

Die Vermessung der Raumzeit

Astronomie für Nicht-Physiker: Die Vermessung des
Weltalls

Markus Pössel

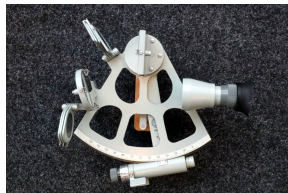
Haus der Astronomie

9. Januar 2020

Raumzeit

Aus "Vermessung der Erde":

- Werkzeuge, um Positionen im Raum zu messen und zu dokumentieren
- Zeitmessung mit Uhrentransport



Links und Mitte: Theodolit und Sextant, eigene Bilder. Rechts: Harrisons Chronometer H5 [eigener Ausschnitt], Bild: Racklevel on English Wikipedia unter Lizenz CC BY 2.5

Plan: Ereignisse (Ort und Zeit) dokumentieren

Raumzeitdiagramme

Betrachte eindimensionale Situation zu fester Zeit



Vereinfachte Darstellung:



Bild aus Pössel, *Das Einstein-Fenster*, Kap. 2

Raumzeitdiagramm: Vorarbeiten



Bild aus Pössel, *Das Einstein-Fenster*, Kap. 2

Raumzeitdiagramm: Vorarbeiten

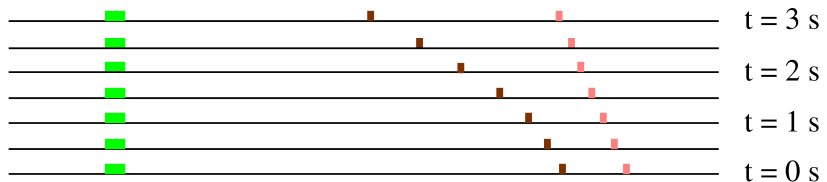


Bild aus Pössel, *Das Einstein-Fenster*, Kap. 2

Raumzeitdiagramm

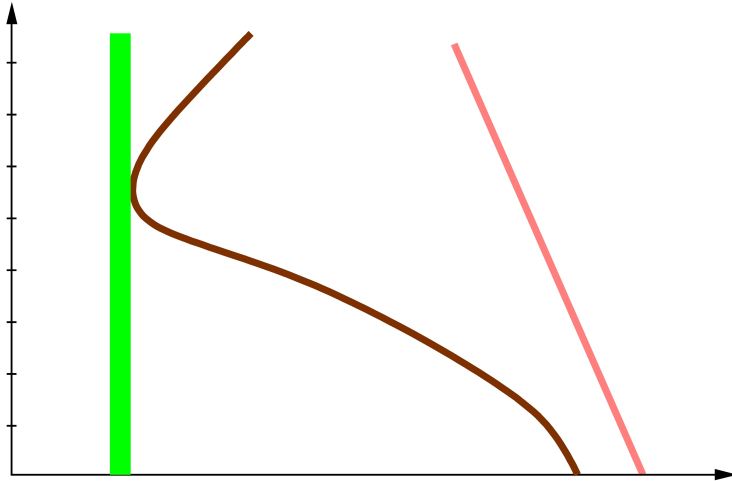


Bild aus Pössel, *Das Einstein-Fenster*, Kap. 2

Raumzeitdiagramm

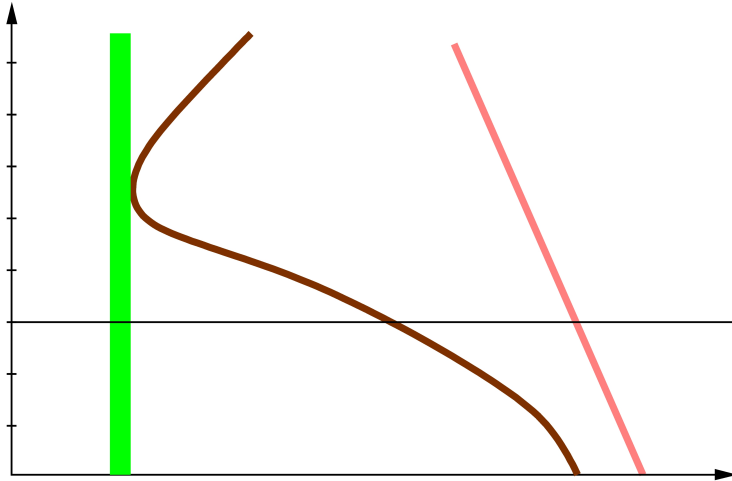


Bild aus Pössel, *Das Einstein-Fenster*, Kap. 2

Raumzeitdiagramm

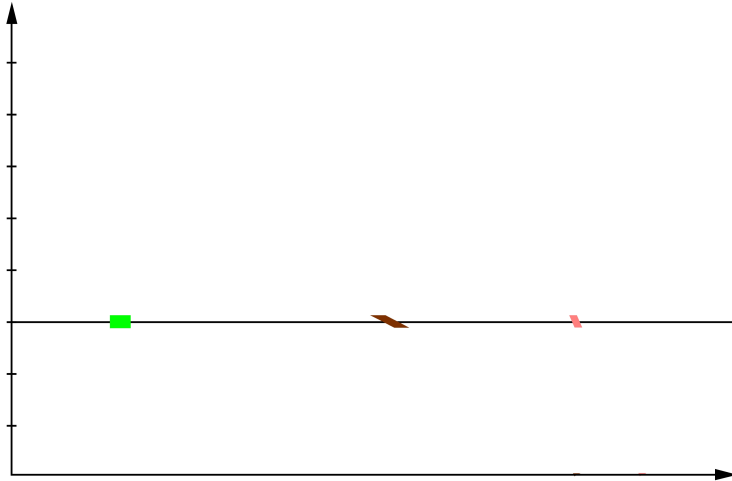
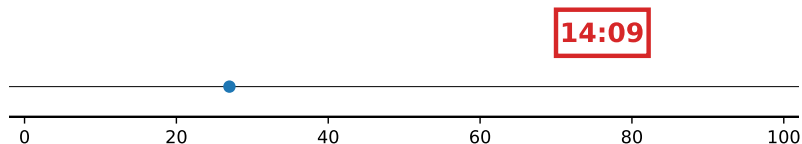


Bild aus Pössel, *Das Einstein-Fenster*, Kap. 2

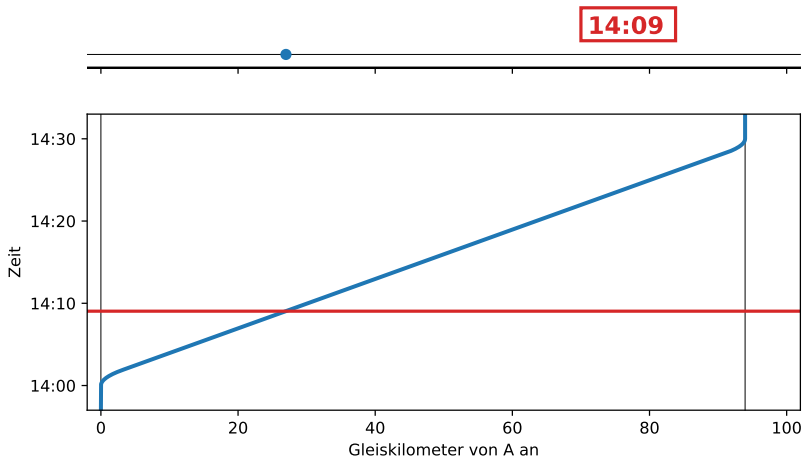
Einfachster Fall: eindimensional

Gedankenexperiment: Eisenbahn entlang einfacher Strecke

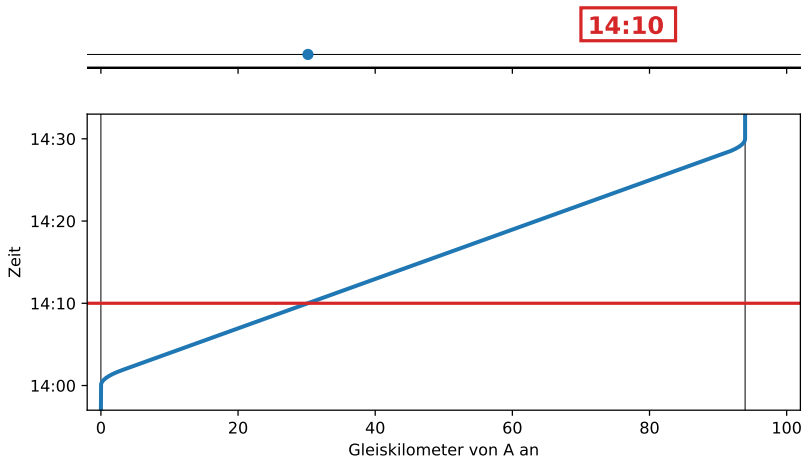
Streckenmessung in Gleiskilometer, Zeit als Uhrzeit



