Astronomie-AG, Dr. Hans-Otto Carmesin
**Kurzentwurf für eine Astronomiestunde**
**Thema der Unterrichtseinheit: SRT**
**Entdeckung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit**

**Didaktik**: KUZ: Die Schüler können die Konstanz begründen.

| Inhaltliche Aspekte | Verhaltensaspekte dazu |
|---|---|
| LV: Planetenbahn | Erläutern, Herleiten, Berechnen |
| TZ: Doppelstern W-UMa | Beschreiben |
| TZ: r, v, Δt | Berechnen |
| TZ: Lichtkurven, Simulation | Berechnen |
| TZ: Konstanz der Lichtgeschwindigkeit | Begründen |

**Methodik**: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

| Zeit | Didaktische Erläuterungen | Methodische Erläuterungen | Sozialform |
|---|---|---|---|
| 5 | Problemstellung: TA: Leitfrage | Lichtgeschwindigkeit konstant? | LSG |
| 15 | Problemanalyse: Ideen, s.u. | TA | LSG |
| 35 | Problemlösung 1: r, v, Δt berechnen | AB | GA |
| 45 | Sicherung 1: | SV, TA | SV |
| 70 | Problemlösung 2: Lichtkurven | Berechnen, Simulation, Programm | GA |
| 80 | Konstanz | Begründen | SSG |
| 90 | Sicherung 2: | SV, Projektor, TA | SV |

Geplantes Tafelbild

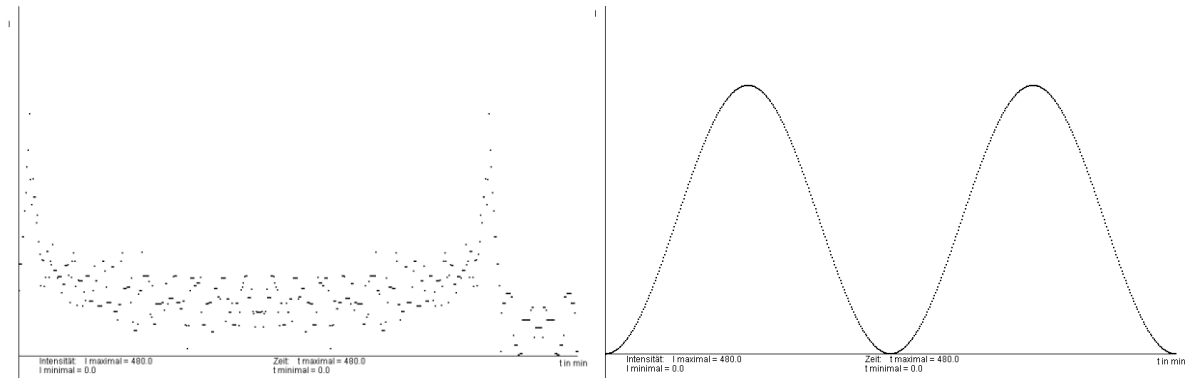
Sendet ein mit einer Geschwindigkeit v Licht mit der Geschwindigkeit v+c aus?

Ideen: Doppelstern, v berechnen, Lichtschwankung beobachten,
Lichtschwankung für c+v simulieren

Lösungen: Verdunklung durch Abschattung
Umlaufdauer T = 8 h
Radius: $F_z = F_G$

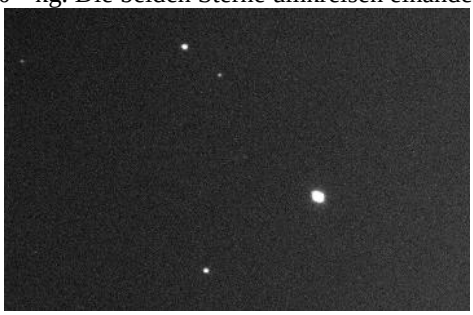
$M v^2 / r = M^2 G / d^2$ | $v = 2\pi r/T$ | : M
$4\pi^2 r/T^2 = M G / (4r^2)$ | auflösen
$r = [\ M G T^2 / (16 \pi^2)\ ]^{1/3} = 916\,863$ km

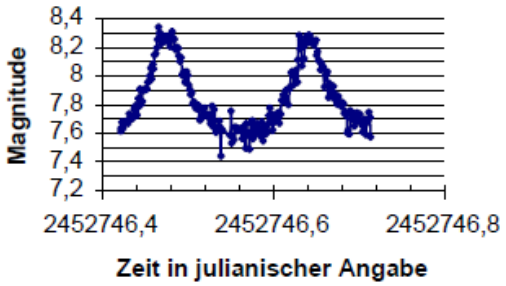
Geschwindigkeit: $v = 2\pi r/T = 200{,}029$ km/s
Bei der Geschwindigkeitsaddition (Galileitransformation) wäre:
Licht von Stern A: 300 200 km/s
Licht von Stern B: 299 800 km/s
Zeitdifferenz: $\Delta t = 161{,}7$ Ly / 299800 km/s – 161,7 Ly / 300 200 km/s = 78,75 Tage



