LEHRERINFO ZUM VIDEO

Relativitätstheorie – Wenn Zeit und Raum sich dehnen

FACH	STUFE	DAUER	VIDEO
Physik	Gymnasium · Sek II (Matura/Abitur)	15 min	youtube.com/@Erklaerbaer

01 Lernziele

Nach dem Video können die Schülerinnen und Schüler …

- die beiden Postulate der speziellen Relativitätstheorie nennen und mit dem Michelson-Morley-Experiment begründen,
- die Relativität der Gleichzeitigkeit an einem Gedankenexperiment erklären,
- den Lorentzfaktor mit der Lichtuhr herleiten und die Zeitdilatation $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$ berechnen,
- die Längenkontraktion $l = l_0/\gamma$ berechnen und richtig zuordnen,
- $E = m \cdot c^2$ anwenden,
- die Rolle der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie für GPS erklären.

02 Voraussetzungen

Folge 11 Grundlagen („Das Weltall“): Lichtgeschwindigkeit, Lichtjahr. Folge 1 Advanced: Bezugssystem, $v = s/t$. Folge 5 Advanced: Energie. Mathematisch: Pythagoras, Wurzeln, Zehnerpotenzen, Gleichungen umformen.

03 Ablauf des Videos

ZEIT	KAPITEL	INHALT UND PRAXISBEISPIEL
0:00	Einstieg	GPS ohne Relativität ≈ 10 km pro Tag daneben · Ident · Serien-Fahrplan
0:55	Was du brauchst	$c \approx 300\,000$ km/s · Bezugssystem · $v = s/t$, Pythagoras
1:33	Das Problem mit dem Licht	Ball im Zug · Michelson-Morley 1887 · Postulate 1905 · Merksatz

2:44	Gleichzeitigkeit ist relativ	Zug mit zwei Blitzen, Anna und Ben · keine absolute Zeit
3:46	Die Lichtuhr	$\Delta t_0 = 2d/c$ · Zickzack · Pythagoras → γ · $\gamma(0{,}6\,c) = 1{,}25$, $\gamma(0{,}8\,c) = 1{,}67$, $\gamma(0{,}99\,c) = 7{,}1$
5:19	Zeitdilatation	Merksatz · Myonen 660 m / 6,6 km · Hafele-Keating 1971 PAUSE-FRAGE $\gamma = 2 \rightarrow 0{,}87\,c$
6:49	Längenkontraktion	Myonen-Sicht 1,5 km · 100 m → 60 m PAUSE-FRAGE 6 Lj mit 0,6 c: 10 / 8 Jahre · Zwillingsparadoxon · $0{,}6\,c \oplus 0{,}6\,c \approx 0{,}88\,c$
8:40	Masse ist Energie	$E = m \cdot c^2$ (Merksatz) · 1 g = 25 GWh · Sonne 4 Mio. t/s · Kernkraftwerk · CERN $\gamma \approx 7000$ · c unerreichbar
10:08	Schwerkraft, Zeit und GPS	allgemeine RT 1915 · Atomuhren 33 cm (2010) · GPS −7 + 45 = 38 µs pro Tag ≈ 11 km
11:38	Prüfungsfallen	vier Fallen (siehe 04)
12:21	Zusammenfassung	fünf Kernaussagen · Auflösung des Einstiegs
12:57	Quiz	4 Fragen · Endkarte Folge 12 Advanced

04 Typische Fehlvorstellungen und Prüfungsfallen

- „Bewegte Uhren gehen schneller." – langsamer; $\gamma \geq 1$ (Kapitel 5, 9).
- Eigenzeit falsch zugeordnet – Δt_0 ist die Zeit im Ruhesystem der Uhr, die kürzere (Kapitel 4, 9).
- „Längenkontraktion in alle Richtungen." – nur in Bewegungsrichtung (Kapitel 6, 9).
- Geschwindigkeiten klassisch addiert ($0{,}6\,c + 0{,}6\,c = 1{,}2\,c$) – relativistisch ≈ $0{,}88\,c$ (Kapitel 6, 9).
- „Die Relativität der Gleichzeitigkeit ist eine Täuschung durch die Laufzeit des Lichts." – Sie bleibt, auch wenn man die Laufzeit herausrechnet (Kapitel 3).

05 Einsatz im Unterricht

Einstieg: Frage: „Wie genau muss eine GPS-Uhr gehen, damit der Fehler unter 10 m bleibt?" (Antwort: ≈ 33 ns).

Übung: Aufgaben 2–10 des Arbeitsblatts.

Vertiefung: Lichtuhr selbst herleiten lassen; Myonen-Rechnung mit eigenen Zahlen; Zwillingsparadoxon als Raumzeit-Diagramm.

Prüfungsvorbereitung: Kapitel 9 und das Arbeitsblatt (Aufgaben im Stil von Matura-/Abiturprüfungen).

Hinweis: Die Myonen-Rechnung ist vereinfacht (einheitliche Geschwindigkeit, mittlere Lebensdauer, Entstehung in 15 km Höhe). Die GPS-Werte sind gerundet (+45,7 µs und −7,2 µs pro Tag). Das Zwillingsparadoxon wird ohne Beschleunigungsphasen gerechnet.