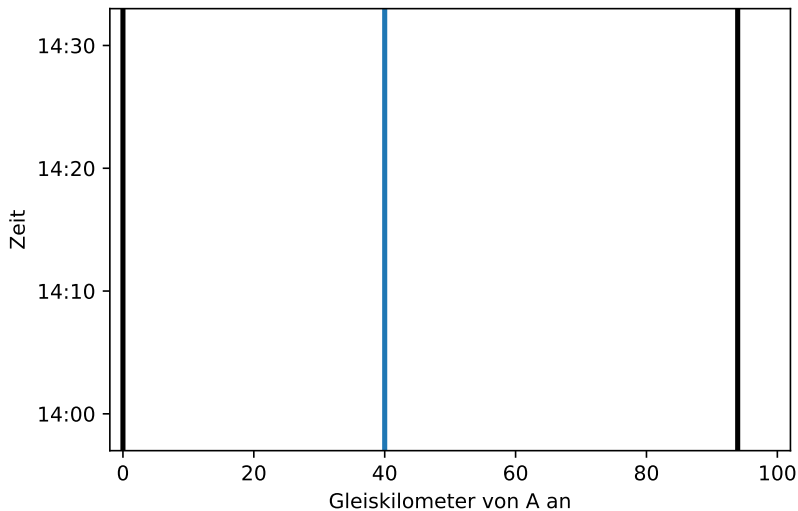
Raumzeitdiagramm



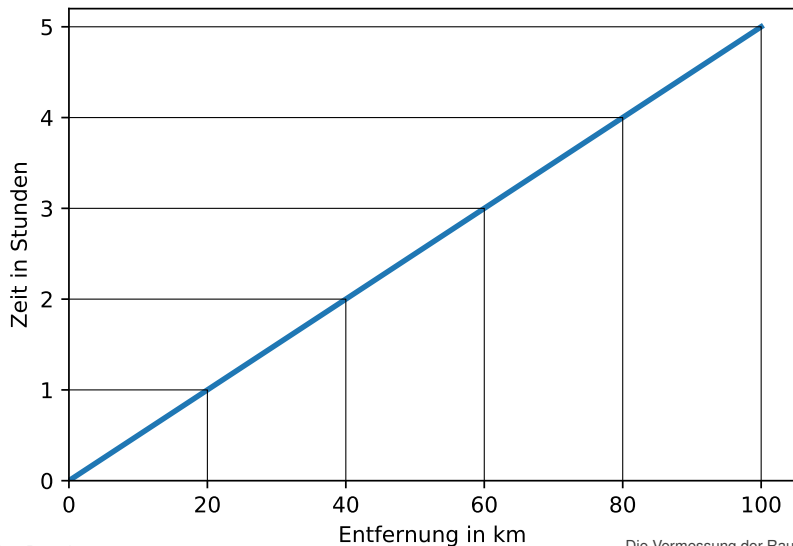
Raumzeitdiagramm — Momentaufnahmen ablesen



