

A. Einstein, 1905, Annalen der Physik: "Zur Elektrodynamik bewegter Körper"

Empfehlenswerte Notizen: David Mermin (Cornell University, USA):

"Physics 209: Introductory Notes on Relativity"

www.lasp.cornell.edu/~cew2/P209/P209_home.html

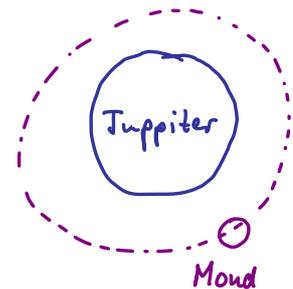
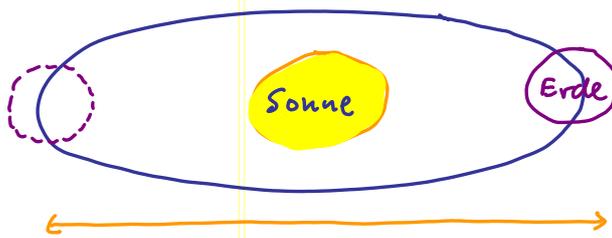
Buch: N. David Mermin: "It's About Time: Understanding Einstein's Relativity",

Princeton University Press, 2005

Lichtgeschwindigkeit (LG)

1) Erste Messversuche - Galilei

2) Erste erfolgreiche Schätzung - Romer (1676)

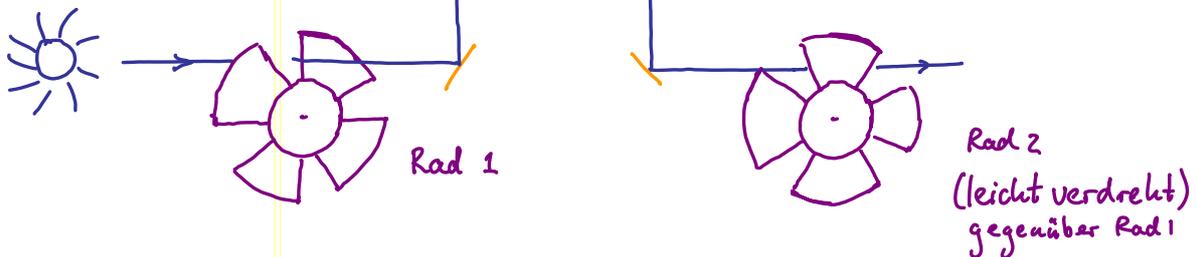


Jupiter-Mondfinsternis früher/später als erwartet, wenn Erde näher/weiter weg war:

3) Erste gute Messung: (Fizeau, 1880)

$$c = 300.000 \text{ km/s}$$

$$= 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$



4) Heute: $c \equiv 299.792.458 \text{ m/s}$ per Definition!

Das ist eigentlich Definition des Meters:

$$1 \text{ m} = \text{Abstand, den Licht in } \left(\frac{1}{299.792.458} \right) \text{ s}$$

zurücklegt

5) Intuition:

$$c \approx 1 \text{ Fuß/Nanosekunde} = 1 \text{ f/ns}$$

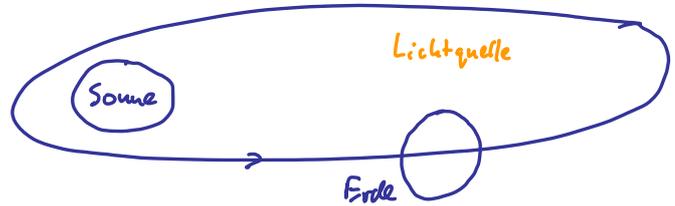
Offensichtliche Frage: "relativ zu was" bewegt sich Licht mit 300.000 km/s ??

SR3

Mögliche Antwort 1 (MA1): "Relativ zu einem 'Licht-Medium' ('Lichtäther')"

Wäre analog zu Schallwellen durch Luft oder Wasser, wo Schallgeschwindigkeit relativ zu Medium unabhängig ist von Geschwindigkeit der Quelle.