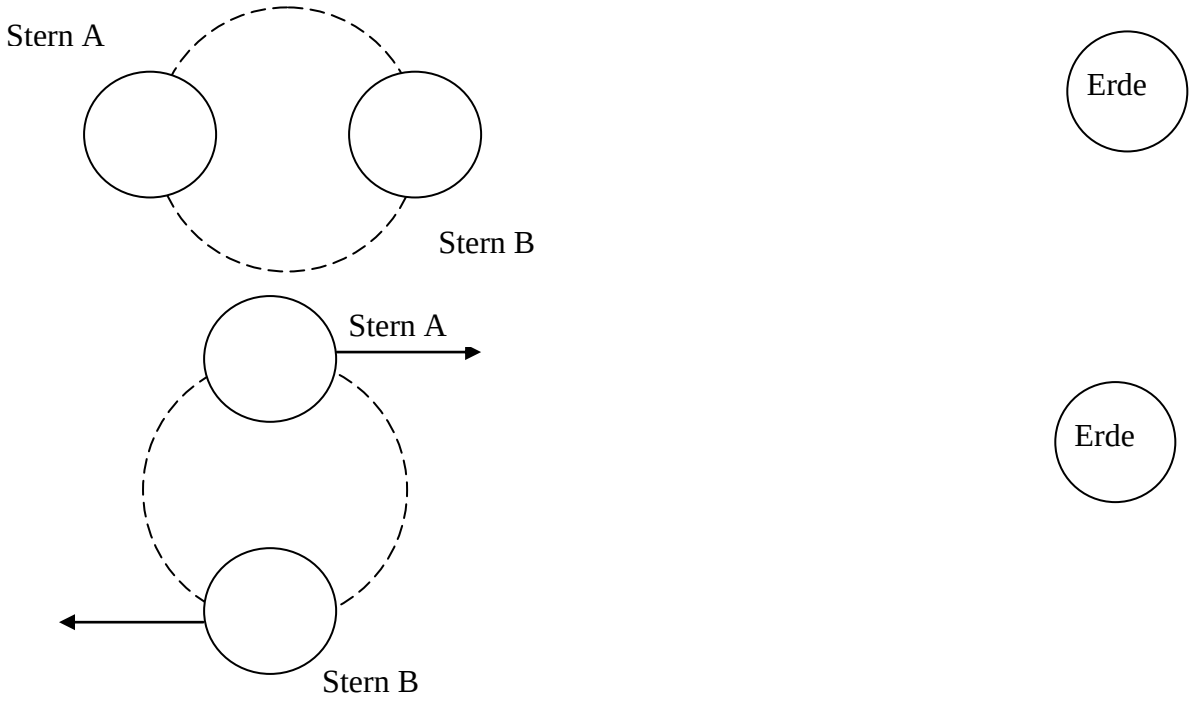

Ergebnis: Licht breitet sich immer mit der gleichen Geschwindigkeit c = 300 000 km/s aus. Das gilt auch, wenn die Lichtquelle sich sehr schnell bewegt. Denn das zeigt unsere Lichtkurve des Doppelsterns W UMa.

Der „Stern“ W Ursae Mayoris ist 161,7 Lichtjahre entfernt und besteht aus zwei Sternen mit jeweils der Masse $2{,}2 \cdot 10^{30}$ kg. Die beiden Sterne umkreisen einander und verdecken sich dabei gegenseitig, siehe Abbildung.






W UMa. Foto Sternwarte Athenaeum. Rechts: Lichtkurve. Periodendauer 8 h. Abstand der Maxima 4 h.




1. Erkläre die Verdunklung.
2. Bestimme die Umlaufzeit T.
3. Bestimme den Bahnradius r bei angenommener Kreisbahn.
4. Bestimme die Bahngeschwindigkeit v.
5. Bestimme die Geschwindigkeit des Lichts, das von Stern A zur Erde gesandt wird?
6. Um wie viel Zeit ist dieses Licht früher bei der Erde, als das Licht, das zur gleichen Zeit von Stern B aus zur Erde gesandt wird?

Lösungsskizze

Zu 1. T = 8 h

Zu 2.
$F_z = F_G$

$M v^2 / r = M^2 G / d^2$ | $v = 2\pi r/T$ | : M

$4\pi^2 r/T^2 = M G / (4r^2)$ | auflösen

$r = [ M G T^2 / (16 \pi^2) ]^{1/3} = 916\,863$ km

Zu 3.
$v = 2\pi r/T = 200{,}029$ km/s

Zu 4.
Bei der Galileitransformation:
Licht von Stern A: 300 200 km/s
Licht von Stern B: 299 800 km/s

Zu 5.
Zeitdifferenz:
$\Delta t = 161{,}7$ Ly / 299800 km/s – 161,7 Ly / 300 200 km/s
$\Delta t = 161{,}7$ Ly · 400 km/s / ( 299800 km/s · 300 200 km/s )
$\Delta t = 161{,}7$ Ly · 4 / ( 2998 · 300 200 km/s ) = 78,75 Tage

Die Periodizität von 8 h wäre gestört.

Astronomie-AG, Dr. Hans-Otto Carmesin
**Kurzentwurf für eine Astronomiestunde**
**Thema der Unterrichtseinheit: SRT**
**Entdeckung der Zeitdehnung im bewegten System**

**Didaktik**: KUZ: Die Schüler können die Zeitdehnung begründen.

| Inhaltliche Aspekte | Verhaltensaspekte dazu |
|---|---|
| LV: Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, c = c‘ | Erläutern, Begründen |
| TZ: Lichtuhr | Beschreiben |
| TZ: Zeit t‘ < t, Lorentz-Faktor | Berechnen |

**Methodik**: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

| Zeit | Didaktische Erläuterungen | Methodische Erläuterungen | Sozialform |
|---|---|---|---|
| 5 | Problemstellung: TA: Leitfrage | Lichtgeschwindigkeit konstant? | LSG |
| 15 | Problemanalyse: Ideen, s.u. | TA | LSG |
| 45 | Problemlösung: t‘ berechnen | AB | GA |
| 55 | Sicherung: | SV, TA | SV |
| 90 | Konsolidierung: Lebensdauer von Myonen | Berechnen | PA |

Geplantes Tafelbild

Wie schnell geht eine Uhr, die mit einer Geschwindigkeit v bewegt wird?

