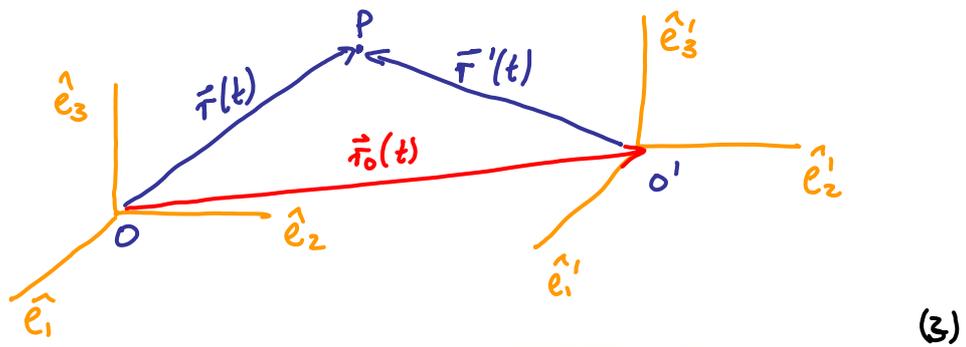


Def: "Inertialsystem": Ein Bezugssystem, in dem sich ein kräftefreier Massenpunkt (MP) mit Geschwindigkeit $\vec{v} = \text{konstant}$ (1) auf einer Geraden bewegt, ist ein "Inertialsystem" (IS)

Seien O und O' zwei IS, mit $t = t'$,

$$\vec{r}(t) = \vec{r}'(t) + \vec{r}_0(t) \quad (2)$$



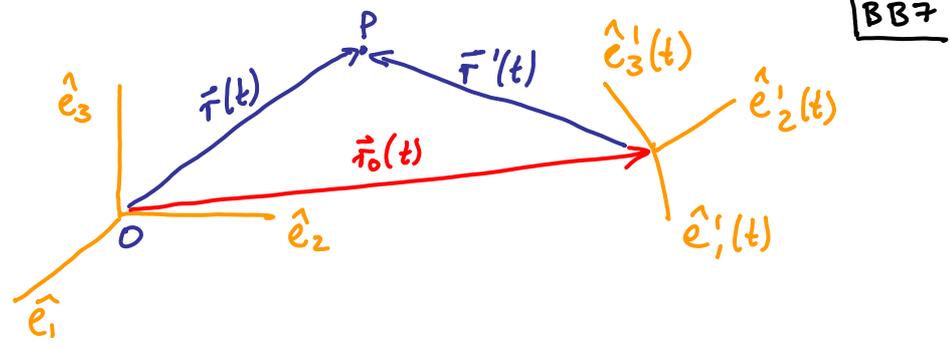
Transformationsregel von einem IS zu einem anderen:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}'(t) + \vec{v}_0 t + \vec{r}_0, \quad t = t', \quad \text{"Galilei-Transf."}$$

(Alle) Inertialsysteme sind für Beschreibung (aller) physikalischer Gesetze äquivalent. [Labor im Zug = Labor im Bahnhof]

Beschleunigte Bezugssysteme:

Sei O (z.B. raumfest) ein IS, O' (z.B. rotierend) \neq IS:



Ortsvektor:

$$\vec{r}(t) - \vec{r}_0(t) = \vec{r}'(t') \quad (1)$$

$$x_i(t) \hat{e}_i - x_{i,0}(t) \hat{e}_i = x'_i(t) \hat{e}'_i(t) \quad (2)$$

$$\dot{x}_i(t) \hat{e}_i - \dot{x}_{i,0}(t) \hat{e}_i = \dot{x}'_i(t) \hat{e}'_i(t) + x'_i(t) \dot{\hat{e}}'_i(t) \quad (3)$$

Geschwindigkeit: (2)

Interpretation:

$\dot{x}_i(t) \hat{e}_i$: Geschw. v. P laut O
 $\dot{x}_{i,0}(t) \hat{e}_i$: Geschw. v. O' relativ zu O
 $\dot{x}'_i(t) \hat{e}'_i(t)$: Geschw. v. P laut O'
 $x'_i(t) \dot{\hat{e}}'_i(t)$: Geschw. eines starr mit O' mitrotierenden Punktes, v. O aus gesehen (nur Richtung ändert sich)

Kurznotation für (3):

$$\dot{\vec{r}} - \dot{\vec{r}}_0 = \dot{\vec{r}}' + \vec{\omega} \times \vec{r}' \quad (4)$$

Punkt besagt (nur heute): Ableitung wirkt nur auf Komponenten.

$$(7.3): \dot{x}_i(t) \hat{e}_i - \dot{x}_{i,0}(t) \hat{e}_i = \dot{x}'_i(t) \hat{e}'_i(t) + x'_i(t) \dot{\hat{e}}'_i(t) \quad \text{BB8} \quad (1)$$

$$\Rightarrow \begin{array}{ccc} \text{Zeitableitung} & = & \text{Zeitableitung} & + & \text{Einfluss der} \\ \text{von } O \text{ aus} & & \text{von } O' \text{ aus,} & & \text{Rotation v. } O' \\ & & \text{betrifft nur Komponenten} & & \text{relativ zu } O \end{array} \quad (2)$$

Eiselsbrücke zur Ableitung eines Vektors in rotierendem Bezugssystem: (3)

Beschleunigung: $\frac{d}{dt} \vec{v}$?

$$\frac{d}{dt} (z) = \frac{d}{dt} \left(\dot{\vec{r}} - \dot{\vec{r}}_0 \right) = \frac{d}{dt} \left(\dot{\vec{r}}' + \vec{\omega} \times \vec{r}' \right) \quad (4)$$

$$\stackrel{(3)}{=} \quad (5)$$

$$\ddot{\vec{r}} - \ddot{\vec{r}}_0 = \quad (6)$$

Bewegungsgleichung:

BB9

$$\text{in } O (= IS) : \vec{F} = m \ddot{\vec{r}} \quad (1)$$

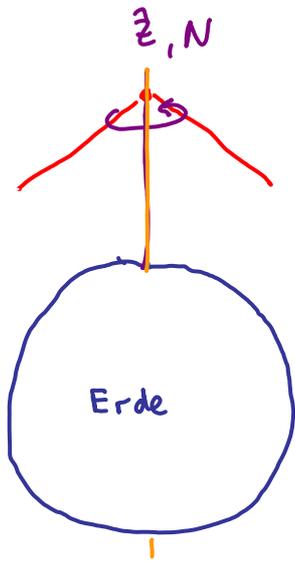
$$\text{in } O' (\neq IS) : \vec{F}' = m \ddot{\vec{r}}' \quad (2)$$

$$\vec{F}' = \vec{F} + \vec{F}_L + \vec{F}_C + \vec{F}_Z + m \vec{r}' \times \dot{\vec{\omega}} \quad (3)$$

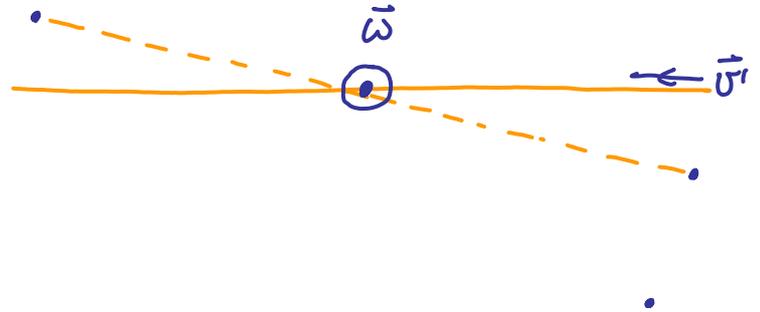
linear-beschleunigende Kraft
"Coriolis-Kraft"
Zentrifugal-Kraft