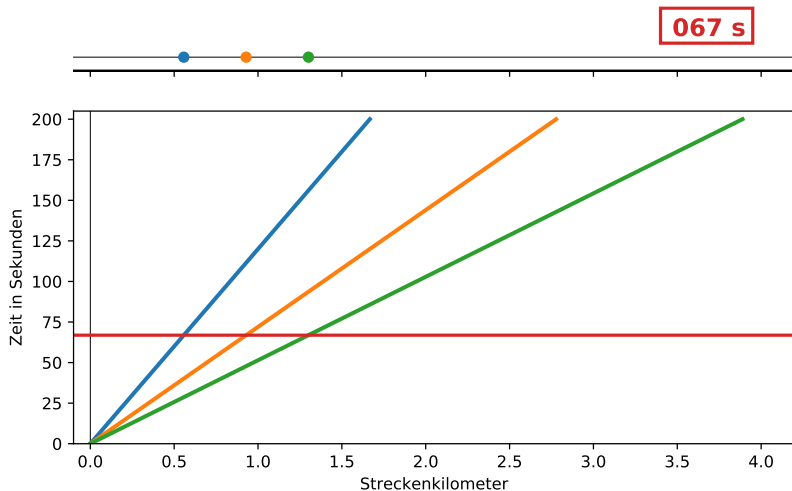
Konstanter Ort = Senkrechte



Konstante Geschwindigkeiten = Raumzeitgeraden



Schneller = Flacher, Langsamer = Steiler



Unterschiedliche Geschwindigkeiten

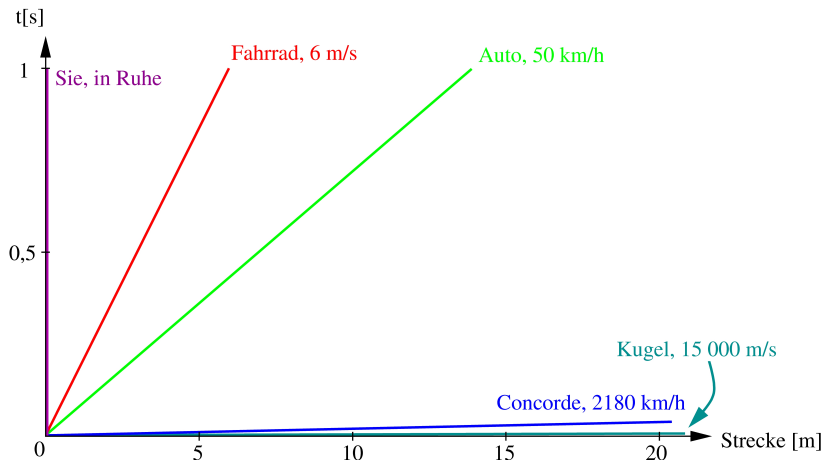
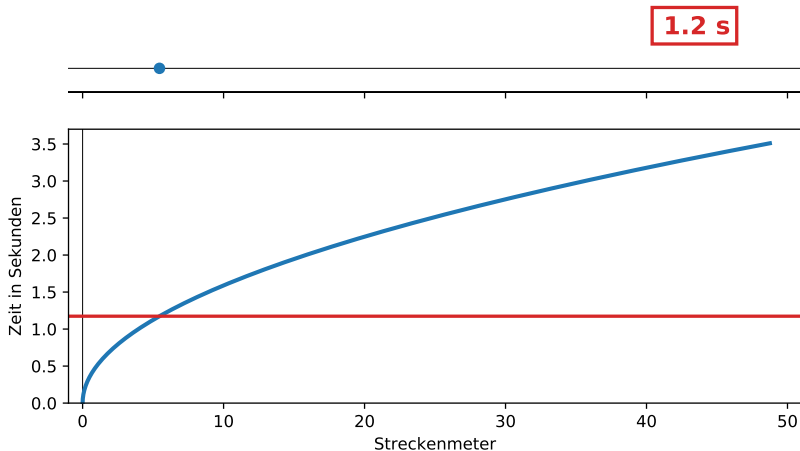
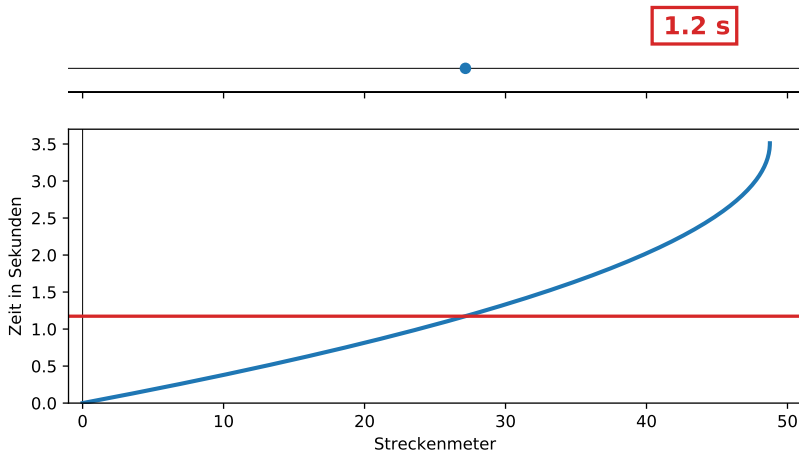