Ideen: Licht ist in der ruhenden und in der bewegten Uhr gleich schnell und soll im Uhrwerk genutzt werden.

Lösungen: Funktionsweise: Ein Lichtblitz zu einem s=0,3 m entfernten Spiegel geschickt. Nach t = 2s/v = 2 ns kommt der Lichtblitz zurück und das Uhrwerk geht 1 ns weiter.

Zu 2a) Geschwindigkeit: Uhr 4 Kästchen, Licht 5 Kästchen, also v = 0,8 c

Zu 2b) Start: t = 0 = t‘
Mitte: t = 2,5 ns (2,5 Kästchen); t‘ = 1,5 ns (1,5 Kästchen)
Ende: t = 5 ns (5 Kästchen); t‘ = 3 ns (3 Kästchen)

Zu 2c) siehe Abb. 7a-d
Satz des Pythagoras: $4^2 + 3^2 = 5^2$
$(vt)^2 + (ct‘)^2 = (ct)^2$
Vergleich: t=5 ns; t‘=1,5 ns
Oder berechnen mit Division durch $c^2$:
$0{,}64\ t^2 + t‘^2 = t^2$ $\quad|-0{,}64t^2$
$t‘^2 = 0{,}36t^2$ $\quad|$Wurzel
t‘ = 0,6t = 1,5 ns

Zu 2d) siehe Abb. 7a-d
$c^2t^2 = v^2t^2 + c^2\ t’^2\ |-v^2t^2 \quad| : c^2$
$t’^2 = t^2\ (1 – v^2/c^2)$ | Wurzel
$t’ = t\ (1 – v^2/c^2)^{0,5}$

Ergebnis: Während in einem ruhenden System eine Zeit t vergeht, vergeht in einem System, das sich mit einer Geschwindigkeit v bewegt, die Zeit $t’ = t\ (1 – v^2/c^2)^{0,5}$.

Bezeichnung: $1/\ (1 – v^2/c^2)^{0,5} = \gamma$ heißt Lorentz-Faktor.

Astronomie-AG, Dr. Hans-Otto Carmesin
**Kurzentwurf für eine Astronomiestunde**
**Thema der Unterrichtseinheit: SRT**
**Erste Lösung des Zwillingsparadoxons im Minkowski-Diagramm**

**Didaktik**: KUZ: Die Schüler können das Paradoxon im Minkowski-Diagramm analysieren.

| Inhaltliche Aspekte | Verhaltensaspekte dazu |
|---|---|
| LV: Zeitdehnung‘ | Erläutern, Berechnen |
| LV: Reise mit v = 0,995 c | Berechnen, Erläutern |
| LV: Zwillingsparadoxon | Erläutern |
| TZ: Minkowski-Diagramm | Erläutern, Zeichnen |
| TZ: Linien der Gleichzeitigkeit | Begründen |
| TZ: Wende entspricht großem Zeitunterschied | Begründen |

**Methodik**: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

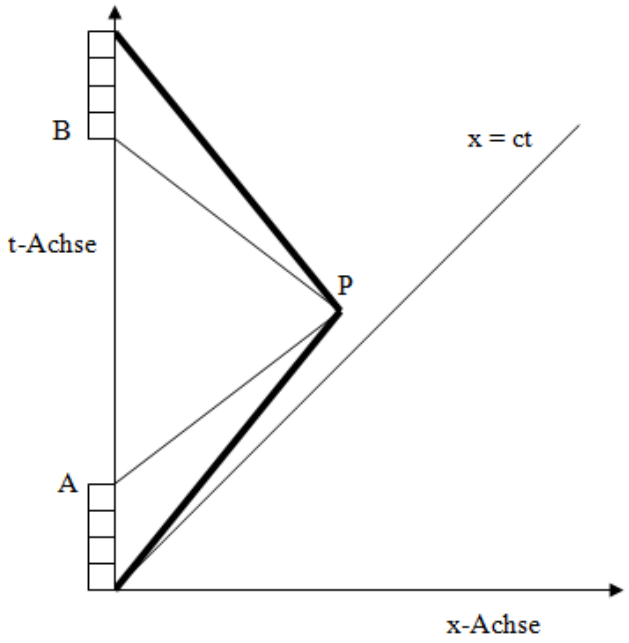
| Zeit | Didaktische Erläuterungen | Methodische Erläuterungen | Sozialform |
|---|---|---|---|
| 5 | Problemstellung: TA: Leitfrage | Zwillingsparadoxon klären | LSG |
| 10 | Problemanalyse: Ideen, Info s.u. | TA | LSG |
| 30 | Problemlösung: Licht altert nicht, Zeit während Wende | Diagramm skizzieren und analysieren | GA |
| 45 | Sicherung: s. u. | SV, TA | SV |

Geplantes Tafelbild

Wann vergeht so viel Zeit bei der ruhenden Zwillingsschwester?

