

# Quanten, Symmetrien, Teilchen Was ist real?

**Axel Maas**

 @axelmaas.bsky.social



**NAWI Graz**  
Natural Sciences

**FWF** Österreichischer  
Wissenschaftsfonds



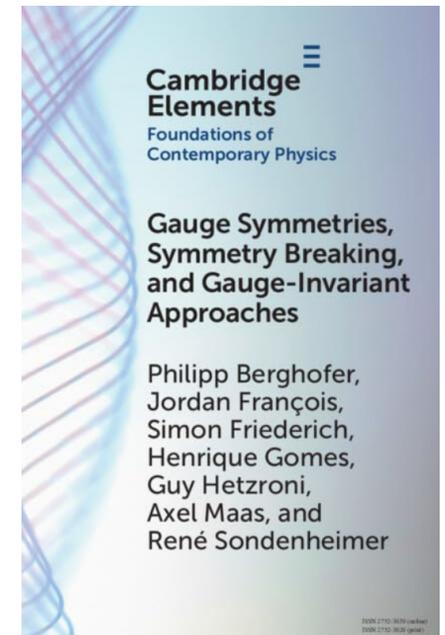
When certain effects show a certain (a)symmetry, this (a)symmetry must be found in the causes which gave rise to them.

Curie, 1894

Wenn ein bestimmter Effekt eine bestimmte (A)Symmetrie zeigt, dann muss diese (A)Symmetrie in seinen Gründen zu finden sein.

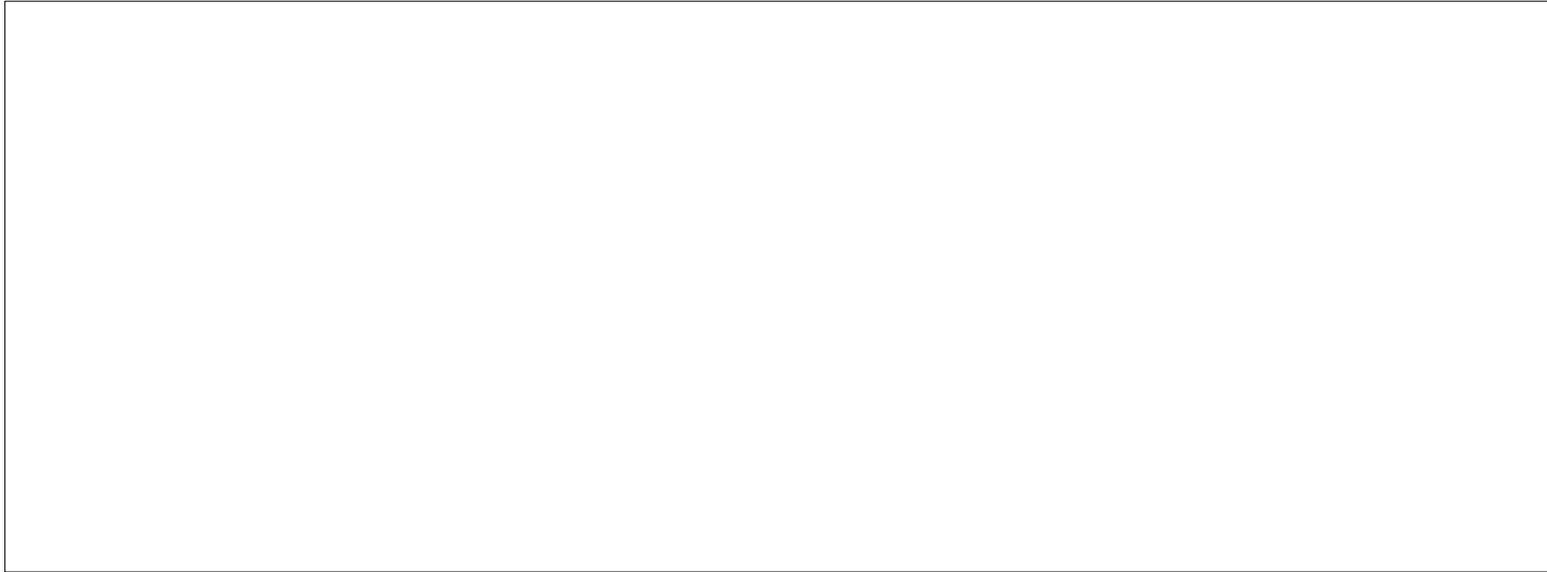
# Inhalt

- Symmetrien in der klassischen Physik
  - Global, lokal und Raumzeit
- Symmetrien in der Quantentheorie
  - Brechung und Invarianzen
- Elementare Teilchen und Symmetrien



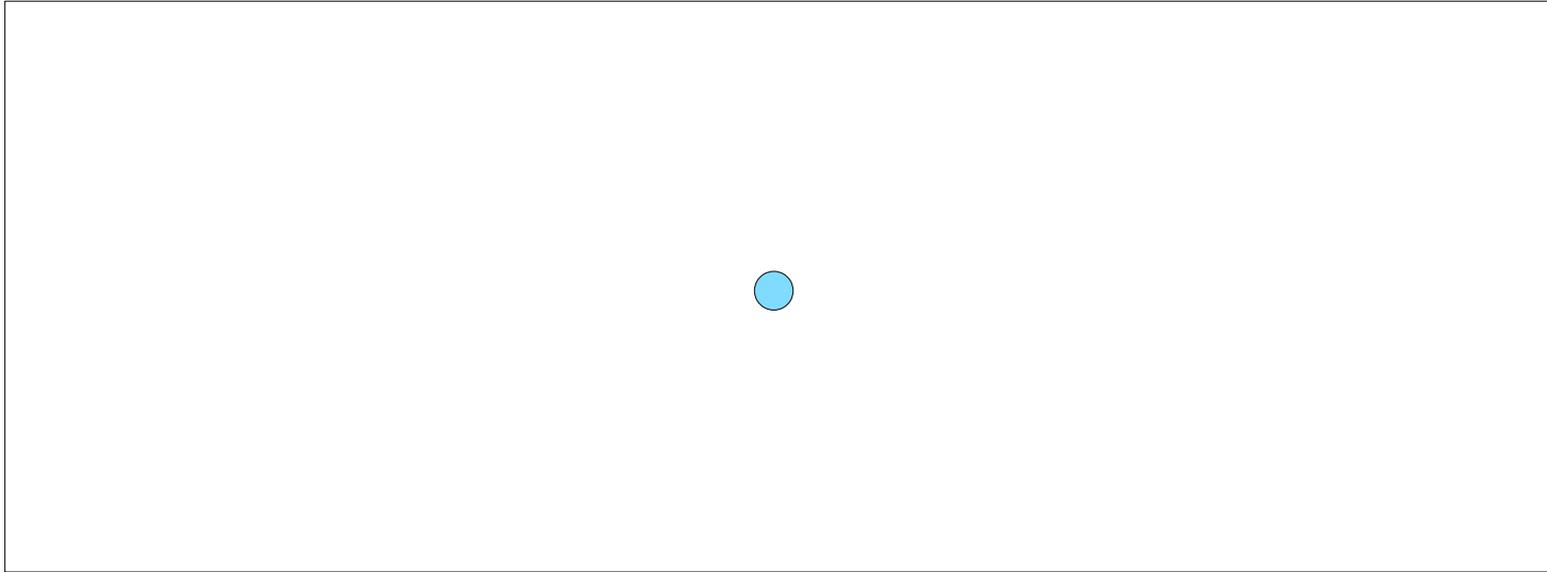
# **Koordinaten**

# Koordinaten



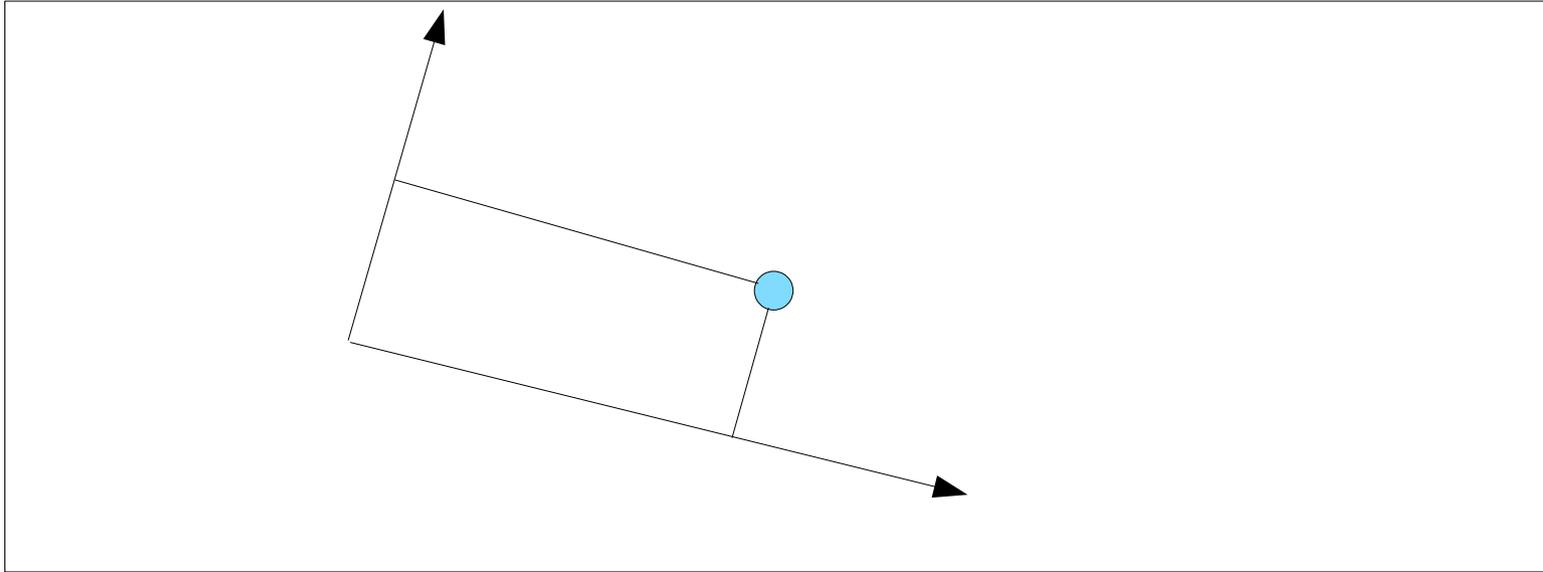
- Raum(zeit)

# Koordinaten



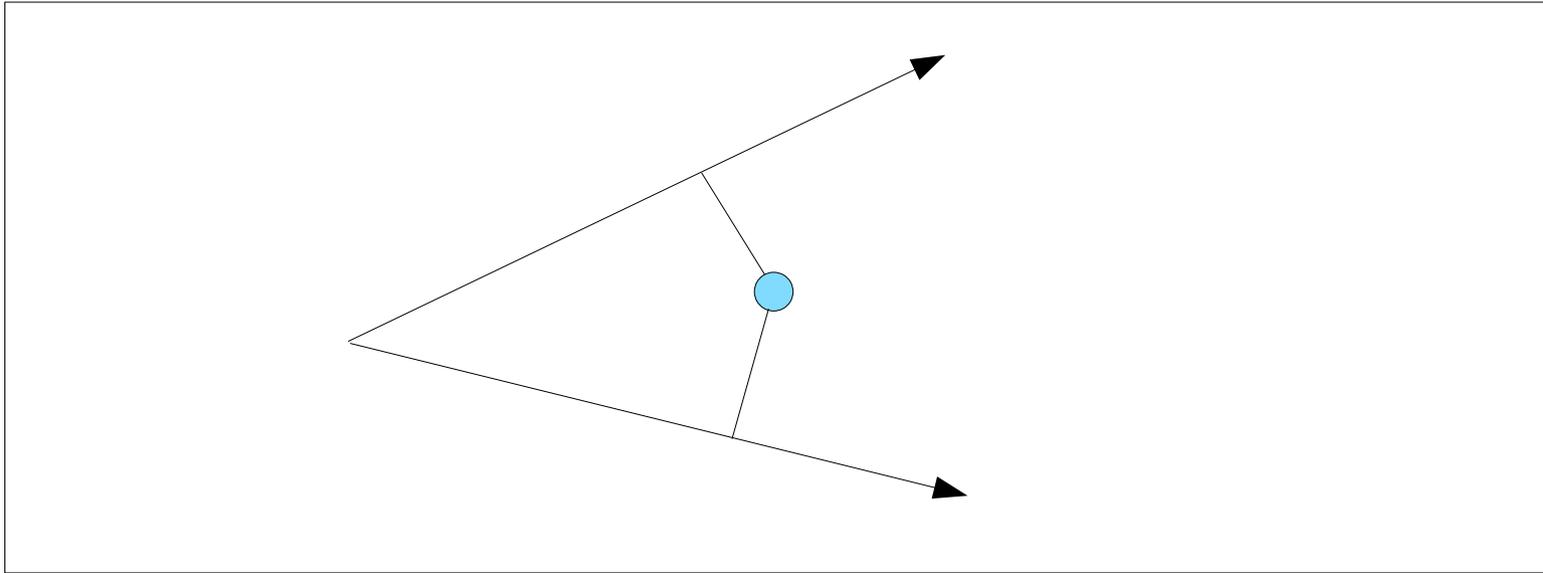
- Raum(zeit) ist eine Menge von Punkten

# Koordinaten



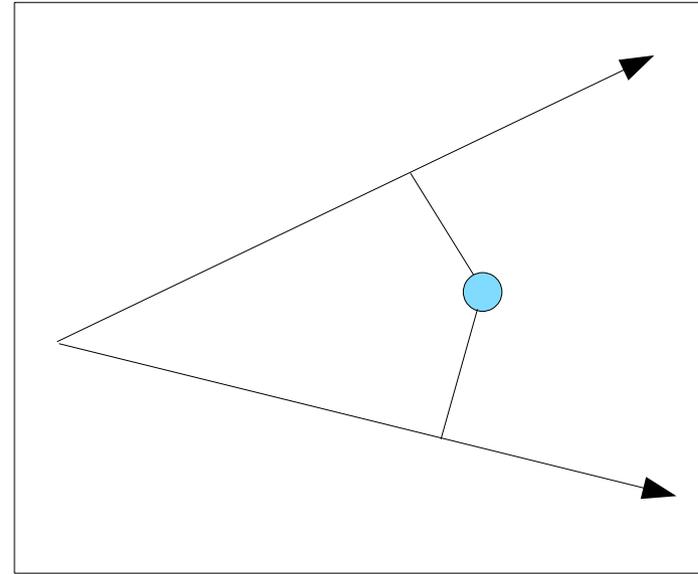
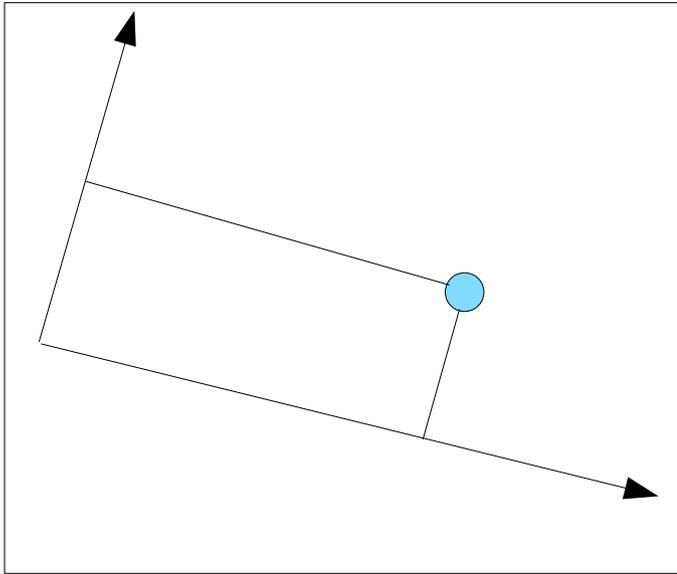
- Raum(zeit) ist eine Menge von Punkten
  - Koordinatensysteme werden verwendet, um sie zu identifizieren

# Koordinaten



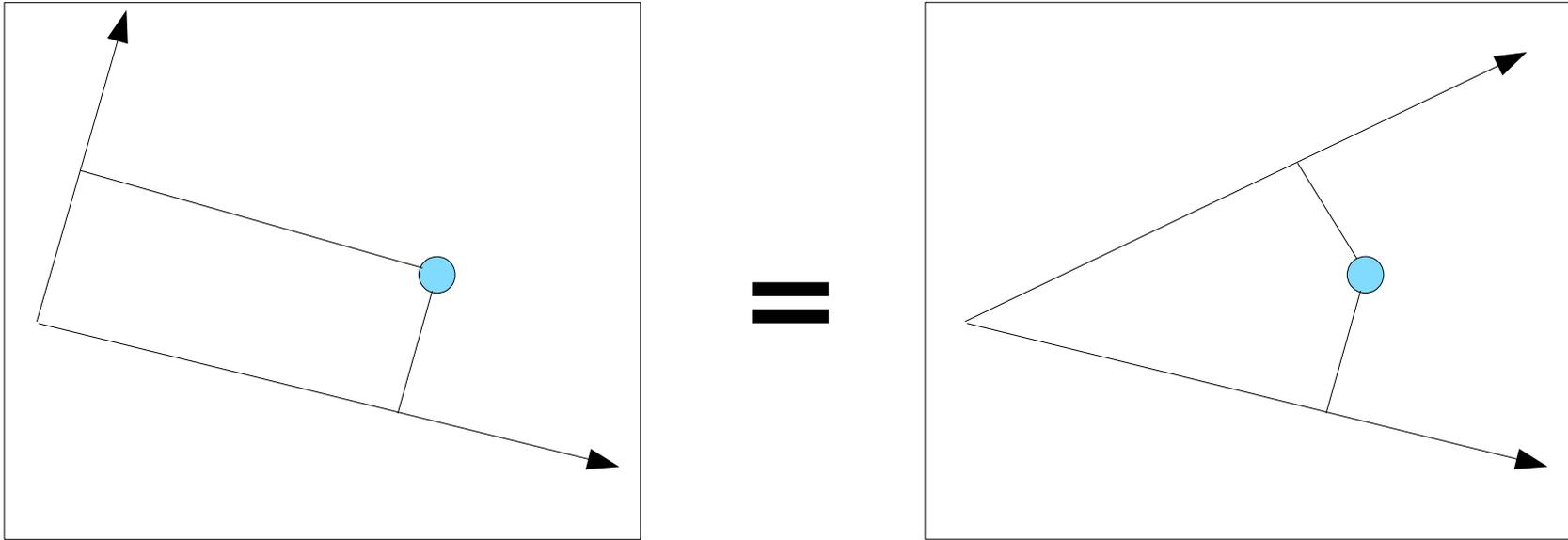
- Raum(zeit) ist eine Menge von Punkten
  - Koordinatensysteme werden verwendet, um sie zu identifizieren
- Müssen nicht die üblichen Länge-Breite-Höhe sein
  - Es gibt unendlich viele Möglichkeiten

# Koordinatentransformationen



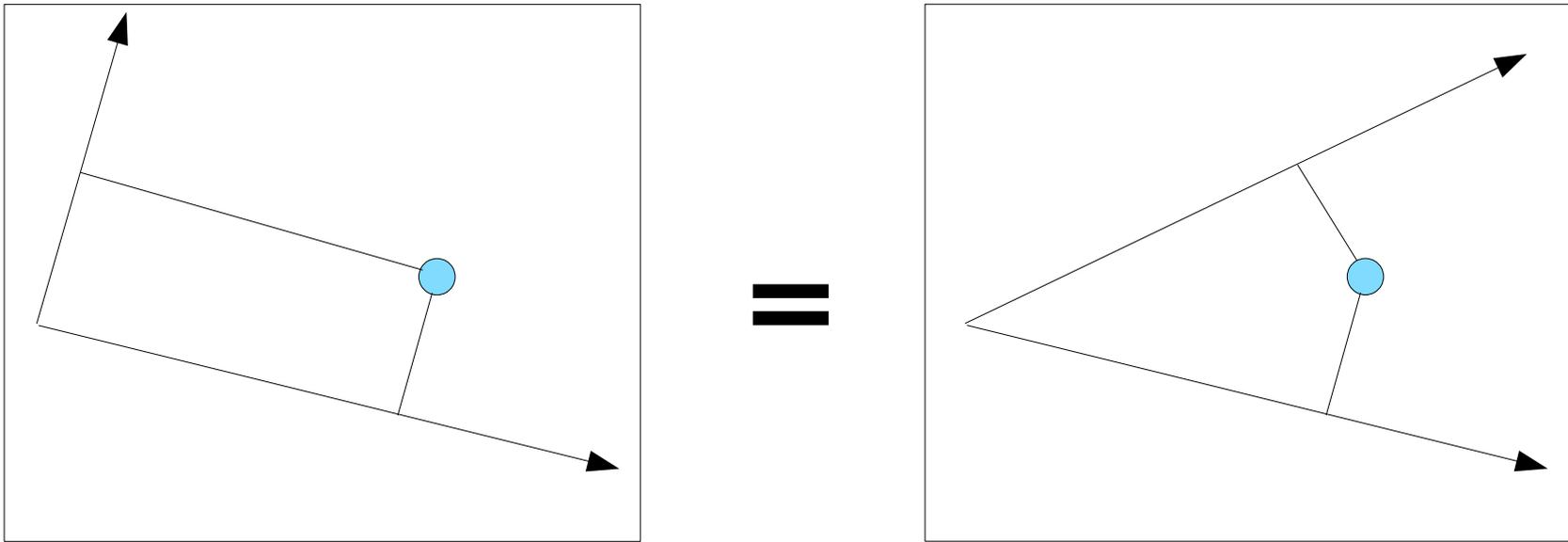
- Koordinatensysteme sind menschengemacht
  - Den Punkten sind sie egal

# Koordinatentransformationen



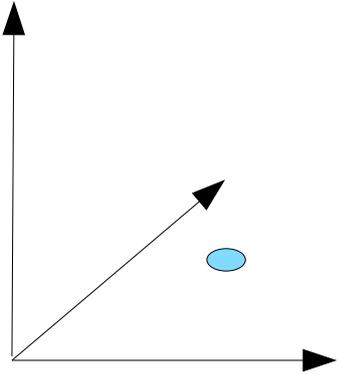
- Koordinatensysteme sind menschengemacht
  - Den Punkten sind sie egal
- Physik muss unabhängig von ihnen sein
- Oder: Physik ist in allen gleich

# Koordinatentransformationen



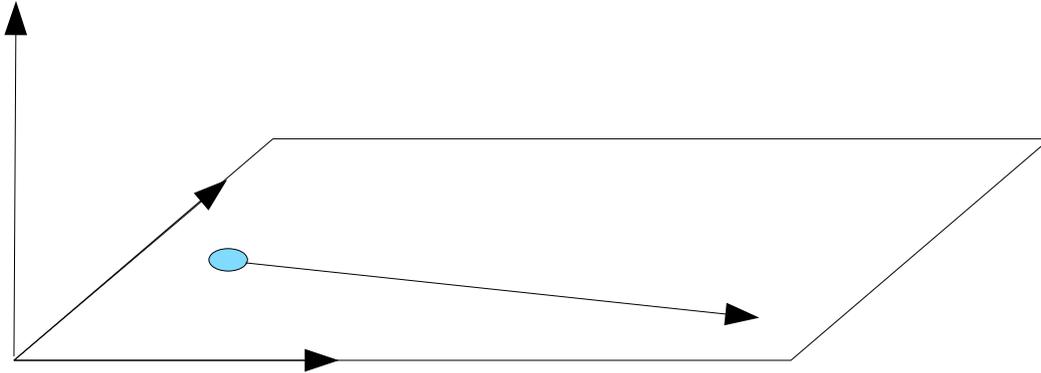
- Koordinatensysteme sind menschengemacht
  - Den Punkten sind sie egal
- Physik muss unabhängig von ihnen sein
- Oder: Physik ist in allen gleich
- Man muss sie also ineinander umwandeln können
  - Koordinatentransformationen

# Überflüssige Koordinaten



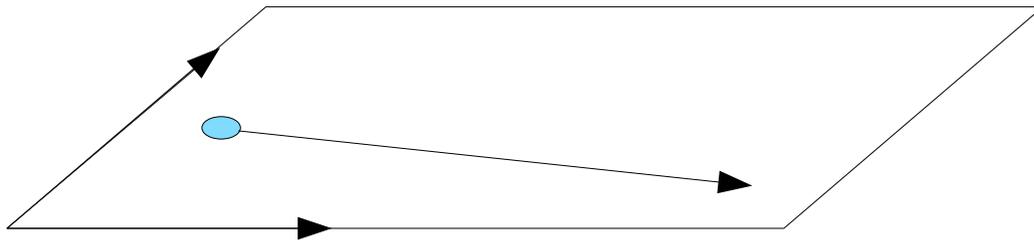
- Nicht immer sind alle Koordinaten unabhängig
  - Einige mögen überflüssig sein

# Überflüssige Koordinaten



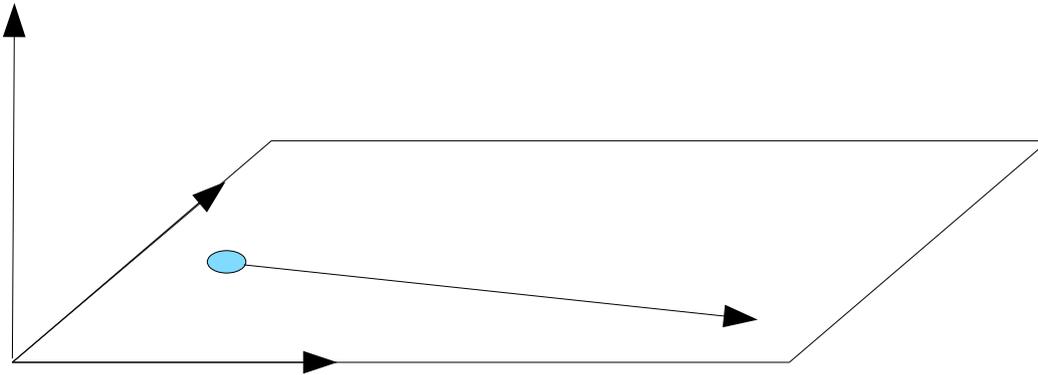
- Nicht immer sind alle Koordinaten unabhängig
  - Einige mögen überflüssig sein
- Z.B. etwas, was sich in der Ebene bewegt, aber für das man auch die Höhe angibt

# Überflüssige Koordinaten



- Nicht immer sind alle Koordinaten unabhängig
  - Einige mögen überflüssig sein
- Z.B. etwas, was sich in der Ebene bewegt, aber für das man auch die Höhe angibt
- Man kann die überflüssigen Koordinaten eliminieren
  - Manchmal technisch hilfreich

# Überflüssige Koordinaten



- Nicht immer sind alle Koordinaten unabhängig
  - Einige mögen überflüssig sein
- Z.B. etwas, was sich in der Ebene bewegt, aber für das man auch die Höhe angibt
- Man kann die überflüssigen Koordinaten eliminieren
  - Manchmal technisch hilfreich
- Aber das ist nicht nötig

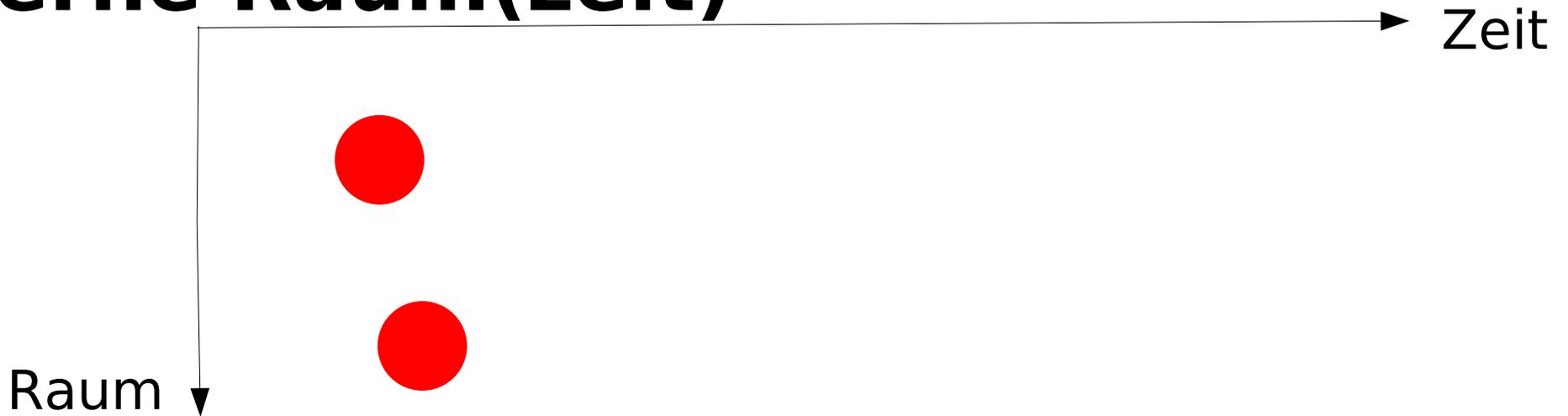
# Externe Raum(zeit)

Zeit

Raum

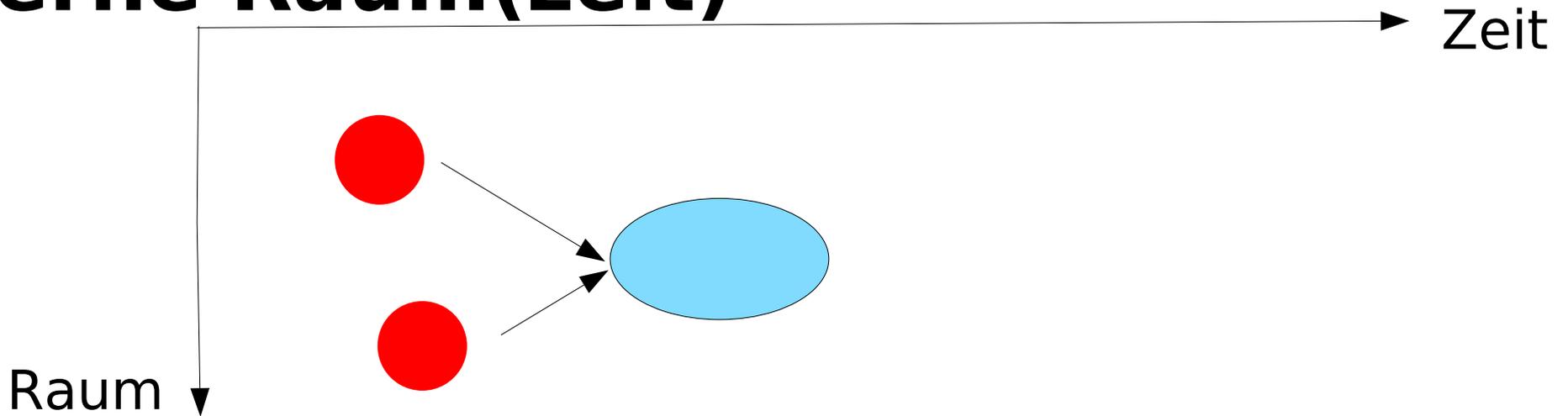
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt

# Externe Raum(zeit)



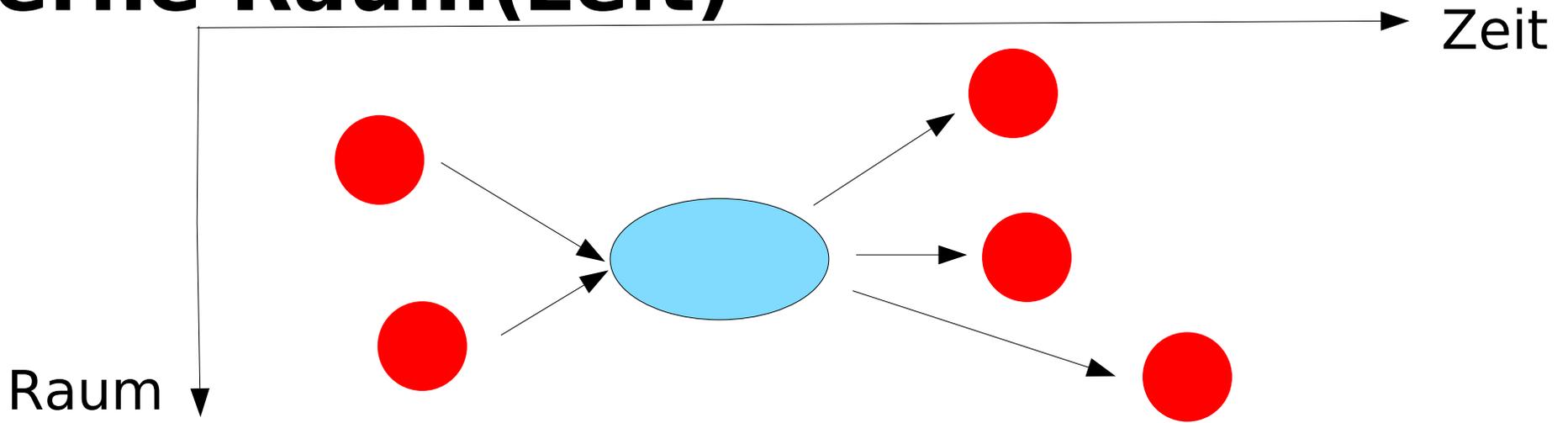
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt
- Die Raum(zeit) ist dabei nur eine Bühne, in der Teilchenphysik geschieht, und nimmt nicht aktiv teil

