

Experimentelle Physik I

WS 16/17

Veranstaltung 4010011

<https://campus.studium.kit.edu/event/H7Ke2neVDU6OCiWVculqYw>

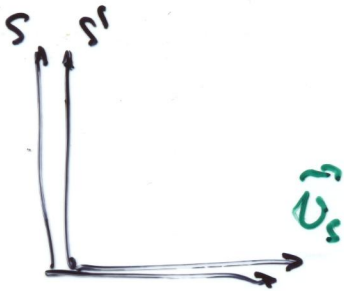
PD Dr. Andreas B. Meyer (KIT und DESY)

20. Vorlesung: 4.2 Relativistische Mechanik (2)

Zusammenfassung

4 Relativistische Mechanik

4.1. Bewegte Bezugssysteme



Lineare Addition

Galilei-Transformation
gilt für $v \ll c$

Experimenteller Befund!

4.2. Relativistische Kinematik

Spezielles Relativitätsprinzip

- ① Alle Inertialsysteme gleichwertig (wie schon bei N.)
- ② Lichtgeschw. ist in allen Inertialsystemen gleich

Es gibt keine absolute Zeit $\frac{\Delta x}{\Delta t} = c = \frac{\Delta x'}{\Delta t'}$

4.2.1 Lorentz-Transformation

$$x' = (x - v_s t) \cdot \gamma$$

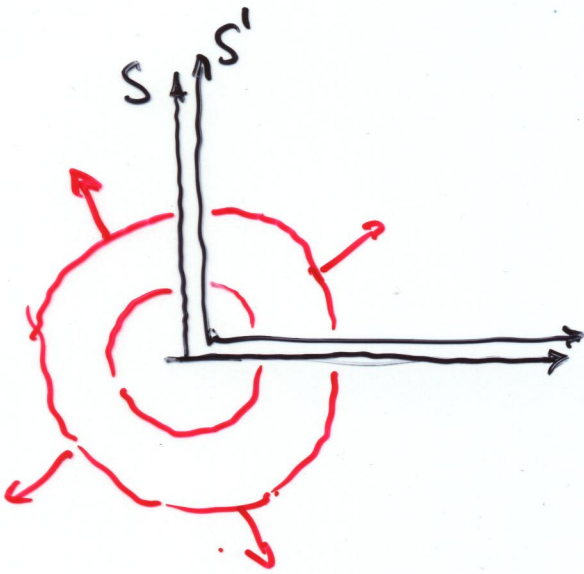
$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \left(t - \frac{v_s}{c^2} \cdot x\right) \gamma$$

$$\gamma := \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \gamma \geq 1$$

Beispiel: Lichtwelle $S(t=0) = S'(t'=0)$



$$\bullet r(t) = c \cdot t \xrightarrow{\text{L.T.}} r'(t) = c \cdot t'$$

• Welle hat in beiden Systemen
Geschw. c

$$\bullet t \neq t'$$

4.2.2 Relativistische Effekte

- Zeit ist eine weitere Dimension.
Gleichzeitigkeit abhängig vom Bezugssystem
- Lichtgeschwindigkeit ist universelle Konstante
Längen / Zeitintervalle kontrahieren / expandieren

- Zeitdilatation $T = \gamma T'$

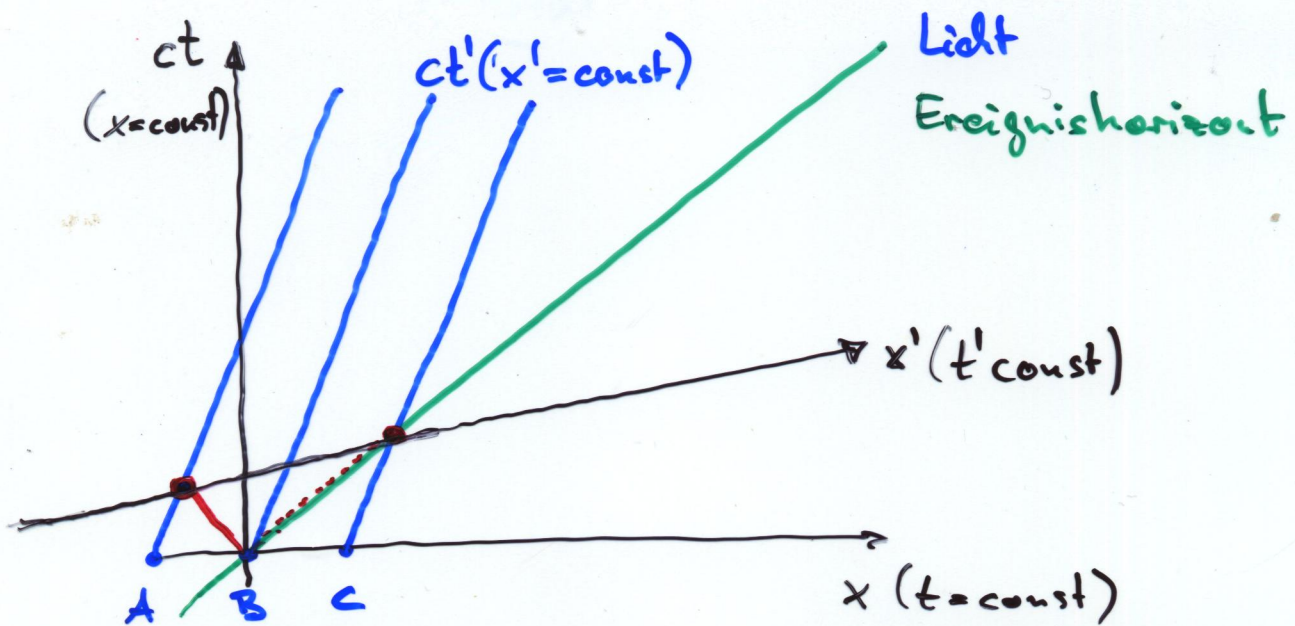
Zeit T aus Sicht von S ist verlängert gegenüber
Zeit T' aus Sicht von bewegtem System S'

