

$c \equiv 299.792.458$ m/s per Definition!

Das ist eigentlich
Definition des Meters:

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

Einsteins Postulate:

- 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)

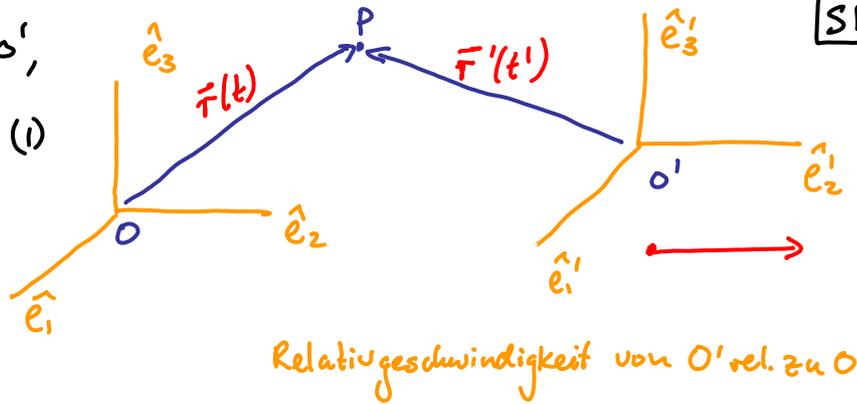
Fazit: Relativ zu was bewegt sich Licht mit c ?

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 .



SR7

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)

(BB6.3)

Liefert Widerspruch zur Galilei-Transformation : $x' =$ (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: **Synchronisationsprobleme !!**

Problem der Gleichzeitigkeit

Zeitmessung ist Aussage über gleichzeitige Ereignisse:

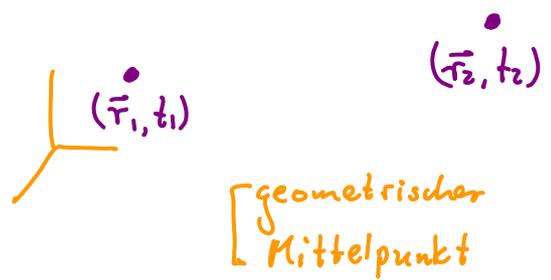
"Zug kommt um 7 Uhr" heisst:

"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 von E_2 ausgesandt, gleichzeitig im geometrischen Mittelpunkt 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)

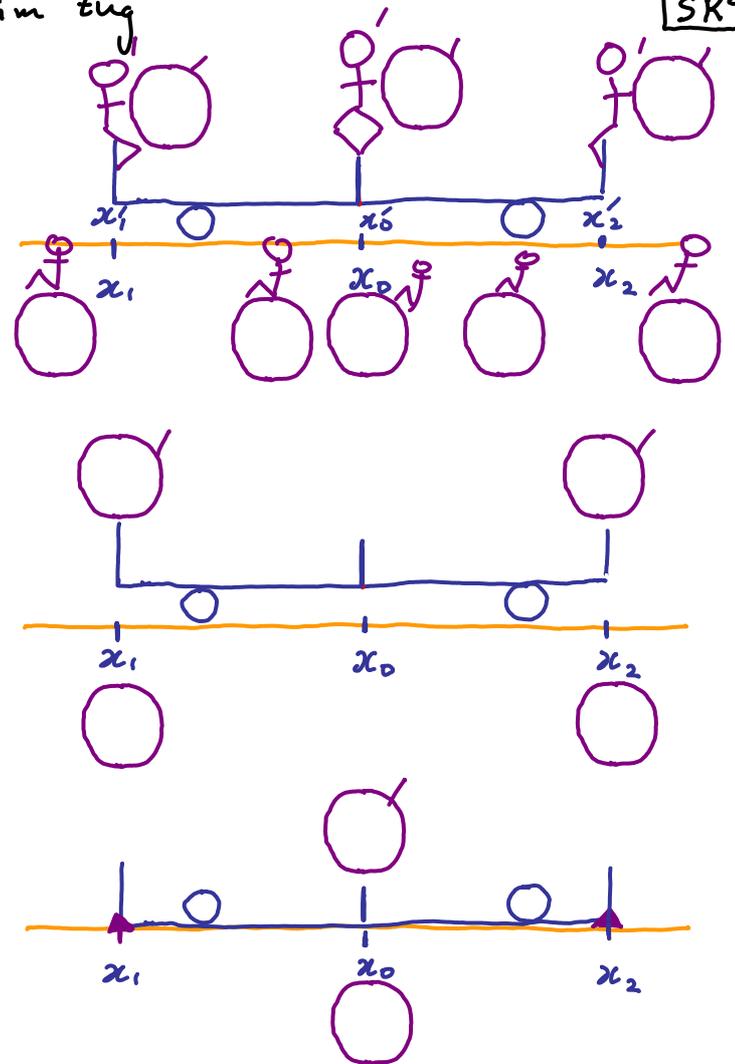
Fall 1: Wagen O' steht im Bahnhof O .
Alle O -Uhren sind miteinander synchronisiert,
Alle O' -Uhren sind miteinander synchronisiert.
Von Wagenmitte werden gleichzeitig,
zur Zeit t_0 zwei Photonen
abgeschossen