# Externe Raum(zeit)



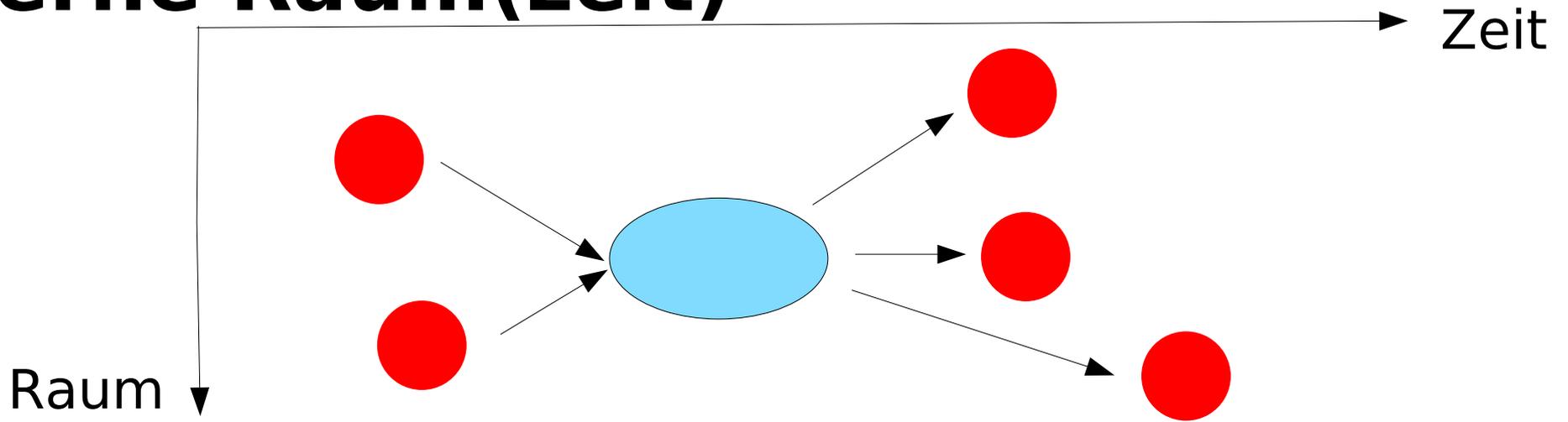
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt
- Die Raum(zeit) ist dabei nur eine Bühne, in der Teilchenphysik geschieht, und nimmt nicht aktiv teil

# Externe Raum(zeit)



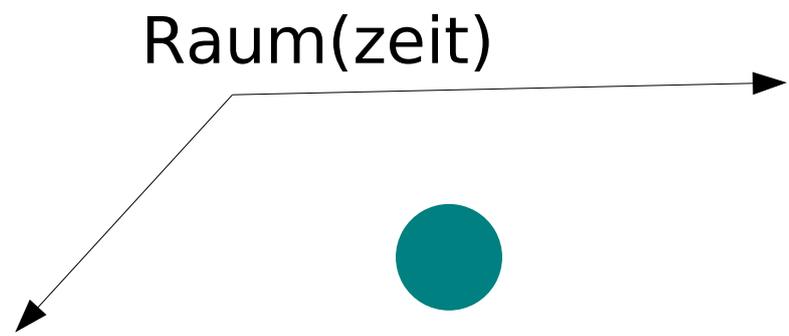
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt
- Die Raum(zeit) ist dabei nur eine Bühne, in der Teilchenphysik geschieht, und nimmt nicht aktiv teil

# Externe Raum(zeit)



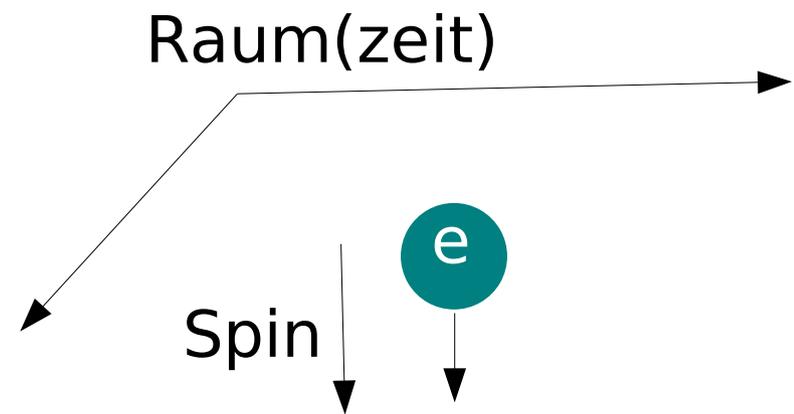
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt
- Die Raum(zeit) ist dabei nur eine Bühne, in der Teilchenphysik geschieht, und nimmt nicht aktiv teil
- Daher wird Raum(zeit) als “externer” Raum(zeit) bezeichnet

# Interner Raum



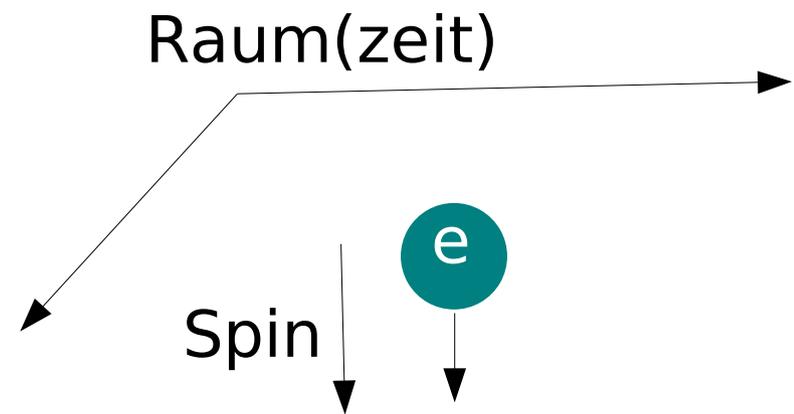
- Teilchen haben mehr Eigenschaften als Ort und Geschwindigkeit

# Interner Raum



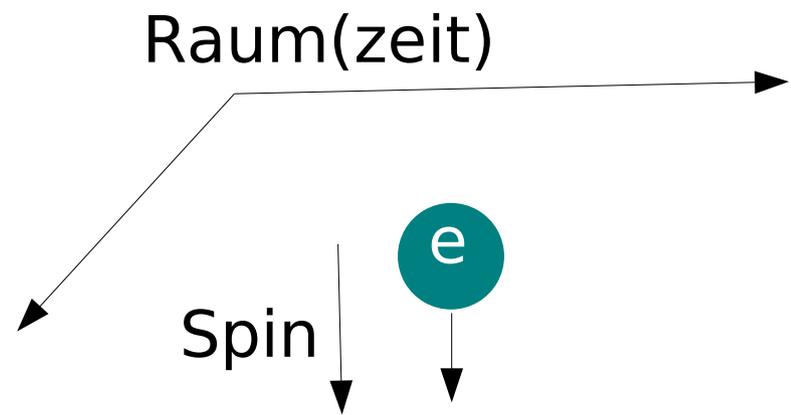
- Teilchen haben mehr Eigenschaften als Ort und Geschwindigkeit
- Beispiel: Spin
  - Bestimmt Eigenschaften unter Drehungen und Gültigkeit des Pauliprinzips
  - Elektronen haben Spin  $\frac{1}{2}$
  - Der Spin hat eine Richtung

# Interner Raum



- Teilchen haben mehr Eigenschaften als Ort und Geschwindigkeit
- Beispiel: Spin
  - Bestimmt Eigenschaften unter Drehungen und Gültigkeit des Pauliprinzips
  - Elektronen haben Spin  $\frac{1}{2}$
  - Der Spin hat eine Richtung
  - Das ist eine zusätzliche Information
  - Benötigt eine zusätzliche Koordinate

# Interner Raum



- Teilchen haben mehr Eigenschaften als Ort und Geschwindigkeit
- Beispiel: Spin
  - Bestimmt Eigenschaften unter Drehungen und Gültigkeit des Pauliprinzips
  - Elektronen haben Spin  $\frac{1}{2}$
  - Der Spin hat eine Richtung
  - Das ist eine zusätzliche Information
  - Benötigt eine zusätzliche Koordinate
- Intern: Gehört zum Elektron, nicht zur Raum(zeit)

# Interner Raum

- Es gibt mehr Möglichkeiten

# Interner Raum

- Es gibt mehr Möglichkeiten – teils sehr abstrakt

# Interner Raum

p

n

- Es gibt mehr Möglichkeiten – teils sehr abstrakt
  - Z.B.: Protonen und Neutronen

# Interner Raum

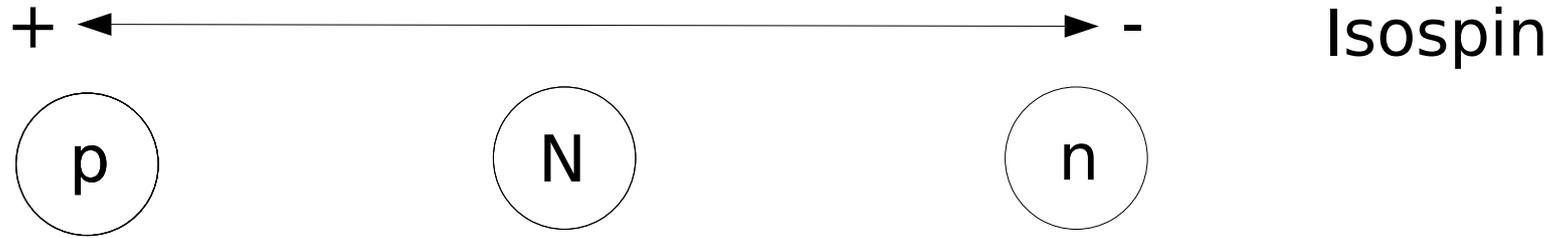
p

N

n

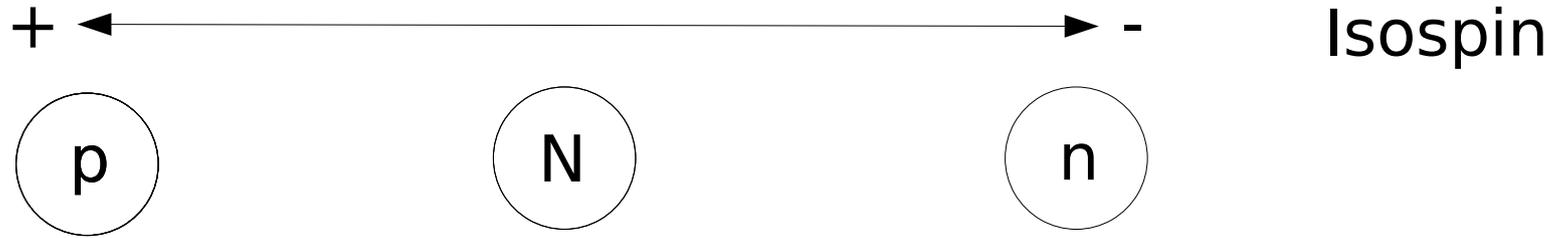
- Es gibt mehr Möglichkeiten – teils sehr abstrakt
  - Z.B.: Protonen und Neutronen
  - Die starke Wechselwirkung kann sie nicht unterscheiden
    - Massendifferenz ist vernachlässigt
  - Verhält sich wie eine Sorte Teilchen: Nukleonen

# Interner Raum



- Es gibt mehr Möglichkeiten – teils sehr abstrakt
  - Z.B.: Protonen und Neutronen
  - Die starke Wechselwirkung kann sie nicht unterscheiden
    - Massendifferenz ist vernachlässigt
  - Verhält sich wie eine Sorte Teilchen: Nukleonen
  - Unterschied kann in einem internen Raum beschrieben werden: Isospin
  - Isospin + ist ein Proton, Isospin - ist ein Neutron

# Interner Raum



- Es gibt mehr Möglichkeiten – teils sehr abstrakt
  - Z.B.: Protonen und Neutronen
  - Die starke Wechselwirkung kann sie nicht unterscheiden
    - Massendifferenz ist vernachlässigt
  - Verhält sich wie eine Sorte Teilchen: Nukleonen
  - Unterschied kann in einem internen Raum beschrieben werden: Isospin
  - Isospin + ist ein Proton, Isospin - ist ein Neutron
  - Andere Kräfte können unterscheiden

# Interner Raum



- Es gibt mehr Möglichkeiten – teils sehr abstrakt
  - Z.B.: Protonen und Neutronen
  - Die starke Wechselwirkung kann sie nicht unterscheiden
    - Massendifferenz ist vernachlässigt
  - Verhält sich wie eine Sorte Teilchen: Nukleonen
  - Unterschied kann in einem internen Raum beschrieben werden: Isospin
  - Isospin + ist ein Proton, Isospin - ist ein Neutron
  - Andere Kräfte können unterscheiden
- Proton oder Neutron zu sein ist eine interne (diskrete) Koordinate

# **Symmetrien**

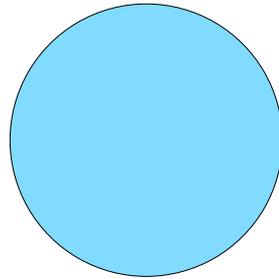
# Was ist eine Symmetrie?

# Was ist eine Symmetrie?

- Eine Symmetrie ist eine Veränderung, die keine messbaren Auswirkungen hat

# Was ist eine Symmetrie?

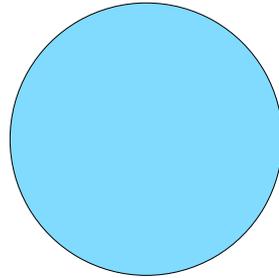
- Eine Symmetrie ist eine Veränderung, die keine messbaren Auswirkungen hat



Dies ist ein Kreis

# Was ist eine Symmetrie?

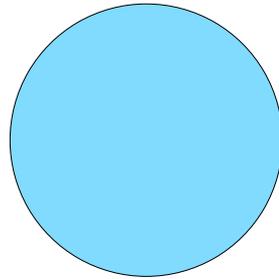
- Eine Symmetrie ist eine Veränderung, die keine messbaren Auswirkungen hat



Dies ist ein Kreis  
Er wurde um  $30^\circ$  gedreht

# Was ist eine Symmetrie?

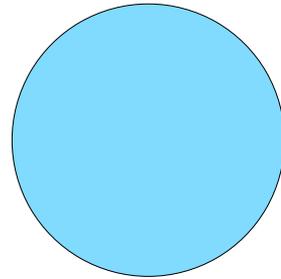
- Eine Symmetrie ist eine Veränderung, die keine messbaren Auswirkungen hat



Dies ist ein Kreis  
Er wurde um  $30^\circ$  gedreht  
Das ist nicht meßbar  
Er hat eine Drehsymmetrie

# Was ist eine Symmetrie?

- Eine Symmetrie ist eine Veränderung, die keine messbaren Auswirkungen hat

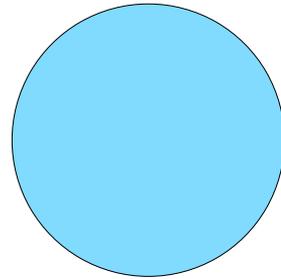


Dies ist ein Kreis  
Er wurde um  $30^\circ$  gedreht  
Das ist nicht meßbar  
Er hat eine Drehsymmetrie

- Dasselbe gilt für jeden Winkel
  - Drehsymmetrie ist eine kontinuierliche Symmetrie

# Was ist eine Symmetrie?

- Eine Symmetrie ist eine Veränderung, die keine messbaren Auswirkungen hat



Dies ist ein Kreis  
Er wurde um  $30^\circ$  gedreht  
Das ist nicht meßbar  
Er hat eine Drehsymmetrie

- Dasselbe gilt für jeden Winkel
  - Drehsymmetrie ist eine kontinuierliche Symmetrie
- Spiegeln ist ebenfalls eine Symmetrie
  - Diskrete Spiegelachse – diskrete Symmetrie

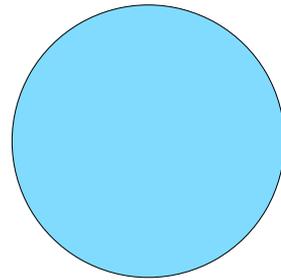
# Warum sind Symmetrien wichtig?

# Warum sind Symmetrien wichtig?

- Symmetrie führen zu Erhaltungsgrößen
  - Kontinuierliche Symmetrien: Satz von Noether
  - Bei diskreten Symmetrien nicht immer der Fall

# Warum sind Symmetrien wichtig?

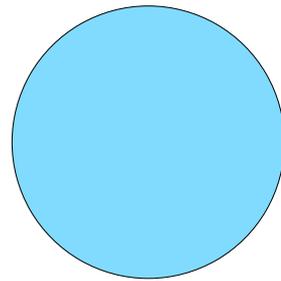
- Symmetrie führen zu Erhaltungsgrößen
  - Kontinuierliche Symmetrien: Satz von Noether
  - Bei diskreten Symmetrien nicht immer der Fall



Drehung um Achse senkrecht zur Folie ist eine Symmetrie: Drehimpuls um die Drehachse ist erhalten

# Warum sind Symmetrien wichtig?

- Symmetrie führen zu Erhaltungsgrößen
  - Kontinuierliche Symmetrien: Satz von Noether
  - Bei diskreten Symmetrien nicht immer der Fall



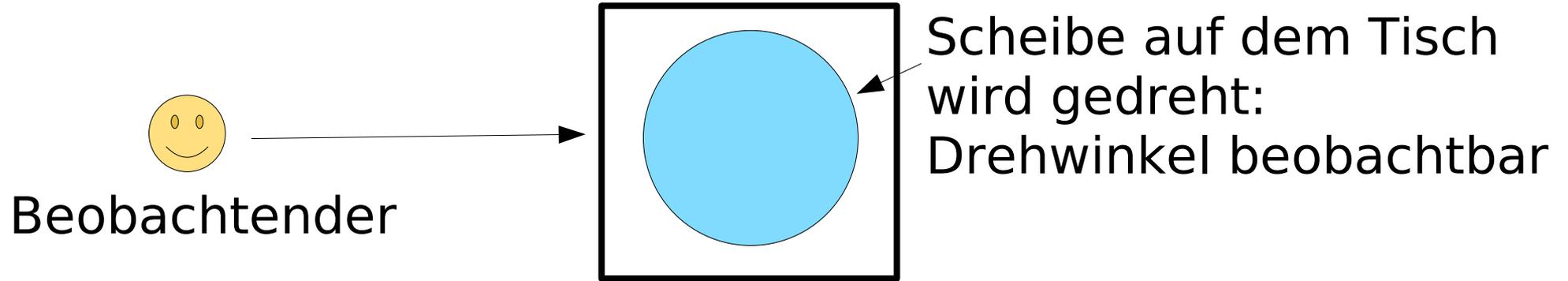
Drehung um Achse senkrecht zur Folie ist eine Symmetrie: Drehimpuls um die Drehachse ist erhalten

- In der Praxis oft umgekehrt
  - Erhaltungsgröße wird beobachtet
  - Eine Theorie mit einer korrespondierenden Symmetrie wird formuliert

**Was Symmetrien nicht sind**

# Was Symmetrien nicht sind

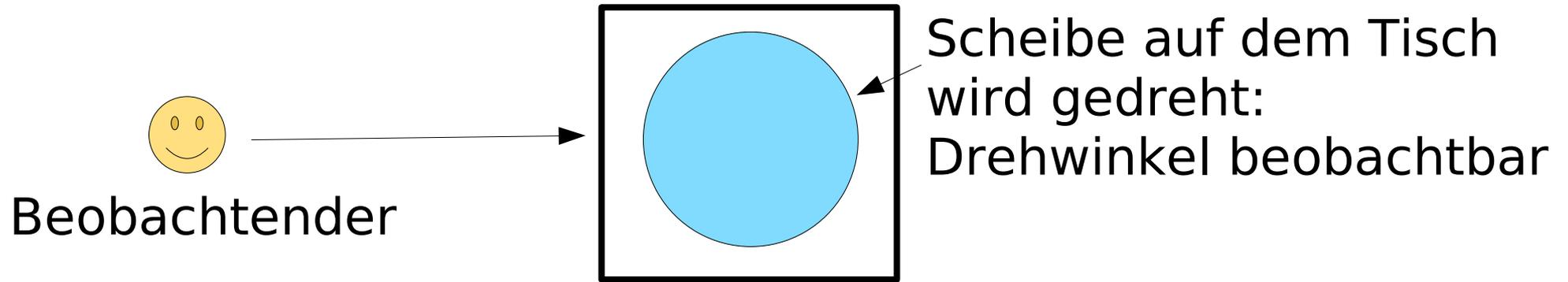
- Eine Symmetrie ist nicht:



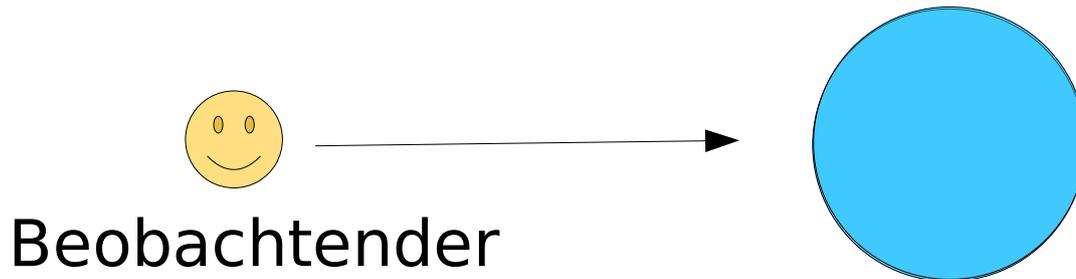
- Eine Symmetrie ist:

# Was Symmetrien nicht sind

- Eine Symmetrie ist nicht:

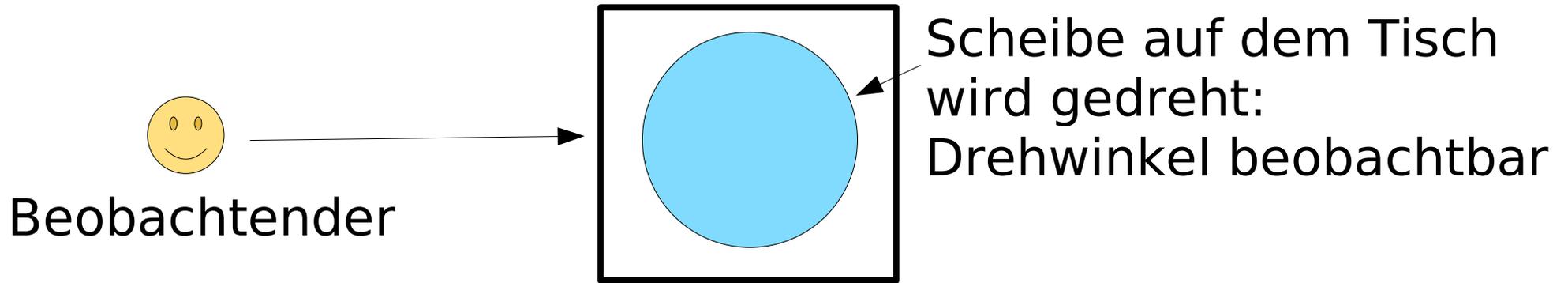


- Eine Symmetrie ist:



# Was Symmetrien nicht sind

- Eine Symmetrie ist nicht:

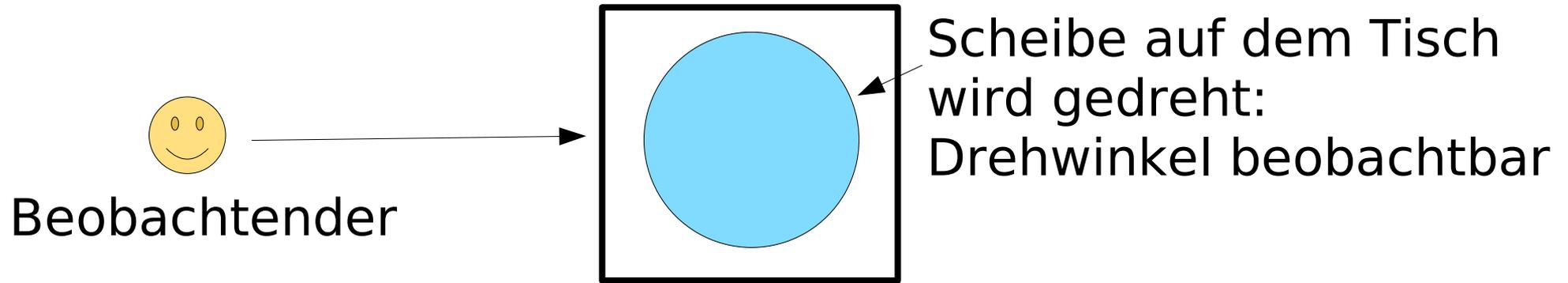


- Eine Symmetrie ist:



# Was Symmetrien nicht sind

- Eine Symmetrie ist nicht:

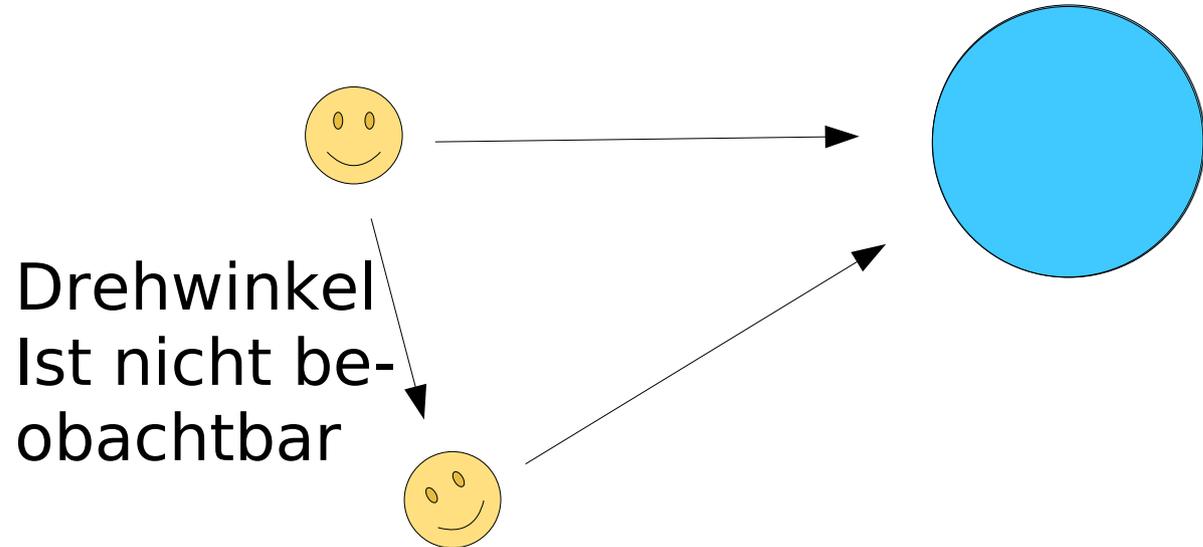


Hier sieht man was, weil auch die Folien gedreht werden müsste!

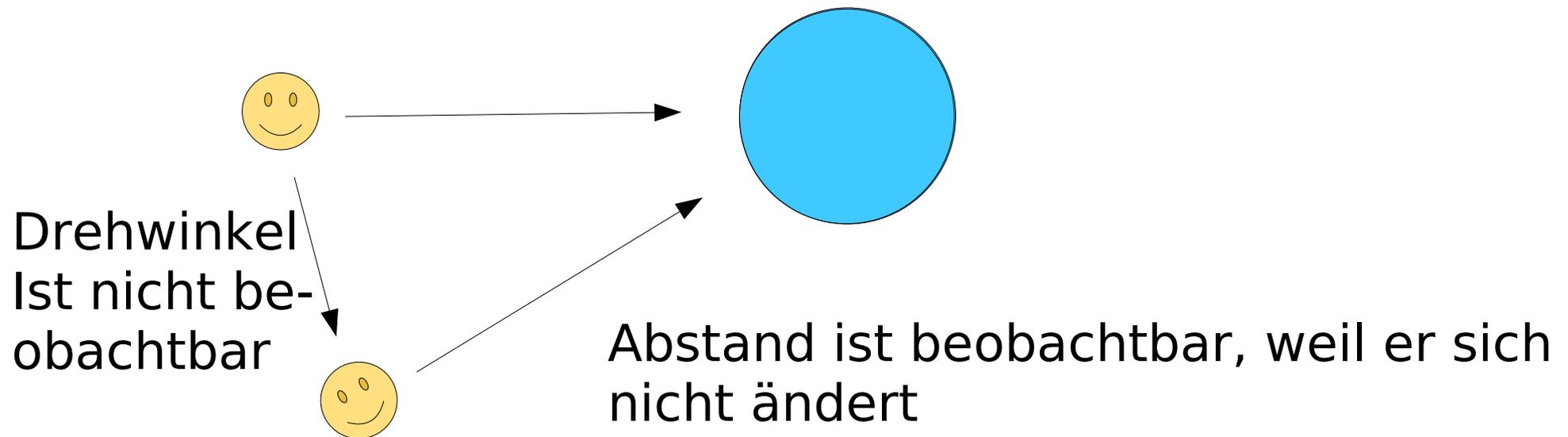
- Eine Symmetrie ist:



# Wie man über Beobachtungen redet

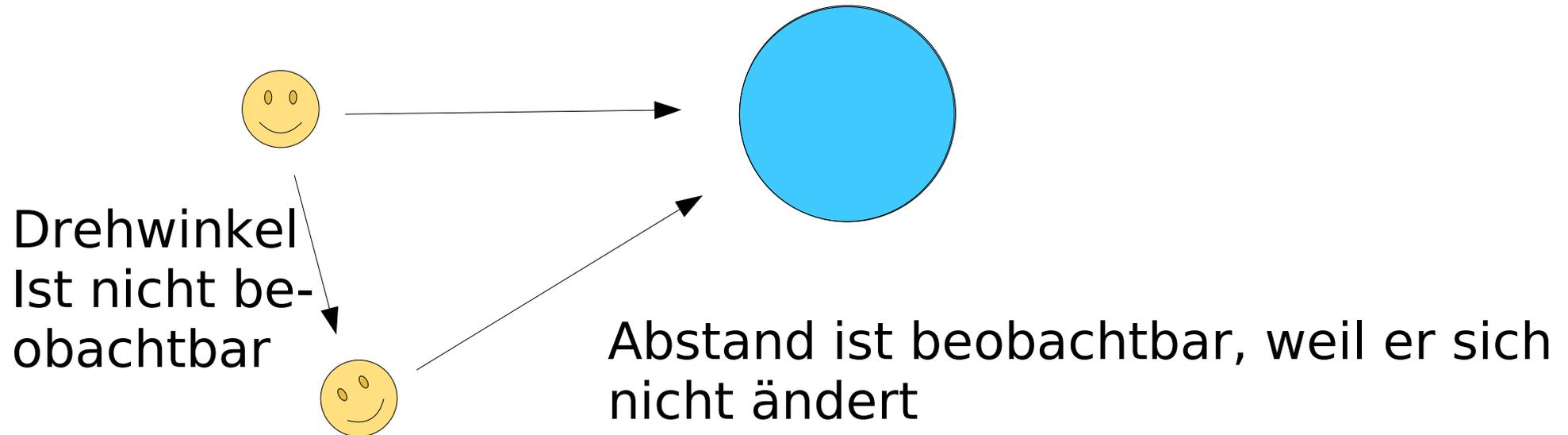


# Wie man über Beobachtungen redet



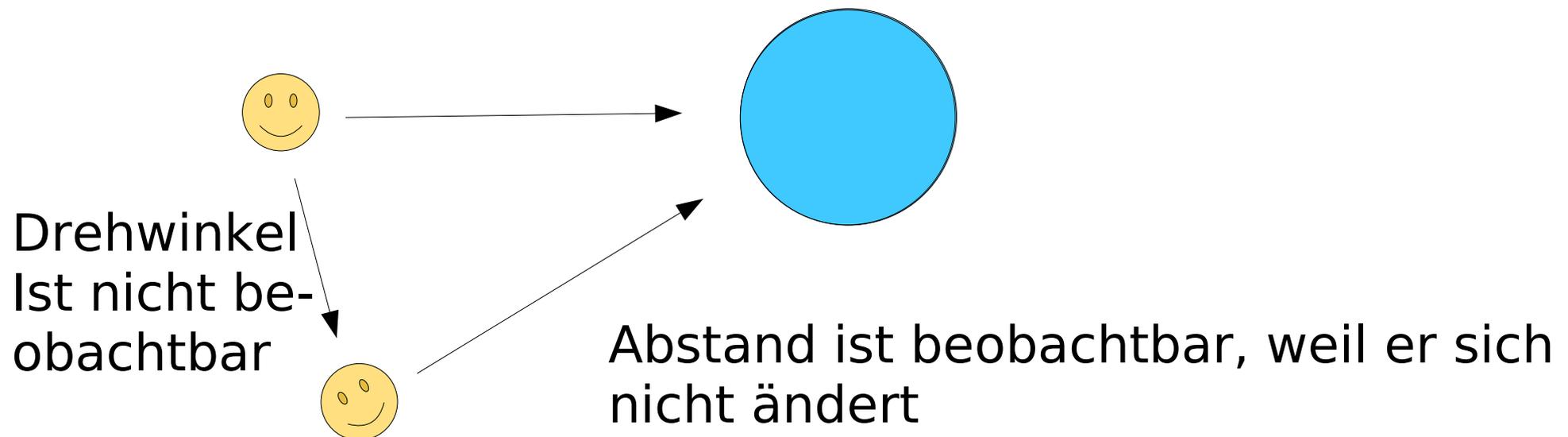
# Wie man über Beobachtungen redet

- Symmetrien haben keine beobachtbaren Konsequenzen



# Wie man über Beobachtungen redet

- Symmetrien haben keine beobachtbaren Konsequenzen
  - Experimentelle Beobachtungen müssen durch Größen ausgedrückt werden, die sich nicht ändern: Invarianten
    - Wigner-Eckart Theorem



# Warum dann Symmetrien?

- Wenn man sie nicht beobachten kann, warum dann überhaupt Symmetrien?