Die Scheinkräfte $\vec{F}_L, \vec{F}_C, \vec{F}_Z, m \vec{r}' \times \dot{\vec{\omega}}$ werden in O' (aber nicht O) benötigt, (weil $O' \neq IS$), um die (sehr realen!), in O gemessenen Beschleunigungen $\left[-\ddot{\vec{r}}_0, z \dot{\vec{r}}' \times \vec{\omega}, \vec{\omega} \times (\vec{r}' \times \vec{\omega}), \vec{r}' \times \dot{\vec{\omega}} \right]$ zu interpretieren.

Gaspard Gustave de Coriolis (* 21. Mai 1792 in Nancy; † 19. September 1843 in Paris) war ein französischer Mathematiker und Physiker.

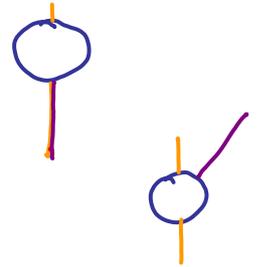


am Nordpol, blick von oben



Aufgaben zum selberrechnen:

- wie sieht das Schwingungsmuster am Südpol aus?
- " " " " an Äquator ?



Jean Bernard Léon Foucault (* 18. September 1819 in Paris; † 11. Februar 1868 ebenda) war ein französischer Physiker.

Foucault wurde in Paris geboren. Seine Ausbildung erhielt er von einem Privatlehrer, da ihm mangels Fleiß und Betragen nahegelegt wurde, die Schule zu verlassen. Er begann ein Medizinstudium, musste aber auch dieses abbrechen, da er den Ekel beim Sezieren nicht überwinden konnte. Ohne Universitäts-Studium widmete er sich der Physik und erarbeitete sich alles autodidaktisch.

In den 1840er Jahren trug er zu den Comptes Rendus, einer Beschreibung eines elektromagnetischen Regulators für die elektrische Bogenlampe bei und veröffentlichte zusammen mit Henri Victor Regnault eine Arbeit über binokulares Sehen. 1851 führte er das nach ihm benannte Foucault'sche Pendel der Öffentlichkeit vor. Dieses ursprünglich von Vincenzo Viviani übernommene Experiment zeigte laientauglich erstmals die Erdrotation.



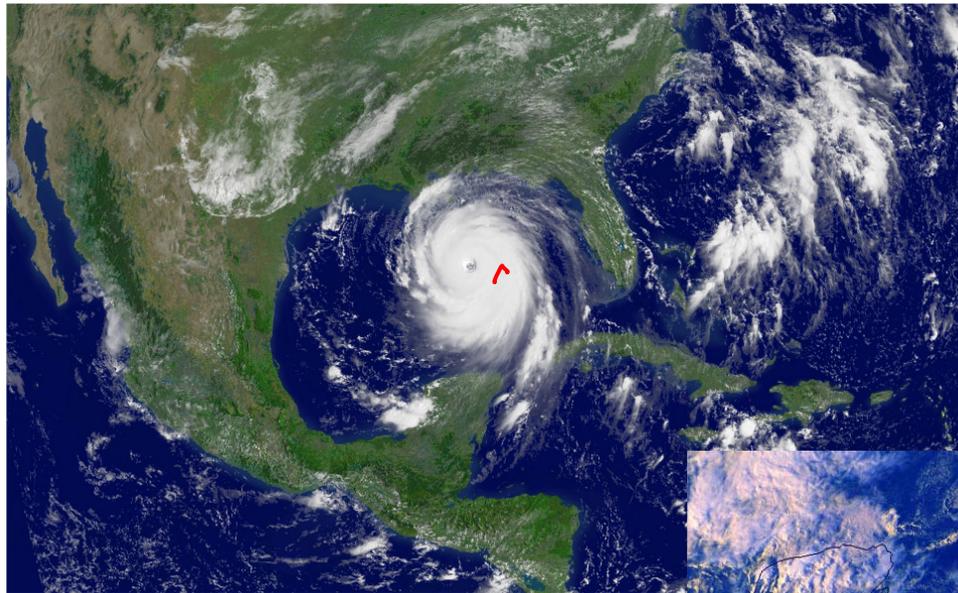
Ein Jahr später gelang ihm mit Hilfe der Drehspiegelmethode eine sehr genaue Messung der Lichtgeschwindigkeit, die er auf 298.000 km/s bestimmte. Er verwendete dabei einen Drehspiegel, der dem von Sir Charles Wheatstone ähnelte. Außerdem bewies er, dass die Lichtgeschwindigkeit in Wasser niedriger als in Luft ist, womit gleichzeitig die Wellennatur des Lichts bestätigt wurde.

