

Quanten, Symmetrien, Teilchen Was ist real?

Axel Maas

 @axelmaas.bsky.social



NAWI Graz
Natural Sciences

FWF Österreichischer
Wissenschaftsfonds



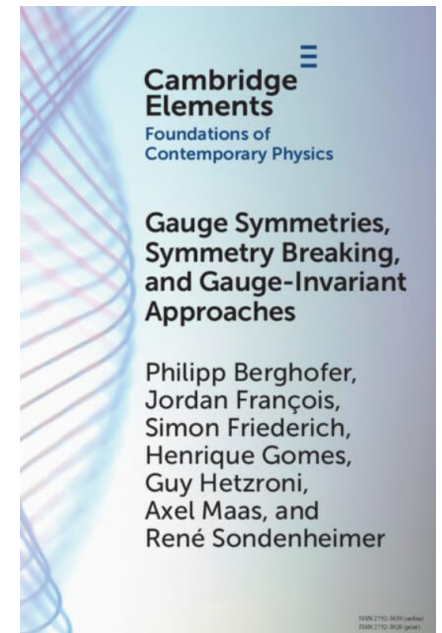
When certain effects show a certain (a)symmetry, this (a)symmetry must be found in the causes which gave rise to them.

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



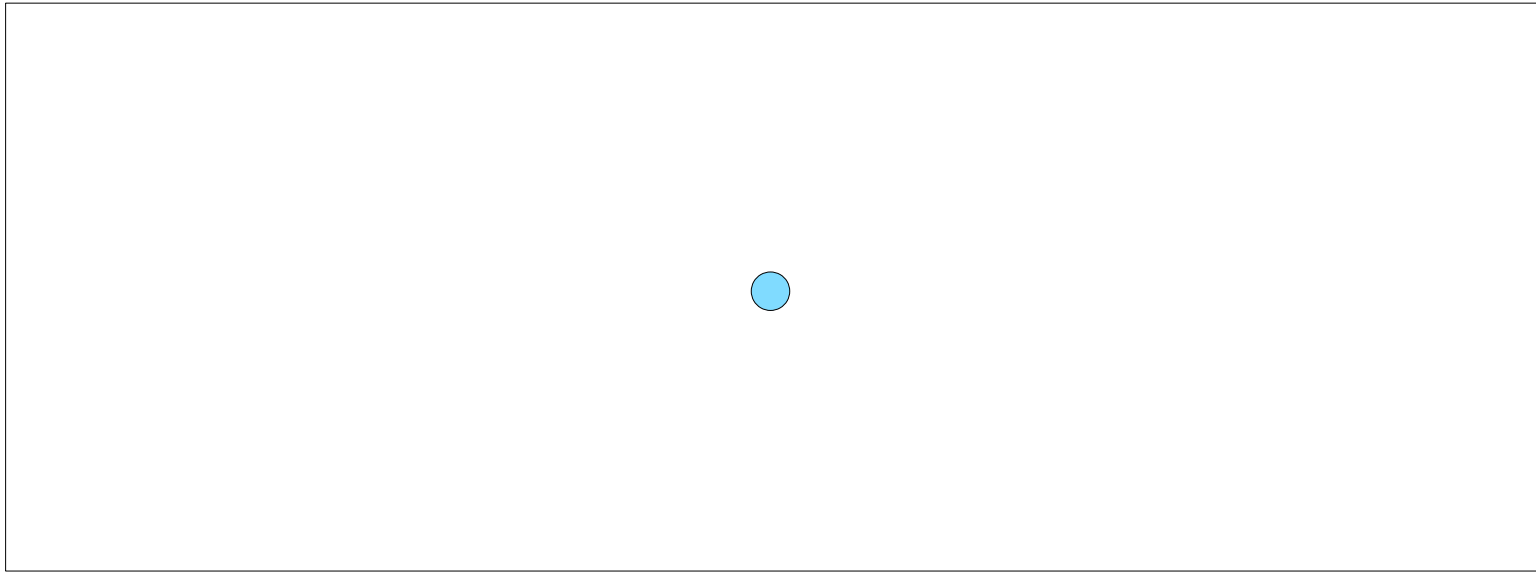
Koordinaten

Koordinaten



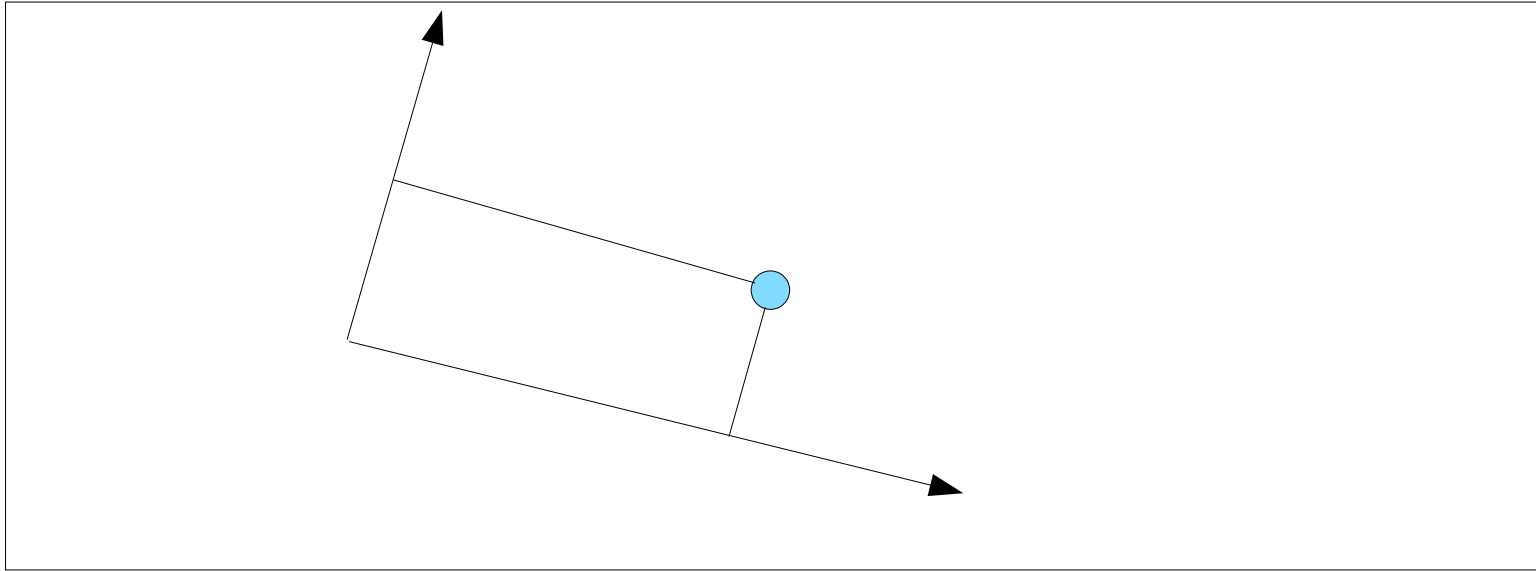
- Raum(zeit)

Koordinaten



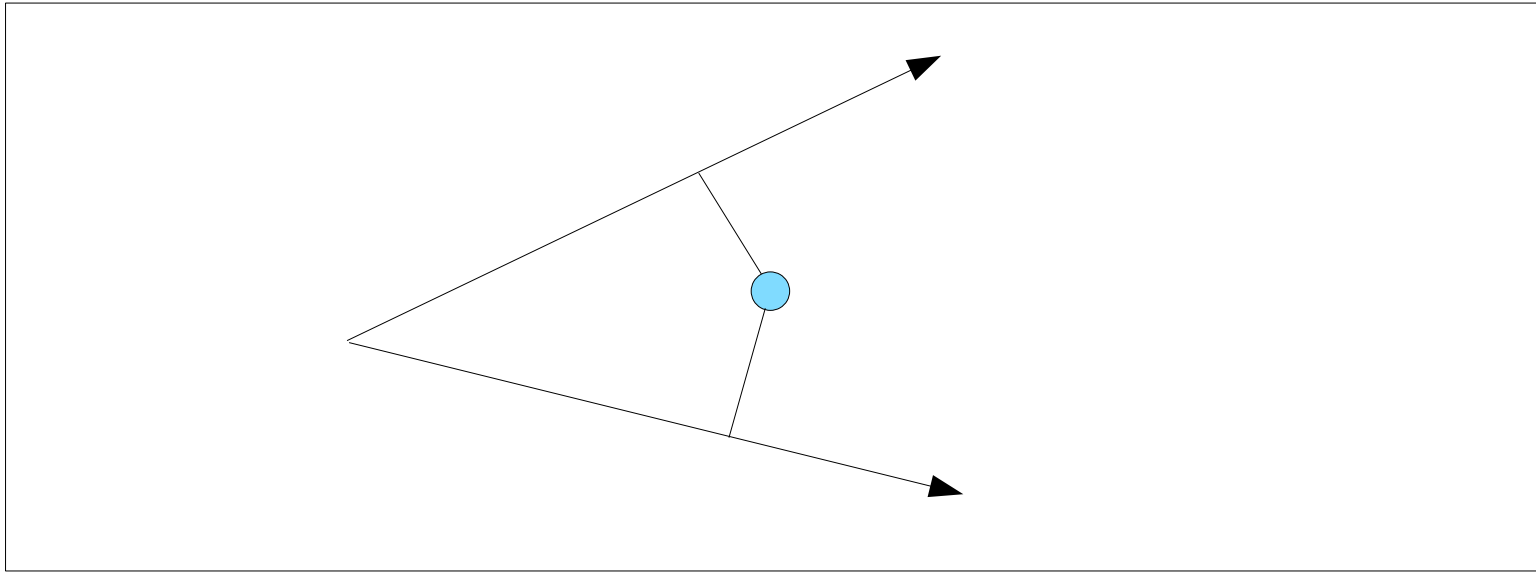
- Raum(zeit) ist eine Menge von Punkten

Koordinaten



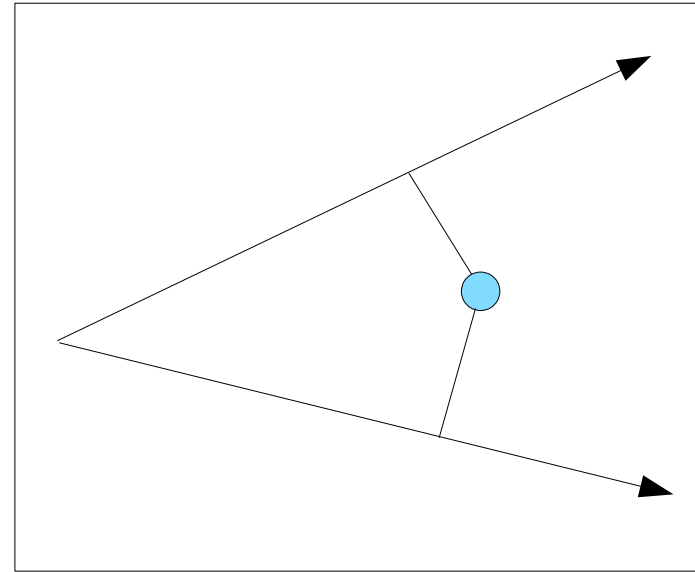
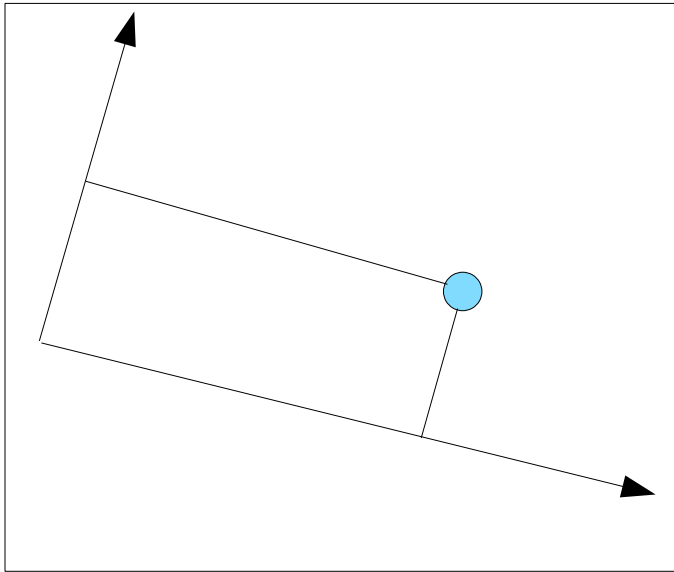
- Raum(zeit) ist eine Menge von Punkten
 - Koordinatensysteme werden verwendet, um sie zu identifizieren

Koordinaten



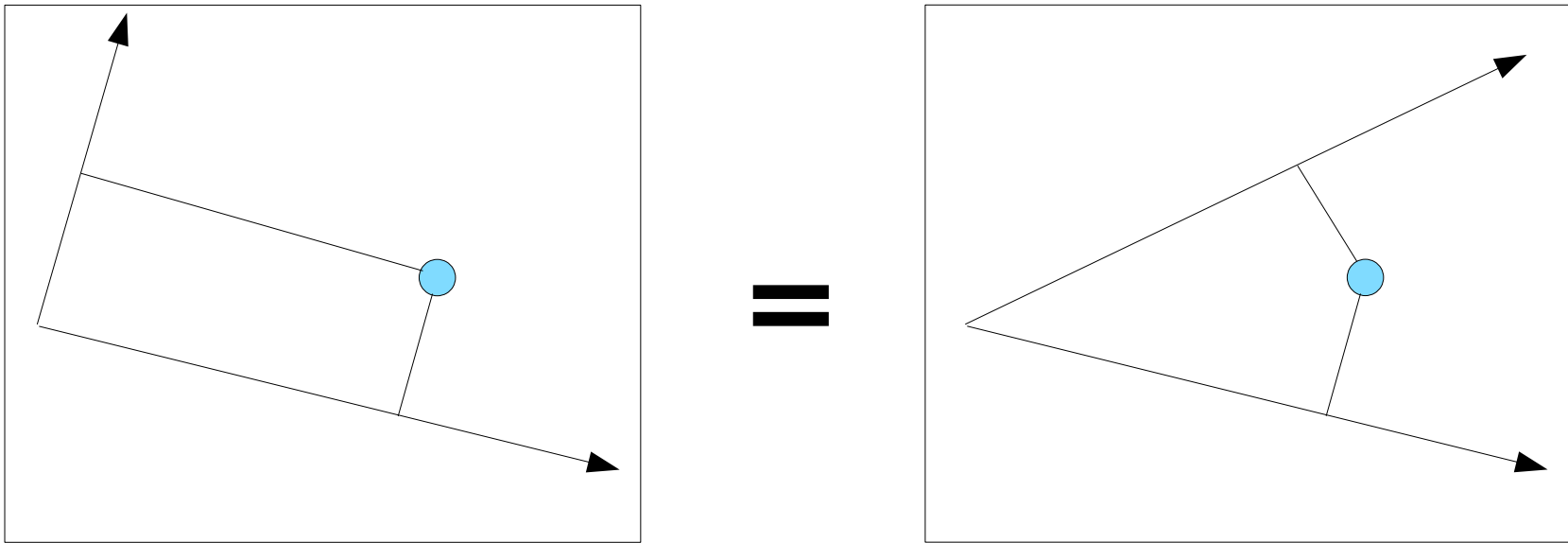
- Raum(zeit) ist eine Menge von Punkten
 - Koordinatensysteme werden verwendet, um sie zu identifizieren
- Müssen nicht die üblichen Länge-Breite-Höhe sein
 - Es gibt unendlich viele Möglichkeiten

Koordinatentransformationen



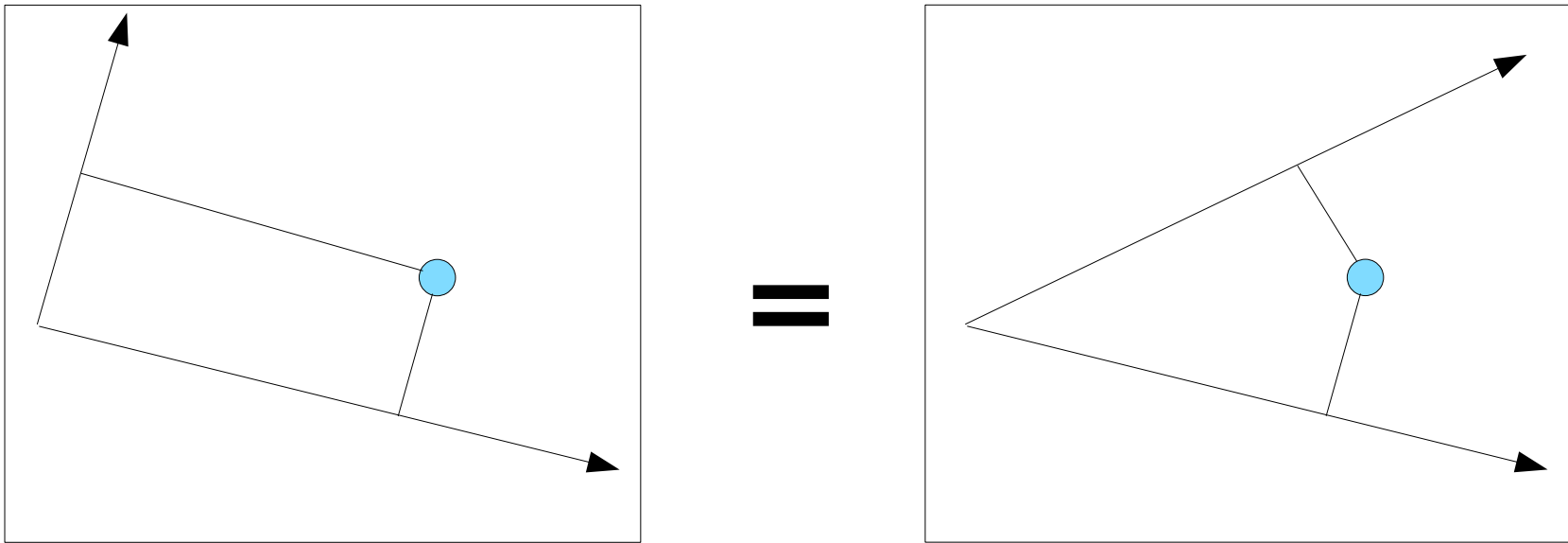
- Koordinatensysteme sind menschengemacht
 - Den Punkten sind sie egal

Koordinatentransformationen



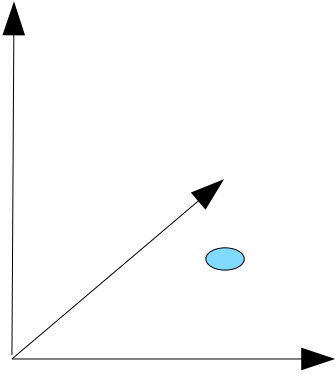
- Koordinatensysteme sind menschengemacht
 - Den Punkten sind sie egal
- Physik muss unabhängig von ihnen sein
- Oder: Physik ist in allen gleich