Bild aus Pössel, *Das Einstein-Fenster*, Kap. 2

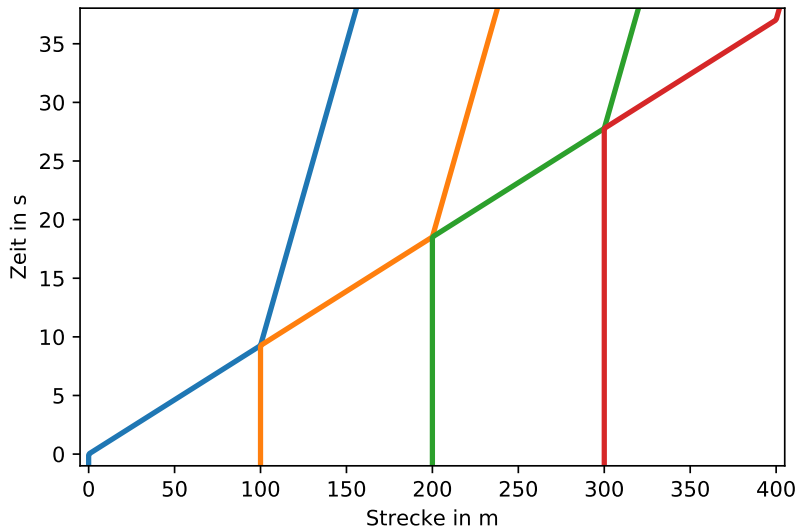
(positive) Beschleunigung = konkave Kurve



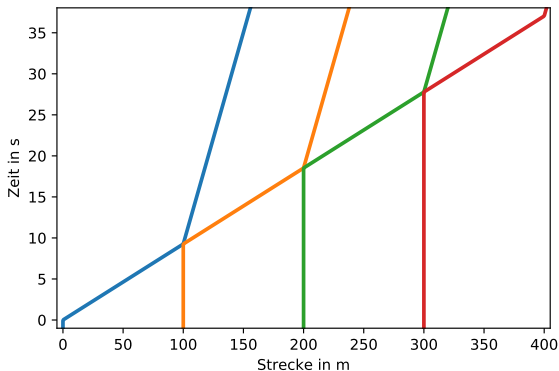
Abbremsen = konvexe Kurve



Ratespiel: Welche sportliche Disziplin ist das hier?



Richtig: Staffellauf 4 mal 100 m



Jeder Punkt im Diagramm repräsentiert ein **Ereignis**

Ereignis = gleicher Ort zur gleichen Zeit

(eindimensional) ausgedehnte Objekte

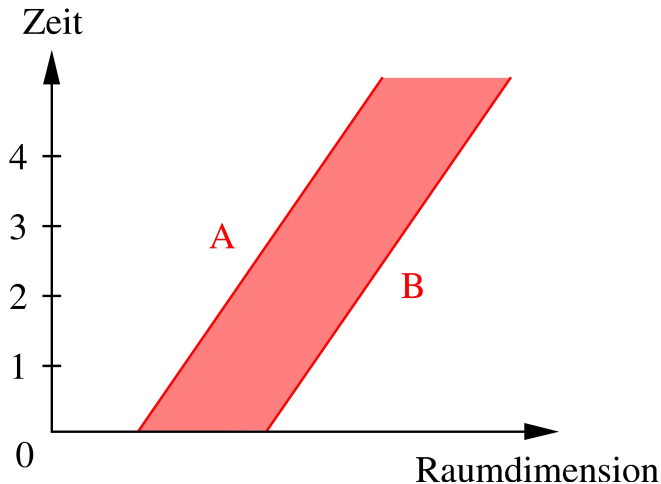
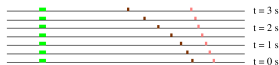
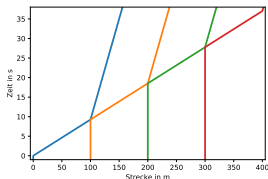