- Längenkontraktion $L = \frac{1}{\gamma} L'$

Abstand L aus Sicht von S ist verkürzt gegenüber
Abstand L' aus Sicht von bewegtem System S' .

Raum-Zeitdiagramm

Minkowski-Diagramm



Ereignis: bestimmt durch (ct, x)

$t = \text{const}$ für alle horizontale Linien

$x = \text{const}$ für alle vertikalen Linien

A, B, C gleichförmig bewegt in S \Rightarrow in Ruhe in S'

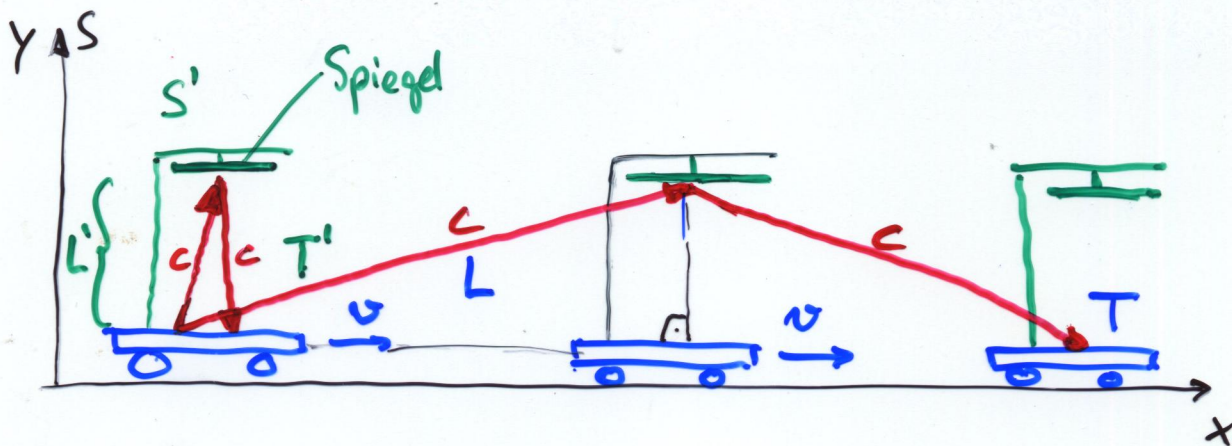
B sendet Lichtstrahl aus

In S': A und C werden gleichzeitig erreicht

In S: A und C werden nicht gleichzeitig erreicht

- In S erscheinen Koordinaten von S' geneigt.

1) Zeitdilatation



$$S': T' = \frac{2L'}{c}$$

$$S: T = \frac{2L}{c}$$

$$L = \sqrt{L'^2 + \left(v \frac{T}{2}\right)^2}$$

$$\frac{c^2 T^2}{4} = L'^2 + \frac{v^2 T^2}{4}$$

$$T = \frac{2L'}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2L'}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2L'}{c} \cdot \gamma$$