# Warum dann Symmetrien?

- Wenn man sie nicht beobachten kann, warum dann überhaupt Symmetrien?
  - Technisch: Oft notwendig um eine praktikable mathematische Beschreibung zu haben

# Warum dann Symmetrien?

- Wenn man sie nicht beobachten kann, warum dann überhaupt Symmetrien?
  - Technisch: Oft notwendig um eine praktikable mathematische Beschreibung zu haben
  - Heuristik: Viele scheinbare Symmetrien in der Natur

# Warum dann Symmetrien?

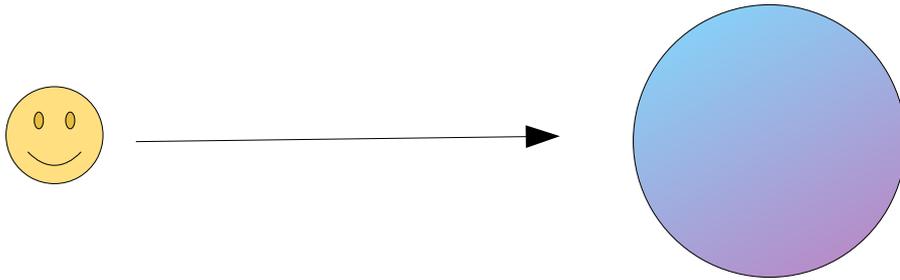
- Wenn man sie nicht beobachten kann, warum dann überhaupt Symmetrien?
  - Technisch: Oft notwendig um eine praktikable mathematische Beschreibung zu haben
  - Heuristik: Viele scheinbare Symmetrien in der Natur
    - Schneeflocke: Eine alleine ist symmetrisch, zwei nur, wenn man sie gleichzeitig dreht etc.
    - Wenn man nur eine anschaut, wirkt alles symmetrisch: Idealisierung
    - Sehr gut der Vorstellung zugänglich

# Warum dann Symmetrien?

- Symmetriebrechung

# Warum dann Symmetrien?

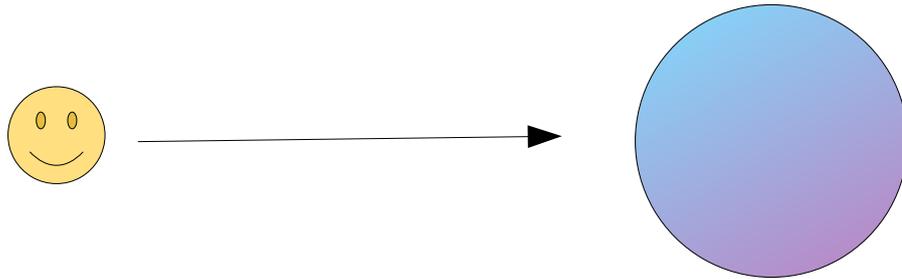
- Symmetriebrechung



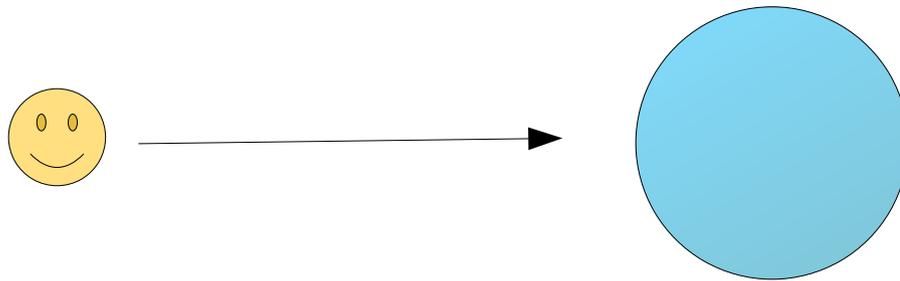
Unterschiedliche Färbung  
bricht die Symmetrie:  
Drehwinkel messbar

# Warum dann Symmetrien?

- Symmetriebrechung



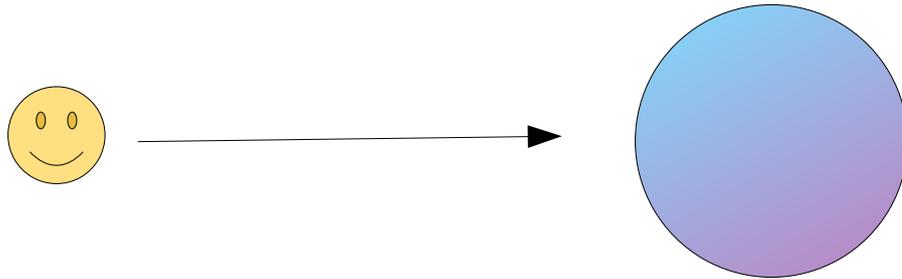
Unterschiedliche Färbung bricht die Symmetrie: Drehwinkel messbar



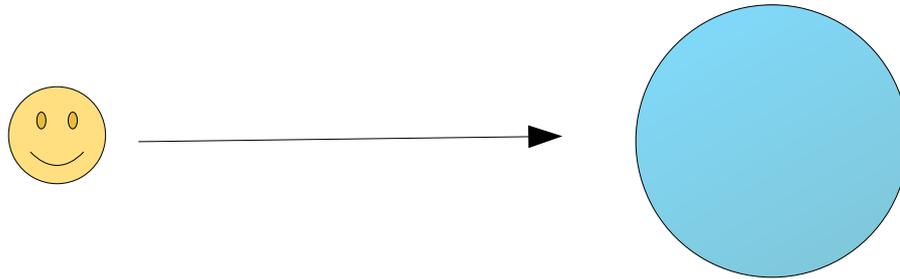
Oft ist die Brechung ganz schwach, und vieles (Erhaltungsgröße!) ist fast wie mit Symmetrien - technisch hilfreich

# Warum dann Symmetrien?

- Symmetriebrechung



Unterschiedliche Färbung bricht die Symmetrie: Drehwinkel messbar



Oft ist die Brechung ganz schwach, und vieles (Erhaltungsgröße!) ist fast wie mit Symmetrien - technisch hilfreich

“Asymmetry is what creates a phenomenon” (Curie, 1894)  
Asymmetrie ist, was einen Phänomen erzeugt

Weitverbreitete Situation in der Welt

# Spontane Symmetriebrechung

- Kann Symmetrie kommen und gehen?

# Spontane Symmetriebrechung

- Kann Symmetrie kommen und gehen?
  - Beispiel: Eisenkugel
    - Symmetrische Form: Drehsymmetrie?
    - Kann magnetisch sein: Nord-Süd-Richtung, nicht drehsymmetrisch
    - Kann durch aufheizen und abkühlen verändert werden
    - Symmetrie ist nicht mehr da, wenn die Kugel magnetisiert wurde
    - Frage der Anfangsbedingungen des Systems

# Spontane Symmetriebrechung

- Kann Symmetrie kommen und gehen?
  - Beispiel: Eisenkugel
    - Symmetrische Form: Drehsymmetrie?
    - Kann magnetisch sein: Nord-Süd-Richtung, nicht drehsymmetrisch
    - Kann durch aufheizen und abkühlen verändert werden
    - Symmetrie ist nicht mehr da, wenn die Kugel magnetisiert wurde
    - Frage der Anfangsbedingungen des Systems
- In der klassischen Physik ist das möglich
  - Hängt von der Geschichte des Systems ab

# Quantisierung

# Quantisierung

- Quantentheorie: Statt Voraussagen können nur noch Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten gemacht werden
  - Eigene Vorträge – hier als gegeben akzeptiert

# Quantisierung

- Quantentheorie: Statt Voraussagen können nur noch Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten gemacht werden
  - Eigene Vorträge – hier als gegeben akzeptiert
- Es gibt verschiedene (äquivalente) Arten eine Quantentheorie zu bauen

# Quantisierung

- Quantentheorie: Statt Voraussagen können nur noch Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten gemacht werden
  - Eigene Vorträge – hier als gegeben akzeptiert
- Es gibt verschiedene (äquivalente) Arten eine Quantentheorie zu bauen
  - Hier: Summe über Geschichten
  - Wahrscheinlichkeit das etwas passiert ist das gewichtete Mittel aller möglichen Geschichten des Universums

# Quantisierung

- Quantentheorie: Statt Voraussagen können nur noch Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten gemacht werden
  - Eigene Vorträge – hier als gegeben akzeptiert
- Es gibt verschiedene (äquivalente) Arten eine Quantentheorie zu bauen
  - Hier: Summe über Geschichten
  - Wahrscheinlichkeit das etwas passiert ist das gewichtete Mittel aller möglichen Geschichten des Universums
  - Wichtungsfunktion ist zentrales Element einer Theorie
    - Enthält die Details von Teilchen und ihren Wechselwirkungen

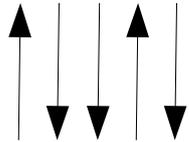
# Geschichten und Symmetrien

- Geschichten sind explizite Realisierungen eines Systems

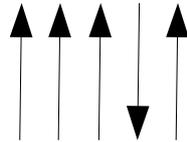
# Geschichten und Symmetrien

- Geschichten sind explizite Realisierungen eines Systems

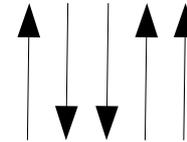
Geschichte 1



Geschichte 2



Geschichte 3

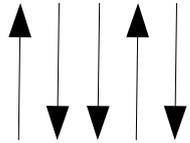


....

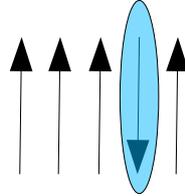
# Geschichten und Symmetrien

- Geschichten sind explizite Realisierungen eines Systems

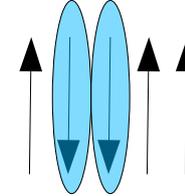
Geschichte 1



Geschichte 2



Geschichte 3



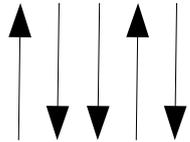
....

Einzelne Geschichten sind nicht völlig symmetrisch

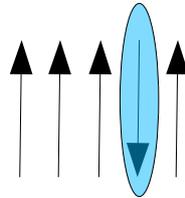
# Geschichten und Symmetrien

- Geschichten sind explizite Realisierungen eines Systems

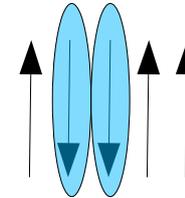
Geschichte 1



Geschichte 2



Geschichte 3



....

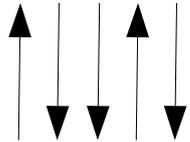
Einzelne Geschichten sind nicht völlig symmetrisch

Wenn aber die Wichtungsfunktion symmetrisch ist, ist der Mittelwert immer symmetrisch

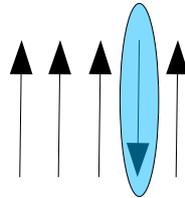
# Geschichten und Symmetrien

- Geschichten sind explizite Realisierungen eines Systems

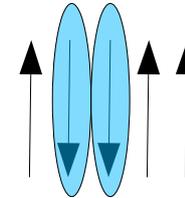
Geschichte 1



Geschichte 2



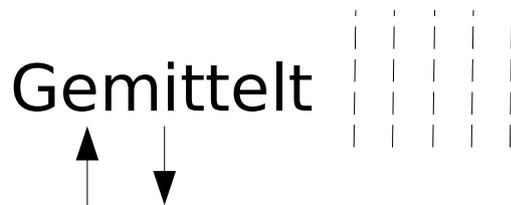
Geschichte 3



....

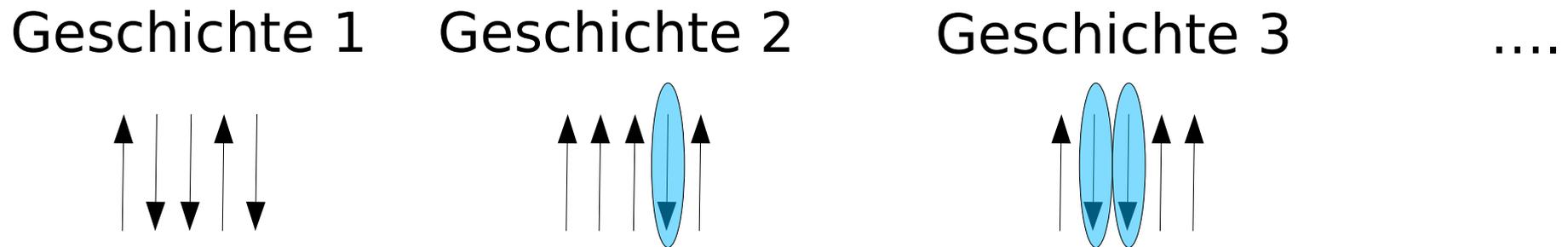
Einzelne Geschichten sind nicht völlig symmetrisch

Wenn aber die Wichtungsfunktion symmetrisch ist, ist der Mittelwert immer symmetrisch



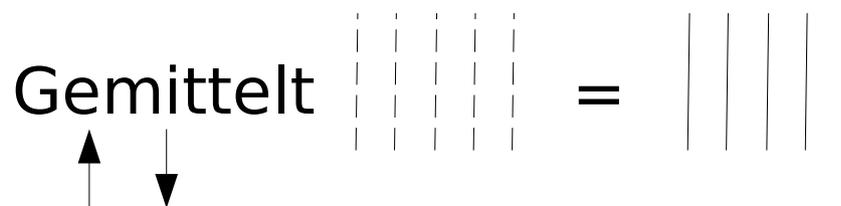
# Geschichten und Symmetrien

- Geschichten sind explizite Realisierungen eines Systems



Einzelne Geschichten sind nicht völlig symmetrisch

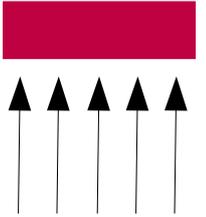
Wenn aber die Wichtungsfunktion symmetrisch ist, ist der Mittelwert immer symmetrisch



Der Mittelwert hat keine Präferenz und ist daher symmetrisch!

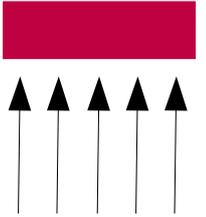
# Spontane Symmetriebrechung

- Keine Symmetrie in der Wichtungsfunktion:  
Keine Symmetrie
  - Z.B. externes Magnetfeld



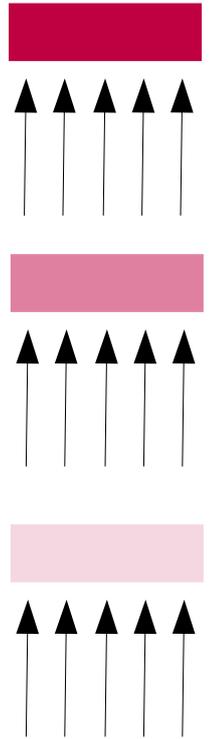
# Spontane Symmetriebrechung

- Keine Symmetrie in der Wichtungsfunktion:  
Keine Symmetrie
  - Z.B. externes Magnetfeld
- Wie kann es dann einen magnetische Eisenkugel geben?



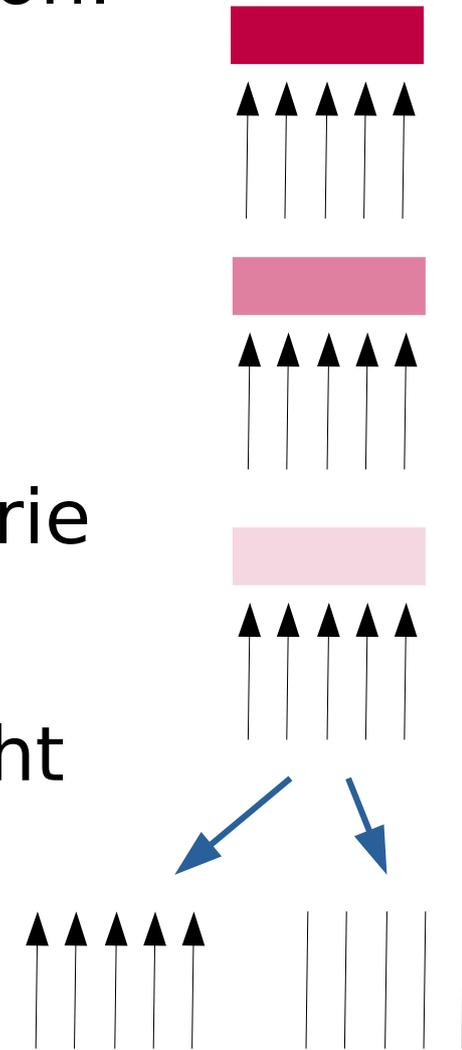
# Spontane Symmetriebrechung

- Keine Symmetrie in der Wichtungsfunktion:  
Keine Symmetrie
  - Z.B. externes Magnetfeld
- Wie kann es dann einen magnetische Eisenkugel geben?
- Gleichmäßiges abschalten der Asymmetrie
  - Reduzieren eines externen Magnetfeldes



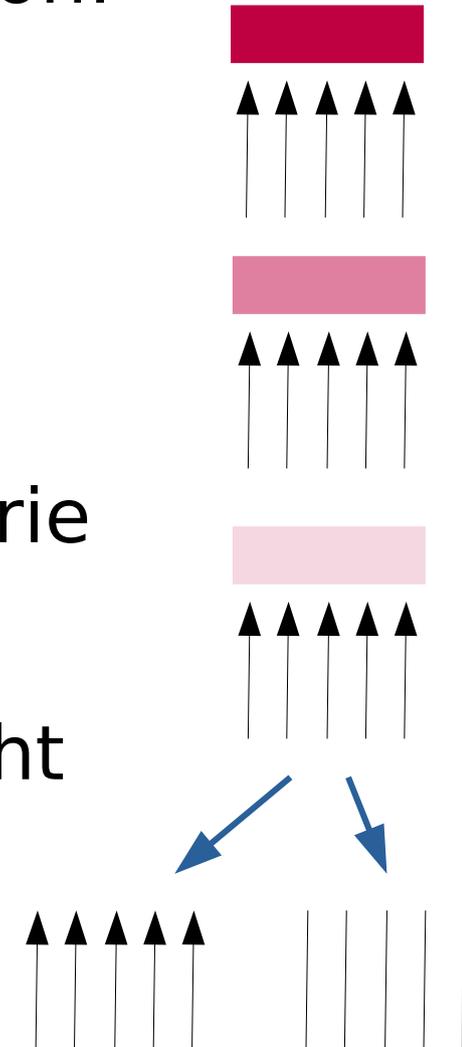
# Spontane Symmetriebrechung

- Keine Symmetrie in der Wichtungsfunktion:  
Keine Symmetrie
  - Z.B. externes Magnetfeld
- Wie kann es dann einen magnetische Eisenkugel geben?
- Gleichmäßiges abschalten der Asymmetrie
  - Reduzieren eines externen Magnetfeldes
- Zwei Optionen: Bleibt bestehen oder nicht



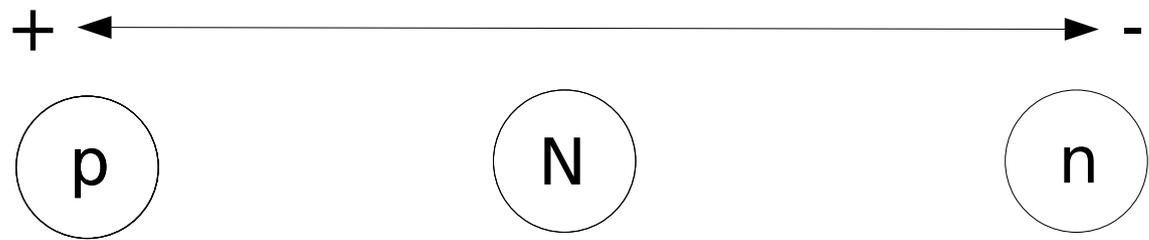
# Spontane Symmetriebrechung

- Keine Symmetrie in der Wichtungsfunktion:  
Keine Symmetrie
  - Z.B. externes Magnetfeld
- Wie kann es dann einen magnetische Eisenkugel geben?
- Gleichmäßiges abschalten der Asymmetrie
  - Reduzieren eines externen Magnetfeldes
- Zwei Optionen: Bleibt bestehen oder nicht
  - Hat eine 'Erinnerung' wo es herkommt
  - System ist metastabil gegen Störungen,  
wenn Asymmetrie bleibt
    - Oder: Reagiert sofort auf Asymmetrie



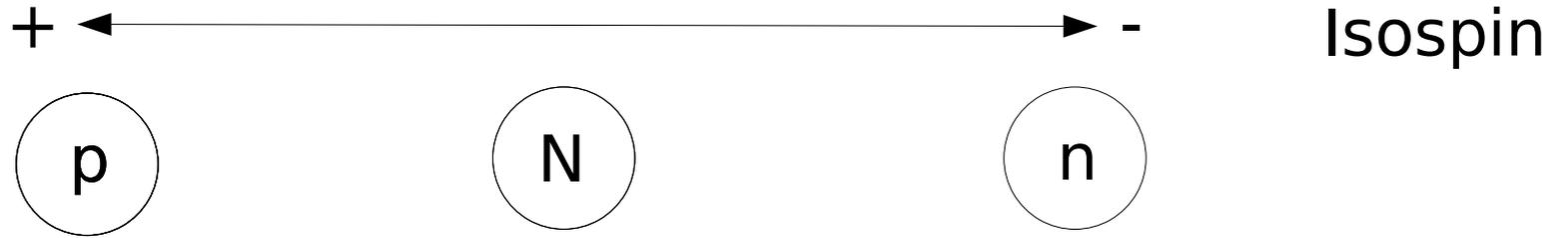
# **Lokale Symmetrien**

# Interner Raum



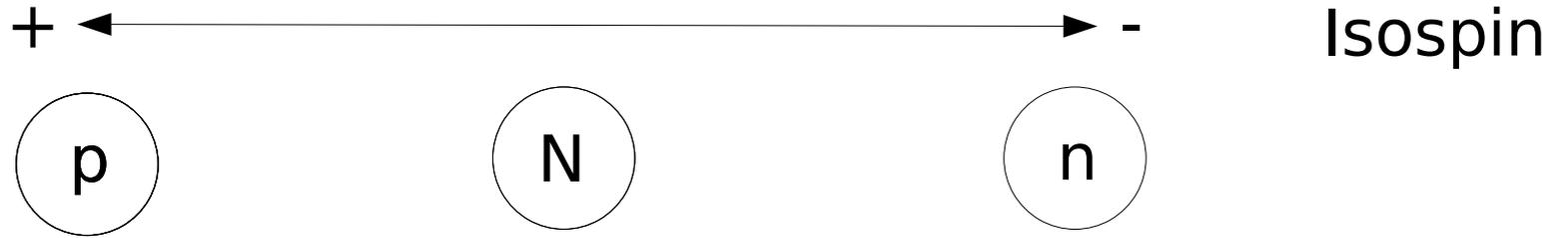
Isospin

# Interner Raum



- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?

# Interner Raum



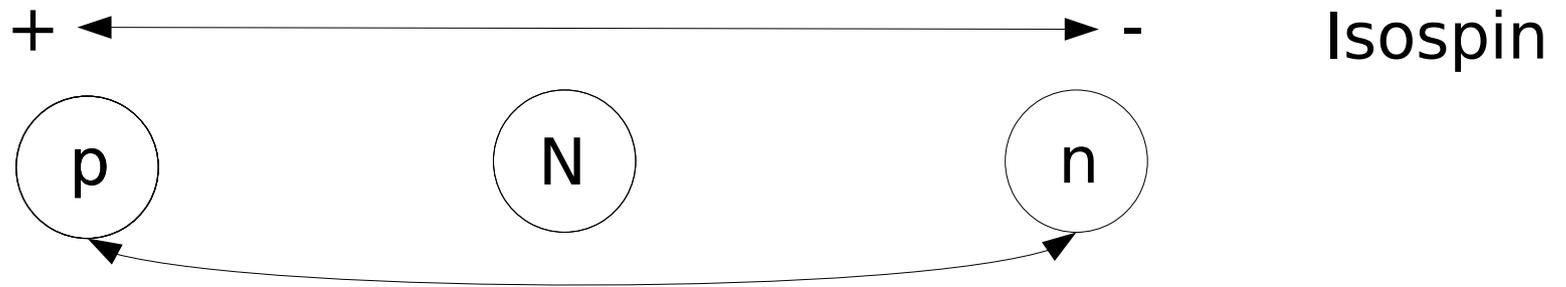
- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?
- Keiner

# Interner Raum



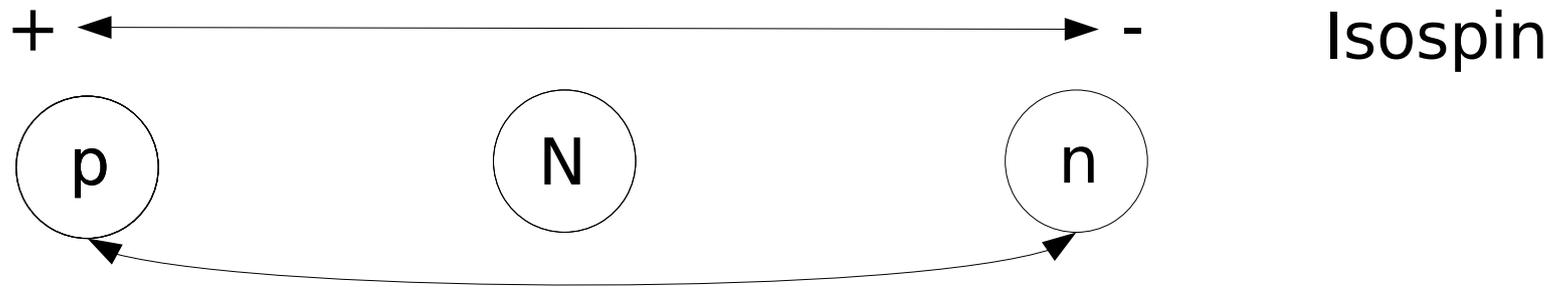
- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?
- Keiner
- Das System unterscheidet dann nicht mehr zwischen Protonen und Neutronen

# Interner Raum



- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?
- Keiner
- Das System unterscheidet dann nicht mehr zwischen Protonen und Neutronen
- Können ausgetauscht werden, ohne dass sich etwas ändert
- Was Proton und Neutron genannt wird, ist egal
- Nur ein Koordinatensystem
- Deswegen ist die starke Kraft unabhängig davon

# Interner Raum

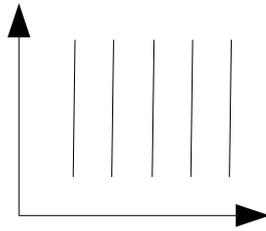


- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?
- Keiner
- Das System unterscheidet dann nicht mehr zwischen Protonen und Neutronen
- Können ausgetauscht werden, ohne dass sich etwas ändert
- Was Proton und Neutron genannt wird, ist egal
- Nur ein Koordinatensystem
- Physik muss davon unabhängig sein

# **Symmetrien und Koordinatensysteme**

# Symmetrien und Koordinatensysteme

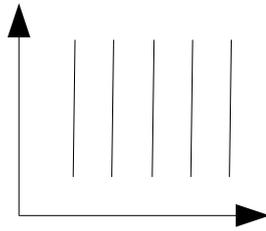
Richtung 2



System ist in Bezug auf Richtung 2  
Symmetrisch, aber nicht Richtung 1

# Symmetrien und Koordinatensysteme

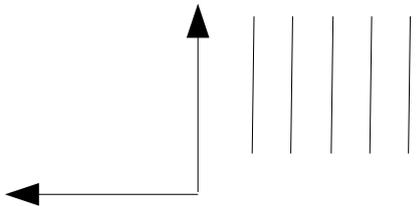
Richtung 2



System ist in Bezug auf Richtung 2  
Symmetrisch, aber nicht Richtung 1

Koordinatensystem wird um  $90^\circ$  gekippt

Richtung 1

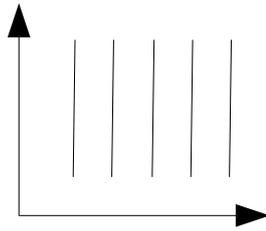


System ist in Bezug auf Richtung 1  
Symmetrisch, aber nicht Richtung 2

Richtung 2

# Symmetrien und Koordinatensysteme

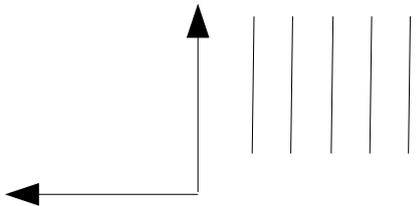
Richtung 2



System ist in Bezug auf Richtung 2  
Symmetrisch, aber nicht Richtung 1

Koordinatensystem wird um  $90^\circ$  gekippt

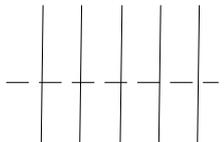
Richtung 1



System ist in Bezug auf Richtung 1  
Symmetrisch, aber nicht Richtung 2

Richtung 2

Entferne  
Koordinaten



System symmetrisch gegenüber  
Spiegelung am Mittelpunkt

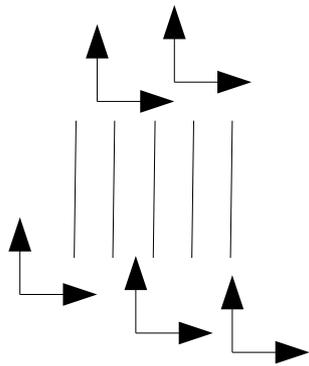
Koordinaten wurden menschengemacht, Symmetrie  
nicht - Symmetrien müssen unabhängig sein!

# Lokale Symmetrien

- Bis jetzt nur globale Änderungen der Richtungen – geht das lokal?

# Lokale Symmetrien

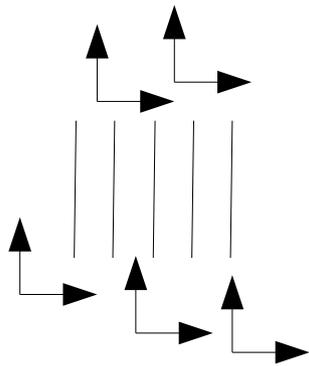
- Bis jetzt nur globale Änderungen der Richtungen – geht das lokal? Ja!



Bestimmung der Orientierung lokal  
immer in einem anderen, beliebigen  
Koordinatsystem

# Lokale Symmetrien

- Bis jetzt nur globale Änderungen der Richtungen – geht das lokal? Ja!

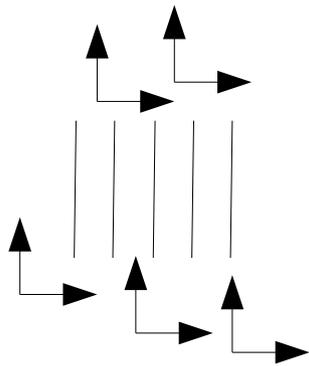


Bestimmung der Orientierung lokal immer in einem anderen, beliebigen Koordinatensystem

- Lässt sich mathematisch als Wichtungsfunktion beschreiben
  - Eichtheorie
  - Experimentelle Resultate bleiben unabhängig von der lokalen Wahl des Koordinatensystems

# Lokale Symmetrien

- Bis jetzt nur globale Änderungen der Richtungen – geht das lokal? Ja!