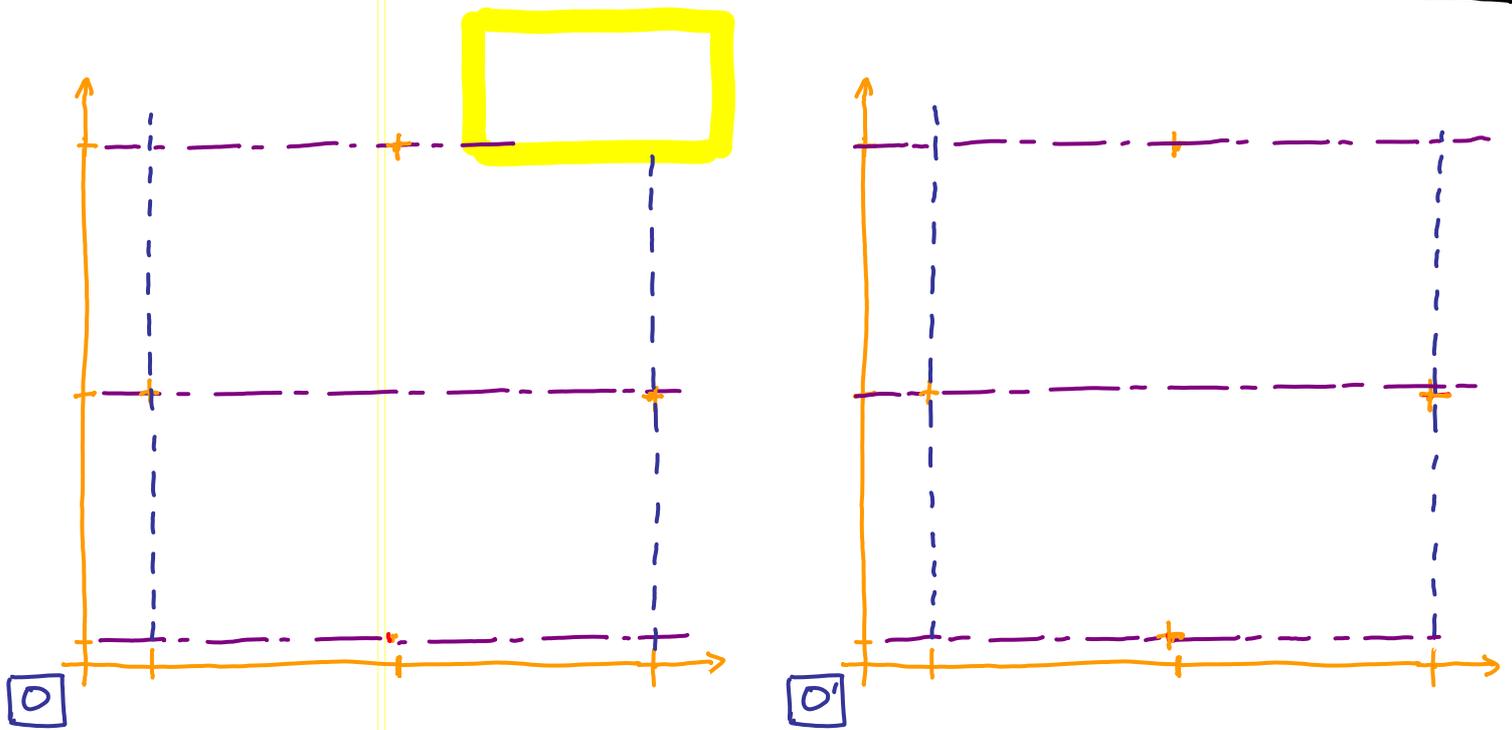
O und O' sehen dasselbe:
Photonen kommen
hinten und vorne an, zur Zeit t_1