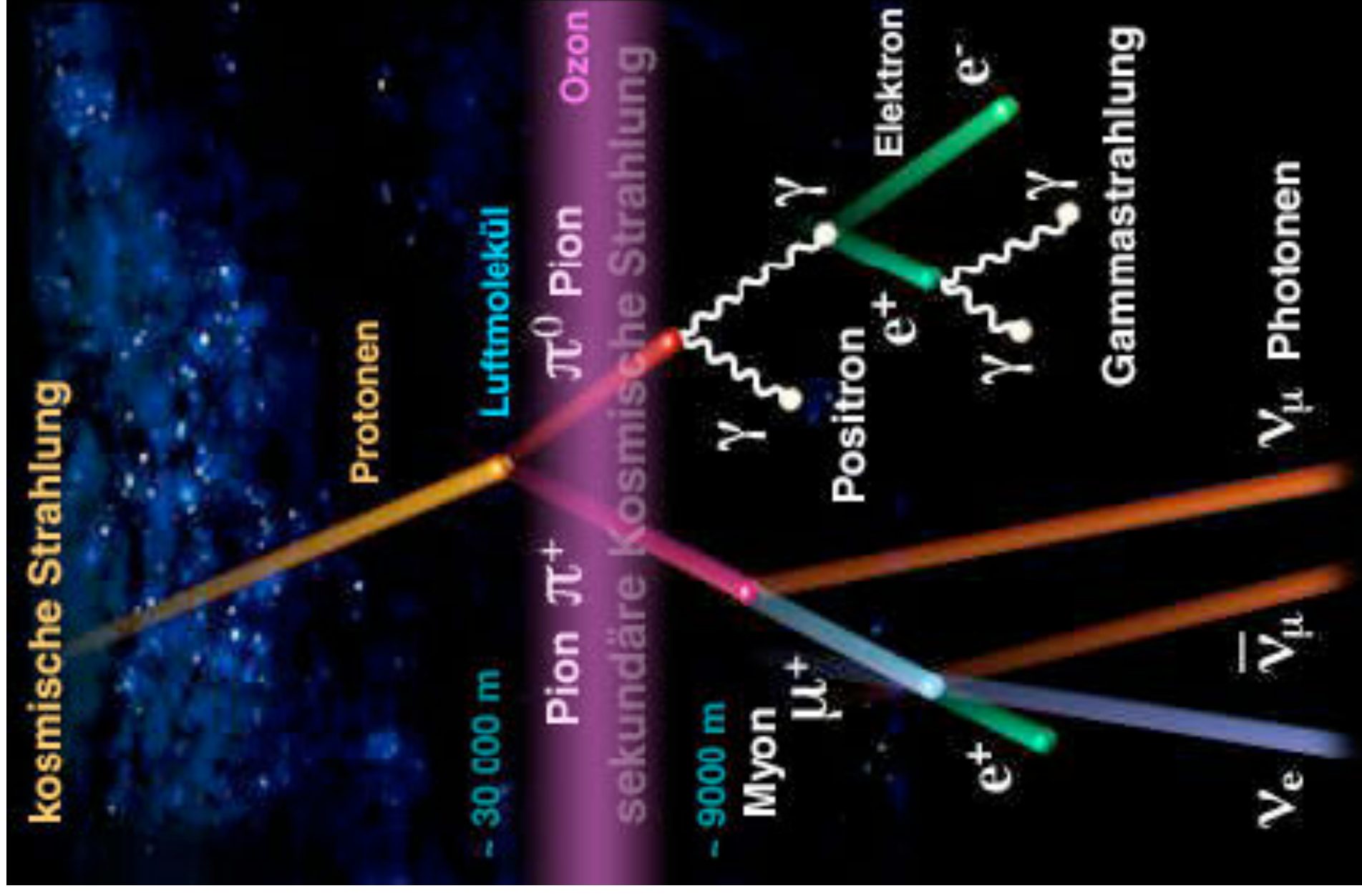
$$T = \gamma T' \quad \gamma \geq 1$$

- Zeit aus Sicht von S ist verlängert gegenüber Zeit aus Sicht von bewegtem System S'

Myonen aus kosmischer Höhenstrahlung

Myon μ :

- schweres Elektron ($m_\mu \sim 200 m_e$)
- μ^+ und μ^-
- Lebensdauer: $\tau = 2.2\mu s$
- Rate auf Erdoberfläche: $\sim 200 m^{-2}s^{-1}$