Ideen: Diagramm, Linien der Gleichzeitigkeit suchen

Info: Minkowski-Diagramm: Querachse x, Hochachse t, Licht: 45°-Linien



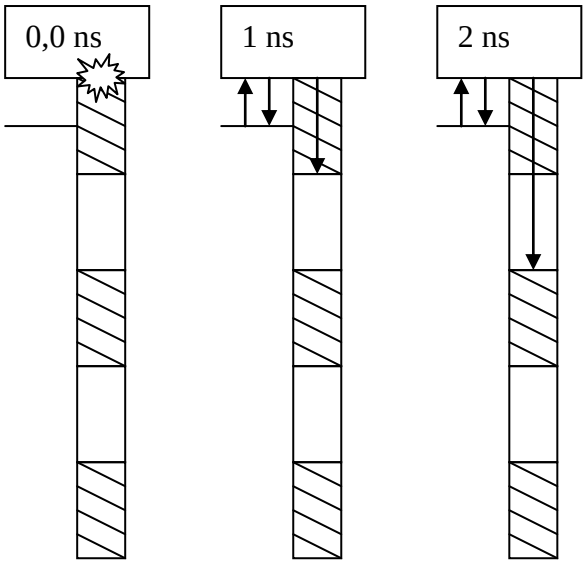

Lösungen:
Wo ist t‘ = 0?
Also: $1/\gamma = 0$
Also v = c

Ergebnis 1: Bei Licht vergeht keine Zeit. Bei 45°-Linien im Minkowski-Diagramm vergeht keine Zeit.

Ergebnis 2: Während die Reisende wendet, vergeht viel Zeit auf der Erde.

Bezeichnung: Jeder Beobachter misst seine eigen Zeit, die sogenannte Eigenzeit $\tau$. Für den bewegten Beobachter ist: $\tau^2 = t^2 - v^2 \cdot t^2/c^2 = t^2 - x^2/c^2$
Deutung: Lauras Eigenzeit verringert sich also aufgrund der zurückgelegten Strecke x.

1. Drei aufeinanderfolgende Schnappschüsse einer Lichtuhr sind dargestellt, das Licht ist dabei durch Pfeile markiert. Erläutern Sie die Funktionsweise!



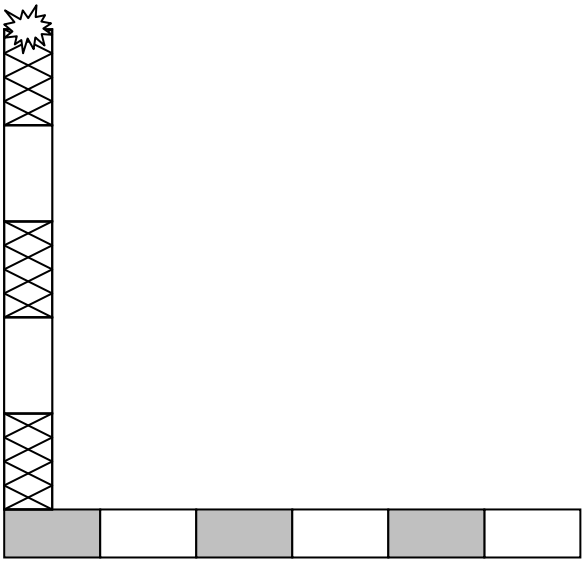

2. Zwei Lichtuhren (ohne Zählwerk) starten am gleichen Ort. Eine Lichtuhr bleibt in Ruhe, während sich die andere nach rechts bewegt.

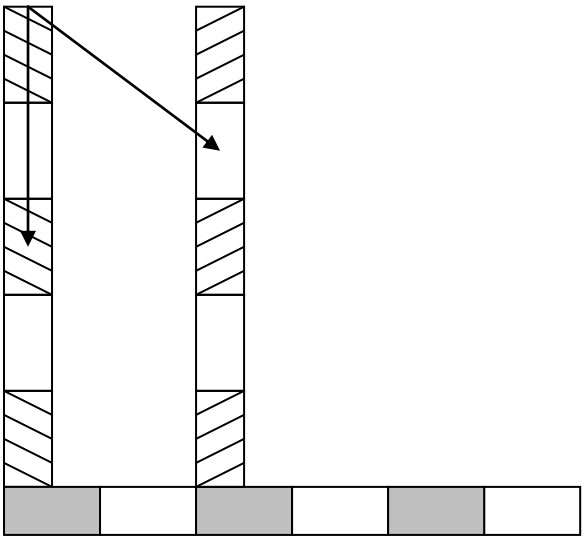
a. Wie schnell bewegt sich die rechte Lichtuhr?

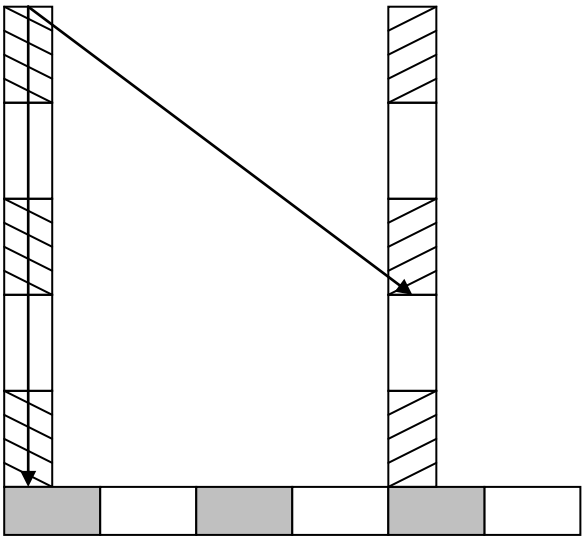
b. Wie spät ist es auf den Uhren bei den drei Schnappschüssen?

c. Leiten Sie eine Formel zur Berechnung der Zeitanzeige t' der bewegten Uhr abhängig von Der Zeitanzeige t der ruhenden Uhr her!

d. Leiten Sie eine Formel für beliebige v her!