(laut O),
(laut O'),

und zünden zwei Knallerbsen.
Die machen Flecken auf die Schiene,
und schicken Photonen zurück,

welche die Wagenmitte
erreichen, zur Zeit t_2





- Blau: "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: $\tan \alpha_c = c$) (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

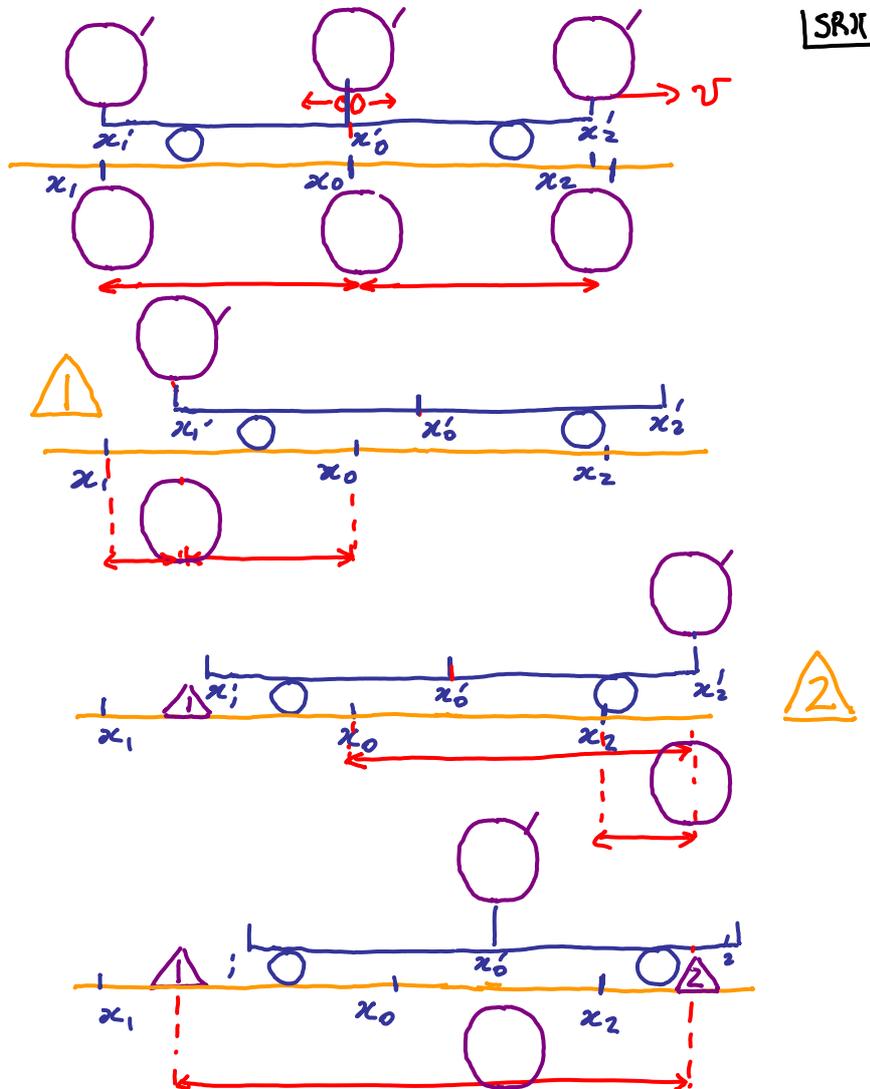
passieren

zur Zeit

Weil diese Ereignisse am selben Ort