06 Quellen

- Michelson, A. A. & Morley, E. W. (1887): On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. American Journal of Science 34
- Einstein, A. (1905): Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik 17 · Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? Annalen der Physik 18
- Hafele, J. C. & Keating, R. E. (1972): Around-the-World Atomic Clocks. Science 177
- Chou, C. W. et al. (2010): Optical Clocks and Relativity. Science 329 (33 cm Höhenunterschied)
- Ashby, N. (2003): Relativity in the Global Positioning System. Living Reviews in Relativity 6
- EDK: Rahmenlehrplan für die Maturitätsschulen (Physik) · KMK: Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife (2020)

NAME _____ KLASSE _____ DATUM _____

Relativitätstheorie – Wenn Zeit und Raum sich dehnen

$c = 3 \cdot 10^8$ m/s · $\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$ · 1 Jahr ≈ $3{,}15 \cdot 10^7$ s.

1 Postulate ●○○

Formuliere Einsteins zwei Postulate. Welches Experiment stützt das zweite?

2 Lorentzfaktor ●○○

Berechne γ für v = 0,5 c, 0,9 c und 0,999 c.

3 Lichtuhr ●●●

Leite mit der Lichtuhr und dem Satz des Pythagoras die Formel $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$ her.

4 Myonen ●●○

Myonen (mittlere Lebensdauer 2,2 µs) fliegen mit 0,98 c. Wie weit kommen sie im Mittel ohne und mit Zeitdilatation?

5 Längenkontraktion ●●○

Ein Zug ist in Ruhe 200 m lang. Wie lang erscheint er bei 0,6 c? Ändert sich seine Höhe?

6 Sternreise ●●●

Ein Raumschiff fliegt mit 0,9 **c** zu Proxima Centauri (4,2 Lichtjahre). Wie lange dauert der Flug für die Erde und für die Crew?

7 Geschwindigkeiten addieren ●●○

Ein Raumschiff fliegt mit 0,8 **c** und schiesst nach vorne eine Sonde mit 0,5 **c** (relativ zum Schiff). Wie schnell ist die Sonde von der Erde aus? Formel: $u = (u_1 + u_2)/(1 + u_1 u_2/c^2)$.

8 E = m·c² ●●○

Die Sonne strahlt $3{,}8 \cdot 10^{26}$ W ab. Wie viel Masse verliert sie pro Sekunde?

9 GPS ●●○

Wie gross wäre der Positionsfehler nach einer Stunde, wenn die Satellitenuhren um 38 µs pro Tag vorgehen und niemand korrigiert?

10 Gleichzeitigkeit ●●●

Erkläre in eigenen Worten, warum Anna im Zug den vorderen Blitz für früher hält, obwohl er für Ben gleichzeitig mit dem hinteren war.

11 Quiz aus dem Video – kreuze an ●○○

a) bewegte Uhr ☐ schneller ☐ gleich ☐ langsamer

b) γ bei 0,6 c ☐ 0,8 ☐ 1,25 ☐ 1,6

c) Energie in 1 g ☐ 9 J ☐ $9 \cdot 10^6$ J ☐ $9 \cdot 10^{13}$ J

d) GPS braucht RT, weil ☐ Erdrotation ☐ Uhren anders gehen ☐ Wolken

Lösungen

1 Postulate

1) Die Naturgesetze sind in jedem Inertialsystem gleich. 2) Licht ist im Vakuum in jedem Inertialsystem gleich schnell. Gestützt durch das Michelson-Morley-Experiment (1887).

2 Lorentzfaktor

0,5 c: 1,15 · 0,9 c: 2,29 · 0,999 c: 22,4

3 Lichtuhr

$(c\cdot\Delta t/2)^2 = (v\cdot\Delta t/2)^2 + d^2$ mit $d = c\cdot\Delta t_0/2 \rightarrow \Delta t^2(c^2 - v^2) = c^2\cdot\Delta t_0{}^2 \rightarrow \Delta t = \Delta t_0/\sqrt{(1 - v^2/c^2)} = \gamma\cdot\Delta t_0$

4 Myonen

ohne: $0{,}98 \cdot 3\cdot10^8 \cdot 2{,}2\cdot10^{-6} \approx 650$ m · $\gamma \approx 5{,}0 \rightarrow$ mit: ≈ 3,2 km

5 Längenkontraktion

$\gamma = 1{,}25 \rightarrow 200 : 1{,}25 = 160$ m · die Höhe bleibt gleich (quer zur Bewegung)

6 Sternreise

Erde: 4,2 : 0,9 ≈ 4,7 Jahre · $\gamma \approx 2{,}29 \rightarrow$ Crew: 4,7 : 2,29 ≈ 2,0 Jahre

7 Geschwindigkeiten

$(0{,}8 + 0{,}5)/(1 + 0{,}4)\ c = 1{,}3/1{,}4\ c \approx 0{,}93\ c$ – nicht 1,3 c

8 $E = m\cdot c^2$

$m = E/c^2 = 3{,}8\cdot10^{26} : 9\cdot10^{16} \approx 4{,}2\cdot10^9$ kg = 4,2 Millionen Tonnen pro Sekunde

9 GPS

38 µs : 24 ≈ 1,6 µs pro Stunde · $1{,}6\cdot10^{-6}$ s · $3\cdot10^8$ m/s ≈ 475 m

10 Gleichzeitigkeit

Anna bewegt sich auf den vorderen Blitz zu; dessen Licht erreicht sie zuerst. Da Licht für sie in beide Richtungen gleich schnell ist und beide Blitze gleich weit von ihr entfernt einschlugen, muss der vordere Blitz für sie früher gewesen sein.

11 Quiz

a) langsamer b) 1,25 c) $9\cdot10^{13}$ J d) Uhren gehen anders