Bild aus Pössel, *Das Einstein-Fenster*, Kap. 2

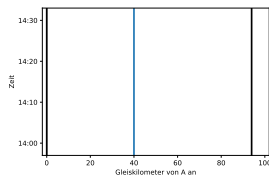
Zusammenfassung: Raumzeitdiagramme



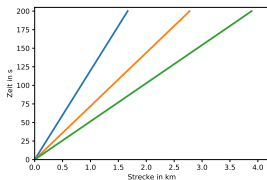
“Schichtung” von
Momentaufnahmen



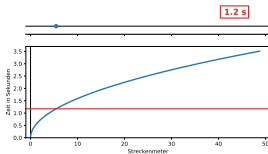
Ereignis =
gleicher Ort & gleiche Zeit



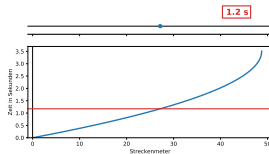
Stillstand = senkrecht



Schnell=flach,
langsam=steil

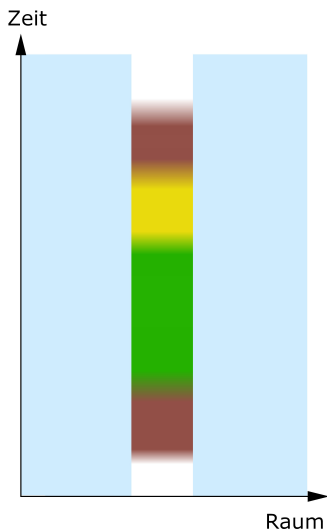


(pos.) Beschleunigung
= konkav

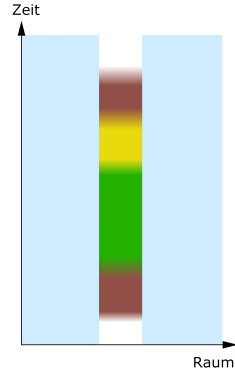


Abbremsen = konvex

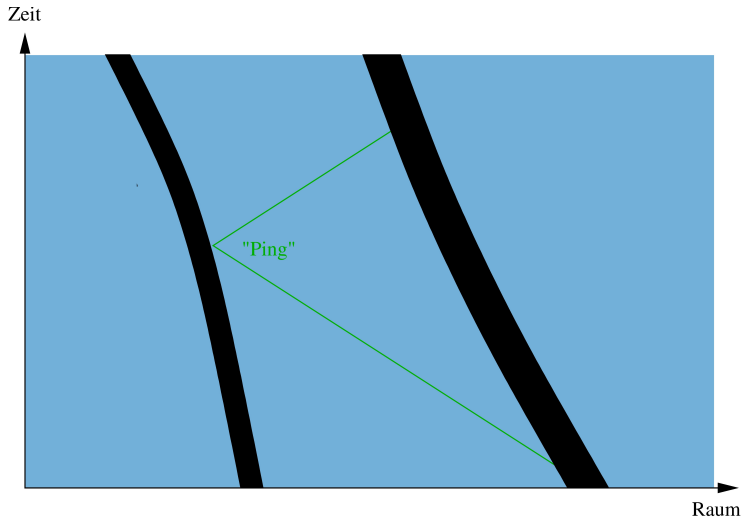
Was ist das hier? (1)



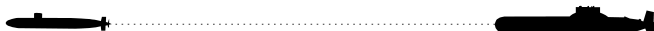
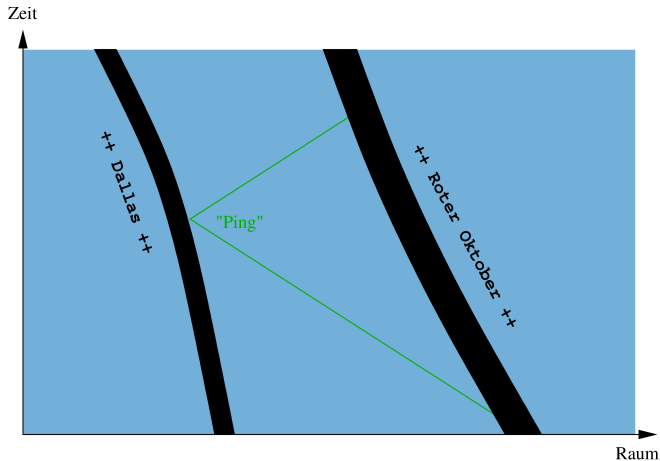
Lösung: Vier-Jahreszeiten-Baum (1)



