



# Symmetrie: Das Urprinzip der Schöpfung

„Reise zum Urknall“, Urania, Berlin 9.4.2000

Bernhard Spaan, TU Dresden



Symmetrie:

Griechisch: Συμμετρία (Summetria) = Ebenmaß

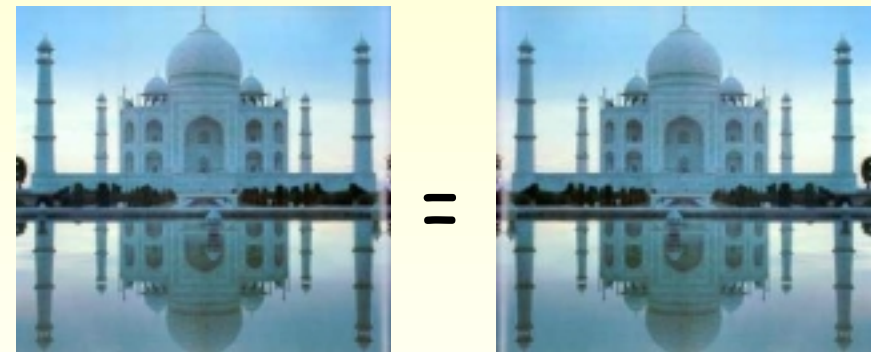
# Was ist Symmetrie?

## Definition der Symmetrie:

„Nach **(bestimmten)** Änderungen an einem System sieht dieses exakt so aus wie zuvor“

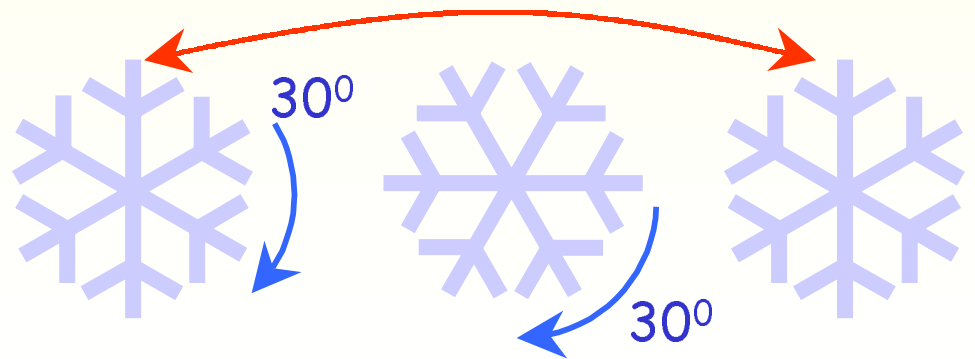
## Beispiele:

- Reflexionen (Spiegelsymmetrie)

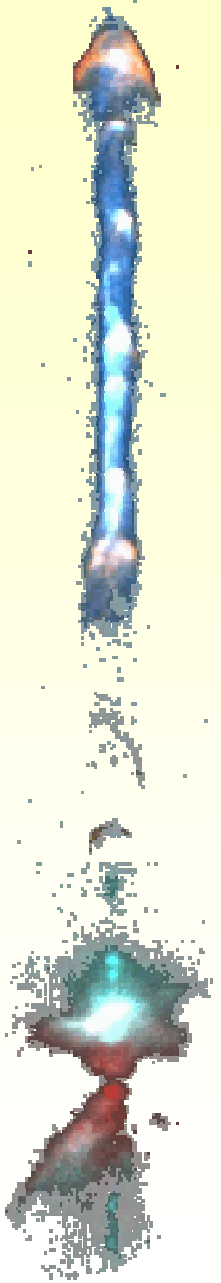


⇒ **Taj Mahal: symmetrisch gegenüber Spiegelungen**

- Rotationen (Drehungen)



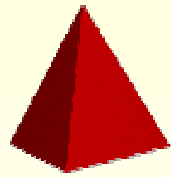
⇒ **Schneeflocke: symmetrisch gegenüber Drehungen um 60°**



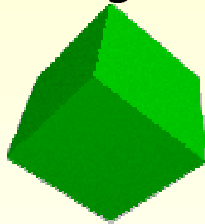
# Zur Geschichte

## ➤ Plato (427-347 v. Chr.)

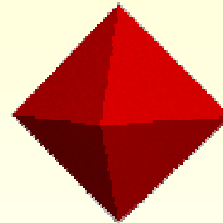
- Weltall: 4 Grundelemente (Feuer, Erde, Luft und Wasser)
- Grundelemente  $\Leftrightarrow$  geometrische Formen



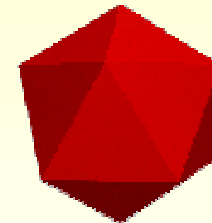
Feuer



Erde



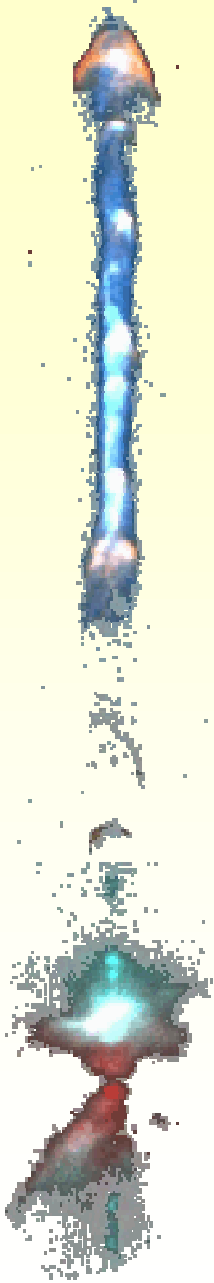
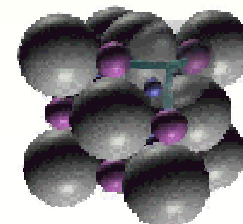
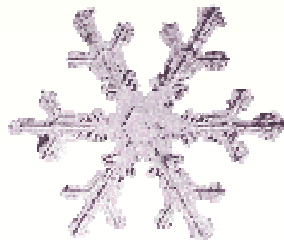
Luft



Wasser

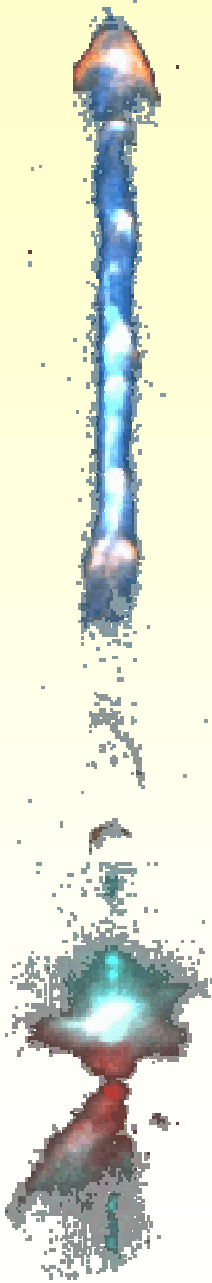
## ➤ Arbeiten zur Kristallsymmetrie und -struktur

- z.B. 1611: Kepler (Schneeflocke), 1849: Bravais (Raumgitter), 1912: v. Laue (Nachweis der Gitterstruktur)

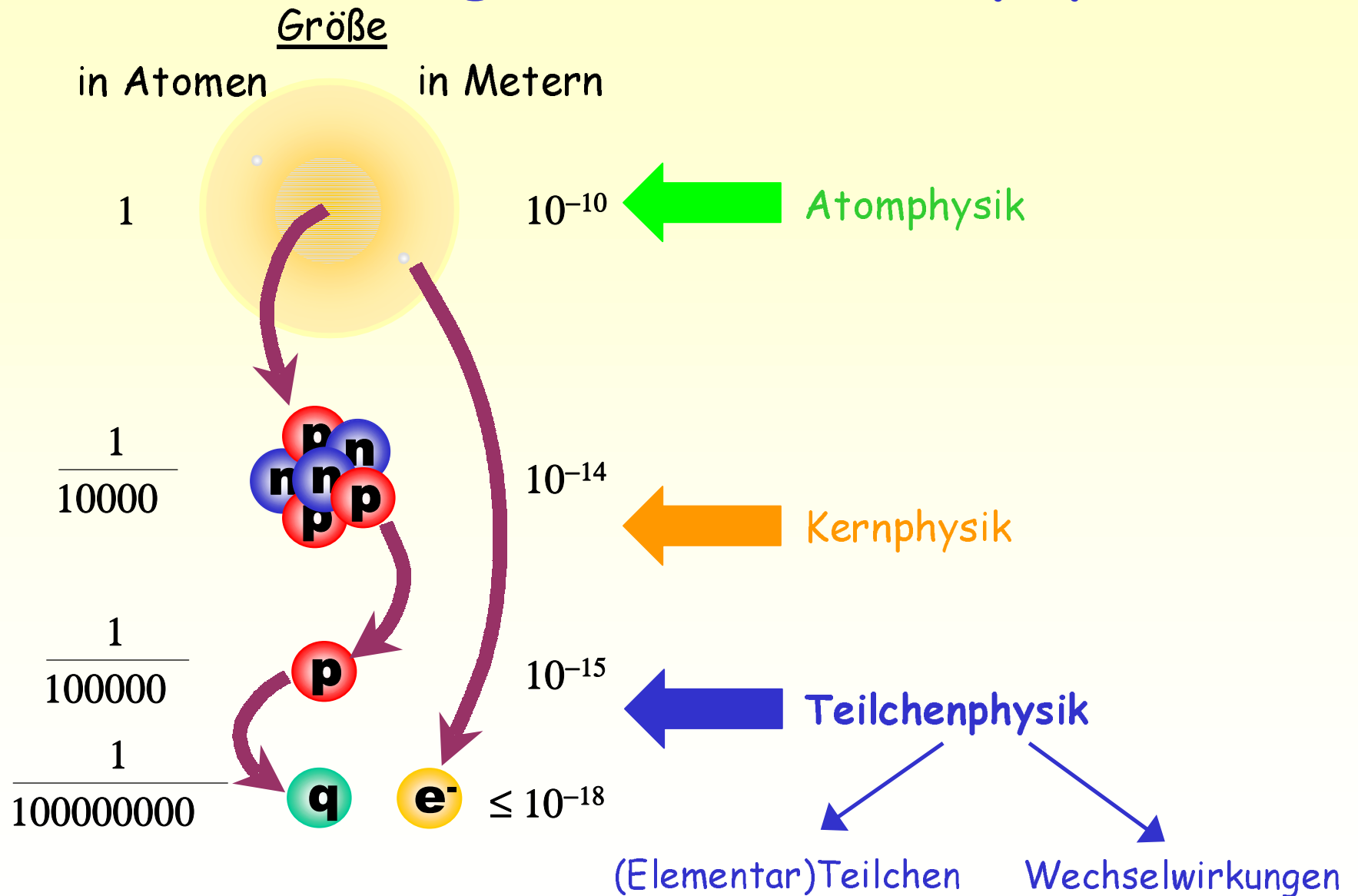


# Symmetrien in der (Teilchen)physik

- Klassifizierung: Periodensystem der Elemente, Elementarteilchen
- Erhaltungssätze
  - Emmy Noether (1917)
    - Symmetrie  $\Rightarrow$  Erhaltungssatz
    - Energie, Impuls, Drehimpuls, Ladung etc...
- Eichsymmetrien
- Diskrete Symmetrien
- Permutationssymmetrie
- Symmetriebrechung
  - Wie bekommen Teilchen Masse?
- ....



# Einführung in die Teilchenphysik



# Elementare Bausteine der Materie

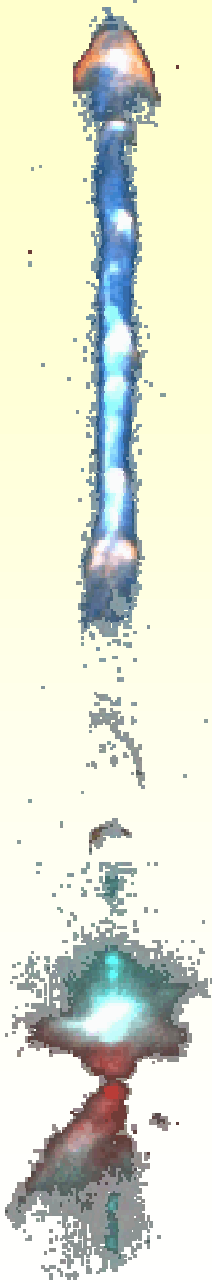
## Teilchen

## Antiteilchen

Leptonen:	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$	Ladung	$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_e \\ e^+ \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_\mu \\ \mu^+ \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ \end{pmatrix}$
Quarks:	$\begin{pmatrix} u^{+\frac{2}{3}} \\ d^{-\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c^{+\frac{2}{3}} \\ s^{-\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t^{+\frac{2}{3}} \\ b^{-\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$		$\begin{pmatrix} \bar{u}^{-\frac{2}{3}} \\ \bar{d}^{+\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{c}^{-\frac{2}{3}} \\ \bar{s}^{+\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{t}^{-\frac{2}{3}} \\ \bar{b}^{+\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$

## Symmetrie:

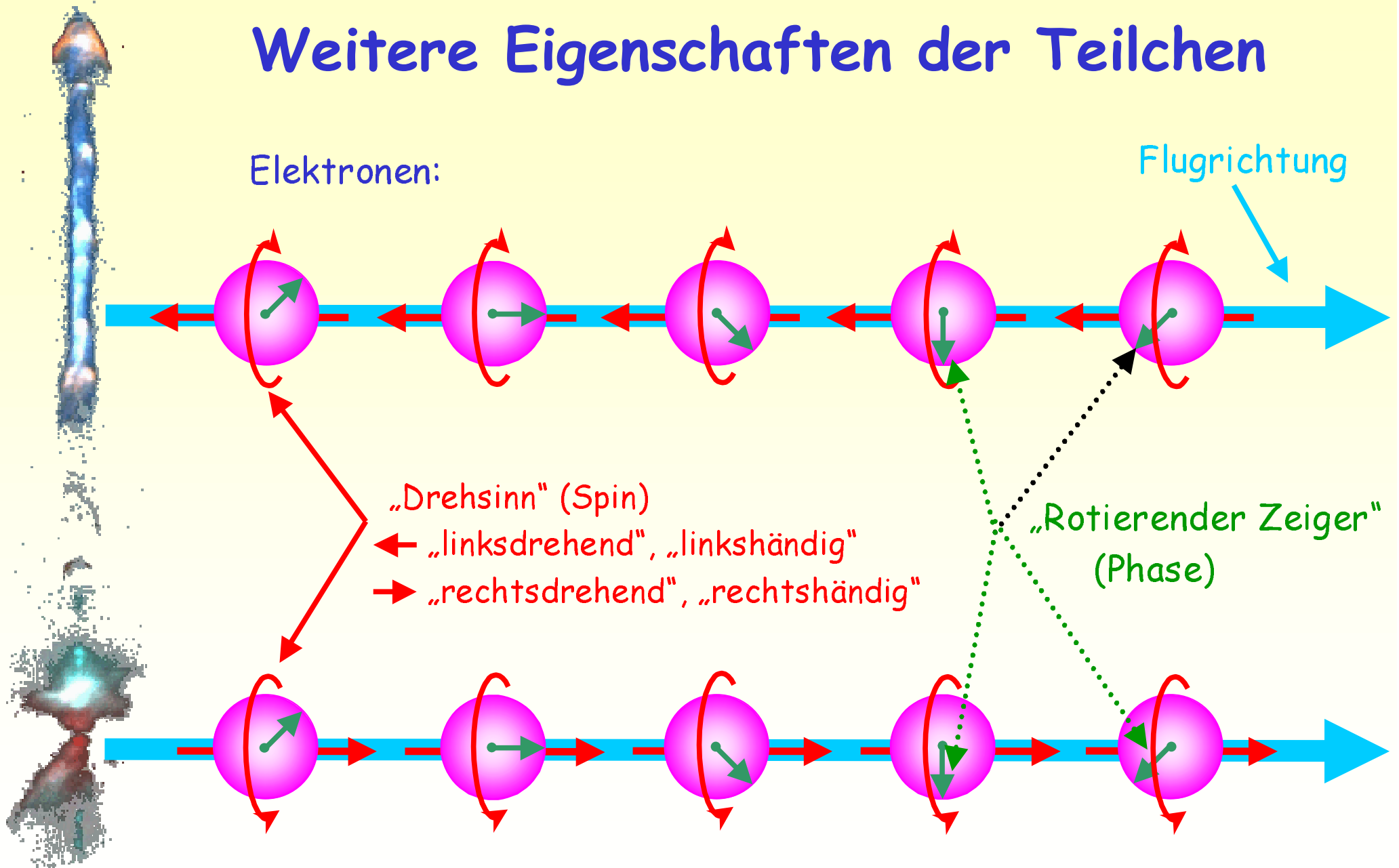
- Ordnung in **jeweils** 3 Familien (vergl. Periodensystem)
- Zu jedem Teilchen existiert ein Antiteilchen
  - mit: ➤ gleicher Masse
  - entgegengesetzter Ladung



