

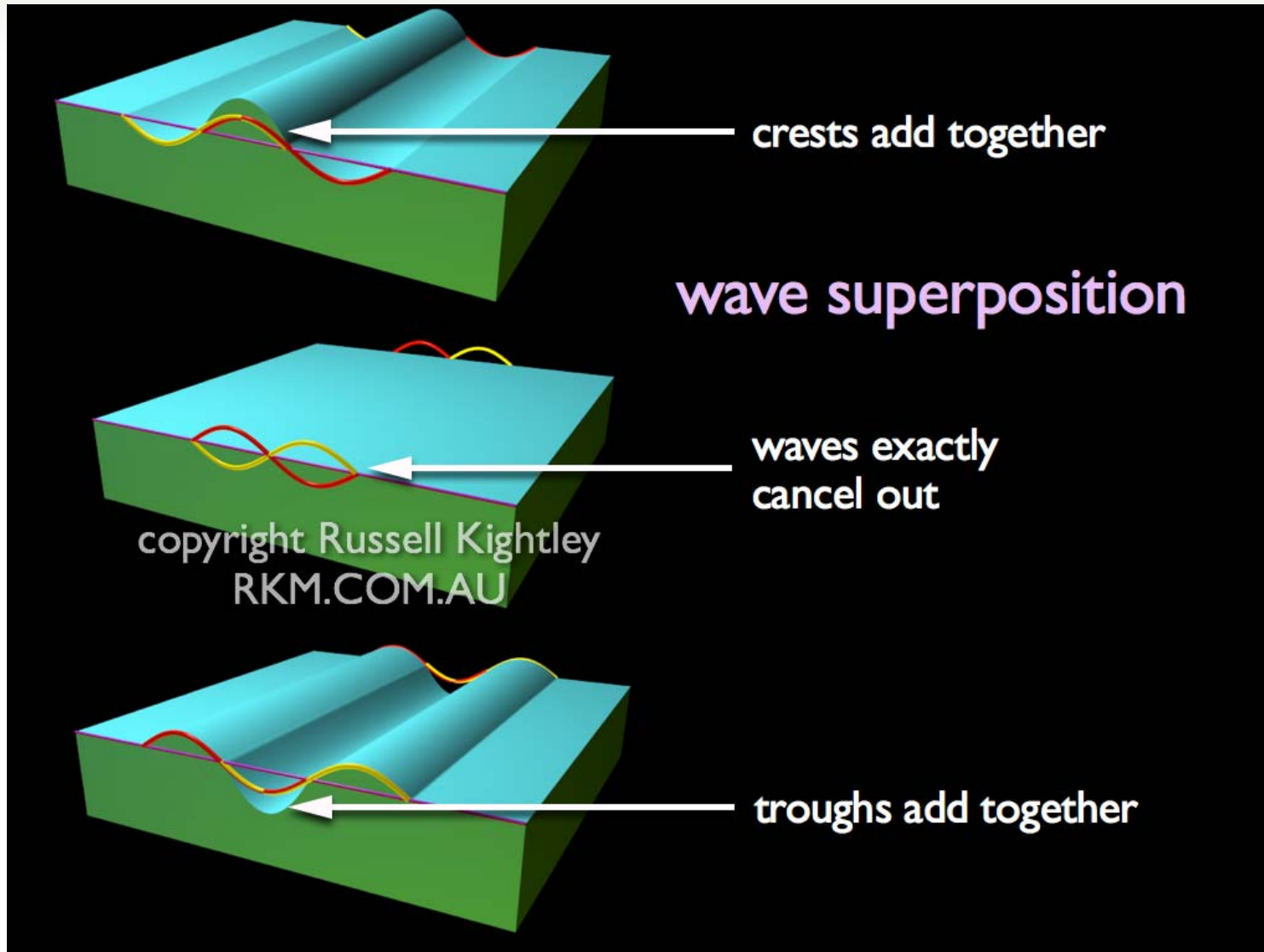
Themenkomplex Relativität



Beobachter

Superpositionsprinzip
Galileische Bezugssysteme
Faradaysche Induktion

Thema Beobachter
Superpositionsprinzip



Kinematische Gleichungen

gültig NUR bei KONSTANTER Beschleunigung

Symptome

Wie beschreibt Bewegung eines Körpers bei KONSTANTER Beschleunigung

Erste Kinematische Gleichung

$$v(t) = v_i + a_{const} \cdot t$$

Dimensionskontrolle

$$\left[\frac{m}{s} \right] = \left[\frac{m}{s} \right] + \left[\frac{m}{s^2} s \right]$$

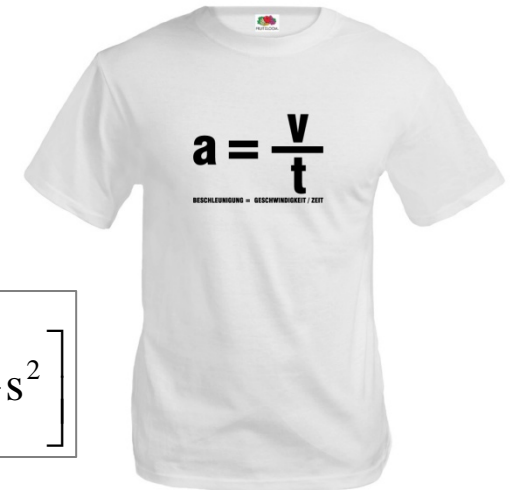
Fragen, die man sich stellen könnte:
Was ist falsch an dieser Gleichung?

Zweite Kinematische Gleichung

$$x(t) = x_i + v_i \cdot t + \frac{1}{2} a_{const} \cdot t^2$$

Dimensionskontrolle

$$[m] = [m] + \left[\frac{m}{s} s \right] + \left[\frac{m}{s^2} s^2 \right]$$



Dritte Kinematische Gleichung

$$v^2(t) = v_i^2 + 2a_{const} \cdot (x_f - x_i)$$

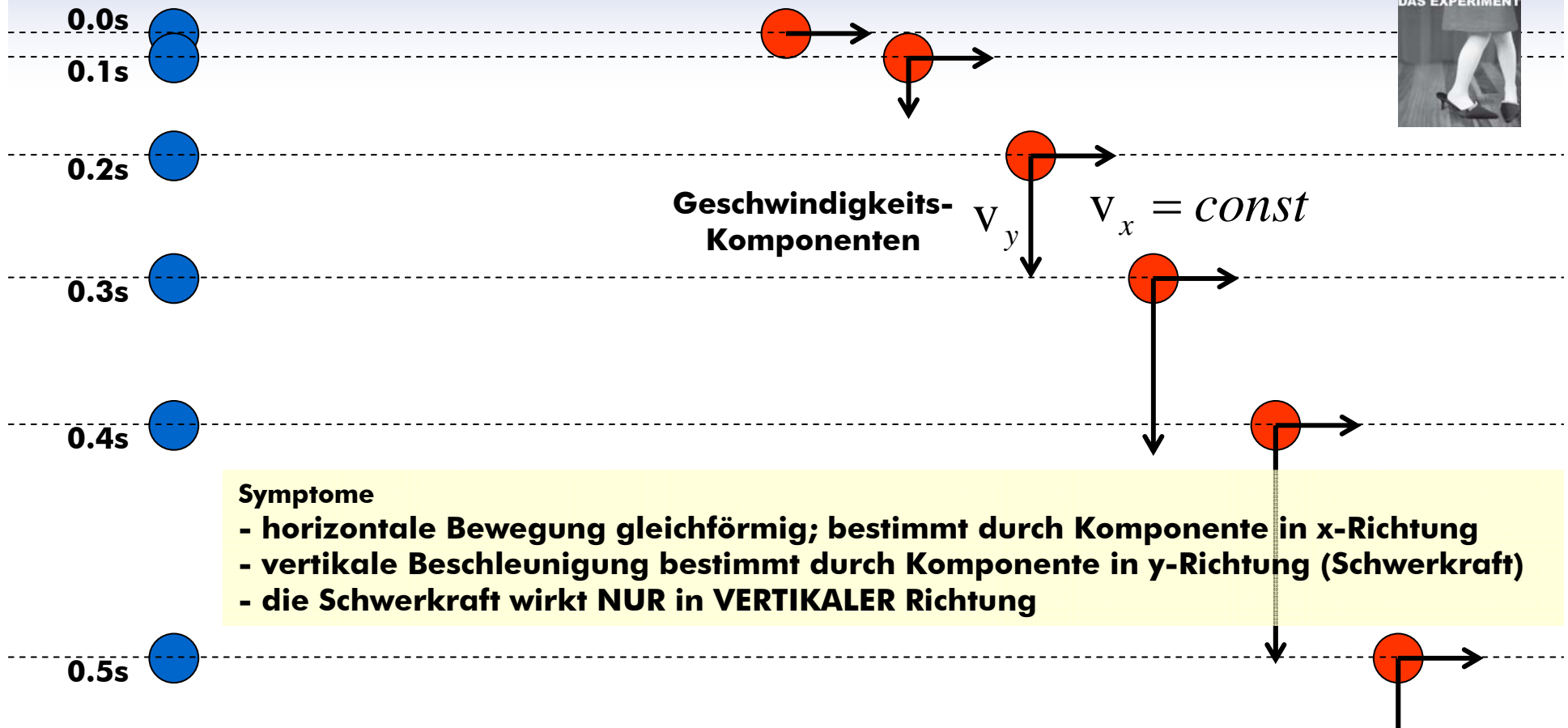
Dimensionskontrolle

$$\left[\frac{m^2}{s^2} \right] = \left[\frac{m^2}{s^2} \right] + \left[\frac{m}{s^2} m \right]$$

Diagnose

Die in den Gleichungen auftauchenden Variablen (x_i , x_f , v_i , v_f , a , t) können durch Kombination der Gleichungen teilweise eliminiert werden

wichtiges physikalisches Prinzip Superposition



Symptome

- horizontale Bewegung gleichförmig; bestimmt durch Komponente in x-Richtung
- vertikale Beschleunigung bestimmt durch Komponente in y-Richtung (Schwerkraft)
- die Schwerkraft wirkt NUR in VERTIKALER Richtung