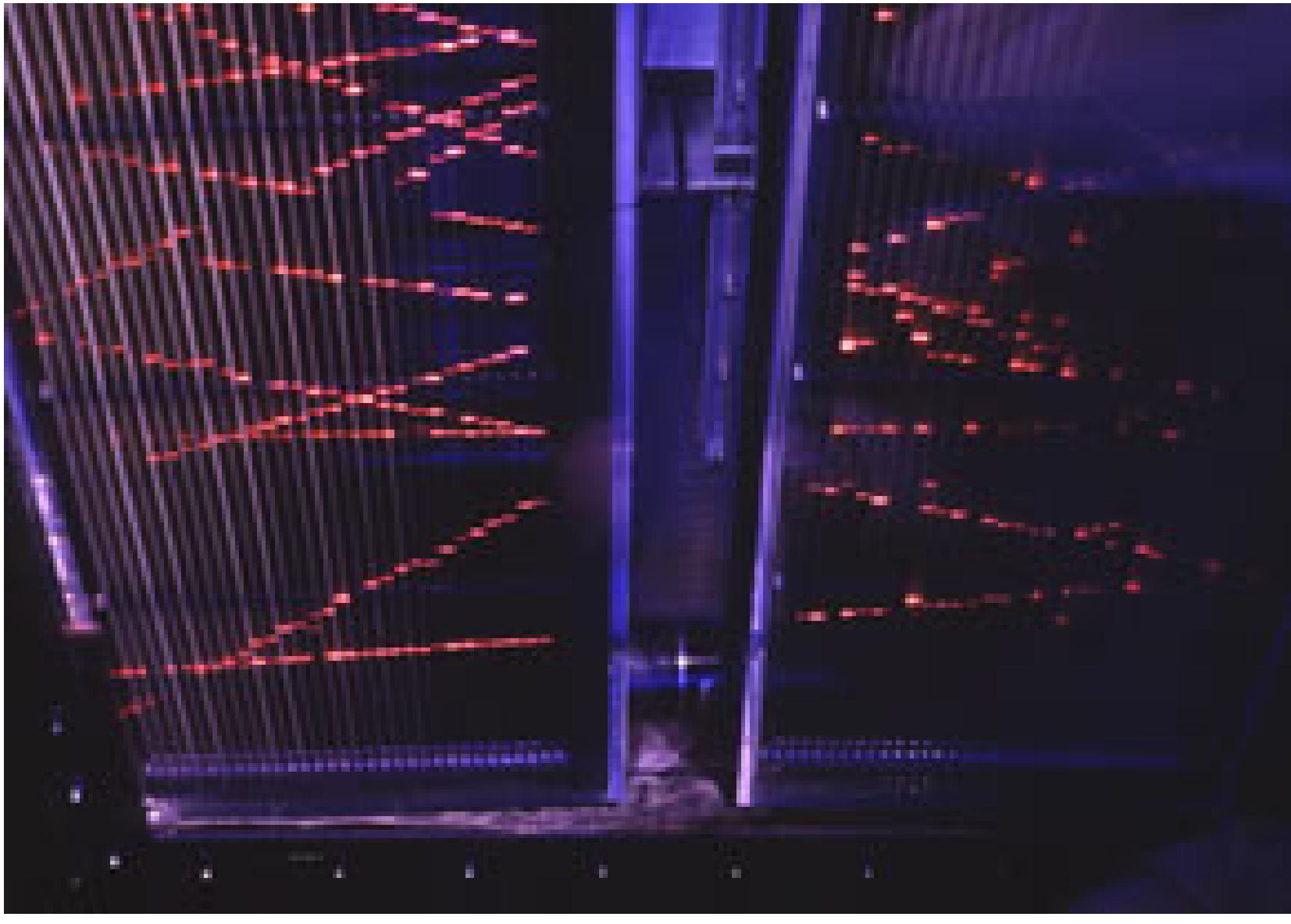


Myonen aus kosmischer Höhenstrahlung

Myon μ :

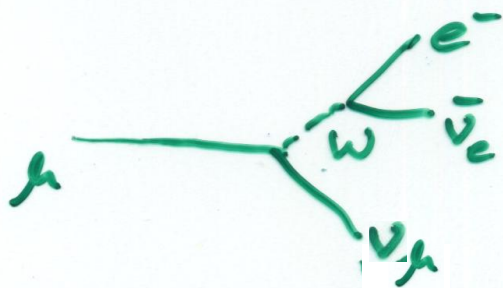
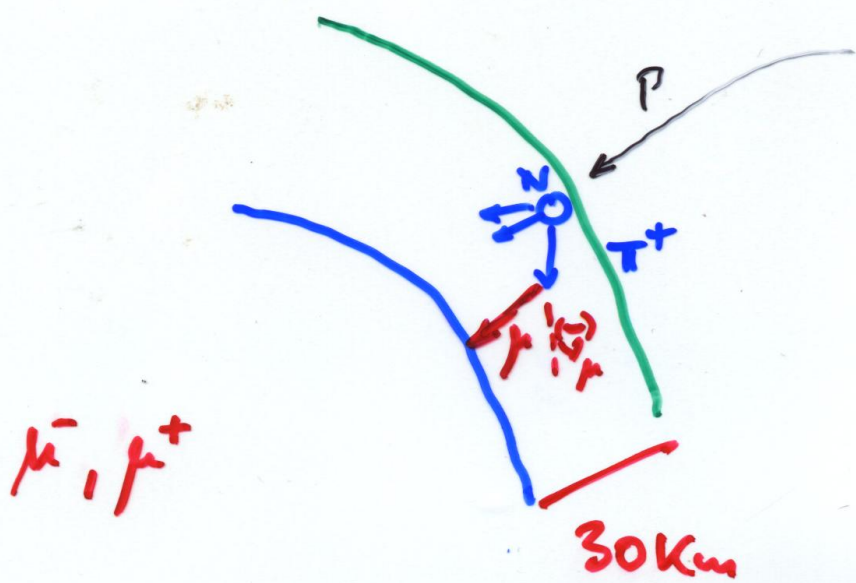
- schweres Elektron
($m_\mu \sim 200 m_e$)
- μ^+ und μ^-
- Lebensdauer: $\tau = 2.2\mu\text{s}$
- Rate auf Erdoberfläche:
 $\sim 200 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Funkenkammer



Experimentelle Bestätigungen

a) Kosmische Höhenstrahlung



$$\tau_{\mu} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$L' = v \cdot \tau_{\mu} = c \cdot 2,2 \mu\text{s} = 660 \text{ m}$$

Dilatation

$$L = v \cdot \gamma \cdot \tau_{\mu}$$

$$\text{Für } \gamma = 50 \quad \Rightarrow \quad v_{\mu} = 0,99998 c$$

$$\Rightarrow L = 33 \text{ km}$$

Exp. Best. (forts):