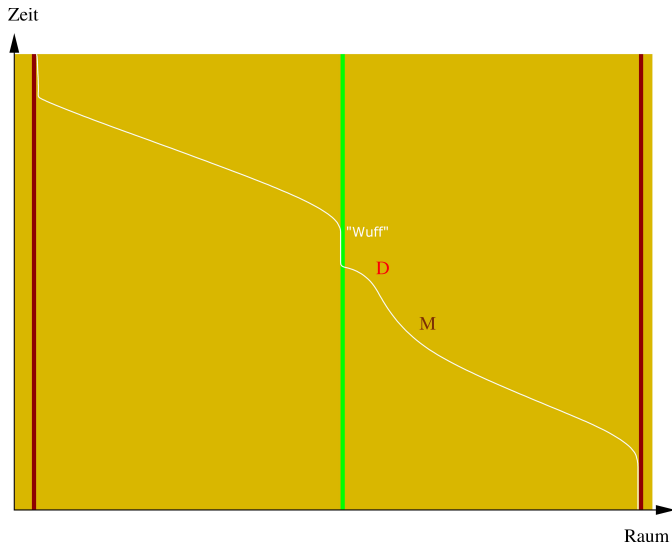
Was ist das hier? (2)



Lösung: Jagd auf Roter Oktober (2)

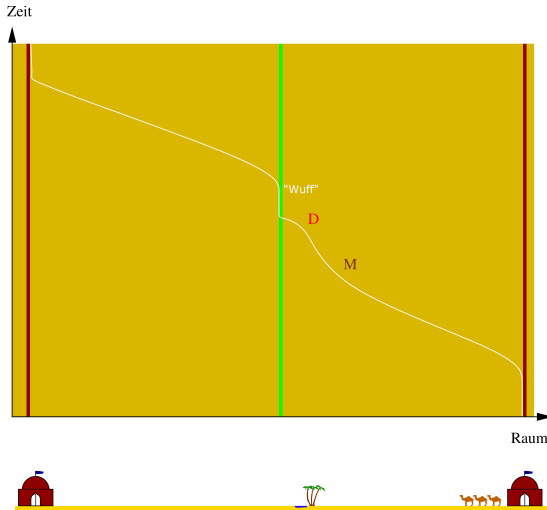


Was ist das hier? (3)



Lösung (3)

“Die Hunde bellen, die Karawane zieht weiter”



Raumzeit vermessen

Koinzidenz von Ereignissen ist absolut.

Herausforderung: Wie bestimmt man **Gleichzeitigkeit** an unterschiedlichen Orten?



Möglichkeiten (zu untersuchen):

- Uhrentransport
- Synchronisation mit Signalen

Uhrentransport

Alltags-Zeit: Wir "tragen unsere Zeit mit uns herum":

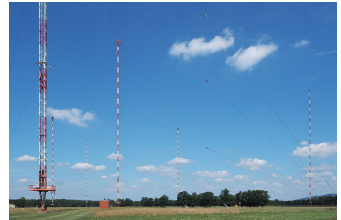


Problem: Uhren-Rundtransport zeigt, dass Uhrentransport beeinflusst, wieviel Zeit auf einer Uhr vergeht.

(Hafele-Keating 1971, Gravity Probe A 1976)

Synchronisierung durch Signale

Funkuhr:



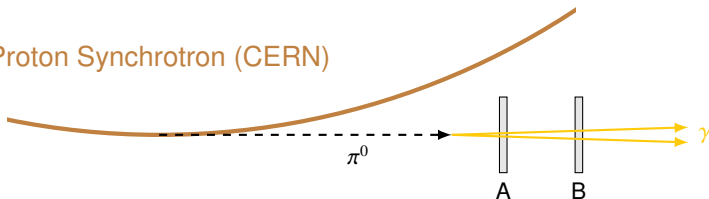
Masten der Sendeanlage Mainflingen. Nutzer Kreuzschnabel via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 3.0

... aber woher wissen wir, wie lange das Signal vom Sender zur Funkuhr benötigt?

Schlüsselfund: Lichtgeschwindigkeit

Die Lichtgeschwindigkeit ist unabhängig von der Lichtquelle

Proton Synchrotron (CERN)



Messungen bei π^0 -Geschwindigkeit von $\beta = v/c = 0.99975$

Alvåger et al. 1964, "Test of the Second Postulate of Special Relativity in the GeV Region"

Eine strategische Entscheidung

An dieser Stelle zwei Möglichkeiten:

- Uhrentransport weiterverfolgen?
- Signalgeschwindigkeits-Synchronisierung weiterverfolgen?

Beides würde letztlich zum gleichen Ergebnis führen.