Diagnose

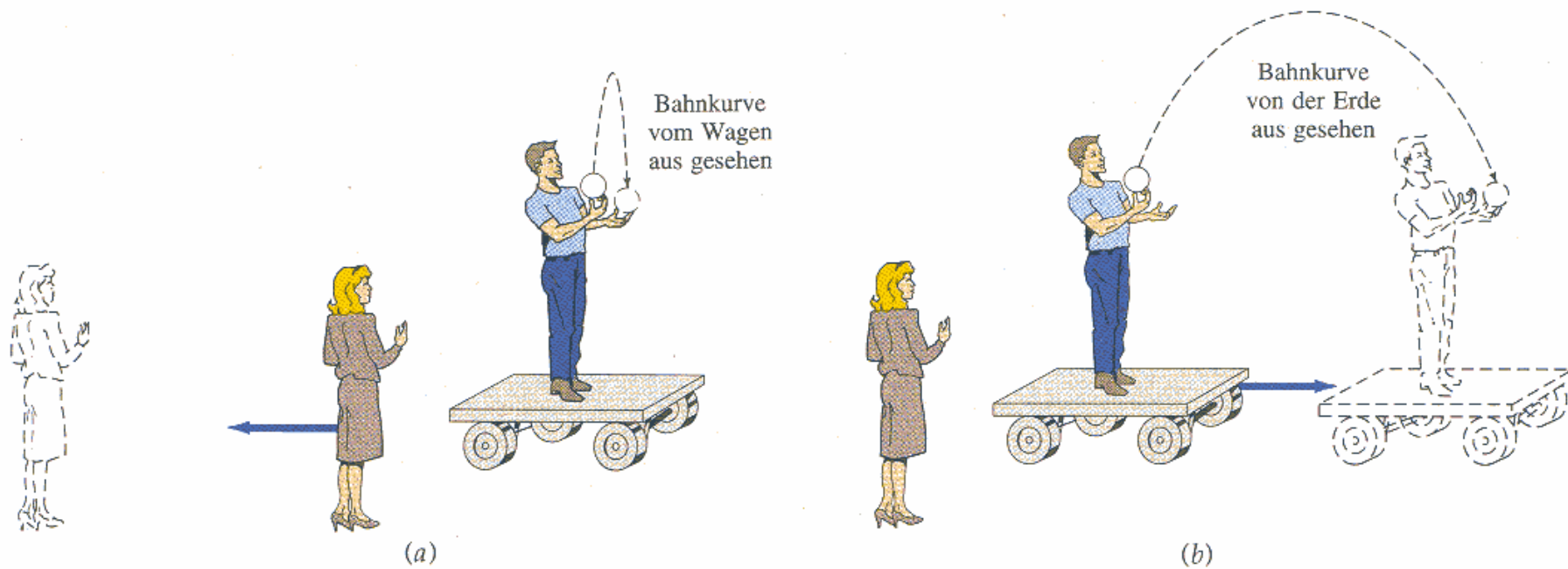
- Bewegungen entlang dieser beiden senkrecht zueinander stehenden Richtungen sind unabhängig voneinander
- Superposition spiegelt das Prinzip der ungestörten Überlagerung von Kräften wieder



Superposition Beobachtung ist relativ

Symptome

Beobachter nehmen Bewegung aufgrund ihres Standpunktes wahr



Freier Fall
Superposition

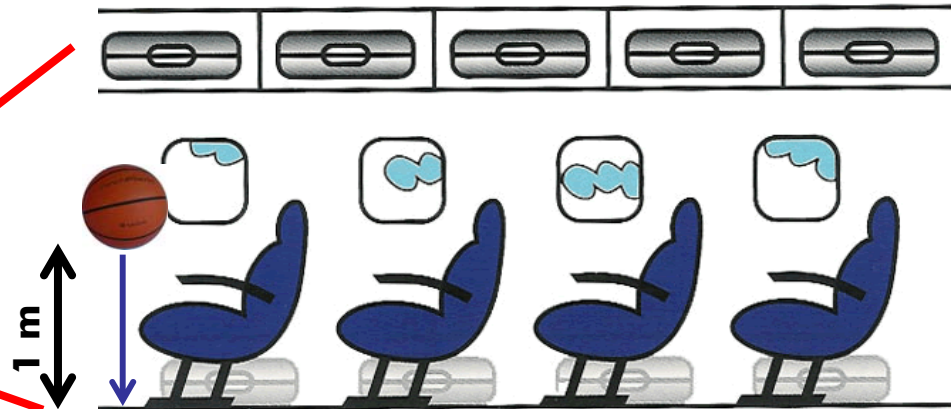
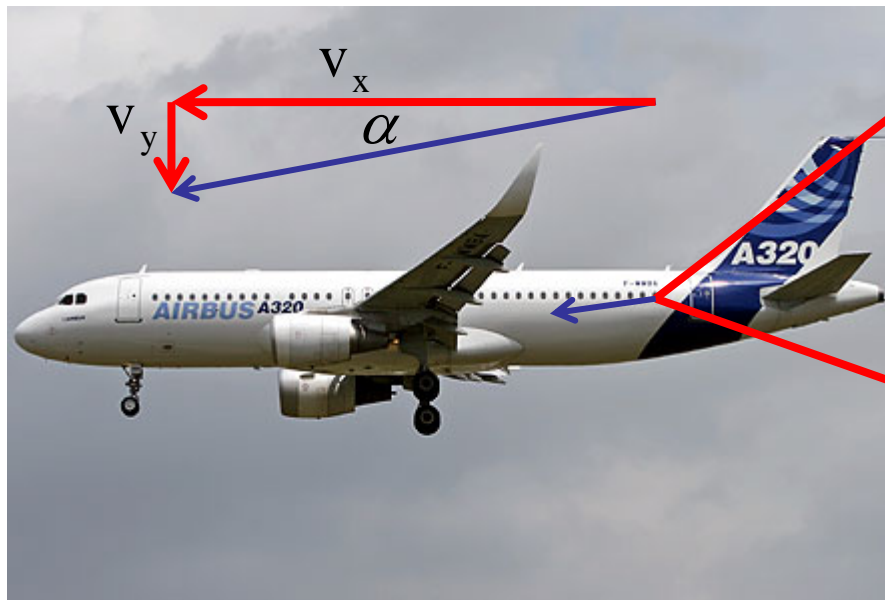
Diagnose
Superposition aus gleichförmiger Bewegung horizontal und Beschleunigung vertikal

Eine Frage des Standpunkts

Ballverlust im Flugzeug

Symptome

- Flugzeug bewegt sich horizontal mit konstanter Geschwindigkeit
- Reisegeschwindigkeit ist 900 km/h oder $v_x = 250$ m/s



freier Fall

$$v_y^2 = v_{y0}^2 - 2gy$$

example

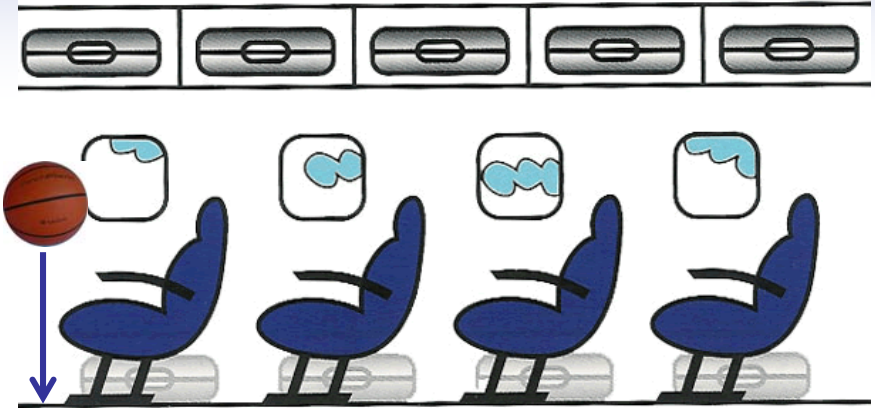
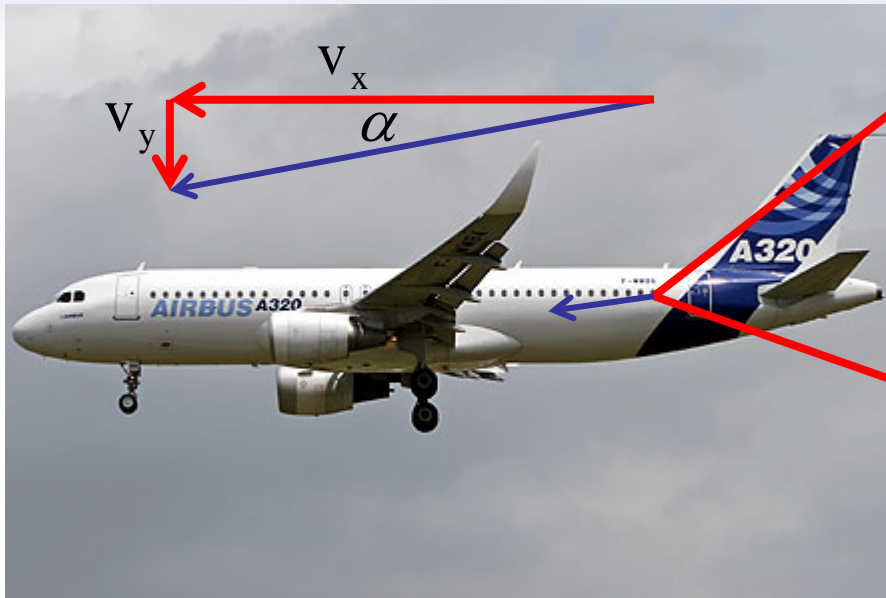
$$v_y = \sqrt{-2(9.81\text{m/s}^2)(-1.0\text{m})} = -4.43\text{m/s}$$

Diagnose

- Passagier merkt nichts von horizontaler Geschwindigkeit des Flugzugs
- Für den Passagier im Flugzeug kommt zu dem Schluß, dass Ball vertikal fällt

Eine Frage des Standpunkts

Ballverlust im Flugzeug



Geschwindigkeit Flugzeug

$$v_x = -250 \text{ m/s}$$

$$v_y = -4.43 \text{ m/s}$$

Geschwindigkeit Ball beim Aufprall

Superposition der Bewegungsabläufe

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 250.04 \text{ m/s}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{v_y}{v_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-4.43 \text{ m/s}}{-250 \text{ m/s}}\right) = -1.02^\circ$$



