phänomene werden im Film am Beispiel des Asteroideneinschlags auf einem Planeten veranschaulicht, der sowohl von einem vorbeifliegenden Raumschiff als auch von einem Planetenbewohner beobachtet wird. Der Film geht auf den Begriff des Inertialsystems ein und erklärt anhand eines die Erde umkreisenden Shuttles, warum es im Universum kein perfektes Inertialsystem geben kann. Auf diese Weise wird begründet, weshalb die spezielle Relativitätstheorie nur

eingeschränkt anwendbar ist und eine Verallgemeinerung in Form der allgemeinen Relativitätstheorie notwendig wurde. Es werden Realaufnahmen vom Zustand der Schwerelosigkeit während eines Parabelfluges gezeigt. Dies führt zur Analogie von freiem Fall und Schwerelosigkeit. Die scheinbare Schwere, die man während des Beschleunigungsvorgangs in einem Raumschiff verspürt, wird mit der Wirkung der Schwerkraft verglichen. Im Film wird so die gravitationsbedingte Zeitdilatation gefolgert, deren geringe Wirkung auf der Erde an alltäglichen Beispielen vermittelt wird. Die Berücksichtigung des Effekts im GPS wird erwähnt. Da die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als Prinzip beibehalten wird, muss beim Auftreten der Zeitdilatation auch die Laufstrecke des Lichts kürzer werden. Im Trick wird gezeigt, wie Längenmaßstäbe daher in der Nähe unserer Erde kürzer erscheinen, als sie ohne Einfluss der Gravitation wären. Die Krümmung des Raumes unter dem Einfluss der Erde wird durch die Ausbeulung einer zunächst flachen Ebene dargestellt. Eine Animation zeigt an dieser gekrümmten Ebene, dass die Kreisbewegung eines Satelliten um die Erde entlang einer Geodäte eine Folge des gekrümmten Raumes ist. Ausgehend von der Vorstellung der Raumzeitkrümmung schildert der Film, wie dadurch die Perihelverschiebung der Merkurbahn und die Lichtablenkung durch die Sonnenmasse erklärt werden konnten. Die vollständige Abkapselung eines Schwarzen Lochs von der übrigen Raumzeit wird anhand des zweidimensionalen Raummodells anschaulich demonstriert und gibt einen Ausblick in die Aspekte der Kosmologie, deren Grundlage die allgemeine Relativitätstheorie bildet.

## Ergänzende Informationen

### Die Prinzipien der allgemeinen Relativitätstheorie

Alle Effekte der speziellen Relativitätstheorie leitete Albert Einstein grundsätzlich aus zwei Annahmen ab, die inzwischen als unumstößliche Tatsachen angesehen werden. Die beiden Annahmen lassen sich z. B. folgendermaßen formulieren:

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.

Doch der Gültigkeitsbereich des Relativitätsprinzips war zunächst auf Inertialsysteme begrenzt, die genau genommen in einem Universum mit Gravitationskräften gar nicht existieren. Das heißt, dass Einsteins spezielle Relativitätstheorie nur in dem besonderen Fall zur Beschreibung von Raum und Zeit geeignet ist, wenn die einwirkenden Kräfte aus der Umgebung vernachlässigbar sind. Die Einschränkung war für Einstein der Anlass, 1907 nach einer Verallgemeinerung seiner Relativitätstheorie für ein Universum mit Gravitation zu suchen. Er erkannte früh, dass der durch die Gravitation verursachte freie Fall in einem ausreichend kleinen Bezugssystem den gleichen kräftefreien Zustand darstellt wie die absolute Schwerelosigkeit, die ein ideales Inertialsystem ist. Daraus ergab sich die Möglichkeit, die spezielle Relativitätstheorie auf die Bewegung von Bezugssystemen unter Einfluss der Schwerkraft zu übertragen. Einstein bezeichnete diesen Sachverhalt als Äquiva-

lenzprinzip der allgemeinen Relativitätstheorie. Es kann zum Beispiel folgendermaßen formuliert werden:

Jedes durch Gravitationseinwirkung freifallende hinreichend kleine Bezugssystem verhält sich genauso wie ein Inertialsystem, in dem keine Gravitationskräfte wirken. (Äquivalenzprinzip)

Eine weitere Art von Gleichwertigkeit bestand zwischen der Trägheit und der Schwere. Das Auftreten von Kräften kann nämlich sowohl durch einen Beschleunigungsvorgang als auch durch die Gravitation hervorgerufen werden. Dieser bedeutsame Umstand bestätigte Einstein darin, sein bisheriges Relativitätsprinzip auf beschleunigte Bezugssysteme zu erweitern:

Verspürt eine Person eine Kraft, ist sie grundsätzlich nicht in der Lage, eindeutig zu sagen, ob sie beschleunigt wird oder der Gravitation ausgesetzt ist.