# Weitere Eigenschaften der Teilchen

Elektronen:

Flugrichtung



„Drehsinn“ (Spin)

← „linksdrehend“, „linkshändig“

→ „rechtsdrehend“, „rechtshändig“

„Rotierender Zeiger“  
(Phase)

# Wechselwirkungen

## ➤ Wechselwirkungen

- Kraftwirkung zwischen Teilchen
- Verantwortlich für Teilchen-Zerfälle und Vernichtungen

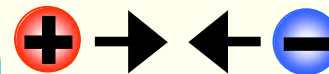
## ➤ Es gibt 4 fundamentale Wechselwirkungen

- Gravitation (Schwerkraft)

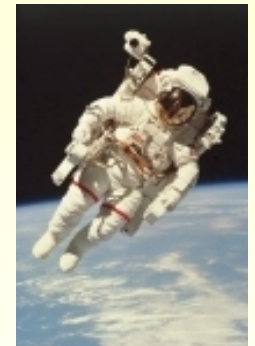
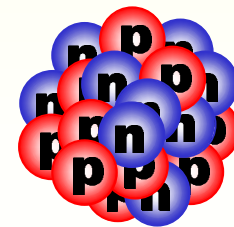
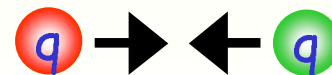
- Elektromagnetismus

- Schwache Wechselwirkung

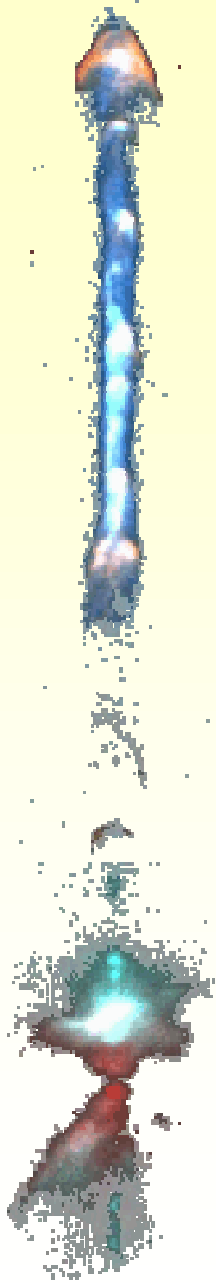
- Starke Wechselwirkung



Elektroschwache Wechselwirkung



⇒ Ursprung aller bekannten Kräfte!

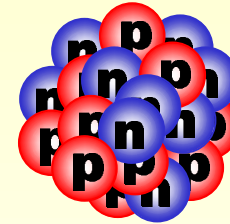




# Wechselwirkungen

Starke Wechselwirkung????? Wofür?

Was hält den Atomkern zusammen?



Neutronen: keine Ladung

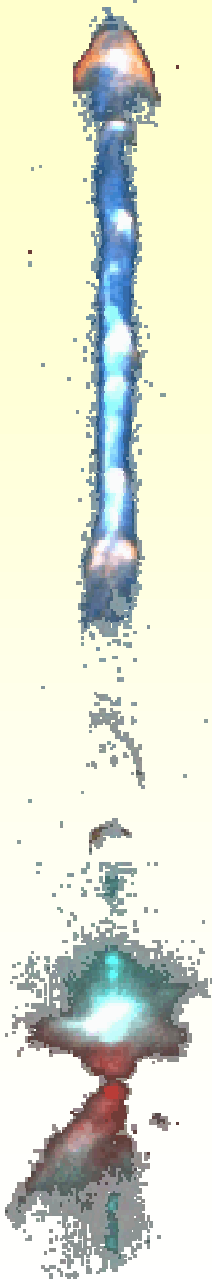
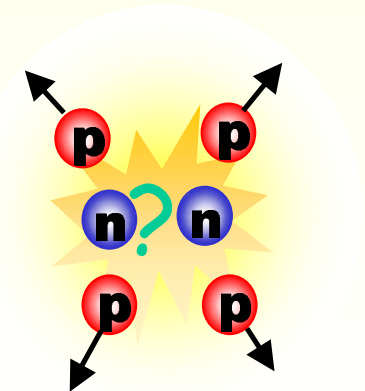
Protonen: positive Ladung - stoßen sich ab



Es gibt eine weitere Kraft:

- überwindet die elektrische Abstoßung
- wirkt nicht auf Elektronen

⇒starke Wechselwirkung

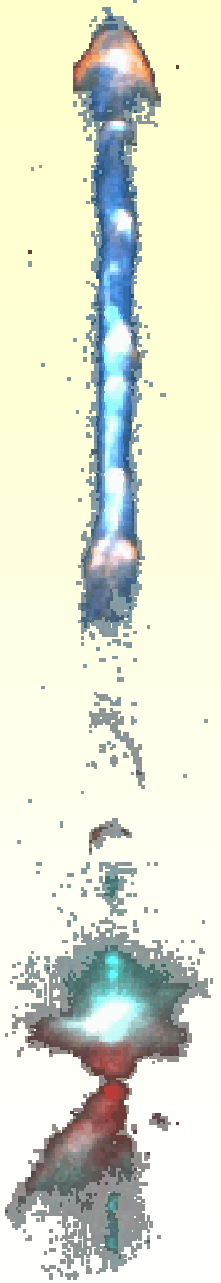


Wechselwirkung



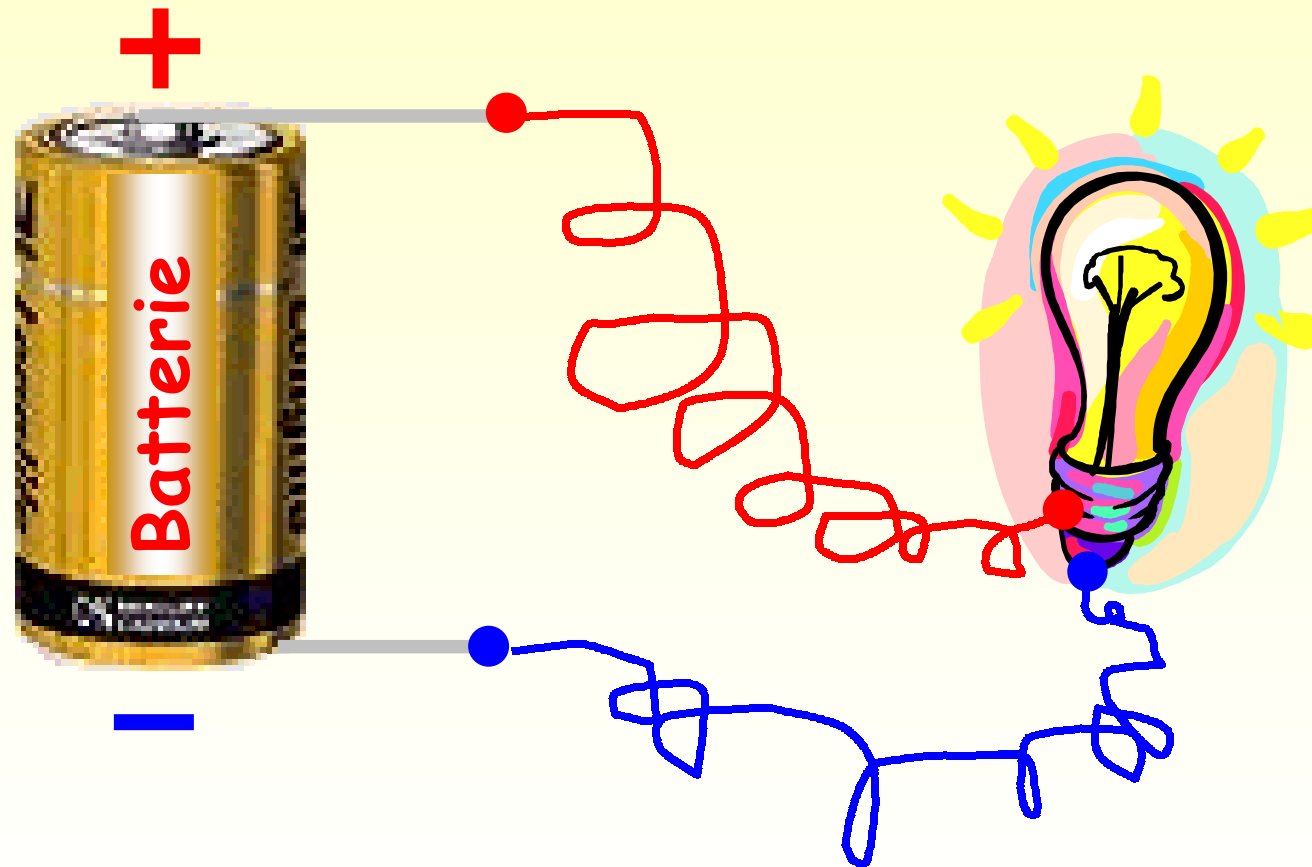
Lokale Eichsymmetrie

(hier: Gravitation wird nicht betrachtet)



# Globale Eichsymmetrie

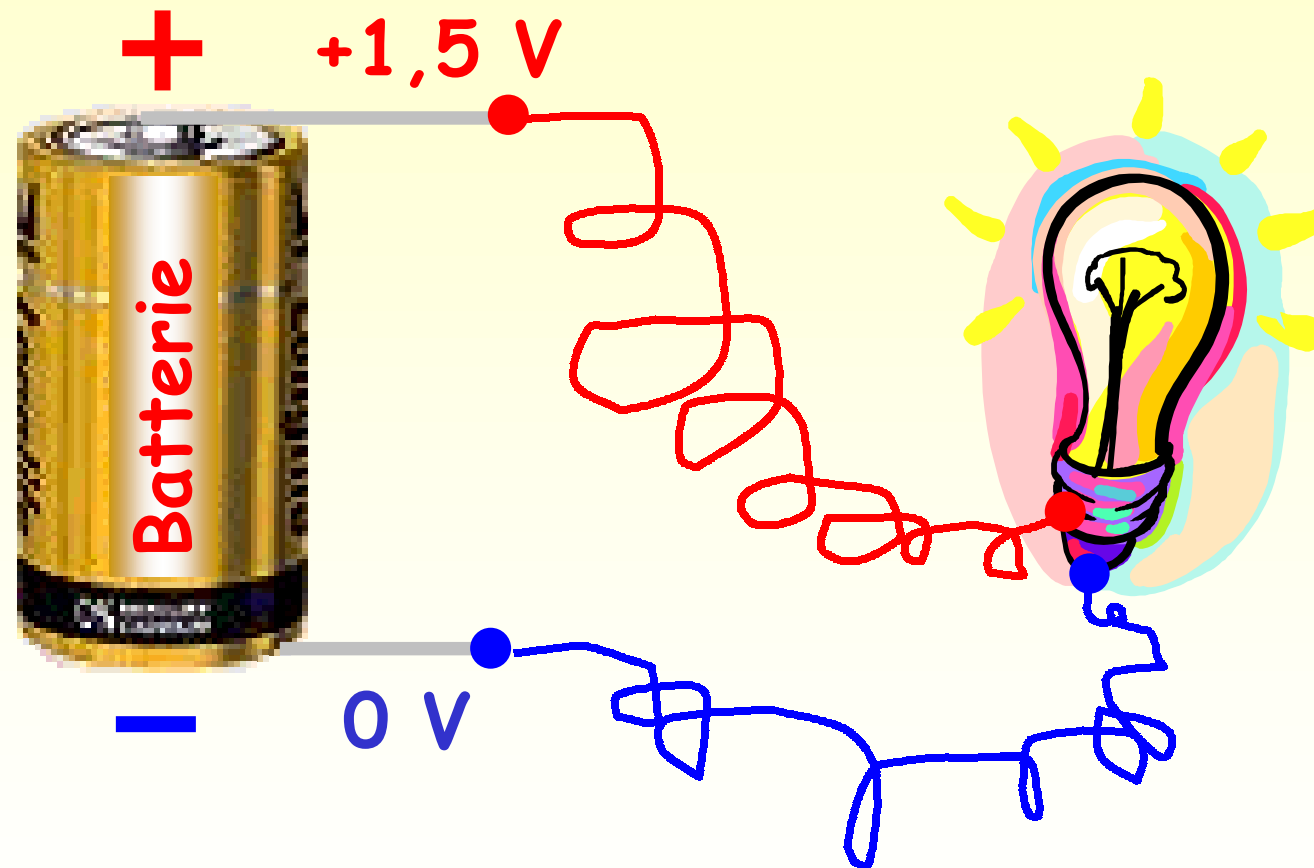
Betrachten: 1,5 Volt Batterie



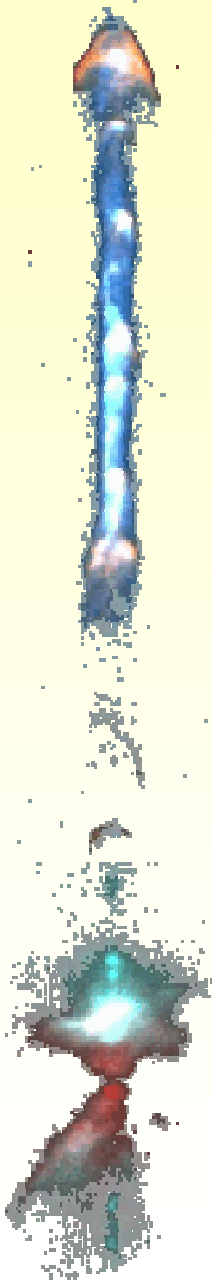
⇒ Spannung = Potenzialdifferenz zwischen den Polen : 1,5 V