Koordinatentransformationen



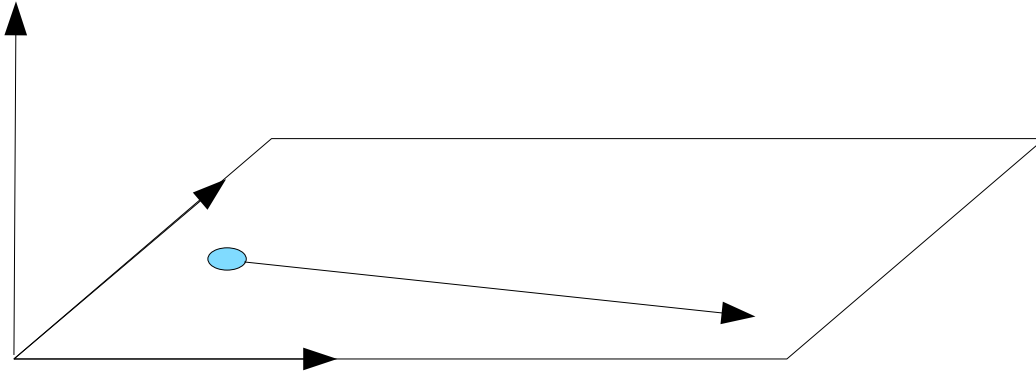
- Koordinatensysteme sind menschengemacht
 - Den Punkten sind sie egal
- Physik muss unabhängig von ihnen sein
- Oder: Physik ist in allen gleich
- Man muss sie also ineinander umwandeln können
 - Koordinatentransformationen

Überflüssige Koordinaten



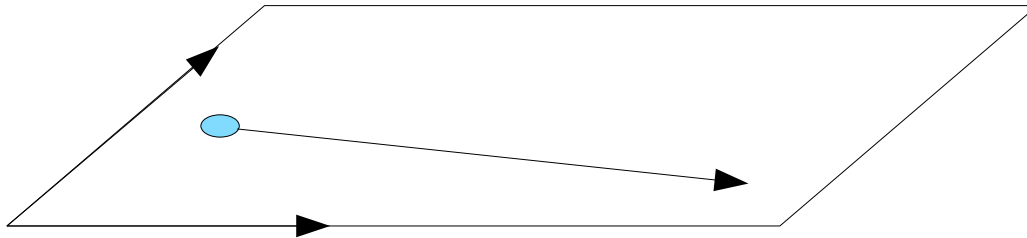
- Nicht immer sind alle Koordinaten unabhängig
 - Einige mögen überflüssig sein

Überflüssige Koordinaten



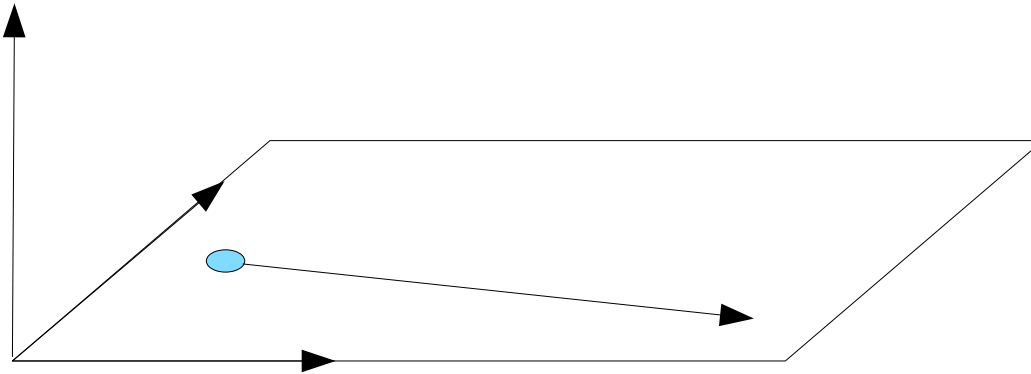
- Nicht immer sind alle Koordinaten unabhängig
 - Einige mögen überflüssig sein
- Z.B. etwas, was sich in der Ebene bewegt, aber für das man auch die Höhe angibt

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

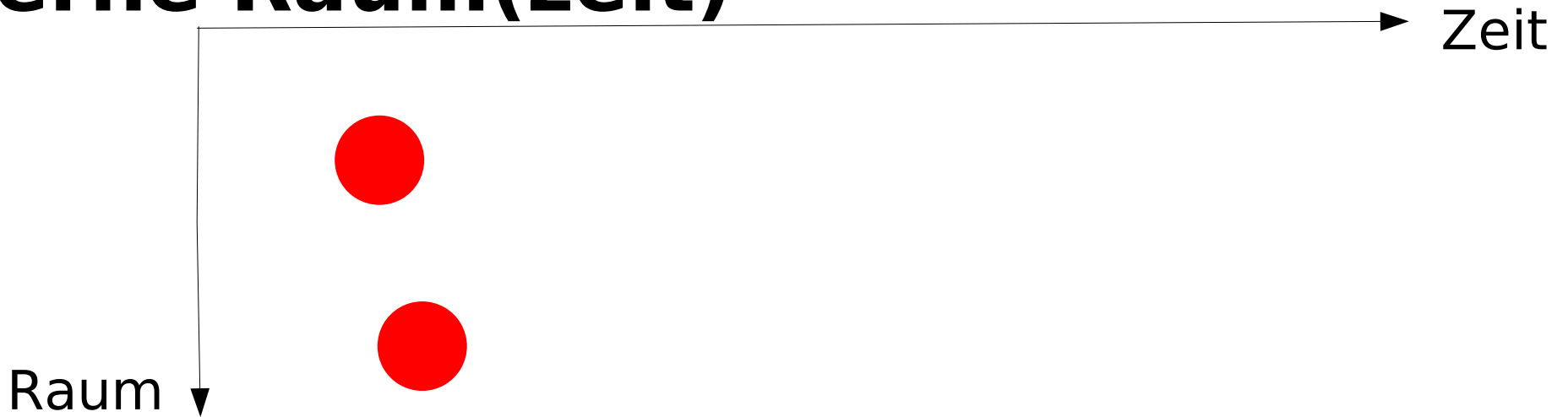
Externe Raum(zeit)

Zeit

Raum

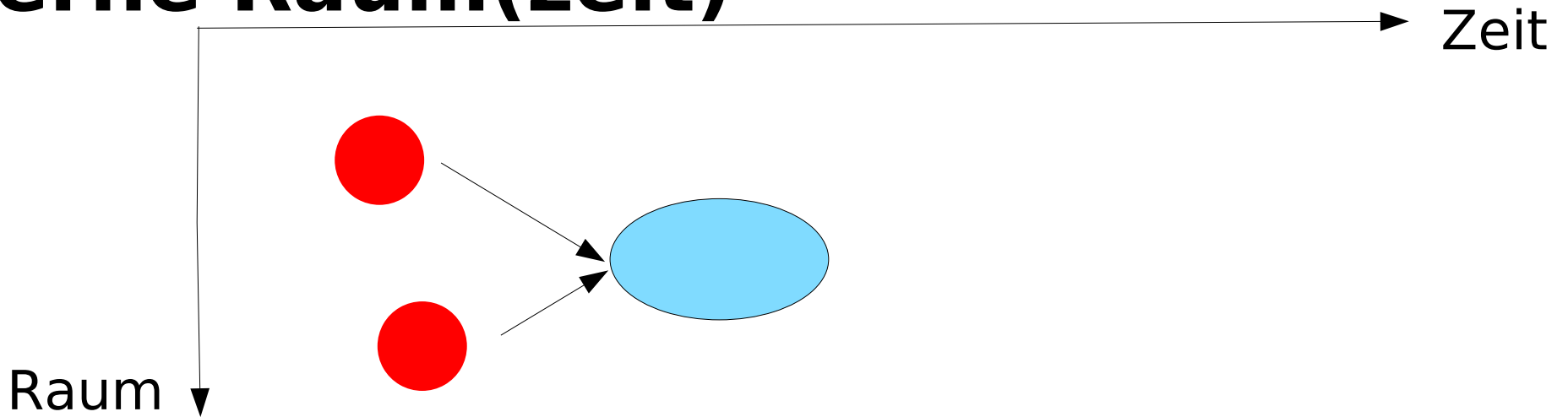
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt

Externe Raum(zeit)



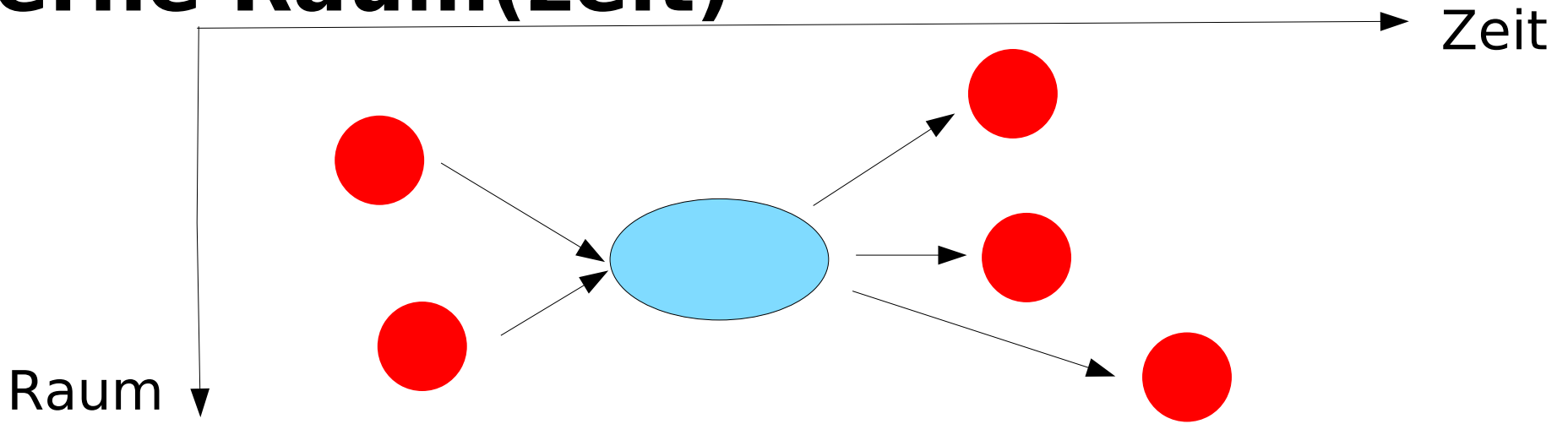
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt
- Die Raum(zeit) ist dabei nur eine Bühne, in der Teilchenphysik geschieht, und nimmt nicht aktiv teil

Externe Raum(zeit)



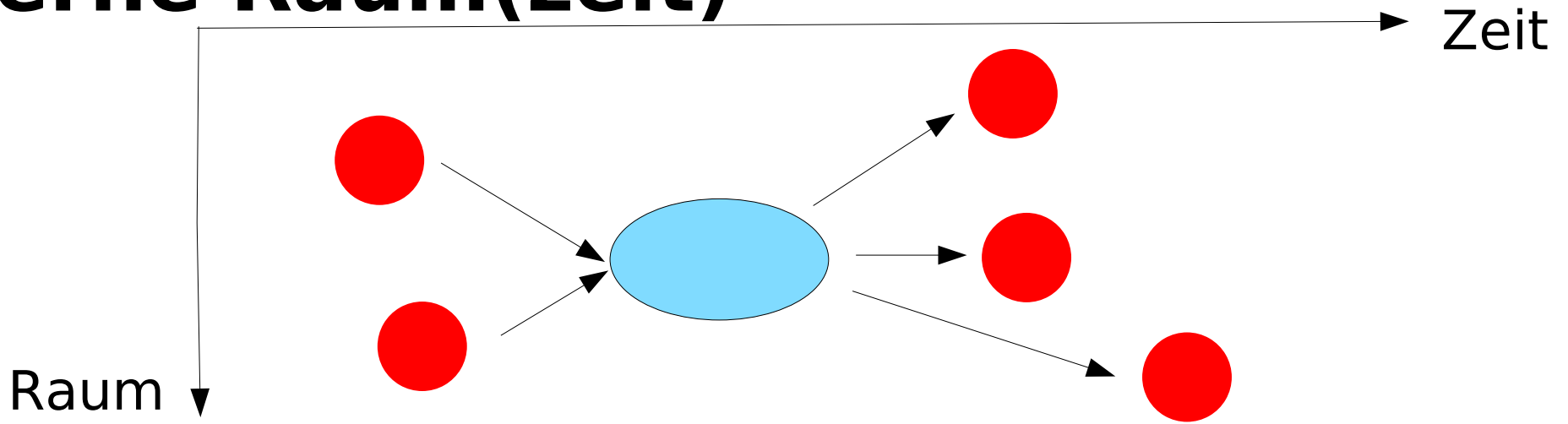
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt
- Die Raum(zeit) ist dabei nur eine Bühne, in der Teilchenphysik geschieht, und nimmt nicht aktiv teil

Externe Raum(zeit)



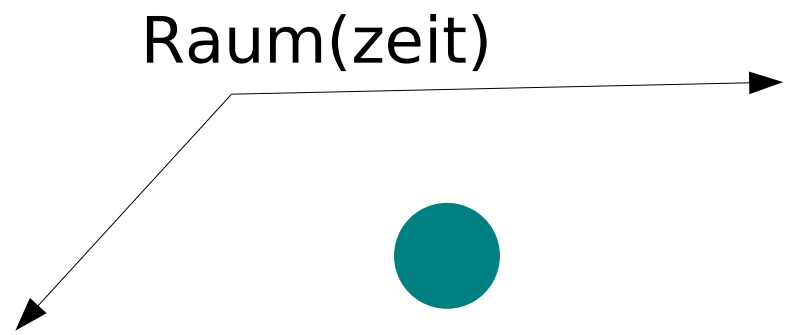
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt
- Die Raum(zeit) ist dabei nur eine Bühne, in der Teilchenphysik geschieht, und nimmt nicht aktiv teil

Externe Raum(zeit)



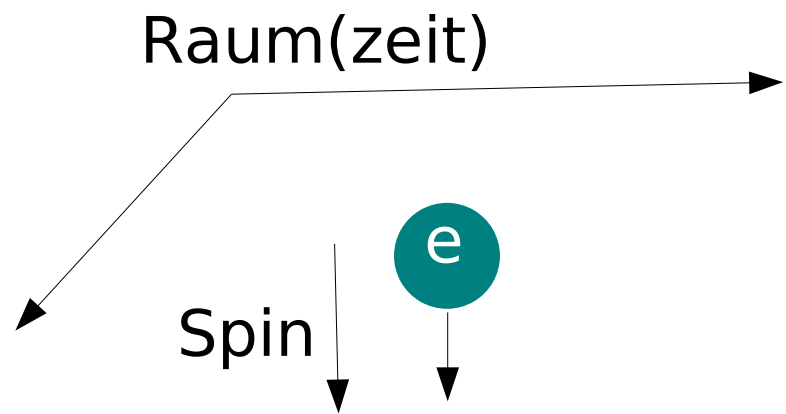
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt
- Die Raum(zeit) ist dabei nur eine Bühne, in der Teilchenphysik geschieht, und nimmt nicht aktiv teil
- Daher wird Raum(zeit) als “externer” Raum(zeit) bezeichnet

Interner Raum



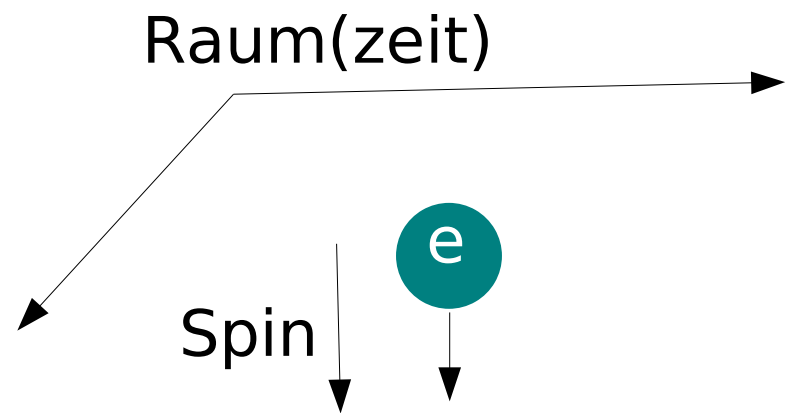
- Teilchen haben mehr Eigenschaften als Ort und Geschwindigkeit

Interner Raum



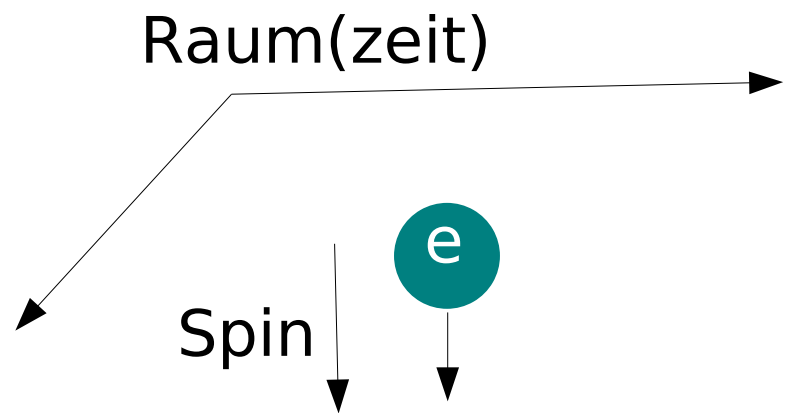
- Teilchen haben mehr Eigenschaften als Ort und Geschwindigkeit
- Beispiel: Spin
 - Bestimmt Eigenschaften unter Drehungen und Gültigkeit des Pauliprinzips
 - Elektronen haben Spin $\frac{1}{2}$
 - Der Spin hat eine Richtung

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

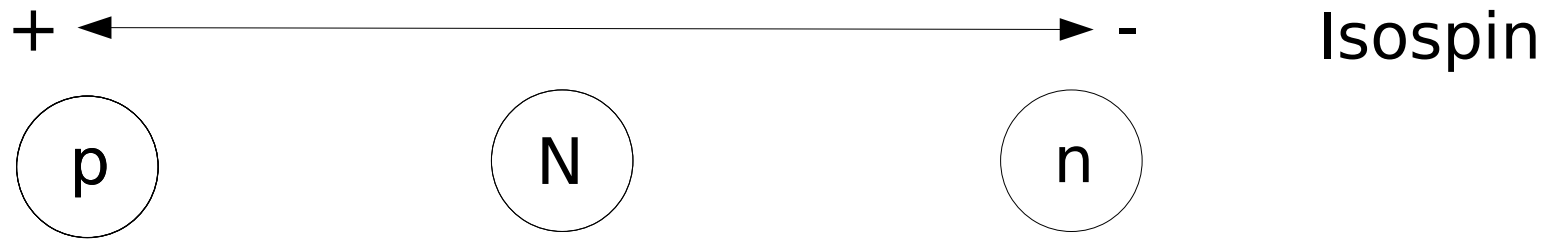
p

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

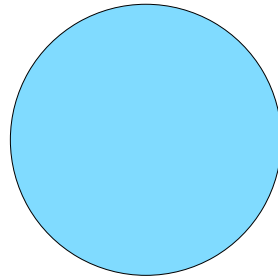
Was ist eine Symmetrie?

Was ist eine Symmetrie?

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

Was ist eine Symmetrie?

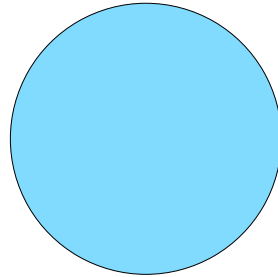
- Eine Symmetrie ist eine Veränderung, die keine messbaren Auswirkungen hat



Dies ist ein Kreis

Was ist eine Symmetrie?

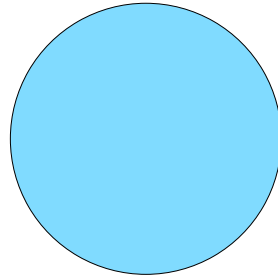
- Eine Symmetrie ist eine Veränderung, die keine messbaren Auswirkungen hat



Dies ist ein Kreis
Er wurde um 30° gedreht

Was ist eine Symmetrie?