Auch die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit sollte in beschleunigten Systemen gültig bleiben. Aus dem grundlegenden Erhalt der Prinzipien der speziellen Relativitätstheorie ergaben sich sofort neue ungewöhnliche Konsequenzen: Wenn eine Person aufgrund der Gravitation eine Kraft verspürt, die gleiche Wirkung aber auch bei einem Beschleunigungsvorgang erfahren könnte, so muss sie die gleiche Zeitdilatation wie eine Person in einem beschleunigt bewegten Bezugssystem erfahren. Folglich fließt die Zeit unter Gravitationseinfluss langsamer. Die gravitationsbedingte Zeitdilatation stellt deshalb auch keinen relativen sondern ein absoluten Effekt dar. Anders als in der speziellen Relativitätstheorie, gemäß der jeder Beobachter beim jeweils anderen die Zeitdilatation bemerkt, wirkt die gravitationsbedingte Zeitdilatation in der allgemeinen Relativitätstheorie eindeutig bei demjenigen, der eine Kraft verspürt.

Eine weitere Folgerung ist, dass auch Licht der Gravitationswirkung unterliegen muss, obwohl es keine Ruhemasse besitzt. Um dies plausibel zu machen bedient man sich wieder eines Gedankenexperiments: Eine Person stürzt im freien Fall zur Erde und sendet senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung einen Lichtstrahl aus. Aus der Sicht der Person bewegt sich der Lichtstrahl geradlinig, da er sich in einem kräftefreien Inertialsystem befindet. Von der Erde aus betrachtet muss sich daher der Lichtstrahl mit der fallenden Person zur Erde und zugleich von der Person weg bewegen. Dies ergibt eine gekrümmte Bahnkurve, die ein Beobachter auf der Erde als Ablenkung des Lichtstrahls durch die Gravitation deutet. Die Ablenkung der masselosen Photonen in der Nähe großer Massen war bereits ein Indiz für die Unzulänglichkeit von Newtons Gravitationstheorie und zugleich ein Hinweis auf die Ursache der Ablenkung durch die Raumkrümmung, auf die Albert Einstein noch stoßen sollte.

### Die Raumzeit als absolutes Gebilde in der Relativitätstheorie

In einem dreidimensionalen Raum kann jeder beliebige Punkt durch die Angabe von drei Koordinaten festgelegt werden. Man erreicht einen bestimmten Ort dadurch, dass man sich nacheinander jeweils parallel zu den Koordinatenachsen um eine bestimmte Zahl an Längeneinheiten bewegt. Die Koordinaten des Punktes und somit auch der Weg dorthin hängen jedoch stark von der Art des Koordinatensystems ab. In einem Koordinatensystem, dessen Achsen gegeneinander verdreht werden, ergeben sich ganz andere Koordinaten für den selben Punkt. Nur der Abstand zweier Punkte bleibt unabhängig von der Wahl des Koordinatensystems immer gleich. Eine ähnliche Entdeckung machte 1908 der russische Mathematiker Her-