# Globale Eichsymmetrie

Betrachten: 1,5 Volt Batterie

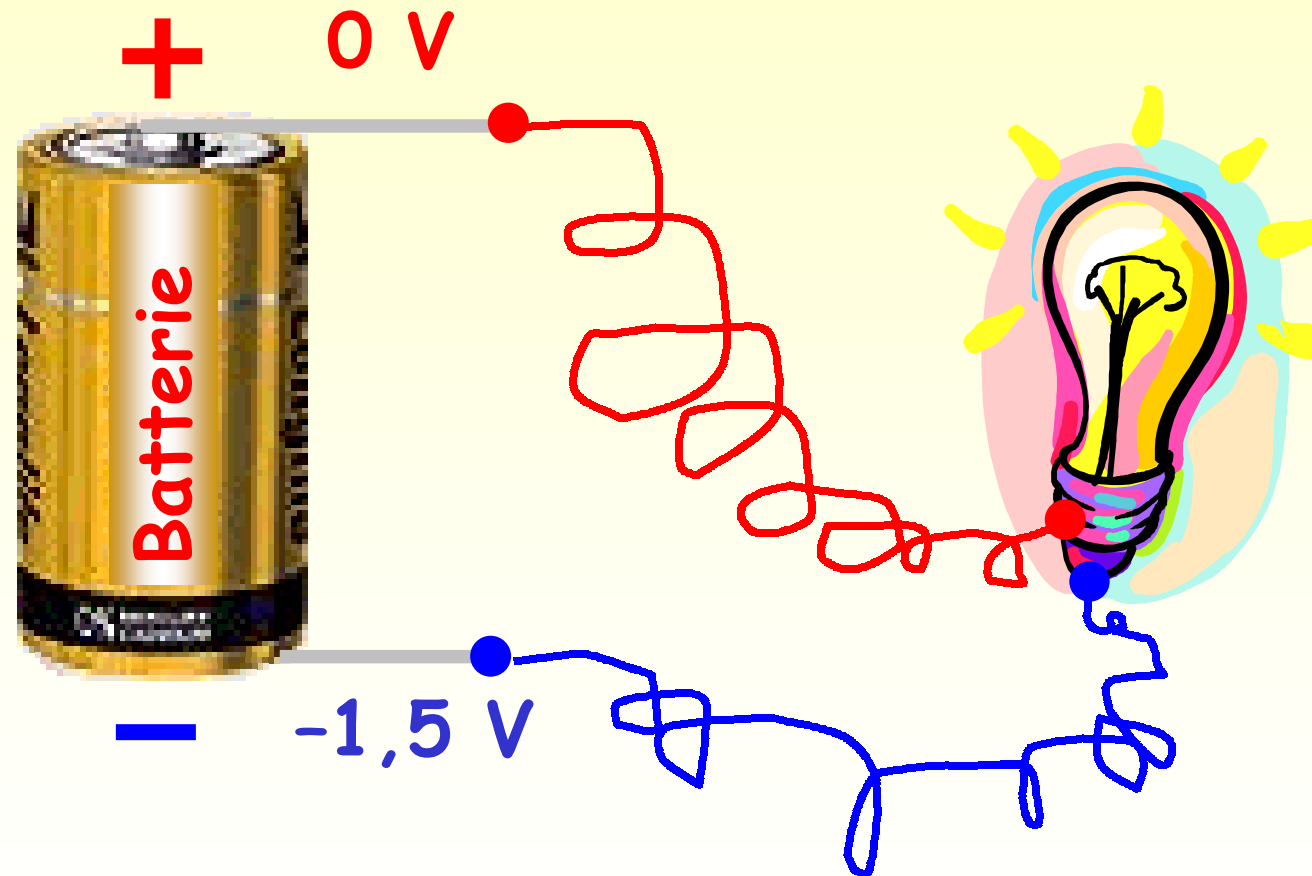


⇒ Spannung = Potenzialdifferenz zwischen den Polen : 1,5 V



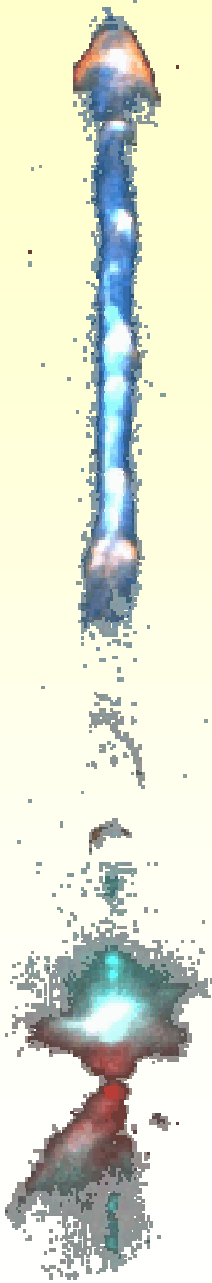
# Globale Eichsymmetrie

Umeichen des Potenzialnullpunktes - gleichartig für + und - Pol !



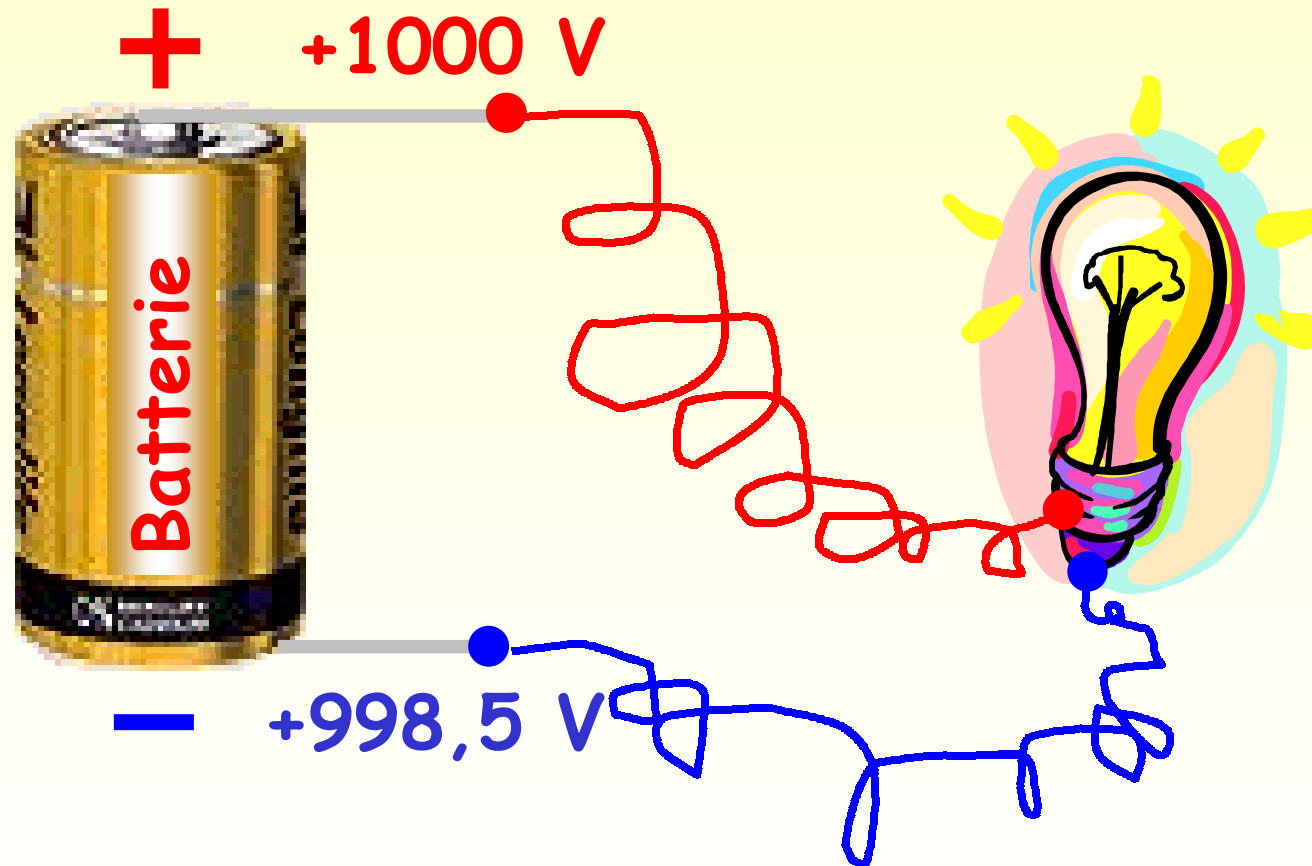
⇒ Spannung = Potenzialdifferenz zwischen den Polen : 1,5 V

**Nichts ist passiert!**



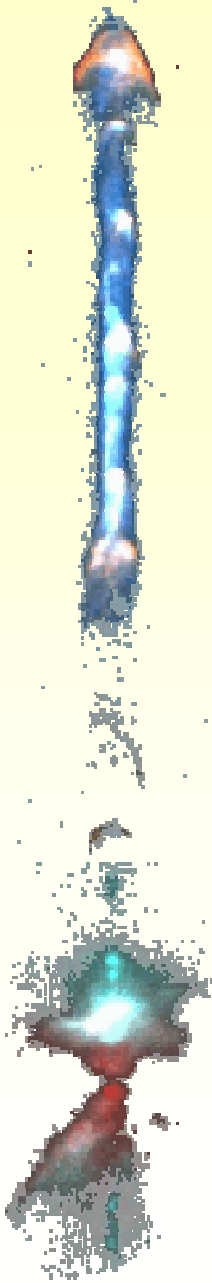
# Globale Eichsymmetrie

Umeichen des Potenzialnullpunktes - gleichartig für + und - Pol !

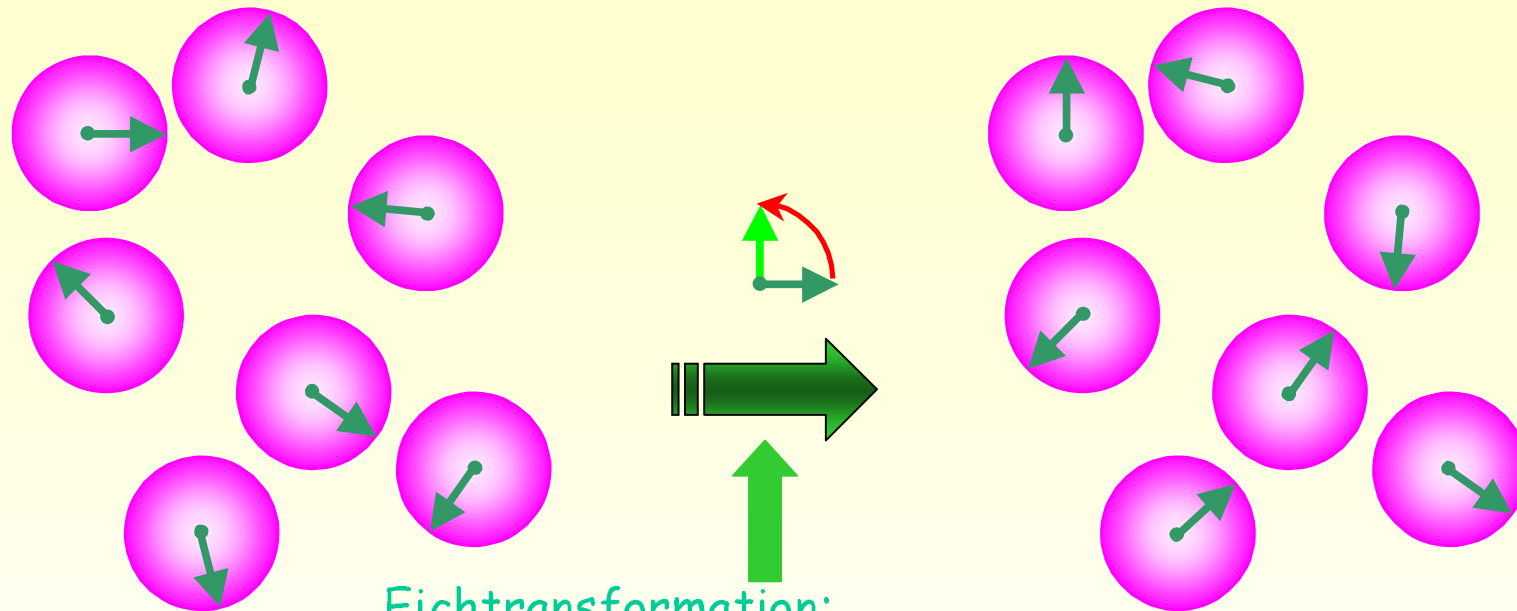


⇒ Spannung = Potenzialdifferenz zwischen den Polen : 1,5 V

**Nichts ist passiert!**



# Globale Eichsymmetrie



Eichtransformation:

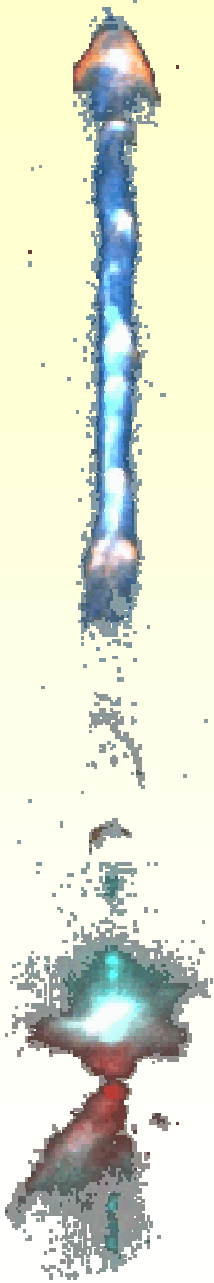
Die Zeiger werden überall um gleichen Winkel gedreht  
(Nullpunktverschiebung)

**Nichts passiert:** Das System ist unabhängig von der Lage  
des gemeinsamen Nullpunktes

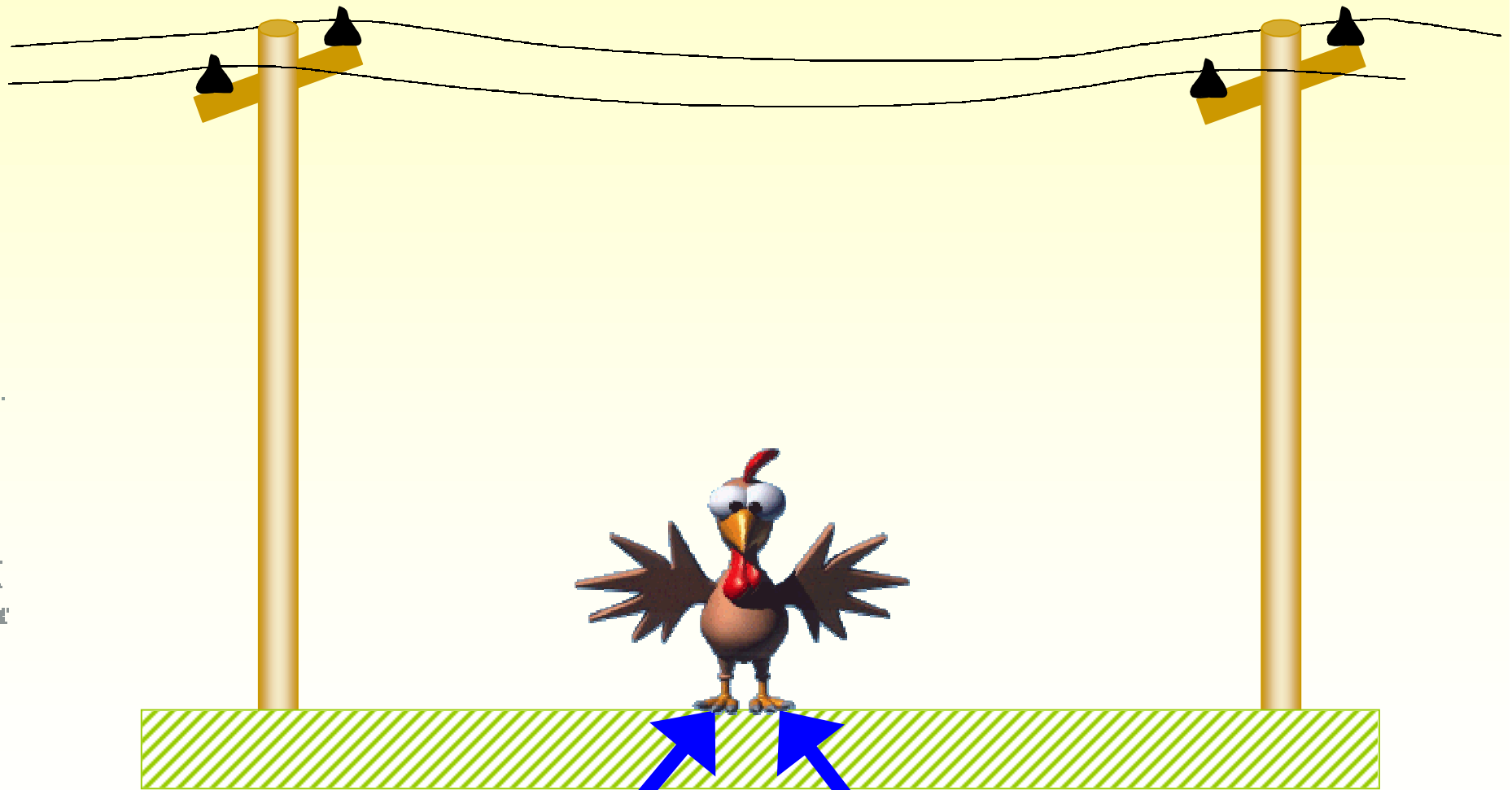
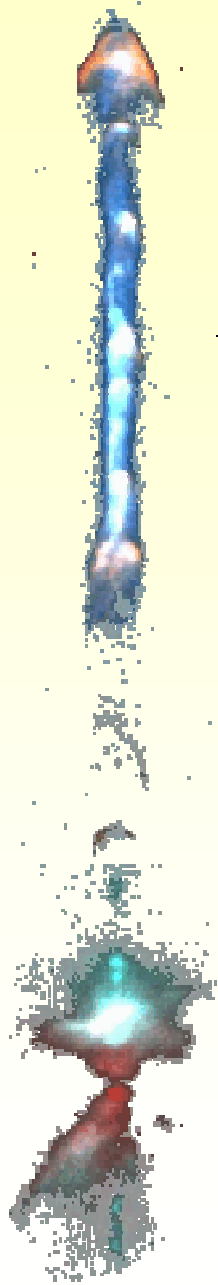
**Symmetrie**

