

# Bezugssysteme – neu beleuchtet

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 1

## **Kleine Vorbemerkung**

Beim Bezugssystemwechsel:

- ändert sich die mathematische Beschreibung
- das physikalische Phänomen bleibt gleich

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 2

## Bezugssysteme



„Eine Frage Herr Schaffner, wann hält Ulm an diesem Zug?“  
(A. Einstein)

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 3

## Bezugssysteme

Um einen Bewegungsvorgang zu beschreiben, muss man ein  
Bezugssystem wählen:

Ein Koordinatensystem, das man sich an einem Bezugskörper  
befestigt denkt.

Man muss festlegen, wie man die Nullpunkte von Ort,  
Geschwindigkeit und Beschleunigung wählt.

(wie bei elektrischem Potenzial, Temperatur, ...)

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 4

## Bezugssystemwechsel

Was passiert bei einem Bezugssystemwechsel vom System S zum System S' ?

Im Folgenden zwei Fälle:

- Bezugssystem S' bewegt sich gegen S mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v_0$
- Bezugssystem S' bewegt sich gegen S mit einer konstanten Beschleunigung  $a_0$

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 5

## S' bewegt sich gegen S mit $v_0$

Geschwindigkeit:

$$v' = v - v_0 \quad v \text{ bezugssystemabhängig}$$

Impuls:

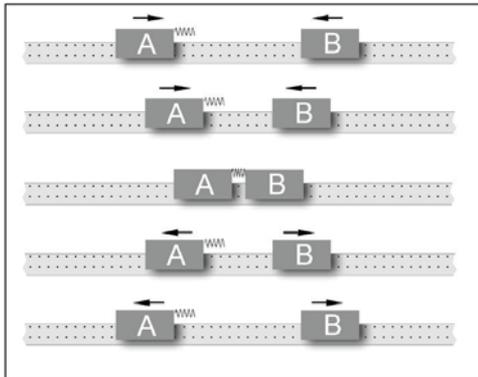
$$p' = m \cdot v' = m \cdot (v - v_0) \quad p \text{ bezugssystemabhängig}$$

kinetische Energie:

$$E_{kin}' = \frac{m}{2} \cdot v'^2 = \frac{m}{2} \cdot (v - v_0)^2 \quad E_{kin} \text{ bezugssystemabhängig}$$

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 6

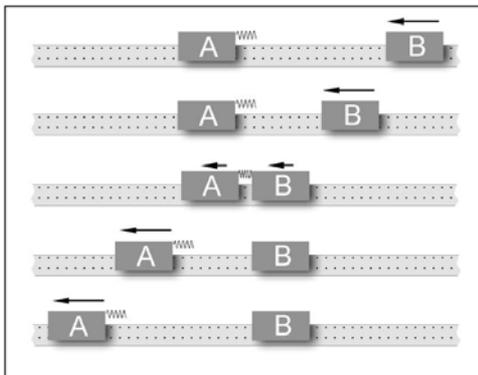
## Impuls- und Energiesatz?



	A	B	zusammen
<i>vorher</i>			
$v$	3 m/s	-3 m/s	
$p$	6 Hy	-6 Hy	0 Hy
$E_{kin}$	9 J	9 J	18 J
<i>nachher</i>			
$v$	-3 m/s	3 m/s	
$p$	-6 Hy	6 Hy	0 Hy
$E_{kin}$	9 J	9 J	18 J

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 7

## Impuls- und Energiesatz?

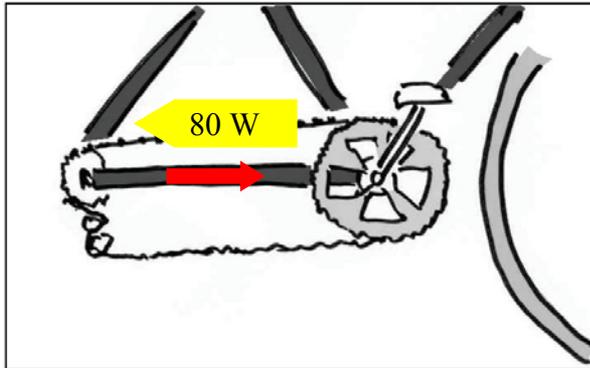


	A	B	zusammen
<i>vorher</i>			
$v'$	0 m/s	-6 m/s	
$p'$	0 Hy	-12 Hy	-12 Hy
$E'_{kin}$	0 J	36 J	36 J
<i>nachher</i>			
$v'$	-6 m/s	0 m/s	
$p'$	-12 Hy	0 Hy	-12 Hy
$E'_{kin}$	36 J	0 J	36 J

Der Bezugssystemwechsel ändert nichts an der Gültigkeit des Energie- und des Impulserhaltungssatzes.

