

## Spezielle Relativitätstheorie in Kontexten

Matthias Borchardt, Bonn

Zeitdilatation, Massenzunahme, Grenzggeschwindigkeit – die Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie scheinen absurd. Sie widersprechen dem gesunden Menschenverstand.

In diesem Beitrag

- lernen Ihre Schüler historisch wichtige Bestätigungsexperimente dieser Theorie kennen,
- erfahren, warum die moderne Satellitennavigation (GPS) ohne Einbeziehung der Relativitätstheorie nicht funktionieren würde,

und

- beschäftigen sich mit der Frage, wie Zeitreisen in die Zukunft möglich sein könnten.



GPS-Satelliten umkreisen die Erde.

© ESA

Zeigen Sie einen Film<sup>1</sup>  
zum Myonenexperiment von  
Frisch & Smith!

II/G

### Der Beitrag im Überblick

**Klasse:** 12

**Dauer:** 2–14 Stunden

**Ihr Plus:**

- ✓ Eine große Spannweite verschiedenster Aspekte zur SRT
- ✓ Materialien unabhängig voneinander einsetzbar
- ✓ Computersimulation

**Inhalt:**

- Vier wissenschaftshistorisch bedeutungsvolle **Experimente** zur Bestätigung der Zeitdilatation, Grenzggeschwindigkeit und Massenzunahme
- GPS und Relativitätstheorie
- Zeitdilatation im Science-Fiction-Genre
- Relativistisches Sehen

<sup>1</sup> [www.scivee.tv/node/2415](http://www.scivee.tv/node/2415)

Zahlenformate von 15 Dezimalstellen und mehr zu verarbeiten. Ermöglichen Sie Ihren Schülern daher auch für diese Aufgaben die Benutzung von Computern. Bei allen übrigen Arbeitsblättern kommt man ohne Computer aus – es sei denn, Sie wollen Ihren Schülern die Möglichkeit geben, ihre Lösungen und Protokolle direkt in digitaler Form einzugeben.

### Bezug zu den Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz

Allg. physikalische Kompetenz	Inhaltsbezogene Kompetenzen Die Schüler ...	Anforderungsbereich
B 4, B 2, E 10, F 4	... lernen wissenschaftshistorisch wichtige Experimente zur Betätigung der SRT kennen ( <b>M 1–M 5</b> ),	I, II
E 10, K 2	...erfahren, dass die SRT für die moderne Alltagswelt wichtig geworden ist (GPS) ( <b>M 6</b> ),	II
F 1, F 4, K 1, B 2	... erkennen, dass die Effekte der SRT nur sichtbar werden, wenn man sich an der Grenze der Lichtgeschwindigkeit befindet oder wenn man hochpräzise Messgeräte (Atomuhren) verwendet,	I, II
F 1, F 2, F 3, F 4, E 2, E 4,	... üben die Anwendung der Formeln für <ul style="list-style-type: none"> <li>– Zeitdilatation,</li> <li>– Lorentzkontraktion,</li> <li>– Massenzunahme und</li> <li>– relativistische Energie,</li> </ul>	II, III
F1, F2, F3, F4	... wiederholen Unterrichtsinhalte wie Zerfallsgesetz ( <b>M 1</b> ) und Wien'schen Geschwindigkeitsfilter ( <b>M 3</b> ),	I, II
F 4, E 2, E 4, E 9, E 10, K 5, K 6	... lernen und üben den Umgang mit Tabellenkalkulationsprogrammen ( <b>M 2, M 6</b> ),	I, II
F 4, F 5, E 9, E 10, K 7	... werten experimentelle Daten aus und interpretieren die Ergebnisse mit Hinblick auf die Erwartungen ( <b>M 4</b> ),	II, III
F 2, F 4, K 7, B 4	...erfahren, wie die Effekte der SRT die Fantasie anregen und spannende mediale Umsetzungen hervorbringen können ( <b>M 7–M 9</b> ).	II

Für welche Kompetenzen und Anforderungsbereiche die Abkürzungen stehen, finden Sie auf der beiliegenden CD-ROM 33.

## M 1 Berg und Tal – das Myonenexperiment von Frisch und Smith

Kosmische Strahlung besteht zu einem großen Teil aus hochenergetischen Protonen. Treffen diese auf die Luftmoleküle der oberen Atmosphärenschichten, entstehen Pionen ( $\pi$ -Mesonen), die in einer Höhe von 10 bis 12 km über dem Erdboden nach sehr kurzer Zeit in Myonen zerfallen. Diese Myonen bewegen sich mit fast Lichtgeschwindigkeit in Richtung Erde. Myonen weisen Ähnlichkeiten mit Elektronen auf, sind aber rund 200-mal schwerer als diese und nicht stabil. Es ist bekannt, dass (ruhende) Myonen eine Halbwertszeit von  $1,52\ \mu\text{s}$  haben.

### Aufgabe 1

Bestätigen Sie die folgende Aussage durch Rechnung:

Wenn wir von einer Halbwertszeit von  $T_H = 1,52\ \mu\text{s}$  ausgehen, dann beträgt die „Halbwertslänge“, also die Strecke, nach der die Hälfte der Myonen zerfallen ist, ungefähr  $L_H = 456\ \text{m}$ .

#### Tipp

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beträgt  $3 \cdot 10^8\ \text{m/s}$ . Rechnen Sie mit diesem Wert.