mann Minkowski, als er unseren dreidimensionalen Raum und die Zeit zu einer vierdimensionalen Raumzeit zusammenfasste und darin eine Metrik einführte. So wie zwischen zwei Punkten in der Ebene der Abstand als kürzeste Verbindung existiert, gibt es auch zwischen zwei Ereignissen in der Raumzeit eine absolute Entfernung. In Koordinaten ausgedrückt lautet sie:  $d^2 = |(c\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2|$ . Im Gegensatz zu der bekannten Abstandsdefinition im dreidimensionalen Raum ist es in der Raumzeit möglich, dass der „Raum-Zeit-Abstand“ verschwinden kann, selbst wenn die Raum- und Zeitintervalle von Null verschieden sind. Das ist der Fall, wenn  $(c\Delta t)^2 = (\Delta r)^2$  gilt, was bei der Ausbreitung von Licht erfüllt ist. In dem für uns sichtbaren dreidimensionalen Raum ist der Abstand von Punkten entlang des Lichtstrahls zwar ungleich Null. Könnten wir uns aber auf dem Lichtstrahl durch den Raum bewegen, so würde die Zeit stillstehen und sich der Raum in Bewegungsrichtung kontrahieren, sodass der Abstand dieser Punkte in der Raumzeit Null wird. Folgendes Beispiel soll die Abstandsdefinition von Minkowski etwas näher erläutern (Dieses Beispiel stammt in leicht abgewandelter Form aus dem Buch von Harald Fritsch, welches im Literaturverzeichnis aufgeführt ist.): Wir betrachten das Ereignis Christi Geburt auf der Erde und eine Sonneneruption auf dem etwa 6 Lichtjahre entfernten Stern Barnard im Jahre 10 n. Chr. (Erdzeit). Im System Erde beträgt der Abstand zwischen den Ereignissen  $d^2 = |(10Lj)^2 - (6Lj)^2| = (8Lj)^2$ . Ein Raumschiff fliegt zu Christi Geburt an der Erde vorbei und erreicht Barnards Stern genau zum Zeitpunkt der Eruption. Dazu muss es mit 60 % der Lichtgeschwindigkeit fliegen. Aufgrund der Zeitdilatation ergibt sich im Raumschiffsystem eine Flugzeit von 8 Jahren. Im Raumschiffsystem ist außerdem die Differenz der Abstände Raumschiff-Erde und

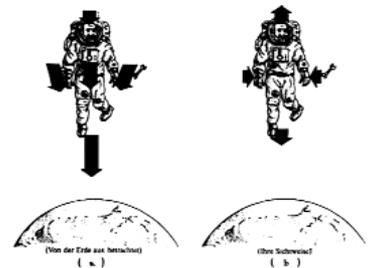
Raumschiff-Stern gleich Null, da es sich zu den beiden genannten Zeitpunkten jeweils am anderen Ort befindet. Im Raumschiffsystem gilt also  $d^2 = |(8Lj)^2 - 0^2| = (8Lj)^2$ . Der Abstand zweier Ereignisse in der Raumzeit ist also in einem ruhenden wie in einem bewegten Koordinatensystem gleich. Einstein, der von der Leistung seines ehemaligen Mathematikprofessor Minkowski nicht sehr beeindruckt war, empfand die Darstellung der Raumzeit eher als Verschleierung der zugrundeliegenden physikalischen Idee seiner Relativitätstheorie. Doch er musste bei der Eingliederung der Gravitation in die Relativitätstheorie bald einsehen, dass die Raumzeit eine wichtige Voraussetzung darstellt, um die allgemeine Relativitätstheorie zu formulieren.

### Die Krümmung der Raumzeit als neue Theorie der Gravitation

Bereits zu Beginn der Entwicklung seiner allgemeinen Relativitätstheorie war sich Einstein sicher, dass sich Newtons Gravitationsgesetz als nicht ganz korrekt herausstellen würde. Seine Argumentation lautete folgendermaßen: Von einem bewegten Bezugssystem aus betrachtet werden Abstände aufgrund der Längenkontraktion in Bewegungsrichtung verkürzt. Da die Massenanziehungskraft zweier Körper aber von der gegenseitigen Entfernung abhängt, würde die Gravitationskraft in unterschiedlichen Bezugssystemen verschieden groß ausfallen. Das widersprach dem Relativitätsprinzip, gemäß dem kein Inertialsystem gegenüber einem anderen ausgezeichnet ist.