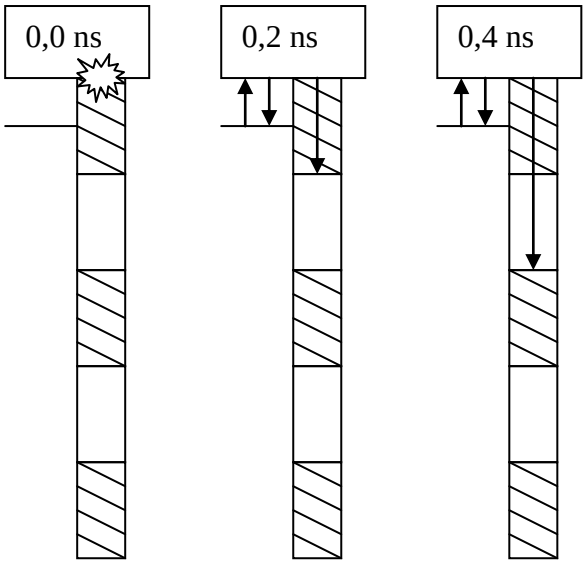






Lösungsskizzen

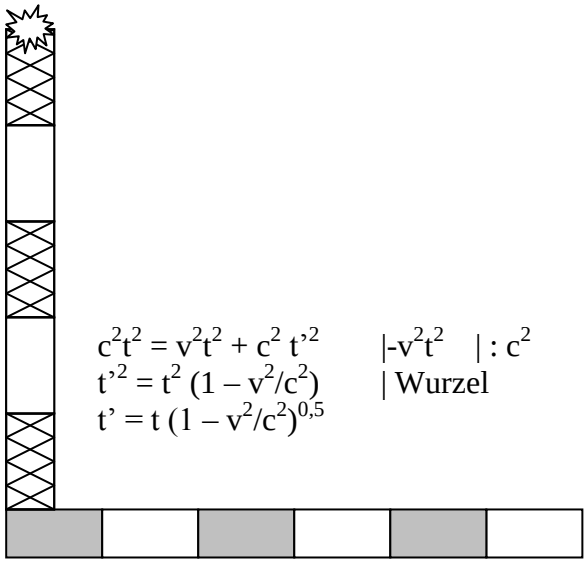
Zu 1.




Zu 2.

Bezeichnung: $\gamma = 1/(1 - v^2/c^2)^{0,5}$

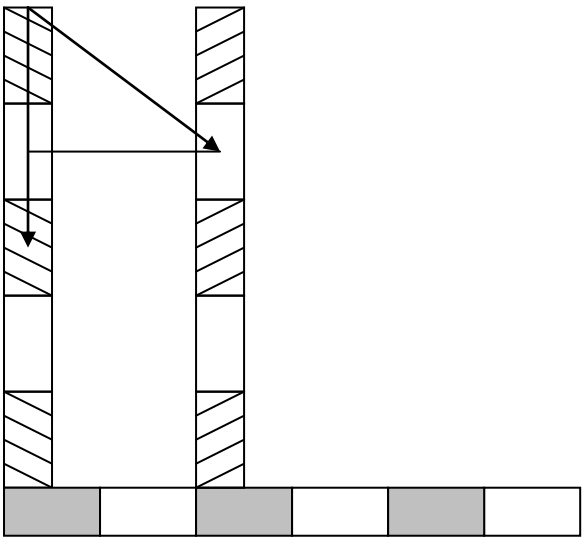
Ergebnis: Während im Ruhesystem eine Zeit t vergeht, vergeht in einem mit einer Geschwindigkeit v bewegten System die Zeit t‘ = t/γ. Der Effekt heißt Zeitdilatation.

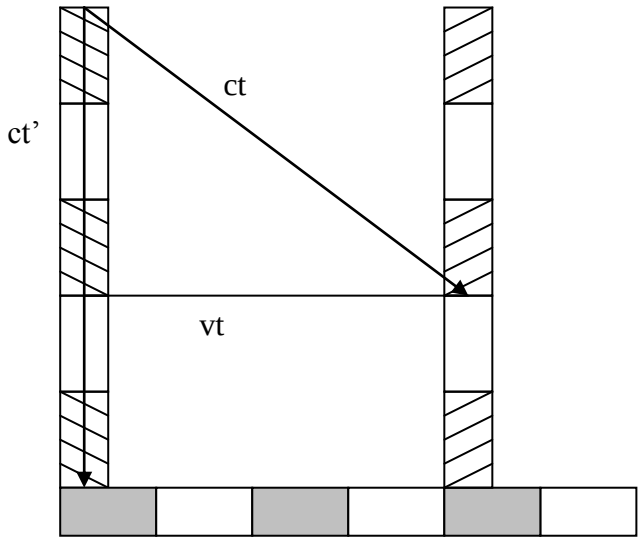


$c^2t^2 = v^2t^2 + c^2\,t'^2$ $\quad |-v^2t^2 \quad | : c^2$

$t'^2 = t^2\,(1 - v^2/c^2)$ $\quad |$ Wurzel

$t' = t\,(1 - v^2/c^2)^{0,5}$





Astronomie-AG, Dr. Hans-Otto Carmesin
**Kurzentwurf für eine Astronomiestunde**
**Thema der Unterrichtseinheit: SRT**
**Entdeckung des Zwillingsparadoxons**

**Didaktik**: KUZ: Die Schüler können das Paradoxon begründen.

| Inhaltliche Aspekte | Verhaltensaspekte dazu |
|---|---|
| LV: Zeitdehnung‘ | Erläutern, Berechnen |
| TZ: Reise mit v = 0,995 c | Berechnen, Erläutern |
| TZ: Zwillingsparadoxon | Erläutern |

**Methodik**: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

| Zeit | Didaktische Erläuterungen | Methodische Erläuterungen | Sozialform |
|---|---|---|---|
| 5 | Problemstellung: TA: Leitfrage | Zwillingsschwester 27 Jahre jünger? | LSG |
| 10 | Problemanalyse: Ideen, s.u. | TA | LSG |
| 30 | Problemlösung: t‘ berechnen | AB | GA |
| 45 | Sicherung: v, t, t‘, Paradoxon | SV, TA | SV |

Geplantes Tafelbild

Wie kann eine Schwester 27 Jahre jünger sein als ihre Zwillingsschwester?