Elektronen: Zeiger ist verknüpft mit Ladung:

Globale Eichsymmetrie  $\Rightarrow$  Ladungserhaltung



# Globale Eichsymmetrie

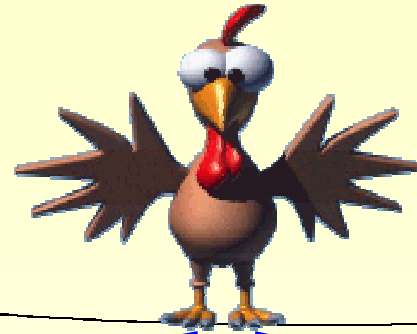


0 V

0 V



# Globale Eichsymmetrie

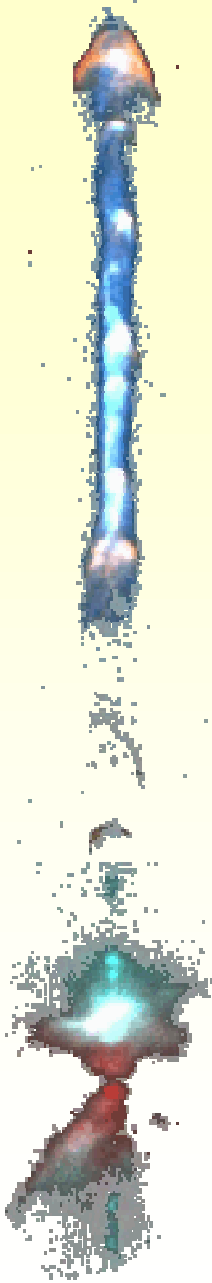


10000 V

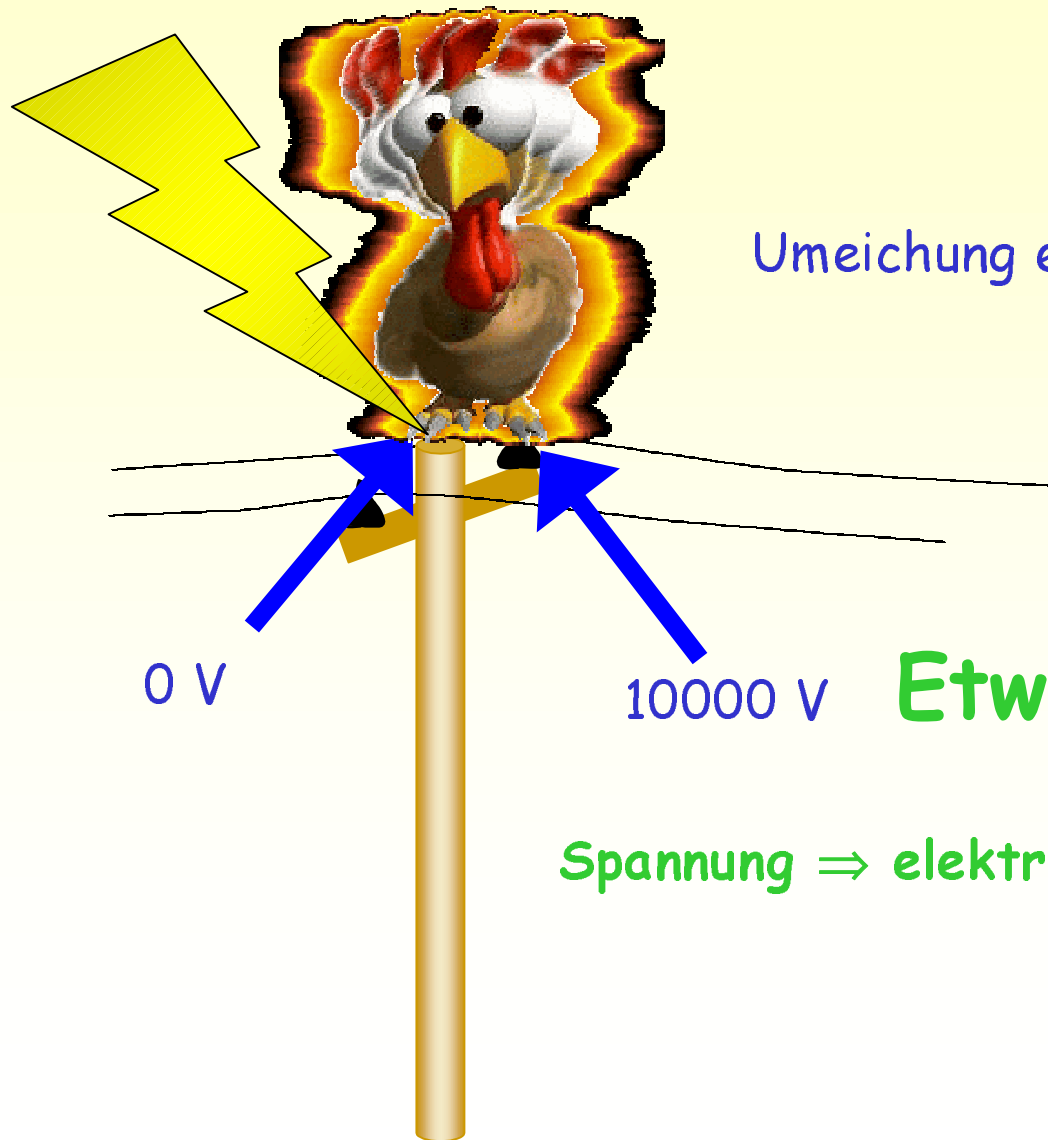
10000 V

**Nichts passiert!**

Umeichung erfolgte überall gleich



# Lokale Eichsymmetrie



Umeichung erfolgte überall anders!

0 V

10000 V

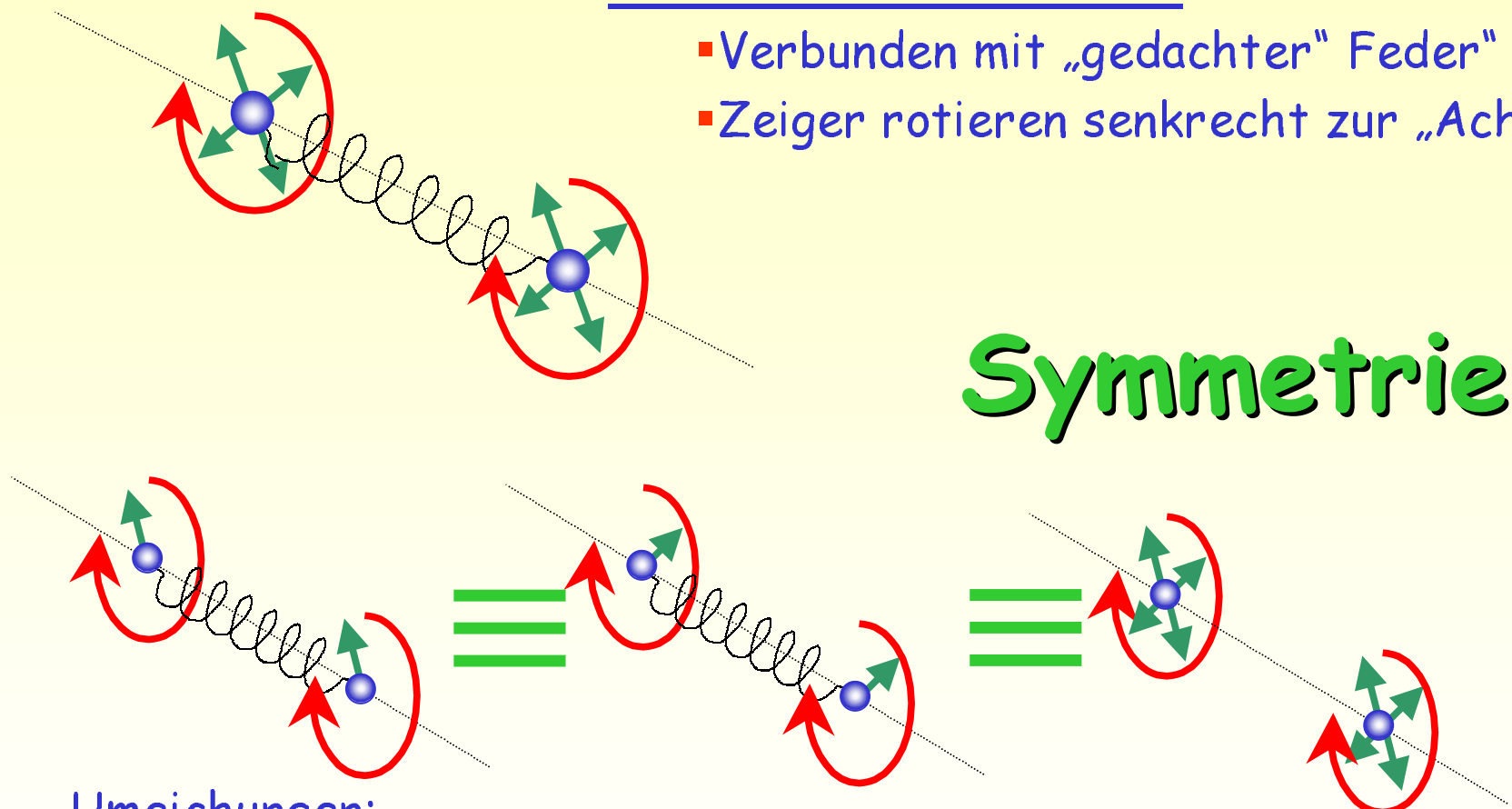
**Etwas passiert!**

Spannung  $\Rightarrow$  elektrisches Feld  $\Rightarrow$  Kraft!



### Betrachten 2 Elektronen:

- Verbunden mit „gedachter“ Feder“
- Zeiger rotieren senkrecht zur „Achse“



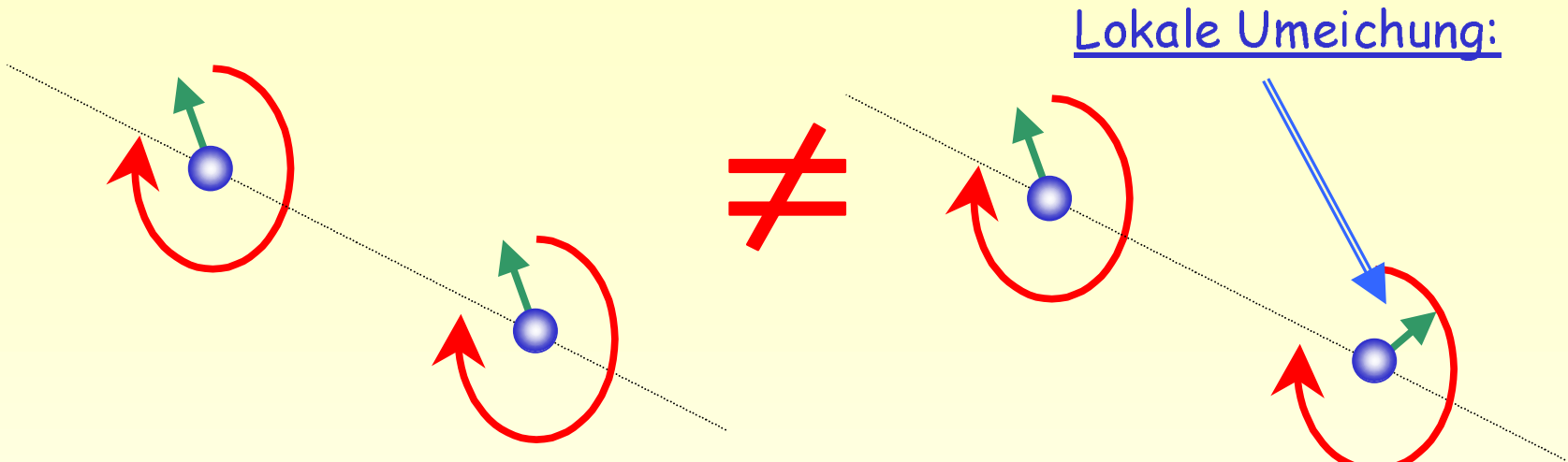
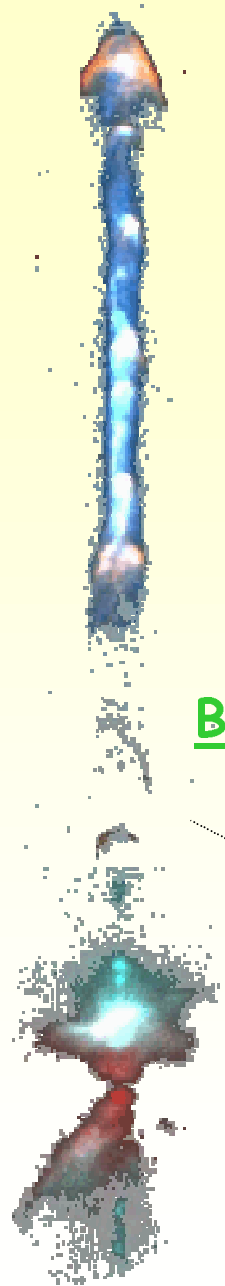
# Symmetrie

Umeichungen:

Gleichartige Veränderungen aller Zeiger:

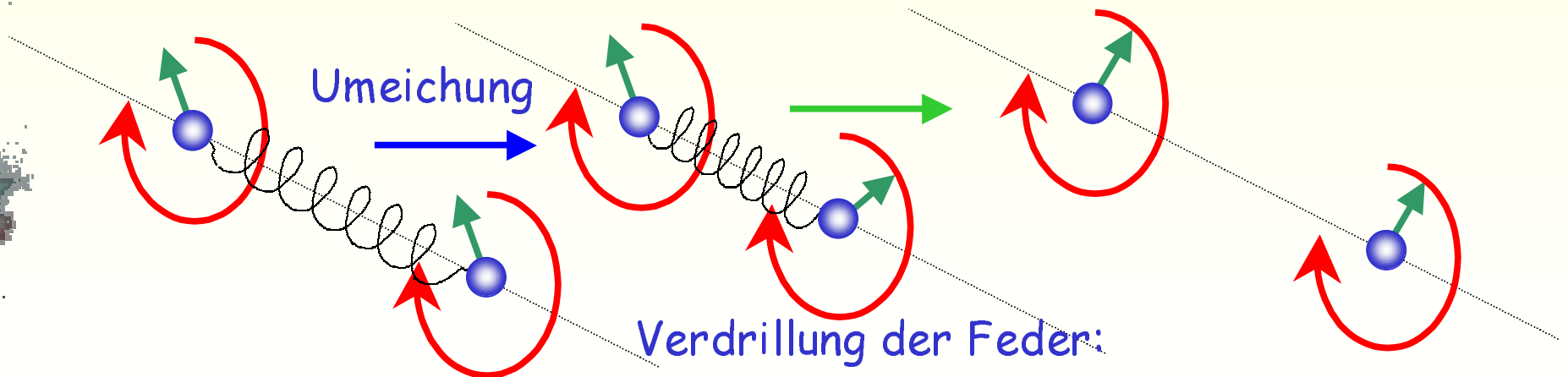
⇒ Keine Kraft auf Feder

⇒ Feder überflüssig

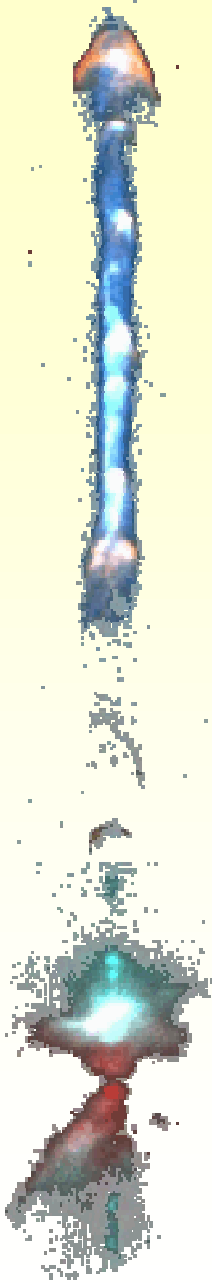


**Symmetrie verletzt**

Benötigen Feder zur Wiederherstellung der Symmetrie:

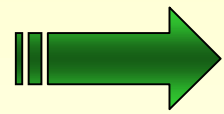


⇒ Es wirkt eine Kraft (anziehend oder abstoßend)  
⇒ Wiederherstellung der Symmetrie



Je nach Richtung der Verdrillung sind die Kräfte anziehend oder abstoßend!