Die Suche nach einer neuen Theorie der Gravitation im Jahre 1908 gestaltete sich zunächst so wenig erfolgreich, dass Albert Einstein die Arbeit daran für einige Jahre aufgab. Dies lag in erster Linie an der äußerst komplizierten mathematischen Struktur, die sich hinter seiner Theorie verbirgt. Bis sich

Einstein wieder mit der allgemeinen Relativitätstheorie beschäftigen konnte, sollten noch drei Jahre vergehen. In dieser Zeit holte er sich mathematischen Rat von seinem Freund, dem Mathematiker Marcel Grossmann. Schließlich begann er im Sommer 1911 erneut, sich mit der Formulierung eines Gravitationsgesetzes zu beschäftigen. Dabei konzentrierte er sich auf die sogenannten Gezeiteneffekte der Gravitation. Bei der Aufstellung des Äquivalenzprinzips hatte Einstein diese Effekte vernachlässigt, indem er hinreichend kleine, frei fallende Bezugssysteme mit kräftefreien Inertialsystemen verglich. Ein frei fallender Körper spürt nämlich aufgrund seiner räumlichen Ausdehnung an jeder Stelle eine unterschiedliche Gravitationskraft in Betrag und Richtung. Im Bezugssystem des frei fallenden Körpers entstehen so Kräfte, die den Körper in Bewegungsrichtung dehnen und quer dazu stauchen. Das bedeutet aber, dass für ausgedehnte frei fallende Bezugssysteme das Äquivalenzprinzip nicht mehr gültig ist. Der



Film veranschaulicht diese Gezeitenkräfte durch die geringfügig unterschiedliche Bewegung zweier Bälle, die in einem Raumschiff die Erde umkreisen. Nach erfolglosen Versuchen, diese Gezeiteneffekte ausschließlich durch die gravitationsbedingte Zeitdilatation zu erklären, gelangte Einstein zu der Einsicht, dass die Gezeitenkräfte nur durch die zusätzliche Annahme einer Raumverzerrung beschreibbar waren. Damit hatte Einstein die wohl erstaunlichste Aussage der Relativitätstheorie entdeckt. Raum und Zeit werden also durch die Masse und Energie, die sich selbst darin befinden, verformt. Unser Raum ist deshalb nicht als Leere auf-

zufassen, sondern besitzt eine eigene Struktur, die von der Massenverteilung und Energiedichte geformt wird. Ähnlich wie die Zeitdilatation hängt auch die Form der Raumkrümmung von der Wahl des Bezugssystems ab, so dass es unendlich viele Sichtweisen unseres Raums und der Zeit gibt. Nur die Kombination aus Raum und Zeit zur vierdimensionalen Minkowskischen Raumzeit, besitzt eine absolute Krümmung und erlaubt eine vom Beobachter unabhängige Darstellung von Zeit und Raum. Im Jahr 1915 gelang es Einstein endlich mit der Unterstützung des berühmten Göttinger Mathematikers David Hilbert, die Krümmung der Raumzeit abhängig von der Massen- und Energiedichte in Form einer Feldgleichung zu beschreiben. An die Stelle der Newtonschen Gravitationskraft trat nun die Krümmung als Ursache, dass sich Körper in der Nähe von großen Massen nicht geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit bewegen. Nach Einsteins Vorstellung bewegen sie sich entlang sogenannter Geodäten, die in der gekrümmten Raumzeit die kürzeste Strecke darstellen. Die Bahnkurve, die wir im Raum beobachten können, stellt dabei nur die dreidimensionale Projektion der Geodäte aus der vierdimensionalen Raumzeit dar, die wir nicht erfassen können.

Mit der Erschaffung der allgemeinen Relativitätstheorie hat Albert Einstein die moderne Physik revolutioniert. Seine Theorie der Gravitation ist neben der Quantentheorie die zweite große Säule der modernen Physik, auf die sich die Forschungen im Bereich der Kosmologie stützen. *Stephen Hawking* und andere führende Physiker versuchen nun, Einsteins Werk weiterzuführen und diese beiden großen Theorien zu einer vereinheitlichten Theorie der Physik zusammenzufügen, die vielleicht die Gestalt unseres Universums und seinen Ursprung erklären könnte.