Ideen: Zeitdehnung, Reise in einer Rakete

Lösungen:
Beispiel: $1/\gamma = 0{,}1$
Reisedauern: $t' = t \cdot 0{,}1$ und $t' = t - 27\ a$
Einsetzen: $t - 27\ a = t \cdot 0{,}1 \mid - t \cdot 0{,}1 + 27\ a$
Also: $27\ a = t \cdot 0{,}9$
Also $t = 30\ a$ und $t' = 3\ a$
Somit ist $1/\gamma^2 = 0{,}01 = 1 - v^2/c^2$
Also $v = 0{,}995\ c$

Ergebnis: Wenn eine Schwester mit einer Geschwindigkeit von 0,995 c eine Reise von 3 Jahren Dauer macht, dann ist sie bei der Rückkehr 27 Jahre jünger als ihre Zwillingsschwester.

Bezeichnung: Dabei reist die Schwester in ihre eigene Zukunft. Man spricht von einer Zeitreise.

Zwillingsparadoxon: Müsste nicht die reisende Schwester 27 Jahre jünger sein, denn von ihr aus gesehen entfernt sich die andere Schwester erst und nähert sich nachher wieder.

Astronomie-AG, Dr. Hans-Otto Carmesin
**Kurzentwurf für eine Astronomiestunde**
**Thema der Unterrichtseinheit: SRT**
**Entdeckung der relativistischen Masse**

**Didaktik**: KUZ: Die Schüler können die relativistische Masse berechnen und die Formel herleiten.

| Inhaltliche Aspekte | Verhaltensaspekte dazu |
|---|---|
| LV: Zeitdehnung | Erläutern, Berechnen |
| TZ: t, v, p und m | Berechnen, Erläutern |
| TZ: relativistische Masse | Erläutern, Berechnen |

**Methodik**: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

| Zeit | Didaktische Erläuterungen | Methodische Erläuterungen | Sozialform |
|---|---|---|---|
| 5 | Problemstellung: TA: Leitfrage | Beim Beschleunigen der Rakete der Zwillingsschwester ist die Masse wichtig. Beispiel Sheriff. | LSG |
| 10 | Problemanalyse: Ideen s.u. | TA | LSG |
| 30 | Problemlösung: s.u. | Herleiten, LH | GA |
| 45 | Sicherung: s. u. | SV, TA | SV |

Geplantes Tafelbild

Welche Masse des Gummiknüppels beobachten der Sheriff und seine Cousine?

Ideen: Zeitdilatation, $y/t' = v'$, $m' = p/v'$

Lösungen:

Im Auto: $t_S = s_y : v_y = 2\ m : 10\ \frac{m}{s} = 0{,}2\ s$

$m_S = p_y : v_y = 4\ kg \cdot \frac{m}{s} : 10\ \frac{m}{s} = 0{,}4\ kg$

Bei der Cousine: $t_C = \gamma \cdot \Delta t_S$:

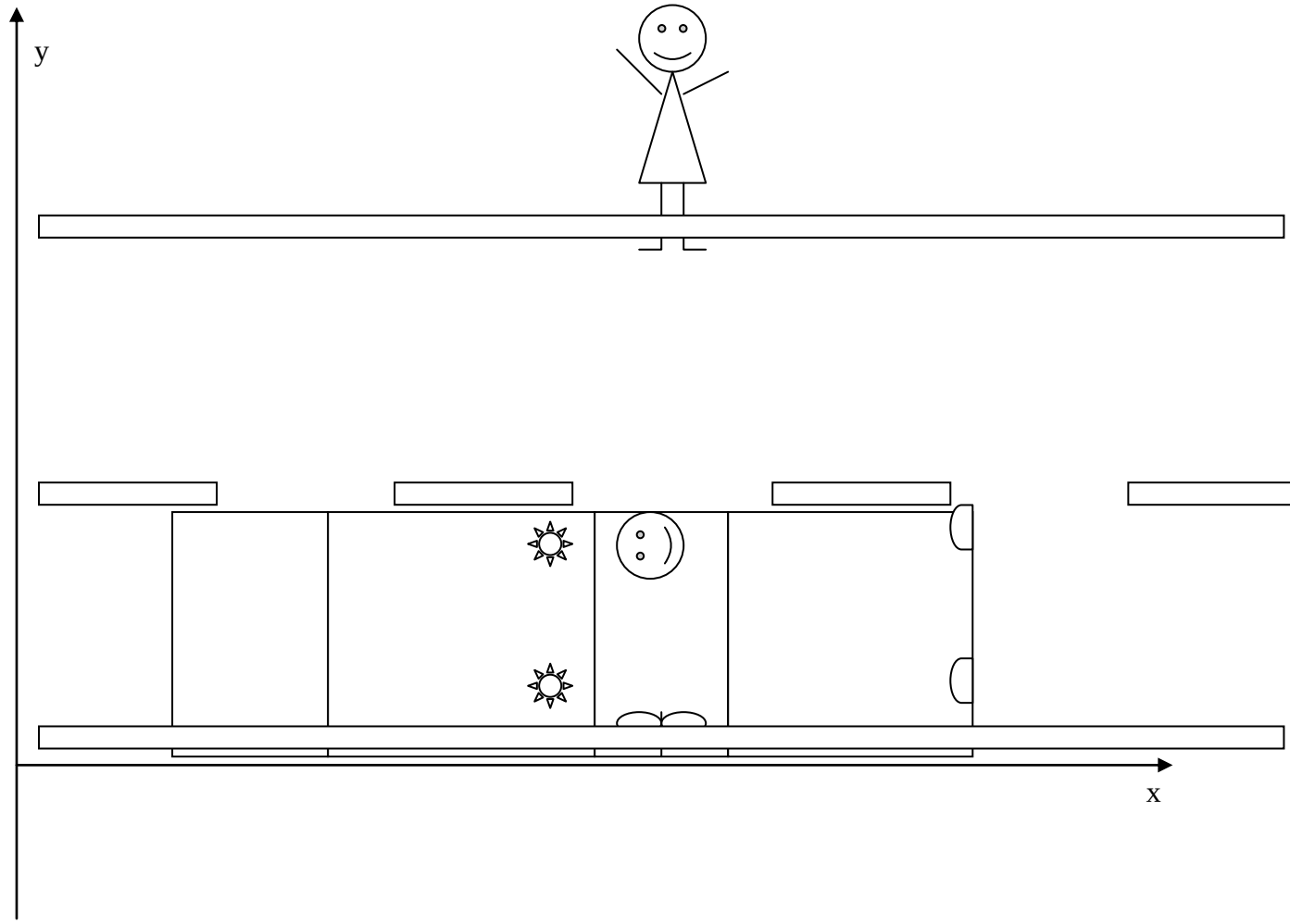
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}64}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}36}} = \frac{1}{0{,}6} = \frac{5}{3}$$