b) Teilchenphysikexperimente

c) Flugzeugexperimente Hafele-Keating Science 14 July 1972

- Ostrichtung: größere Geschw. bzgl. Inertialsystem
⇒ Uhr verlangsamt

gemessen: $(-59 \pm 10) \mu\text{s}$ erwartet: $(-40 \pm 23) \mu\text{s}$

- Westrichtung: kleinere Geschw. bzgl. Inertialsystem
⇒ Uhr beschleunigt

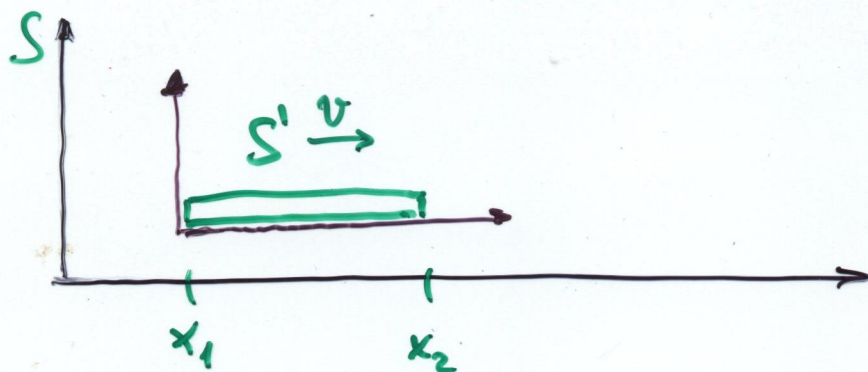
gemessen $(273 \pm 7) \mu\text{s}$, erwartet: $(275 \pm 21) \mu\text{s}$

- Berechnungen beinhalten ART-Effekt, daß Uhren in stärkeren Schwerfeld langsamer gehen.
Betrifft Ost- u. Westflug in gleicher Weise.

Anwendung heute:

GPS: ART u. SRT korrektur

2.) Längenkontraktion



L.T.:

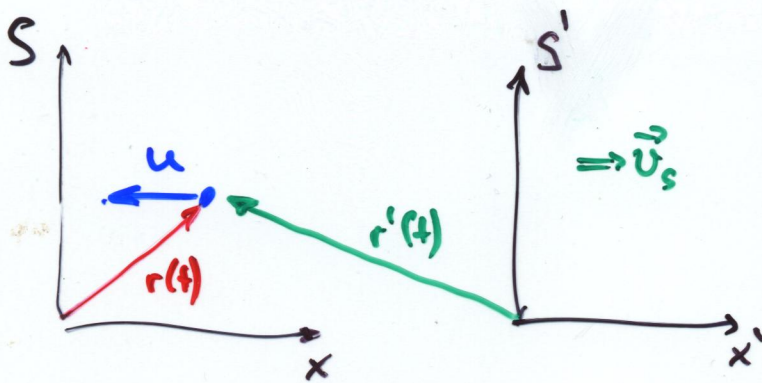
$$x_2' = \gamma \cdot (x_2 - vt)$$
$$x_1' = \gamma \cdot (x_1 - vt)$$

$$\underbrace{x_2' - x_1'}_{L'} = \gamma \cdot \underbrace{(x_2 - x_1)}_L$$

- Abstände von bewegtem System verkürzt

$$L = \frac{1}{\gamma} \cdot L'$$

3.) Addition von Geschwindigkeiten



$$x(t) = -u \cdot t$$

$$x'(t) = \gamma \cdot (x(t) - v_s \cdot t) = \gamma \cdot (- (u+v)t)$$

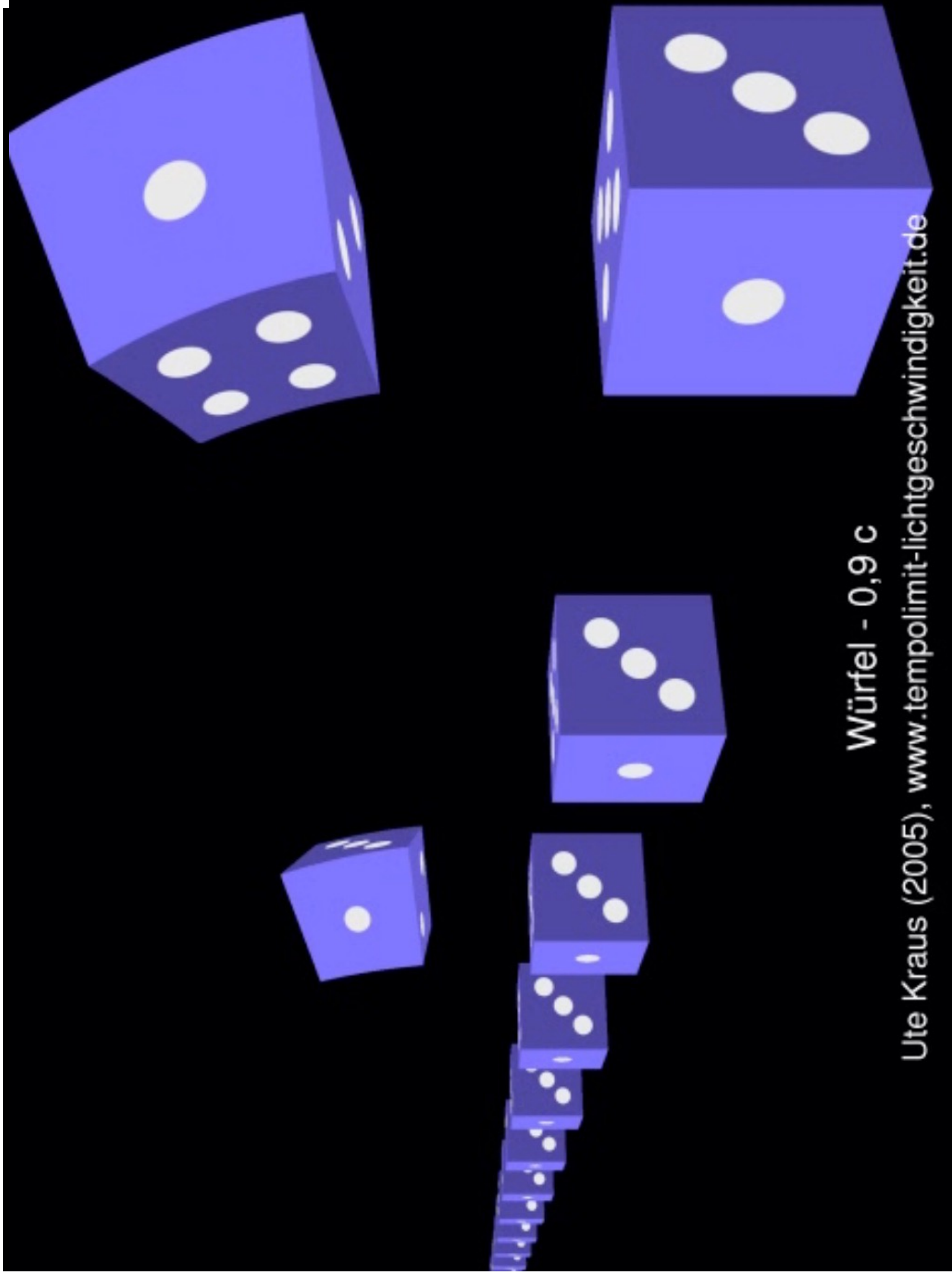
$$t' = \gamma \cdot \left(t - \frac{v \cdot x(t)}{c^2} \right)$$