Aber: MA1 widerspricht Experiment (Michelson-Morley (1887))



Erwartet: c_1 c_2 c_3

(mit Strom schwimmen ist schneller als gegen Strom schwimmen)

Gemessen: c_1 c_2 c_3 !!

hypothetischer Etherwind



hypothetischer "Ätherwind weht nach links relativ zur Erde"

Mögliche Antwort 2 (MA2): "Relativ zur Quelle"

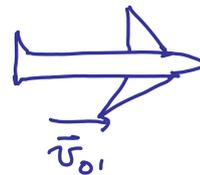
SR4

Wäre analog zu Kugel aus Flugzeug gefeuert:

Geschw. Flugzeug rel. zu Boden:

Geschw. Kugel rel. zu Flugzeug:

Geschw. Kugel rel. zu Boden:

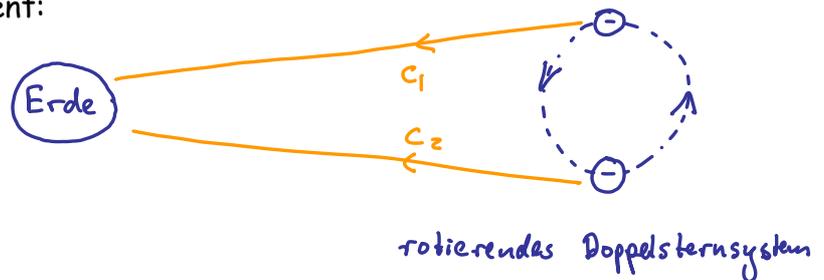


Aber: MA2 widerspricht Experiment:

Erwartet $c_1 =$

laut Galileo: $c_2 =$

Gemessen: c_1 c_2



Ferner: MA2 widerspricht Maxwell's Elektrodynamik, die vorhersagt: Geschwindigkeit aller elektromagnetischer (EM) Strahlung ist genau c , unabhängig von Geschw. der Quelle!

Enter Einstein: er bemerkt: EM-Phänomene sehen in verschiedenen Inertialsystemen gleich aus!



Elektromotorische Kraft in Leiterschleife ist dieselbe, unabhängig davon ob Leiterschleife ruht und Magnet bewegt wird oder umgekehrt.

Einstein postuliert:

- 1) Relativitätsprinzip: (Alle) IS sind für Beschreibung (aller) physikalischen Gesetze äquivalent (1)
(somit ist "Einführung eines Lichtäthers oder absolut ruhenden Raumes" überflüssig)
- 2) Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (LG): Die LG im Vakuum hat in allen IS den gleichen Wert c (unabhängig von deren Relativgeschw. zur Quelle) (2)
(2 folgt aus 1, da Maxwell-Theorie besagt: c ist unabhängig von Quelle) (2)

Fazit: Relativ zu was bewegt sich Licht mit c ?

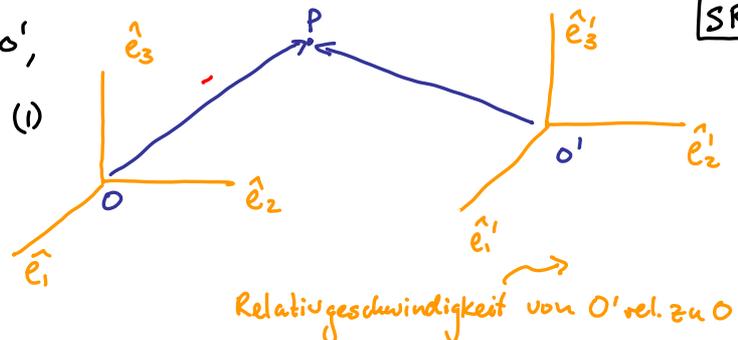
Antwort: Egal! Relativ zu allen beliebigen IS!

(3)

Explizit: Für $t = t'$ sei $O = O'$,

also: $x(O')$

Koordinaten des Ursprungs von O' aus Sicht von O .



SR6

Lichtblitz starte bei $t = t'$ in $O = O'$, und erreicht etwas später Punkt P.

O sagt: $r^2 = x^2 + y^2 + z^2 =$ (2)

(5.2)

O' sagt: $r'^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 =$ (3)

Liefert Widerspruch zur Galilei-Transformation : $x' =$ (BB6.3) (4)

(4) in (3) liefert nicht (2) !!