stattfinden, sieht auch O sie

zur Zeit



Raum-Zeit-Diagramm für Fall 2: Wagen O' fährt durch Bahnhof O

SR12

① Wie bewegt sich Wagen?

Zum Zeitpunkt $t_m = t'_m$
 Sei $x_m = x'_m$

Geschw = v , $x_{mitte} = x'_0$

Steigung: $\tan \alpha =$

② Wie liegen x' - und t' -Achsen im O-Diagramm?

Linien mit $x' = \text{konst.}$:

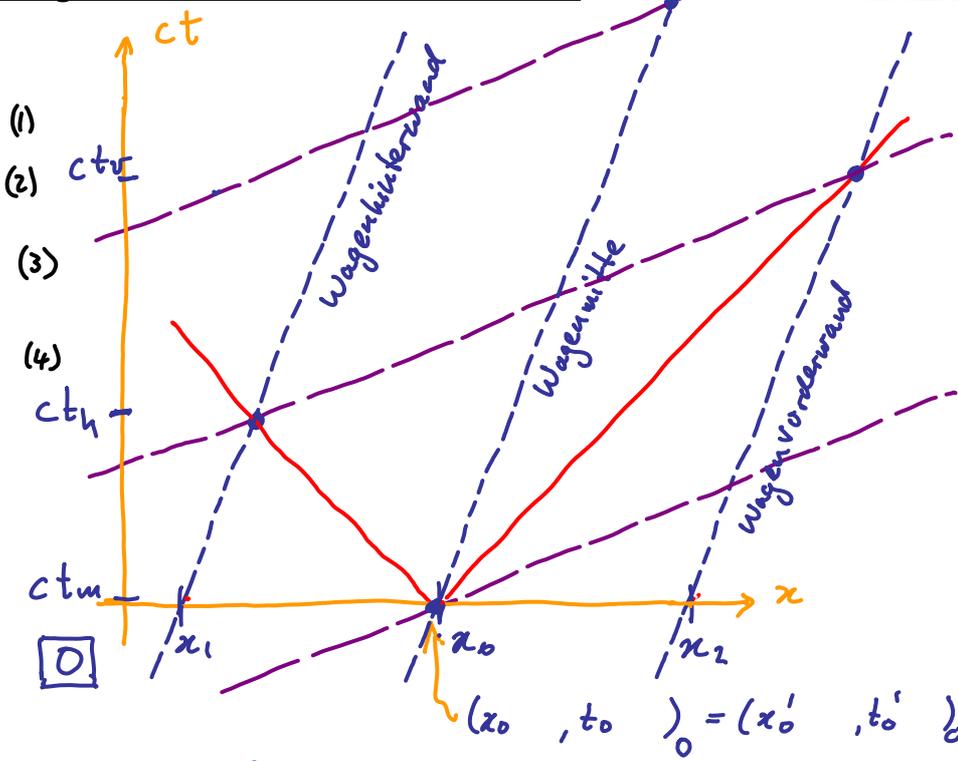
ct' -Achse:

Photonen zurück bei $x' = 0$ z.B.