Wenn bereits nach einem halben Kilometer mehr als die Hälfte der Myonen zerfallen ist, dann dürften nach einer Flugstrecke von über 10 km kaum noch Myonen auf dem Erdboden ankommen. Messungen auf Meeresebene führen allerdings zu einem **völlig anderen Ergebnis** – die Zählraten für die aus der Hochatmosphäre stammenden Myonen sind deutlich höher als erwartet. Dieses erstaunliche Phänomen wurde schon bald nach seiner Entdeckung mit der Relativitätstheorie Albert Einsteins in Verbindung gebracht. Man stellte die Hypothese auf, dass sich die Lebensdauer der Myonen aufgrund ihrer extrem hohen Geschwindigkeit verlängert haben könnte – die innere Uhr der bewegten Myonen ticke wegen der Zeitdilatation langsamer als bei ruhenden Myonen.

Eine erste experimentelle Bestätigung dieser Behauptung wurde 1941 von den Physikern **B. Rossi** und **D. Hall** erbracht, die die Zählraten von Myonen in großer Höhe (Echo Lake in der Nähe von Denver, Colorado) mit der im 1624 m tiefer gelegenen Denver verglichen.<sup>1</sup>

### Das Experiment von Frisch und Smith (1963)

Präzisere und besser nachvollziehbare Messungen wurden 1963 von **David Frisch** und **James Smith** durchgeführt. Sie bestimmten experimentell die Anzahl der Myonen in der Nähe des Gipfels des Mount Washington und in der 1907 m tiefer gelegenen Stadt Cambridge (Massachusetts).

Diese Messungen sind Grundlage für die folgenden Aufgaben.



Mount Washington (New Hampshire)

<sup>1</sup> Rossi, Bruno; Hall, David B.: Variation of the Rate of Decay of Mesotrons with Momentum. Phys. Rev. 1941 (59) S. 223–228

**Problem 2:**

Die Gravitation beeinflusst ebenfalls den Gang von Uhren. Diese Erkenntnis stammt aus der Allgemeinen Relativitätstheorie, die Albert Einstein 1915 veröffentlichte.

Dabei gilt: Je stärker die Gravitation – desto langsamer läuft die Uhr.

Für das Flugzeugexperiment bedeutet das:

Die Uhr im Flugzeug ist weiter vom Erdmittelpunkt entfernt und geht daher, im Gegensatz zur geschwindigkeitsbedingten Zeitdehnung, schneller als die Erduhr. Dieser Effekt ist für einen West- und Ostflug gleich. Die Formel, mit der sich diese gravitative Zeitraffung berechnen lässt, lautet:

$$\Delta t_{\text{grav}} = t_R \cdot \frac{g \cdot \Delta h}{c^2},$$

wobei  $\Delta h$  der Höhenunterschied der beiden Uhren und  $g$  die Erdbeschleunigung ist.

**Aufgaben – Fortsetzung**

- Nehmen Sie an, dass sich das Flugzeug in einer Höhe von 10 km bewegt. Berechnen Sie den Gangunterschied der Uhren aufgrund der Gravitation für die Dauer einer Erdumrundung und geben Sie das Ergebnis in Nanosekunden an.
- Geben Sie nun die resultierende Zeitdifferenz der Uhren

$$\Delta t_{\text{res}} = \Delta t_v + \Delta t_{\text{grav}}$$

für eine komplette Westumrundung und für eine komplette Ostumrundung der Erde unter Berücksichtigung der geschwindigkeitsbedingten und der gravitativen Zeiteffekte an.

**Die Messungen:**

Als Sie bei den obigen Aufgaben die Zeitdifferenzen berechnet haben, sind Sie davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit des Flugzeugs und die Flughöhe während der Erdumrundungen konstant bleiben. Dies war bei dem Experiment von Hafele und Keating aber keineswegs der Fall. Das Flugzeug, das die beiden Forscher benutzen, absolvierte normale Linienflüge mit Zwischenlandungen und Pausen. Um die Zeitdifferenz der Uhren mithilfe der Formeln der Relativitätstheorie vorhersagen zu können, verwendeten die Forscher daher die von den Piloten aufgezeichneten Informationen über Position, Geschwindigkeit und Höhe des Flugzeugs. Die Endergebnisse entstanden durch mühsames Aufaddieren der vielen Zeitverschiebungsintervalle. Diese nach der Relativitätstheorie zu erwartenden Ergebnisse lauteten (die Fehler entstehen durch die natürlichen Gangunsicherheiten der Atomuhren und die Messfehler in den Aufzeichnungen der Piloten):

**Westflug:**  $\Delta t_{\text{gesamt}} = 275 \pm 21 \text{ ns}$ ,

**Ostflug:**  $\Delta t_{\text{gesamt}} = -40 \pm 23 \text{ ns}$

Die an den vier Flugzeug-Atomuhren abgelesenen und gemittelten Ergebnisse lauteten:

**Westflug:**  $\Delta t_{\text{gesamt}} = 273 \pm 7 \text{ ns}$ ,

**Ostflug:**  $\Delta t_{\text{gesamt}} = -59 \pm 10 \text{ ns}$

- Vergleichen Sie die Messergebnisse der Atomuhren mit den von Hafele und Keating theoretisch vorhergesagten Werten. Äußern Sie sich zu der Frage, inwieweit die beiden Forscher mit ihrem Experiment erfolgreich waren.