Bestimmung der Orientierung lokal immer in einem anderen, beliebigen Koordinatensystem

- Lässt sich mathematisch als Wichtungsfunktion beschreiben
  - Eichtheorie
  - Experimentelle Resultate bleiben unabhängig von der lokalen Wahl des Koordinatensystems
  - Wichtige Konsequenz: Keine spontane Symmetriebrechung möglich (Theorem von Elitzur)

# Beispiel: Klassische Elektrodynamik

- Triumph der klassischen Physik im 19. Jahrhundert
- Formuliert in den Maxwellgleichungen
  - Ohne (und mit) Materie werden die elektrischen und magnetischen Felder beschrieben, und wie sie zusammenhängen

# Beispiel: Klassische Elektrodynamik

- Triumph der klassischen Physik im 19. Jahrhundert
- Formuliert in den Maxwellgleichungen
  - Ohne (und mit) Materie werden die elektrischen und magnetischen Felder beschrieben, und wie sie zusammenhängen
- Können abgeleitet werden aus einem gemeinsamen Feld: Das Vektorpotential
  - Zentral für relativistische Darstellung

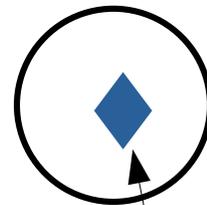
# Beispiel: Klassische Elektrodynamik

- Triumph der klassischen Physik im 19. Jahrhundert
- Formuliert in den Maxwellgleichungen
  - Ohne (und mit) Materie werden die elektrischen und magnetischen Felder beschrieben, und wie sie zusammenhängen
- Können abgeleitet werden aus einem gemeinsamen Feld: Das Vektorpotential
  - Zentral für relativistische Darstellung
- Das Vektorpotential ist nicht eindeutig, aber die elektrischen und magnetischen Felder sind es

# Beispiel: Klassische Elektrodynamik

- Triumph der klassischen Physik im 19. Jahrhundert
- Formuliert in den Maxwellgleichungen
  - Ohne (und mit) Materie werden die elektrischen und magnetischen Felder beschrieben, und wie sie zusammenhängen
- Können abgeleitet werden aus einem gemeinsamen Feld: Das Vektorpotential
  - Zentral für relativistische Darstellung
- Das Vektorpotential ist nicht eindeutig, aber die elektrischen und magnetischen Felder sind es
  - Vektorpotential örtliche beliebig änderbar: Eichtheorie
  - Prototyp für Eichtheorien

# Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

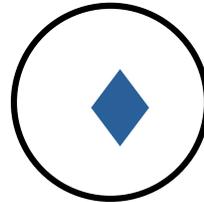


(Unendlich lange)  
stromdurchflossene Spule

Magnetfeld im Innern der Spule,  
aber nicht draussen

# Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

 Quelle

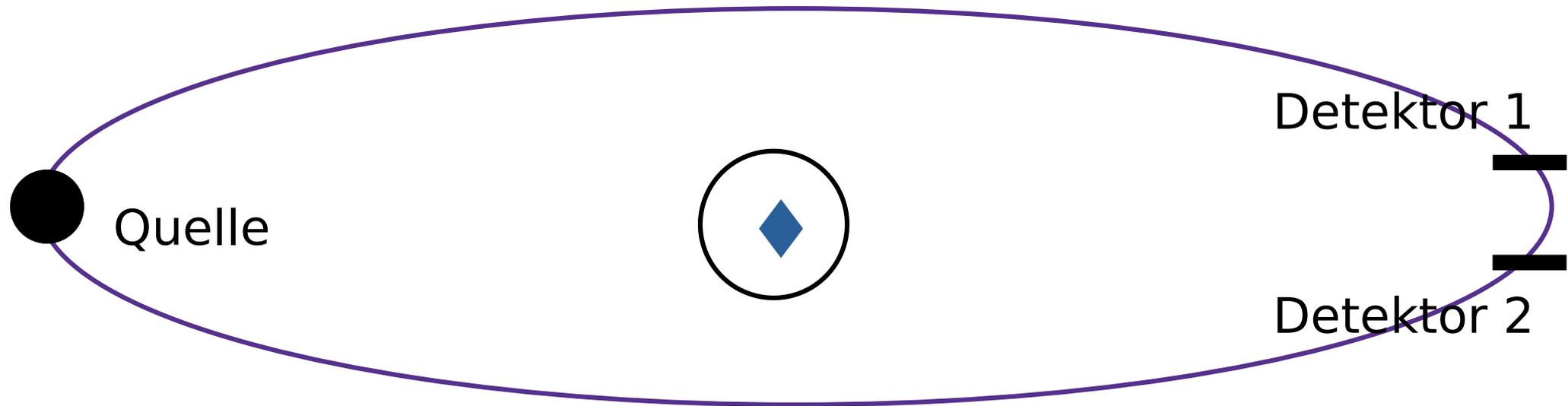


Detektor 1 

Detektor 2 

# Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

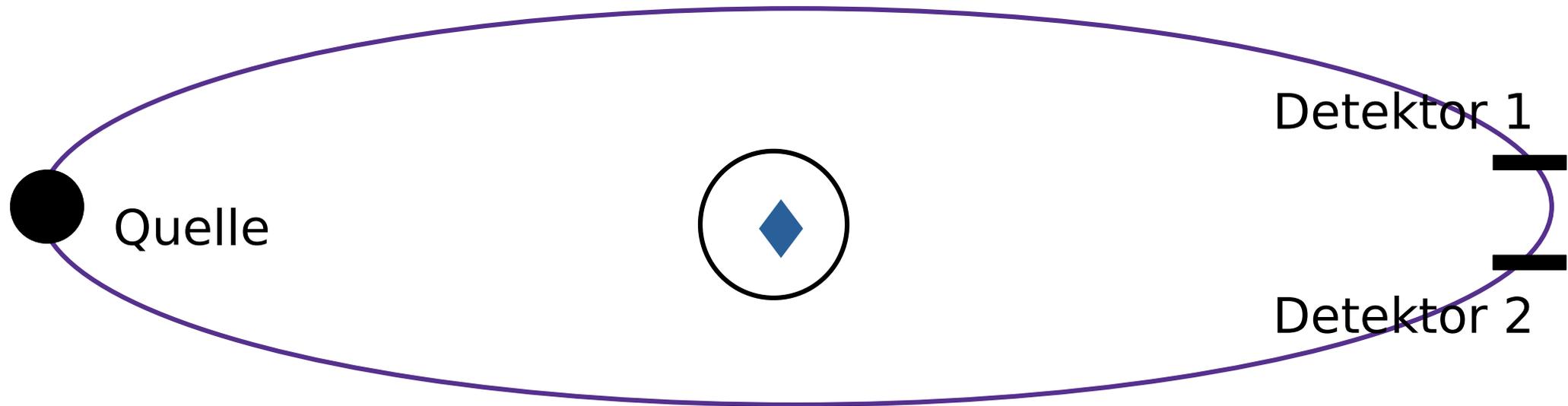
Bahn eines Elektrons



# Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

Bahn eines Elektrons

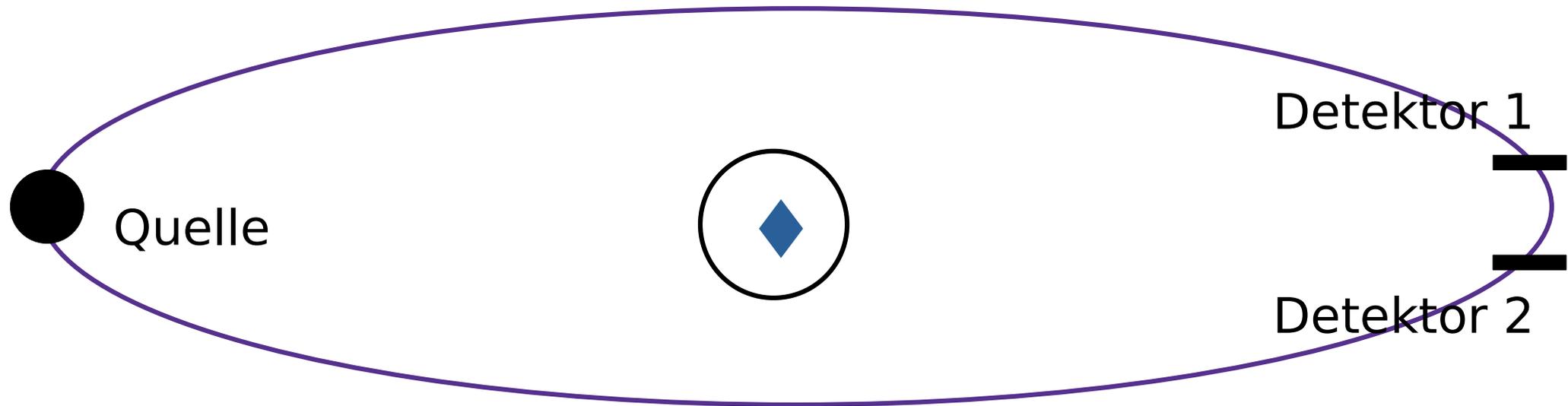
Klassisch wird das Magnetfeld ignoriert



Rate an Detektor 1 gleich Rate an Detektor 2

# Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

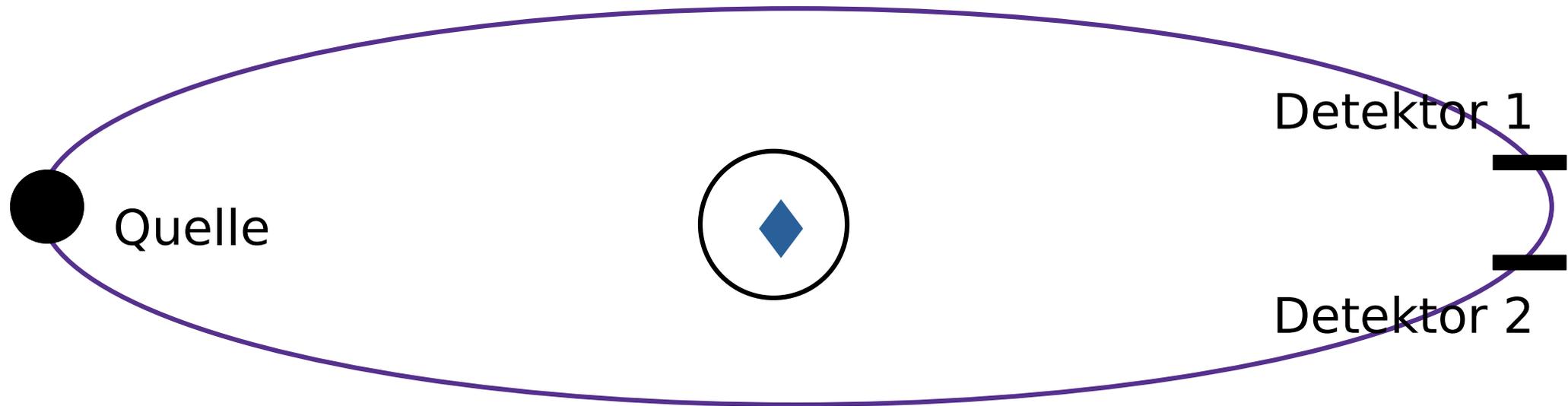
Bahn eines Elektrons  
Klassisch wird das Magnetfeld ignoriert  
Quantenmechanisch kommt es zu  
einer Selbstinterferenz



Rate an Detektor 1 gleich Rate an Detektor 2  
Rate an Detektor 1 **ungleich** Rate an Detektor 2

# Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

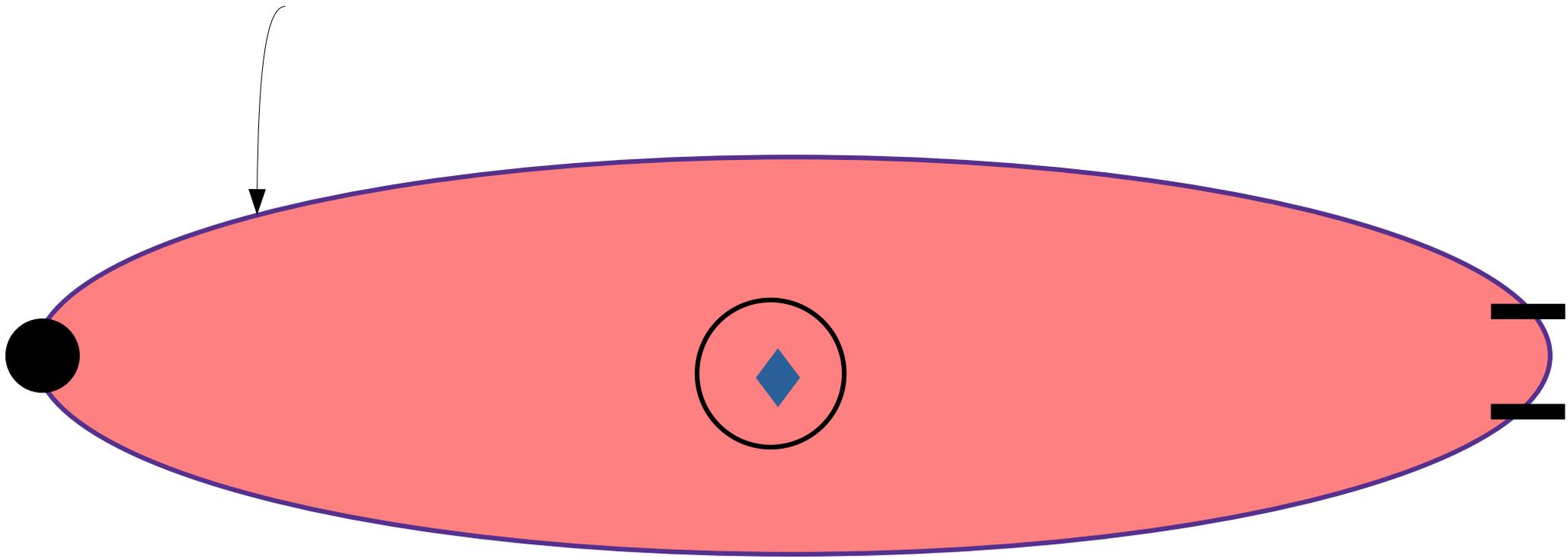
Bahn eines Elektrons  
Klassisch wird das Magnetfeld ignoriert  
Quantenmechanisch kommt es zu  
einer Selbstinterferenz



Rate an Detektor 1 gleich Rate an Detektor 2  
Rate an Detektor 1 **ungleich** Rate an Detektor 2  
Warum?

# Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

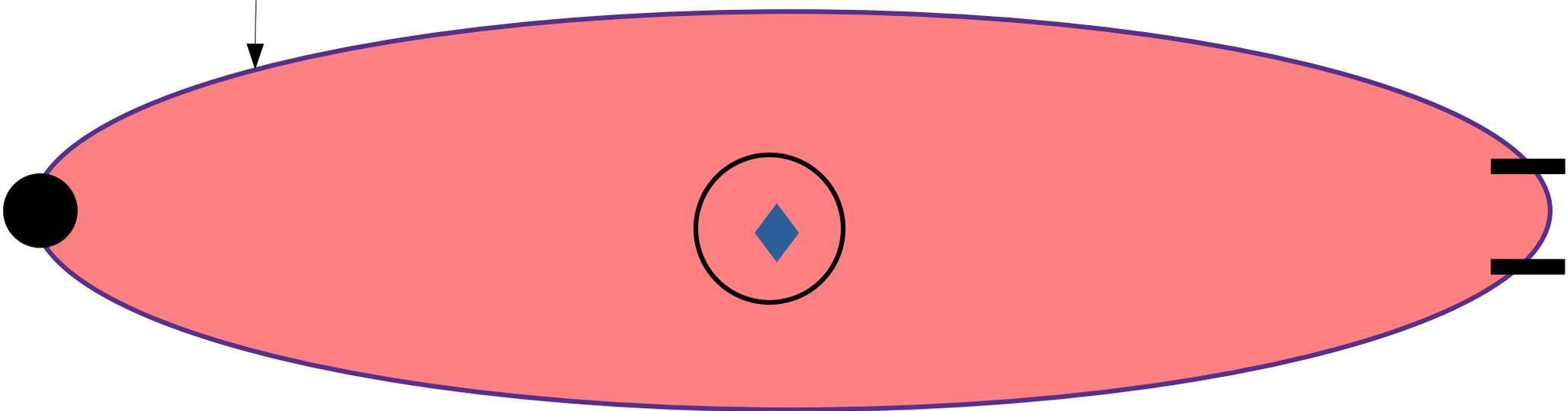
Vektorpotential überall von Null verschieden!  
Kann es das sein?



Rate an Detektor 1 **ungleich** Rate an Detektor 2  
Warum?

# Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

Vektorpotential überall von Null verschieden!  
Kann es das sein?  
Aharnov & Bohm 1950er: Ja!



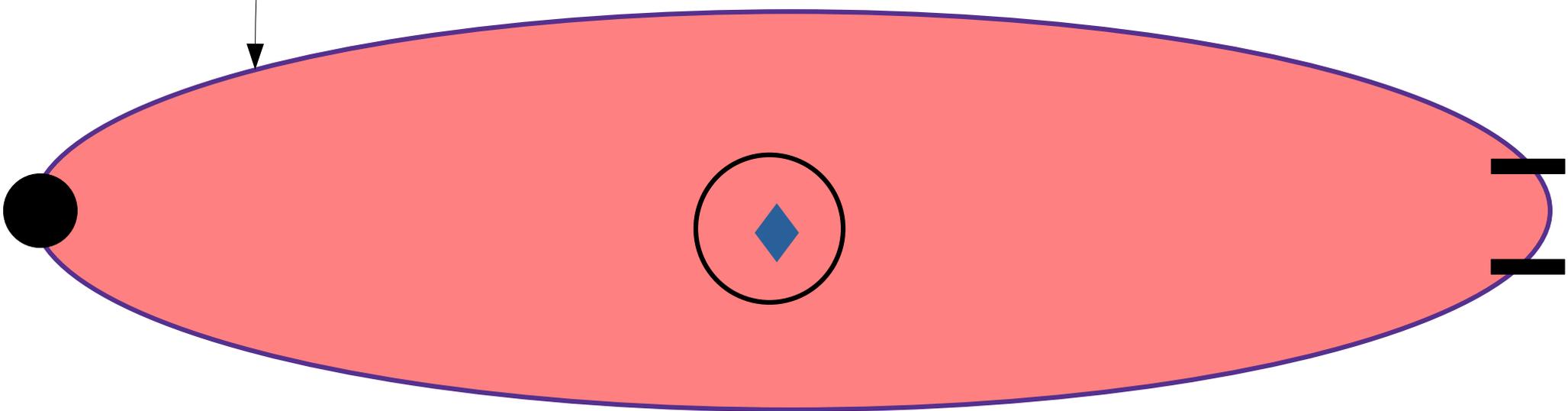
Rate an Detektor 1 **ungleich** Rate an Detektor 2  
Warum?

# Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

Vektorpotential überall von Null verschieden!  
Kann es das sein?

Aharnov & Bohm 1950er: Ja!

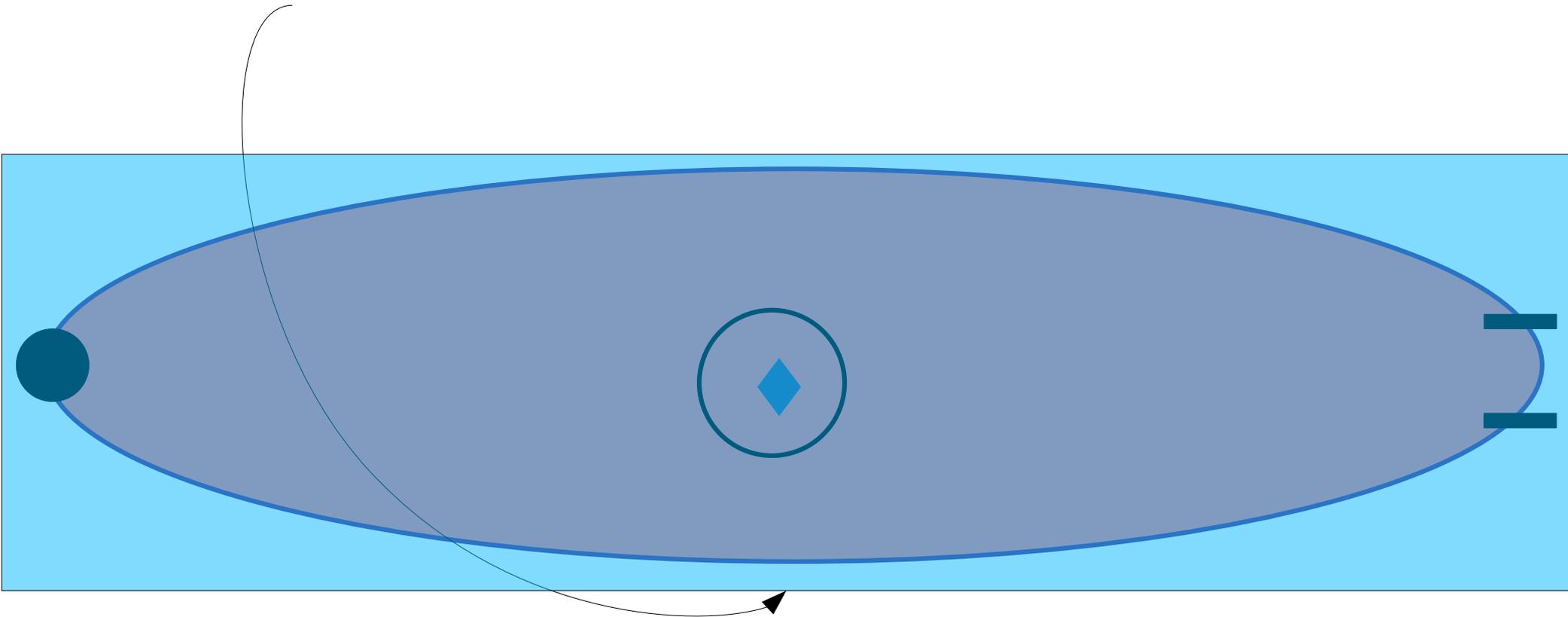
Wightmann & Strocchi 1970er: Aber Eichfeld,  
kann keinen Effekt haben! Was dann?



Rate an Detektor 1 **ungleich** Rate an Detektor 2  
Warum?

# Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

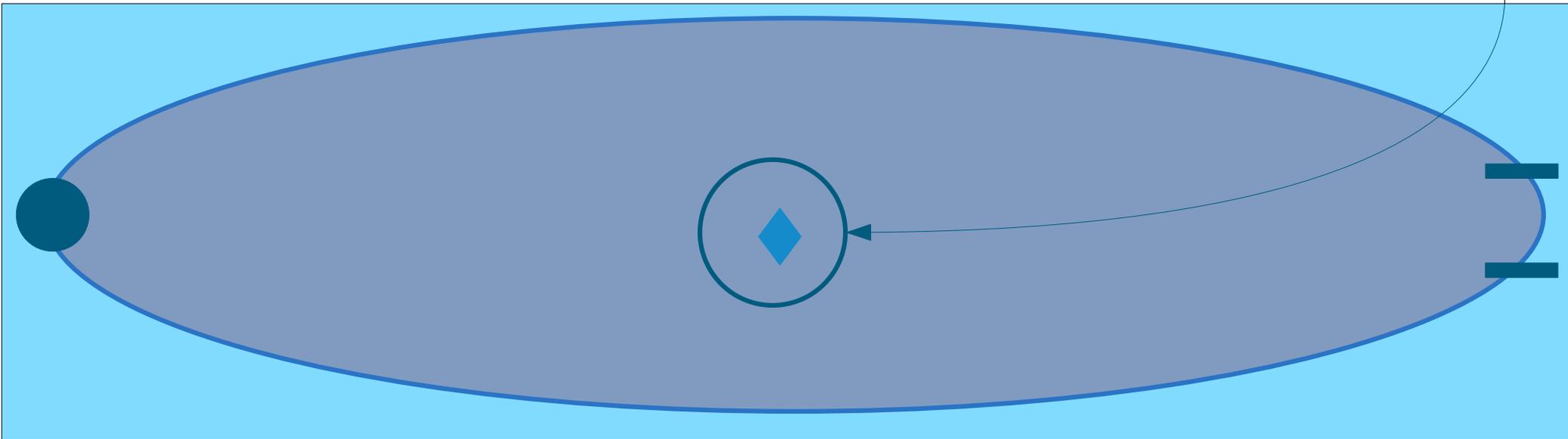
Quantenphysik: Das Elektron hat eine Wellenfunktion – die ist nicht lokal und überall



Rate an Detektor 1 **ungleich** Rate an Detektor 2  
Warum?

# Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

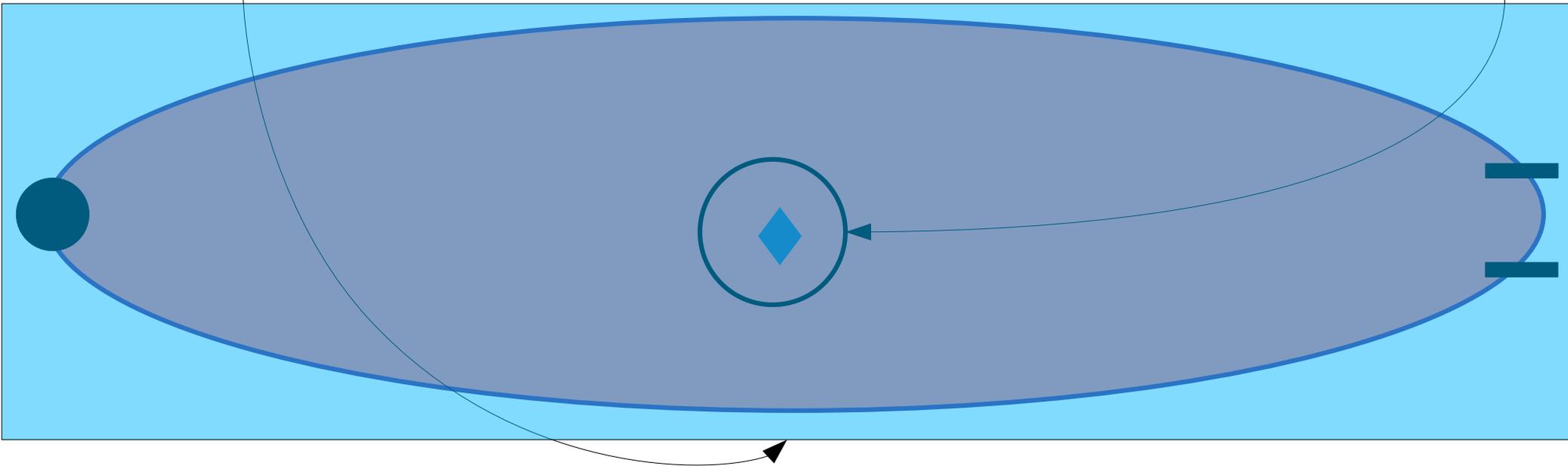
Wechselwirkung zwischen der Wellenfunktion und der Spule auf der Oberfläche der Spule - eichinvariant!



Rate an Detektor 1 **ungleich** Rate an Detektor 2  
Warum?

# Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

Quantenphysik: Das Elektron hat eine Wellenfunktion – die ist nicht lokal und überall Wechselwirkung zwischen der Wellenfunktion und der Spule auf der Oberfläche der Spule – eichinvariant!



Rate an Detektor 1 **ungleich** Rate an Detektor 2  
Warum?

Lektion: Eichtheorien sind nicht trivial zu interpretieren.

**(Elementar)Teilchen**

**(Elementar)Teilchen**

-

**Was sind die Teilchen die  
wir sehen?**

**(Elementar)Teilchen**

-

**Was sind die Teilchen die  
wir sehen?**

Erstmal das Standardbild...

dann das mit der Perspektive über Symmetrien

# Die Struktur der Materie

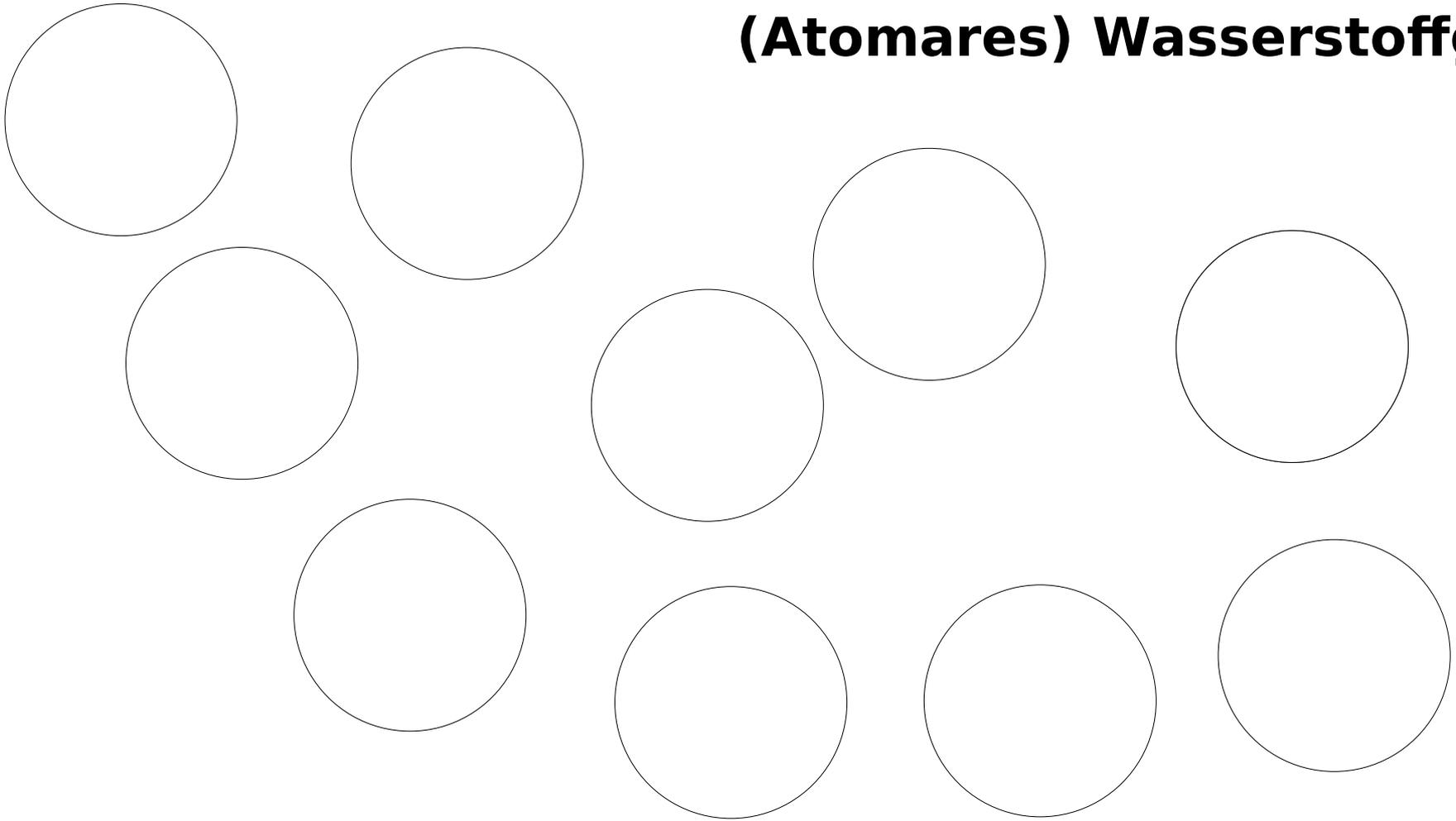
- Gewöhnliche Materie besteht aus Atomen

# Die Struktur der Materie

- Gewöhnliche Materie besteht aus Atomen
  - Die Moleküle, Kristalle, Zellen...bilden

# Die Struktur der Materie

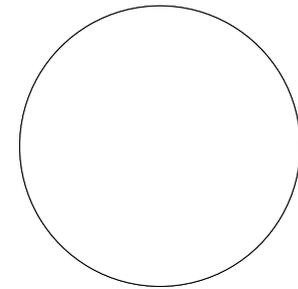
**(Atomares) Wasserstoffgas**



- Gewöhnliche Materie besteht aus Atomen
  - Die Moleküle, Kristalle, Zellen...bilden

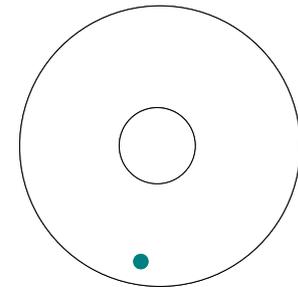
# Die Struktur der Materie

**Wasserstoffatom**



# Die Struktur der Materie

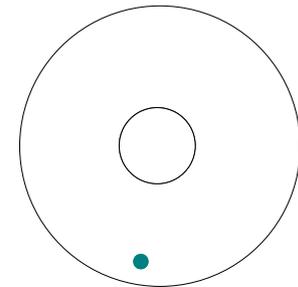
## Wasserstoffatom



- Ein Atom ist ein Bindungszustand eines **Elektrons** und eines Kernes
  - Abgeleitet aus Streuexperimenten

# Die Struktur der Materie

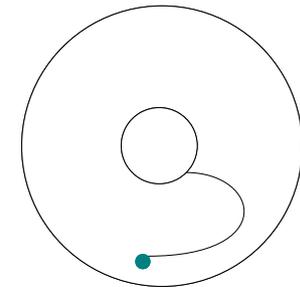
## Wasserstoffatom



- Ein Atom ist ein Bindungszustand eines **Elektrons** und eines Kernes
  - Abgeleitet aus Streuexperimenten
  - Kern ist 100000-mal kleiner als das Atom

# Die Struktur der Materie

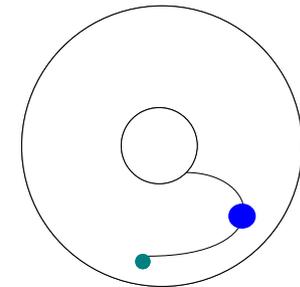
## Wasserstoffatom



- Ein Atom ist ein Bindungszustand eines **Elektrons** und eines Kernes
  - Abgeleitet aus Streuexperimenten
  - Kern ist 100000-mal kleiner als das Atom
- Zusammenhalt durch elektromagnetische Kräfte

# Die Struktur der Materie

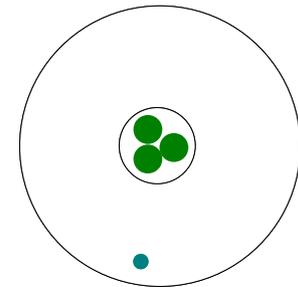
## Wasserstoffatom



- Ein Atom ist ein Bindungszustand eines **Elektrons** und eines Kernes
  - Abgeleitet aus Streuexperimenten
  - Kern ist 100000-mal kleiner als das Atom
- Zusammenhalt durch elektromagnetische Kräfte
  - Wirken durch den Austausch von **Photonen**

# Die Struktur der Materie

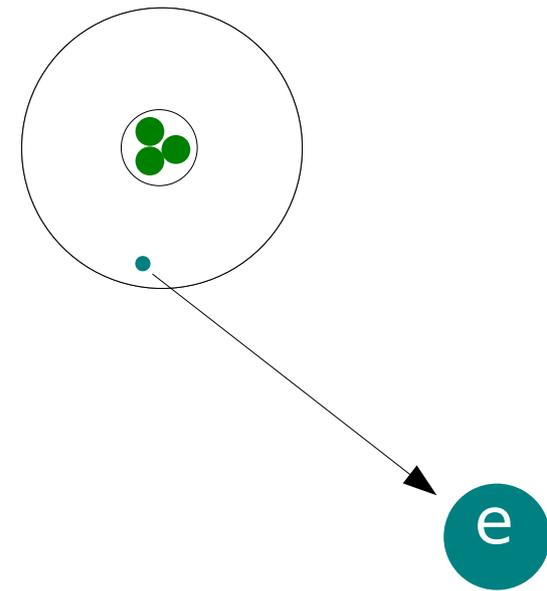
## Wasserstoffatom



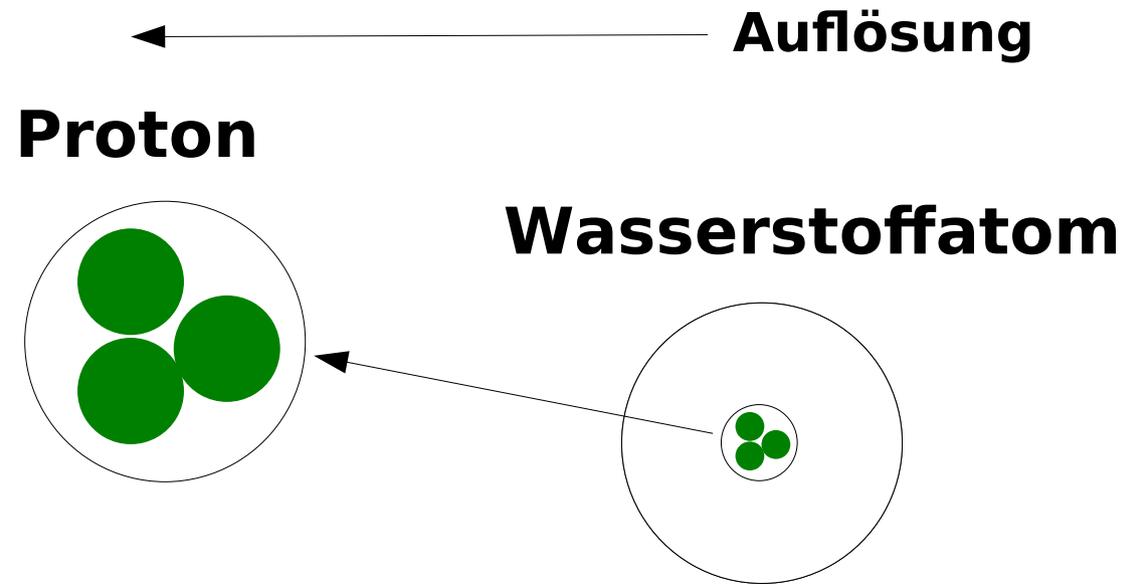
- Streuexperimente am Kern zeigen ein ähnliches Bild wie beim Atom selbst
  - Der Kern muss auch eine Struktur haben