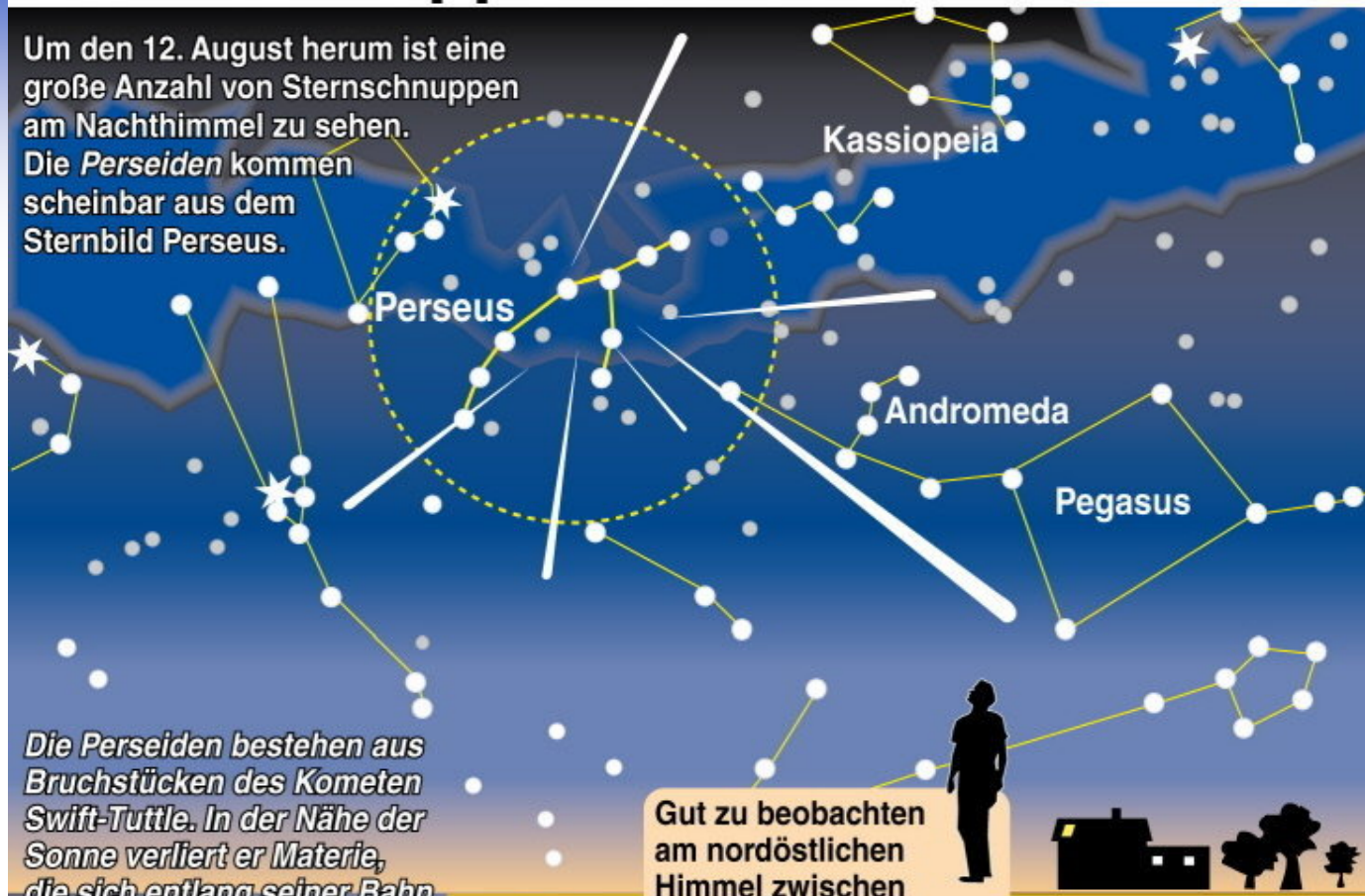
Diagnose

Für einen Beobachter am Boden bewegt sich Ball im wesentlichen horizontal



Sternschnuppen-Schauer

Um den 12. August herum ist eine große Anzahl von Sternschnuppen am Nachthimmel zu sehen. Die *Perseiden* kommen scheinbar aus dem Sternbild Perseus.



Die Perseiden bestehen aus Bruchstücken des Kometen Swift-Tuttle. In der Nähe der Sonne verliert er Materie, die sich entlang seiner Bahn verteilt (Meteoritenstrom).

Gut zu beobachten am nordöstlichen Himmel zwischen 23 Uhr und Mitternacht.



Beim Eintritt in die Atmosphäre der Erde verglühen diese Teilchen (Sternschnuppen). Die Erde durchfliegt am 12./13. August den dichtesten Teil dieses Stromes.

Alles ist relativ! Aber zu was?



0 m/s relativ zu ihrem Hörsaalstuhl



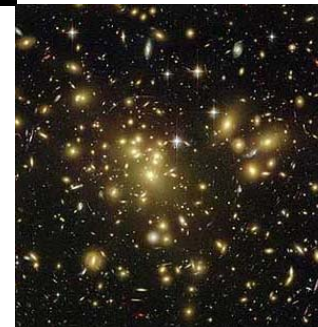
**400 m/s relativ zum
Erdzentrum (Rotation)**



**33 000 m/s relativ zur
Sonne (Orbit)**



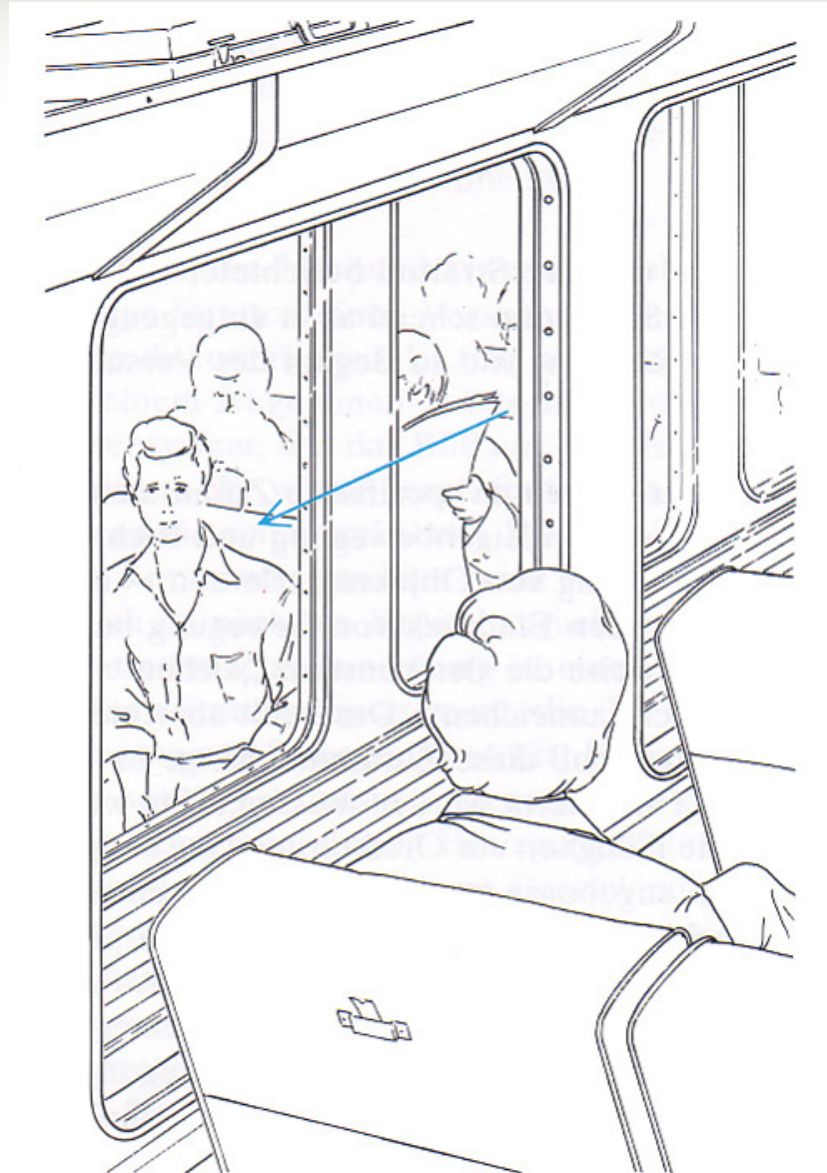
**220 000 m/s relativ zum
Zentrum des Milchstrasse
(Orbit)**



**370 000 m/s relativ zum
kosmischen Hintergrund**

Thema Beobachter

Bezugssysteme



Kunstflugstaffel

Bedeutung von Bezugssystemen



Unter einem **INERTIALSYSTEM** versteht man in der Physik ein Koordinatensystem, in dem sich ein kräftefreier Körper geradlinig und gleichförmig bewegt (lateinisch *iners* „untätig, träge“)

Alle Systeme, die sich gleichförmig gegenüber einem anderen Inertialsystem bewegen, sind ebenfalls Inertialsysteme.

Relative Bewegung

Betankung von Flugzeugen in der Luft klappt nur wenn ihre **relative** Geschwindigkeit in Betrag und Richtung zueinander nahezu **konstant** ist