⇒ Der Zeiger muss mit der Ladung verknüpft sein!



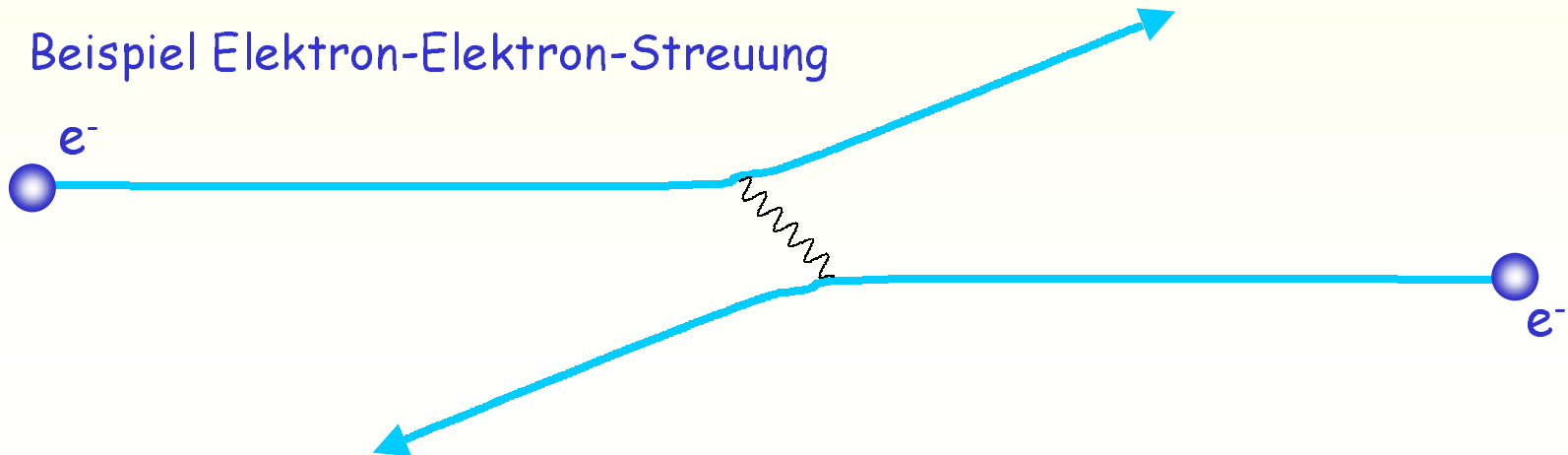
## Quantenelektrodynamik (QED)

Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung

Die Rolle der **Feder** wird durch Austauschteilchen eingenommen!

⇒ Photon (Lichtquant) 

Beispiel Elektron-Elektron-Streuung



# Wechselwirkungen

Ursache aller Wechselwirkungen ist

lokale Eichsymmetrie

Für jede der Wechselwirkungen ist eine entsprechende Symmetrie gefunden worden (QED: Zeiger)

⇒ Zu jeder Symmetrie (Wechselwirkung) existieren Austauschteilchen:

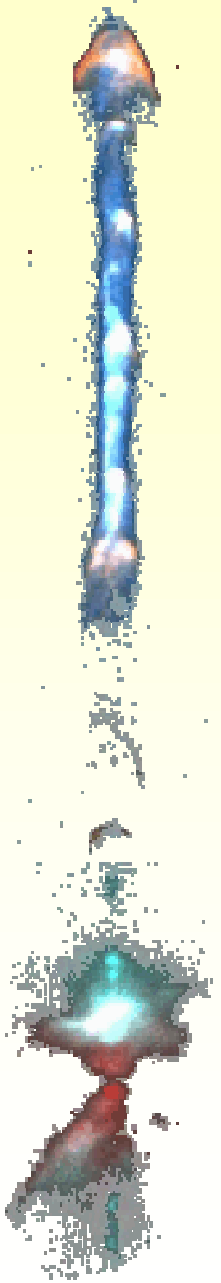
1. Elektroschwache Wechselwirkung:

⇒ Photon (QED) (masselos)

⇒  $Z^0$ ,  $W^+$ ,  $W^-$  (sehr schwer, ca.  $90 \cdot m_p$ )

2. Starke Wechselwirkung:

⇒ 8 verschiedene Gluonen (masselos)



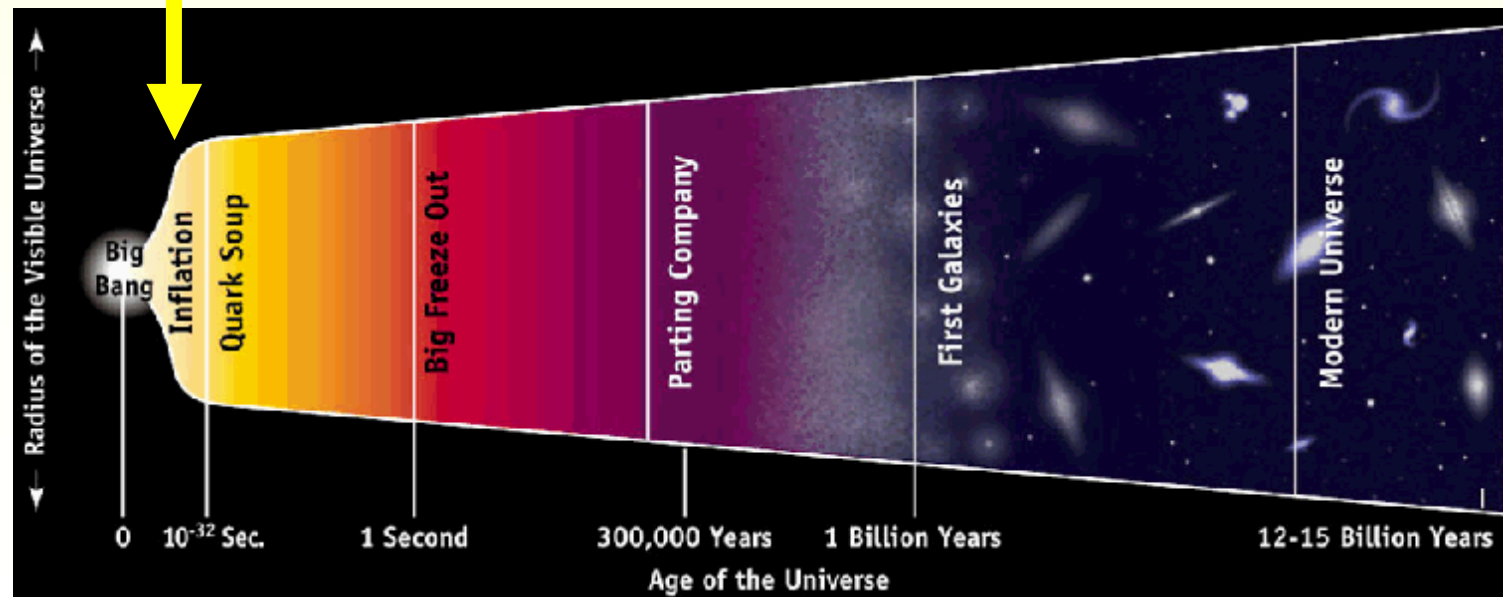
# Ausblick

Frage: Gibt es eine gemeinsame Symmetrie für alle Wechselwirkungen?  
⇒ Vereinheitlichung der Wechselwirkungen?

Ein erster Erfolg war die Vereinheitlichung von **elektromagnetischer** und **schwacher** Wechselwirkung zur **elektroschwachen** Wechselwirkung.

⇒ „Große“ Vereinheitlichung bei sehr hohen Energien?

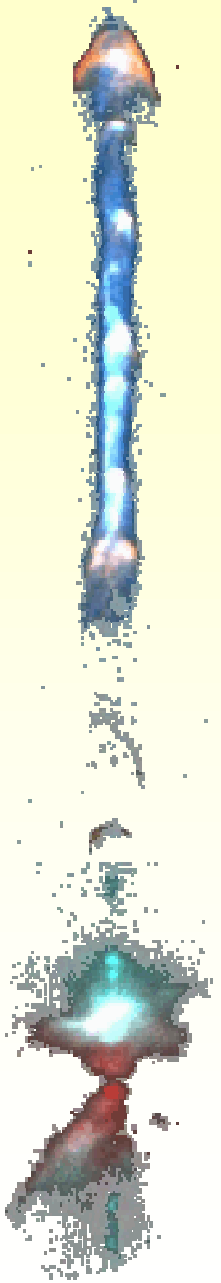
⇒ Frühzeit des Universums



## Materie - Antimaterie

# Symmetrie

- Zu jedem Teilchen existiert ein Antiteilchen
- Teilchen und Antiteilchen haben gleiche Massen!
- Alle bekannten Wechselwirkungen liefern:
  - Paarweise Erzeugung von Materie und Antimaterie





# Materie - Antimaterie

- Bei perfekter Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie wären beide in gleichen Mengen vorhanden!
- Aber: Universum ist von Materie dominiert!

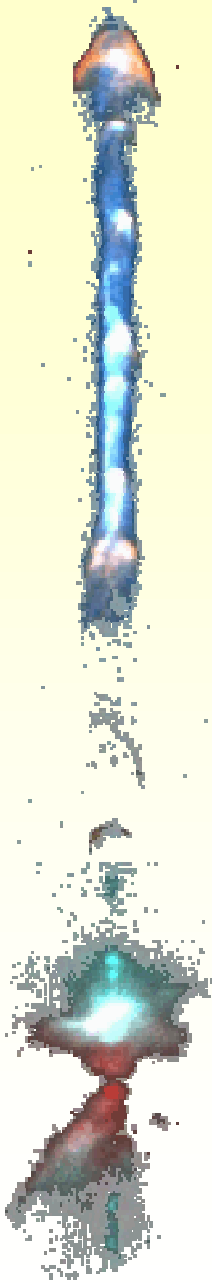
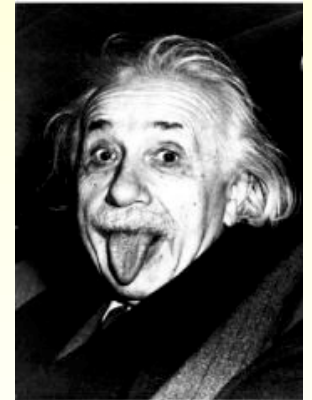
## Woher wissen wir das?

- Materie und Antimaterie vernichten einander!

⇒ große Energiemenge wird frei:  $E=m \cdot c^2$   
ca. Faktor 1000 im Vergleich zur Atombombe!

Wenige kg  $^{235}\text{U}$  (Uran)

⇒ Keine Antimaterie auf der Erde ✓

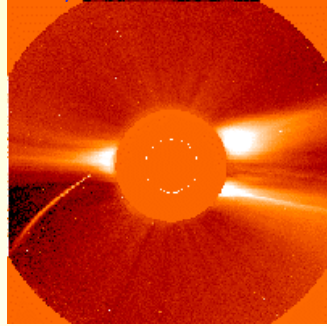


# Materie - Antimaterie

## ➤ Antimaterie im Sonnensystem?

⇒ Besuch von Mond, Mars etc.. ✓

"Courtesy of SOHO/LASCO consortium"



⇒ Sonnenwind: Materie ✓

⇒ Keine Antimaterie im Sonnensystem ✓

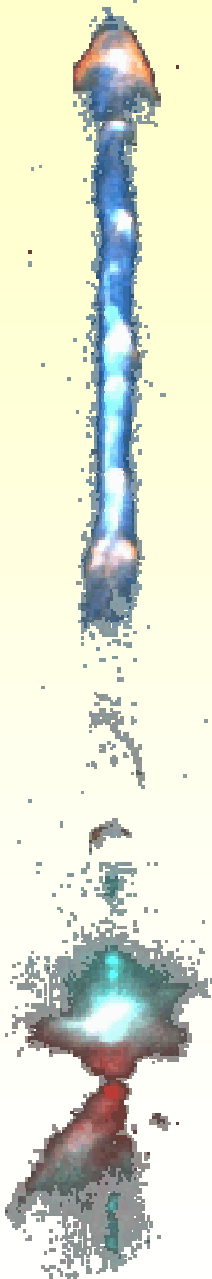
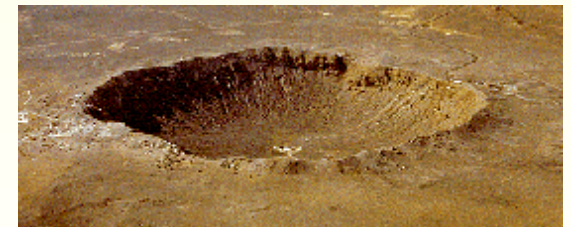
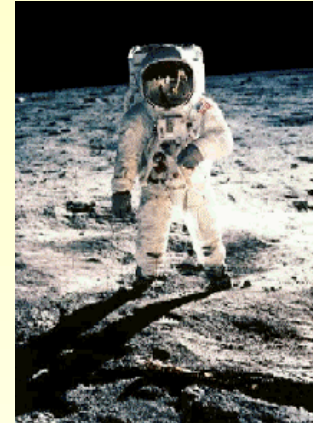
## ➤ Antimaterie in unserer Milchstraße?

⇒ Analyse von Meteoriten ✓

⇒ Kosmische Strahlung aus Milchstraße: Materie überwiegt ✓

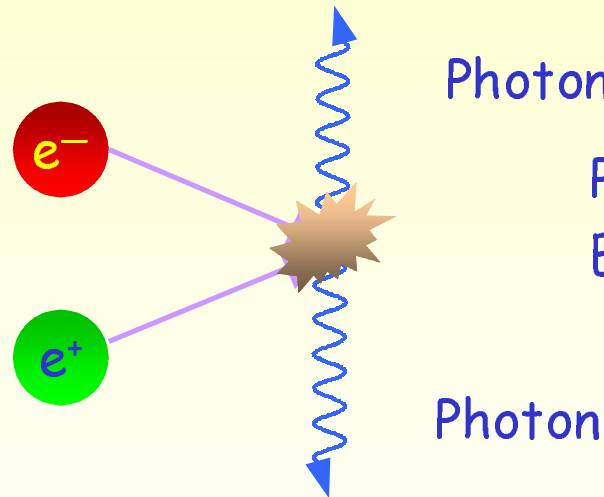
⇒ Materie überwiegt! ✓

☀ Was ist mit dem Rest des Universums?



# Materie - Antimaterie

## ➤ Positron-Elektron Vernichtung



Photon = „Lichtblitz“ mit hoher Energie

Photonen haben charakteristische Energie:

$$E_\gamma = \frac{1}{2} m_e \cdot c^2 \quad (511 \text{ keV, Röntgenstrahlung: } E \cong 1 \text{ keV})$$

Photon

Photonen werden in Atmosphäre absorbiert!

⇒ Nachweis: Detektoren in Erdumlaufbahn

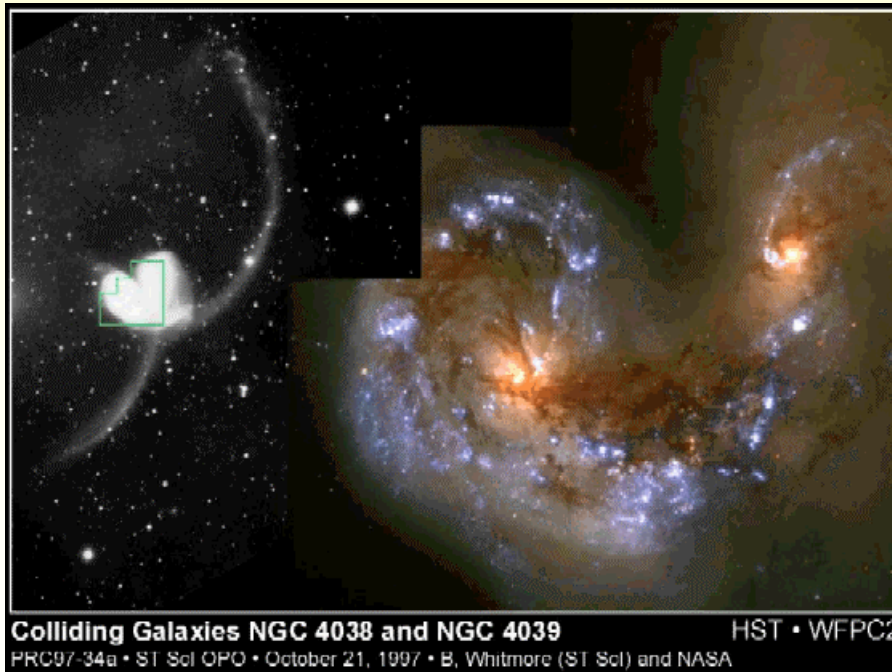
⇒ Keine Anzeichen für größere Mengen an Antimaterie im Weltall!