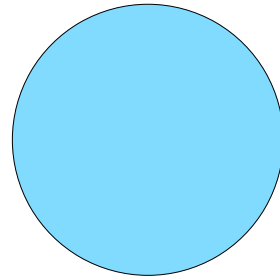
- Eine Symmetrie ist eine Veränderung, die keine messbaren Auswirkungen hat



Dies ist ein Kreis
Er wurde um 30° gedreht
Das ist nicht meßbar
Er hat eine Drehsymmetrie

Was ist eine Symmetrie?

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

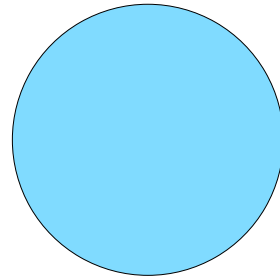


Dies ist ein Kreis
Er wurde um 30° gedreht
Das ist nicht meßbar
Er hat eine Drehsymmetrie

- 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° 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

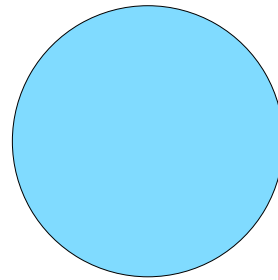
Warum sind Symmetrien wichtig?

Warum sind Symmetrien wichtig?

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

Warum sind Symmetrien wichtig?

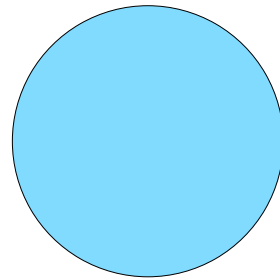
- Symmetrie führen zu Erhaltungsgrößen
 - Kontinuierliche Symmetrien: Satz von Noether
 - Bei diskreten Symmetrien nicht immer der Fall



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



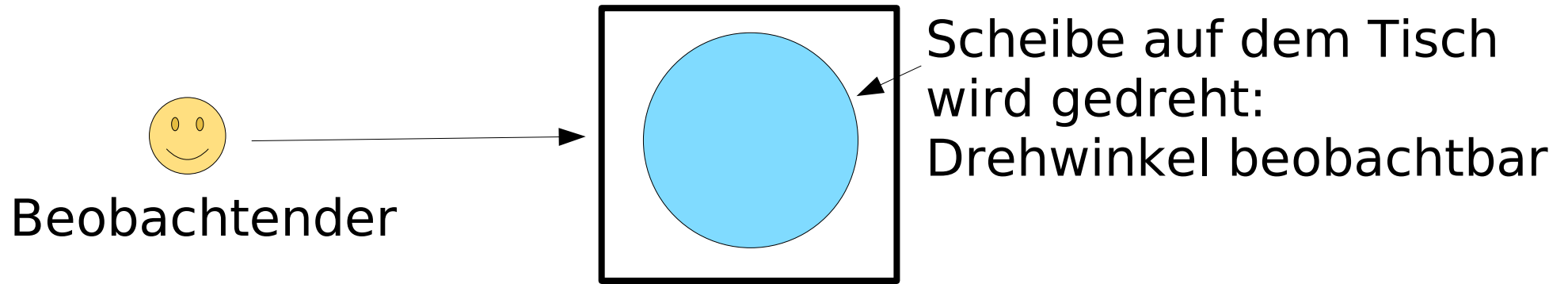
Drehung um Achse senkrecht zur Folie ist eine Symmetrie: Drehimpuls um die Drehachse ist erhalten

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

Was Symmetrien nicht sind

Was Symmetrien nicht sind

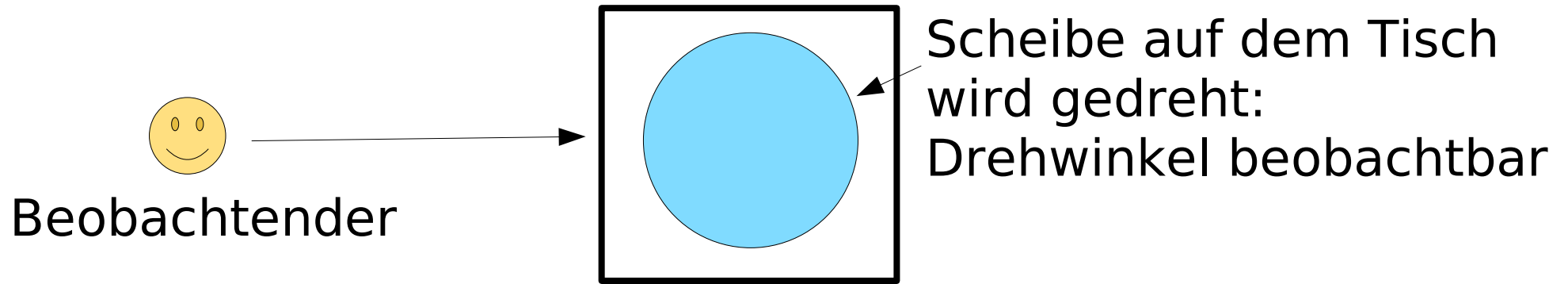
- Eine Symmetrie ist nicht:



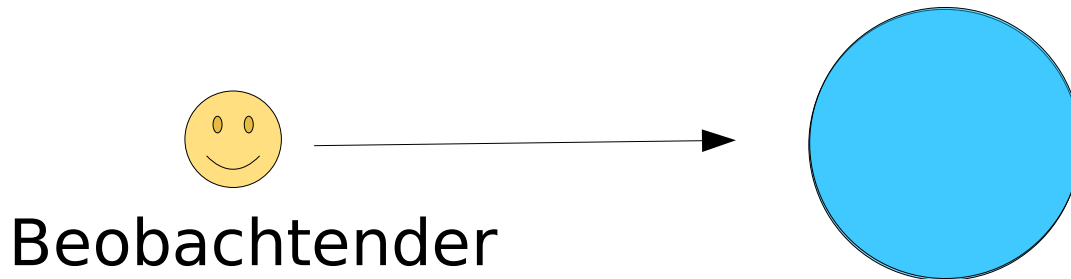
- Eine Symmetrie ist:

Was Symmetrien nicht sind

- Eine Symmetrie ist nicht:

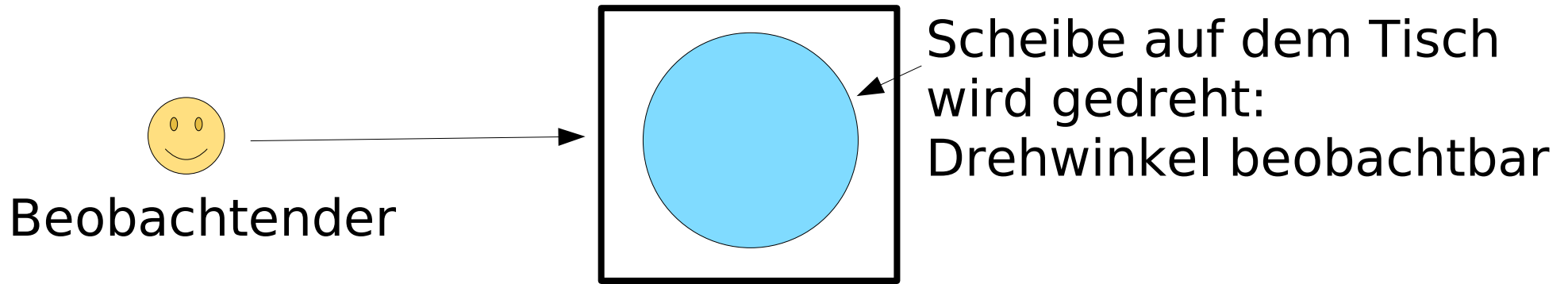


- Eine Symmetrie ist:

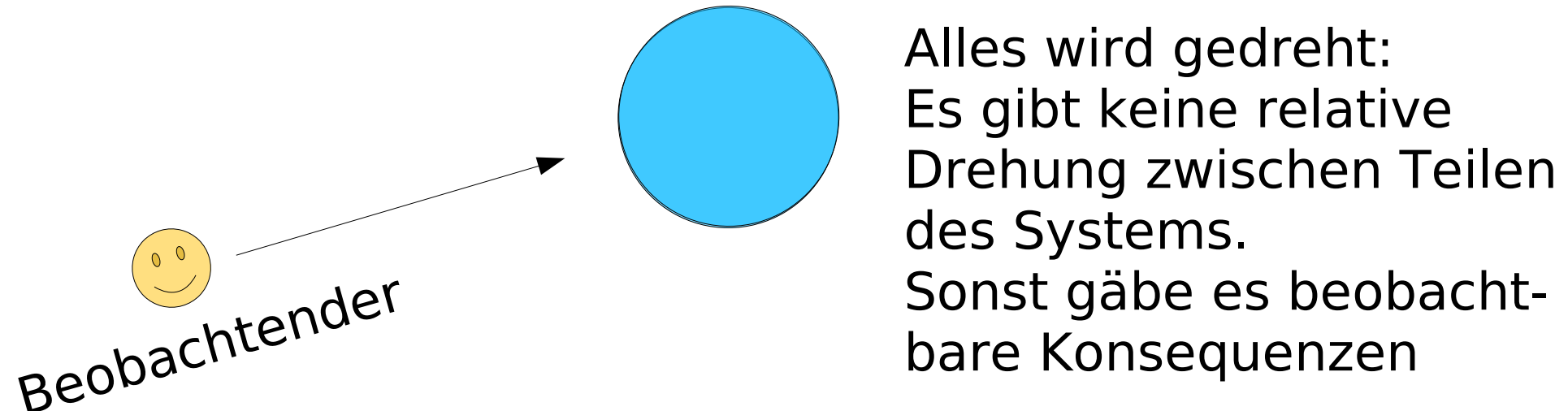


Was Symmetrien nicht sind

- Eine Symmetrie ist nicht:

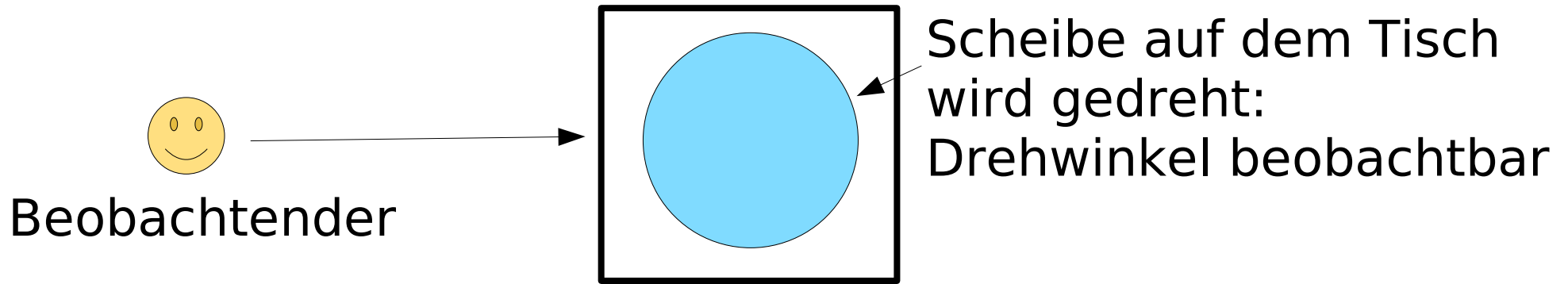


- Eine Symmetrie ist:



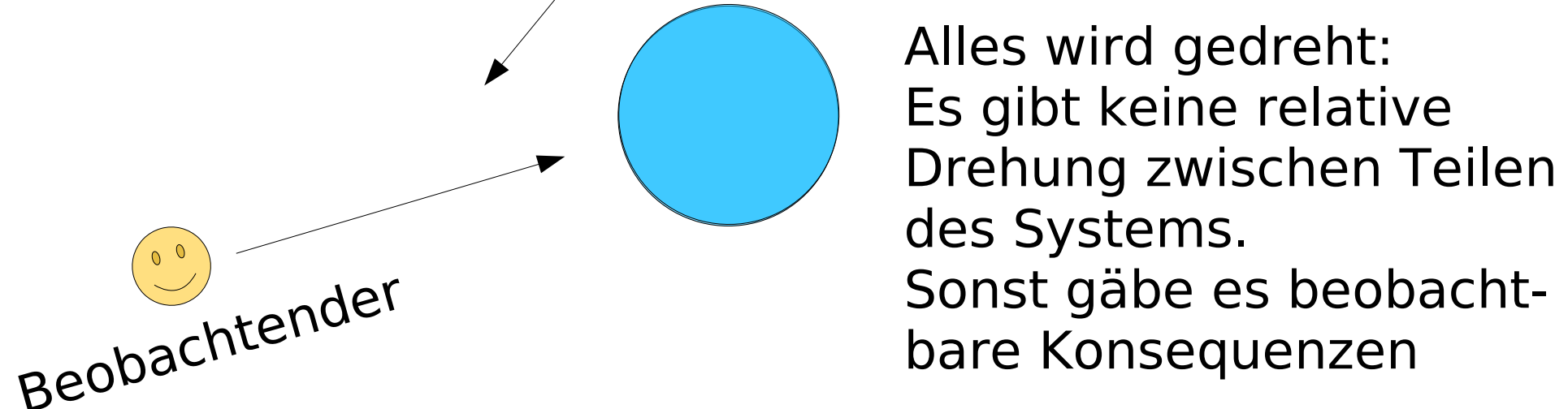
Was Symmetrien nicht sind

- Eine Symmetrie ist nicht:

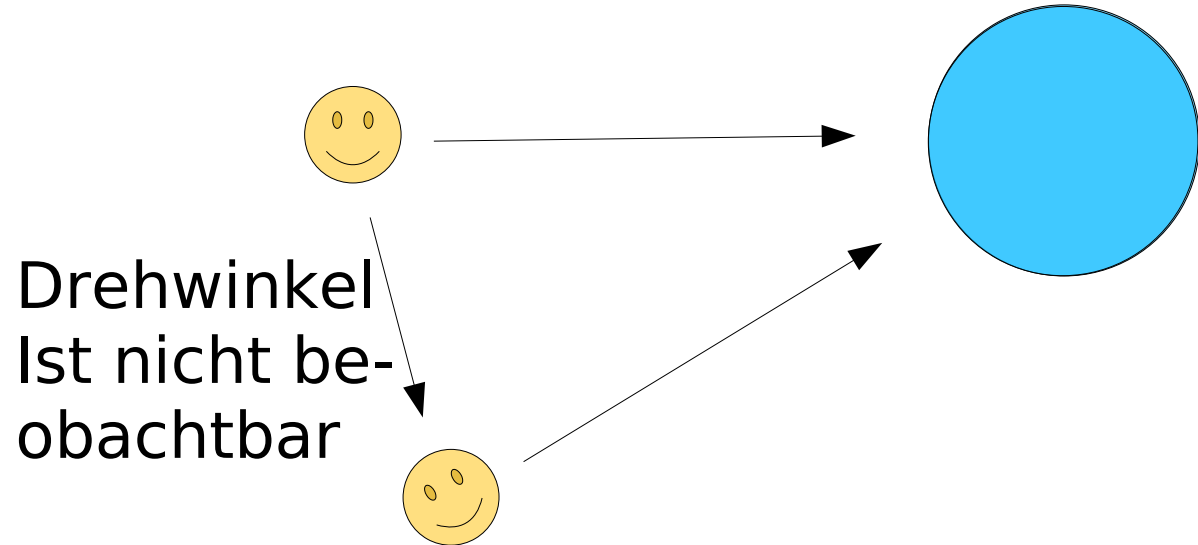


Hier sieht man was, weil auch die Folien gedreht werden müsste!

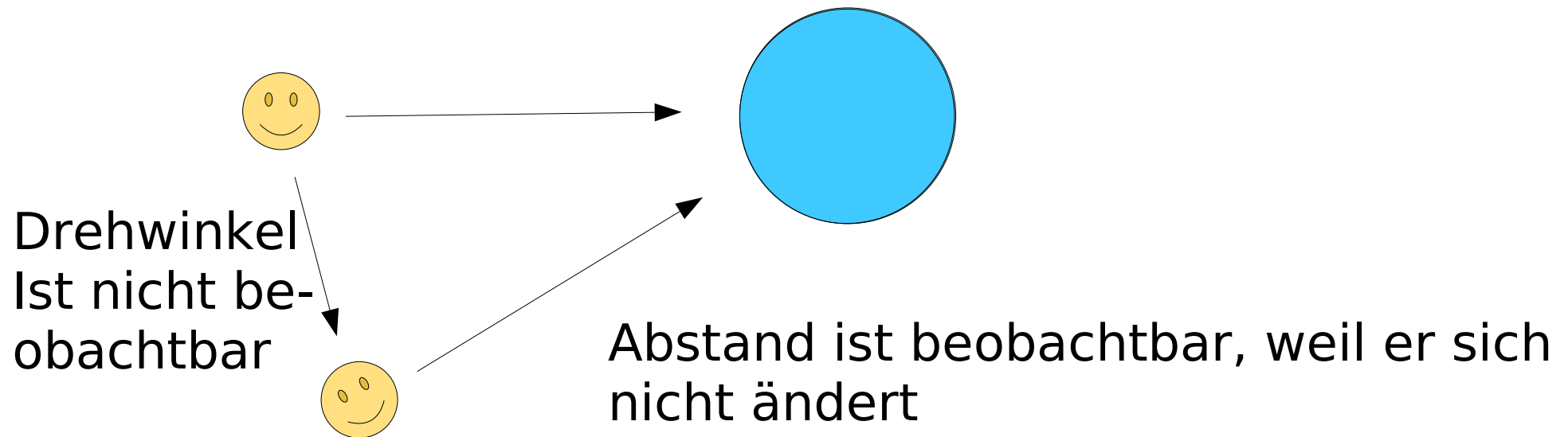
- Eine Symmetrie ist:



Wie man über Beobachtungen redet

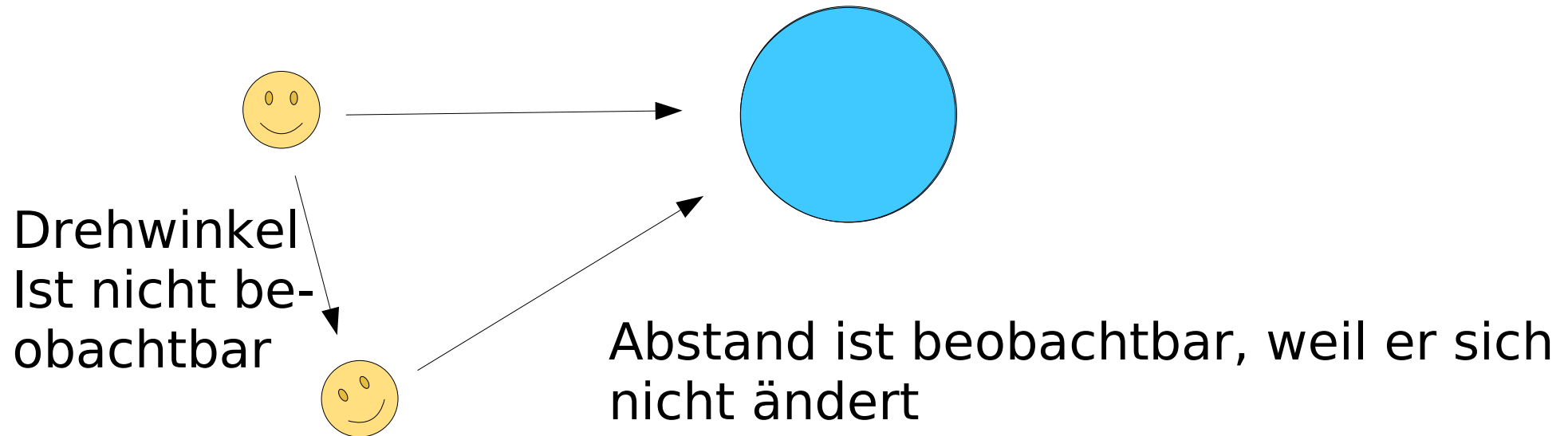


Wie man über Beobachtungen redet



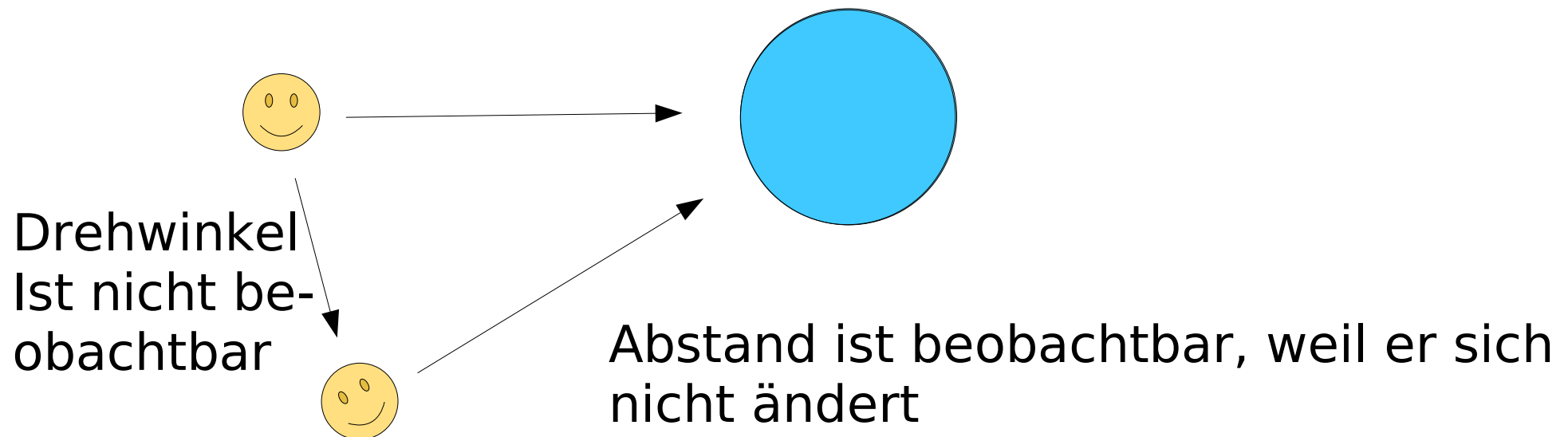
Wie man über Beobachtungen redet

- 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?