Beobachter am Boden sieht sich bewegende Objekte

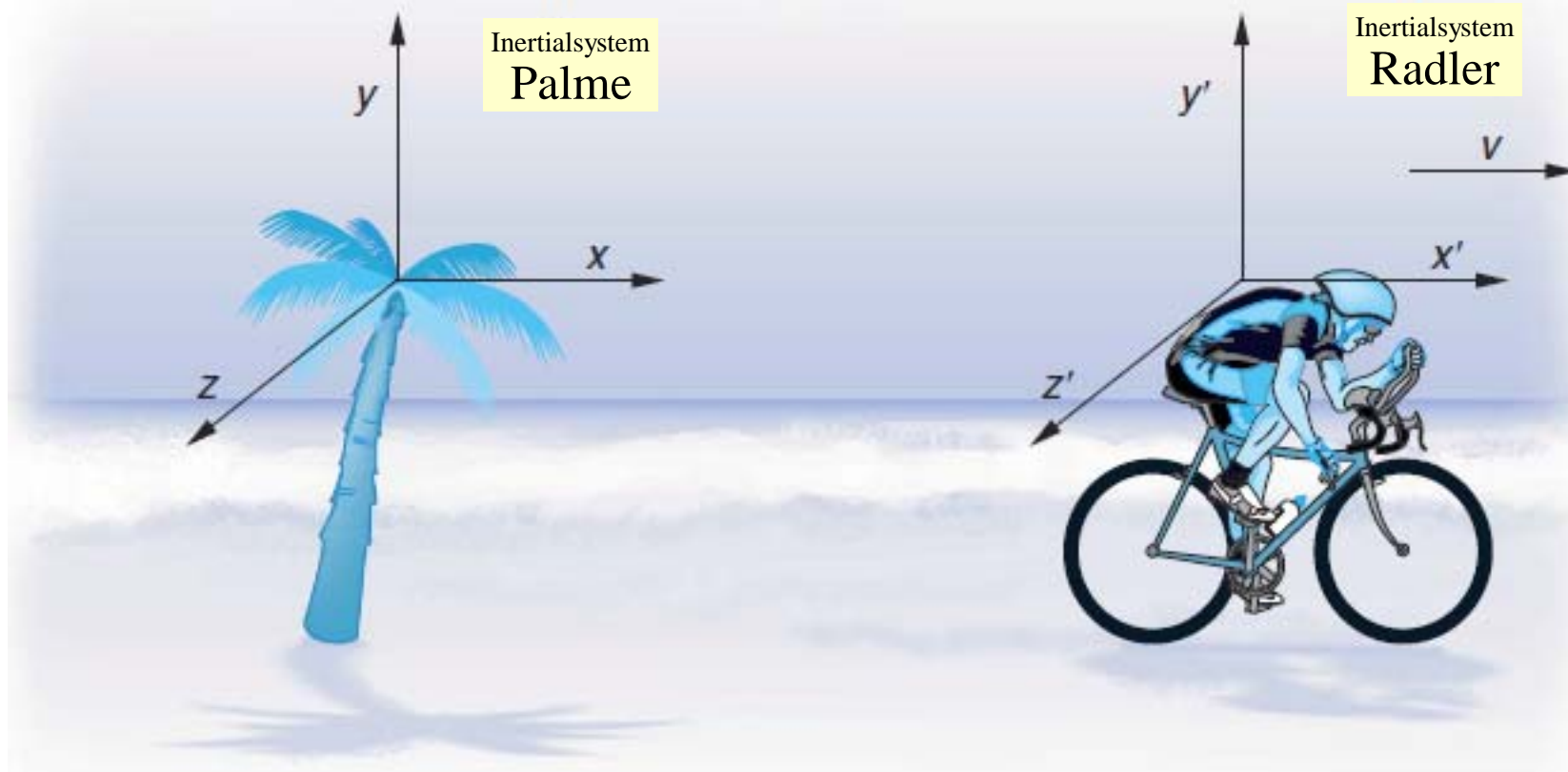


Inertialsysteme

Symptome

Inertialsystem Palme ist fest mit Erdoberfläche verbunden

Relative Bewegung von Palme und Radler erfolgt entlang x-Achse



Diagnose

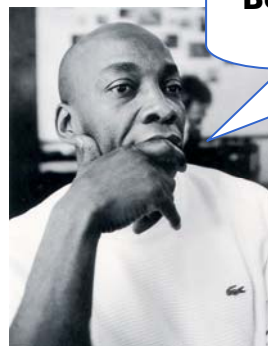
- Radler bewegt sich in Inertialsystem PALME mit Geschwindigkeit v
- Palme bewegt sich in Inertialsystem RADLER mit Geschwindigkeit $-v$



Bewegte Bezugssysteme

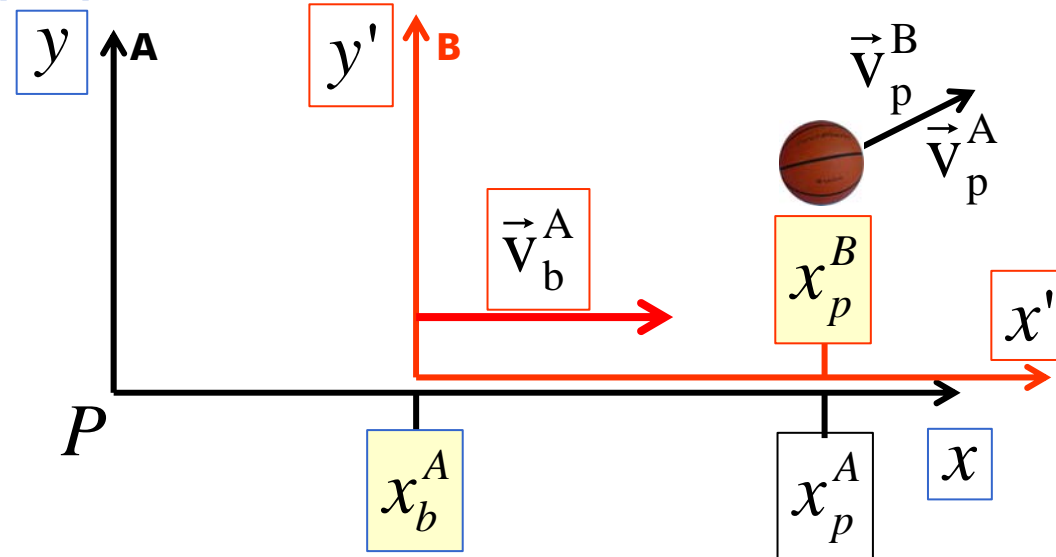
Symptome

Bezugssystem (B) bewegt sich relativ zu ruhendem Bezugssystem (A) mit konstanter Geschwindigkeit entlang der x-Achse



Bezugssystem A
Meerperspektive

Bezugssystem B
Vogelperspektive

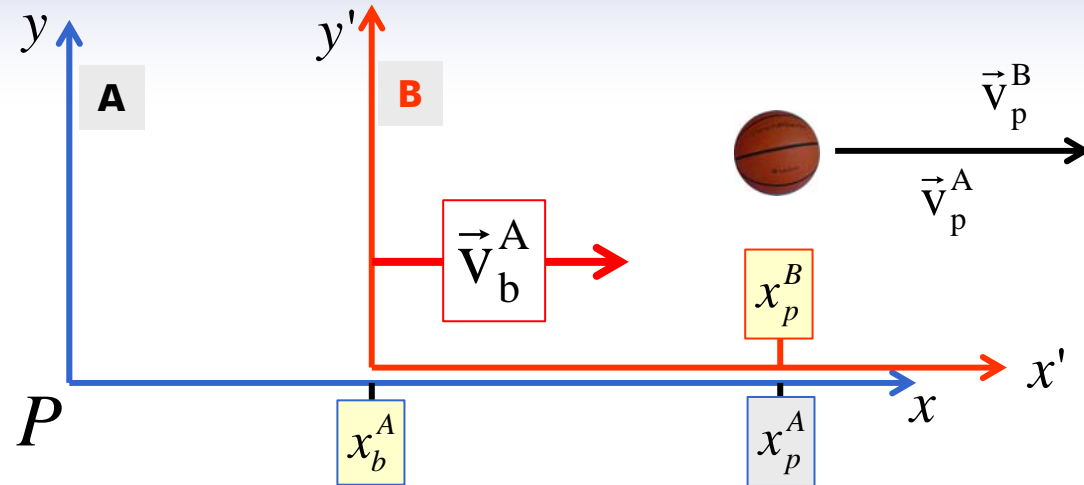


Diagnose

In jedem der Bezugssysteme bestimmt man andere Geschwindigkeit des Basketballs



Linear bewegtes Bezugssystem



Ortskoordiante

$$x_p^A = x_p^B + x_b^A$$

Relativgeschwindigkeit von B in Bezug auf A

berechne Geschwindigkeit

$$\frac{d}{dt} x_p^A = \frac{d}{dt} x_p^B + \frac{d}{dt} x_b^A \rightarrow v_p^A = v_p^B + v_b^A$$

berechne Beschleunigung

$$\frac{d}{dt} v_p^A = \frac{d}{dt} v_p^B + \frac{d}{dt} \text{konst} \rightarrow a_p^A = a_p^B$$

Diagnose

- Bezugssysteme bewegen sich zueinander mit KONSTANTER Geschwindigkeit
- Beobachter stellen GLEICHE Beschleunigung für bewegendes Teilchen fest

Leben in Bezugssystemen

Inertialsystem



Diagnose

- Beschleunigung wird in beiden Bezugssystemen identisch gemessen
- Beobachter kann NICHT unterscheiden, ob in ruhenden oder gleichförmig bewegenden System
- Bezugssysteme, die so charakterisiert sind, heißen Inertialsysteme

analog ergibt sich Bezugssysteme in 3D

Symptome

Koordinatensystem (B) bewegt sich in Bezug zu Koordinatensystem (A) mit Geschwindigkeit v_{BA}

Ortskoordiante Bezugssystem A

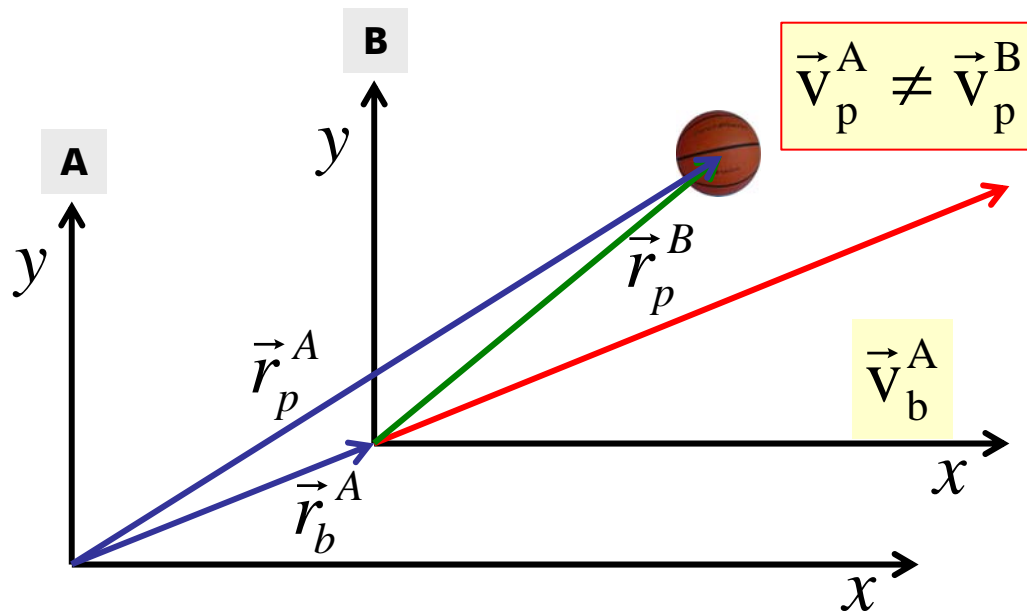
$$\vec{r}_p^A = \vec{r}_p^B + \vec{r}_b^A$$