Konzeptuell einfacher: Synchronisierung mit Hilfe von Licht (Einstein, Spezielle Relativitätstheorie)

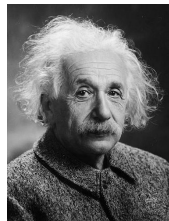
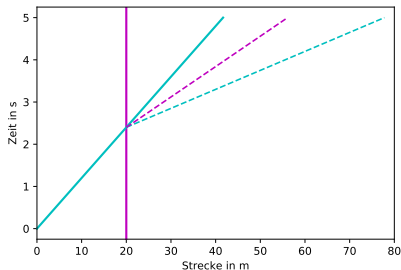
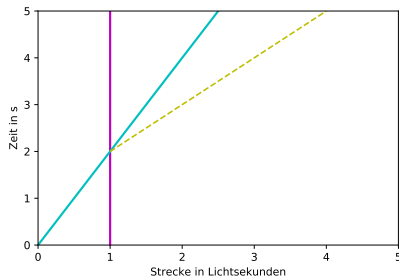


Foto via Library of Congress

Lichtsignale bringen Struktur



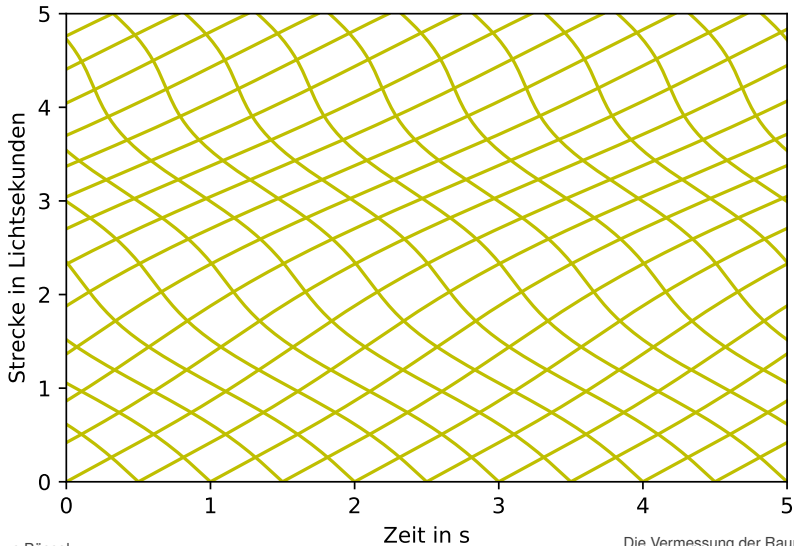
Autos, zwei Bälle mit gleicher
Mündungsgeschwindigkeit



Raumschiffe, zwei Lichtsignale

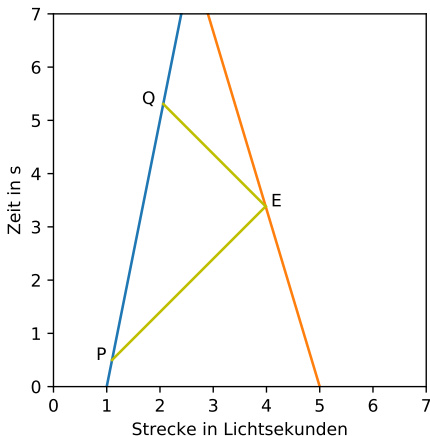
Wenn die Lichtausbreitung nicht von der Quellengeschwindigkeit abhängt, gibt es von jedem Ereignis in jede Richtung genau ein mögliches Lichtsignal \Rightarrow grundlegende Struktur!

Strukturen aus Lichtsignalen



Perspektivumkehr

Definiere Strecken und Gleichzeitigkeit auf Grundlage von *Lichtsignalen*



Abstand Δx zwischen E und unserer Weltlinie heißt

$$\Delta t = t(Q) - t(P) = 2 \cdot \frac{\Delta x}{c}$$

entsprechend

$$\Delta x = \frac{c}{2} [t(Q) - t(P)]$$

und

$$t(E) = \frac{1}{2} [t(Q) + t(P)].$$

Nächste Schritte

- Wie vertragen sich diese Definitionen mit der Mechanik?
- Gleichberechtigung von Systemen: Spezielle Relativitätstheorie
- Grundzüge der allgemeinen Relativitätstheorie: Raumzeitmetrik