$$t_C = \frac{5}{3} \cdot 0{,}2\ s = \frac{1}{3}\ s$$

$$v_{yC} = 2m : t_C = 6\ \frac{m}{s}$$

$$m_C = p_y : v_{yC} = 4\ kg \cdot \frac{m}{s} : 6\ \frac{m}{s} = \frac{2}{3}\ kg$$

Ergebnis: Die Masse des Gummiknüppels ist im Auto praktisch in Ruhe. Man nennt sie daher die Ruhemasse $m_0 = 0{,}4$ kg. Aus Sicht der Cousine erscheint die Masse bewegt. Man nennt diese Masse daher die relativistische Masse $m_r = 2/3$ kg. Das Beispiel zeigt die allgemeine Regel $m_r = \gamma \cdot m_0$.




Ein Sheriff in Texas fährt in seinem Auto mit der Geschwindigkeit $v_x = 0{,}8\ c$ an seiner am Straßenrand winkenden Cousine vorbei. Da entdeckt er im Auto auf dem Türholm 2 m rechts neben sich eine Riesenmücke. In „Notwehr“ wirft er seinen Gummiknüppel mit der Geschwindigkeit $v_y = -10\ \frac{m}{s}$ nach dem Tier. Im Holm entsteht eine Delle, wie sie ein Gegenstand mit dem Impulsbetrag $p_y = 4\ kg \cdot \frac{m}{s}$ erzeugt. Bestimmen Sie die vom Sheriff und seiner Cousine feststellbaren Massen des Gummiknüppels.

a. Welche Flugdauer $\Delta t_S$ beobachtet der Sheriff?
b. Welche Masse $m_S$ des Gummiknüppels folgert er?
c. Begründe, dass diese Masse $m_S$ zugleich die Masse $m_0$ im System des Gummiknüppels ist.
d. Welche Flugdauer $\Delta t_C$ beobachtet die Cousine?
e. Welche Geschwindigkeit $v_{yC}$ beobachtet sie?
f. Welche Masse $m_C$ des Gummiknüppels folgert sie?
g. Abends treffen sich beide und vergleichen ihre Feststellungen. Welchen allgemeinen Zusammenhang zwischen der Masse $m_0$ im System des bewegten Gegenstands und der relativistischen Masse m in einem Ruhesystem können sie folgern?

Lösungsskizze zur relativistischen Masse

Zu a) System Auto: $\Delta t_S = s_y : v_y = 2\ m : 10\ \frac{m}{s} = 0{,}2\ s$

Zu b) System Auto: $m_S = p_y : v_y = 4\ kg \cdot \frac{m}{s} : 10\ \frac{m}{s} = 0{,}4\ kg$

Zu c) Im Auto ist die Geschwindigkeit des Knüppels $10\ \frac{m}{s}$, also für relativistische Effekte vernachlässigbar. Also ist $m_S$ die Ruhemasse $m_0$.

Zu d) Aus Sicht der Cousine bewegt sich das Auto. Also ist die Flugdauer $\Delta t_C$ des Knüppels aus Sicht der Cousine um den sogenannten Lorentz-Faktor länger als $\Delta t_S$:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}64}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}36}} = \frac{1}{0{,}6} = \frac{5}{3}$$

$$\text{Also ist } \Delta t_C = \frac{5}{3} \cdot 0{,}2\ s = \frac{1}{3}\ s$$

Zu e) Aus Sicht der Cousine ist die Flugdauer länger, die Länge in y-Richtung bleibt aber gleich, weil in y-Richtung keine Bewegung stattfindet:

$$v_{yC} = 2m : \Delta t_C = 6\ \frac{m}{s}$$

Zu f) Die Beule geht in y-Richtung und ist für beide Beobachter daher gleich, Auch das physikalische Gesetz m = p/v ist für beide Beobachter gleich, denn es gilt in allen bewegten Systemen:

$$m_C = p_y : v_{yC} = 4\ kg \cdot \frac{m}{s} : 6\ \frac{m}{s} = \frac{2}{3}\ kg > 0{,}4\ kg = m_0$$