# Die Struktur der Materie

## Wasserstoffatom



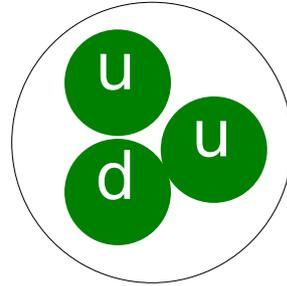
# Die Struktur der Materie



# Die Struktur der Materie



**Proton**

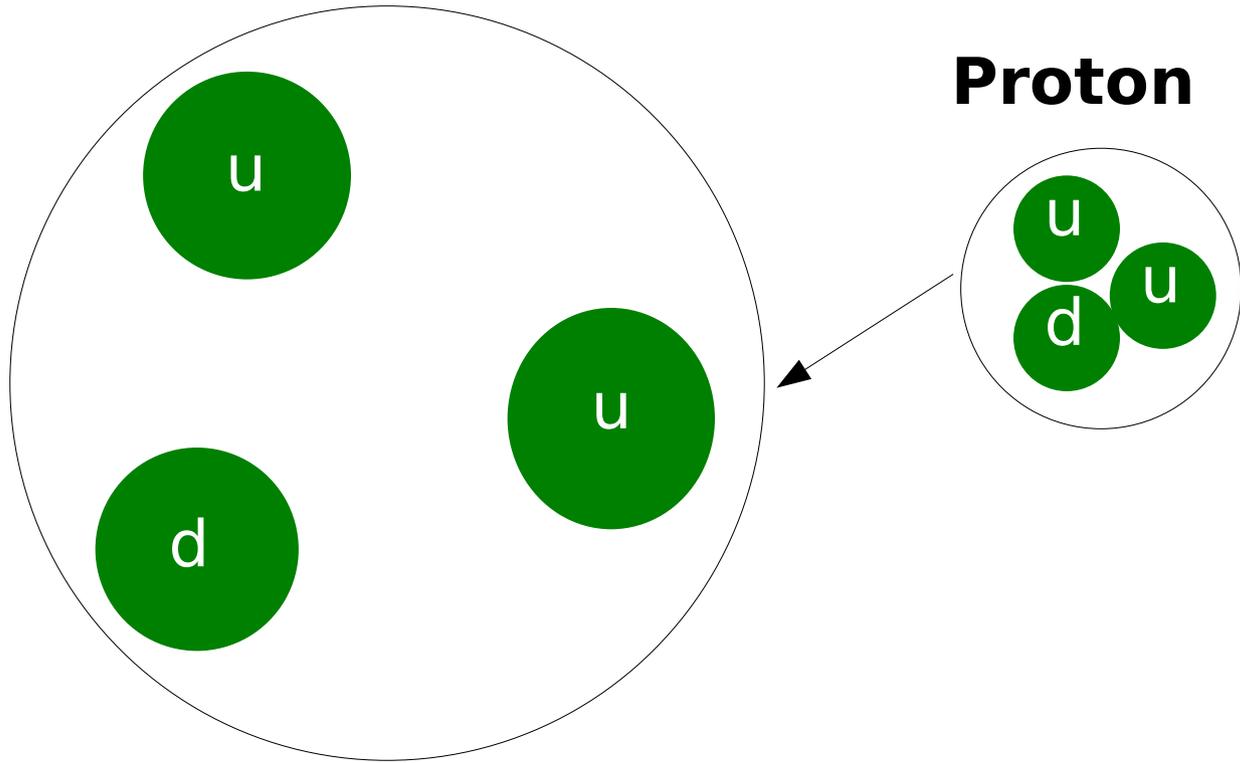


- Proton besteht aus drei Teilchen: Ein Hadron
  - **Drei Quarks**
  - **Zwei Arten: up und down quarks**



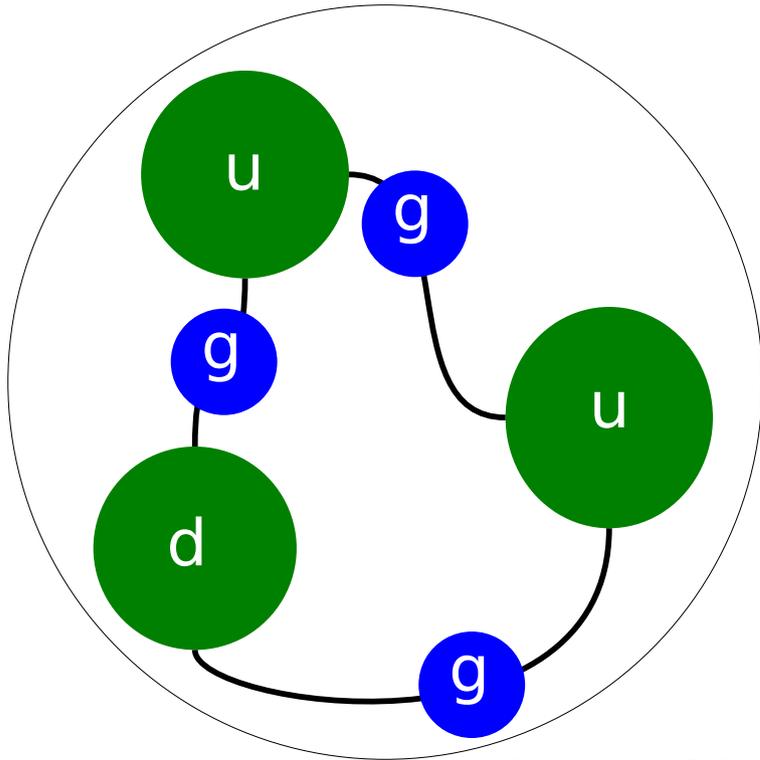
# Die Struktur der Materie

Auflösung



# Die Struktur der Materie

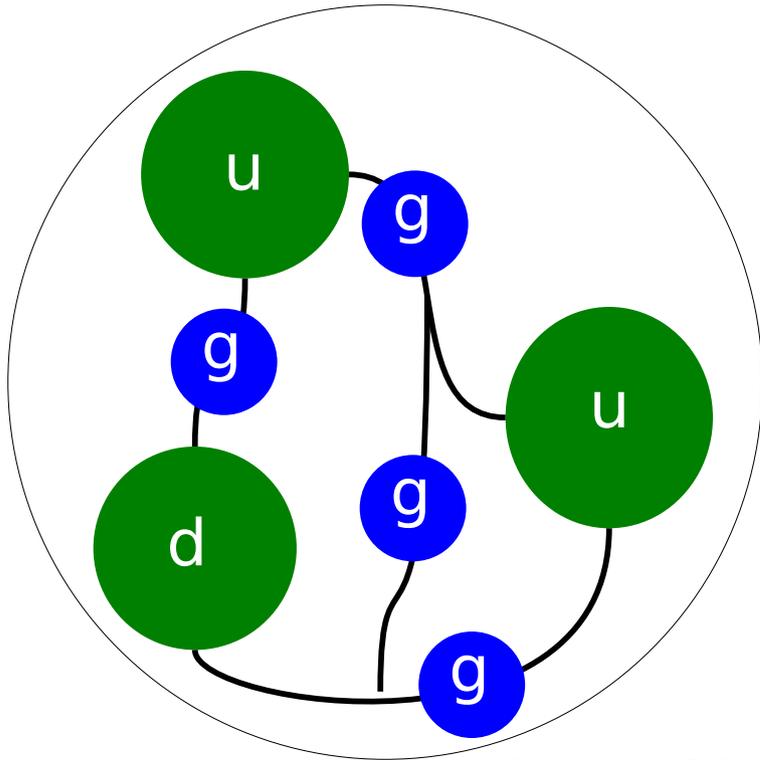
← Auflösung



- Quarks tauschen Gluonen aus
  - Masselose Teilchen, wie Photonen
  - Übertragen eine neue Kraft, wie Photonen die elektromagnetische tragen
  - Kraft ist viel stärker: Starke (Kern)kraft

# Die Struktur der Materie

Auflösung



- Quarks tauschen Gluonen aus
  - Masselose Teilchen, wie Photonen
  - Übertragen eine neue Kraft, wie Photonen die elektromagnetische tragen
  - Kraft ist viel stärker: Starke (Kern)kraft
  - Gluonen wechselwirken miteinander – Photonen nicht

# Teilchen

u

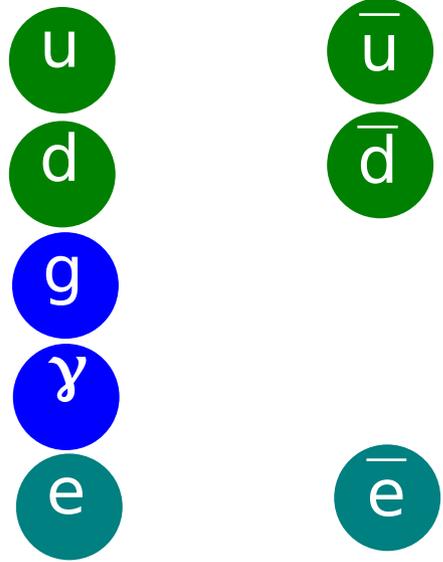
d

g

$\gamma$

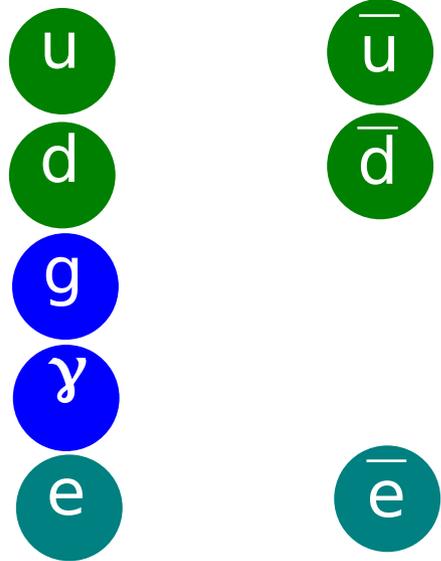
e

# Teilchen - und Antiteilchen



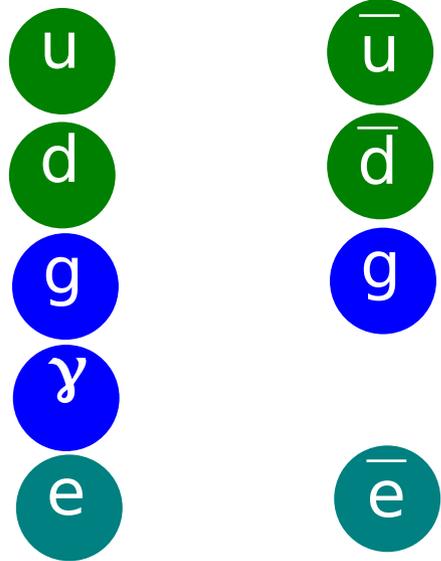
- Zu jedem geladenen Teilchen gibt es ein umgekehrt geladenes Antiteilchen: Antimaterie
  - Sonst gleiche Eigenschaften

# Teilchen - und Antiteilchen



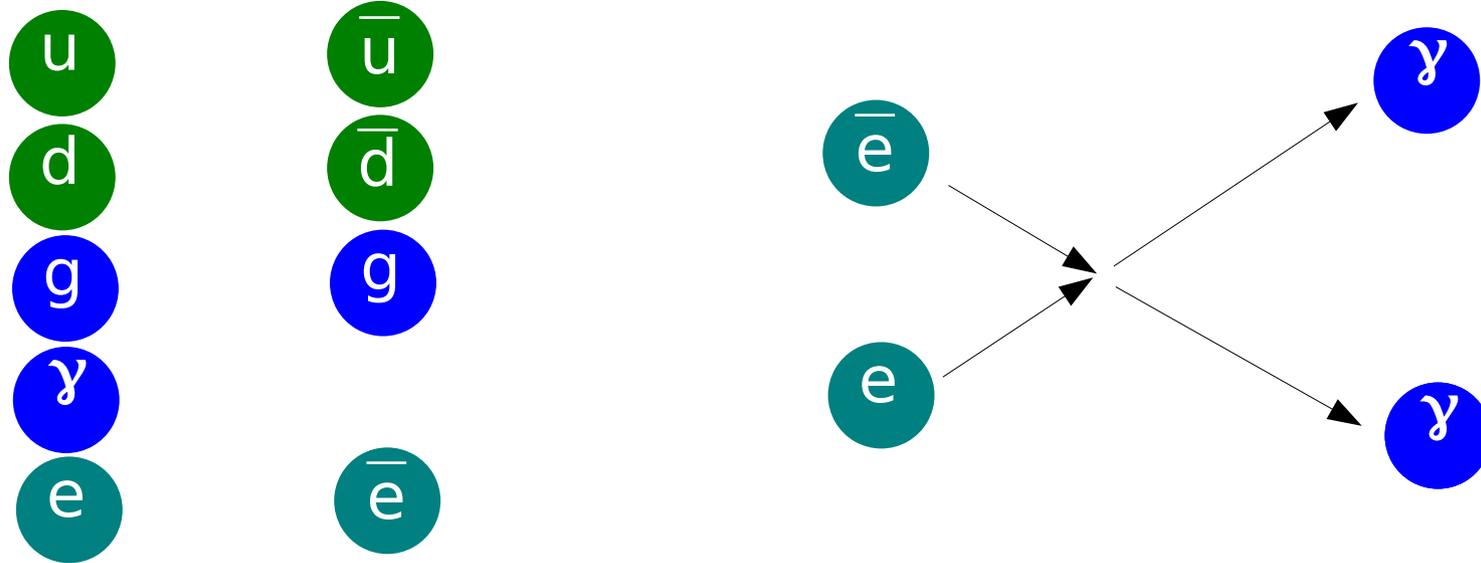
- Zu jedem geladenen Teilchen gibt es ein umgekehrt geladenes Antiteilchen: Antimaterie
  - Sonst gleiche Eigenschaften
  - Photon ist ungeladen

# Teilchen - und Antiteilchen



- Zu jedem geladenen Teilchen gibt es ein umgekehrt geladenes Antiteilchen: Antimaterie
  - Sonst gleiche Eigenschaften
  - Photon ist ungeladen
  - Gluon ist kompliziert, weil es eine mehrkwürdige Art von Ladung trägt, passt aber ins Schema

# Teilchen - und Antiteilchen



- Zu jedem geladenen Teilchen gibt es ein umgekehrt geladenes Antiteilchen: Antimaterie
  - Sonst gleiche Eigenschaften
  - Photon ist ungeladen
  - Gluon ist kompliziert, weil es eine mehrkwürdige Art von Ladung trägt, passt aber ins Schema
  - Materie und Antimaterie zerstören sich gegenseitig

# Teilchen - und Antiteilchen mit Spin

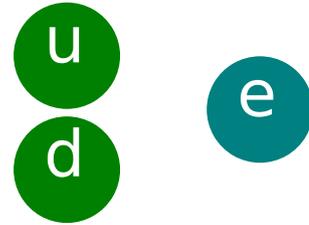


- Teilchen haben außer (elektrischer/starker u.ä.) Ladung einen Spin
  - Ganz vereinfacht: Drehimpuls eines punktförmigen Objektes

# Teilchen - und Antiteilchen mit Spin



Fermionen

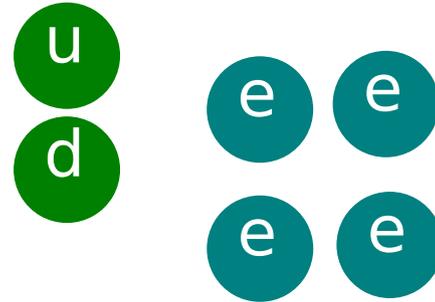


- Teilchen haben außer (elektrischer/starker u.ä.) Ladung einen Spin
  - Ganz vereinfacht: Drehimpuls eines punktförmigen Objektes
  - Fermionen: Halbzahliger Spin

# Teilchen - und Antiteilchen mit Spin



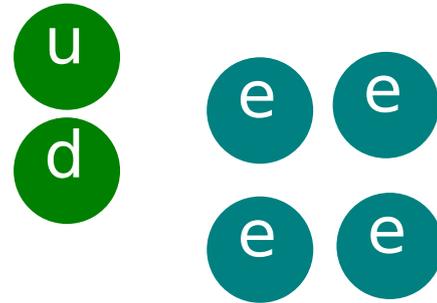
Fermionen



- Teilchen haben außer (elektrischer/starker u.ä.) Ladung einen Spin
  - Ganz vereinfacht: Drehimpuls eines punktförmigen Objektes
  - Fermionen: Halbzahliger Spin, unterliegen dem Pauliprinzip

# Teilchen - und Antiteilchen mit Spin

Fermionen



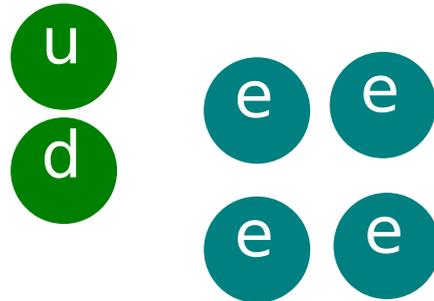
Bosonen



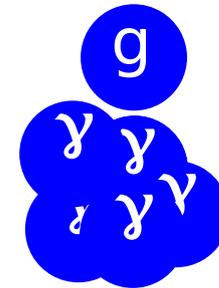
- Teilchen haben außer (elektrischer/starker u.ä.) Ladung einen Spin
  - Ganz vereinfacht: Drehimpuls eines punktförmigen Objektes
  - Fermionen: Halbzahliger Spin, unterliegen dem Pauliprinzip
  - Bosonen: Ganzzahliger Spin

# Teilchen - und Antiteilchen mit Spin

Fermionen



Bosonen



- Teilchen haben außer (elektrischer/starker u.ä.) Ladung einen Spin
  - Ganz vereinfacht: Drehimpuls eines punktförmigen Objektes
  - Fermionen: Halbzahliger Spin, unterliegen dem Pauliprinzip
  - Bosonen: Ganzzahliger Spin, können beliebig gestapelt werden

# Sektoren

u

d

g

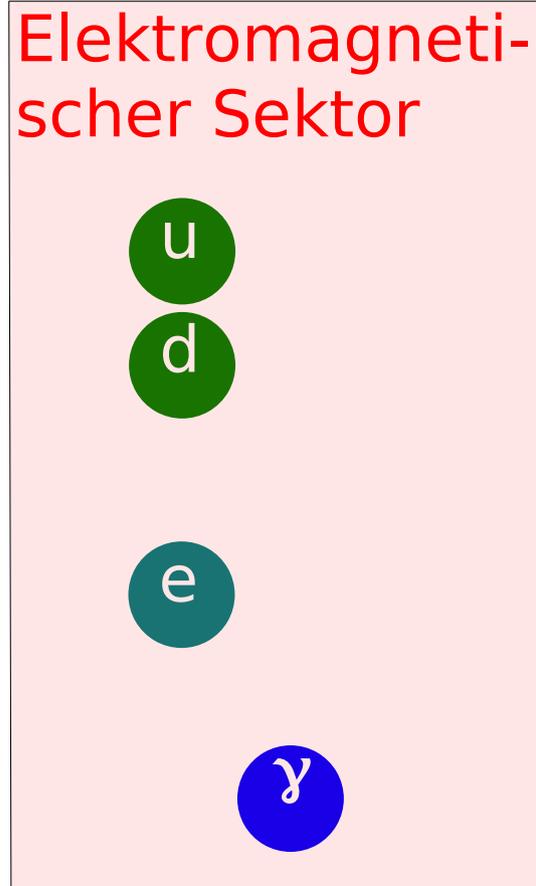
$\gamma$

e

- Gruppierung der Teilchen nach Kräften

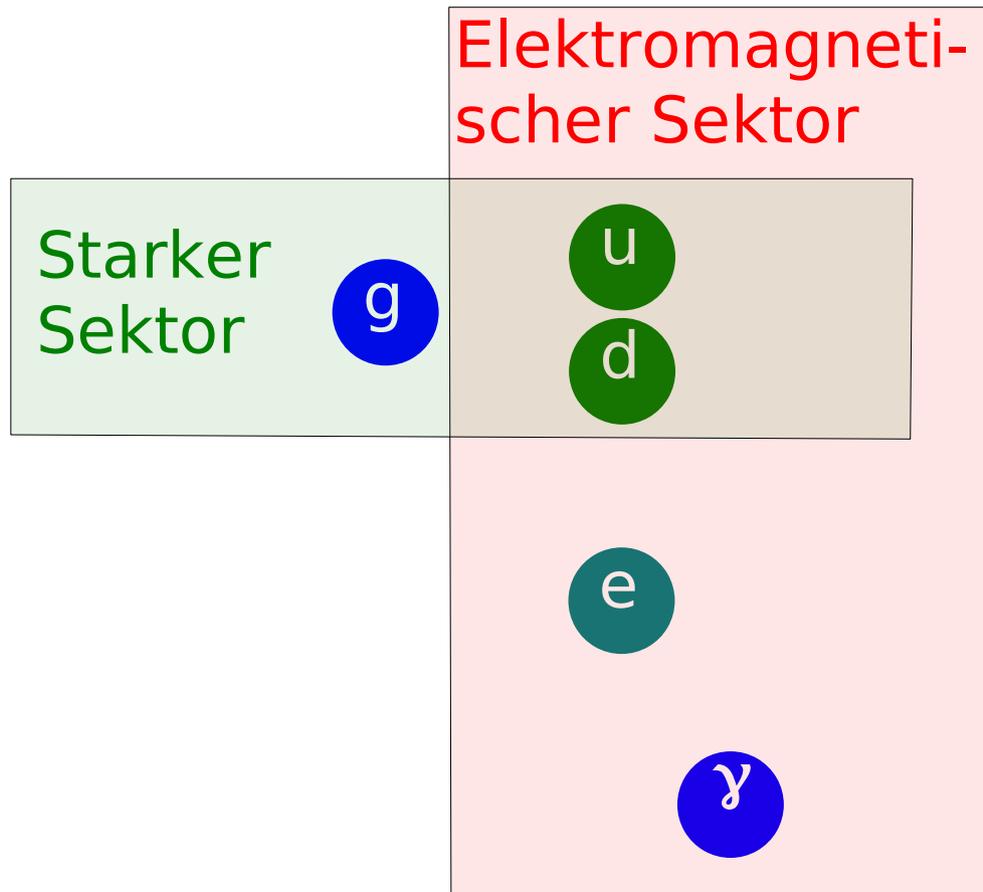
# Sektoren

g



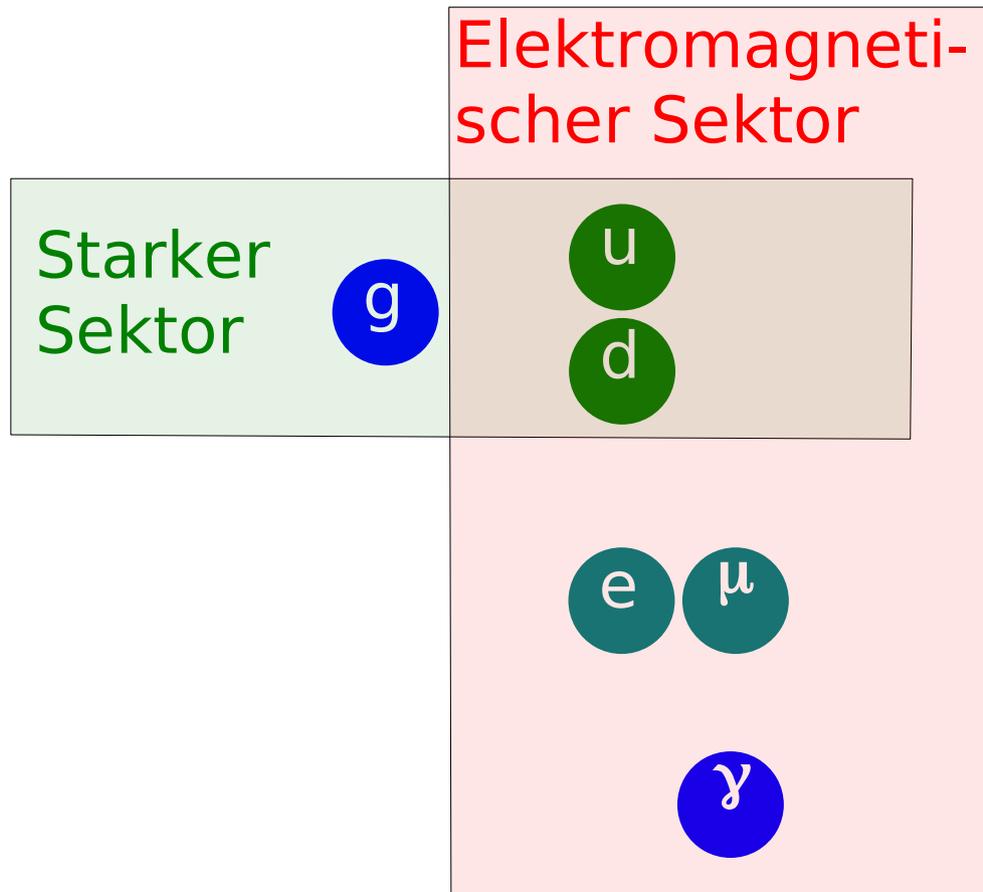
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)

# Sektoren



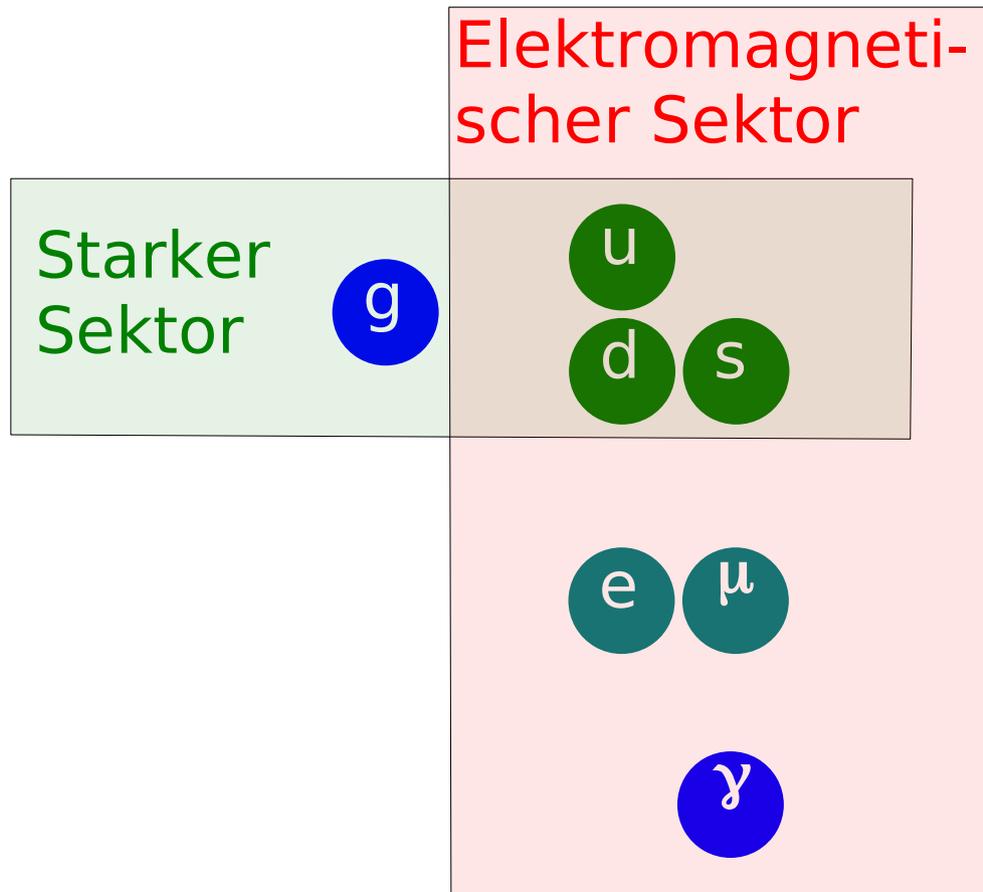
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)

# Sektoren



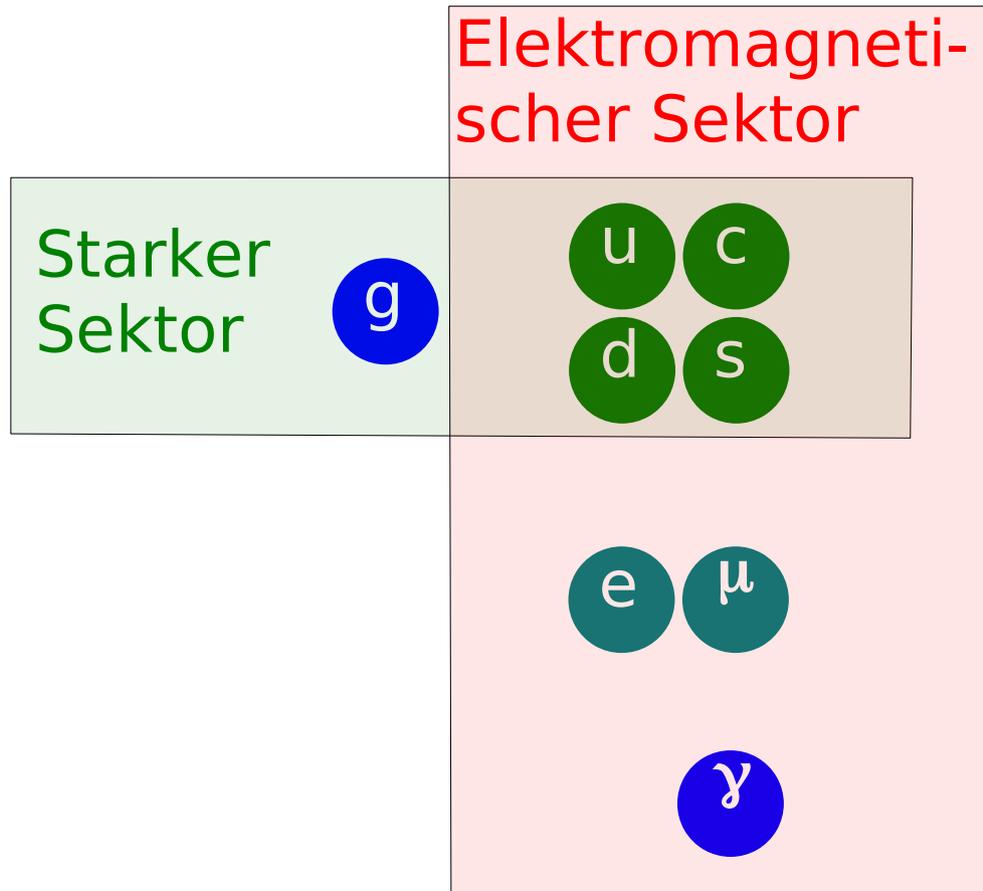
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)

# Sektoren



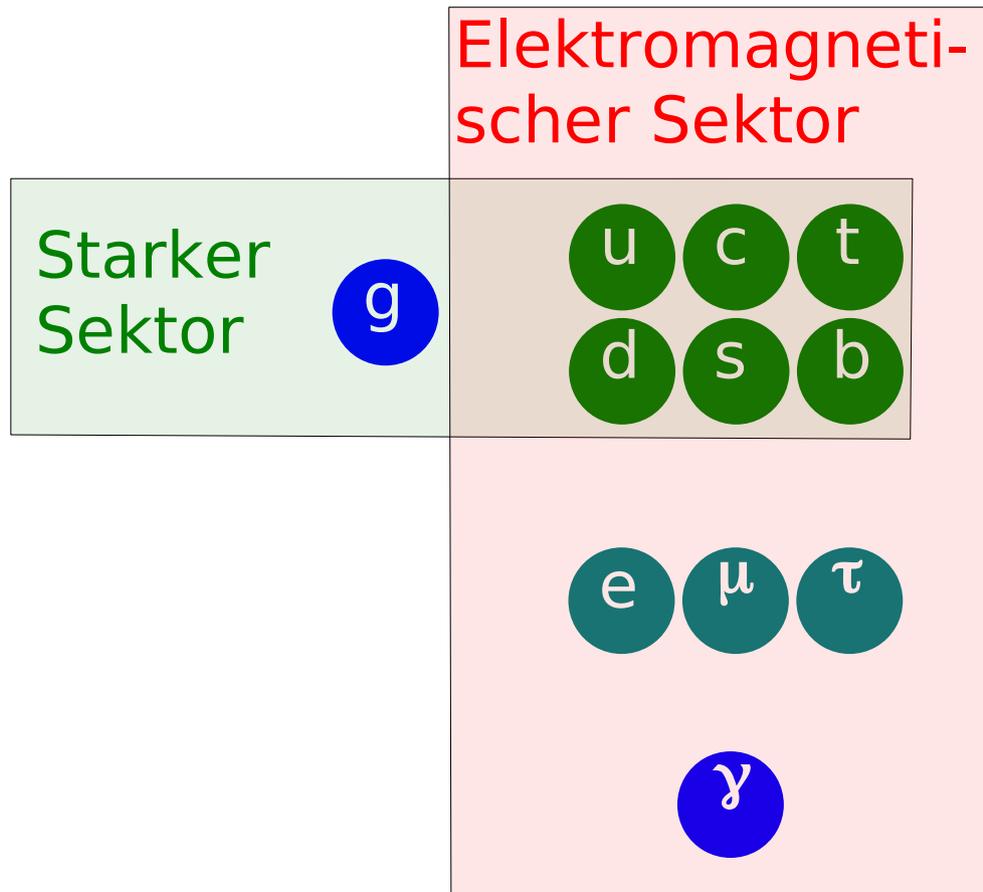
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)

# Sektoren



- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)