(5.3) erscheint zunächst verblüffend, wenn wir annehmen, dass Apparate für Messung von Geschw. (oder, weil $v = x/t$, von Abständen (Messlatten) und Zeiten (Uhren), für O und O' 100% gleich funktionieren. Tun sie aber nicht! Grund:

Problem der Gleichzeitigkeit

Zeitmessung ist Aussage über gleichzeitige Ereignisse:

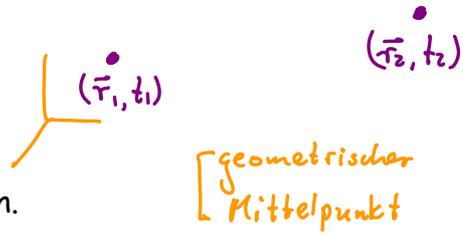
"Zug kommt um 7 Uhr" heisst:

"Uhrzeiger zeigt auf 7" und "Zug kommt" sind gleichzeitige Ereignisse.

Wie ist "gleichzeitig" definiert, wenn zwei Ereignisse räumlich getrennt sind??

Einstein's Definition (nutzt Konstanz der LG):

Ereignisse E_1 und E_2 sind gleichzeitig, wenn zwei Lichtstrahlen, zur Zeit t_1 von E_1 und t_2 von E_2 ausgesandt, gleichzeitig ankommen.



Wir werden zeigen:

Zwei Ereignisse, die für O' gleichzeitig erscheinen, erscheinen für O ungleichzeitig!

(mit anderen Worten: Uhren von O und O' lassen sich nicht perfekt synchronisieren...)

(Berühmtes) Beispiel: "Photonenpaar im Zug"

(Mermin Notes, Part 5)

Fall 1: Wagen O' steht im Bahnhof O .

Alle O -Uhren sind miteinander synchronisiert,

Alle O' -Uhren sind miteinander synchronisiert.

Von Wagenmitte werden gleichzeitig,

zur Zeit t_0 zwei Photonen

abgeschossen

O und O' sehen dasselbe:

Photonen kommen

hinten und vorne an, zur Zeit

(laut O),

(laut O'),

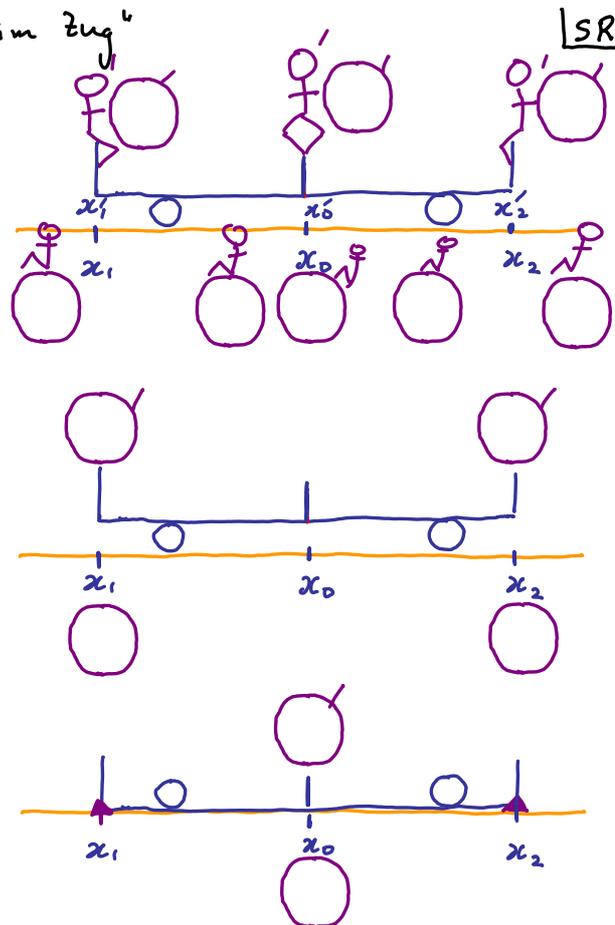
und zünden zwei Knallerbsen.