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 8

## Energietransporte: die Fahrradkette



Anwendung von:

$$P = v \cdot F$$

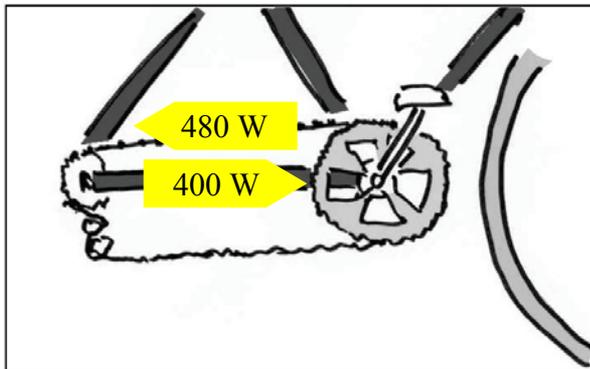
$$F = 80 \text{ N}$$

$$v_{\text{Kette}} = 1 \text{ m/s}$$

Bezugssystem Fahrrad:  $P = v_{\text{Kette}} \cdot F = 1 \text{ m/s} \cdot 80 \text{ N} = 80 \text{ W}$

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 9

## Energietransporte: die Fahrradkette



Anwendung von:

$$P = v \cdot F$$

$$F = 80 \text{ N}$$

$$v_{\text{Kette}} = 1 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{Fahrrad}} = 5 \text{ m/s}$$

Bezugssystem Erde:

$$P_1 = (v_{\text{Kette}} + v_{\text{Fahrrad}}) \cdot F = 6 \text{ m/s} \cdot 80 \text{ N} = 480 \text{ W}$$

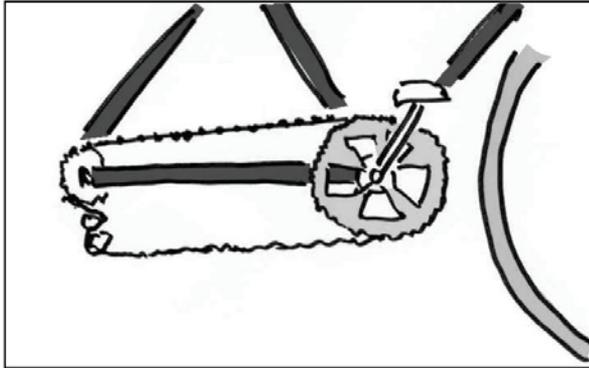
$$P_2 = v_{\text{Fahrrad}} \cdot (-F) = 5 \text{ m/s} \cdot (-80 \text{ N}) = -400 \text{ W}$$

$$P = P_1 + P_2 = 80 \text{ W}$$



Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 10

## Energietransporte: die Fahrradkette



Anwendung von:

$$P = v \cdot F$$

$$F = 80 \text{ N}$$

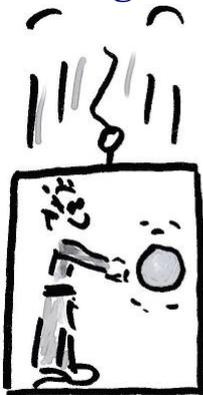
$$v_{\text{Kette}} = 1 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{Fahrrad}} = 5 \text{ m/s}$$

Mechanische Energieströme sind bezugssystemabhängig.