Zu g) Beide können feststellen, dass das Massenverhältnis $\frac{m_C}{m_S} = \frac{\frac{2}{3}kg}{\frac{2}{5}kg} = \frac{5}{3}$ beträgt. Sie wissen, dass $\frac{5}{3}$ auch der Lorentz-Faktor $\gamma$ ist. Die Masse $m_S$ ist zugleich die Ruhemasse $m_0$ des Knüppels, denn der Knüppel ist aus Sicht des Sheriffs sehr langsam. Die Masse $m_C$ ist zugleich die relativistische Masse $m_R$ des Knüppels, denn der Knüppel ist aus Sicht der Cousine sehr schnell. Also folgern sie:

$$\frac{m_R}{m_0} = \gamma \quad \text{oder} \quad m_R = m_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Astronomie-AG, Dr. Hans-Otto Carmesin
**Kurzentwurf für eine Astronomiestunde**
**Thema der Unterrichtseinheit: SRT**
**Entdeckung der Äquivalenz von Masse und Energie**

**Didaktik**: KUZ: Die Schüler können die Äquivalenz begründen und anwenden.

| Inhaltliche Aspekte | Verhaltensaspekte dazu |
|---|---|
| LV: relativistische Masse | Erläutern, Berechnen |
| TZ: Tangentengleichung | Herleiten |
| TZ: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ | Herleiten |
| TZ: $E = m \cdot c^2$ | Begründen |

**Methodik**: Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

| Zeit | Didaktische Erläuterungen | Methodische Erläuterungen | Sozialform |
|---|---|---|---|
| 5 | Problemstellung: TA: Leitfrage | Alltagsbedeutung von $\Delta m$ | LSG |
| 10 | Problemanalyse: Ideen s.u. | TA | LSG |
| 30 | Problemlösung: s.u. | Herleiten, LH | GA |
| 45 | Sicherung: s. u. | SV, TA | SV |
| 90 | Konsolidierung | Fusion auf der Sonne;<br>Analyse des Flugs der Zwillingsschwester | PA |

Geplantes Tafelbild

Wie hängt die Massenzunahme $\Delta m = m_r - m_0$ im Alltag, also für $q=v^2/c^2 << 1$ von v ab?

Ideen:
$\Delta m = m_r - m_0 = m_0 (\gamma-1)$
Tangente für $\gamma(q)$, Tangentengleichung $f(q) = \gamma(0) + \gamma'(0) \cdot q$

Lösungen:
$\gamma(q) = (1-q)^{-0,5}$
$\gamma'(v) = 0,5 \cdot (1-q)^{-1,5}$
$\gamma'(0) = 0,5$
$f(q) = 1 + 0,5 \cdot q$
$\Delta m = m_0 \cdot (1 + 0,5q - 1) = m_0 \cdot 0,5q = m_0 \cdot 0,5 \cdot v^2/c^2$
$\Delta m = E_{kin} / c^2$

Ergebnis: Der Massenunterschied ist im Alltag gleich der Bewegungsenergie pro $c^2$. Äquivalent ist $E_{kin} = \Delta m \cdot c^2$. Allgemein gilt für die Gesamtenergie $E = m \cdot c^2$.

Denn beim Beschleunigen kann man in einem mit der Masse mitgeführten Koordinatensystem immer die kinetische Energiezunahme für kleine Geschwindigkeit als $\Delta E_{kin} = \Delta m \cdot c^2$ schreiben.

Anwendungen
In der Sonne verschmelzen vier Protonen mit einer Masse von je $1,672\,621\,58 \cdot 10^{-27}$ kg zu einem Heliumatomkern mit einer Masse von $6,644\,655\,98 \cdot 10^{-27}$ kg. Bestimme die dabei freigesetzte Energie (Lösung 4,5 pJ).

1) Masse und Energie

Foto: Hancken (http://www.hancken.de/files/bilder/pet-ct/pet-ct_philips_440.jpg)

a) Beobachtung a: Bei der Klinik Dr. Hancken erhält ein Patient zur Diagnose einen Stoff, der sich in bestimmtem Gewebe ansammelt. In dem Stoff werden ein Elektron und ein Antielektron mit einer Masse von je $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg in zwei Strahlungsteilchen mit einer Energie von je E = 81,92 fJ umgewandelt. Die Strahlungsteilchen werden erfasst und dienen der Positionsbestimmung des Stoffes.

Fotos: Hendrik Mau (links) und Laura Leddin (rechts), Athenaeum Stade

b) Beobachtung b: In der Sonne verschmelzen vier Protonen mit einer Masse von je $1{,}672\,621\,58 \cdot 10^{-27}$ kg zu einem Heliumatomkern mit einer Masse von $6{,}644\,655\,98 \cdot 10^{-27}$ kg. Dabei wird eine Energie von 4,5 pJ abgegeben.

Neutronenkammer von Chadwick

(http://www.leifiphysik.de/sites/default/files/medien/versuch_orig_kernphygrundlagen_ver.jpg)

c) Beobachtung 3: 1934 bestrahlten Chadwick und Goldhaber einen Deuteriumkern mit der Masse $3{,}344\,496\,935 \cdot 10^{-27}$ kg mit einem Strahlungsteilchen der Energie 354 fJ. Dabei entstanden ein Proton und ein Neutron mit der Masse $1{,}674\,927\,16 \cdot 10^{-27}$ kg.

d) Bestimme aus den obigen Beobachtungen einen Zusammenhang zwischen Masse und Energie.

2) Ein Elektron wird beschleunigt und erhält dabei die Bewegungsenergie 200 fJ. Bestimme die Geschwindigkeit.