Ortskoordiante Bezugssystem B

Geschwindigkeit Bezugssystem A

$$\vec{V}_p^A = \vec{V}_p^B + \vec{V}_b^A$$

Geschwindigkeit Bezugssystem B



$$\frac{d}{d\vec{r}} \vec{V}_p^A = \frac{d}{d\vec{r}} \vec{V}_p^B + \cancel{\frac{d}{d\vec{r}} \vec{V}_b^A}$$

konstant in Bezug auf B

$$\vec{a}_p^A = \vec{a}_p^B$$

Linear beschleunigtes Bezugssystem

Symptome

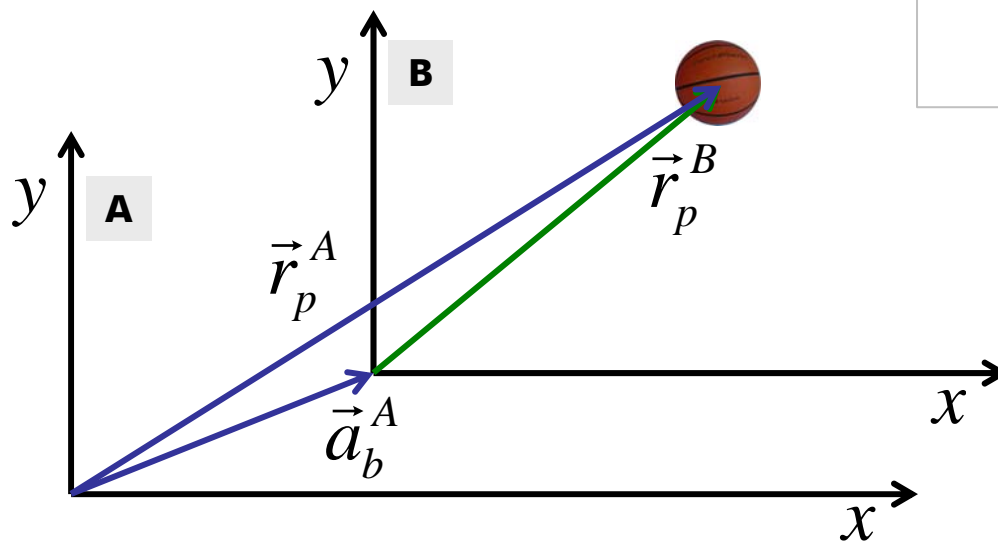
- im bewegten Bezugssystem (B) beobachtet Beschleunigung zusammensetzt aus zwei Anteilen
- Beschleunigung durch wirkende Kraft
- Beschleunigung des Bezugssystem

Gleichungen in Bezugssystem, das mit a^B beschleunigt wird

$$\vec{r}_p^A = \vec{r}^B + \vec{v}_b^A t + \frac{1}{2} a^B t^2$$

$$\vec{v}_p^A = \vec{v}_b^A + \vec{v}^B + \vec{a}^B t$$

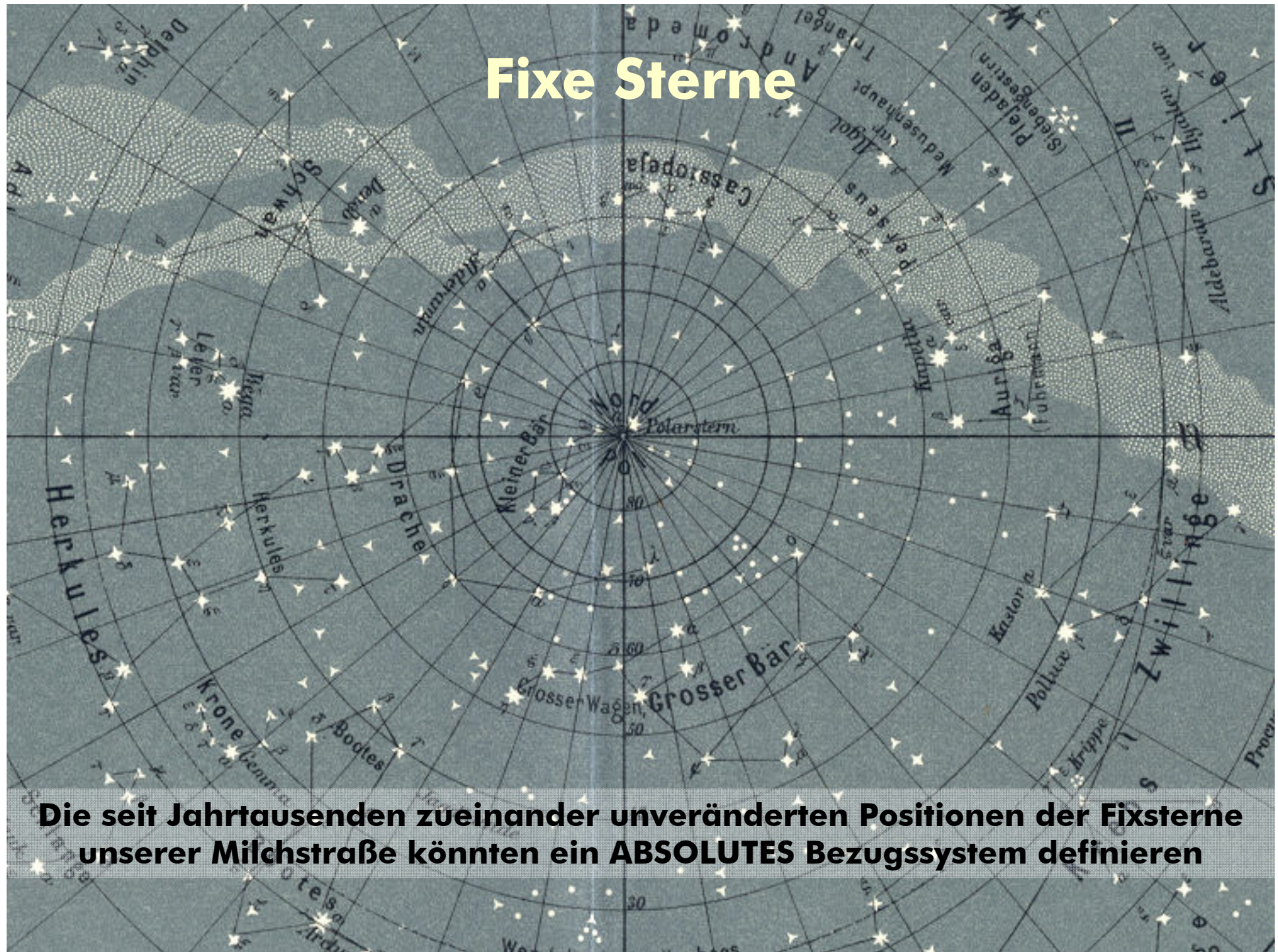
$$\vec{a}_a^B = \vec{a}_b^A + \vec{a}^B$$



Diagnose

- Beobachter in Inertialsystem beobachtet keine Beschleunigung eines Körpers
- Person im bewegten System beobachtet eine Beschleunigung
- diese scheinbare Kraft nennt man Trägheitskraft

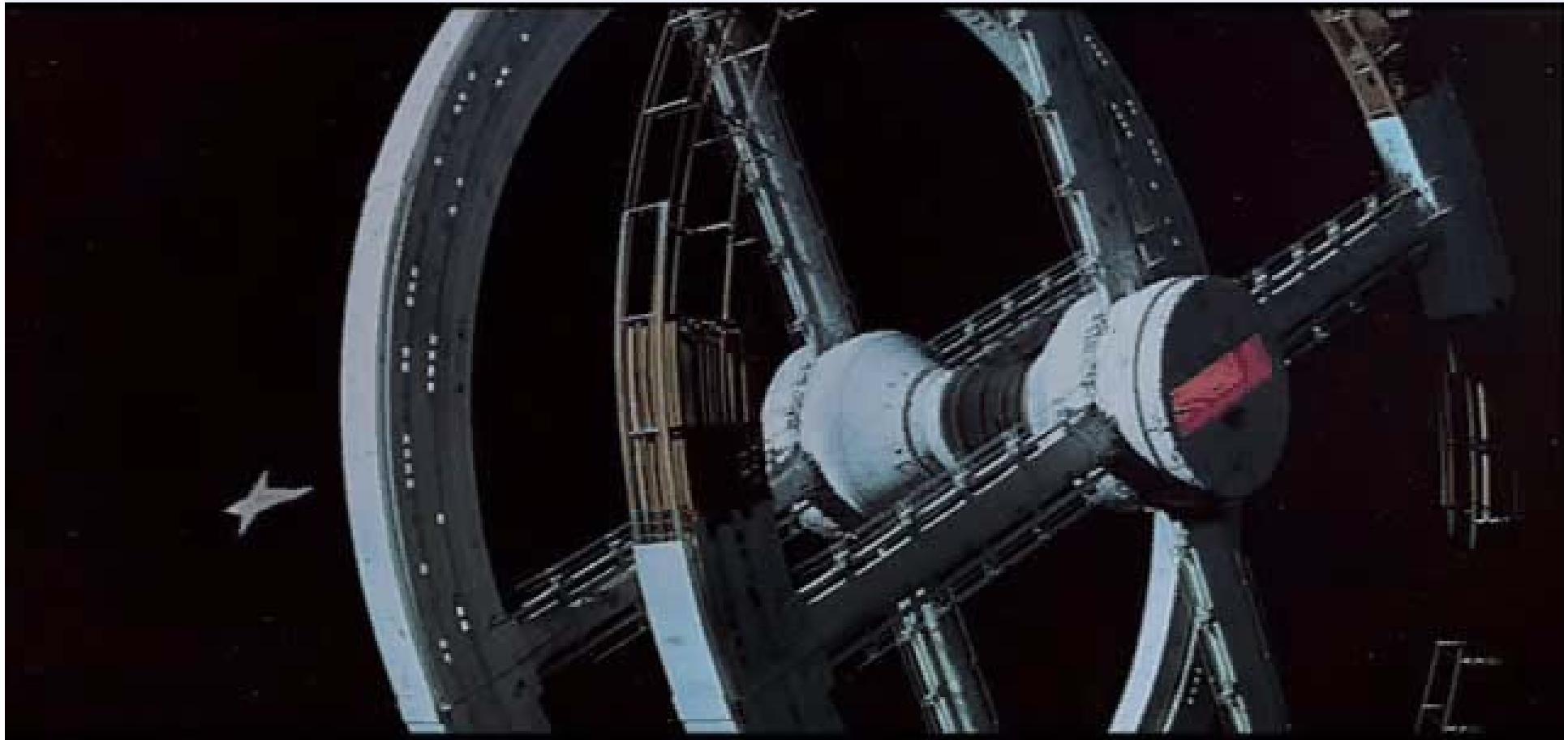
Fixe Sterne



Die seit Jahrtausenden zueinander unveränderten Positionen der Fixsterne unserer Milchstraße könnten ein ABSOLUTES Bezugssystem definieren