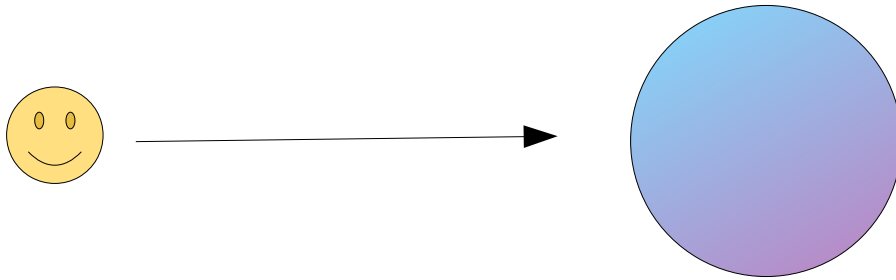
- Wenn man sie nicht beobachten kann, warum dann überhaupt Symmetrien?
 - Technisch: Oft notwendig um eine praktikable mathematische Beschreibung zu haben
 - Heuristik: Viele scheinbare Symmetrien in der Natur
 - Schneeflocke: Eine alleine ist symmetrisch, zwei nur, wenn man sie gleichzeitig dreht etc.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

Warum dann Symmetrien?

- Symmetriebrechung

Warum dann Symmetrien?

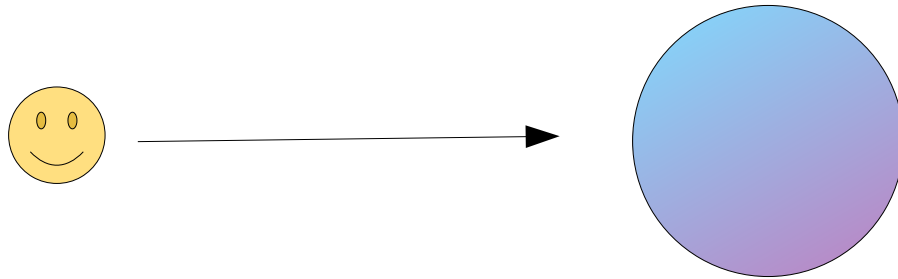
- Symmetriebrechung



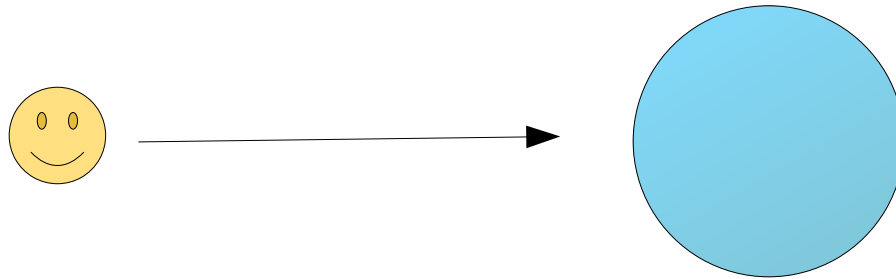
Unterschiedliche Färbung
bricht die Symmetrie:
Drehwinkel messbar

Warum dann Symmetrien?

- Symmetriebrechung



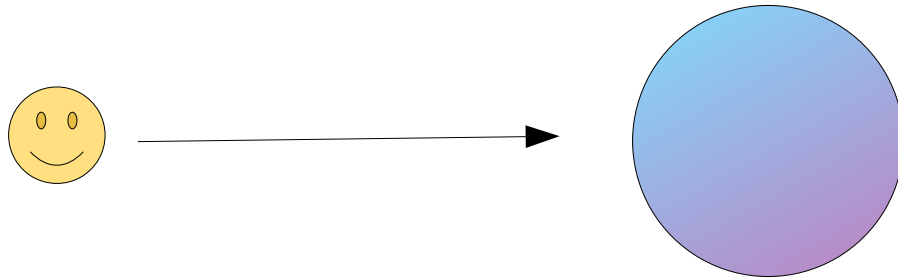
Unterschiedliche Färbung
bricht die Symmetrie:
Drehwinkel messbar



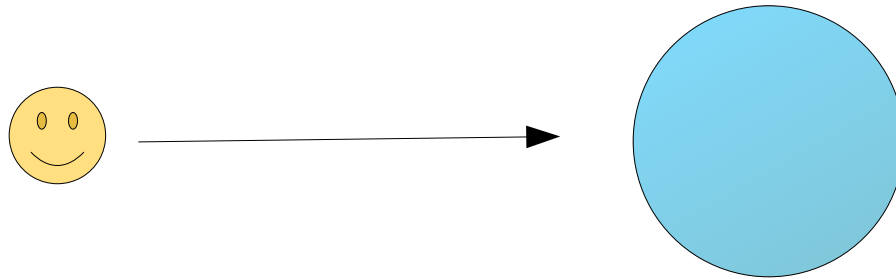
Oft ist die Brechung ganz
schwach, und vieles
(Erhaltungsgröße!) ist fast
wie mit Symmetrien -
technisch hilfreich

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

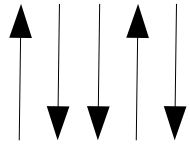
Geschichten und Symmetrien

- Geschichten sind explizite Realisierungen eines Systems

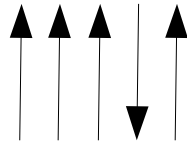
Geschichten und Symmetrien

- Geschichten sind explizite Realisierungen eines Systems

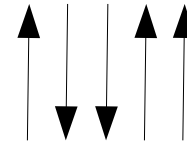
Geschichte 1



Geschichte 2



Geschichte 3

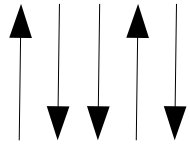


....

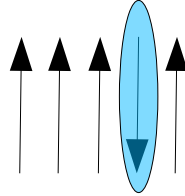
Geschichten und Symmetrien

- Geschichten sind explizite Realisierungen eines Systems

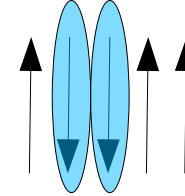
Geschichte 1



Geschichte 2



Geschichte 3



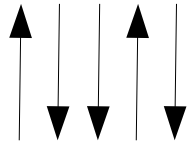
....

Einzelne Geschichten sind nicht völlig symmetrisch

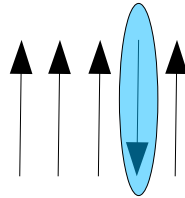
Geschichten und Symmetrien

- Geschichten sind explizite Realisierungen eines Systems

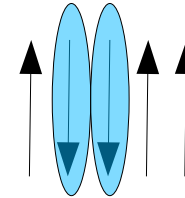
Geschichte 1



Geschichte 2



Geschichte 3



....

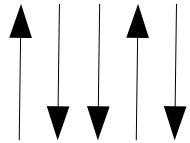
Einzelne Geschichten sind nicht völlig symmetrisch

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

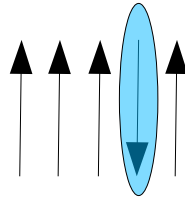
Geschichten und Symmetrien

- Geschichten sind explizite Realisierungen eines Systems

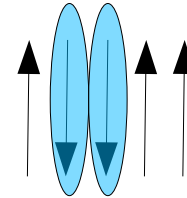
Geschichte 1



Geschichte 2



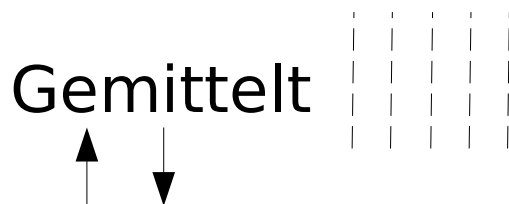
Geschichte 3



....

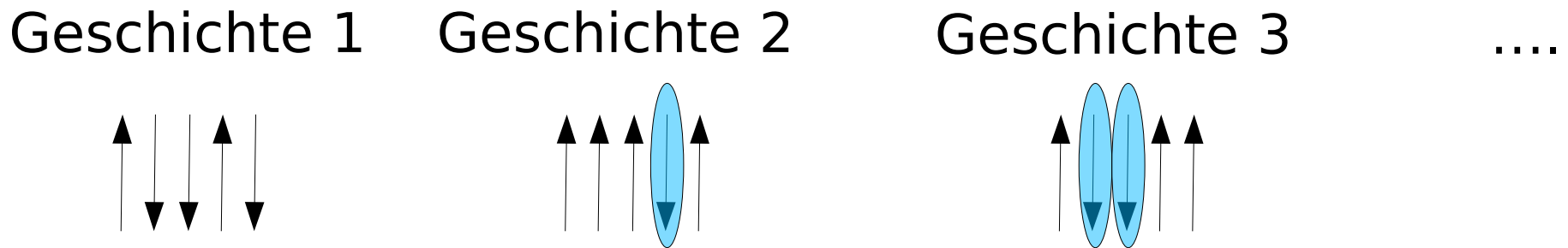
Einzelne Geschichten sind nicht völlig symmetrisch

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



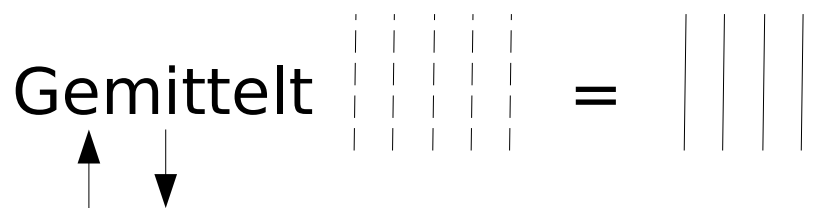
Geschichten und Symmetrien

- Geschichten sind explizite Realisierungen eines Systems



Einzelne Geschichten sind nicht völlig symmetrisch

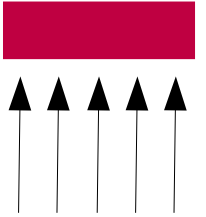
Wenn aber die Wichtungsfunktion symmetrisch ist, ist der Mittelwert immer symmetrisch



Der Mittelwert hat keine Präferenz und ist daher symmetrisch!

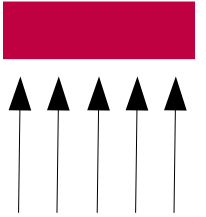
Spontane Symmetriebrechung

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



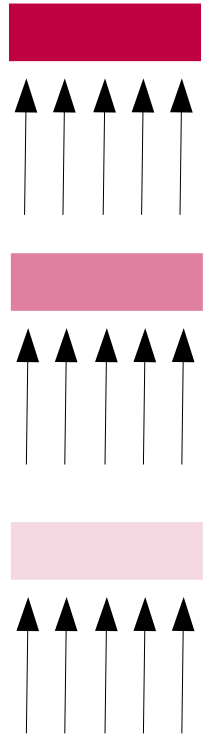
Spontane Symmetriebrechung

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



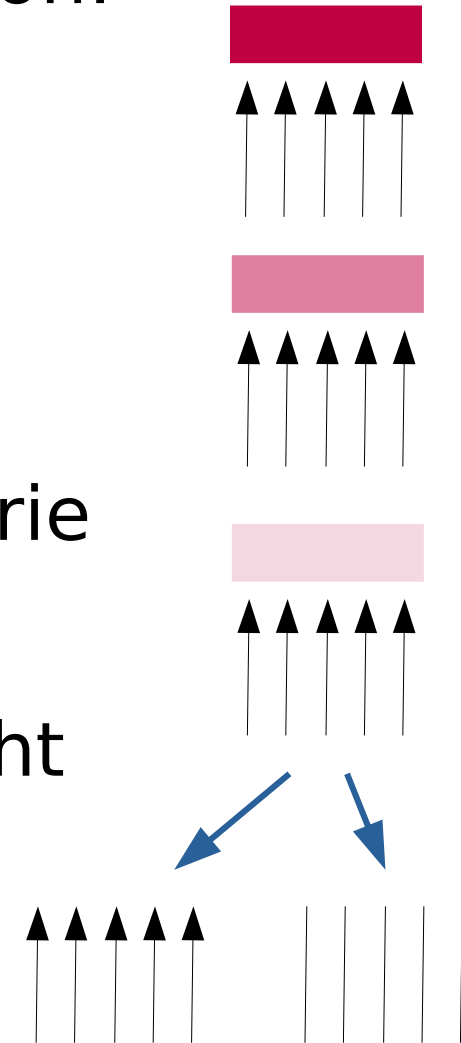
Spontane Symmetriebrechung

- 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



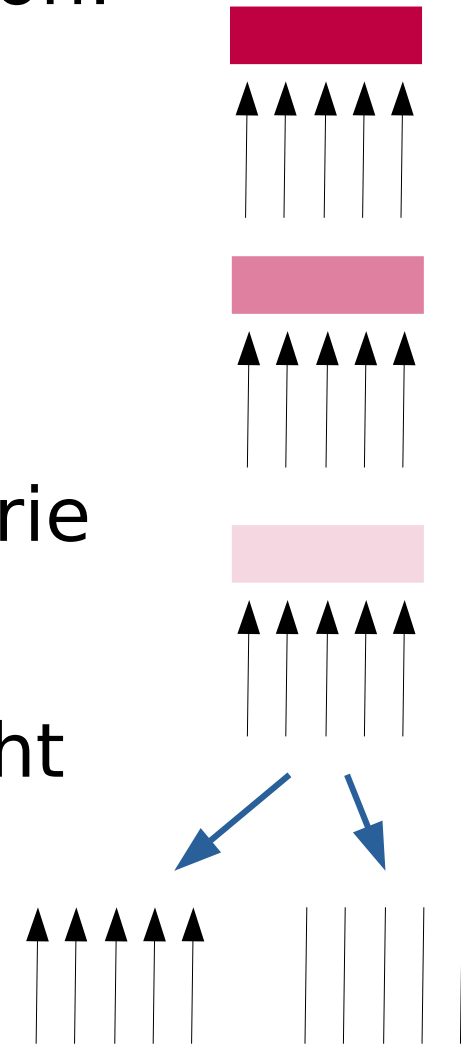
Spontane Symmetriebrechung

- 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



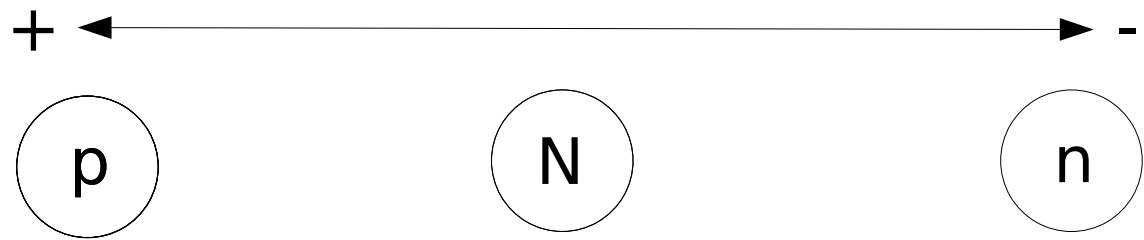
Spontane Symmetriebrechung

- 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



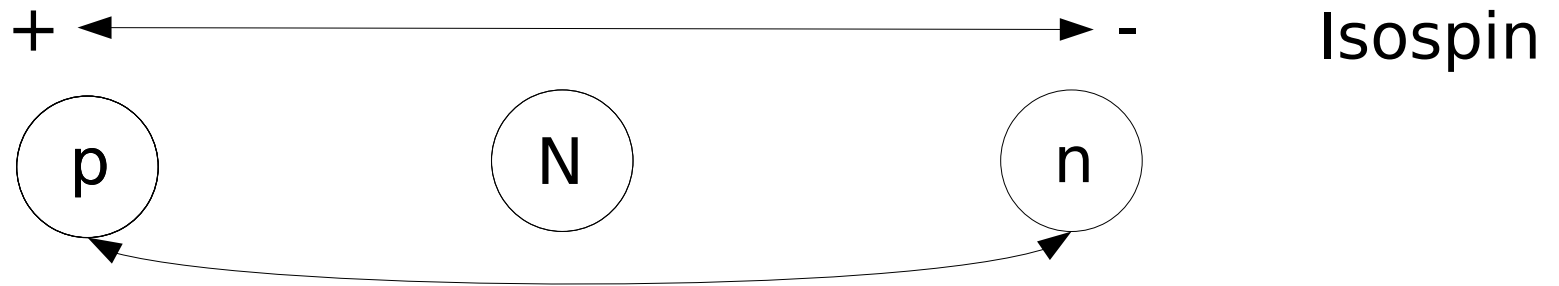
- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?
- Keiner