Steigung der t' -Achse: $\tan \alpha =$

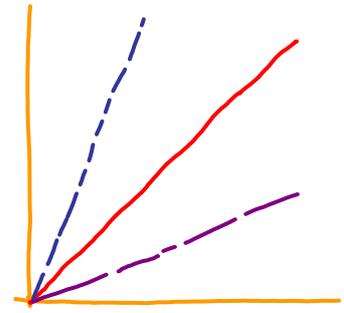
③ Linien mit $t' = \text{konst.}$: Lichtblitze sind in O' gleichzeitig vorne und hinten angekommen:

Alle Geraden mit $t' = \text{konst.}$ sind $\Rightarrow x'$ -Achse:



(7) $\left\{ \begin{array}{l} \text{alle Geraden mit } x' = \text{konst. sind} \\ \text{sonst würden Geraden mit } x'_1 \neq x'_2 \text{ sich irgend=} \\ \text{wann kreuzen, im Widerspruch zu} \end{array} \right.$ (8)

Winkel in Raum-Zeit-Diagramm?



Winkel zwischen Photonbahn und

- x -Achse:
- ct -Achse:
- gegenläufiger Photonbahn:
- x' -Achse:
- ct' -Achse:

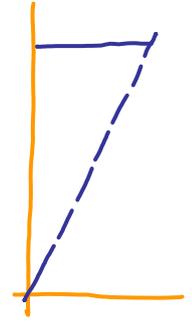
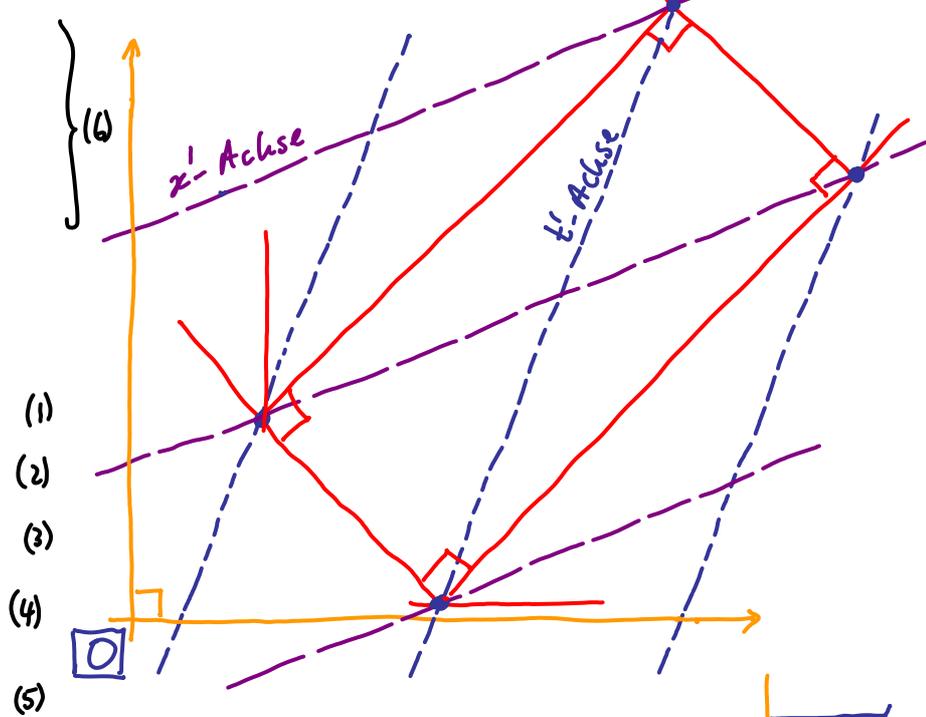
\Rightarrow Photonbahnen halbieren immer Winkel zwischen x' - und ct' -Achse

$\Rightarrow \bar{\alpha} =$ (6) und $\bar{\beta} =$ (6) (7) $\Rightarrow 90^\circ = \alpha + \bar{\beta} =$ (7) (8)