Die machen Flecken auf die Schiene,

und schicken Photonen zurück,

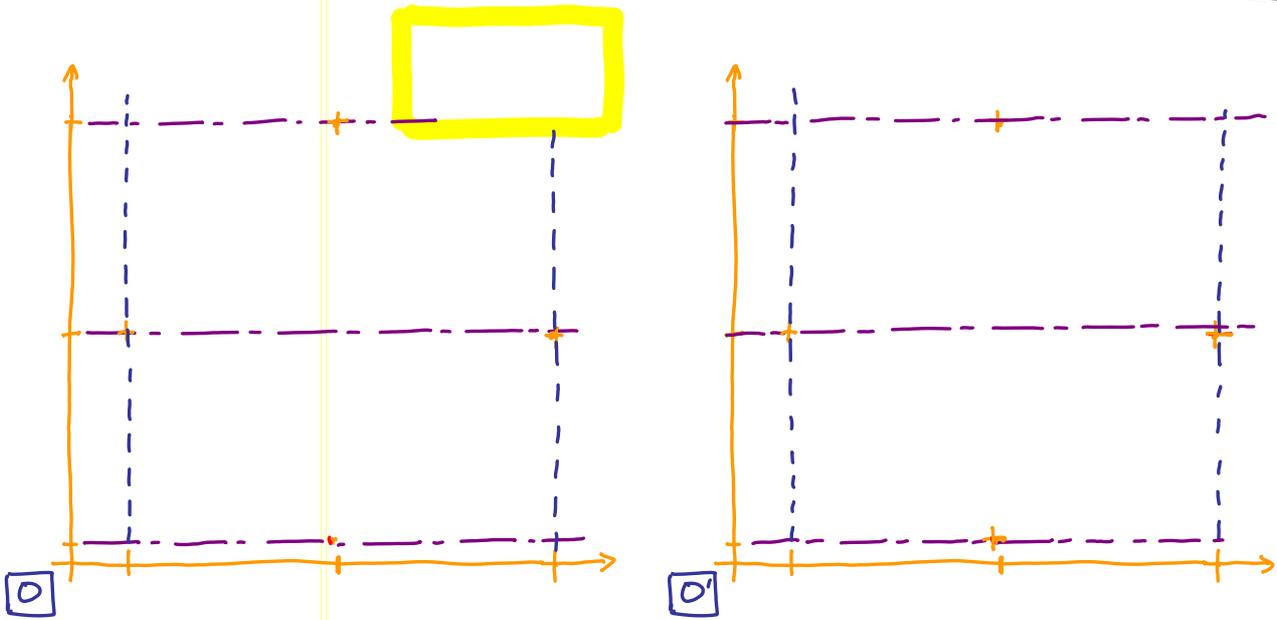
welche die Wagenmitte

erreichen, zur Zeit



Raum-Zeit (Minkowski) -Diagramm für Fall 1: Wagen O' steht im Bahnhof O

SR10



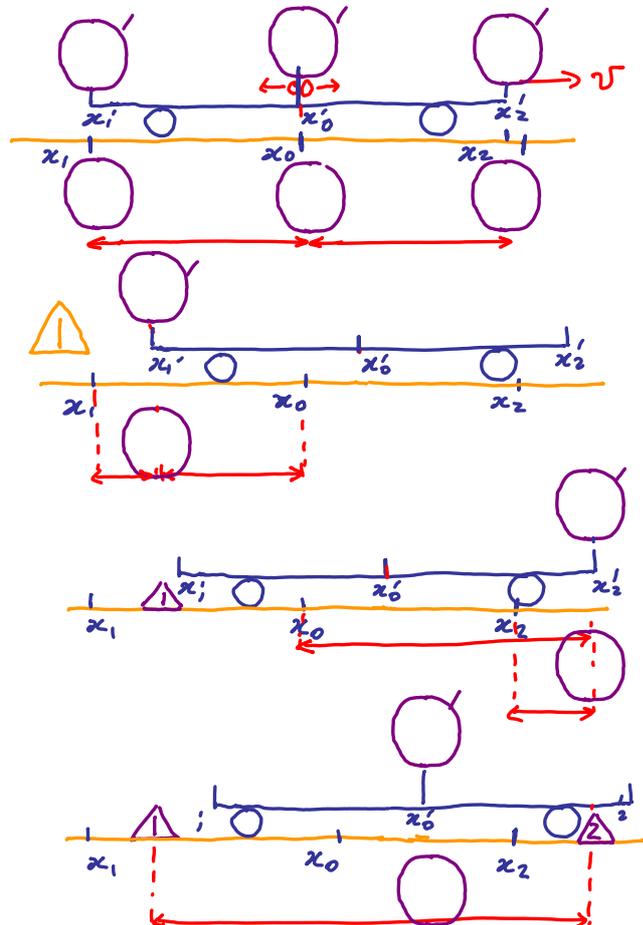
- Blaue: "Weltlinien für eine Abfolge von Ereignissen (z.B. Bahnkurve von Hinter- und Vorderwand des Wagens)"
- Lila: "gleichzeitige Ereignisse (synchronisierte Uhren haben denselben Zeigerstand)"
- Rot: "Photonbahnen (Steigung: $\tan \alpha_c = 1$) (auch "Lichtkegel" genannt)"