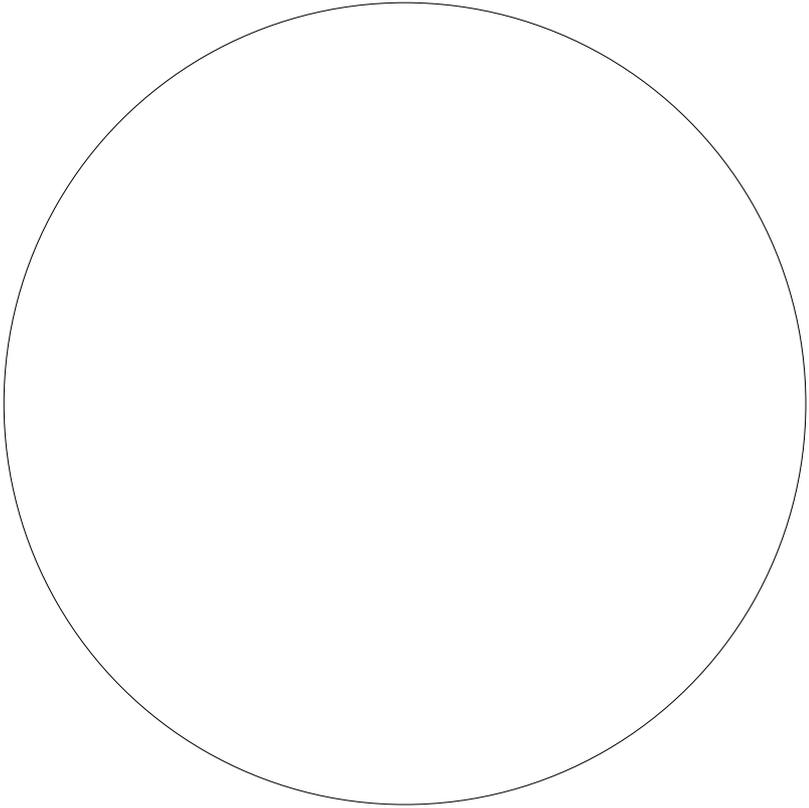
# Sektoren



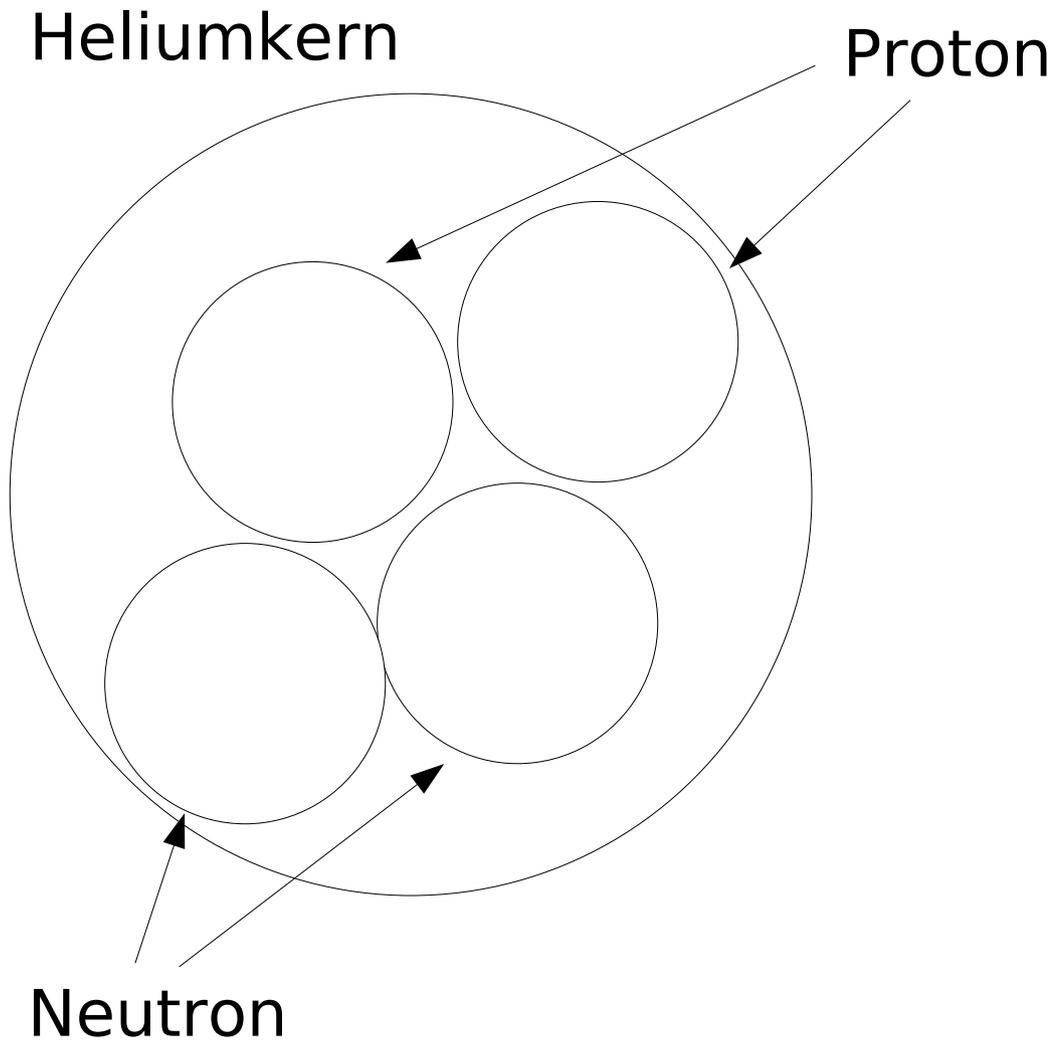
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)