(Hinweise auf Produktion von Antimaterie in unserer Galaxie)



# Materie - Antimaterie

- Gibt es vielleicht Galaxien aus Antimaterie?
  - Beobachtung von Kollisionen von Galaxien!



⇒ Keine Hinweise auf Antimaterie

# Bedingungen für Materie-Überschuss

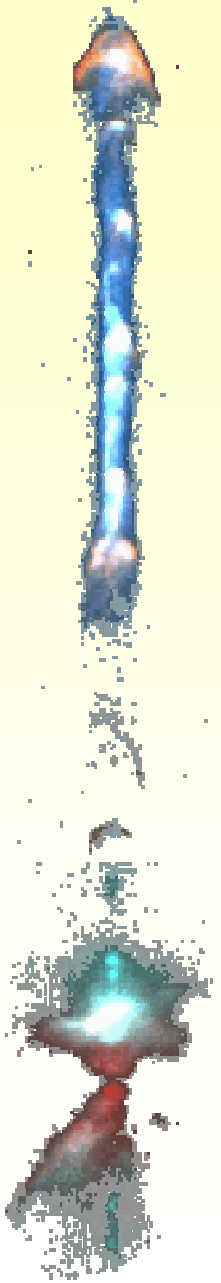
➤ Andrei Sacharow (1967):  
formulierte 3 notwendige Bedingungen



1. Verletzung der Baryonenzahl
2. Verletzung der C und CP-Symmetrie
3. Abkehr vom thermodynamischen Gleichgewicht

CP-Symmetrie:

Bildet die Welt der Teilchen  
auf die Welt der Antiteilchen ab



# Diskrete Symmetrien

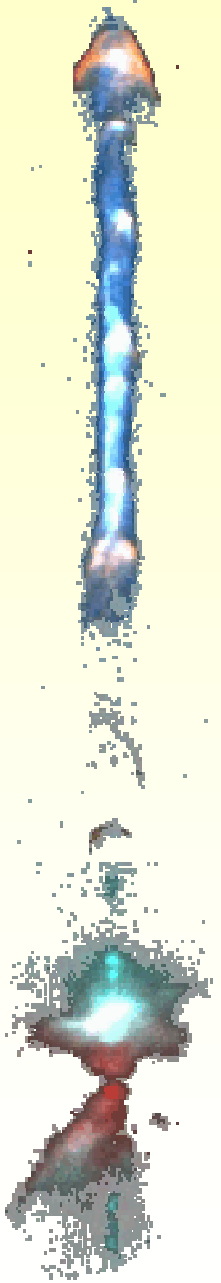
**C: Ladungskonjugation** Teilchen → Antiteilchen

**P: Parität** rechts → links „Spiegel“

**T: Zeitumkehr** vorwärts → rückwärts

Hier: Unterscheidung von

- links- und rechts
- Materie - Antimaterie



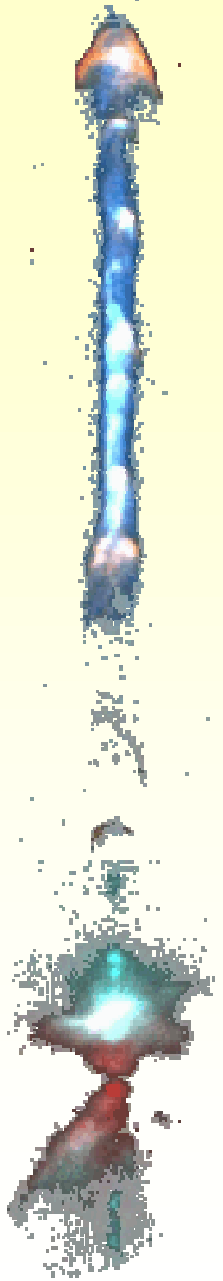
# Links - Rechts im täglichen Leben

Brauchen Physik(er), um den Unterschied zu erklären:



Ohne Verletzung der **Spiegelsymmetrie**  
gibt es keine Unterscheidung von  
**Rechts - Links**

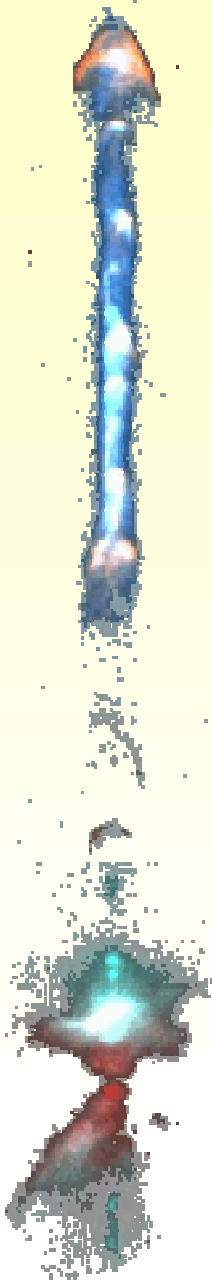
# Spiegelsymmetrie



Taj Mahal:  
Natur und Spiegelbild identisch!



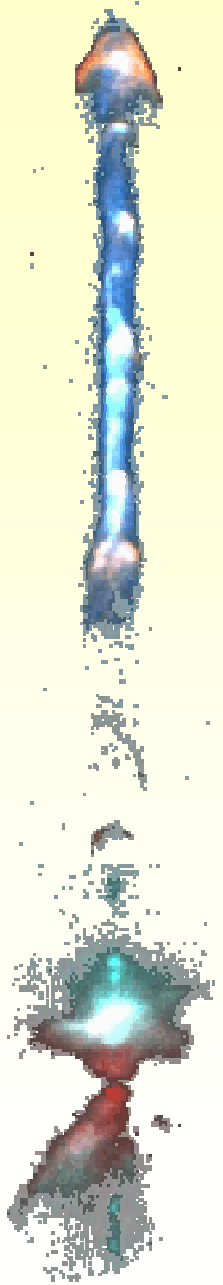
# Spiegelsymmetrie-Verletzung



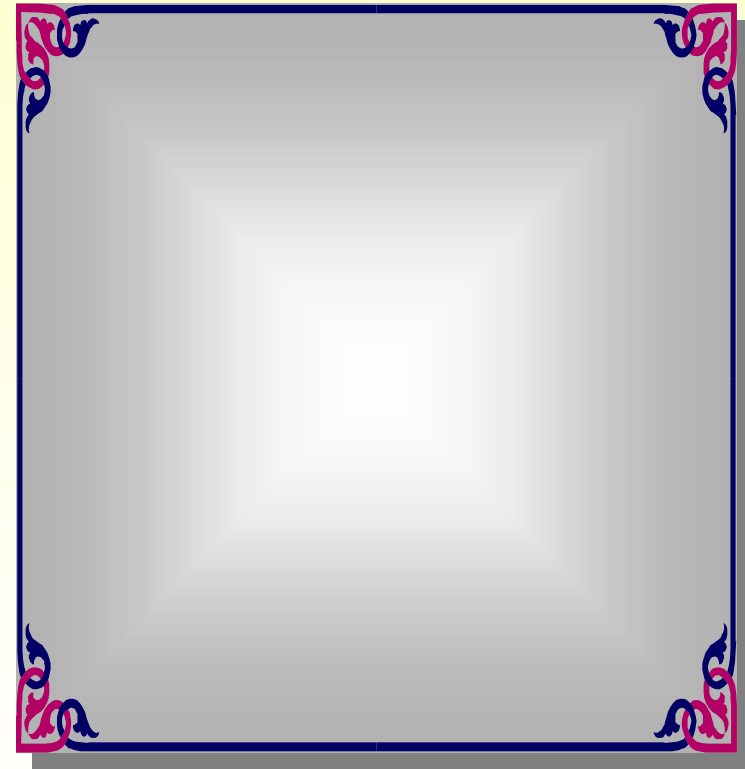
Menschen:  
Natur und Spiegelbild  
nahezu identisch!

Spiegelsymmetrie leicht verletzt!

# Spiegelsymmetrie-Verletzung

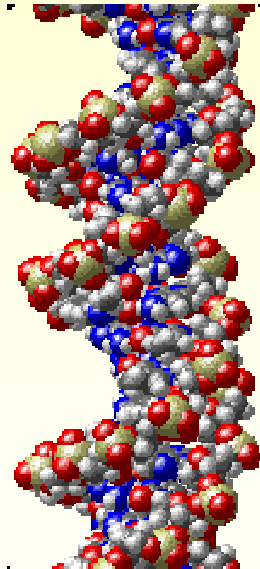
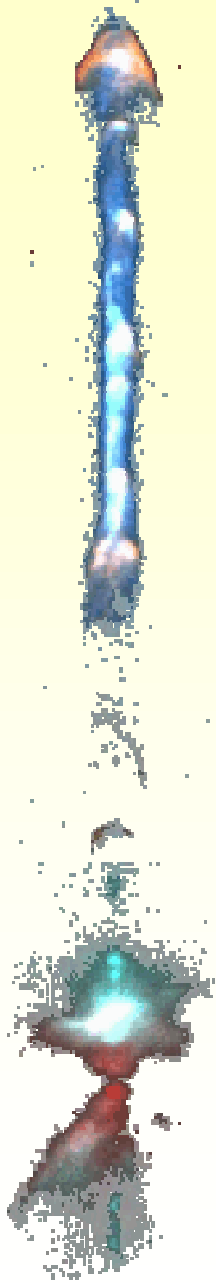


In Transsylvanien

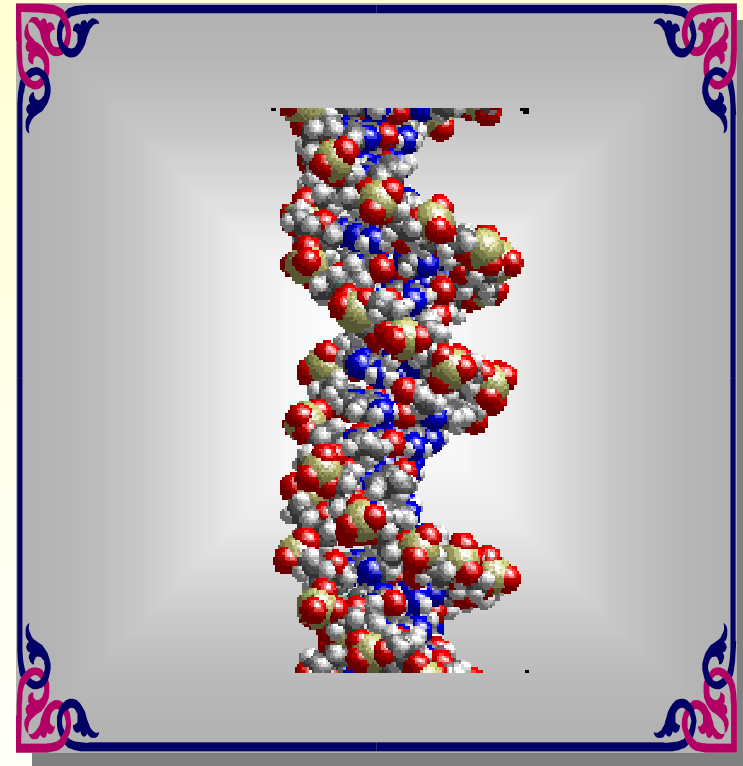


Im Spiegel

# Spiegelsymmetrie-Verletzung

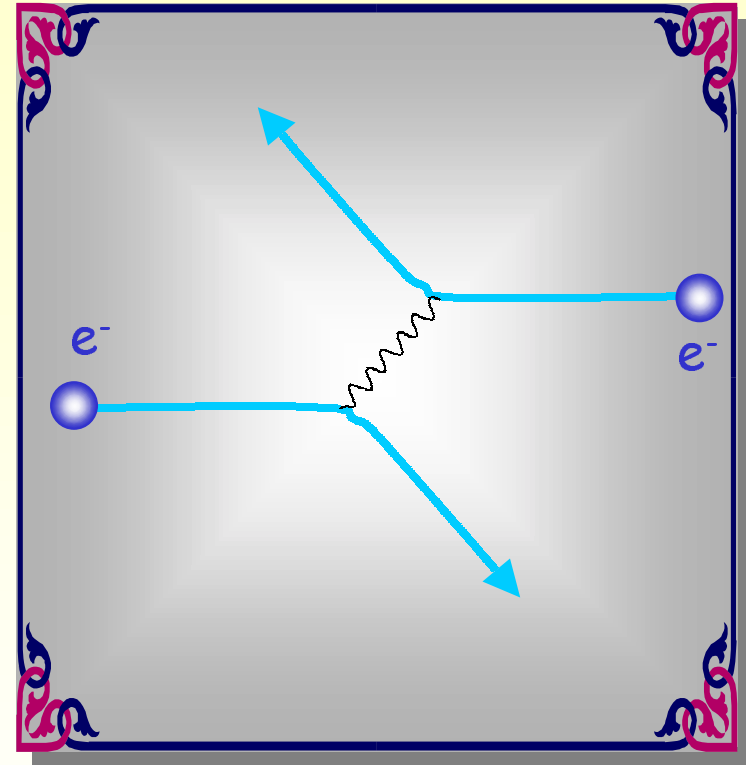
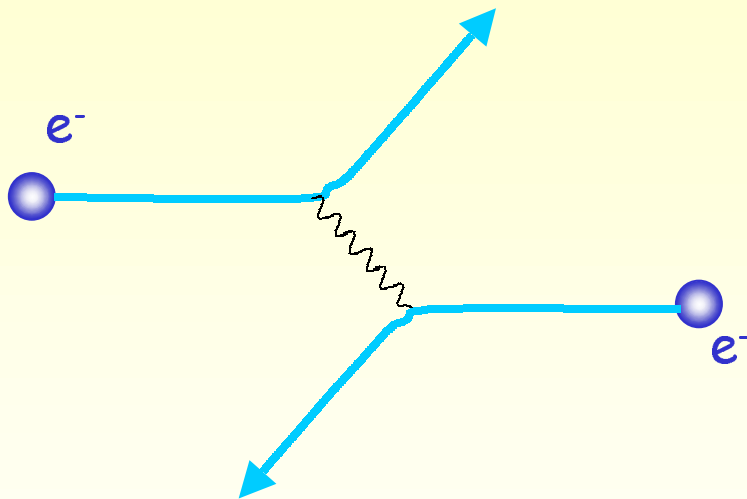
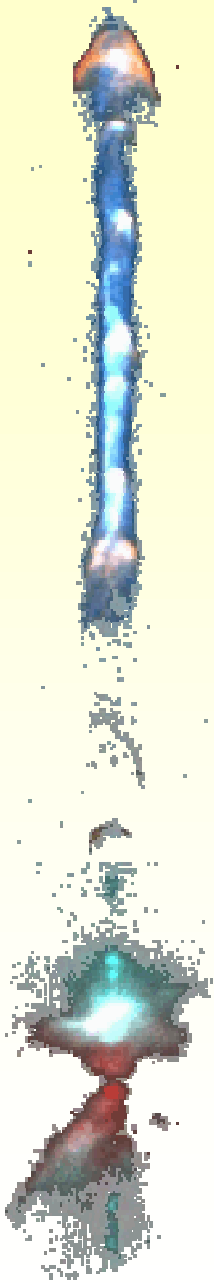


Natur:  
DNS: Rechtsschraube



Im Spiegel:  
DNS: Linksschraube  
Kommt in der Natur nicht vor!