Fall 2: Wagen fährt durch Bahnhof (Geschwindigkeit = v).
 sei Zeitpunkt, wenn
 Dann werden die zwei Photonen gleichzeitig abgeschossen.

O sagt: L-Photon trifft hinten z.Z.
 R-Photon trifft vorne z.Z.
 O' sagt: weil $LG = c$ in jedem IS,
 ist für mich
 Photonen kommen gleichzeitig hinten, vorne an:
 Fazit: ["gleichzeitig" für O']
 ["gleichzeitig" für O]

Ferner: die Ankünfte der zwei Knallerbsenphotonen bei Wagenmitte passieren zur Zeit
 Weil diese Ereignisse am selben Ort stattfinden, sieht auch O sie zur Zeit

SR11



Wie groß ist die Zeitdifferenz $t_r - t_h$ für O?

SR14

Wagen hat Länge

$L =$

Abstand zwischen Flecken Δ_1, Δ_2

$D =$

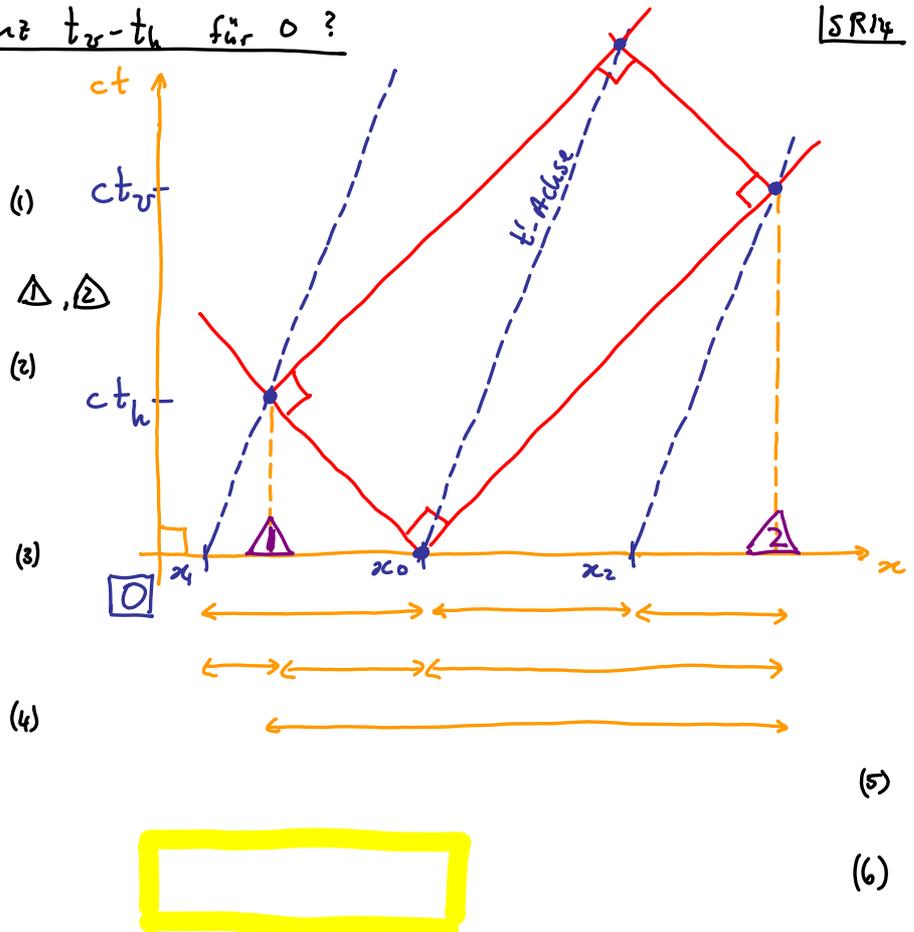
Weg des L-Photons:

$ct_h =$

Weg des R-Photons:

$ct_r =$

$(4) - (3):$



(5)
(6)

Allgemeine Regel (R1):

SR15

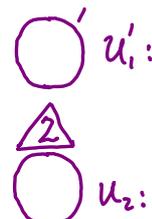
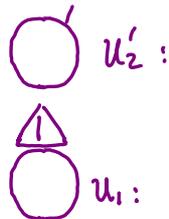
Falls zwei Ereignisse E1, E2 (Knall 1, Knall 2) gleichzeitig sind in einem IS (hier O), dann gilt in einem zweiten IS (hier O'), das sich mit Geschw. v in Richtung von O_1 (Knall 1) nach O_2 (Knall 2) bewegt, dass

E1 um die Zeitspanne Δt später als E2 stattfindet,

(1)

wobei D der Abstand zwischen E1 und E2 im zweiten IS ist.

O baue (O -)synchronisierte Uhren U_1, U_2 an den Flecken Δ_1, Δ_2 auf, und O' (O' -)synchronisierte Uhren U'_1, U'_2 an der Hinter- und Vorderwand bei



Wie erklärt sich O' , dass O eine Differenz (laut O') gleichzeitig sind?

misst für Ereignisse, die

O' wird behaupten: Uhr U_1

relativ zu U_2 !!

Allgemeine Regel (R2):

SR16

Wenn 2 Uhren in ihrem Ruhesystem (hier) synchronisiert und einen Abstand D getrennt sind, dann gilt aus Sicht eines Systems (hier), in dem diese O-Uhren sich entlang ihrer Verbindungslinie mit Geschw. v bewegen:

die vordere O-Uhr geht

relativ zur hinteren O-Uhr um

Allgemein ist Asynchronität gegeben durch:



(1)

Zahlenbeispiele:

$D \sim 3 \text{ km}, \quad v \sim 30 \text{ m/s}, \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ (2)

$\Delta t = \frac{(3 \times 10^3 \text{ m})(30 \text{ m/s})}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2} \approx 10^{-12} \text{ s} = 1 \text{ picosec}$ (3)

Laserforscher können Pulse mit Dauer 10^{-15} – 10^{-18} Sekunden auflösen.
femtosec attosec (4)

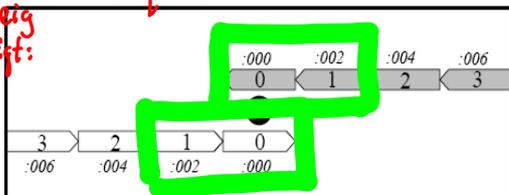
Folgen von Asynchronität: Beispiel Asynchrone Züge (Mermin Notes, Part 9)

SR17

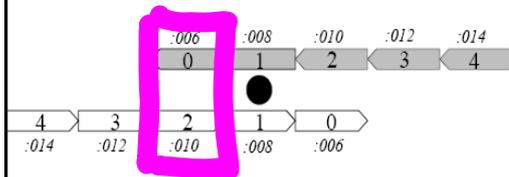
Filmsequenz v. Bahnhofskamera

Bahnsteig Uhr zeigt:

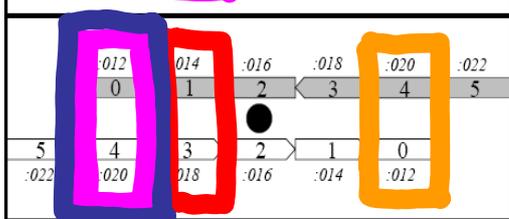
:000 (a)



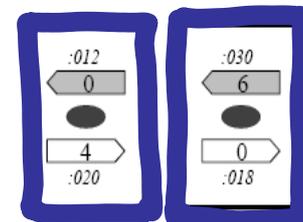
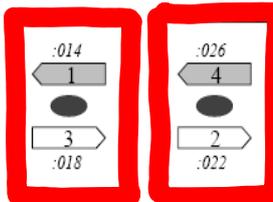
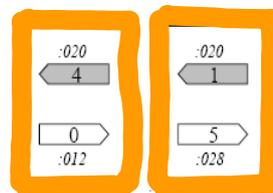
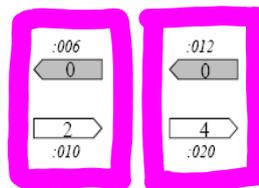
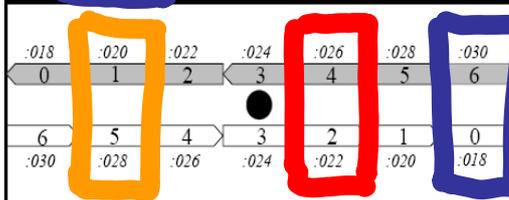
:006 (b)



:012 (c)



:018 (d)



(Asynchronität)_E: $2 \frac{v}{c}$

$v_w = \frac{\Delta x_w}{\Delta t_w} = \frac{1}{5} \text{ W/T}$

Zeitdilatation:

$\frac{\Delta t_g}{\Delta t_w} = \frac{3}{5} = \gamma'$

Längenkontraktion:

$\frac{\Delta x_g}{\Delta x_w} = \frac{3}{5} = \gamma'$

Asynchronität d. W-wagen

$\frac{\Delta t_w}{\Delta x_w} = \frac{16}{5}$

Lichtgeschwindigkeit:

$c = \left(\frac{v}{\Delta t / \Delta x} \right)^{1/2} = \frac{1}{4}$

Überlichtgeschwindigkeit: $v > c$ liefert Uneinigkeit über Reihenfolge v. Fotos!

- Weisser Zug (W) und grauer Zug (G) fahren mit gleicher Geschwindigkeit in gegenübergesetzte Richtungen durch einen Bahnhof.
- Am Mittelpunkt jedes Wagens befindet sich eine Uhr, und ein Schaffner mit Kamera.
- Um Folgen von Asynchronität zu illustrieren, stellen wir die Uhren in W untereinander asynchron um 2 Ticks pro Wagen, ebenso für G.
- Dem Personal von W erzählen wir jedoch fälschlicherweise, ihre jeweiligen Uhren seien untereinander synchron; dasselbe erzählen wir dem Personal von G.
- Wenn sich ein W- und G-Wagen Fenster an Fenster gegenüber befinden, machen beide Schaffner ein Foto, das Wagennummern und Uhrzeigerstand beider Uhren zeigt. Jeder Schaffner in jedem Wagen kennt nur die von ihm gemachten Fotos.
- Eine Serie von am Bahnsteig montierten Sicherheitskameras macht dieselben Fotos ebenfalls, sie werden dann zu einer Filmsequenz montiert.
- Einstein (E) steht am Bahnsteig und analysiert die Filmsequenz.
Geschw. beider Züge laut E:

$v_E =$

s

Beobachtung 1:

E vergleicht zu gegebenem Zeitpunkt verschiedene Wagen desselben Zuges, und bemerkt eine Asynchronität:

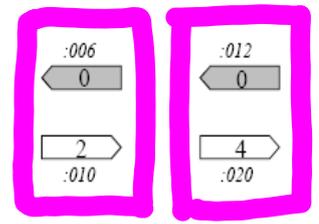
$\frac{\Delta t_g}{\Delta x_g} =$

Beobachtung 2:

W-Personal studiert "Bahnkurve" $x(t)$ von G-Wagen Nr. 0, nutzt das für W-Messung der Geschw. dieses G-Wagens.