# Neutron

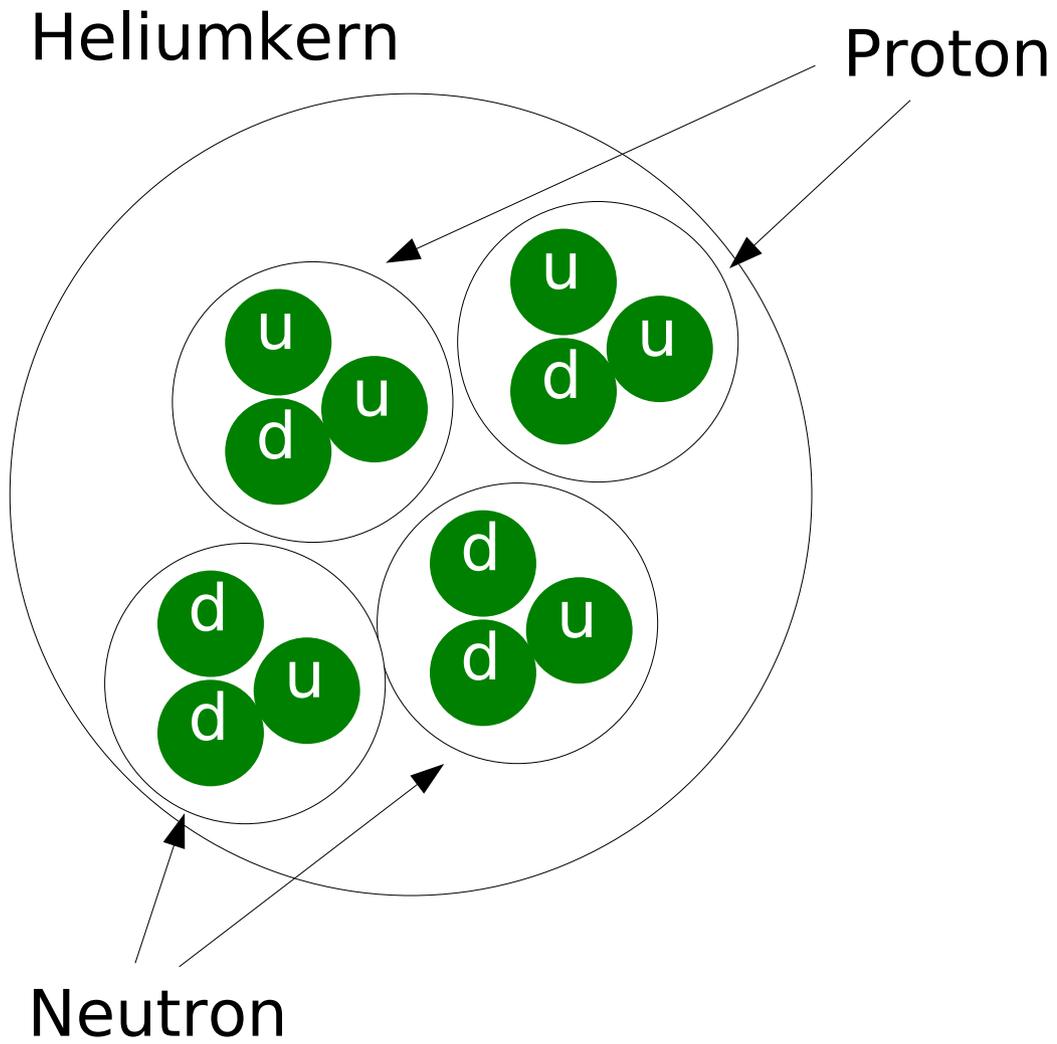
Heliumkern



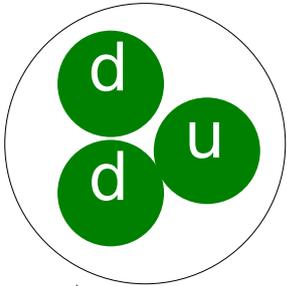
# Neutron



# Neutron

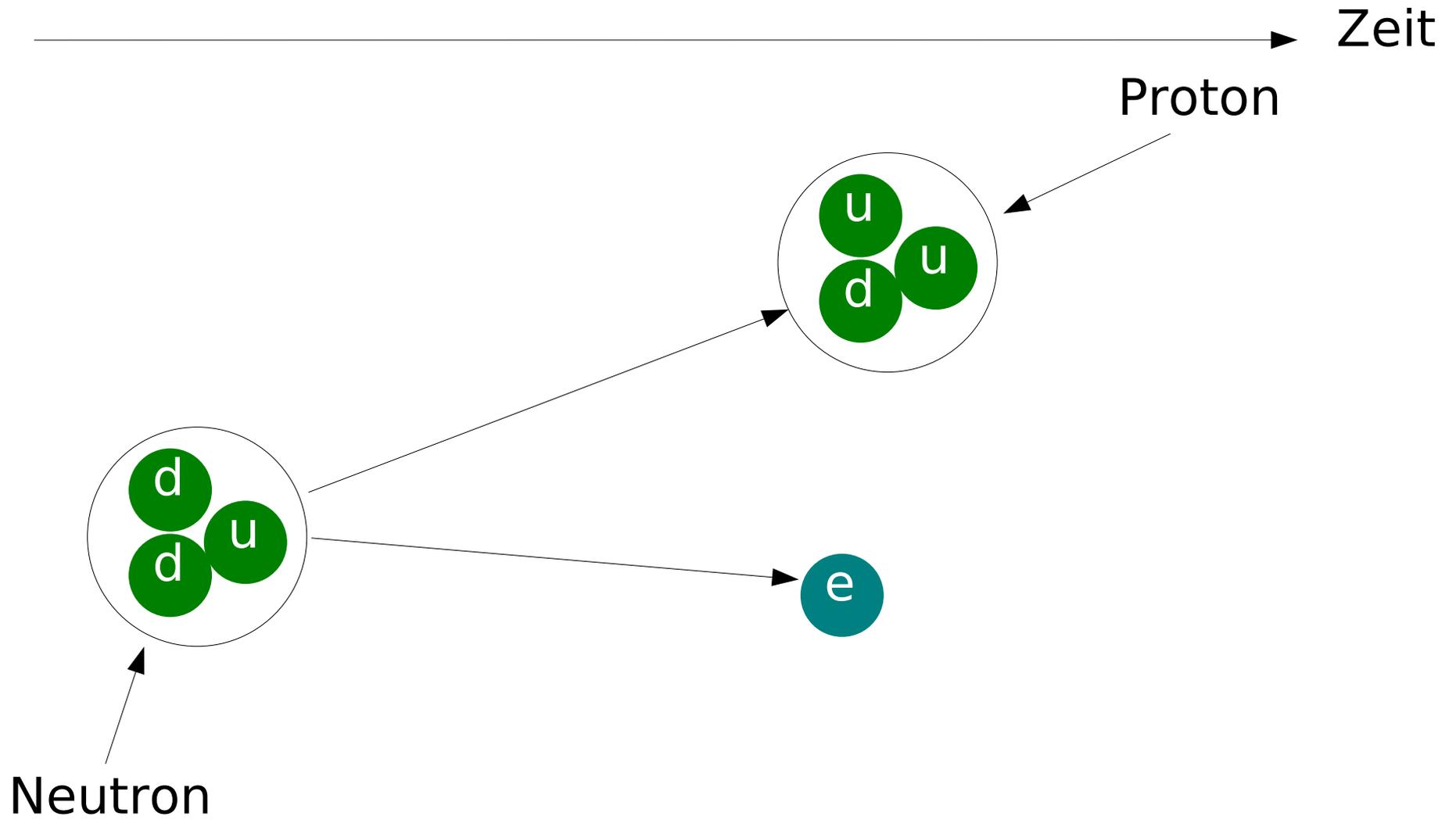


# Neutron

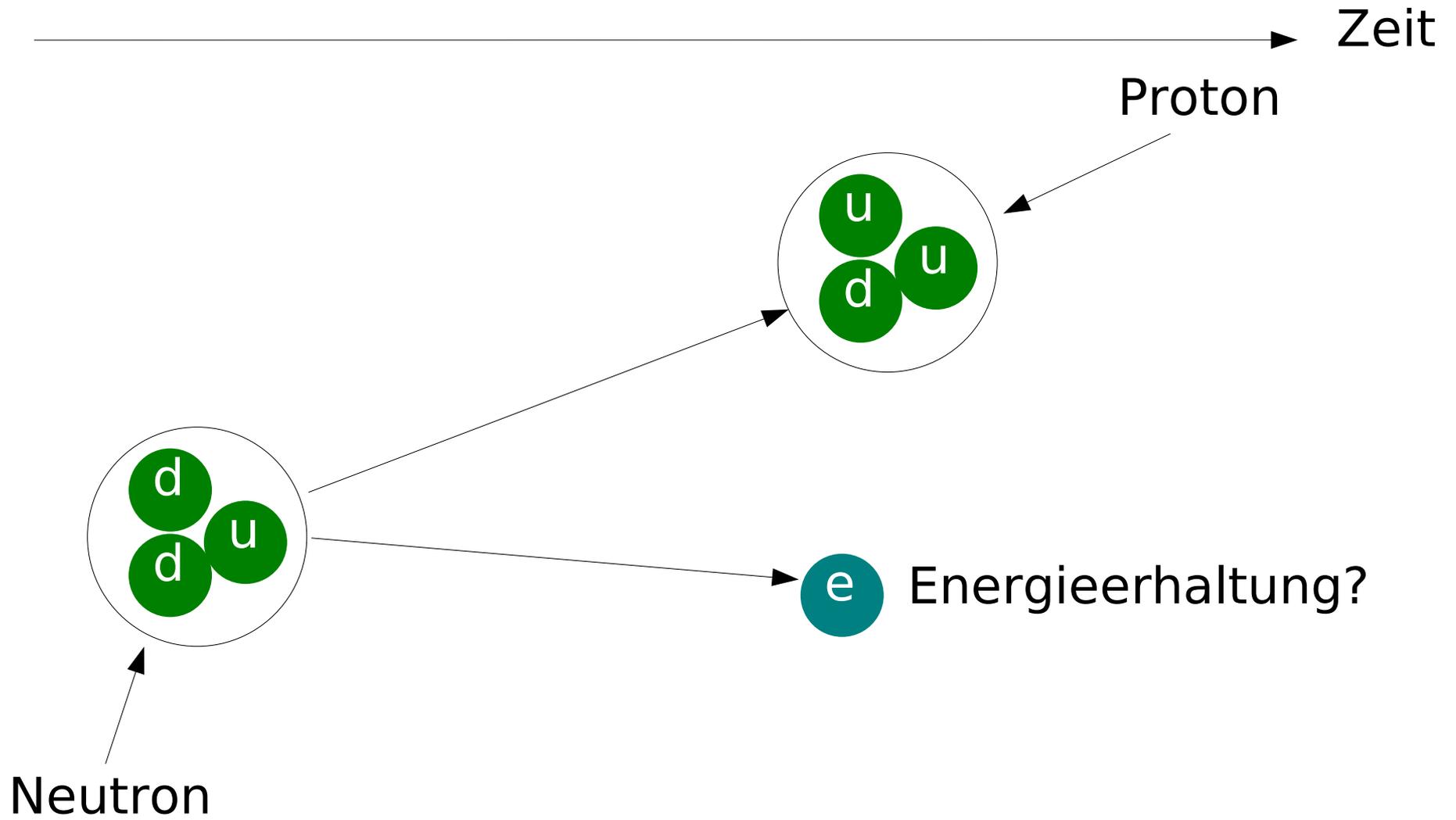


Neutron

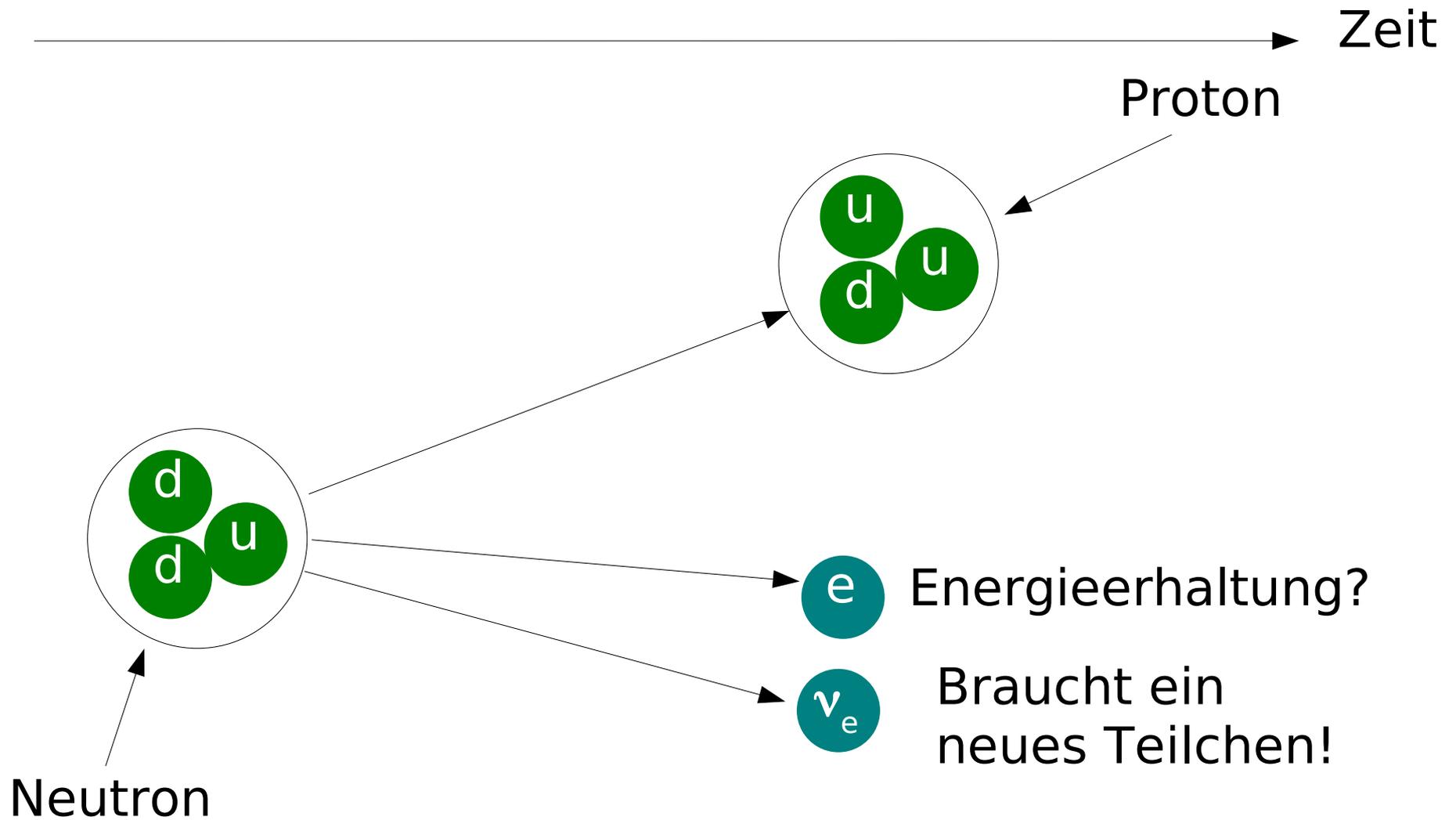
# Neutron



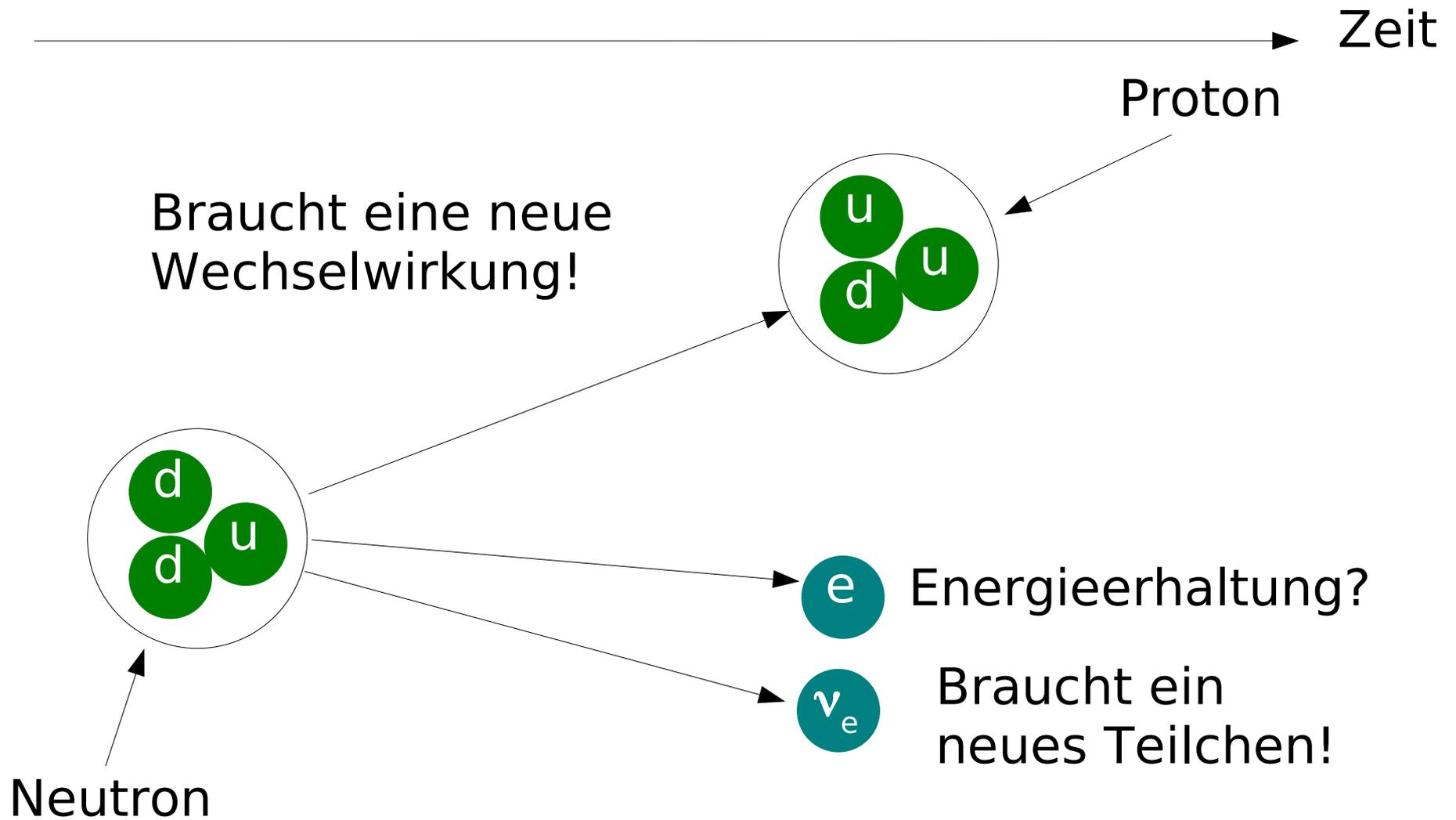
# Neutron



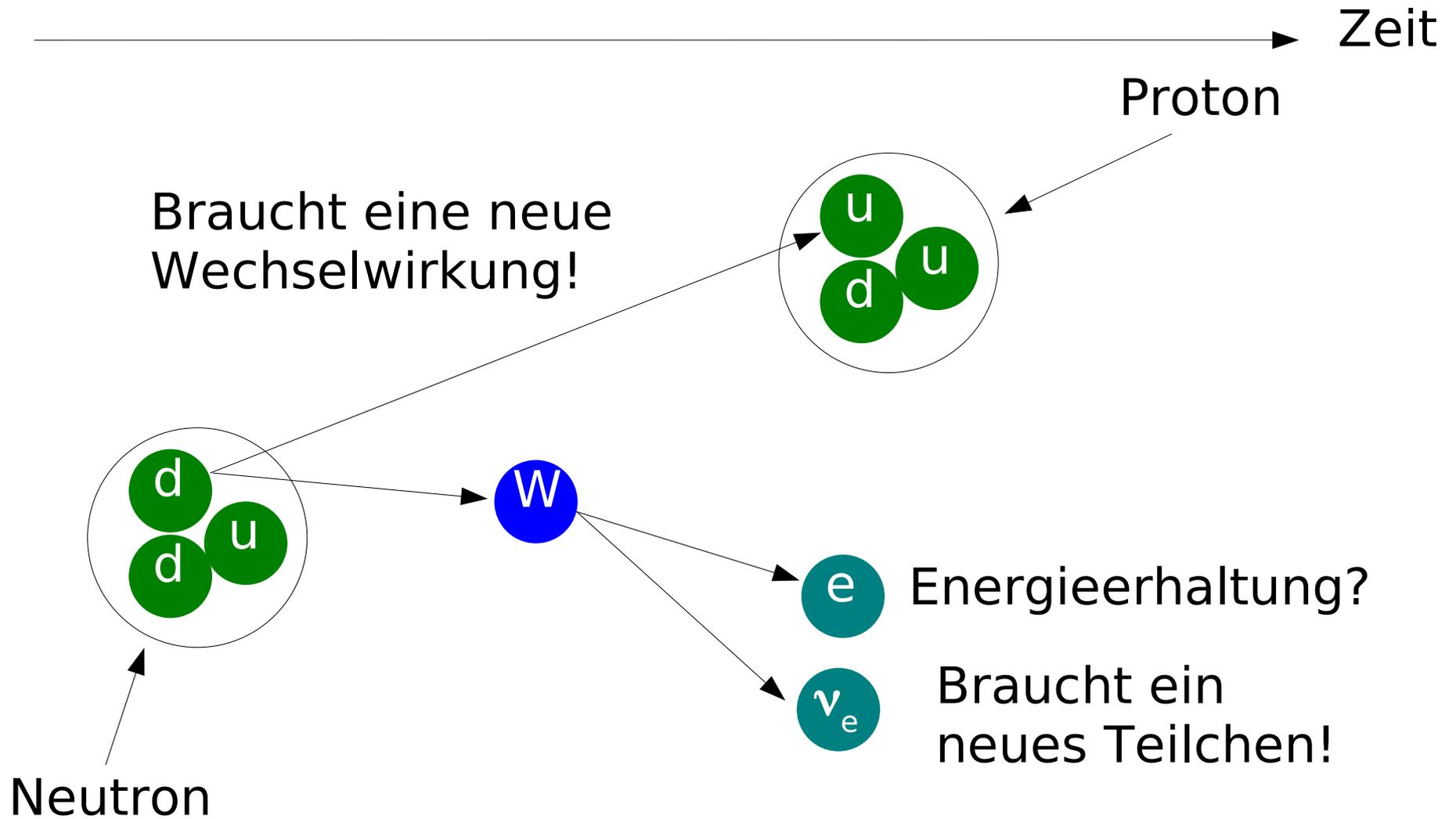
# Neutron



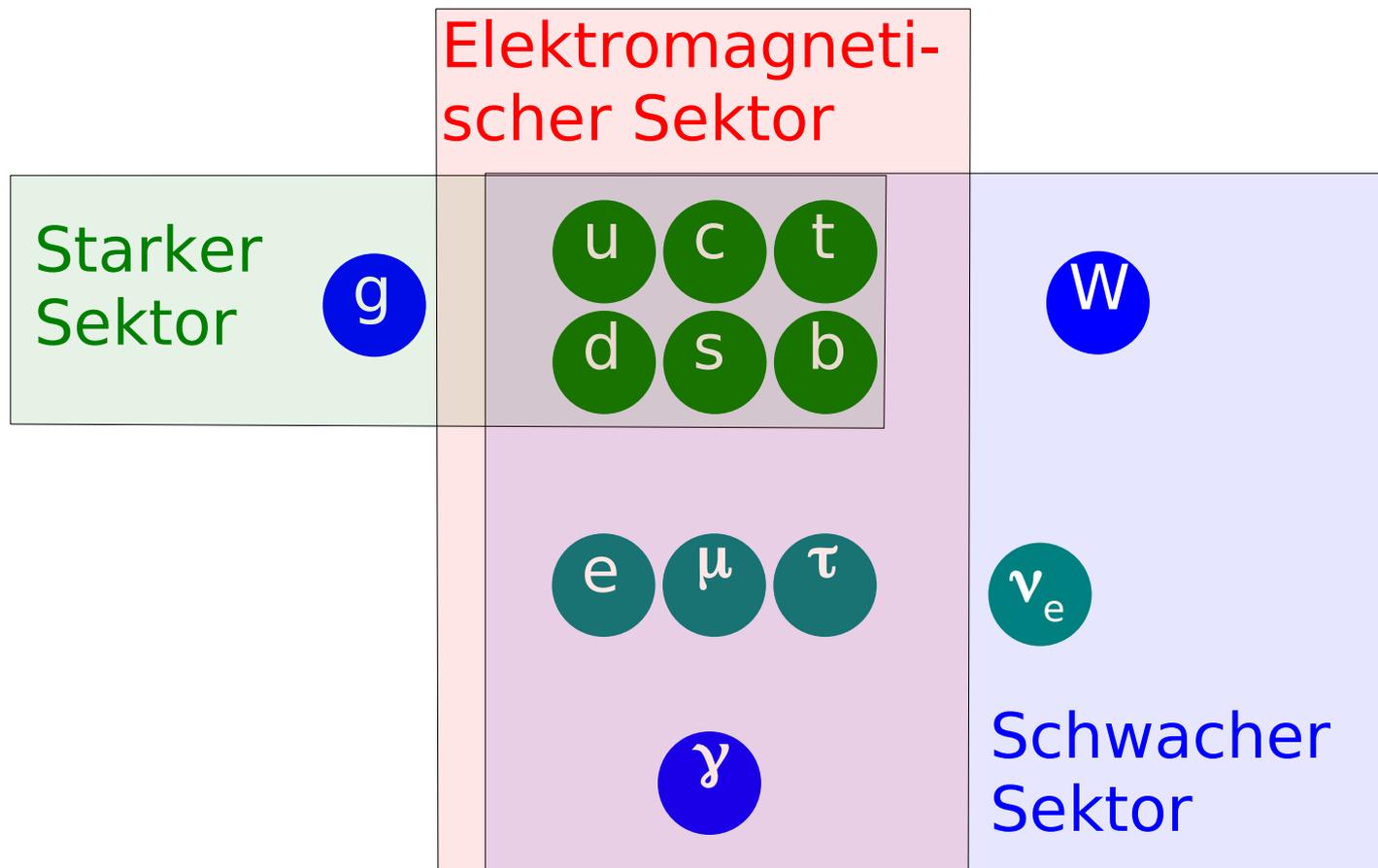
# Neutron



# Neutron

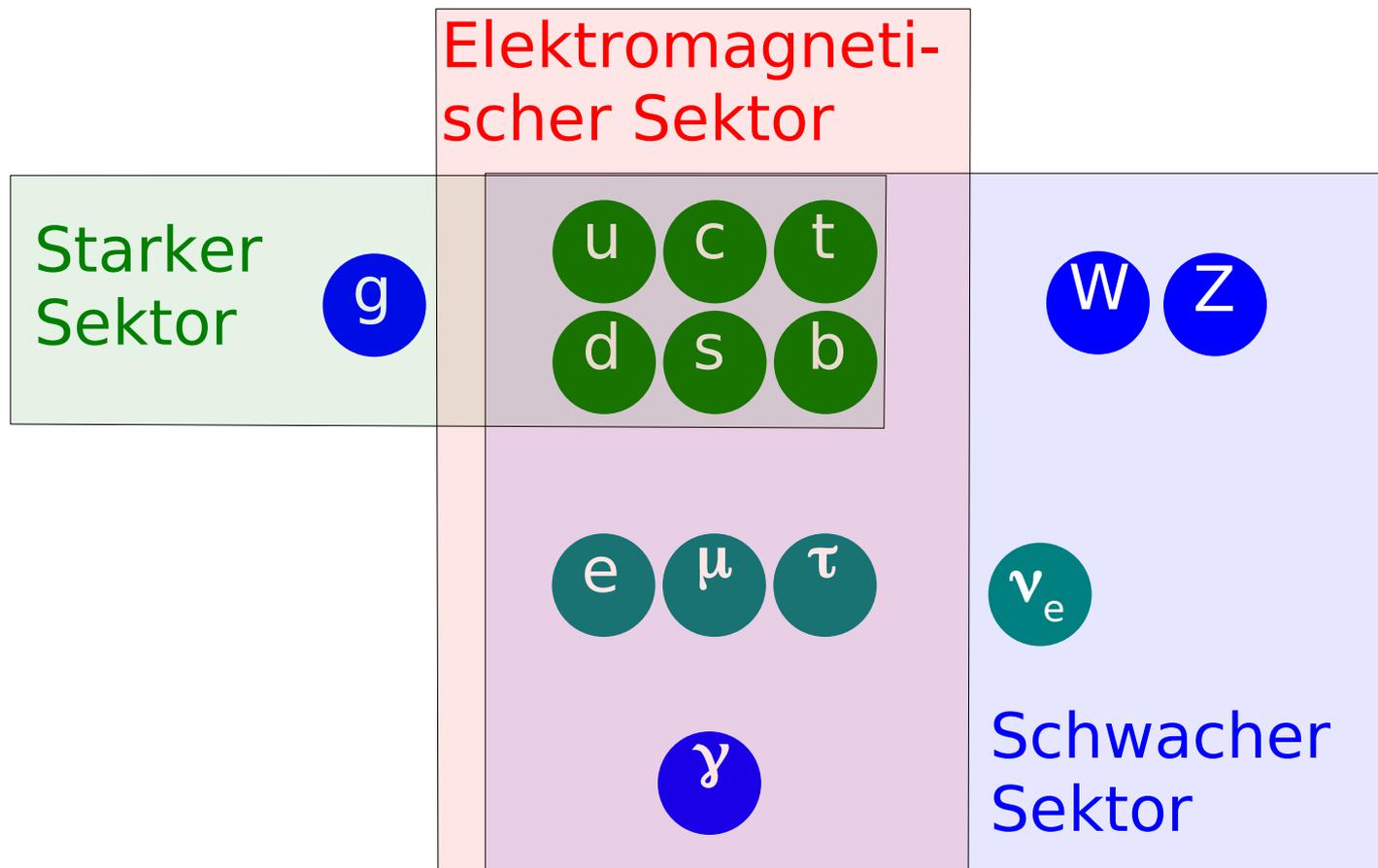


# Sektoren



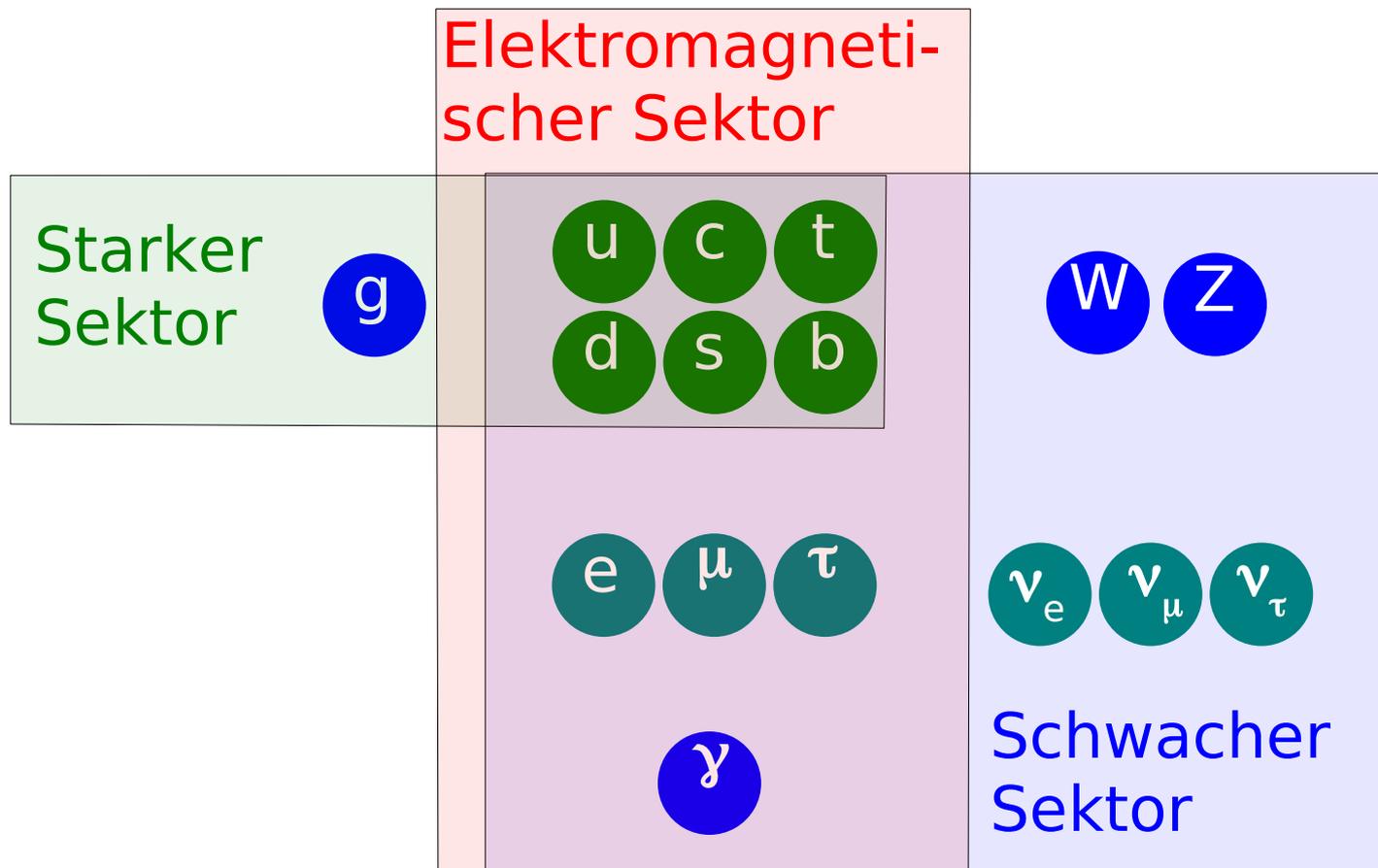
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)
  - Schwache (Kern)kräfte

# Sektoren



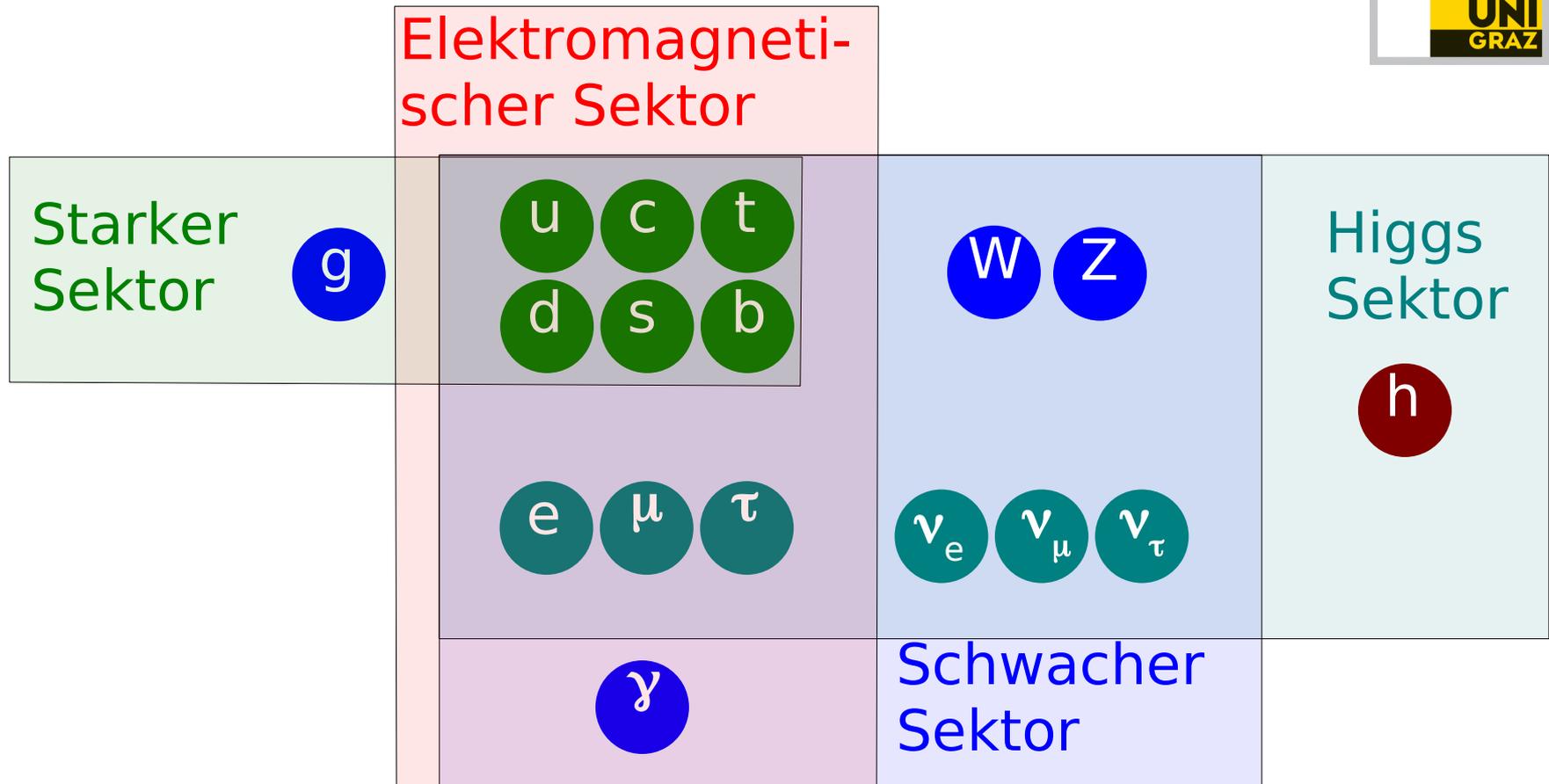
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)
  - Schwache (Kern)kräfte

# Sektoren



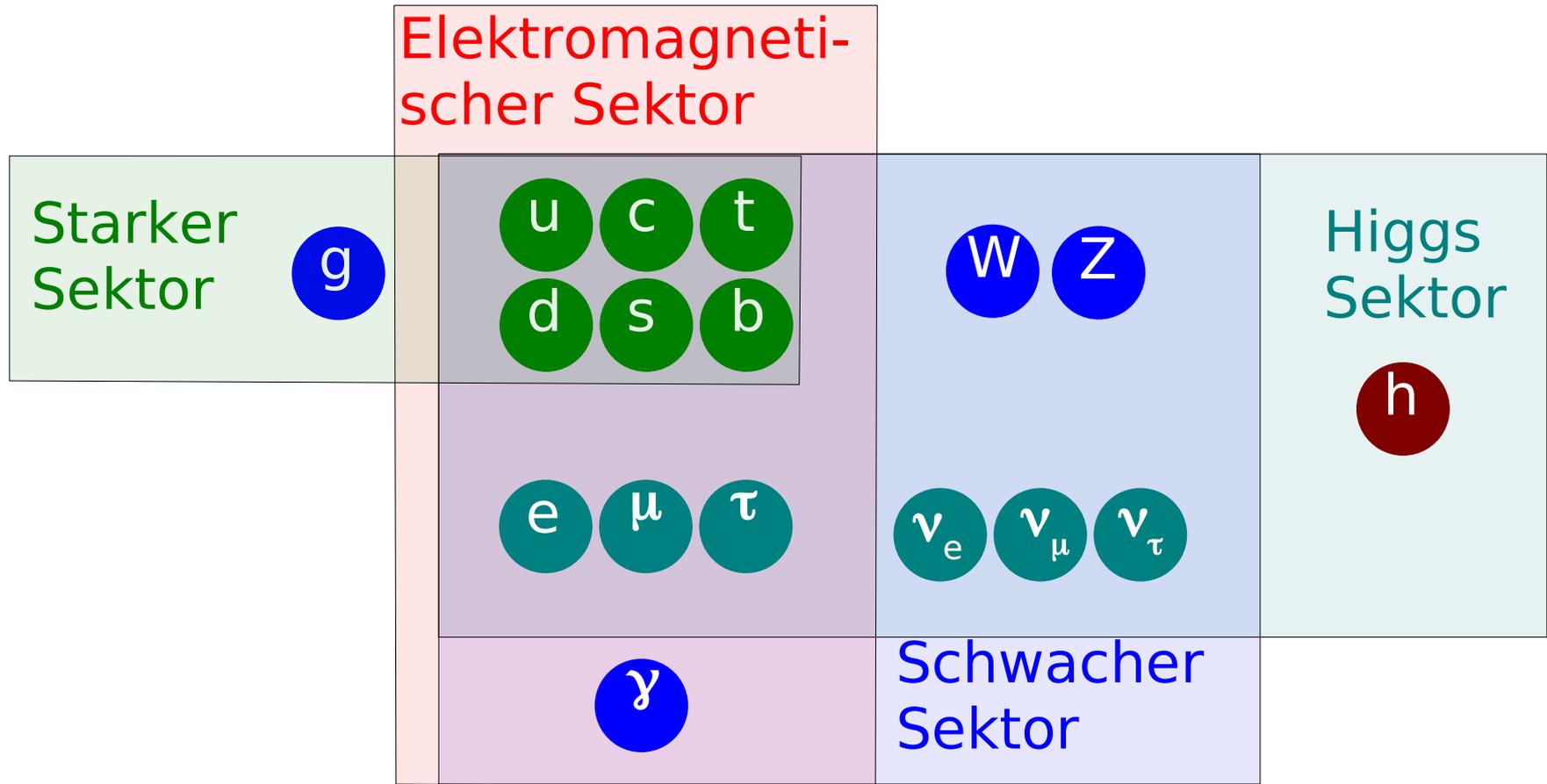
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)
  - Schwache (Kern)kräfte

# Sektoren



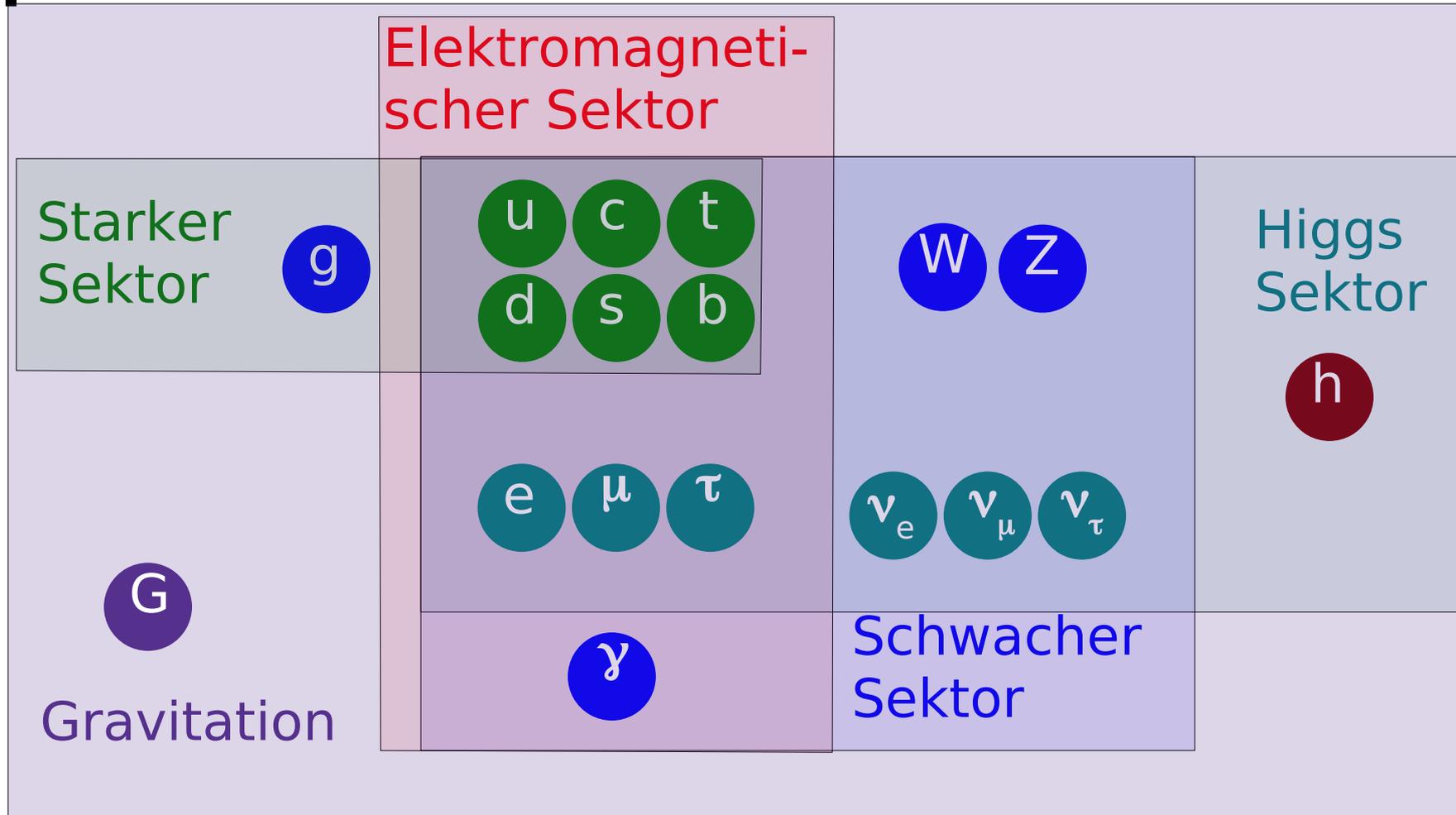
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)
  - Schwache (Kern)kräfte
  - Higgs

# Sektoren



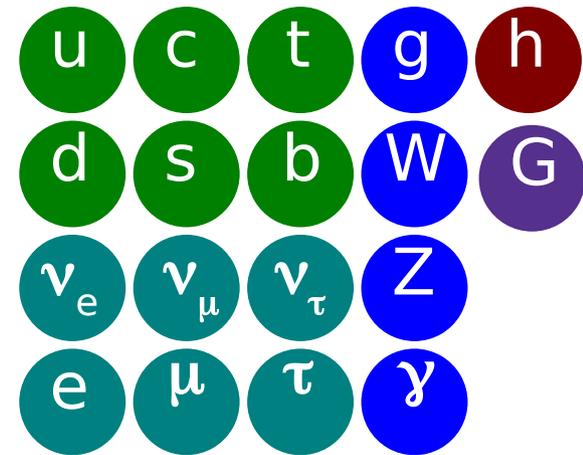
- Standardmodell der Teilchenphysik

# Sektoren



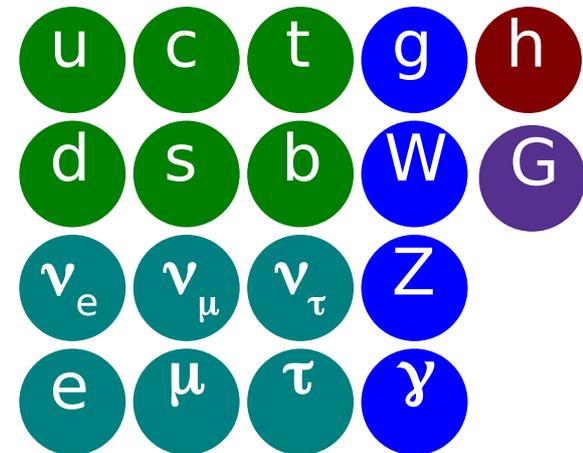
- Standardmodell der Teilchenphysik
- Gravitation als Quantengravitation umfassend
  - Wirkt auf Energie, nicht nur auf Masse
  - Vieles unklar – hier gut motivierte Variante

# Standardmodell der Teilchenphysik



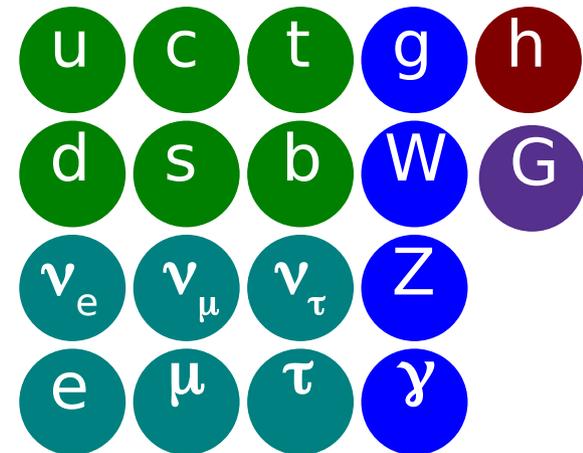
# Standardmodell der Teilchenphysik

- Enthält zwei Sorten Teilchen



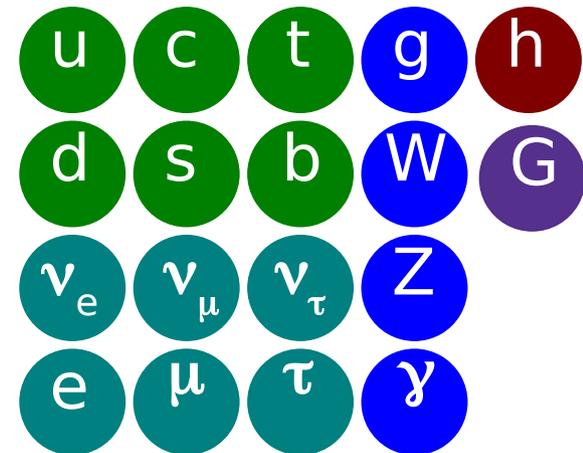
# Standardmodell der Teilchenphysik

- Enthält zwei Sorten Teilchen
- Materie
  - 6 Sorten (Flavors) Quarks
  - 6 Sorten (Flavors) Leptonen



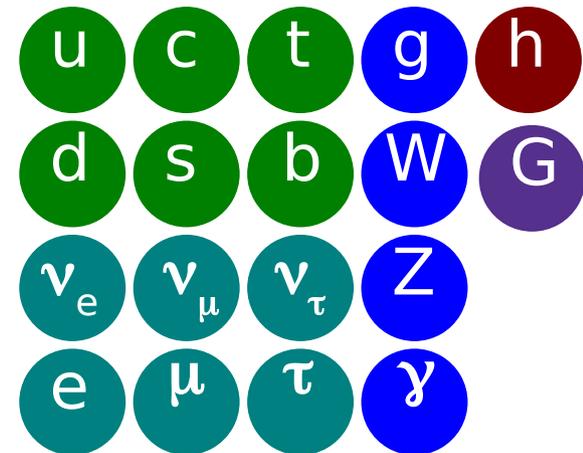
# Standardmodell der Teilchenphysik

- Enthält zwei Sorten Teilchen
- Materie
  - 6 Sorten (Flavors) Quarks
  - 6 Sorten (Flavors) Leptonen
- Kraftteilchen
  - Photon, Gluon, W- und Z-Bosonen, Graviton



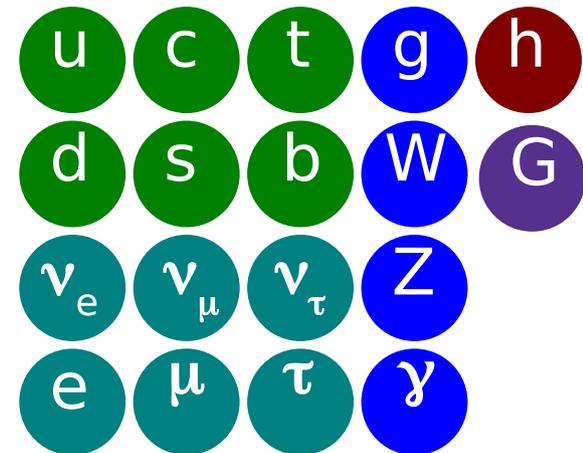
# Standardmodell der Teilchenphysik

- Enthält zwei Sorten Teilchen
- Materie
  - 6 Sorten (Flavors) Quarks
  - 6 Sorten (Flavors) Leptonen
- Kraftteilchen
  - Photon, Gluon, W- und Z-Bosonen, Graviton
- **Higgs** ist ein bißchen von beidem



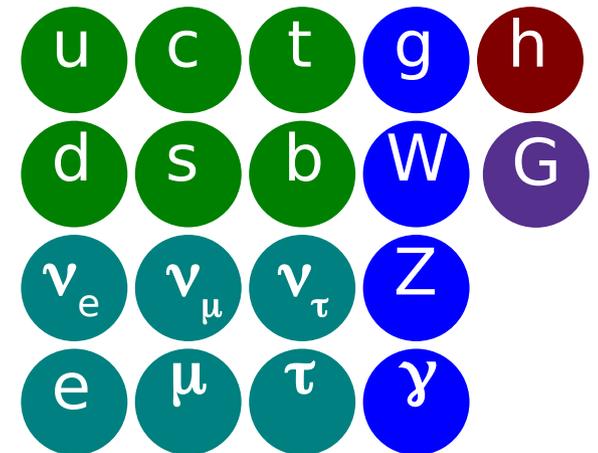
# Standardmodell der Teilchenphysik

- Beschreibt alle etablierten Resultate an erdgebundenen Experimenten hervorragend
- Enthält zwei Sorten Teilchen
- Materie
  - 6 Sorten (Flavors) Quarks
  - 6 Sorten (Flavors) Leptonen
- Kraftteilchen
  - Photon, Gluon, W- und Z-Bosonen, Graviton
- **Higgs** ist ein bißchen von beidem



# Die Eigenschaften der Teilchen

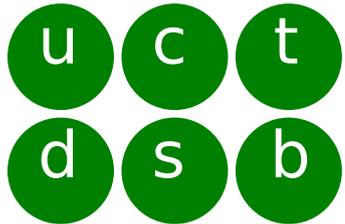
- Sehr unterschiedliche Eigenschaften



# Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

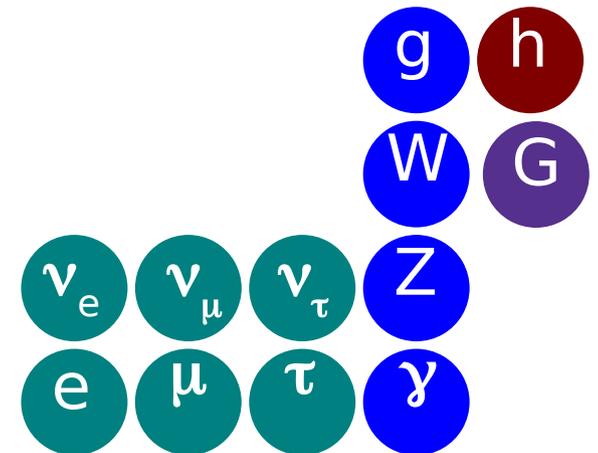
Down: 0.5%

Strange: 10%

Charm: 130%

Bottom: 420%

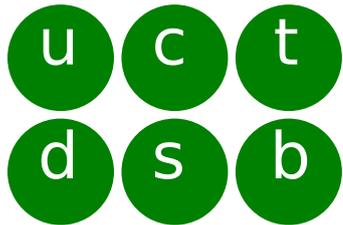
Top: 17500%



# Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

Down: 0.5%

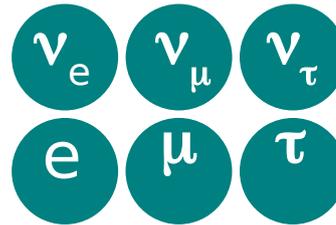
Strange: 10%

Charm: 130%

Bottom: 420%

Top: 17500%

Leptonen: Fermionen



Massen relativ zu H:

Elektron: 0.05%

Muon: 10%

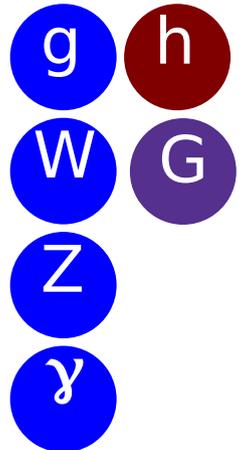
Tauon: 180%

Neutrinos:

Massen  $< 0.0000002\%$

Reihenfolge unbekannt,

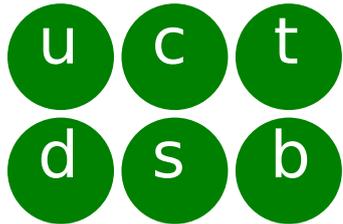
Massen unterschiedlich



# Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

Down: 0.5%

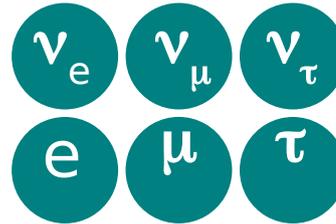
Strange: 10%

Charm: 130%

Bottom: 420%

Top: 17500%

Leptonen: Fermionen



Massen relativ zu H:

Elektron: 0.05%

Muon: 10%

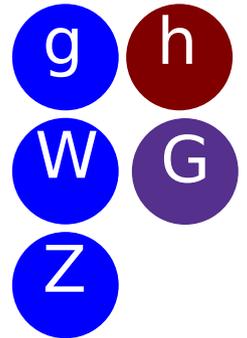
Tauon: 180%

Neutrinos:

Massen < 0.0000002%

Reihenfolge unbekannt,

Massen unterschiedlich

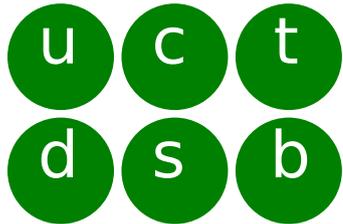


Photon: Masseloses Boson

# Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

Down: 0.5%

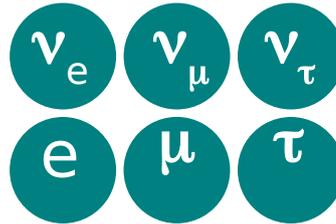
Strange: 10%

Charm: 130%

Bottom: 420%

Top: 17500%

Leptonen: Fermionen



Massen relativ zu H:

Elektron: 0.05%

Muon: 10%

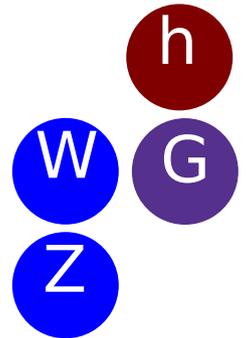
Tauon: 180%

Neutrinos:

Massen < 0.0000002%

Reihenfolge unbekannt,

Massen unterschiedlich

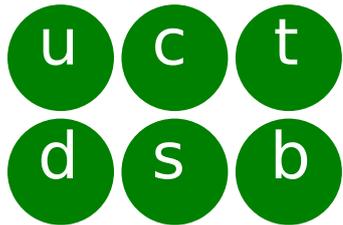


 Photon: Masseloses Boson  Gluon: Massloses Boson

# Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

Down: 0.5%

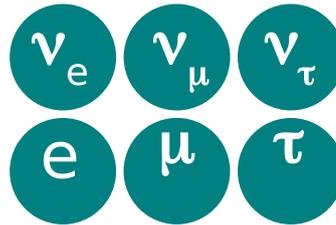
Strange: 10%

Charm: 130%

Bottom: 420%

Top: 17500%

Leptonen: Fermionen



Massen relativ zu H:

Elektron: 0.05%

Muon: 10%

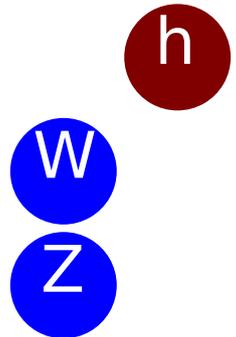
Tauon: 180%

Neutrinos:

Massen < 0.0000002%

Reihenfolge unbekannt,

Massen unterschiedlich



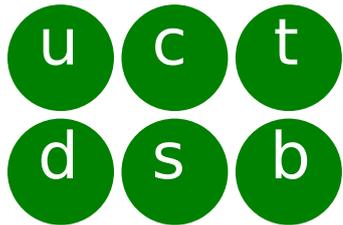
 Photon: Masseloses Boson  Gluon: Massloses Boson

 Graviton: Masseloses Boson

# Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

Down: 0.5%

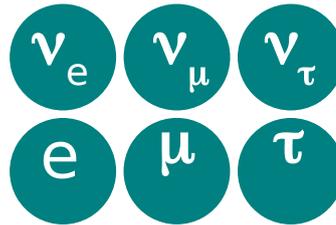
Strange: 10%

Charm: 130%

Bottom: 420%

Top: 17500%

Leptonen: Fermionen



Massen relativ zu H:

Elektron: 0.05%

Muon: 10%

Tauon: 180%

Neutrinos:

Massen < 0.0000002%

Reihenfolge unbekannt,

Massen unterschiedlich

Schwache Bosonen



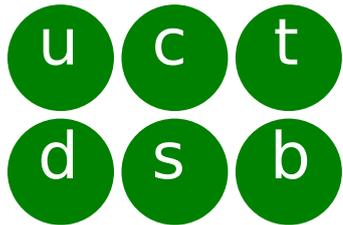
 Photon: Masseloses Boson  Gluon: Massloses Boson

 Graviton: Masseloses Boson

# Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

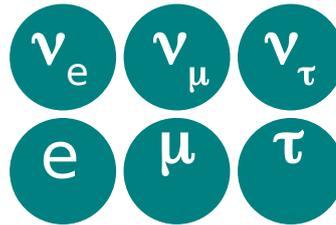
Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%  
Down: 0.5%  
Strange: 10%  
Charm: 130%  
Bottom: 420%  
Top: 17500%

Leptonen: Fermionen



Massen relativ zu H:

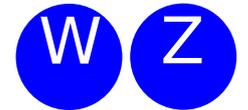
Elektron: 0.05%  
Muon: 10%  
Tauon: 180%  
Neutrinos:  
Massen < 0.0000002%  
Reihenfolge unbekannt,  
Massen unterschiedlich

Higgs: Boson



12500%

Schwache Bosonen



W: 8000%  
Z: 9100%

 Photon: Masseloses Boson  Gluon: Massloses Boson

 Graviton: Masseloses Boson

# Das Problem mit Teilchen

- Vereinigung von Quantenmechanik und spezieller Relativitätstheorie erzwingt Teilchen als Felder zu beschreiben

# Das Problem mit Teilchen

- Vereinigung von Quantenmechanik und spezieller Relativitätstheorie erzwingt Teilchen als Felder zu beschreiben
- Elementarteilchen wie Vektorpotential: Lokale Symmetrien
  - Abhängig von internem Koordinatensystem
  - Eigenschaften können sich unter Koordinatentransformationen ändern

# Das Problem mit Teilchen

- Vereinigung von Quantenmechanik und spezieller Relativitätstheorie erzwingt Teilchen als Felder zu beschreiben
- Elementarteilchen wie Vektorpotential: Lokale Symmetrien
  - Abhängig von internem Koordinatensystem
  - Eigenschaften können sich unter Koordinatentransformationen ändern
- **Betrifft alle bekannten Elementarteilchen**
  - Was sind dann 'echte' Teilchen?
  - Warum reden wir dann von Elementarteilchen?