# Teilchenphysik im Spiegel



Elektromagnetische & starke Wechselwirkung:

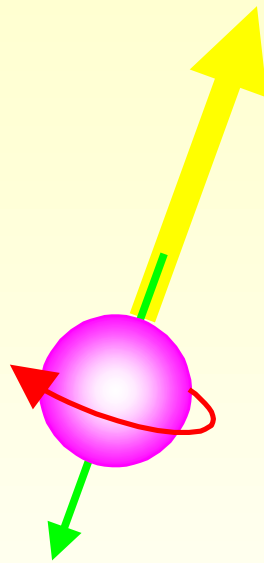
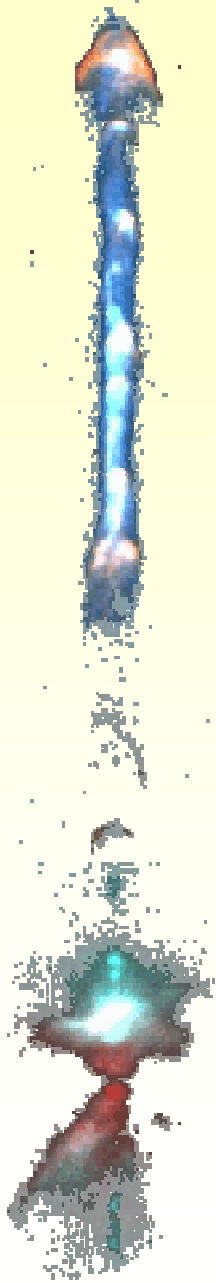
Die gespiegelten Reaktionen sind in der Natur gleich häufig!

⇒ Spiegelsymmetrie = Paritätserhaltung

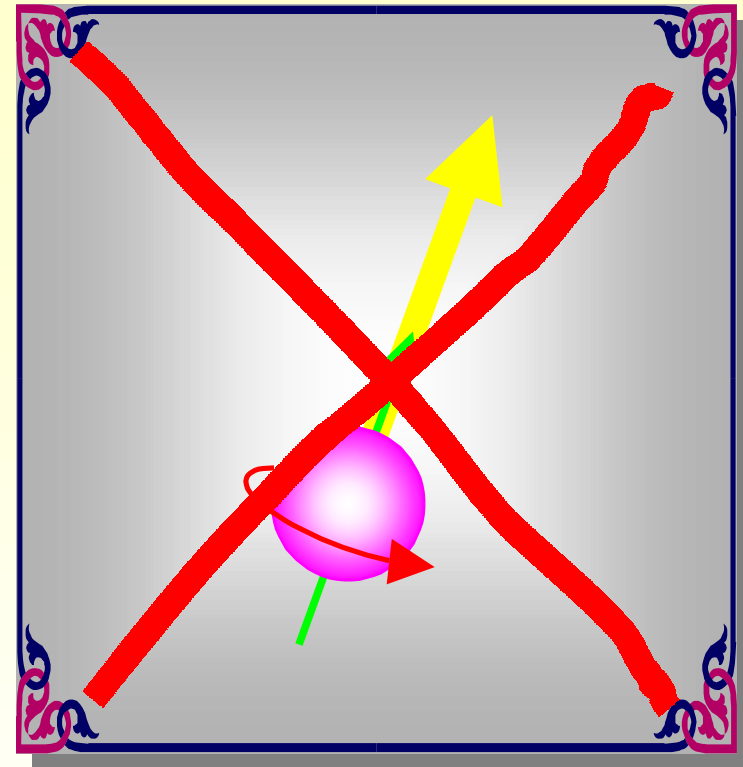
Schwache Wechselwirkung: Verletzung der Spiegelsymmetrie

koppelt an linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen

# Neutrinos im Spiegel



linkshändig



rechtshändig

Natur: linkshändige Neutrinos  
rechtshändige Antineutrinos }

Paritätsverletzung  
(gibt es nur in der schwachen Wechselwirkung)

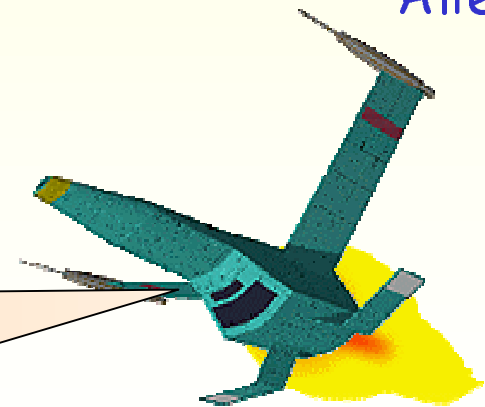
# Raumschiffe auf Kollisionskurs

Abbiegen im  
Neutrino-Drehsinn!

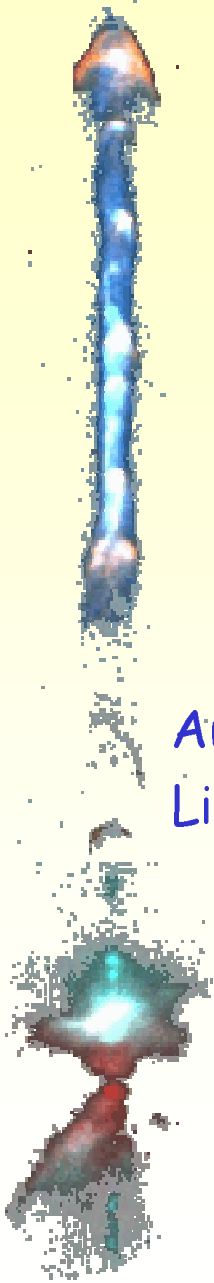


Ausweichmanöver:  
Links- und Rechts müssen einander bekannt sein!

Alien

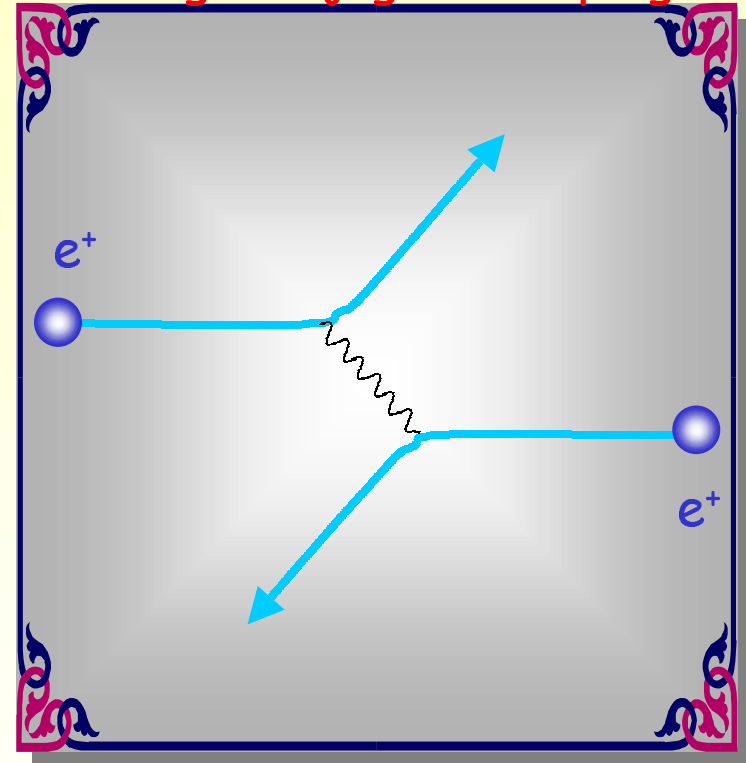
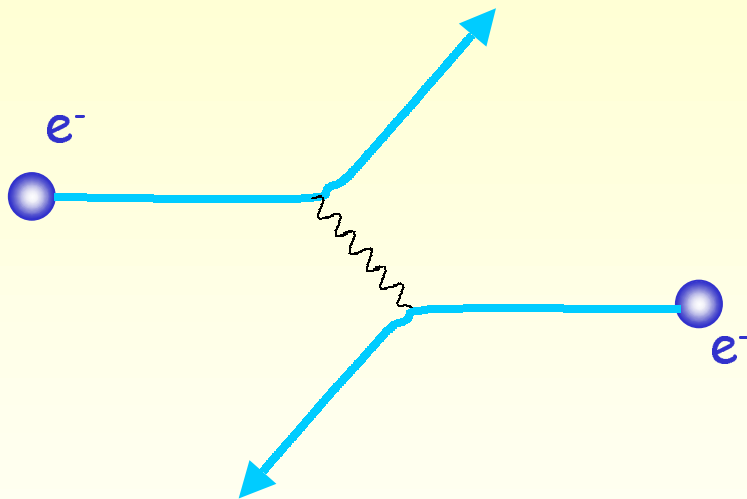


Materie  
Oder  
Antimaterie???



# Teilchenphysik im C-Spiegel

## Ladungskonjugationsspiegel



Elektromagnetische & starke Wechselwirkung:

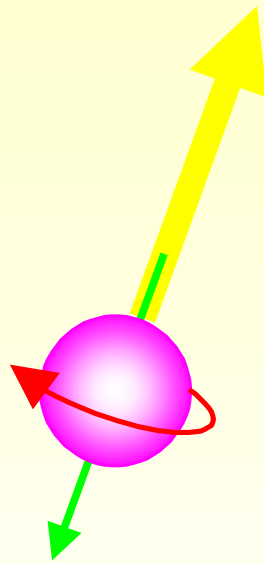
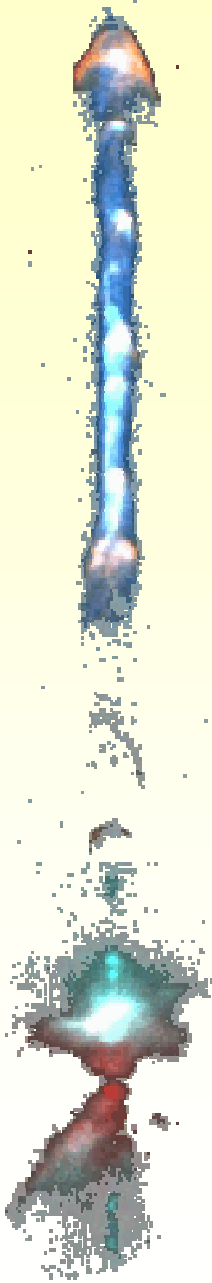
Reaktionen sind in der Welt der Antiteilchen gleich häufig!

⇒ C-Symmetrie ist erhalten

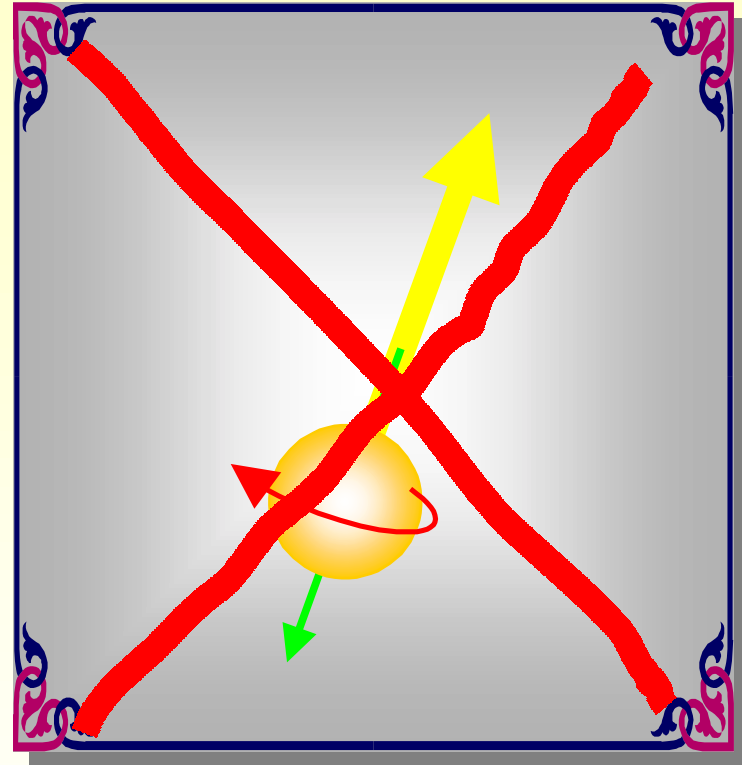
Schwache Wechselwirkung: Verletzung der C-Symmetrie

koppelt an linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen

# Neutrinos im C-Spiegel



Linkshändiges Neutrino



Linkshändiges Antineutrino

Natur: linkshändige Neutrinos  
rechtshändige Antineutrinos }

C-Symmetrie ist verletzt  
(gibt es nur in der schwachen  
Wechselwirkung)



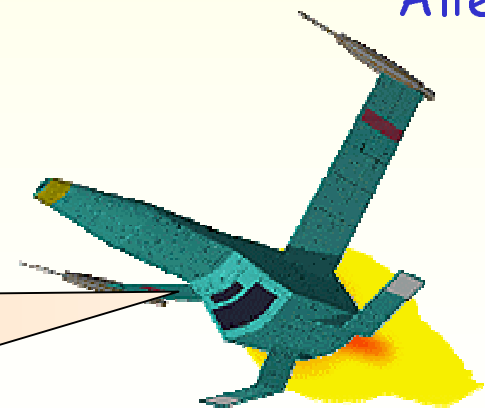
# Raumschiffe auf Kollisionskurs

Ooops  
Was sagen Eure Experimente  
zur CP-Verletzung?

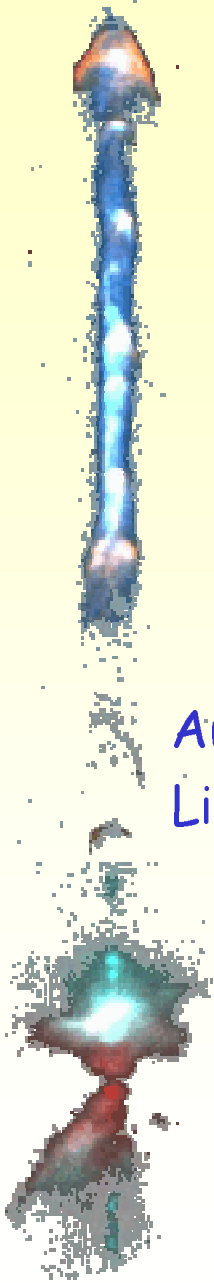


Ausweichmanöver:  
Links- und Rechts müssen einander bekannt sein!

Alien

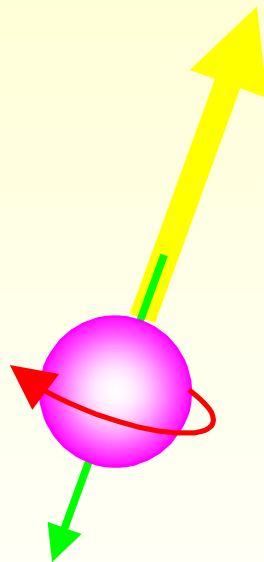


Materie  
Oder  
Antimaterie???