Interner Raum



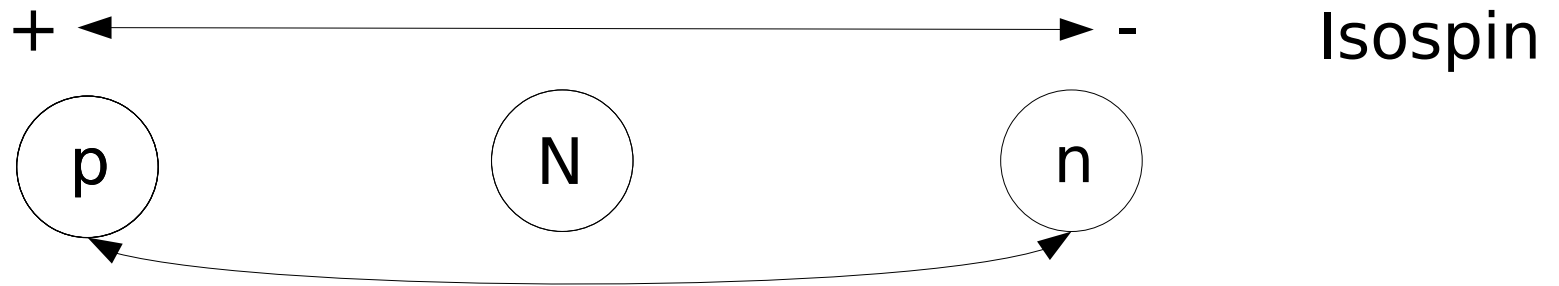
- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?
- Keiner
- Das System unterscheidet dann nicht mehr zwischen Protonen und Neutronen

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

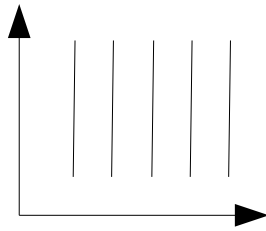


- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?
- Keiner
- Das System unterscheidet dann nicht mehr zwischen Protonen und Neutronen
- Können ausgetauscht werden, ohne dass sich etwas ändert
- Was Proton und Neutron genannt wird, ist egal
- Nur ein Koordinatensystem
-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

Symmetrien und Koordinatensysteme

Symmetrien und Koordinatensysteme

Richtung 2

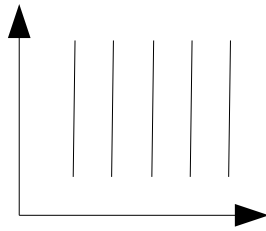


System ist in Bezug auf Richtung 2
Symmetrisch, aber nicht Richtung 1

Richtung 1

Symmetrien und Koordinatensysteme

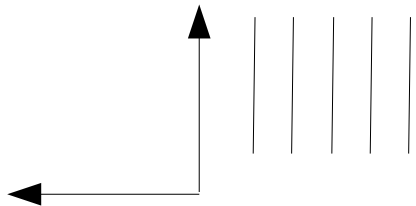
Richtung 2



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

Koordinatensystem wird um 90° gekippt

Richtung 1

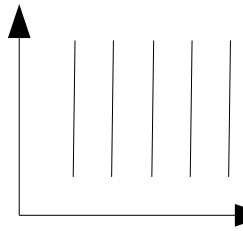


System ist in Bezug auf Richtung 1
Symmetrisch, aber nicht Richtung 2

Richtung 2

Symmetrien und Koordinatensysteme

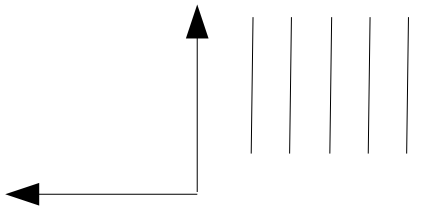
Richtung 2



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

Koordinatensystem wird um 90° gekippt

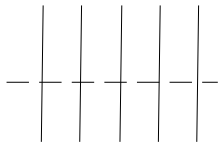
Richtung 1



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

Richtung 2

Entferne
Koordinaten



System symmetrisch gegenüber
Spiegelung am Mittelpunkt

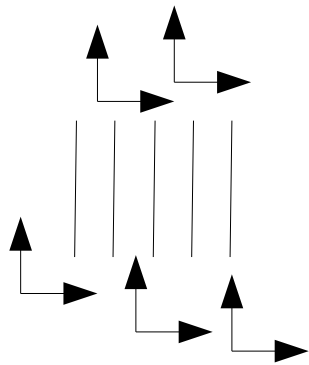
Koordinaten wurden menschengemacht, Symmetrie nicht - Symmetrien müssen unabhängig sein!

Lokale Symmetrien

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

Lokale Symmetrien

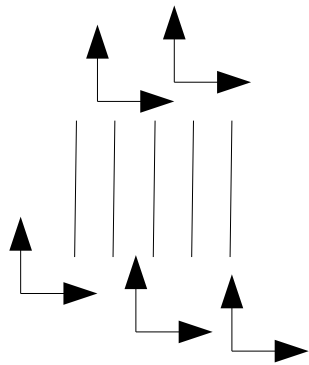
- Bis jetzt nur globale Änderungen der Richtungen – geht das lokal? Ja!



Bestimmung der Orientierung lokal immer in einem anderen, beliebigen Koordinatensystem

Lokale Symmetrien

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

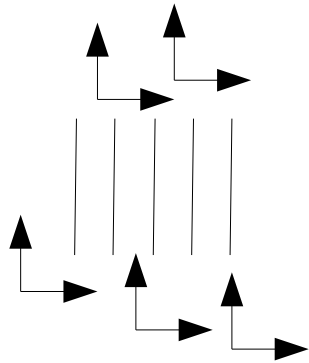


Bestimmung der Orientierung lokal immer in einem anderen, beliebigen Koordinatensystem

- 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

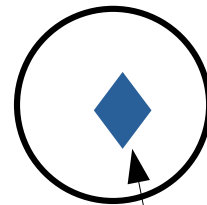
Beispiel: Klassische Elektrodynamik

- 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

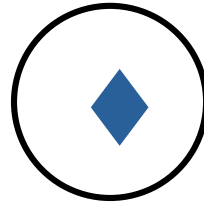


(Unendlich lange)
stromdurchflossene Spule

Magnetfeld im Innern der Spule,
aber nicht draussen

Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

 Quelle

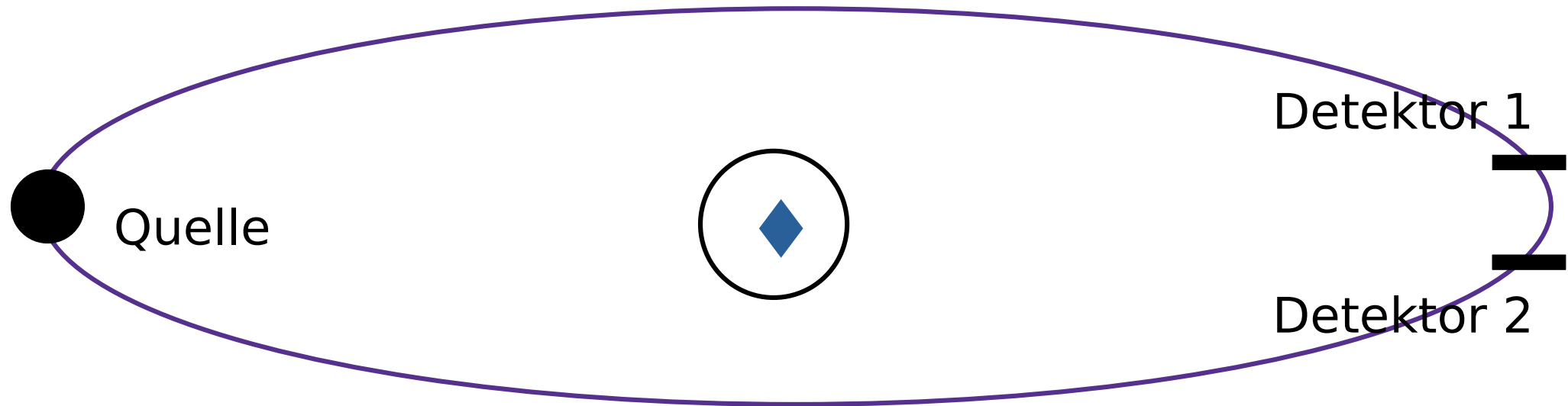


Detektor 1 

Detektor 2 

Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

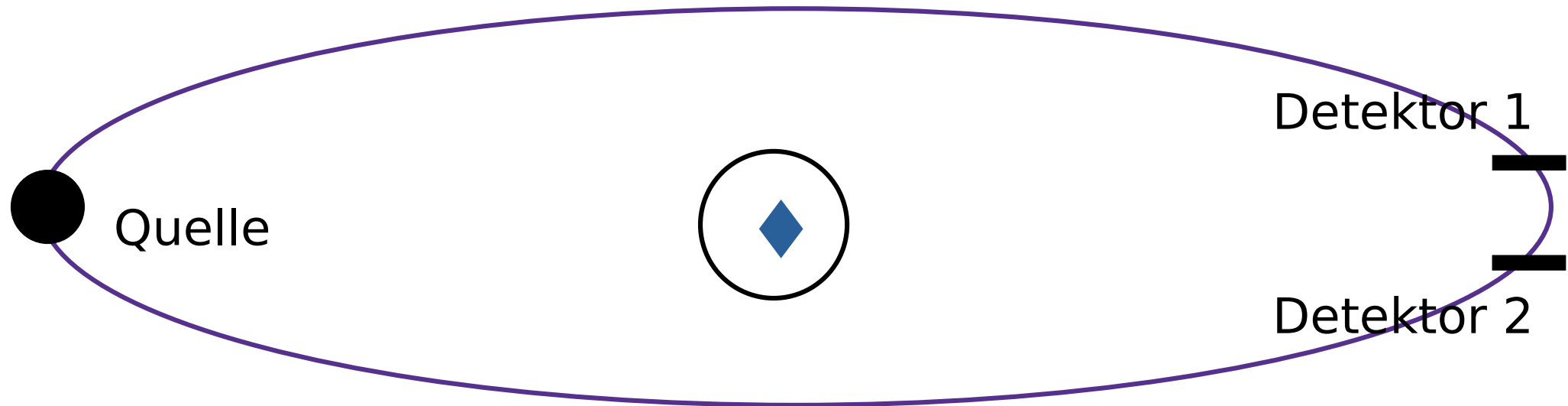
Bahn eines Elektrons



Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

Bahn eines Elektrons

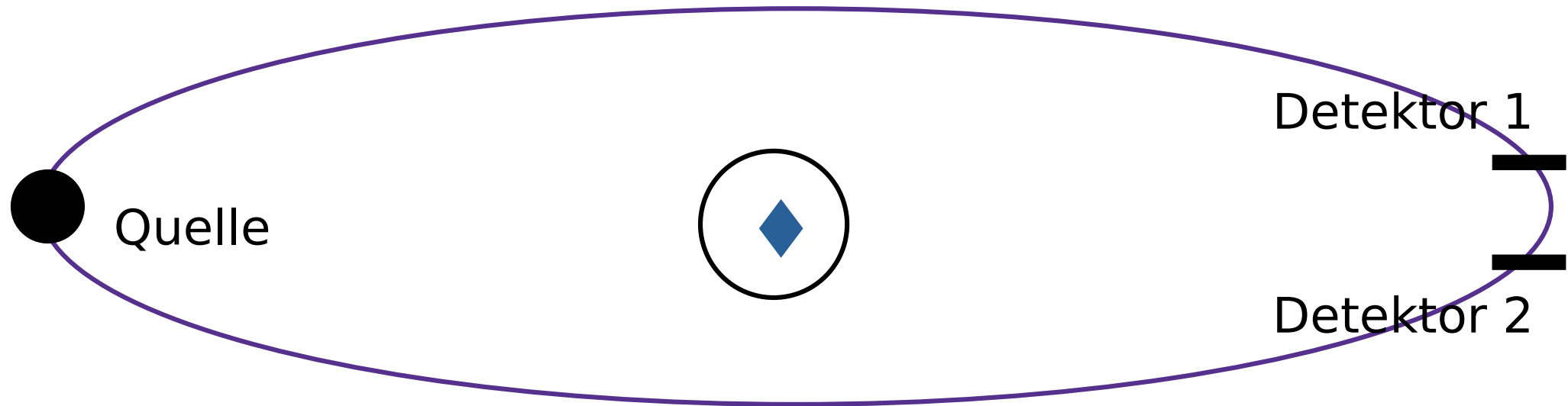
Klassisch wird das Magnetfeld ignoriert



Rate an Detektor 1 gleich Rate an Detektor 2

Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

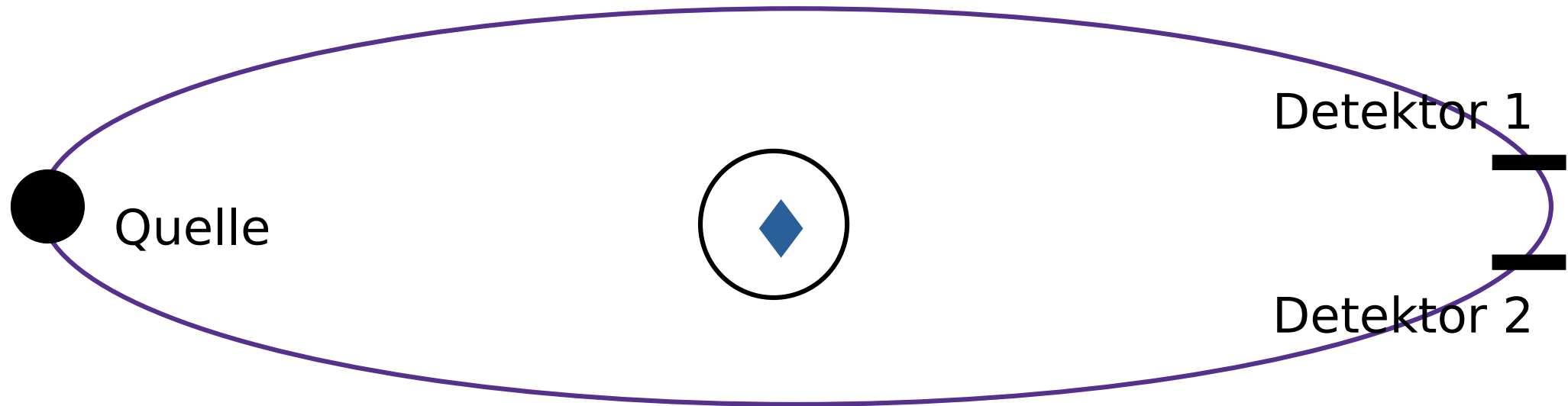
Bahn eines Elektrons
Klassisch wird das Magnetfeld ignoriert
Quantenmechanisch kommt es zu
einer Selbstinterferenz



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

Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

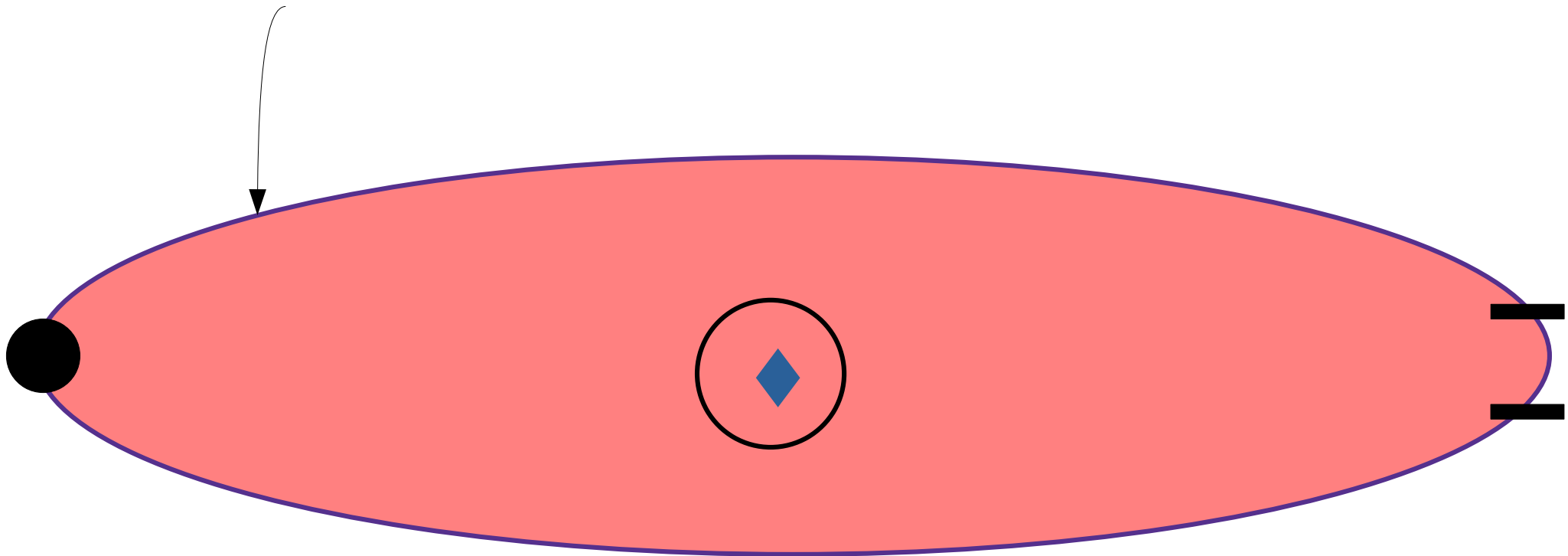
Bahn eines Elektrons
Klassisch wird das Magnetfeld ignoriert
Quantenmechanisch kommt es zu
einer Selbstinterferenz



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

Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

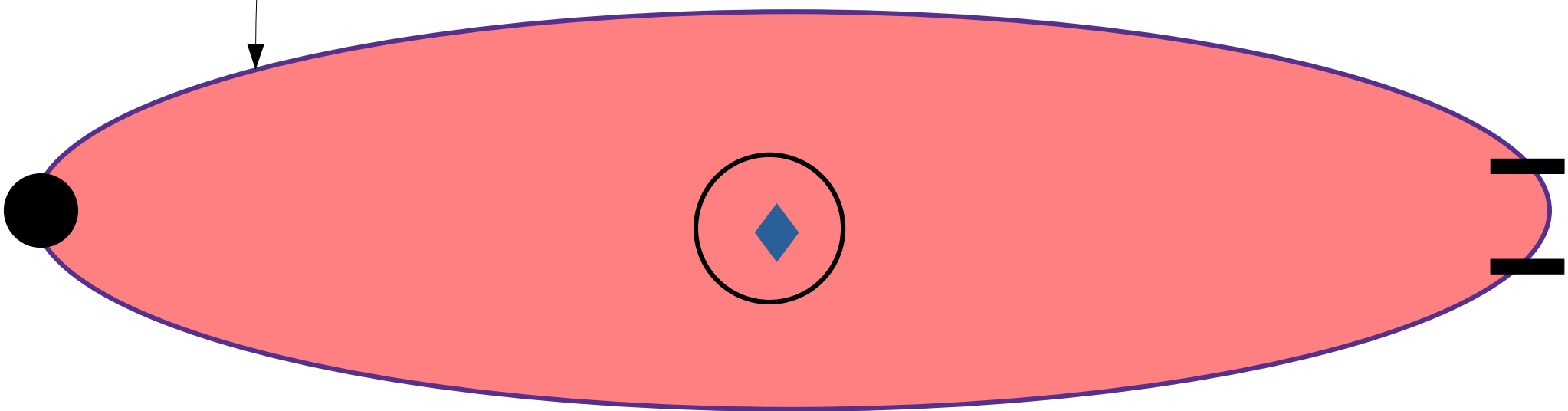
Vektorpotential überall von Null verschieden!
Kann es das sein?



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!