$v_w =$

(2)



(3)

Schrumpffaktor

Uhrenvergleich: $\frac{\Delta t_g}{\Delta t_w} =$

W-Personal glaubt, W-Uhren seien synchronisiert, und folgert:

- entweder G-Uhren sind nicht-synchronisiert,
- oder (falls sie es doch sind, wie G-Personal beteuert) G-Uhren laufen

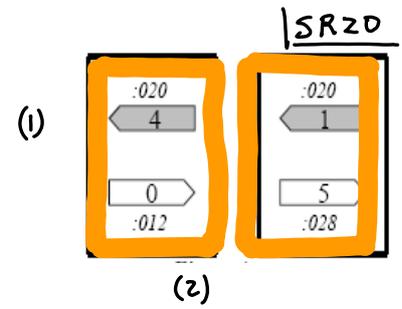
"Zeit-Dilatation": bewegte Uhren laufen

(4)

Übrigens: G-Personal folgert für W-Uhren! (Situation ist völlig)
E weiss: Grund für Verwirrung: G- und W-Uhren sind

Beobachtung 2:

G-Personal studiert Fotos von W-Zug zur festen G-Zeit :020, bemerkt und folgert: W-Uhren sind

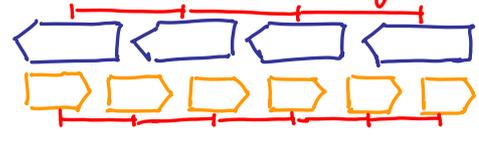


Asynchronität der W-Uhren laut G = $\frac{\Delta t_w}{\Delta x_w} =$

(2) ist ungleich (19.1) [von E gemessen], denn (wie E weiss): G-Uhren sind *auch asynchron!*

Längenvergleich:

Länge v. ()-W-Wagen = Länge v. ()G-Wagen (3)



$\Rightarrow \frac{\text{Länge 1 W-Wagen}}{\text{Länge 1 G-Wagen}} =$

(gleiche Schrumpffaktor wie 19.3) (4)

G-Personal meint: W-Längen

Längenkontraktion: bewegte Massstäbe

(5)

Übrigens: G-Personal folgert für W-Uhren! (Situation ist völlig)
E weiss: Grund für Verwirrung: G- und W-Uhren sind

SR21

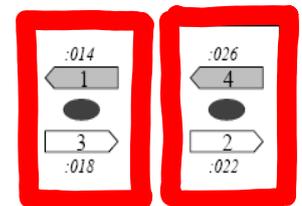
Asynchronität liefert effektive "Lichtgeschwindigkeit":

(16.1) $\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{v}{c^2} \Rightarrow c^2 =$ (19.2) = (20.2) $\Rightarrow c =$

Zwei Fotos eines Objekts, dass sich mit c bewegt, aus Sicht von W und von G (!) [obwohl W und G sich relativ zueinander bewegen!!]

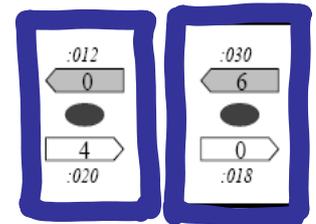
$(v_o)_G = \frac{(\Delta x_o)_G}{(\Delta t_o)_G} =$

$(v_o)_W = \frac{(\Delta x_o)_W}{(\Delta t_o)_W} =$



Zwei Fotos eines Objekts, dass sich (für W und G) mit > c bewegt:

$(v_o)_G = \frac{(\Delta x_o)_G}{(\Delta t_o)_G} = \frac{6}{18} = \frac{1}{3} > \frac{1}{4}$ $(v_o)_W = \frac{(\Delta x_o)_W}{(\Delta t_o)_W} = \frac{4}{2} = 2 > \frac{1}{4}$



Aber: W und G sind sich über die Reihenfolge, in der die Fotos entstanden sind!
Das illustriert allgemeine Tatsache: würde sich ein Objekt schneller als Licht bewegen, würden sich immer zwei IS finden, die sich wären über die Reihenfolge von Ereignissen in der Geschichte (Bahnkurve) des Objekts. Unhaltbare Inkonsistenz!