Wechsel des Bezugssystems

Annäherung an Raumstation



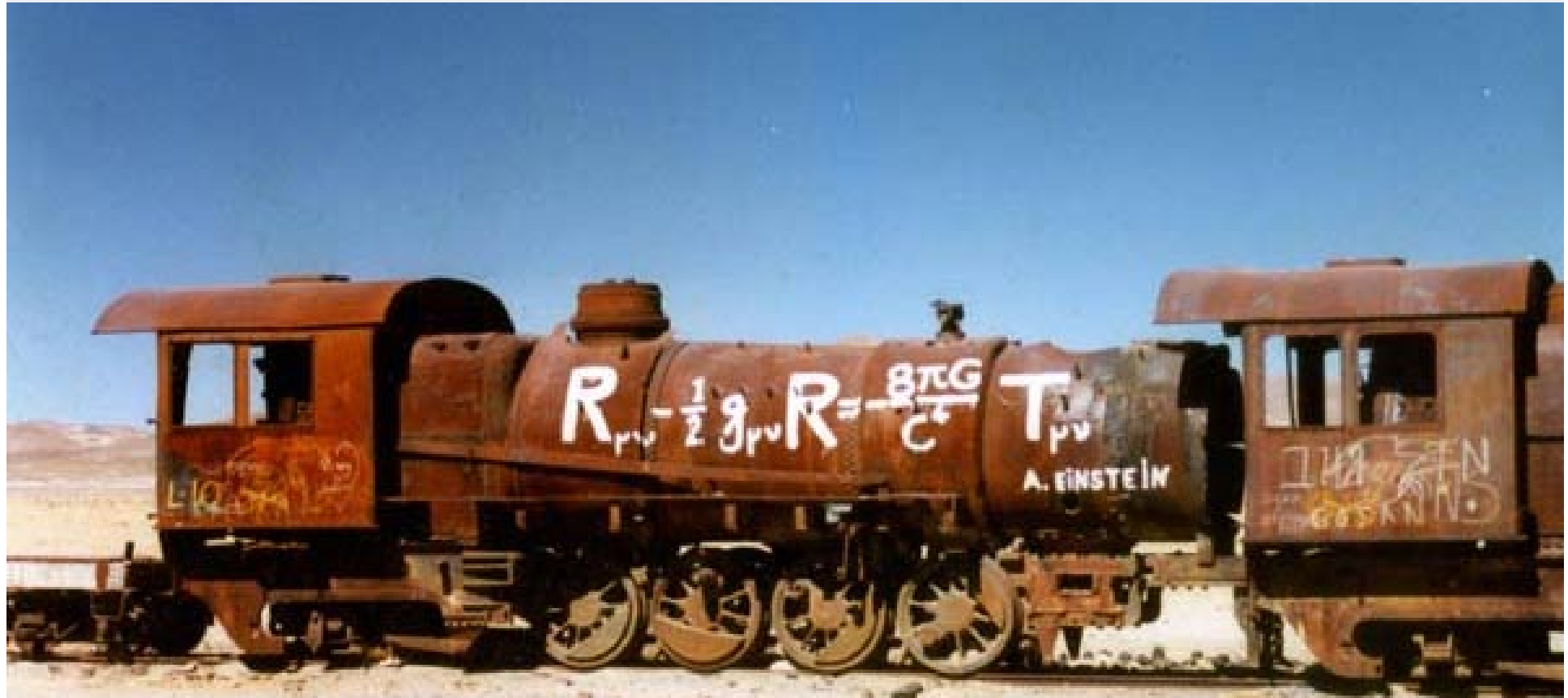
Diagnose

SPEZIELLE Relativitätstheorie beschäftigt sich mit **UNBESCHLEUNIGTEN** Inertialsystemen

ALLGEMEINE Relativitätstheorie beschäftigt sich mit **BESCHLEUNIGTEN** Inertialsystemen

Spezielle Relativitätstheorie

Zusammenhang zwischen Ereignissen und physikalischen Größen
in unterschiedlichen Bezugssystemen



Allgemeine Relativitätstheorie

Zusammenhang zwischen Ereignissen und physikalischen Größen
in beliebigen, speziell beschleunigten Bezugssystemen

Was beobachtet der andere? Bewegung ist relativ

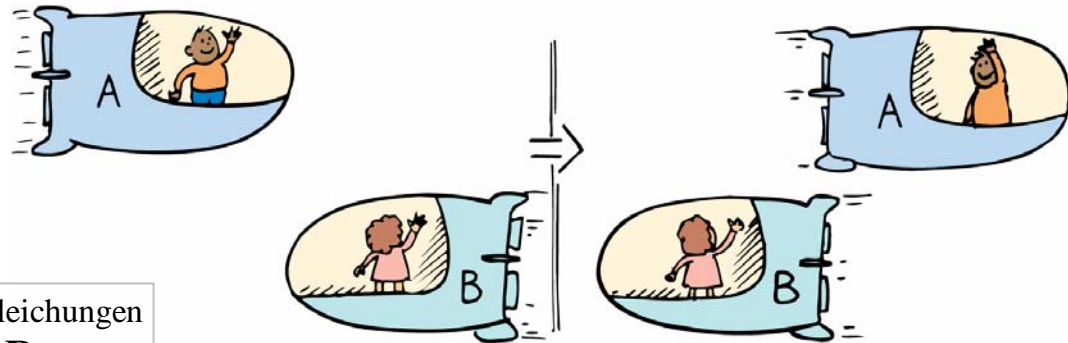
Symptome

- wer bewegt sich, wer bewegt sich nicht oder bewegen sich beide Körper?
- welches Bezugssystem könnte man als das ruhende definieren?
- gibt es überhaupt ausgezeichnetes Bezugssystem?
- Beispiel: Faradaysche Induktion



Lorentzkraft

$$\vec{F}_M = q_e \cdot \vec{v}_e \times \vec{B}_M$$



Eine der Maxwell'schen Gleichungen

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}_e = - \frac{\partial \vec{B}_M}{\partial t}$$

Faradaysches Induktionsgesetz

Faradaysche
Induktion



Diagnose

- bewegt man Spule in Richtung Magnet, ergibt sich aus Lorentzkraft elektrischer Strom
- bewegt man den Magneten sollte Phänomen nicht auftreten, da Elektronen in Ruhe
- Faraday argumentiert: sich änderndes magnetisches Feld erzeugt zirkulares elektrisches Feld
- relative Bewegung ist entscheidend und liefert in beiden Fällen gleiches Resultat

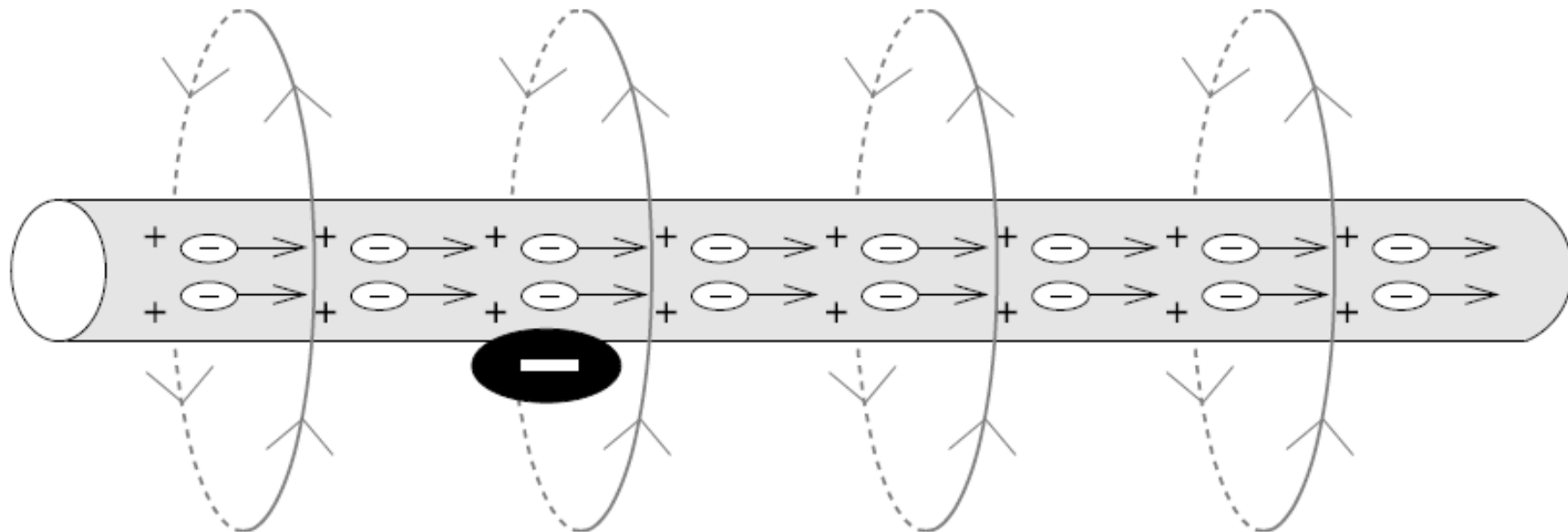
Bewegung ist relativ – Situation A

Faradaysches Paradoxon



Symptome

- Atomrümpfe sind geladen und ruhen im Leiter
- Elektronen bewegen sich im Metall

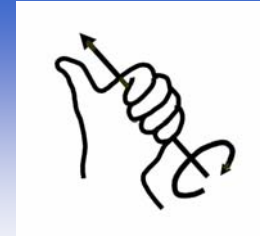


Diagnose

- da Leiter nach außen hin **NEUTRAL** ist, gibt es **KEINE** elektrische Wechselwirkung
- relativ zum Leiter ist Testladung in Ruhe
- relativ zum Magnetfeld ist Testladung in Ruhe
- Testladung setzt sich **NICHT** in Bewegung
- Testladung erfährt **KEINE** magnetische Wechselwirkung