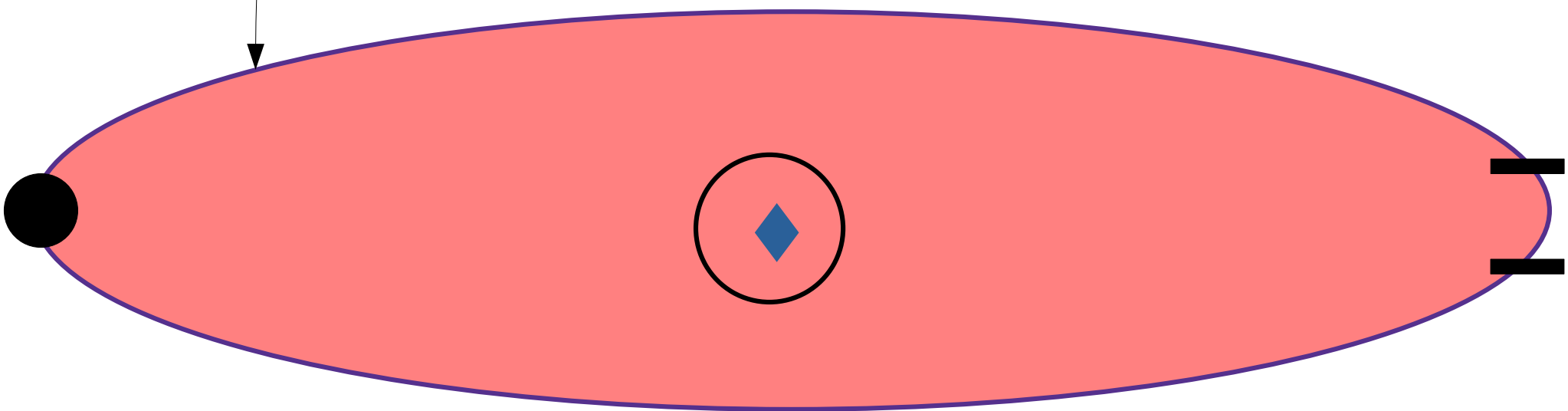
Rate an Detektor 1 **ungleich** Rate an Detektor 2
Warum?

Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

Vektorpotential überall von Null verschieden!
Kann es das sein?

Aharnov & Bohm 1950er: Ja!

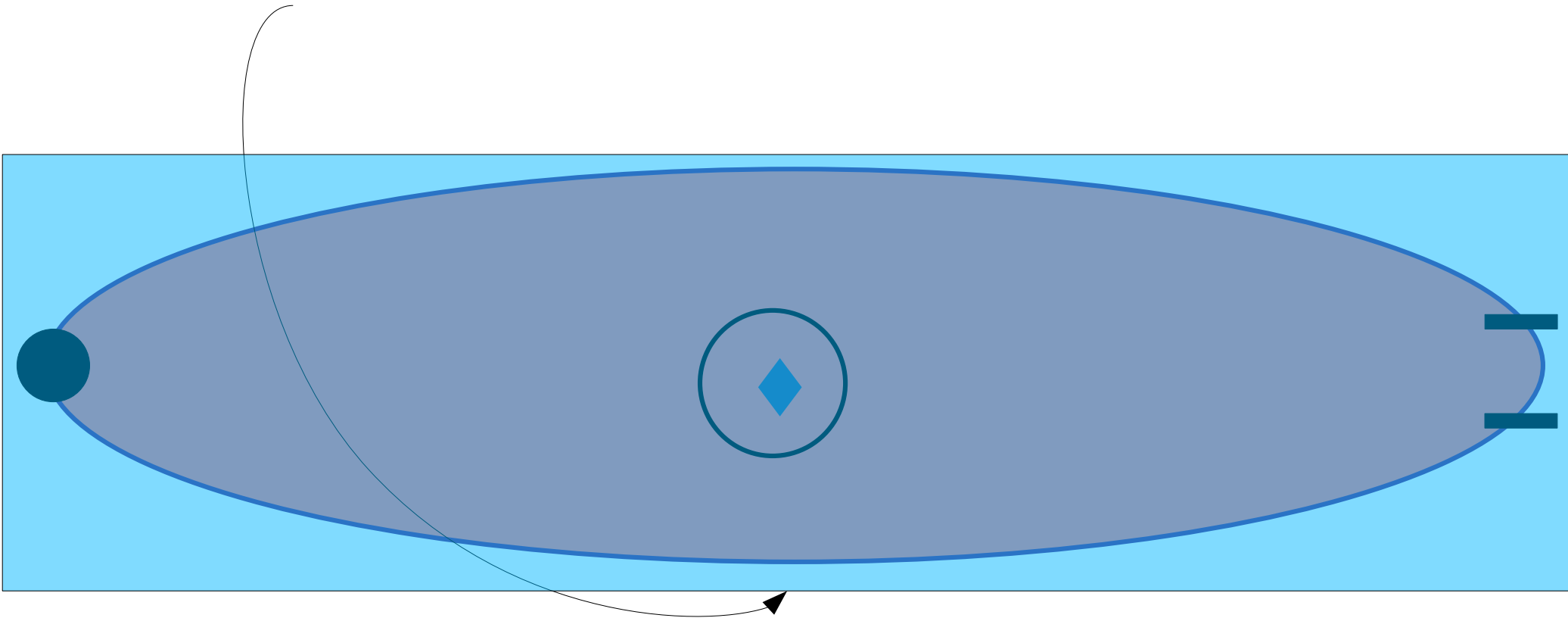
Wightmann & Strocchi 1970er: Aber Eichfeld,
kann keinen Effekt haben! Was dann?



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

Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

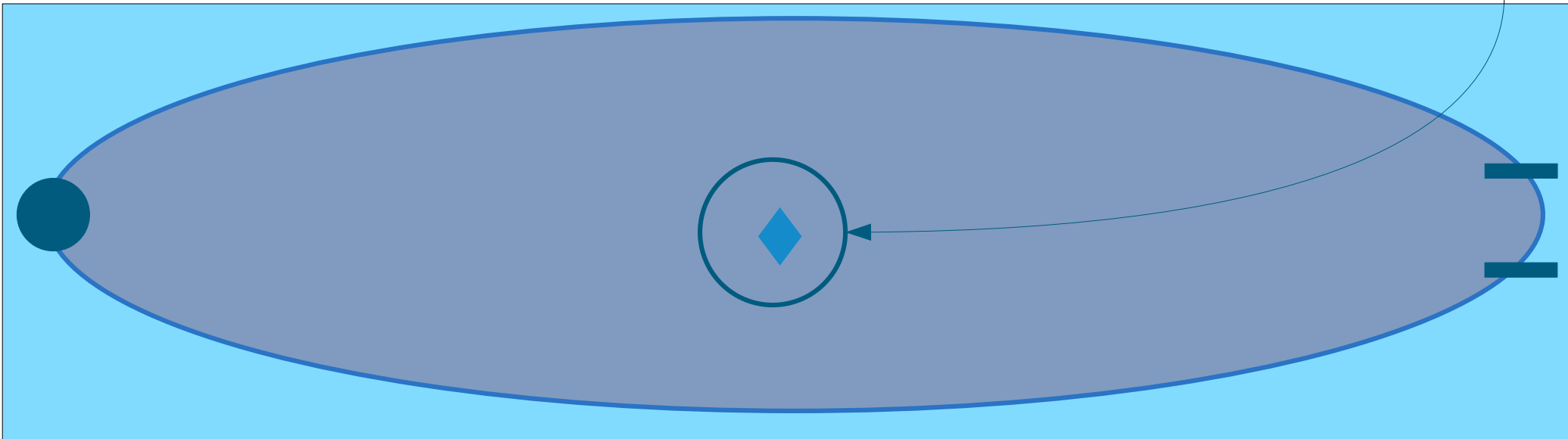
Quantenphysik: Das Elektron hat eine Wellenfunktion – die ist nicht lokal und überall



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

Konsequenz: Aharnov-Bohm-Effekt

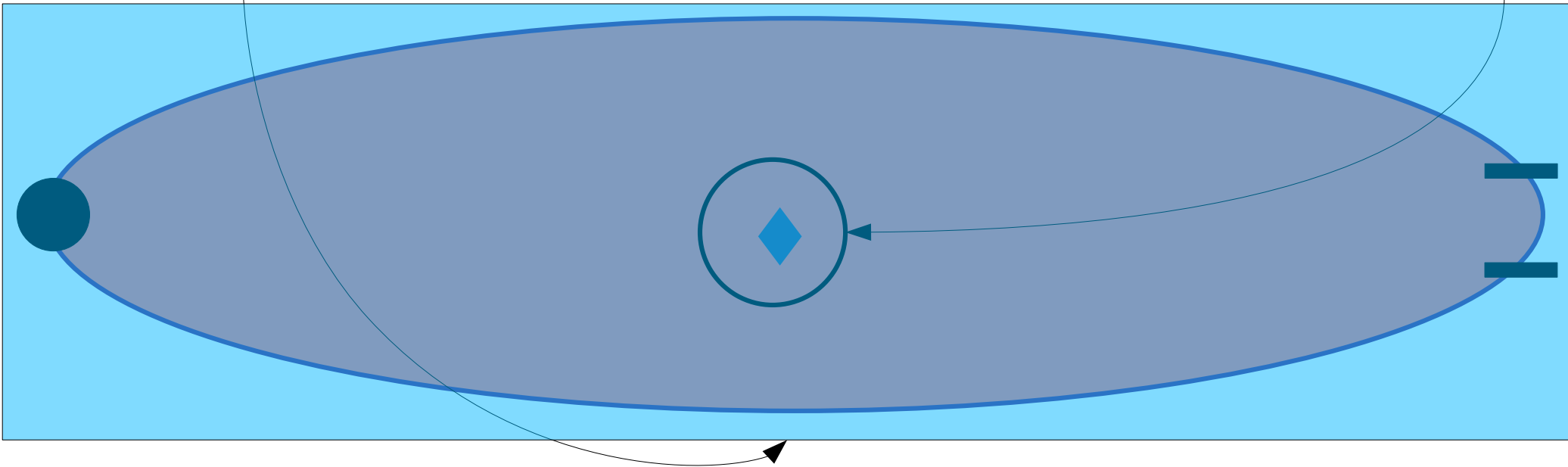
Wechselwirkung zwischen der Wellenfunktion und der Spule auf der Oberfläche der Spule -
eichinvariant!



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

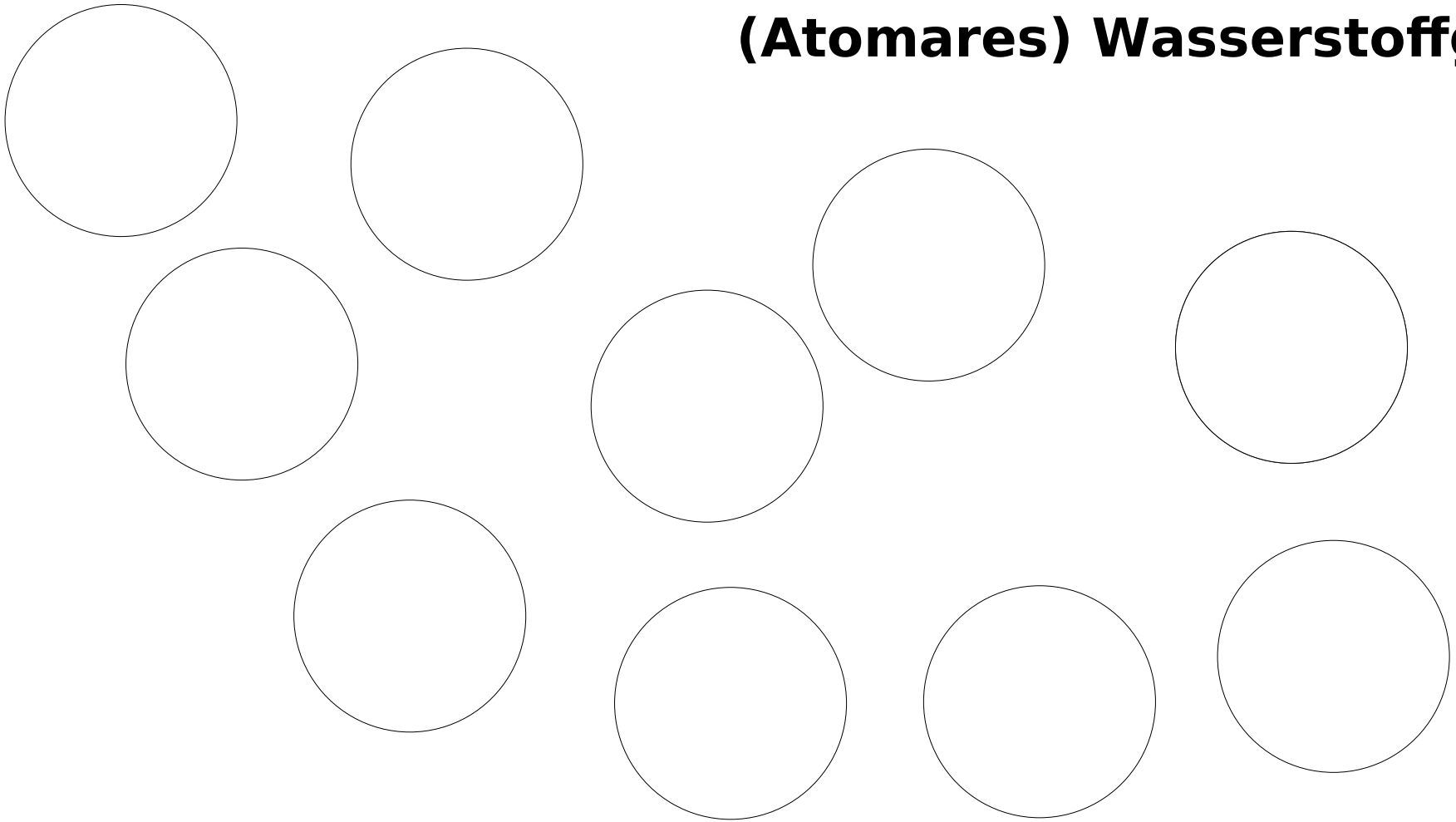
- Gewöhnliche Materie besteht aus Atomen

Die Struktur der Materie

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

Die Struktur der Materie

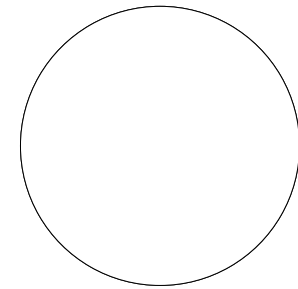
(Atomares) Wasserstoffgas



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

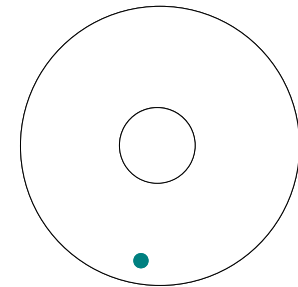
Die Struktur der Materie

Wasserstoffatom



Die Struktur der Materie

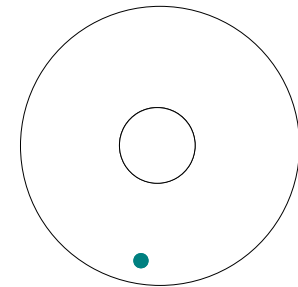
Wasserstoffatom



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

Die Struktur der Materie

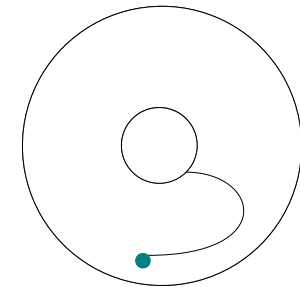
Wasserstoffatom



- 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

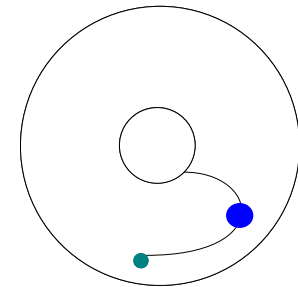
Wasserstoffatom



- 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

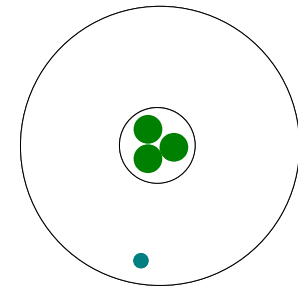
Wasserstoffatom



- 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

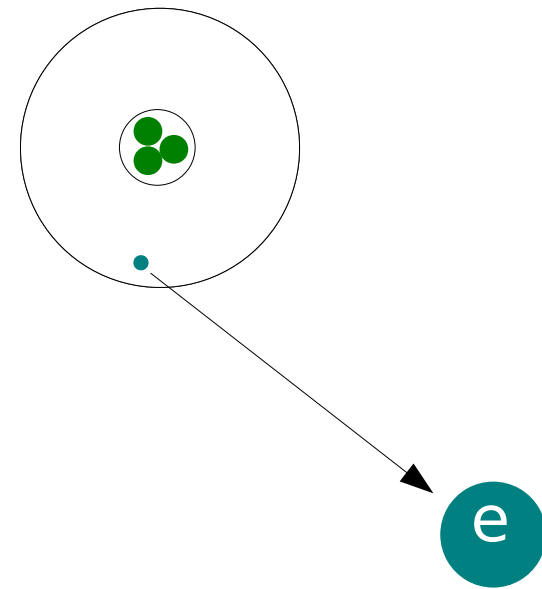
Wasserstoffatom



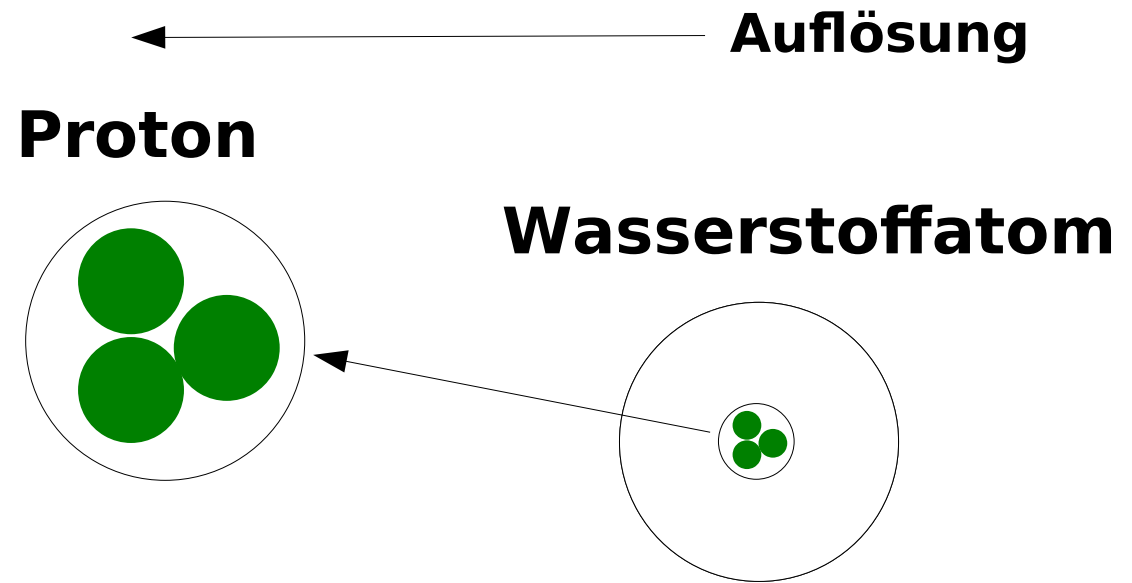
- Streuexperimente am Kern zeigen ein ähnliches Bild wie beim Atom selbst
 - Der Kern muss auch eine Struktur haben