In der Optik wird das von ihm entwickelte foucault'sche Schneidenverfahren zur Prüfung optischer Flächen oder ganzer optischer Systeme verwendet.

Weiter untersuchte Foucault Wirbelströme in Metallen, wofür er die Copley Medaille erhielt, entwickelte ein leistungsfähiges Spiegelteleskop und erfand 1852 das Gyroskop, basierend auf Johann Gottlieb Friedrich von Bohnenbergers Maschine von 1817. Er wurde 1865 in die französische Akademie der Wissenschaften aufgenommen.

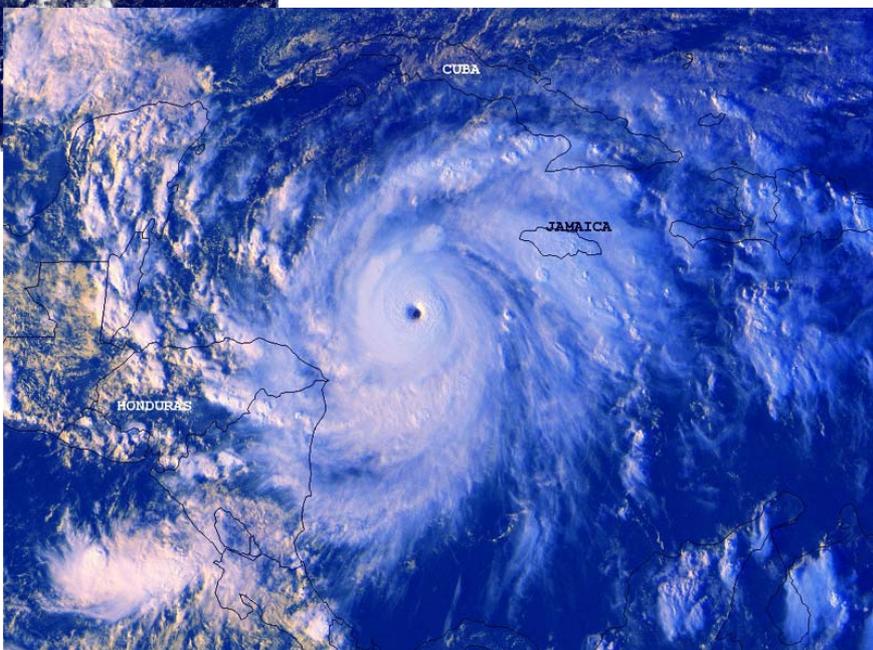
Foucault erkrankte an Aphasie und starb, fast blind und stumm, am 11. Februar 1868 in Paris.