Bewegung ist relativ – Situation B

Faradaysches Paradoxon

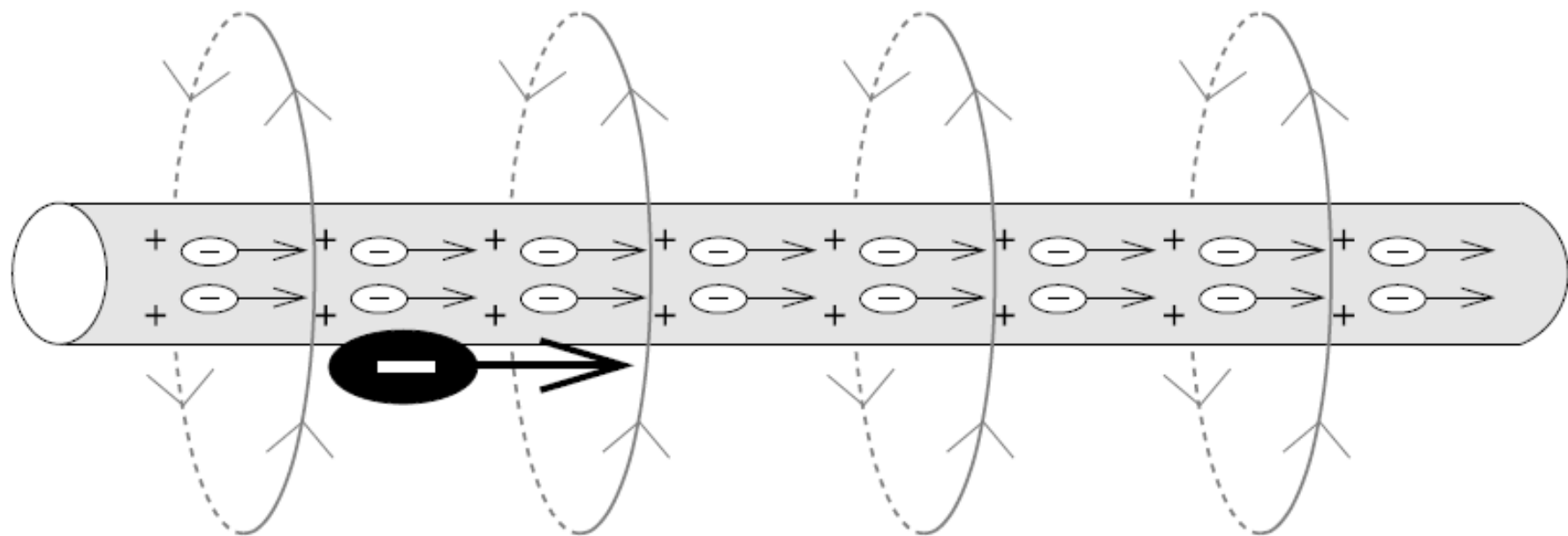


Symptome

- bewegte negative Ladungen erzeugen magnetisches Feld nach Linker-Hand-Regel
- damit ergibt sich magnetische Kraft auf bewegte Testladung
- Lorentzkraft erhöht sich mit Geschwindigkeit Testladung und mit elektrischem Strom in Leiter

Lorentzkraft

$$F_M = q_e \cdot \vec{v}_e \times \vec{B}_M$$



Diagnose

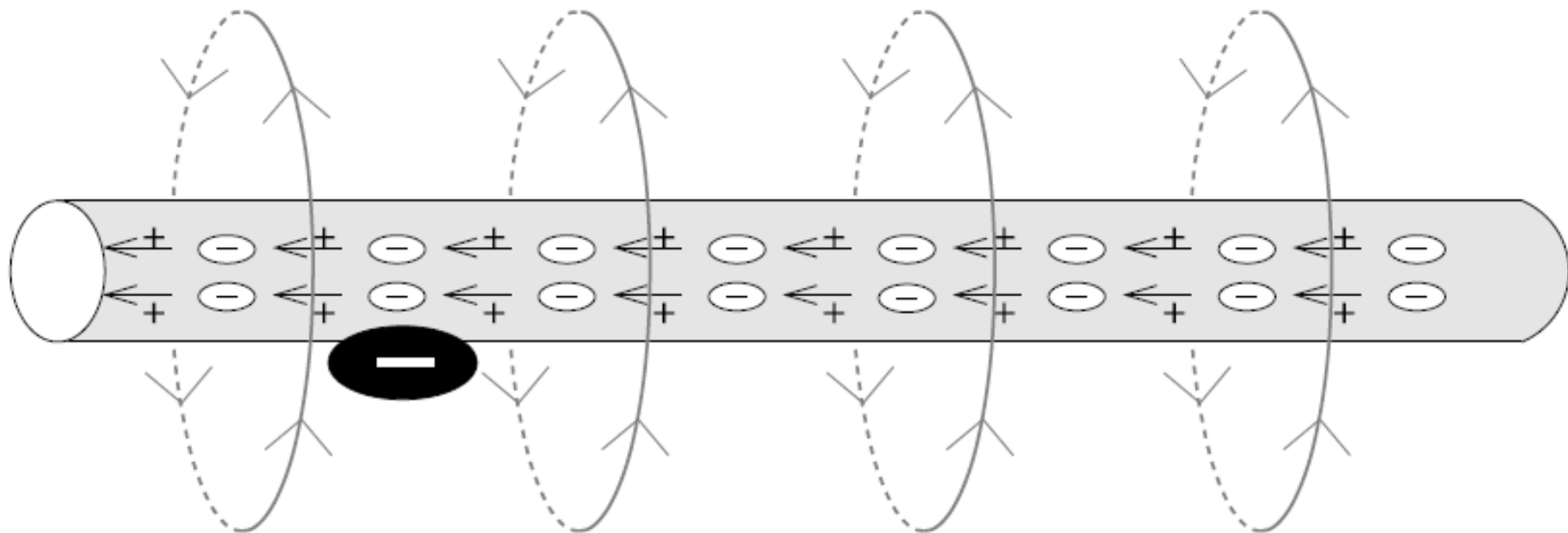
Bewegung der Testladung relativ zum Magnetfeld führt zu magnetischer Wechselwirkung

Bewegung ist relativ – Situation C

Faradaysches Paradoxon

Symptome

- Testladung bewegt sich **GENAU** mit **Geschwindigkeit** Elektronen in Leiter
- **Elektronen in Leiter und Testladung bewegen sich also relativ zueinander NICHT**
- **relativ zu Testladung bewegen sich Ionenrümpfe nach RECHTS**
- **Leiter bewegt sich aus Sicht der Testladung nach RECHTS**
- **Magnetfeld hat aufgrund Rechte-Hand-Regel gleiche Richtung**



Diagnose

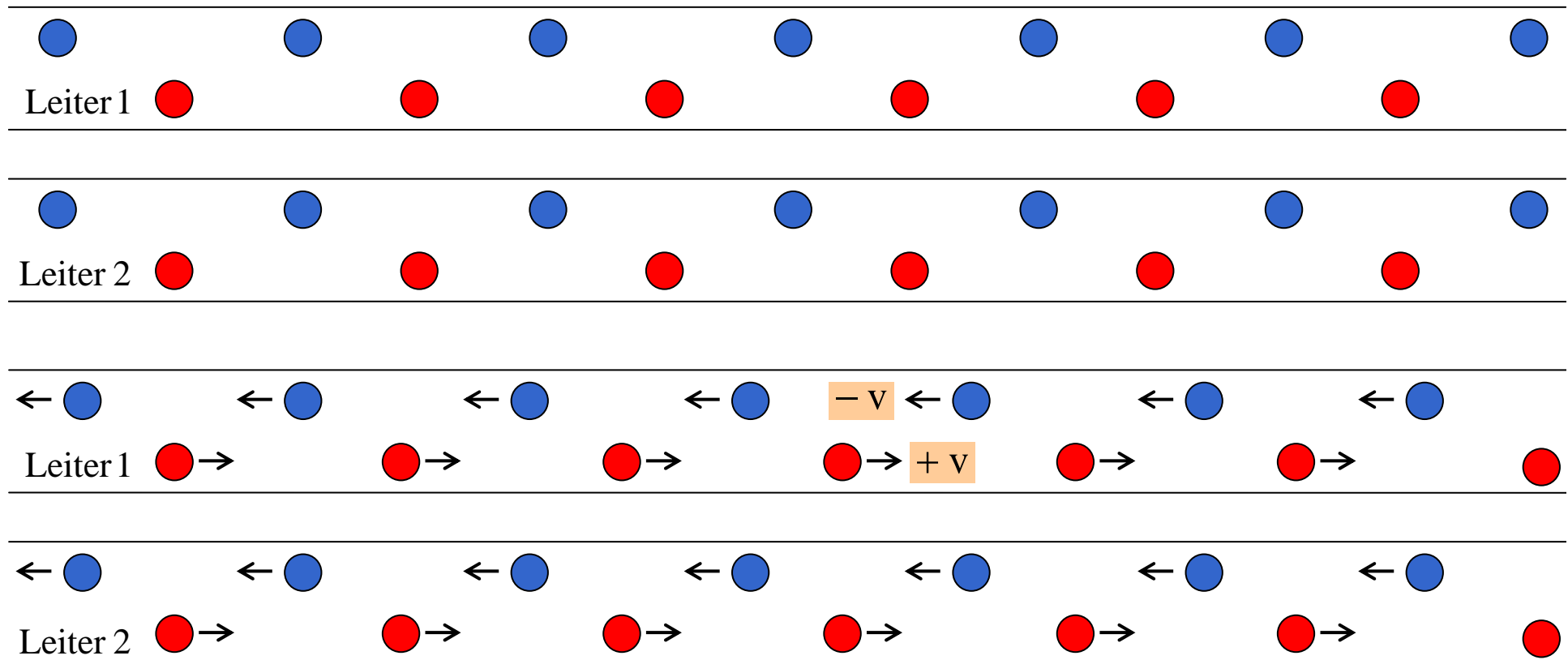
- im Fallbeispiel A ist Testladung in Ruhe relativ zu Leiter **UND** magnetischem Feld
- im Fallbeispiel C ist Testladung in Ruhe relativ nur zum Magnetfeld
- ist Magnetfeld damit überhaupt eine reale physikalische Größe?