Wir wissen bereits, dass

$\tan \alpha =$ (2.4) $\Rightarrow \tan \beta =$ (8)

SR13



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

Wagen hat Länge
 $L =$

Abstand zwischen Flecken Δ_1, Δ_2

$D =$

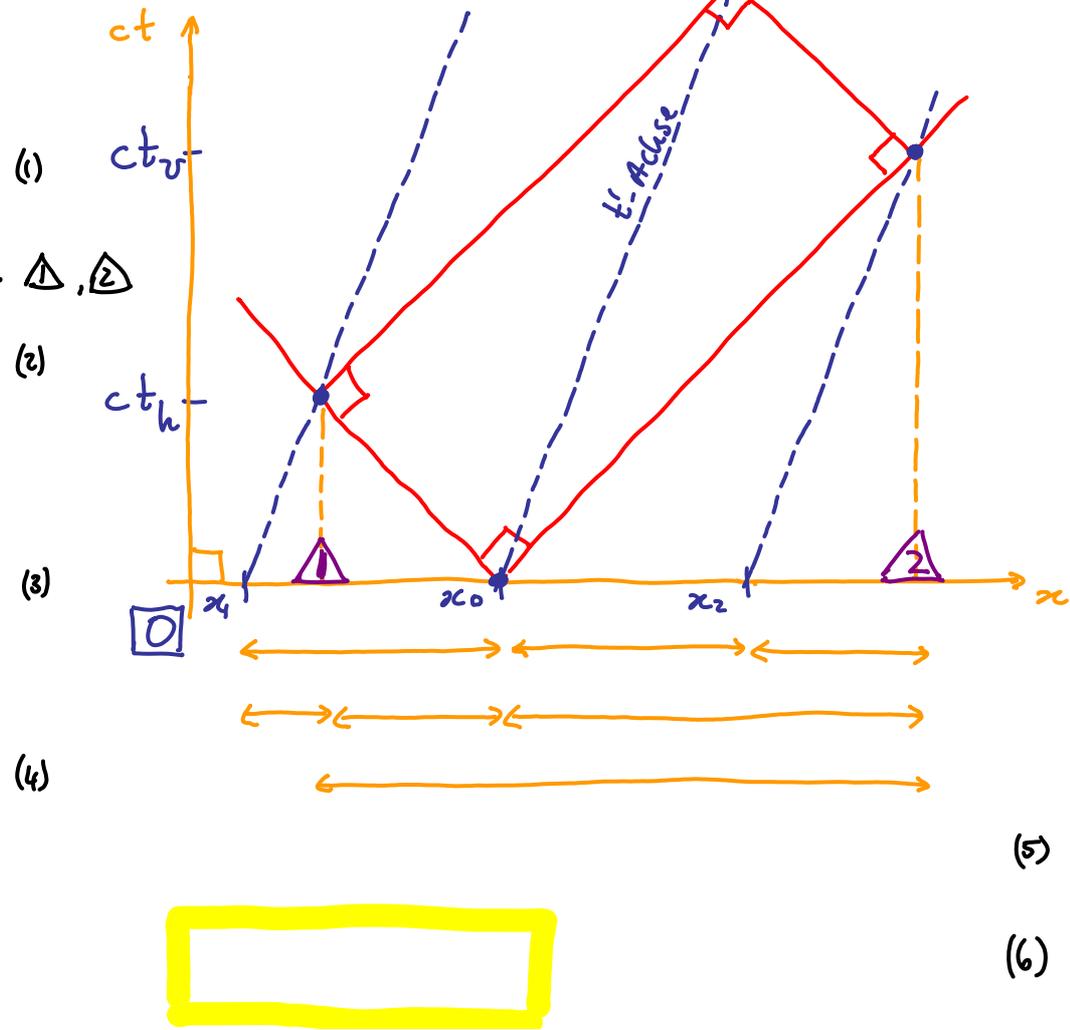
Weg des L-Photons:

$ct_h =$

Weg des R-Photons:

$ct_r =$

(4) - (3):



(5)
(6)

Allgemeine Regel (R1):

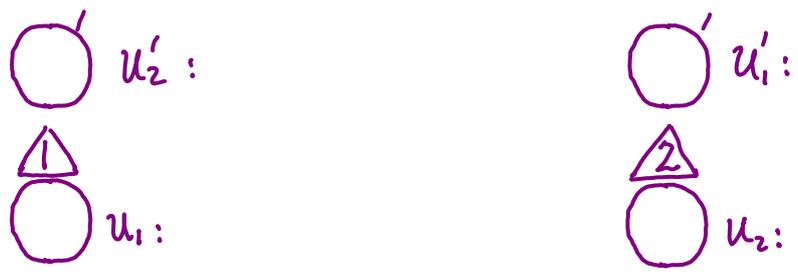
Falls zwei Ereignisse E1, E2 (Knall 1, Knall 2) gleichzeitig sind in einem IS (hier), dann gilt in einem zweiten IS (hier), das sich mit Geschw. in Richtung von (Knall) nach (Knall) bewegt, dass

E1 um die Zeitspanne E2 stattfindet,

(1)

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

O baue (O-)synchronisierte Uhren an den Flecken auf, und O' (O'-)synchronisierte Uhren U1', U2' 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 U1

relativ zu U2 !!

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)

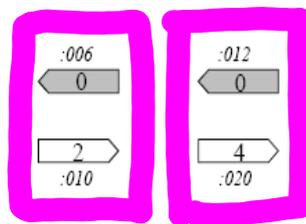
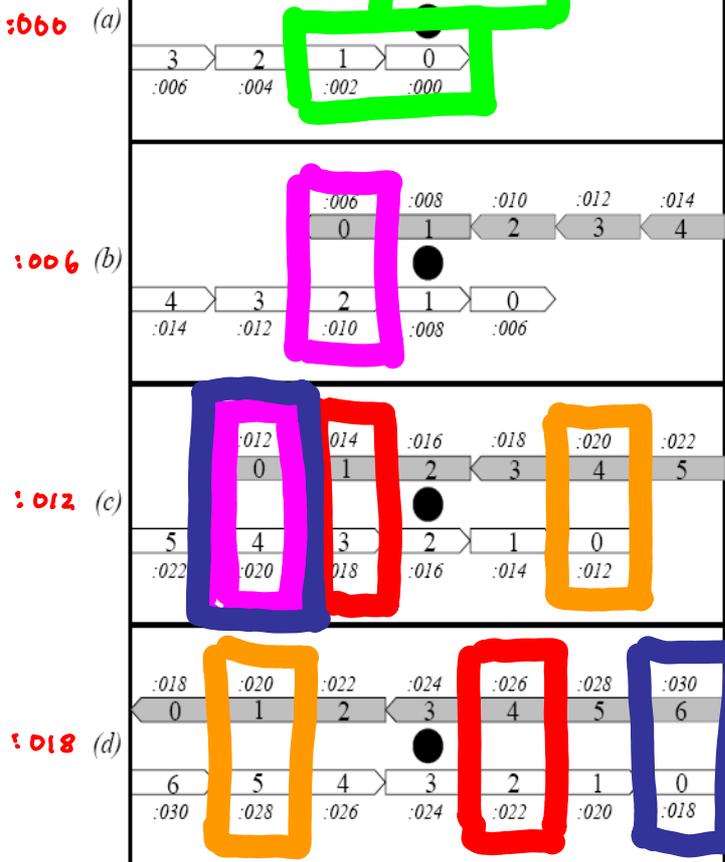
Laserforscher können Pulse mit Dauer 10^{-15} – 10^{-18} Sekunden auflösen.
femtosec attosec (4)