Wirbelstürme



Hurricane Katrina

Hurricane Mitch

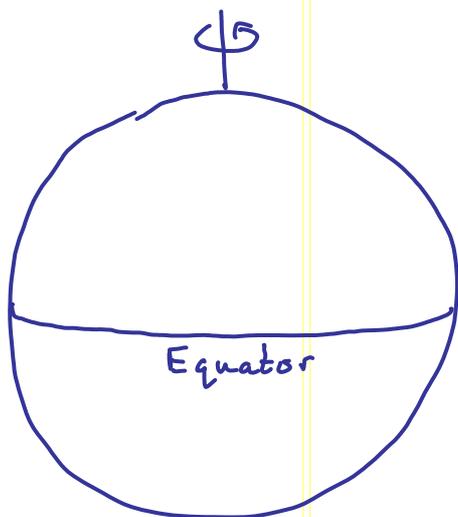


Drehrichtung in Nordhalbkugel:

Wirbelstürme: Warme Luft über dem Ozean steigt auf, erzeugt Niederdruckgebiet, das Luft lateral ansaugt. Die Coriolis-Kraft lenkt die angesaugte Luft ab, sodass Wirbel entsteht.

Naiv:

$\odot \vec{\omega}_1$

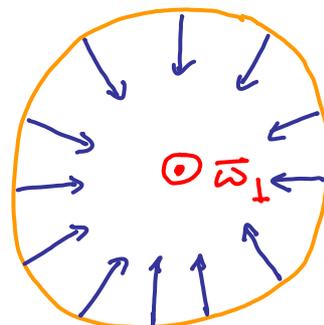


Druckgradientkraft berücksichtigen:



$$\vec{F}_c = 2m \vec{v}' \times \vec{\omega}$$

Auf Kreisbahn:
Druckgradientkraft
und Corioliskraft



Am Equator:



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

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

"Physics 209: Introductory Notes on Relativity"

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

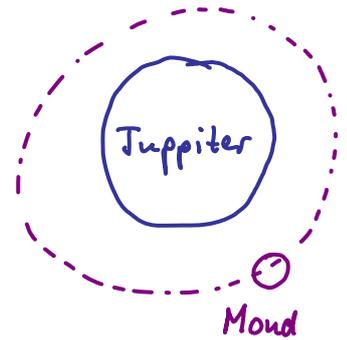
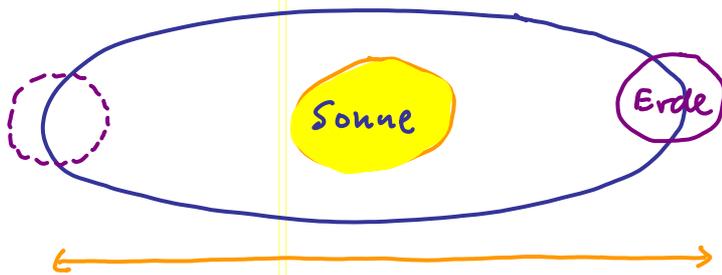
Buch: N. David Mermin: "It's About Time: Understanding Einstein's Relativity",

Princeton University Press, 2005

Lichtgeschwindigkeit (LG)

1) Erste Messversuche - Galilei

2) Erste erfolgreiche Schätzung - Romer (1676)

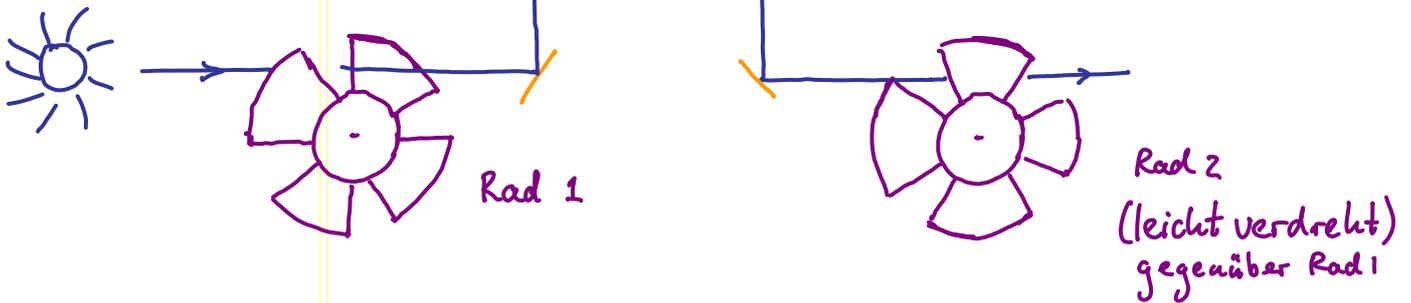


Jupiter-Mondfinsternis früher/später als erwartet, wenn Erde näher/weiter weg war:

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:

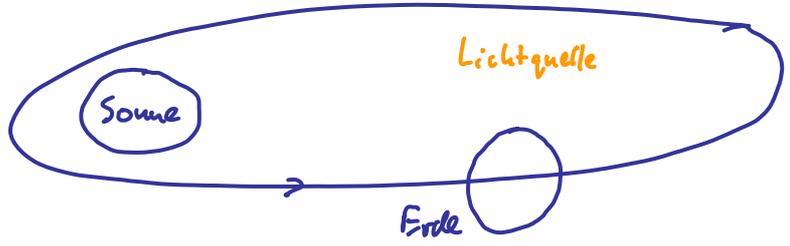
$$c \approx 1 \text{ Fuß/Nanosekunde} = 1 \text{ f/ns}$$

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

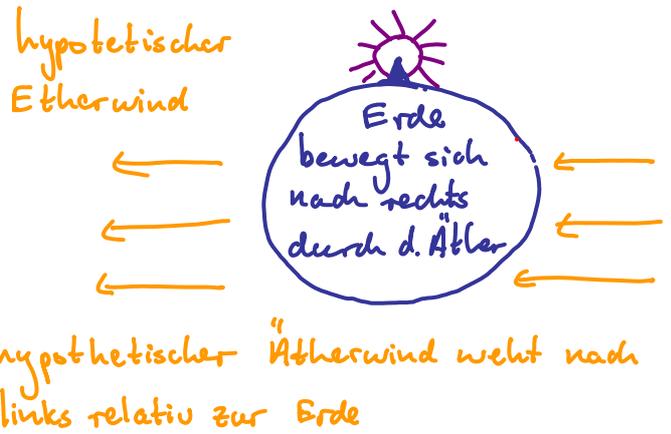
Mögliche Antwort 1 (MA1): "Relativ zu einem 'Licht-Medium' ('Lichtäther')"

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)

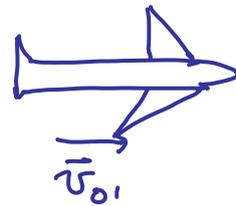


Gemessen: c_1 c_2 c_3 !!

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

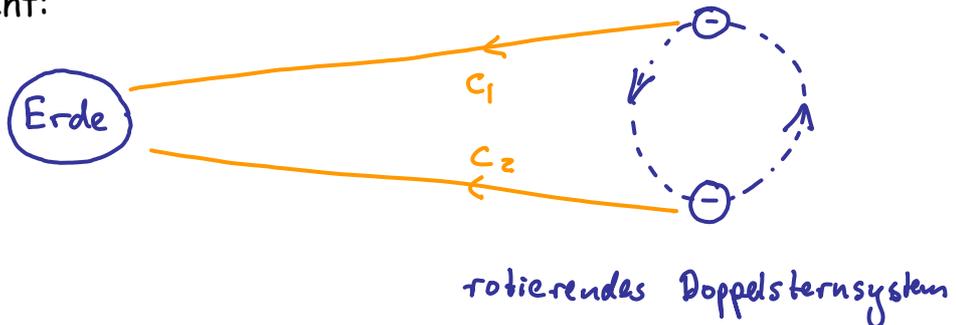
Wäre analog zu Kugel aus Flugzeug gefeuert:

- Geschw. Flugzeug rel. zu Boden:
- Geschw. Kugel rel. zu Flugzeug:
- Geschw. Kugel rel. zu Boden:



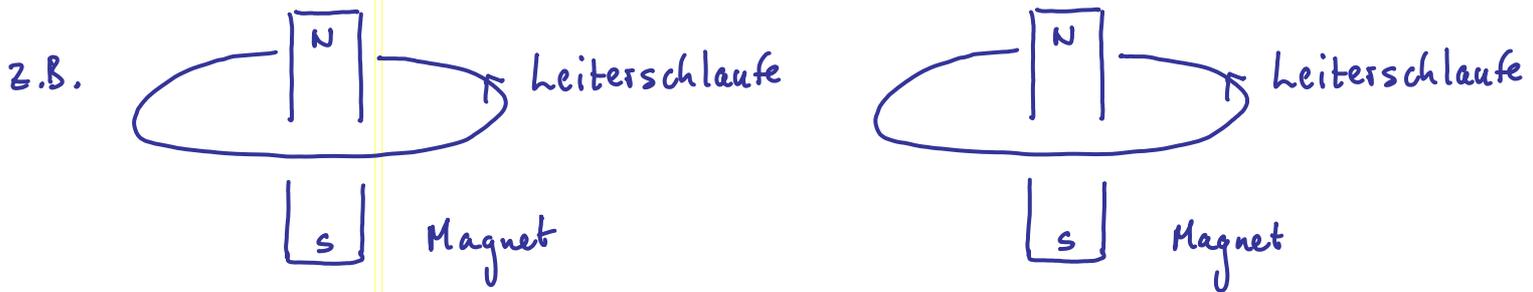
Aber: MA2 widerspricht Experiment:

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!



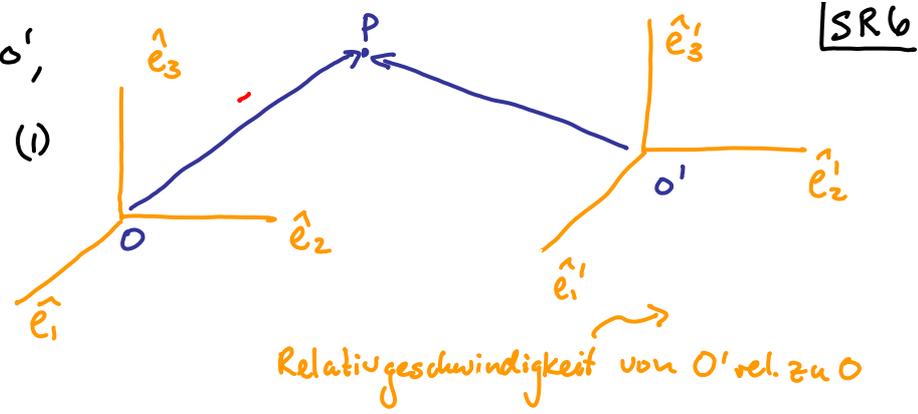
Elektromotorische Kraft in Leiterschleife ist dieselbe, unabhängig davon ob Leiterschleife ruht und Magnet bewegt wird oder umgekehrt.

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 $0 = 0'$,
 also: $x(0')$
 Koordinaten des Ursprungs von $0'$ aus Sicht von 0 .



Lichtblitz starte bei $t = t'$ in $0 = 0'$, und erreicht etwas später Punkt P.

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

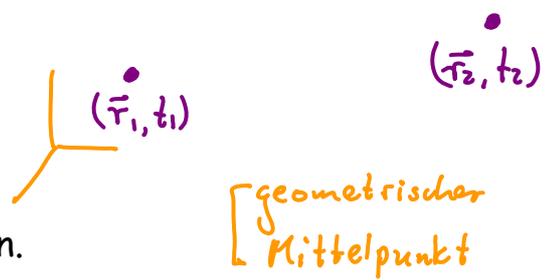
"Zug kommt um 7 Uhr" heisst:

"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
gleichzeitig 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...)