$$u' = \frac{x'}{t'} = - \frac{(u+v)}{1 + \frac{u \cdot v}{c^2}} \quad |u'| < |u+v| < |c|$$

$$1.) \quad u = 0,8c \quad v = 0,8c \quad u' = \frac{1,6c}{1,64} = 0,98c$$

$$2.) \quad u = c \quad v = 0,8c \quad u' = c$$

Simulation relativistischer Effekte (Würfel)



Visueller Eindruck entsteht durch gleichzeitig im Auge eintreffende Lichtstrahlen
Wir interpretieren das Erscheinen der Rückseite als Drehung

Die unerwartet sichtbare Rückseite

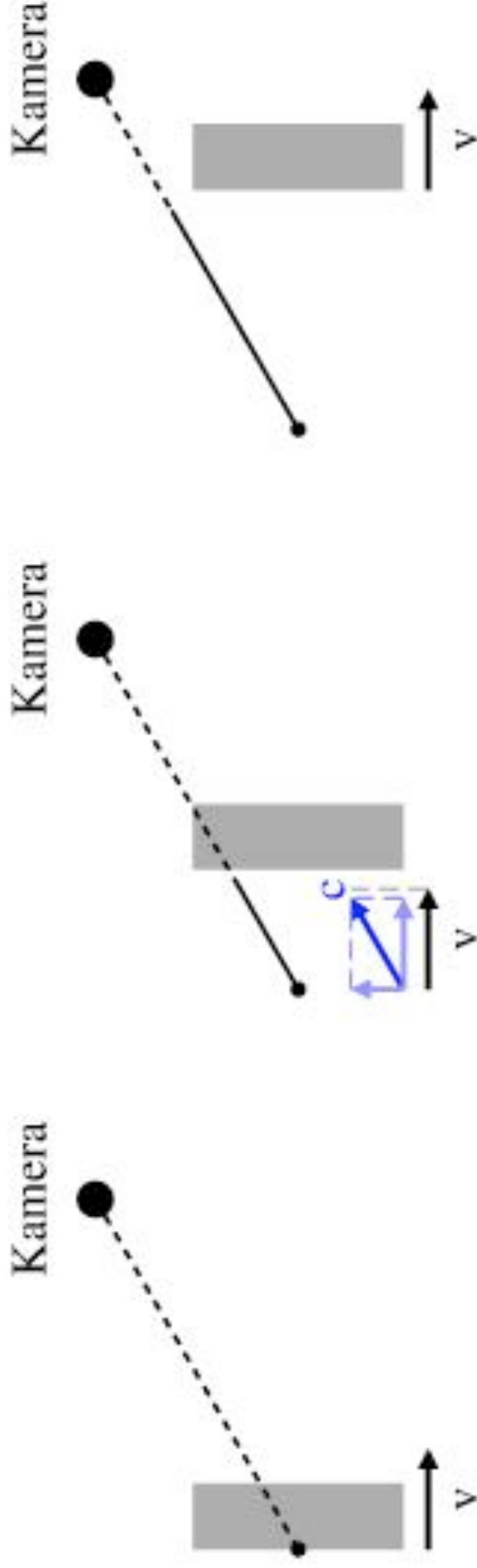
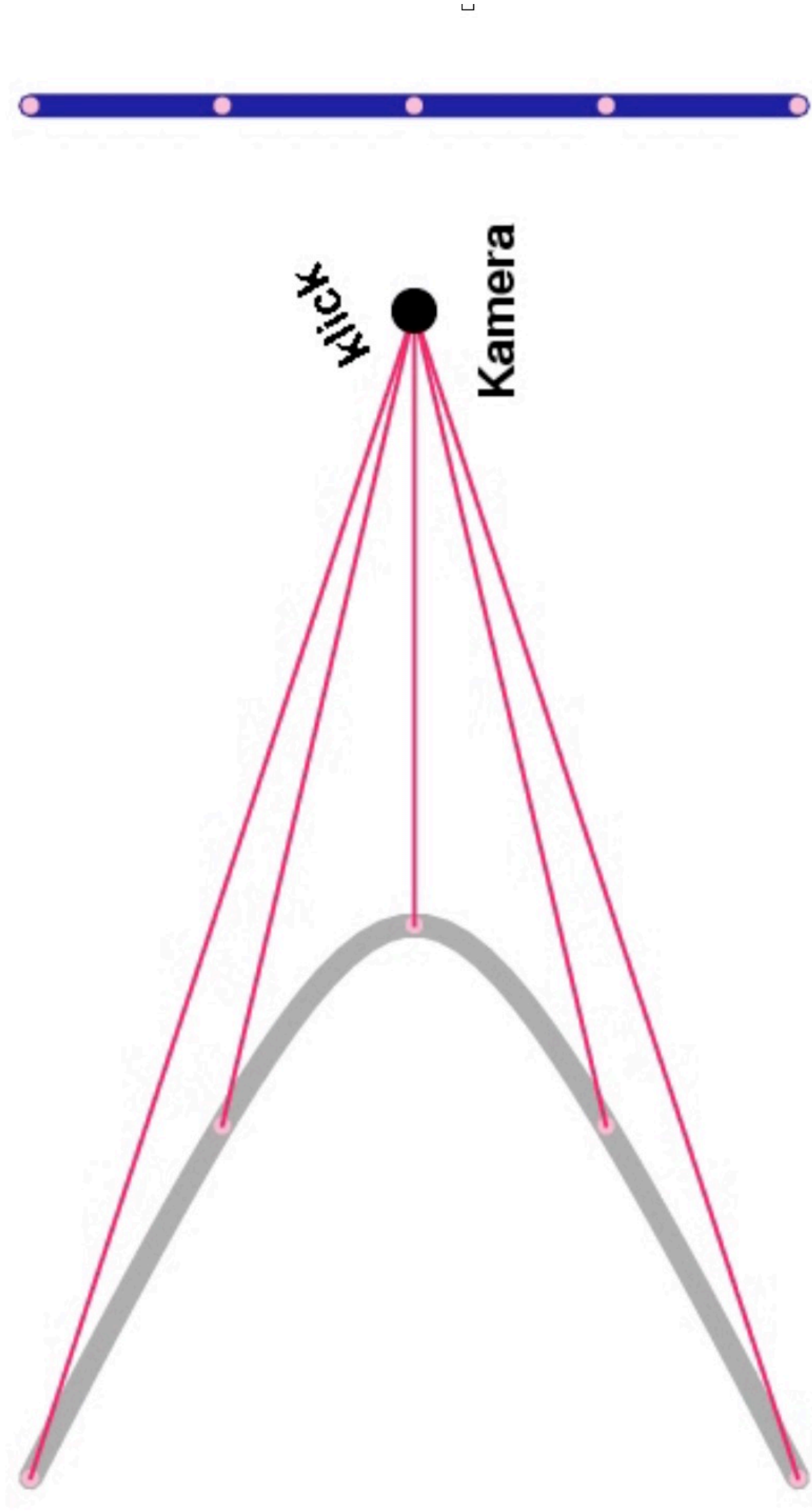


Bild entsteht durch gleichzeitig (im System der Kamera) eintreffendes Licht
Unterschiedlich lange Lichtwege führen zu Verzerrungen

Sobald die horizontale Komponente der Lichts (c) von v übertroffen wird, wird die Rückseite sichtbar.
Der Würfel macht dann schnell genug den Weg frei.
Der Würfel bewegt sich hier mit 95% c und ist daher in Flugrichtung auf 31% seiner Ruhelänge kontrahiert.
Dünne durchgezogene Linien markieren zurückgelegte Lichtwege, punktierte Linien deren weiteren Verlauf.