Die Struktur der Materie

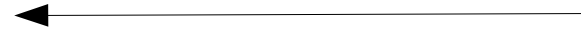
Wasserstoffatom



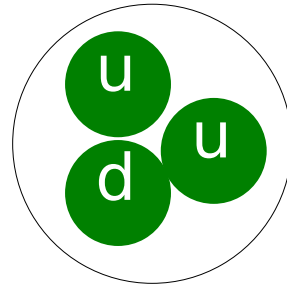
Die Struktur der Materie



Die Struktur der Materie



Proton

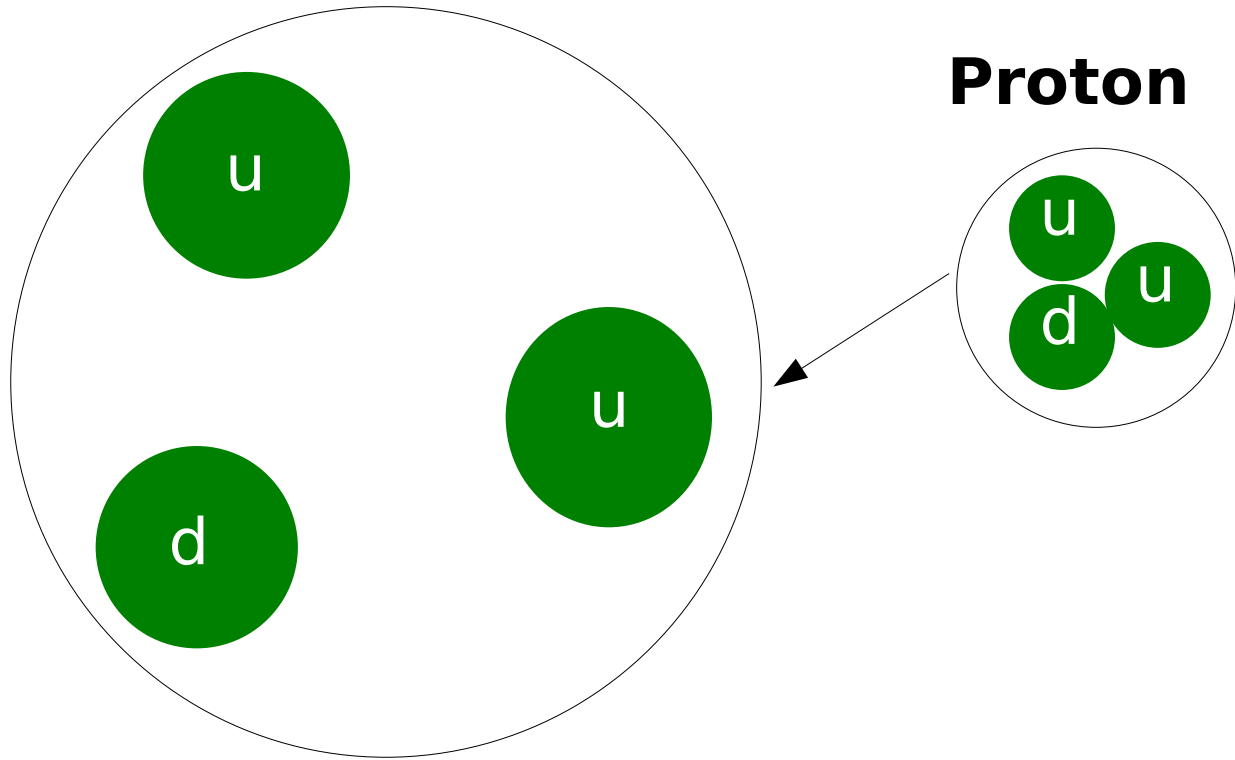


- Proton besteht aus drei Teilchen: Ein Hadron
 - **Drei Quarks**
 - **Zwei Arten: up und down quarks**



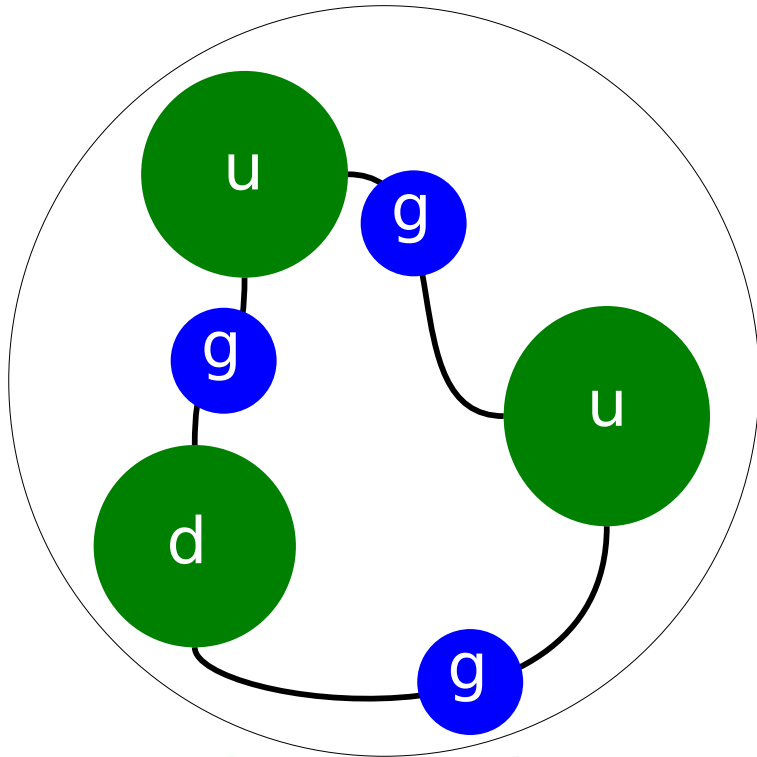
Die Struktur der Materie

Auflösung



Die Struktur der Materie

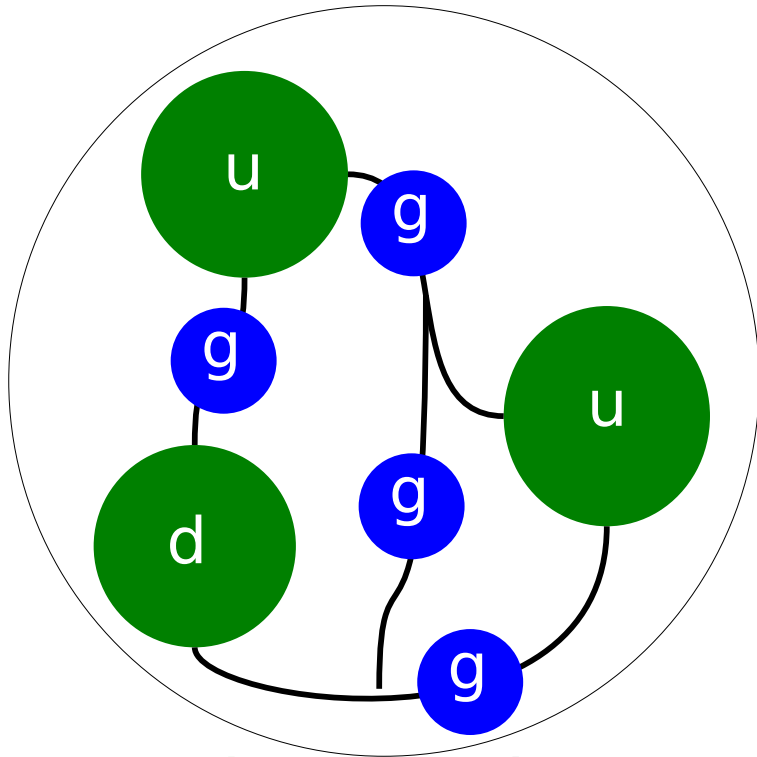
Auflösung



- **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

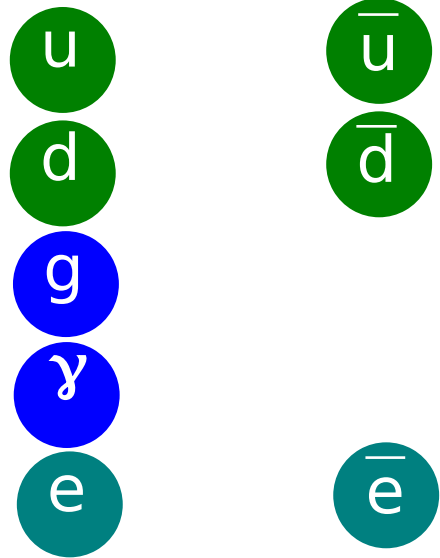
d

g

γ

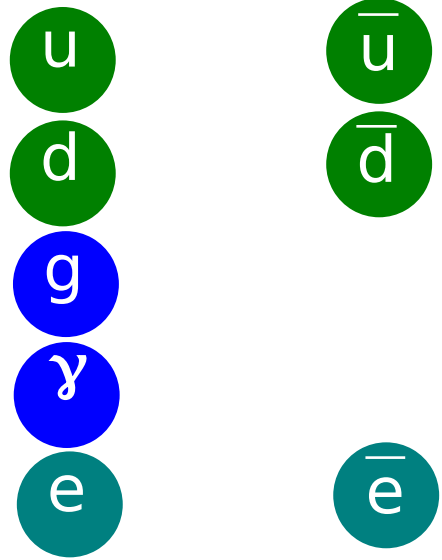
e

Teilchen - und Antiteilchen



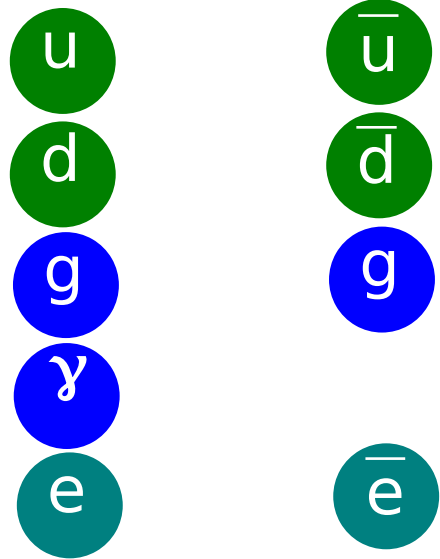
- Zu jedem geladenen Teilchen gibt es ein umgekehrt geladenes Antiteilchen: Antimaterie
 - Sonst gleiche Eigenschaften

Teilchen - und Antiteilchen



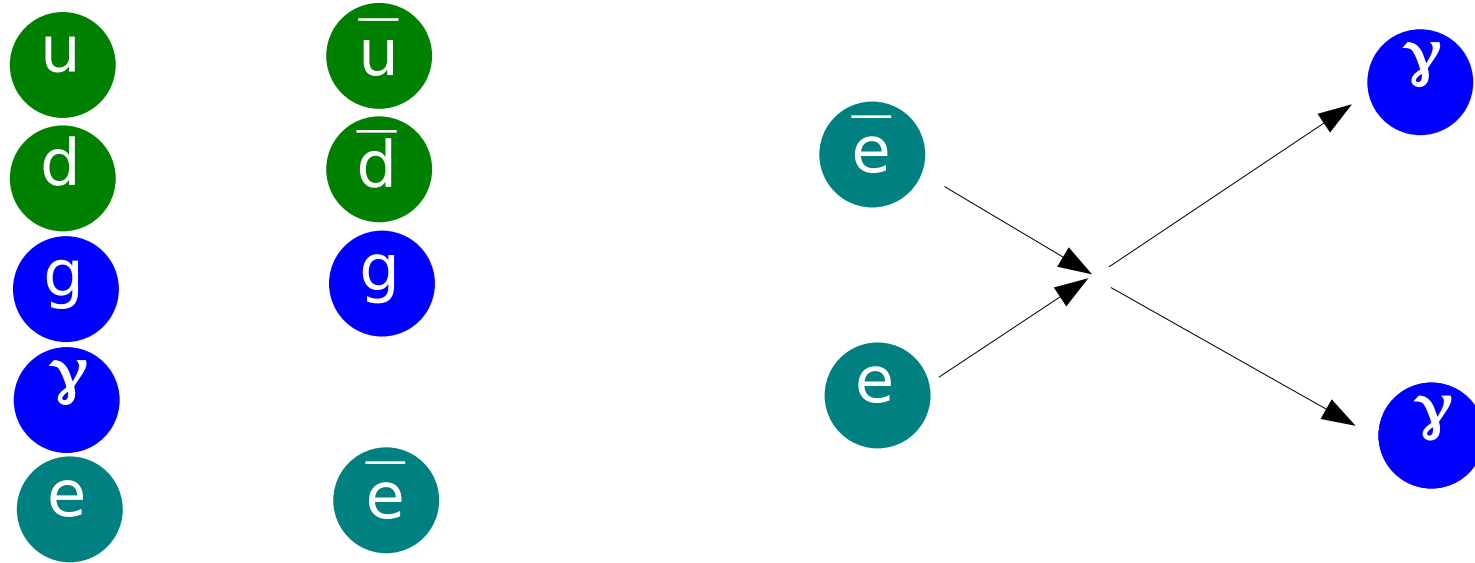
- Zu jedem geladenen Teilchen gibt es ein umgekehrt geladenes Antiteilchen: Antimaterie
 - Sonst gleiche Eigenschaften
 - Photon ist ungeladen

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



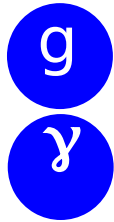
- Zu jedem geladenen Teilchen gibt es ein umgekehrt geladenes Antiteilchen: Antimaterie
 - Sonst gleiche Eigenschaften
 - Photon ist ungeladen
 - Gluon ist kompliziert, weil es eine mehrkwürdige Art von Ladung trägt, passt aber ins Schema
 - Materie und Antimaterie zerstören sich gegenseitig

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

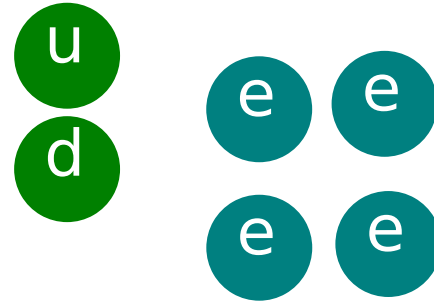


- Teilchen haben außer (elektrischer/starker u.ä.) Ladung einen Spin
 - Ganz vereinfacht: Drehimpuls eines punktförmigen Objektes
 - Fermionen: Halbzahliger Spin

Teilchen - und Antiteilchen mit Spin



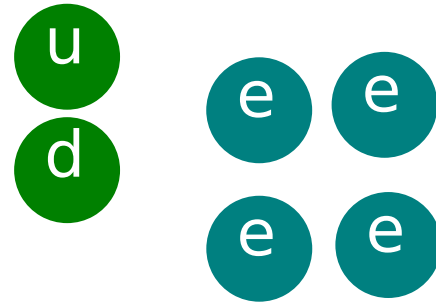
Fermionen



- 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



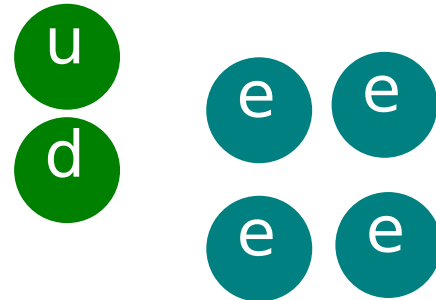
Bosonen



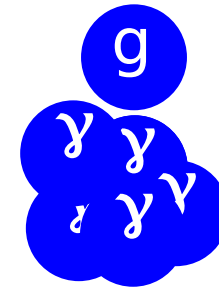
- Teilchen haben außer (elektrischer/starker u.ä.) Ladung einen Spin
 - Ganz vereinfacht: Drehimpuls eines punktförmigen Objektes
 - Fermionen: Halbzahliger Spin, unterliegen dem Pauliprinzip
 - Bosonen: Ganzzahliger Spin

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



- Gruppierung der Teilchen nach Kräften

Sektoren

g

Elektromagnetischer Sektor

u

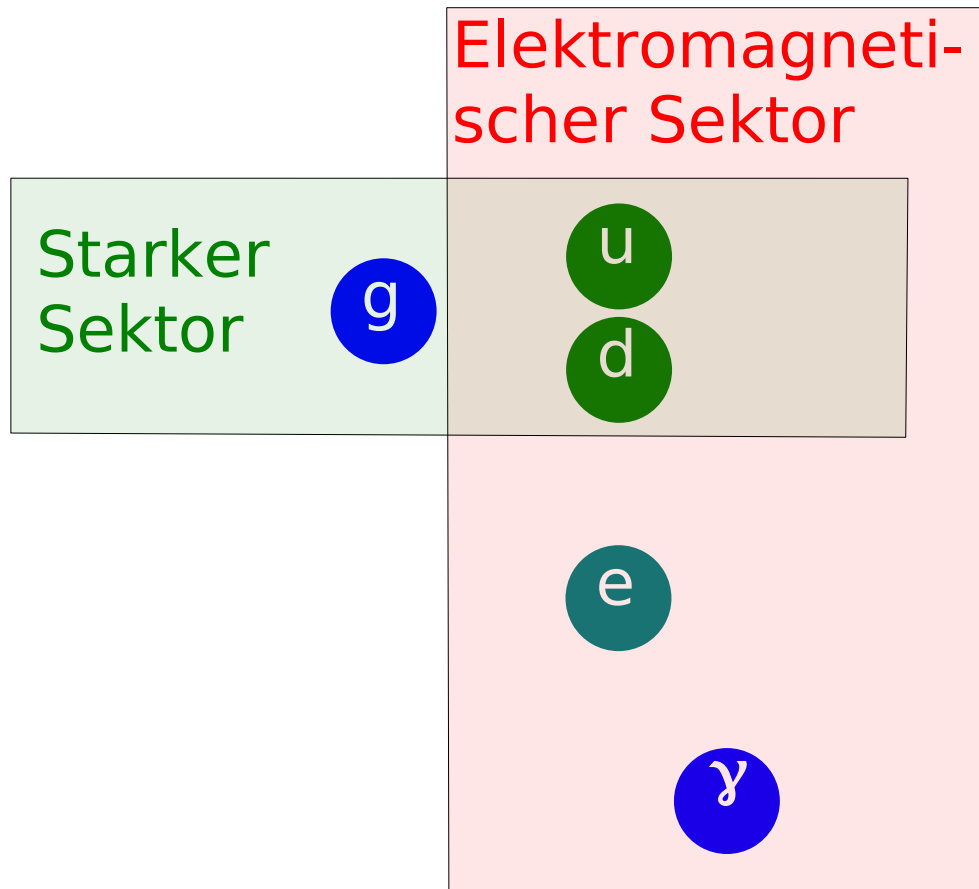
d

e

γ

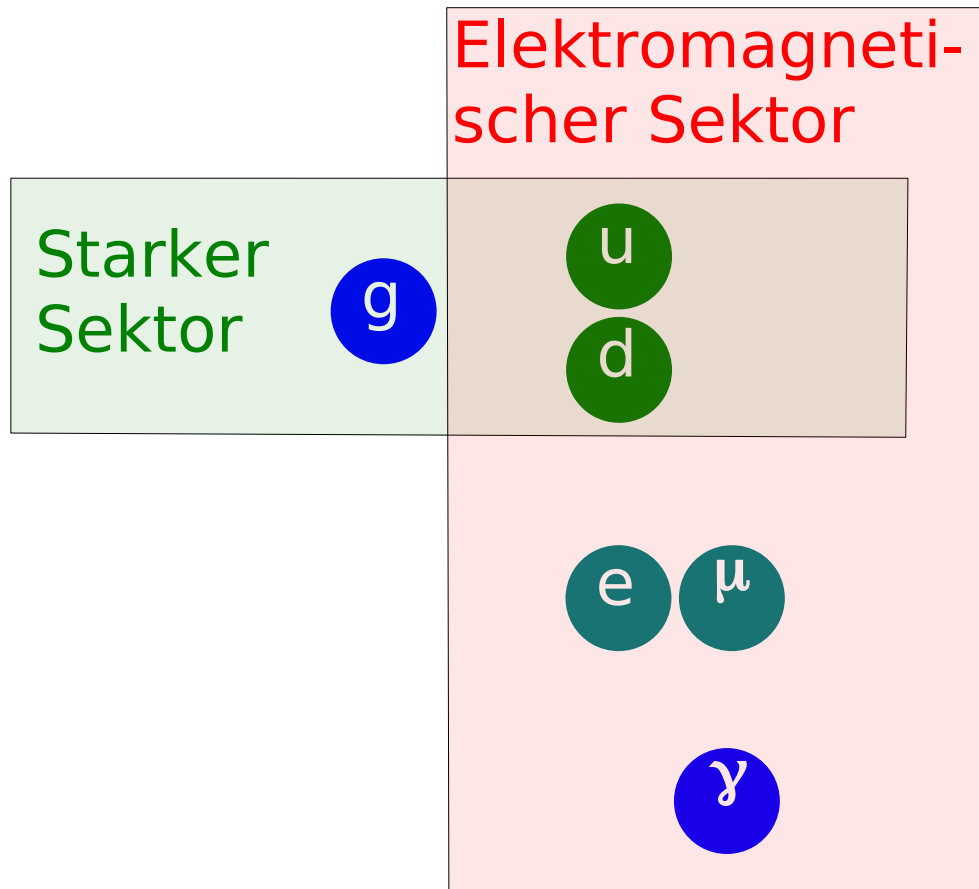
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
 - Elektromagnetische Kräfte (QED)