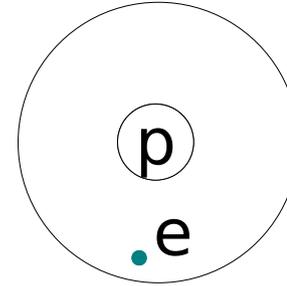
# Lösung: Zusammensetzen

# Lösung: Zusammensetzen

- Teilchen können kombiniert werden:  
Bindungszustand

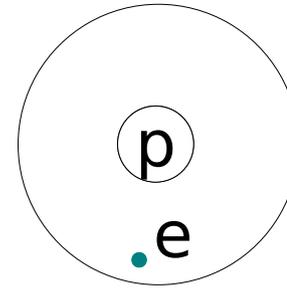
# Lösung: Zusammensetzen

- Teilchen können kombiniert werden:  
Bindungszustand
  - Z.B.: Wasserstoffatom aus Elektron und Proton



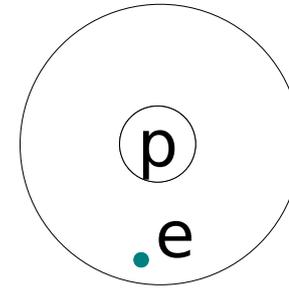
# Lösung: Zusammensetzen

- Teilchen können kombiniert werden:  
Bindungszustand
  - Z.B.: Wasserstoffatom aus Elektron und Proton
  - Geht auch mit Elementarteilchen



# Lösung: Zusammensetzen

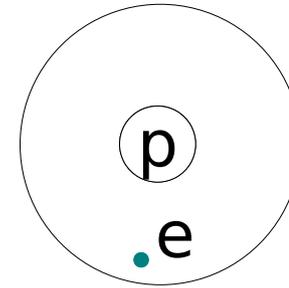
- Teilchen können kombiniert werden:  
Bindungszustand



- Z.B.: Wasserstoffatom aus Elektron und Proton
- Geht auch mit Elementarteilchen
- Bindungszustände sind invariant und physikalisch beobachtbar
  - Für alle drei (vier) Grundkräfte unterschiedlich

# Lösung: Zusammensetzen

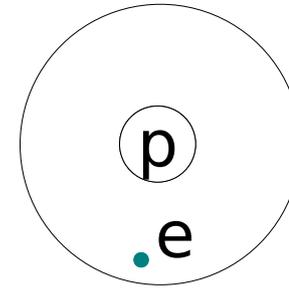
- Teilchen können kombiniert werden:  
Bindungszustand



- Z.B.: Wasserstoffatom aus Elektron und Proton
- Geht auch mit Elementarteilchen
- Bindungszustände sind invariant und physikalisch beobachtbar
  - Für alle drei (vier) Grundkräfte unterschiedlich
- Warum reden wir dann noch von Elementarteilchen?

# Lösung: Zusammensetzen

- Teilchen können kombiniert werden:  
Bindungszustand



- Z.B.: Wasserstoffatom aus Elektron und Proton
- Geht auch mit Elementarteilchen
- Bindungszustände sind invariant und physikalisch beobachtbar
  - Für alle drei (vier) Grundkräfte unterschiedlich
- Warum reden wir dann noch von Elementarteilchen?
  - Unterschied ist messbar in Größe und Form

# Lösung: Elektromagnetismus

# Lösung: Elektromagnetismus

- Elektrisch geladene Teilchen werden von einer Wolke von Photon umgeben
  - 'Coulombwolke'



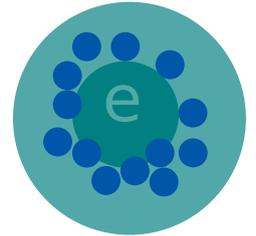
# Lösung: Elektromagnetismus

- Elektrisch geladene Teilchen werden von einer Wolke von Photon umgeben
  - ‘Coulombwolke’
  - Haben kaum messbare Effekte
    - Elektromagnetismus ist schwach



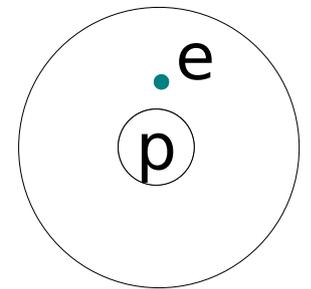
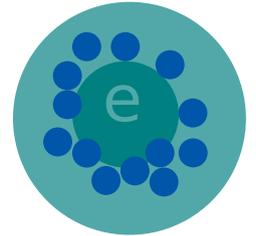
# Lösung: Elektromagnetismus

- Elektrisch geladene Teilchen werden von einer Wolke von Photon umgeben
  - ‘Coulombwolke’
  - Haben kaum messbare Effekte
    - Elektromagnetismus ist schwach
  - Erzeugt z.B. effektives Elektron



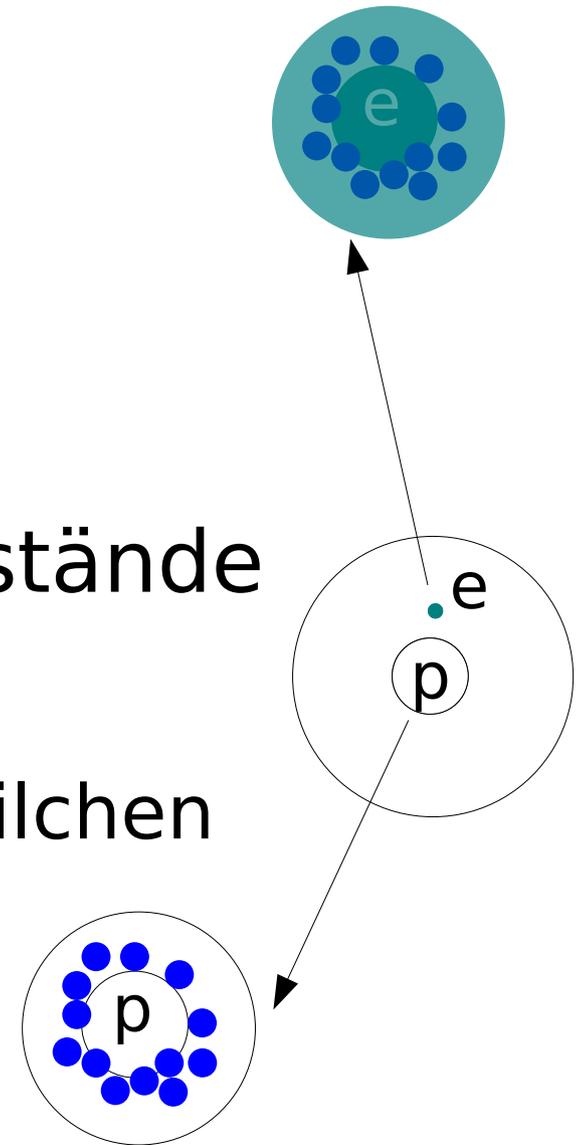
# Lösung: Elektromagnetismus

- Elektrisch geladene Teilchen werden von einer Wolke von Photon umgeben
  - ‘Coulombwolke’
  - Haben kaum messbare Effekte
    - Elektromagnetismus ist schwach
    - Erzeugt z.B. effektives Elektron
- Elektrisch neutrale Bindungszustände
  - Atome und Moleküle



# Lösung: Elektromagnetismus

- Elektrisch geladene Teilchen werden von einer Wolke von Photon umgeben
  - ‘Coulombwolke’
  - Haben kaum messbare Effekte
    - Elektromagnetismus ist schwach
  - Erzeugt z.B. effektives Elektron
- Elektrisch neutrale Bindungszustände
  - Atome und Moleküle
  - Bei Zerlegung bekommt jedes Teilchen wieder eine Coulombwolke



**Lösung: Starke Wechselwirkung**

# Lösung: Starke Wechselwirkung

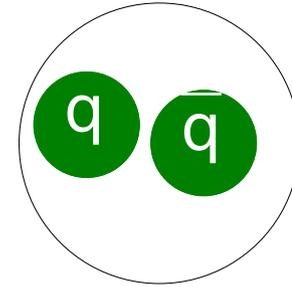
- Die starke Wechselwirkung bindet Quarks (und Gluonen) immer in Hadronen: Confinement

# Lösung: Starke Wechselwirkung

- Die starke Wechselwirkung bindet Quarks (und Gluonen) immer in Hadronen: Confinement
- Es gibt viele Varianten
  - Alle Sorten sind möglich, aber nicht alle Kombinationen von Quarks und Antiquarks

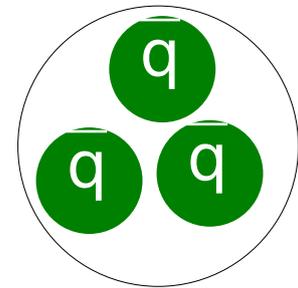
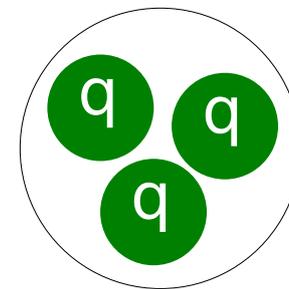
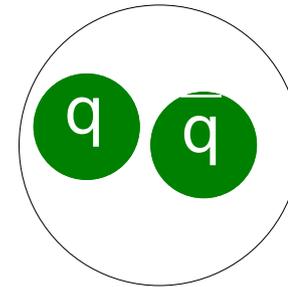
# Lösung: Starke Wechselwirkung

- Die starke Wechselwirkung bindet Quarks (und Gluonen) immer in Hadronen: Confinement
- Es gibt viele Varianten
  - Alle Sorten sind möglich, aber nicht alle Kombinationen von Quarks und Antiquarks
    - Mesonen (viele Hundert beobachtet)



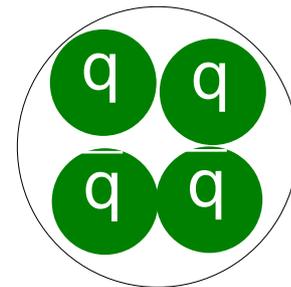
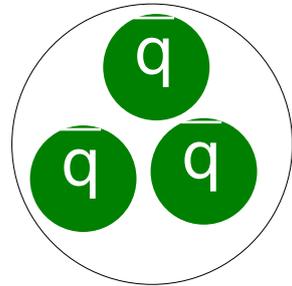
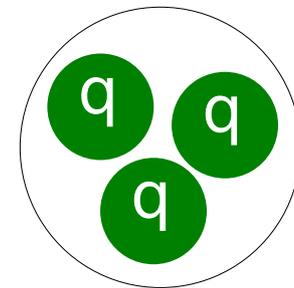
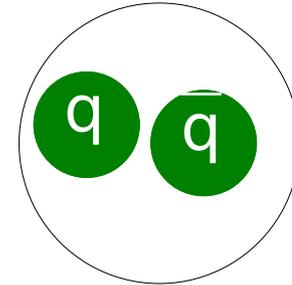
# Lösung: Starke Wechselwirkung

- Die starke Wechselwirkung bindet Quarks (und Gluonen) immer in Hadronen: Confinement
- Es gibt viele Varianten
  - Alle Sorten sind möglich, aber nicht alle Kombinationen von Quarks und Antiquarks
    - Mesonen (viele Hundert beobachtet)
    - Baryonen (Mehr als Hundert beobachtet)



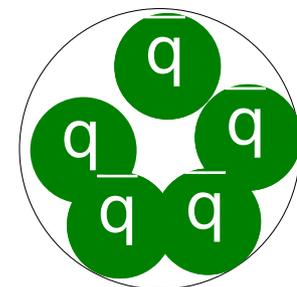
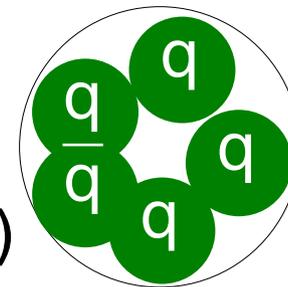
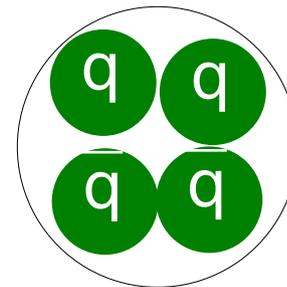
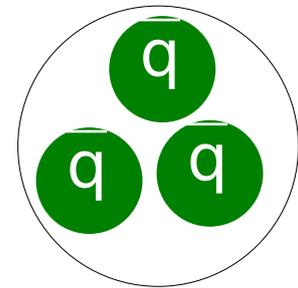
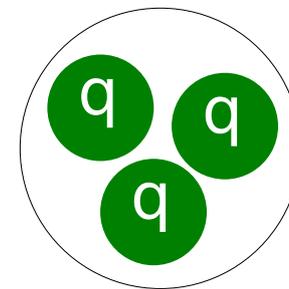
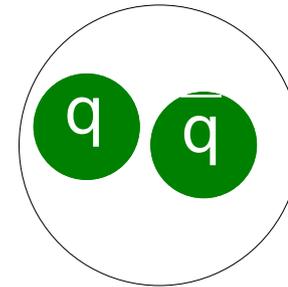
# Lösung: Starke Wechselwirkung

- Die starke Wechselwirkung bindet Quarks (und Gluonen) immer in Hadronen: Confinement
- Es gibt viele Varianten
  - Alle Sorten sind möglich, aber nicht alle Kombinationen von Quarks und Antiquarks
    - Mesonen (viele Hundert beobachtet)
    - Baryonen (Mehr als Hundert beobachtet)
    - Tetraquarks (eine Handvoll vermutlich beobachtet)



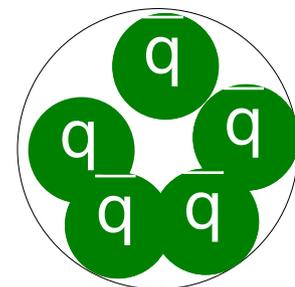
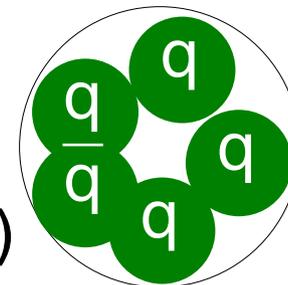
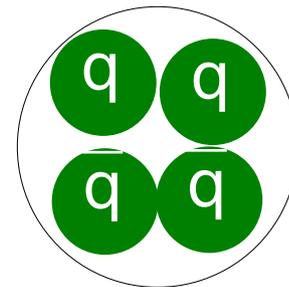
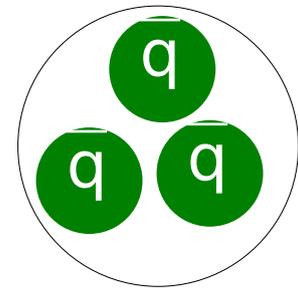
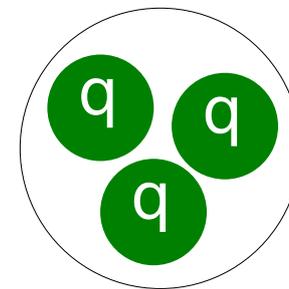
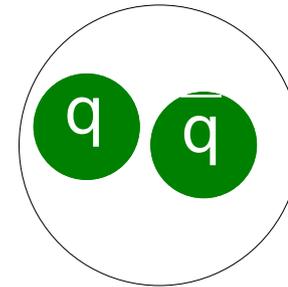
# Lösung: Starke Wechselwirkung

- Die starke Wechselwirkung bindet Quarks (und Gluonen) immer in Hadronen: Confinement
- Es gibt viele Varianten
  - Alle Sorten sind möglich, aber nicht alle Kombinationen von Quarks und Antiquarks
    - Mesonen (viele Hundert beobachtet)
    - Baryonen (Mehr als Hundert beobachtet)
    - Tetraquarks (eine Handvoll vermutlich beobachtet)
    - Pentaquarks (einige Kandidaten)



# Lösung: Starke Wechselwirkung

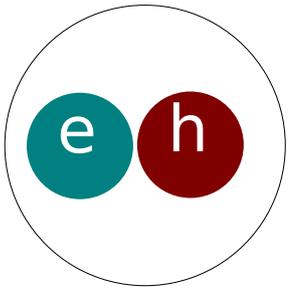
- Die starke Wechselwirkung bindet Quarks (und Gluonen) immer in Hadronen: Confinement
- Es gibt viele Varianten
  - Alle Sorten sind möglich, aber nicht alle Kombinationen von Quarks und Antiquarks
    - Mesonen (viele Hundert beobachtet)
    - Baryonen (Mehr als Hundert beobachtet)
    - Tetraquarks (eine Handvoll vermutlich beobachtet)
    - Pentaquarks (einige Kandidaten)
- Quarks und Gluonen niemals frei



# **Lösung: Schwache Wechselwirkung**

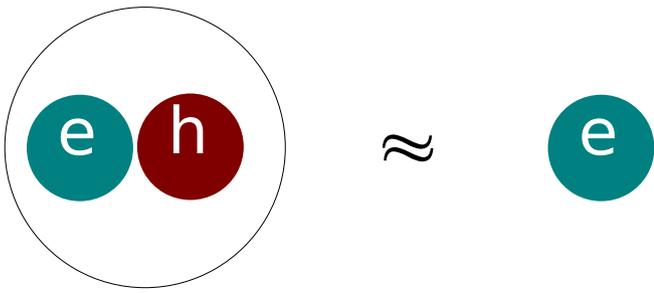
# Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen



# Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen



# Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen

Higgskondensat

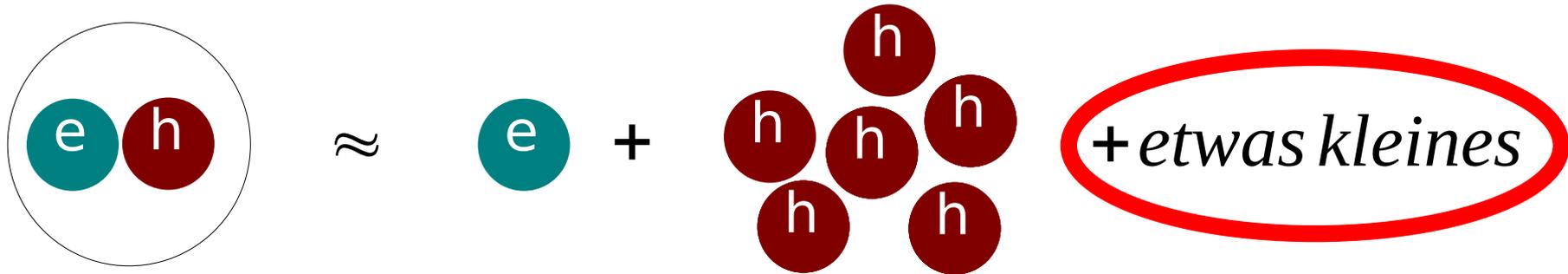


- Subtiler Effekt aufgrund des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus: Fröhlich-Morocchio-Strocchi Effekt

# Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen

Higgskondensat

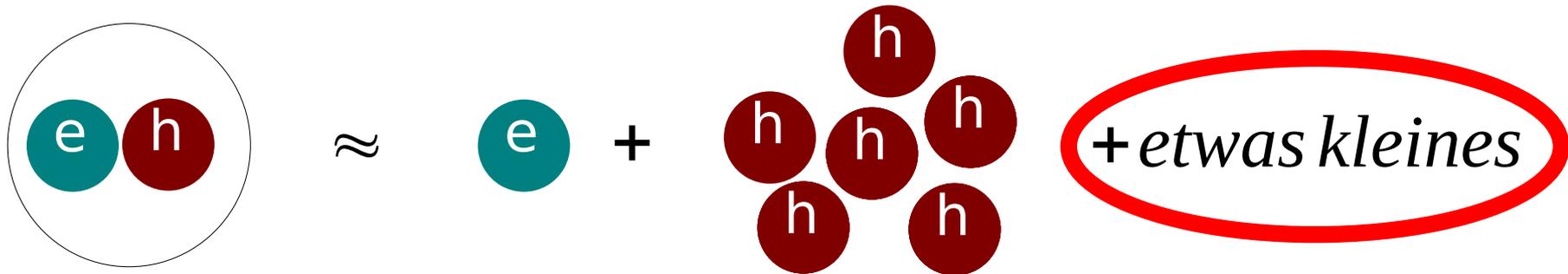


- Subtiler Effekt aufgrund des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus: Fröhlich-Morocchio-Strocchi Effekt

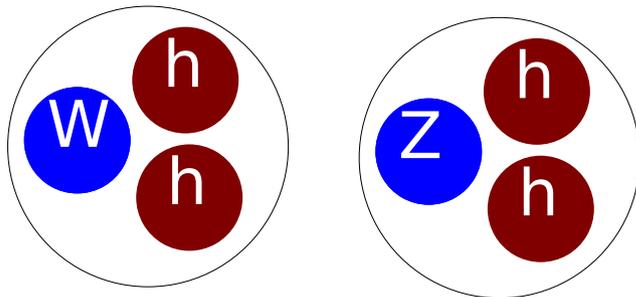
# Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen

Higgskondensat



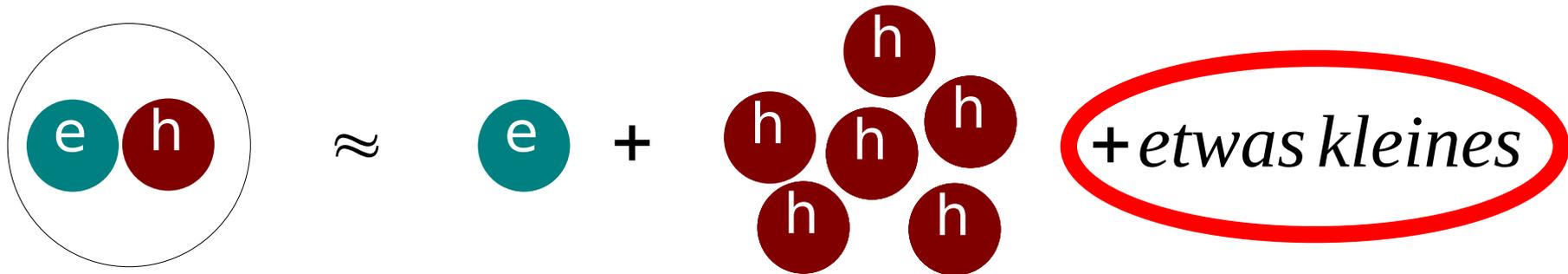
- Subtiler Effekt aufgrund des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus: Fröhlich-Morcchio-Strocchi Effekt
  - Gilt für alle schwach wechselwirkende Teilchen



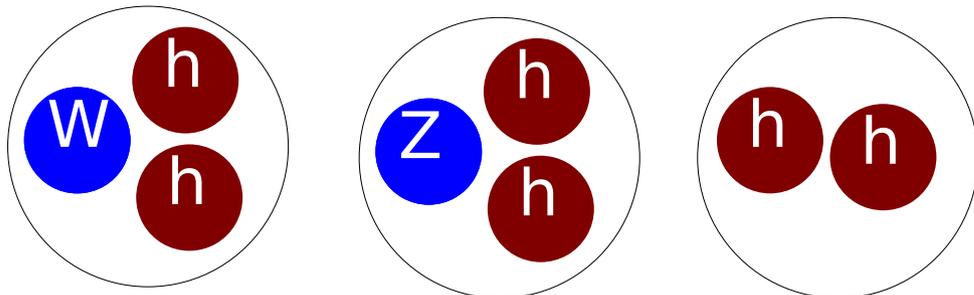
# Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen

Higgskondensat



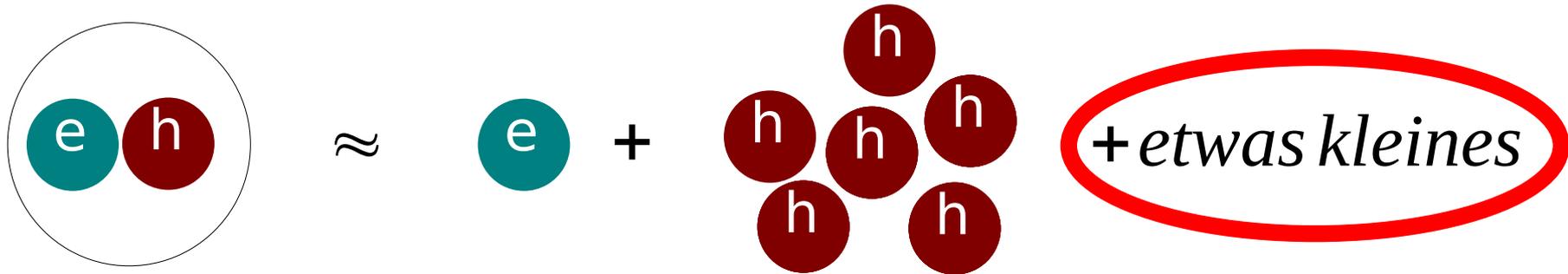
- Subtiler Effekt aufgrund des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus: Fröhlich-Morcchio-Strocchi Effekt
  - Gilt für alle schwach wechselwirkende Teilchen



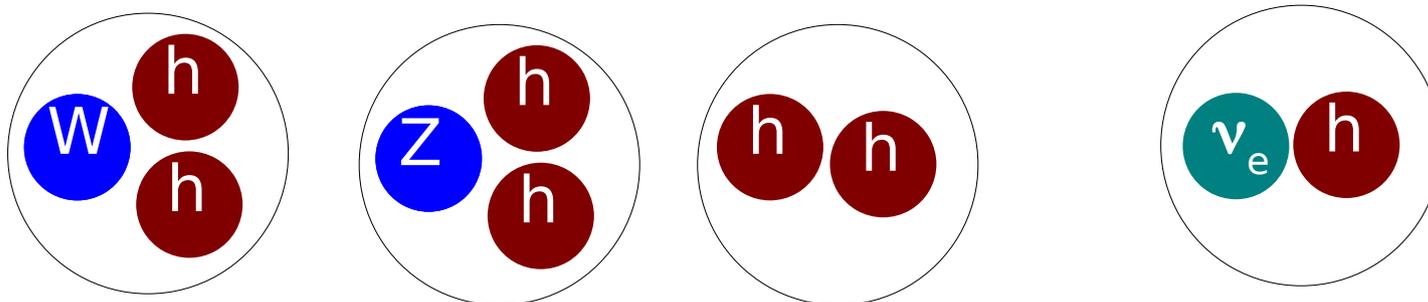
# Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen

Higgskondensat



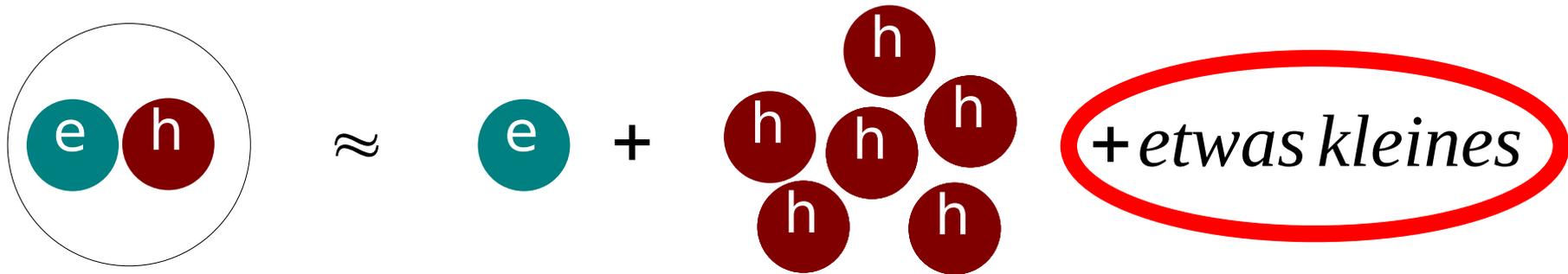
- Subtiler Effekt aufgrund des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus: Fröhlich-Morcchio-Strocchi Effekt
  - Gilt für alle schwach wechselwirkende Teilchen



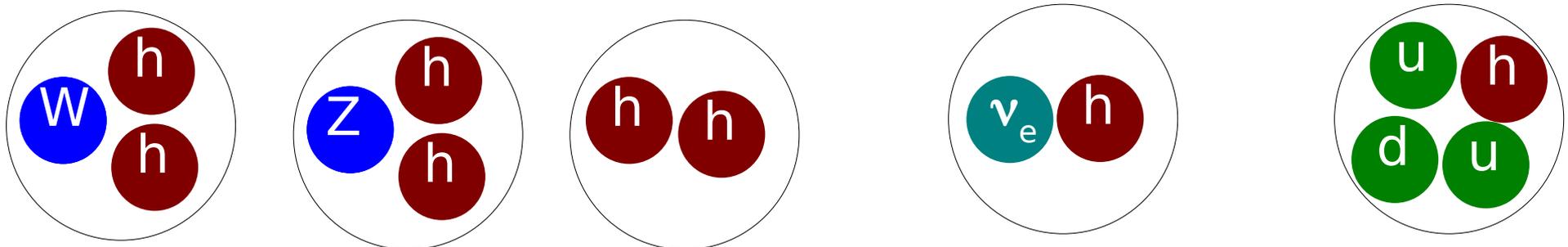
# Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen

Higgskondensat



- Subtiler Effekt aufgrund des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus: Fröhlich-Morcchio-Strocchi Effekt
  - Gilt für alle schwach wechselwirkende Teilchen



# Lösung: Gravitation

- Deutlich spekulativer

# Lösung: Gravitation

- Deutlich spekulativer
- Möglich: Wie bei schwacher Wechselwirkung



# Lösung: Gravitation

- Deutlich spekulativer
- Möglich: Wie bei schwacher Wechselwirkung



Gravitonkondensat

- Grund, warum unsere Raumzeit so 'einfach' aussieht

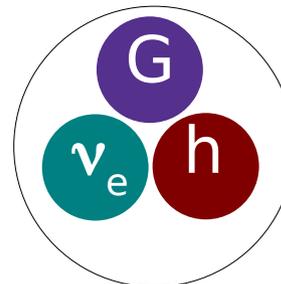
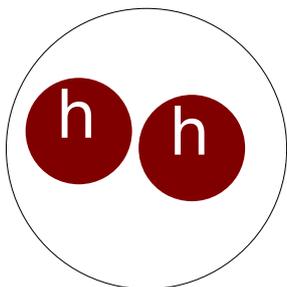
# Lösung: Gravitation

- Deutlich spekulativer
- Möglich: Wie bei schwacher Wechselwirkung



Gravitonkondensat

- Grund, warum unsere Raumzeit so 'einfach' aussieht
  - Gilt auch für Teilchen mit Spin



**Warum?**

Einstein veröffentlicht die allgemeine Relativitätstheorie (1915)

Diese macht Raum und Zeit zu einer lokalen Symmetrie.

Einstein veröffentlicht die allgemeine Relativitätstheorie (1915)

Diese macht Raum und Zeit zu einer lokalen Symmetrie

Also wird Raum und Zeit in unserem Sinne unbeobachtbar  
und nur komplexe zusammengesetzte Objekte nehmen ihren  
Platz ein

Einstein veröffentlicht die allgemeine Relativitätstheorie (1915)

Diese macht Raum und Zeit zu einer lokalen Symmetrie

Also wird Raum und Zeit in unserem Sinne unbeobachtbar und nur komplexe zusammengesetzte Objekte nehmen ihren Platz ein

Kretschmann wirft ein, dass die Einführung von einer lokalen (Raumzeit)symmetrie im Prinzip immer machbar ist, aber keinen physikalischen Inhalt erzeugt  
(Kretschmanneinwurf, 1917)

Einstein veröffentlicht die allgemeine Relativitätstheorie (1915)

Diese macht Raum und Zeit zu einer lokalen Symmetrie

Also wird Raum und Zeit in unserem Sinne unbeobachtbar und nur komplexe zusammengesetzte Objekte nehmen ihren Platz ein

Kretschmann wirft ein, dass die Einführung von einer lokalen (Raumzeit)symmetrie im Prinzip immer machbar ist, aber keinen physikalischen Inhalt erzeugt  
(Kretschmanneinwurf, 1917)

Einstein antwortet, dass er recht hat. Aber sonst könnte man keine Intuition/Heuristik aufbauen (1918)

Einstein veröffentlicht die allgemeine Relativitätstheorie (1915)

Diese macht Raum und Zeit zu einer lokalen Symmetrie

Also wird Raum und Zeit in unserem Sinne unbeobachtbar und nur komplexe zusammengesetzte Objekte nehmen ihren Platz ein

Kretschmann wirft ein, dass die Einführung von einer lokalen (Raumzeit)symmetrie im Prinzip immer machbar ist, aber keinen physikalischen Inhalt erzeugt  
(Kretschmanneinwurf, 1917)

Einstein antwortet, dass er recht hat. Aber sonst könnte man keine Intuition/Heuristik aufbauen (1918)

Dieses Wechselspiel zwischen physikalisch beobachtbar (ontologisch real) und heuristisch handhabbar ist ein Wesentliches Charakteristikum moderner Debatten

# Zusammenfassung

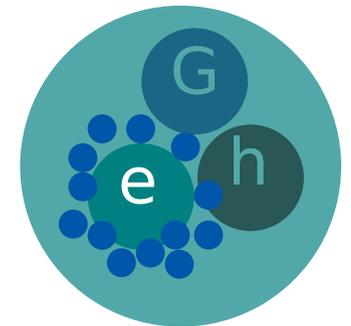
- Symmetrien sind, was keinen Effekt hat
- Nur unsymmetrisches ist beobachtbar

# Zusammenfassung

- Symmetrien sind, was keinen Effekt hat
- Nur unsymmetrisches ist beobachtbar
  
- Elementarteilchen unterliegen Symmetrien

# Zusammenfassung

- Symmetrien sind, was keinen Effekt hat
- Nur unsymmetrisches ist beobachtbar
- Elementarteilchen unterliegen Symmetrien
  - Nur komplexe Kombinationen sind real



# Zusammenfassung

- Symmetrien sind, was keinen Effekt hat
- Nur unsymmetrisches ist beobachtbar
- Elementarteilchen unterliegen Symmetrien
  - Nur komplexe Kombinationen sind real
- Symmetrien erlauben eine technisch und heuristisch einfache Beschreibung