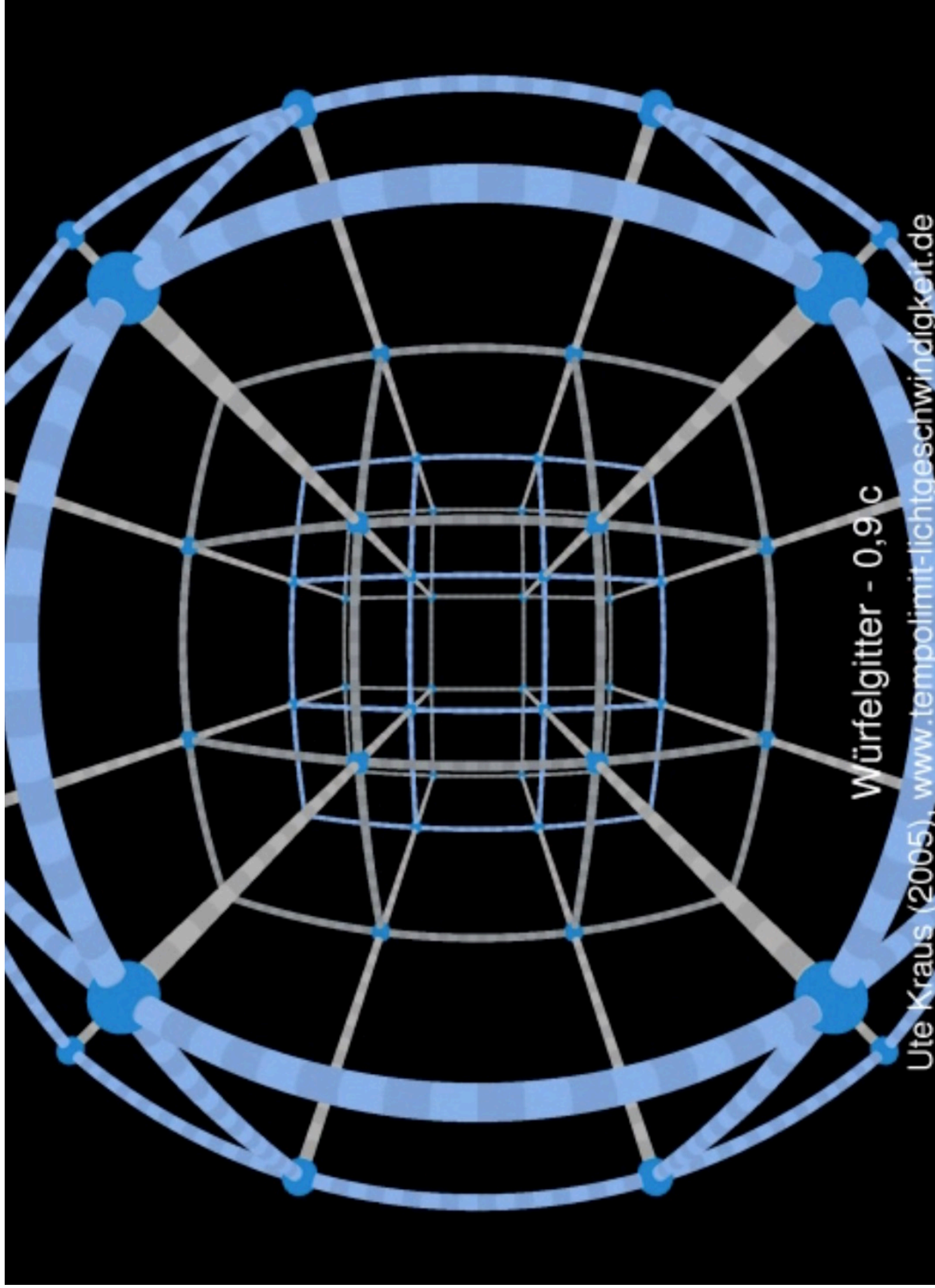
Stab: Emissionspunkte gleichzeitig eintreffenden Lichts liegen auf einer Hyperbel



Stab - $0,9c$

Ute Kraus (2005), www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de

Sich näherndes Gitter



Würfelgitter - $0,9c$

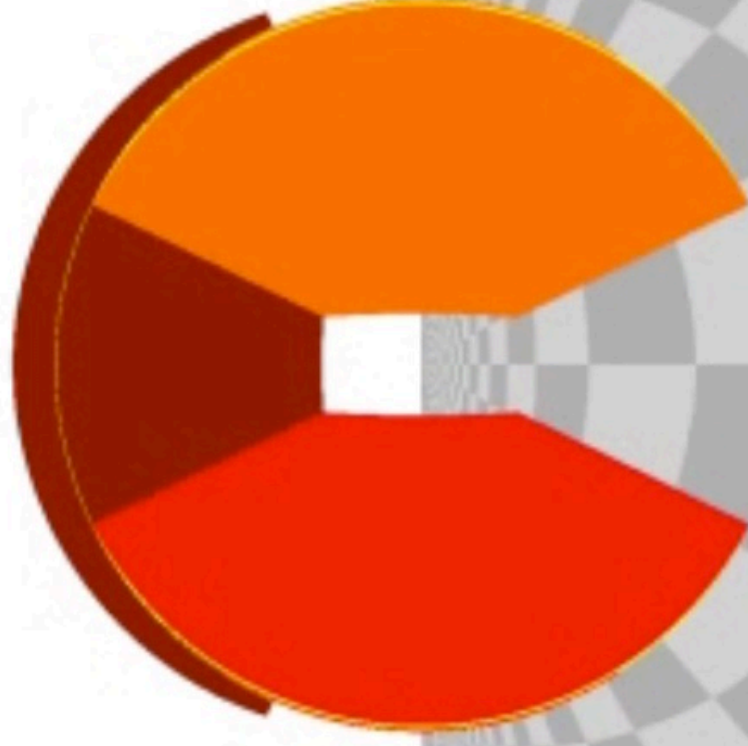
Ute Kraus (2005), www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de

Flug durch Tübingen



Flug durchs Brandenburger Tor

Vorderseite: gelb, Innenseiten: rot, Rückseite: blau



Tor - 0,99 c

Ute Kraus (2005), www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de