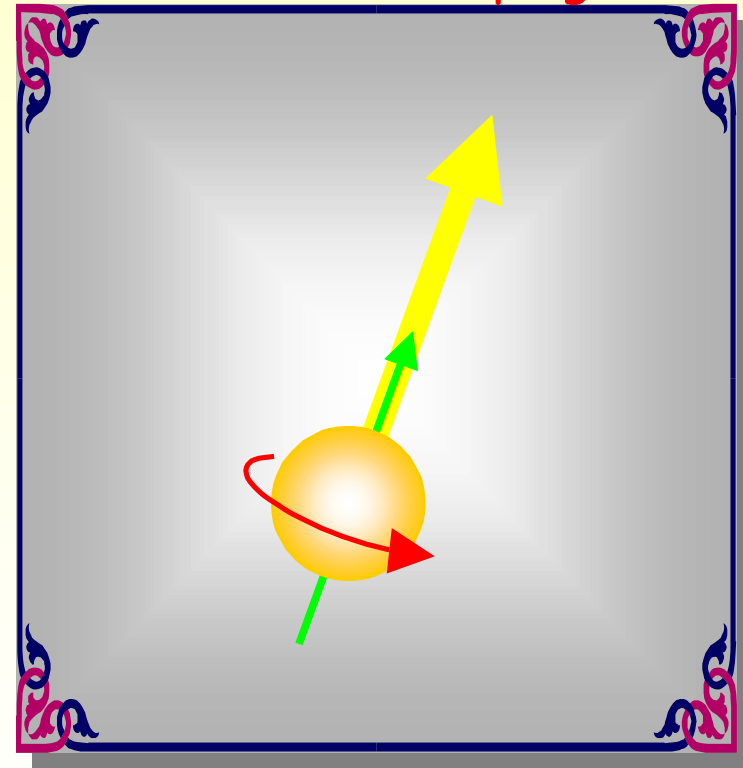


# Neutrinos im CP-Spiegel

Ladungskonjugation  
und normaler Spiegel

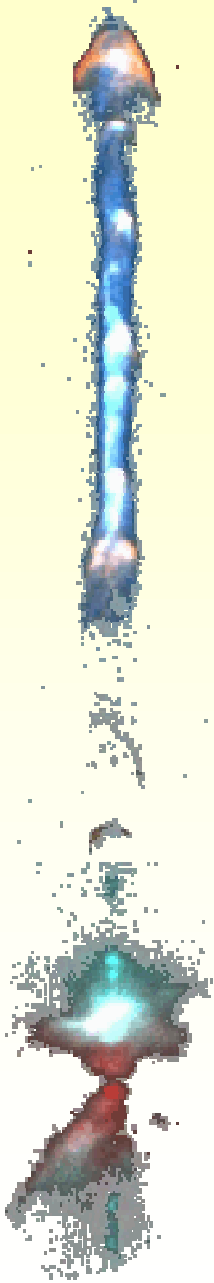


Linkshändiges Neutrino



Rechtshändiges Antineutrino

CP-Symmetrie erhalten?



# Teilchenphysik im CP-Spiegel

Elektromagnetische & starke Wechselwirkung:

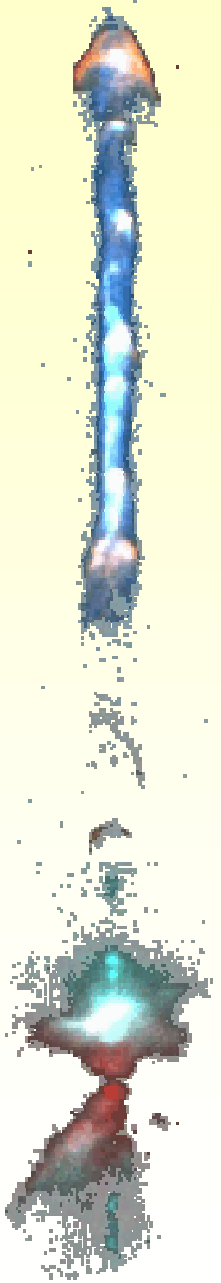
Reaktionen sind in der gespiegelten Welt der Antiteilchen gleich häufig!

⇒ CP-Symmetrie ist erhalten

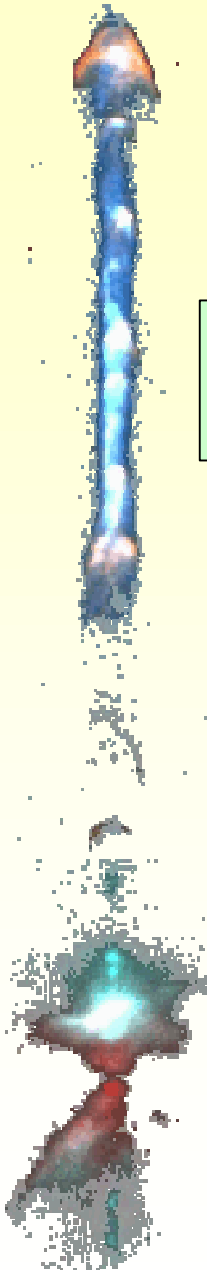
Schwache Wechselwirkung: CP-Symmetrie ist **fast** erhalten

In bestimmten, sehr seltenen Fällen tritt eine Reaktion mit **unterschiedlicher** Häufigkeit in beiden Welten auf!

- Die Raumschiffe können sich über ein Ausweichmanöver verständigen
- Teilchenphysik:
  - Sucht nach dem Ursprung der CP-Verletzung



# Experimente zur CP-Verletzung



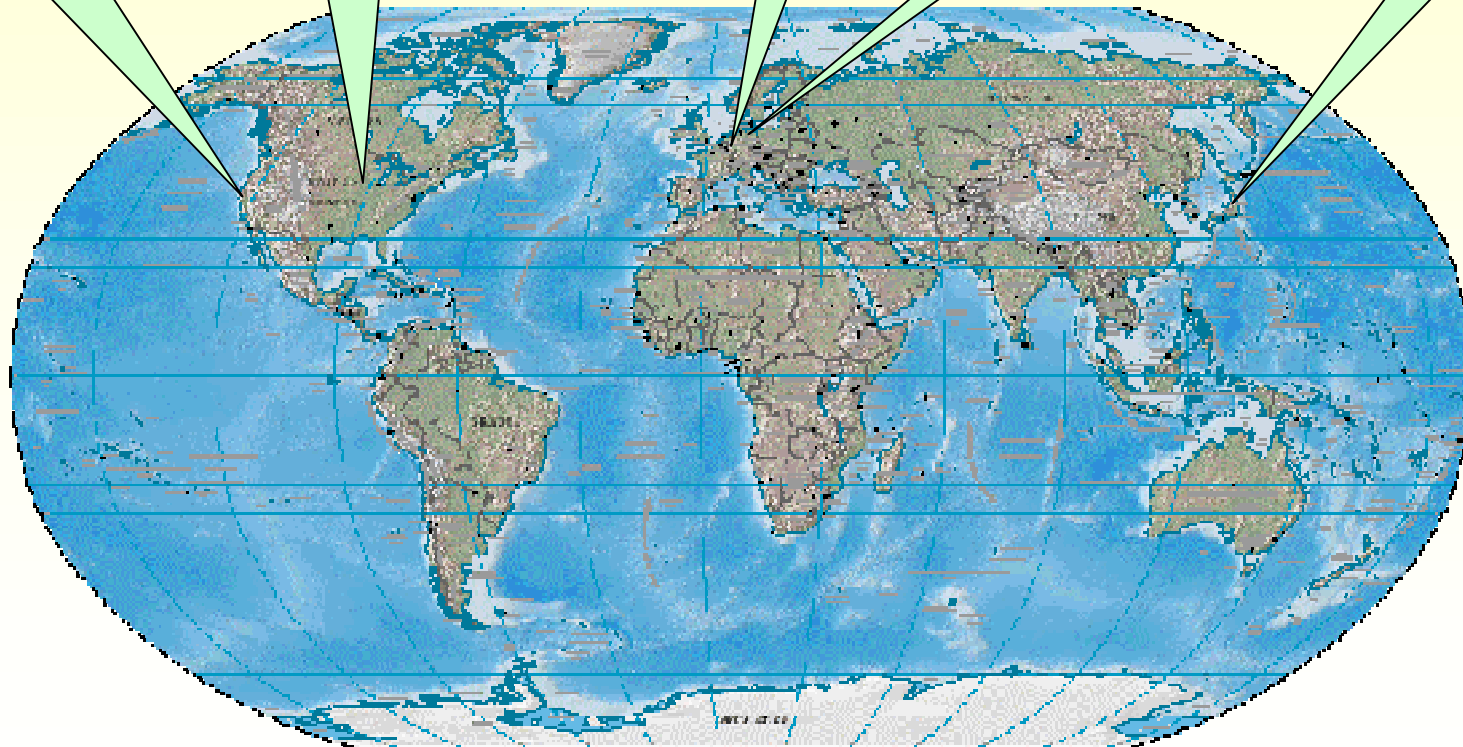
SLAC  
BABAR

Fermilab  
CDF, D0, KTeV

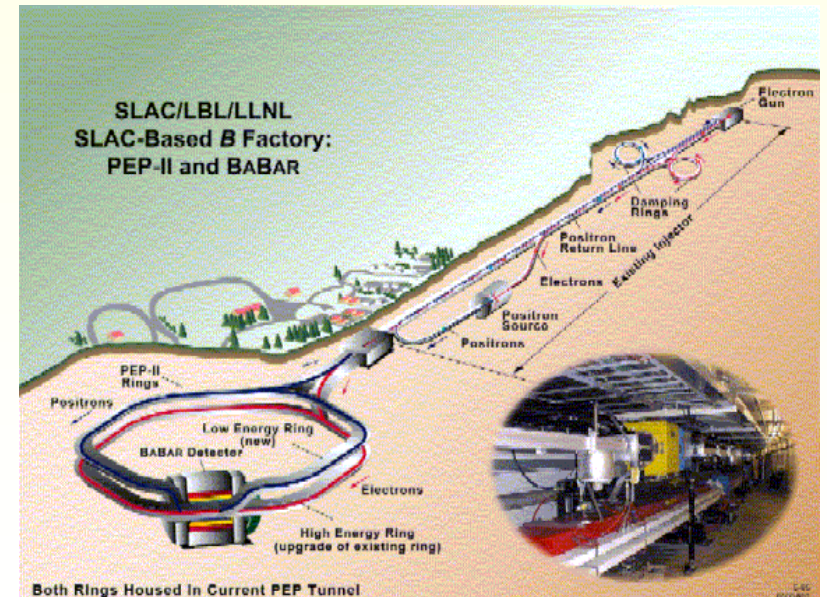
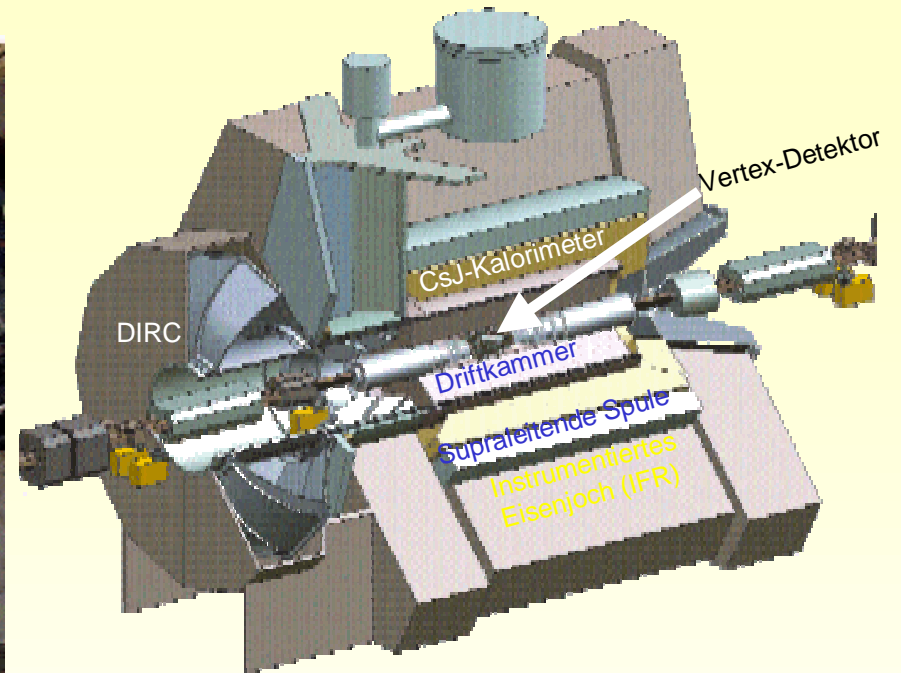
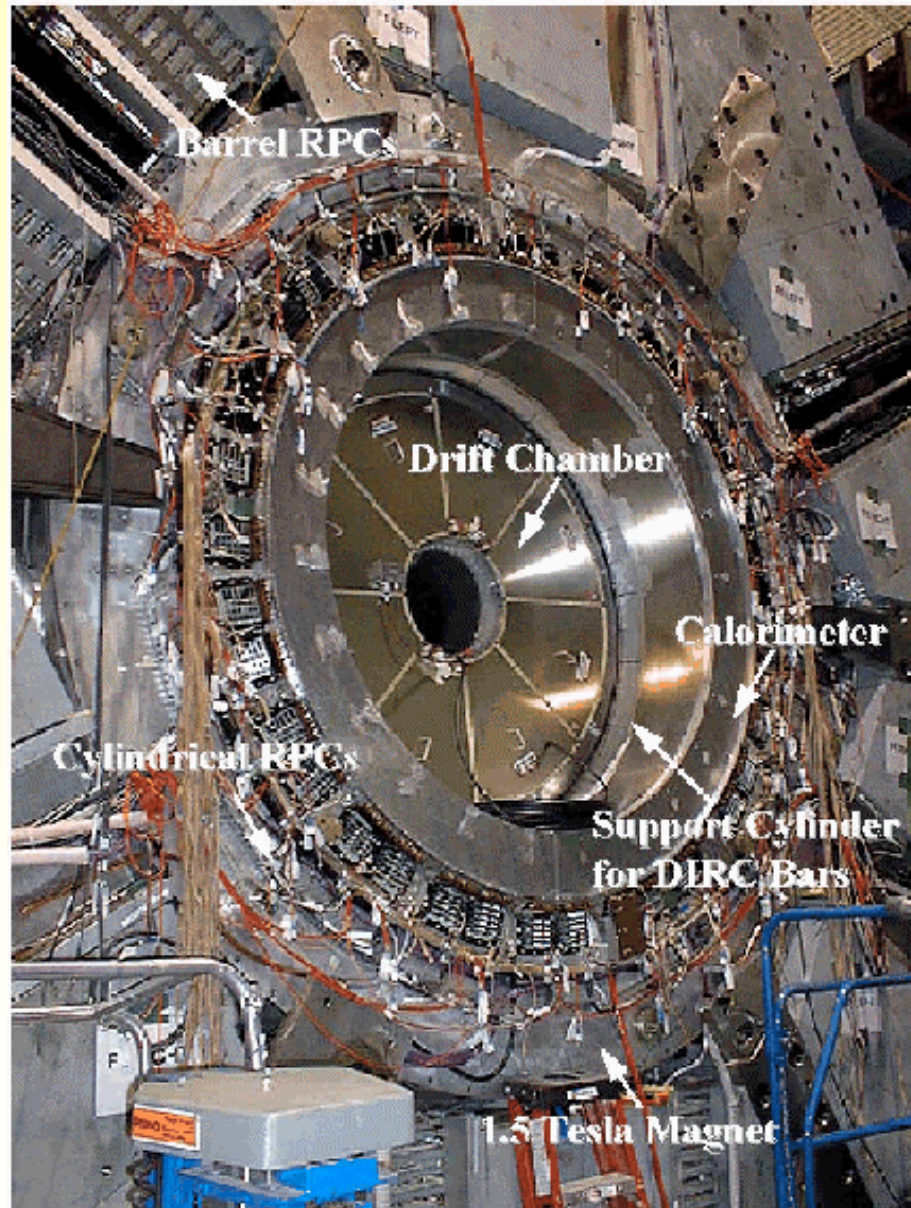
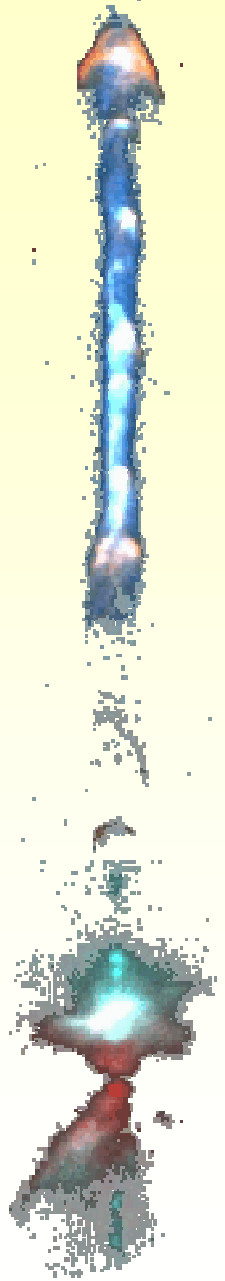
CERN  
NA48

DESY  
HERA-B

KEK  
BELLE



# Das BABAR-Experiment am SLAC



# Zusammenfassung

## Symmetrie:

# Das Urprinzip der Schöpfung

- Beschreibung von Wechselwirkungen (Kräften)
- Klassifizierung
- Symmetrieverletzung (CP,.....)
- Symmetriebrechung (Massen der Teilchen)
- .....