## Die Verwendung der Relativitätstheorie im GPS-System:

Eine erfolgreiche Anwendung der Relativitätstheorie in der Technik, die auch im Film Erwähnung findet, ist das Global Positioning System (GPS). Ein GPS-Taschenmessgerät ist heutzutage fast schon ein Alltagsgegenstand. Auch die Verwendung des GPS als Navigationshilfe im Auto dürften viele Schüler bereits kennen. Ein GPS-Gerät empfängt und verarbeitet Signale, die von bis zu 24 geostationären Satelliten ausgesandt werden. Mindestens vier Satelliten sind nötig, um die Position und Höhe über dem Meeresspiegel des Benutzers je nach technischer Ausführung auf bis zu 10 cm genau ablesen zu können. Diese faszinierende Genauigkeit ist jedoch nur möglich, weil die Effekte der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie bei der Berechnung mitberücksichtigt sind. Es handelt sich also um ein Gerät, dessen weltweiter Nutzen erst durch Einsteins Werk möglich wurde.

## Zum Einsatz im Unterricht

### Fragen zum Film:

1. Welche besonderen Effekte entdeckte Albert Einstein in seiner speziellen Relativitätstheorie bei schnellen Bewegungen im Bereich der Lichtgeschwindigkeit?
2. Welche Eigenschaft zeichnet ein Inertialsystem aus? Warum gibt es in unserem Universum kein ideales Inertialsystem?
3. Welche wesensverwandten Zustände erkannte Einstein bei der Betrachtung von Schwerelosigkeit und Schwerkraft?
4. Welche Schlussfolgerungen zog Einstein aus dieser Analogie?
5. Welche Konsequenz ergibt sich aus der Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit auch unter Einfluss der Gravitation konstant bleibt?

6. Durch welches Modell können wir uns die Krümmung der vierdimensionalen Raumzeit veranschaulichen?
7. Warum bewegt sich nach Newtons Gravitationstheorie ein Satellit auf einer Kreisbahn um die Erde? Wie erklärt Einsteins allgemeine Relativitätstheorie diese Bewegung?
8. Welche zwei astronomischen Effekte konnte Einstein mit Hilfe seiner Theorie erklären?

### 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.

### Literatur

Thorne Kip S.: Gekrümmter Raum und verbogene Zeit, Bechtermünz Verlag, Augsburg, 1999

Ein Buch, das sich ausführlich mit der allgemeinen Relativitätstheorie und ihrer Anwendung in der Astrophysik insbesondere mit Schwarzen Löchern auseinandersetzt. Dabei wird auch ausführlich auf die geschichtliche Entwicklung der Relativitätstheorie eingegangen.

Hawking Stephen: Eine kurze Geschichte der Zeit, Rowohlt Verlag, Reinbek, 1988 und 1997 (erweiterte Ausgabe)

Das Buch vermittelt auf anschauliche und unterhaltsame Weise die Entwicklung der Kosmologie von der Vergangenheit bis zur Gegenwart und widmet sich dabei auch Einsteins Theorie von Raum und Zeit, Schwarzen Löchern, der Möglichkeit von Zeitreisen und der Vereinheitlichung der Physik.

### 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](mailto:info@fwu.de)  
[vertrieb@fwu.de](mailto: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](mailto: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](mailto:vertrieb@fwu.de)**

Laufzeit: 24 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/ genehmigte  
Nutzungen werden zivil- und/oder  
strafrechtlich verfolgt.

**LEHR-  
Programm  
gemäß  
§ 14 JuSchG**

## FWU - Schule und Unterricht

- VHS 42 10444
- DVD-VIDEO 46 10444
- ■ Paket 50 10444 (VHS 42 10444 + DVD 46 10444)

24 min, Farbe

### Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie

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 dritte Teil der dreiteiligen Serie zur Relativitätstheorie stellt anhand von Realaufnahmen und zahlreichen Animationen die faszinierenden Aussagen der allgemeinen Relativitätstheorie vor. Masse und Energie krümmen Raum und Zeit und beeinflussen so die Bewegung von Körpern.

### Schlagwörter

Lichtgeschwindigkeit, Zeitdilatation, Längenkontraktion, relativistische Massenzunahme, Inertialsystem, Gravitation, Trägheit, Raumzeit, Raumzeitkrümmung, Periheldrehung des Merkurs, Schwarzes Loch

### Physik

Relativitätstheorie - Astronomie - Astrophysik, Geophysik - Weltraumfahrt

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 10443/46 10443/50 10443 Albert Einsteins spezielle Relativitätstheorie Teil 2. VHS/DVD-VIDEO, 17 min, f