Faradaysches Paradoxon



Symptome

Idealisierte parallele Leiterbahnen enthalten gleich viele positive und negative Ladungsträger



Diagnose

- bei Ladungstransport kontrahieren die Abstände der Ladungsträger für ruhenden Beobachter
- System bleibt aber für Beobachter nach außen neutral
- trotzdem gibt es auf einmal eine Wechselwirkung zwischen den Leitern

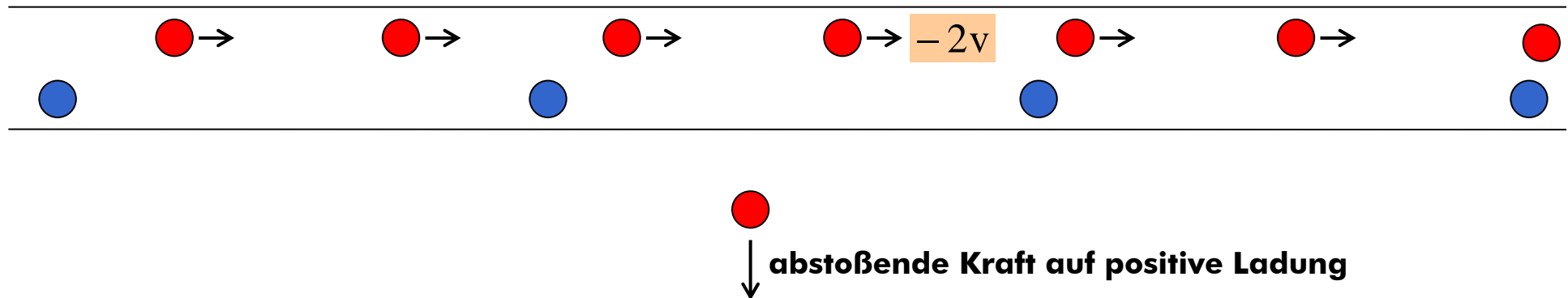


Faradaysches Paradoxon



Symptome

- äußere positive Ladung bewegt sich mit selber Geschwindigkeit wie Elektronen
- aus der Sicht der äußeren Ladung bewegen sich die positive Ladungen im Leiter
- im Ruhesystem der positiven Ladung erhöht sich die Dichte der positiven Ladungsträger
- Ursache ist die Längenkontraktion der Speziellen Relativitätstheorie
- durch die noch höhere relative Geschwindigkeit verstärkt sich die Längenkontraktion



Diagnose

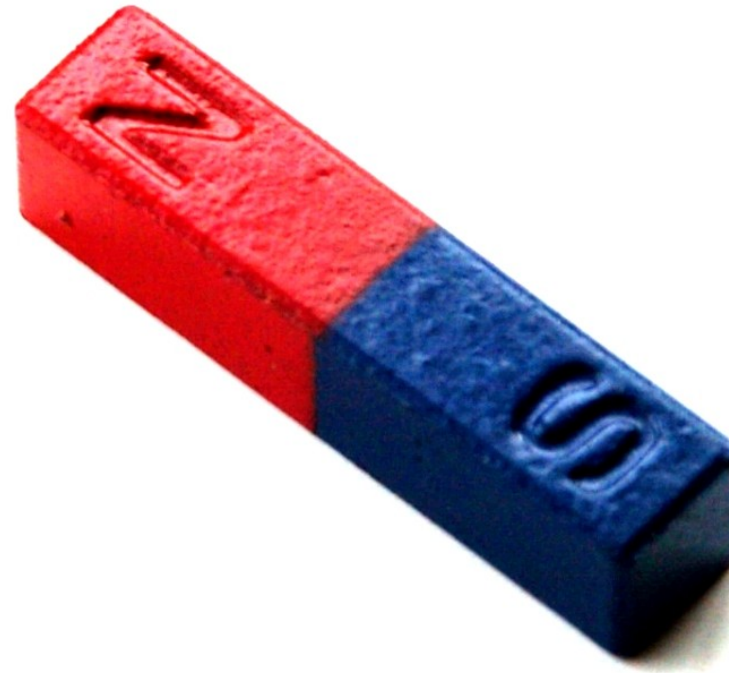
- Bezugssystem positive Ladung sieht positiven Ladungsüberschuss und erfährt elektrische Kraft
- im Bezugssystem eines ruhenden Beobachter ist der Leiter mysteriöserweise neutral
- woraus resultiert Kraft auf eine bewegte Ladung
- die klassische Physik sagt: Aufgrund der magnetischen Wechselwirkung (Lorentzkraft)!

Faradaysches Paradoxon



Symptome

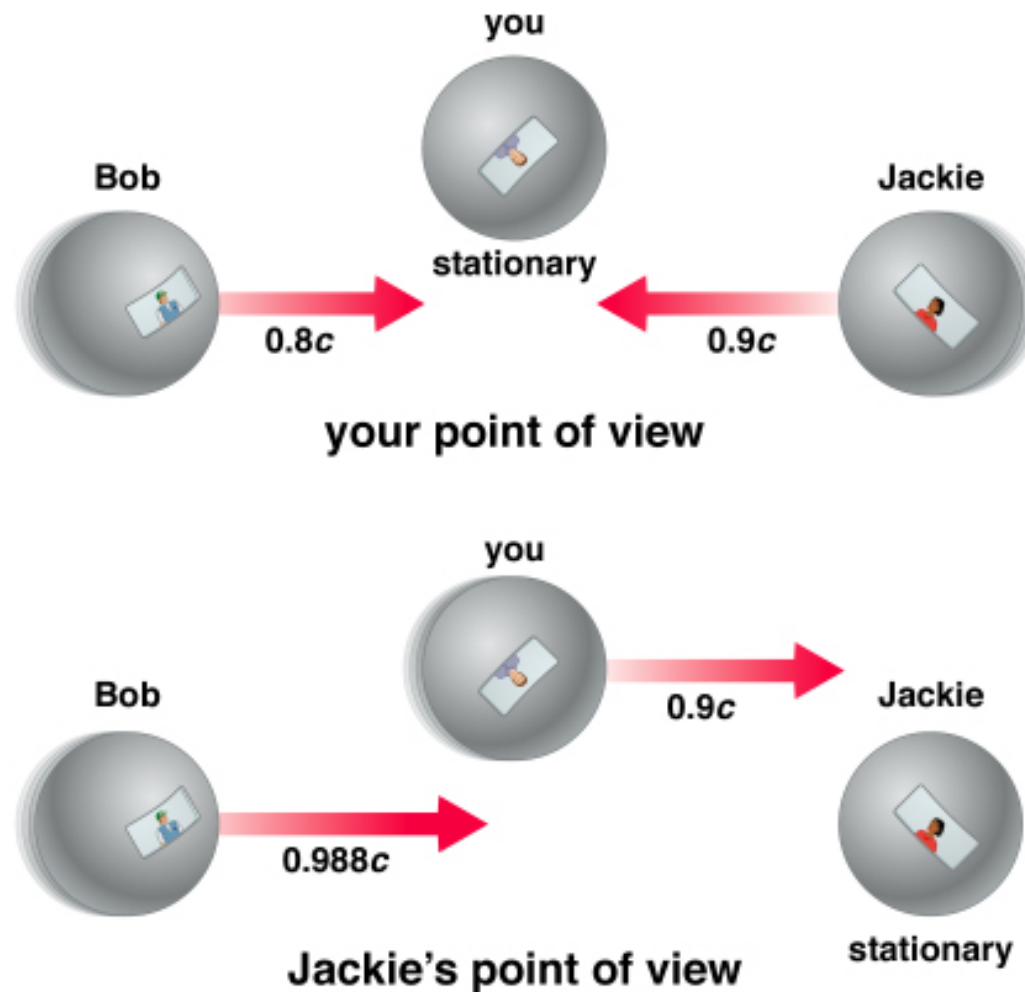
- für ruhenden Beobachter ist Ursache Wechselwirkung aufgrund Bewegung Ladungen
- Magnetismus ist elektrisches Feld betrachtet bloß aus Sichtweise ruhenden Bezugssystems



Diagnose

- für bewegten Beobachter ist Ursache Längenkontraktion aufgrund SRT
- Geschwindigkeit der Elektronen im Leiter ist mit 0.3 m/h äußerst gering
- Längenkontraktion ist verschwindend gering
- allerdings gibt es viele Elektronen, z.B. 1 Ampere sind 10^{19} Elektronen/ Sekunden
- ein Elektromagnet ist Beispiel für spezielle Relativitätstheorie
- ABER wie erklärt sich damit das Verhalten von Stabmagneten?

Was beobachtet der andere? Bewegung ist relativ



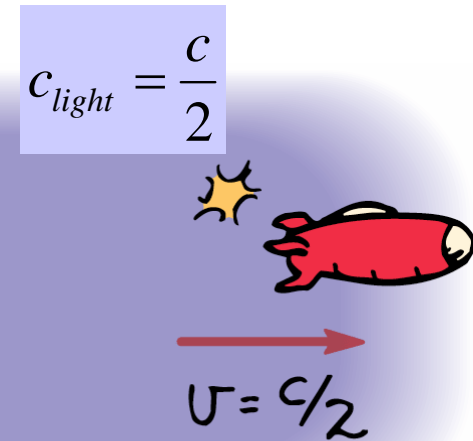
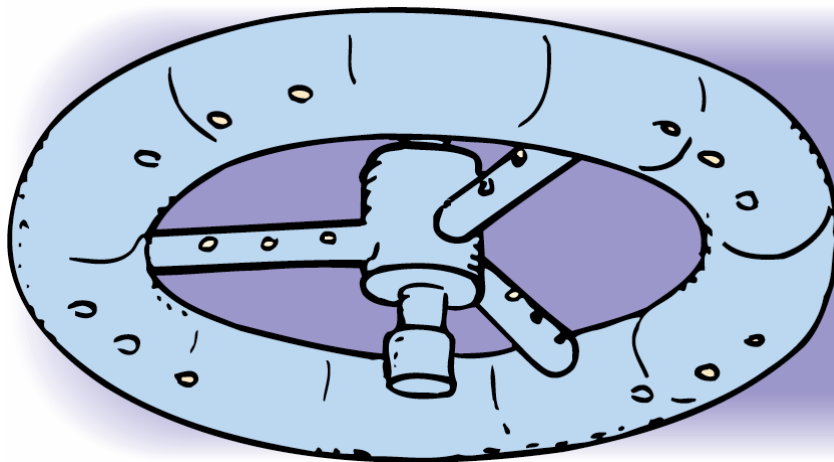
Diagnose

Je nach Bezugssystem ergeben sich unterschiedliche Sichtweisen auf eine Situation

Was beobachtet der andere? Bewegung ist relativ

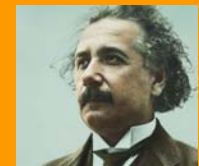
Symptome

- sich mit $c/2$ entfernende Rakete sendet Lichtpuls an Raumstation
- hat der Lichtpuls dann nur die halbe Lichtgeschwindigkeit?



Diagnose

Jeder Lichtstrahl bewegt sich im ruhenden System mit bestimmter, gleich bleibender Geschwindigkeit unabhängig davon, ob dieser Lichtstrahl von einem ruhenden oder bewegten Körper entsandt wird



Albert Einstein 1905