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 11

## S' bewegt sich gegen S mit $a_0$



freier Fall



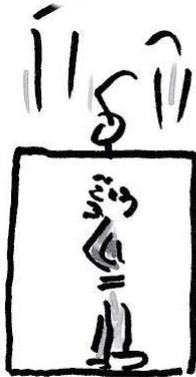
Die Gravitationsfeldstärke  
ist bezugssystemabhängig!

im Aufzug: alles schwerelos, kein Gravitationsfeld

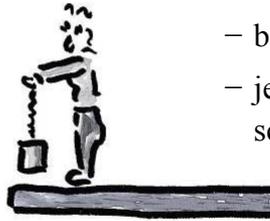
von außen: beschleunigter Fall, Gravitationsfeld

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 12

## S' bewegt sich gegen S mit $a_0$



freier Fall



Masse ist

- bezugssystemunabhängig
- je nach Bezugssystem schwer oder träge

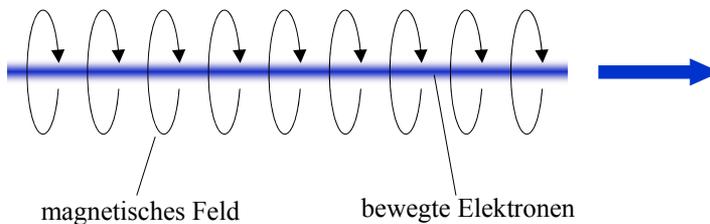
von außen: auf Gewicht wirkt Gravitation, es ist *schwer*

im Aufzug: Gewicht ist beschleunigt, es ist *träge*

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 13

## Bezugssystemwechsel in der Elektrodynamik

Elektronenstrahl:



Bezugskörper Erde: elektrischer Strom

magnetisches Feld

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 14

## Bezugssystemwechsel in der Elektrodynamik

Elektronenstrahl:

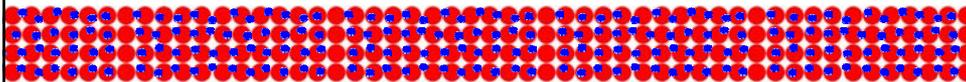


Bezugskörper Elektronen: kein elektrischer Strom  
kein magnetisches Feld  
⇒ elektrische Stromstärke und magnetische Feldstärke sind  
bezugssystemabhängig

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 15

## Bezugssystemwechsel in der Elektrodynamik

elektrischer Strom in einem Kupferdraht:



**ruhende positive Restatome**

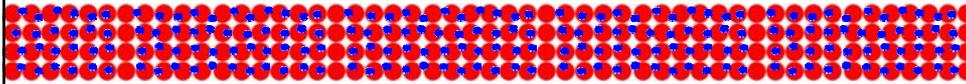
**bewegte Elektronen**

Bezugskörper Draht: elektrischer Strom (Elektronen)  
magnetisches Feld

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 16

## Bezugssystemwechsel in der Elektrodynamik

elektrischer Strom in einem Kupferdraht:



**bewegte positive Restatome**

**ruhende Elektronen**

Bezugskörper Elektronen: elektrischer Strom (Restatome)  
magnetisches Feld

⇒ Bei einem neutralen Leiter ändert sich die elektrische  
Stromstärke und die magnetische Feldstärke nicht.

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 17

## Felder beim Bezugssystemwechsel

Wie verhalten sich elektrische und magnetische Felder beim  
Wechsel des Bezugssystems?

Wie kann man die auftretenden Felder im jeweiligen  
Bezugssystem mit den Maxwellgleichungen erklären?

Beim Bezugssystemwechsel entstehen aus elektrischen Feldern  
magnetische Felder und umgekehrt.

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 18

## Felder beim Bezugssystemwechsel

Konsequenz:

- Elektrische und magnetische Felder sind nicht verschiedene physikalische Systeme, sondern zwei Aspekte des gleichen Systems, des elektro-magnetischen Feldes.
- Die elektrische und magnetische Komponente des Feldes unterscheidet sich je nach Bezugssystem.