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

SR17

Filmsequenz v. Bahnhofskamera

Bahnsteig Uhrzeit:



(Asynchronität)_E: $2 \frac{v}{c}$

$v_w = \frac{\Delta x_w}{\Delta t_w} = \frac{1}{5} \text{ WFT}$

Zeitdilatation:

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

Längenkontraktion:

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

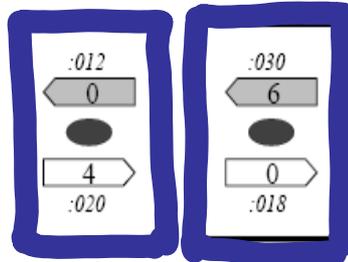
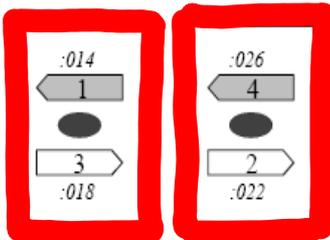
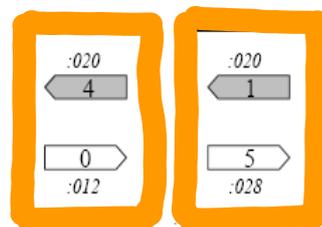
Asynchronität d. W-Wagen

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

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:

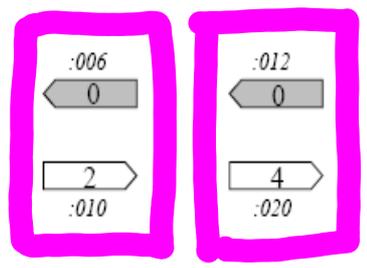
E vergleicht zu gegebenem Zeitpunkt verschiedene Wagen desselben Zuges, und bemerkt eine Asynchronität:

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

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)

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

(3)
Schrumpffaktor

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

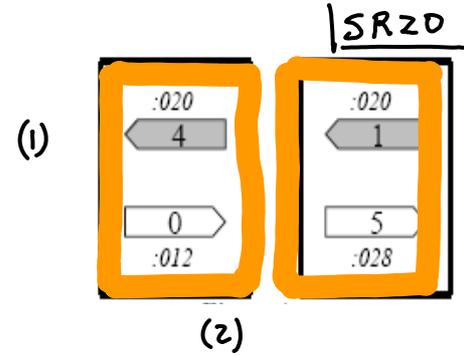
"Zeit-Dilatation": bewegte Uhren laufen

(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

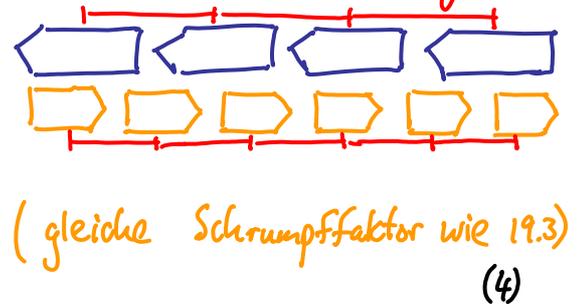


Asynchronität der W-Uhren laut G = $\frac{\Delta t_w}{\Delta x_w} =$

(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)



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

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

Asynchronität liefert effektive "Lichtgeschwindigkeit":

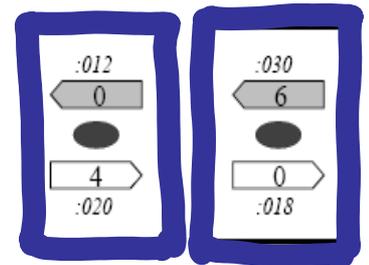
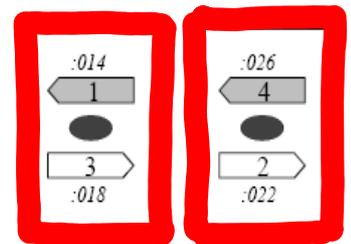
SR21

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

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!