Antwort bereits in erster Veröffentlichung zur Relativitätstheorie:

Albert Einstein: „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“

(Annalen der Physik und Chemie, 1905)

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 19

## Ursprung der Relativitätstheorie

Einsteins Ausgangspunkt für die Relativitätstheorie war Unzufriedenheit mit der Elektrodynamik:

*„Daß die Elektrodynamik Maxwells ... in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt ... ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter.“*

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 20

## Transformationsgleichungen für Felder

relativistisch:

$$\vec{E}' = \gamma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - \frac{\gamma^2}{\gamma+1} \vec{\beta}(\vec{\beta} \cdot \vec{E})$$

$$\vec{H}' = \gamma(\vec{H} - \vec{v} \times \vec{D}) - \frac{\gamma^2}{\gamma+1} \vec{\beta}(\vec{\beta} \cdot \vec{H})$$

$$\vec{\beta} = \frac{\vec{v}}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

nicht-relativistische Näherung:

$$\vec{E}' = \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{H}' = \vec{H} - \vec{v} \times \vec{D}$$

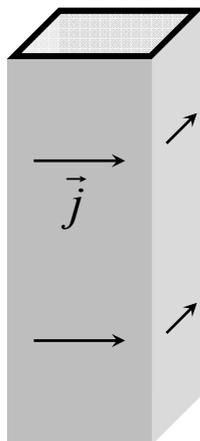
Vergleiche Lorentzkraft im Ruhesystem des bewegten Teilchens:

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = q \cdot \vec{E}'$$

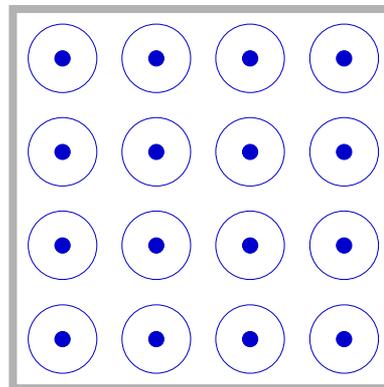
Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 21

## Beispiel: ein quadratisches elektrisches Feld

Unendlich lange Spule



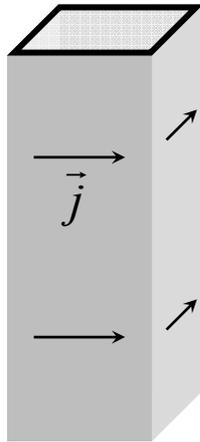
Querschnitt von oben



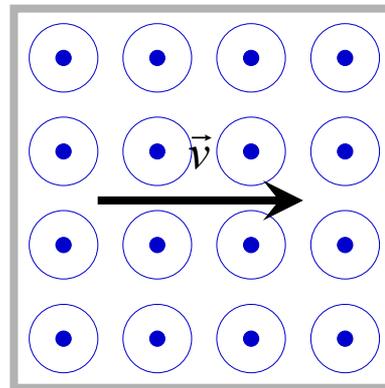
Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 22

# Wechsel des Bezugssystems

Unendlich lange Spule



Querschnitt von oben

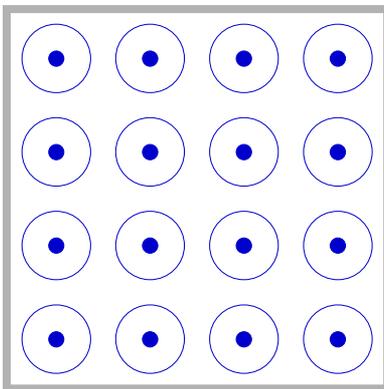


$$\vec{H}$$

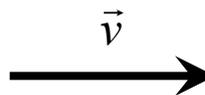
$$\vec{E} = 0$$

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 23

# magnetisches Feld

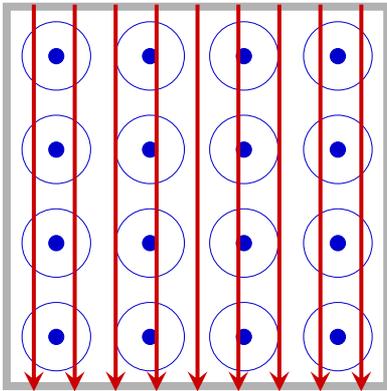


$$\vec{H}' = \vec{H} - \vec{v} \times \vec{D} = \vec{H}$$



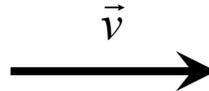
Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 24

## elektrisches Feld



$$\vec{H}' = \vec{H} - \vec{v} \times \vec{D} = \vec{H}$$

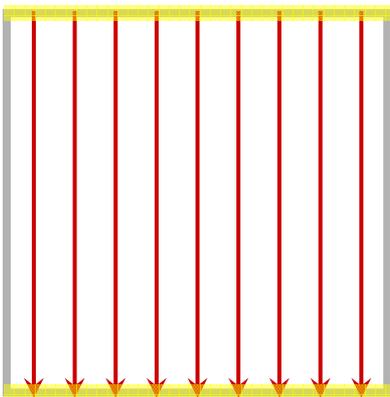
$$\vec{E}' = \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = \vec{v} \times \vec{B}$$



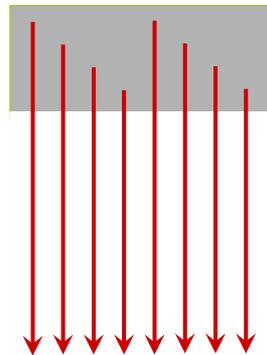
Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 25

## Quellen des elektrischen Feldes

Feldlinien: beginnen und enden auf Flussquellen



Flussquellen

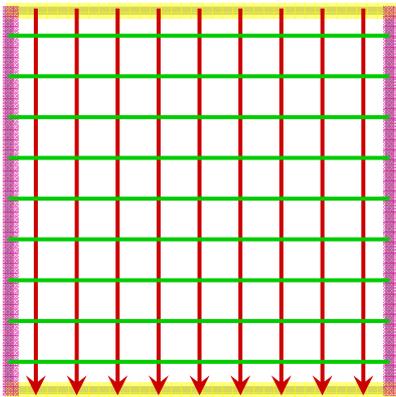


$$3. \text{ MG: } \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon_0}$$

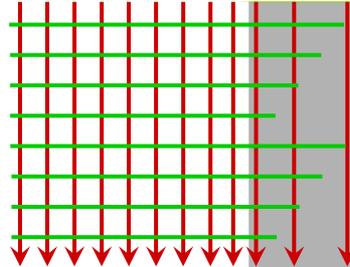
Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 26

## Quellen des elektrischen Feldes

Orthogonalflächen: beginnen und enden auf Wirbelquellen



Flussquellen    Wirbelquellen



$$2. \text{ MG: } \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 27

## Herkunft der Wirbelquellen

nicht-relativistische Erklärung möglich

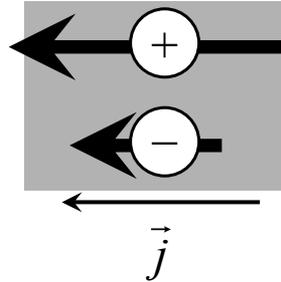
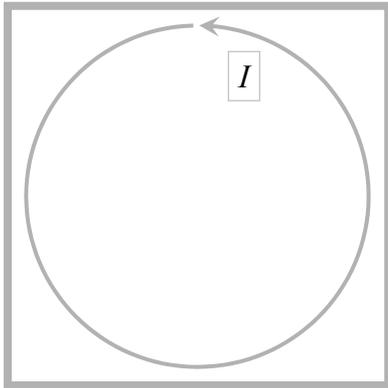
$$2. \text{ Maxwell-Gleichung: } \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 28

## Herkunft der Flussquellen

relativistischer Effekt:

Ladungs- und Stromdichte sind nicht invariant



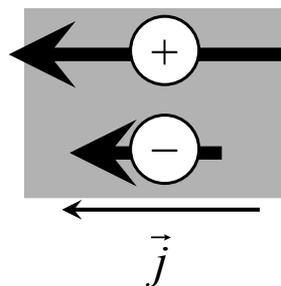
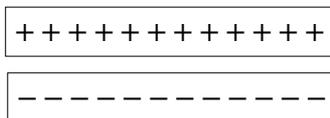
Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 29

## Herkunft der Flussquellen

relativistischer Effekt:

Ladungs- und Stromdichte sind nicht invariant

von null verschiedene Ladungsdichte durch unterschiedliche Längenkontraktion der positiven und negativen Ladungsträger



Bezugssysteme neu beleuchtet, Folie 30