Sektoren



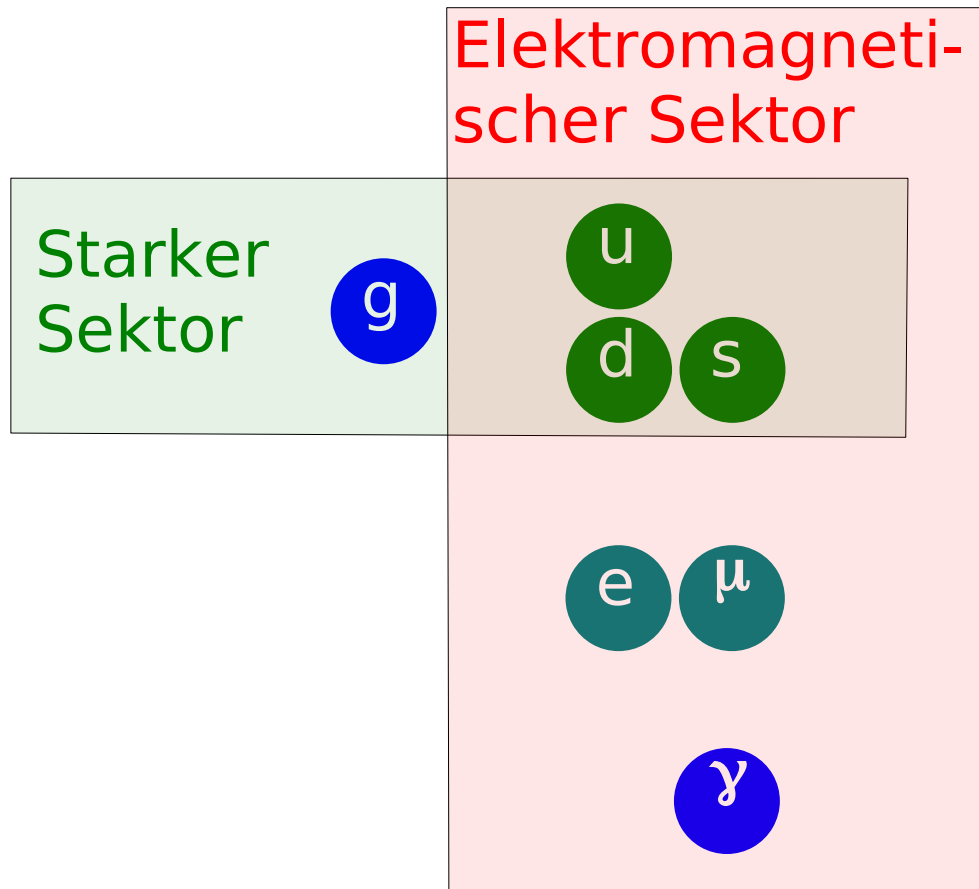
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
 - Elektromagnetische Kräfte (QED)
 - Starke (Kern)kräfte (QCD)

Sektoren



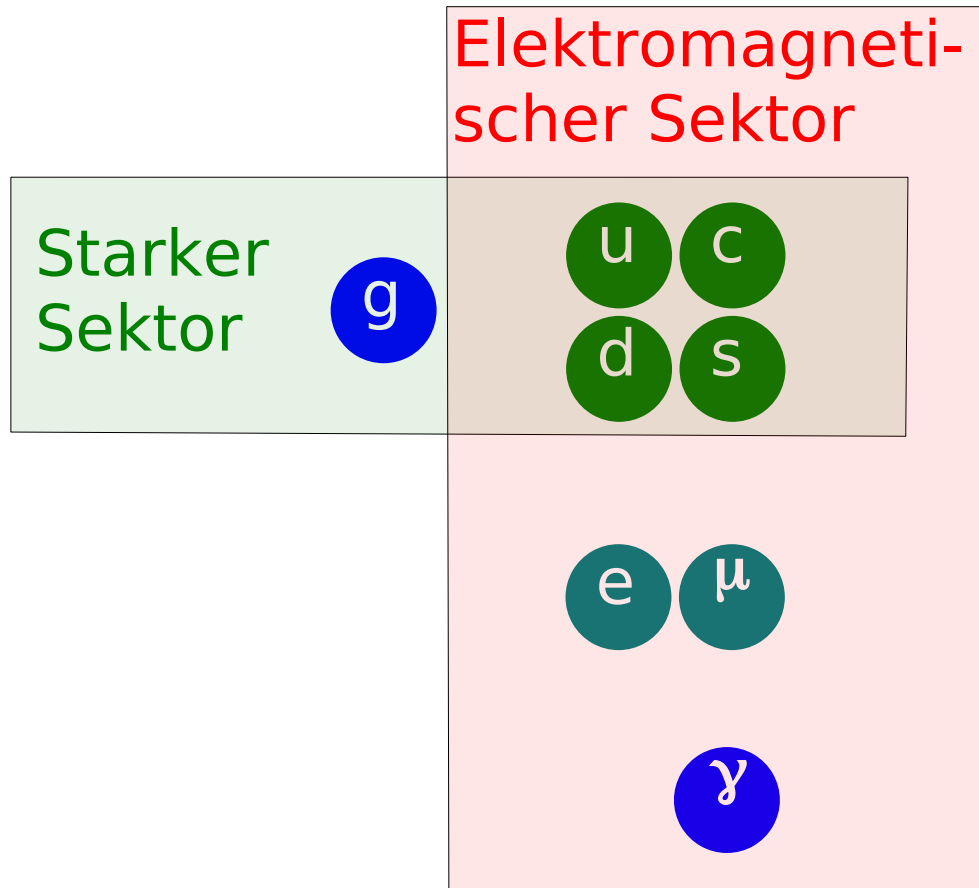
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
 - Elektromagnetische Kräfte (QED)
 - Starke (Kern)kräfte (QCD)

Sektoren



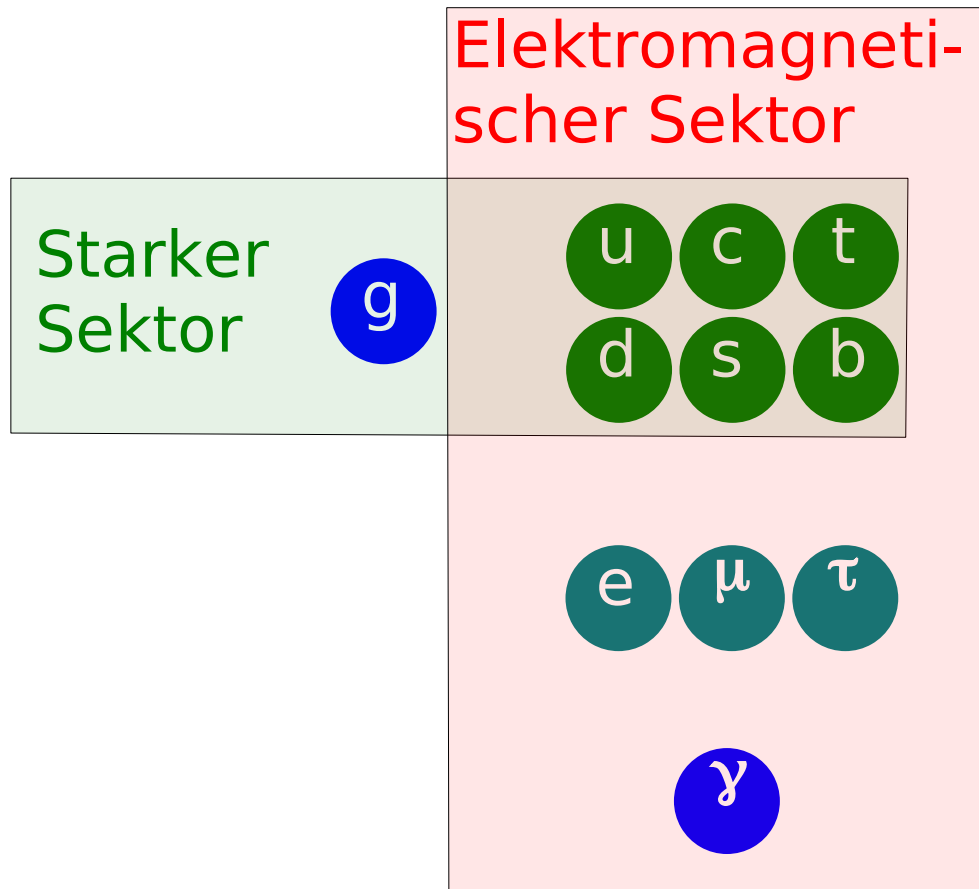
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
 - Elektromagnetische Kräfte (QED)
 - Starke (Kern)kräfte (QCD)

Sektoren



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

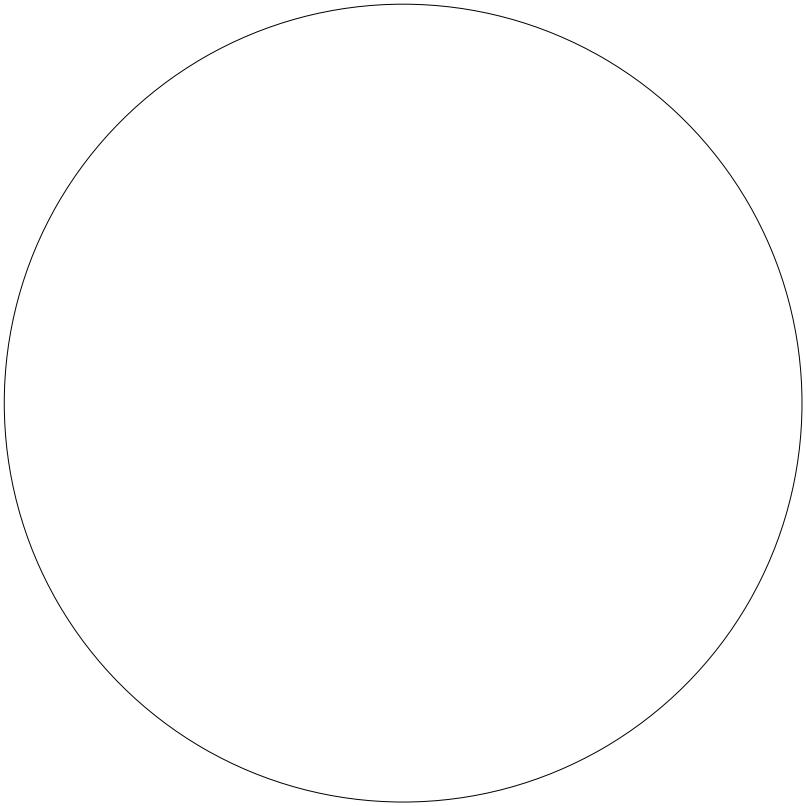
Sektoren



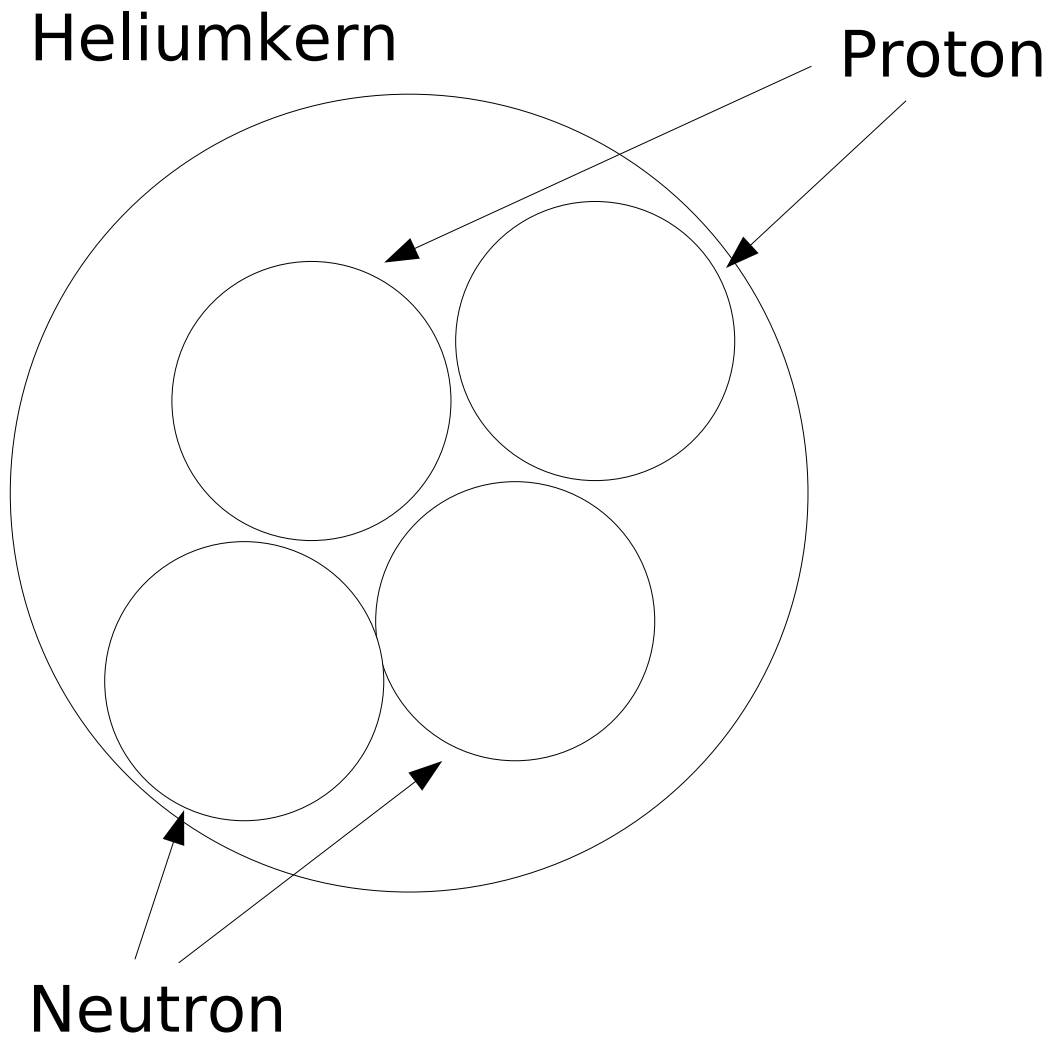
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
 - Elektromagnetische Kräfte (QED)
 - Starke (Kern)kräfte (QCD)

Neutron

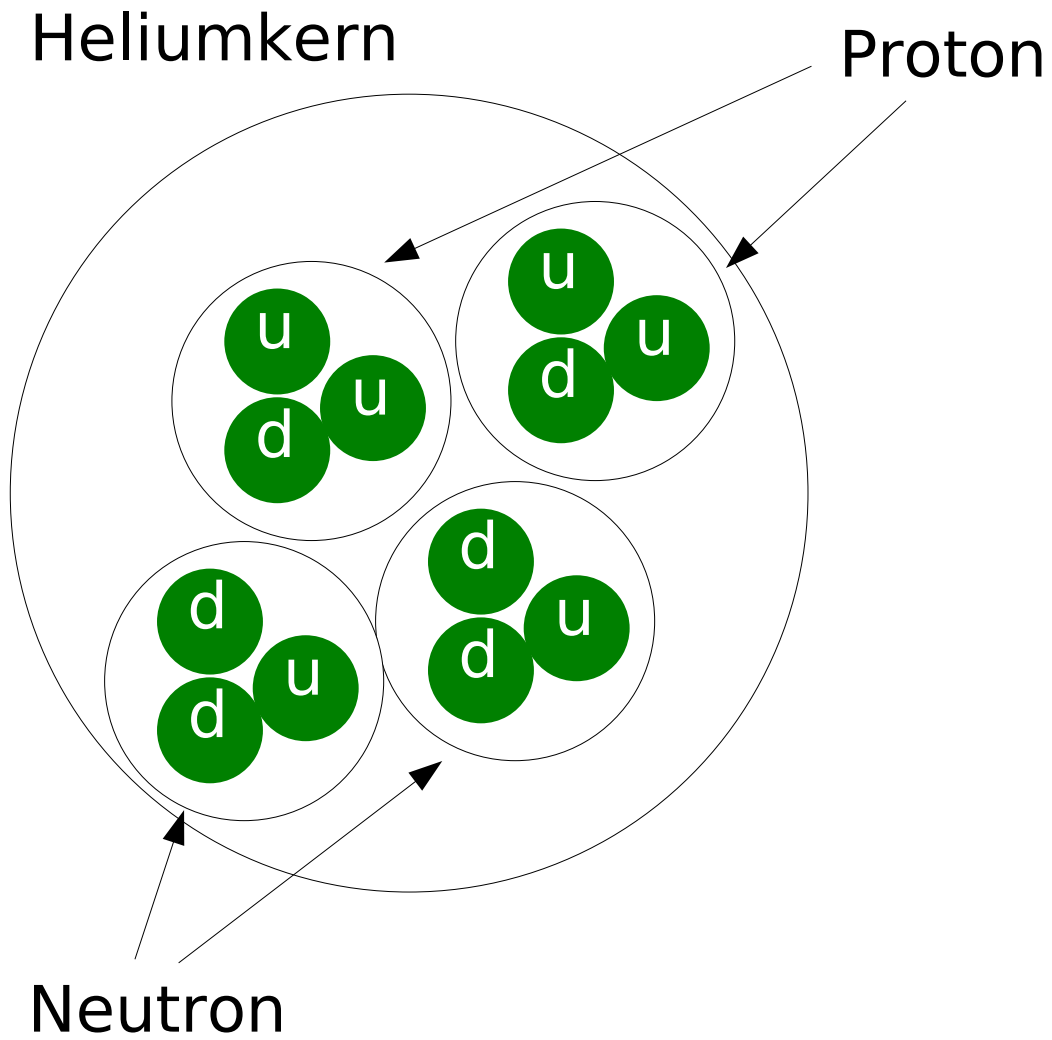
Heliumkern



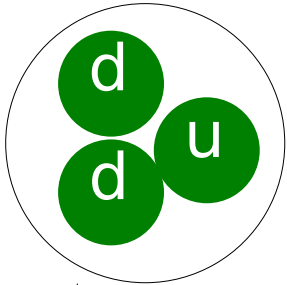
Neutron



Neutron

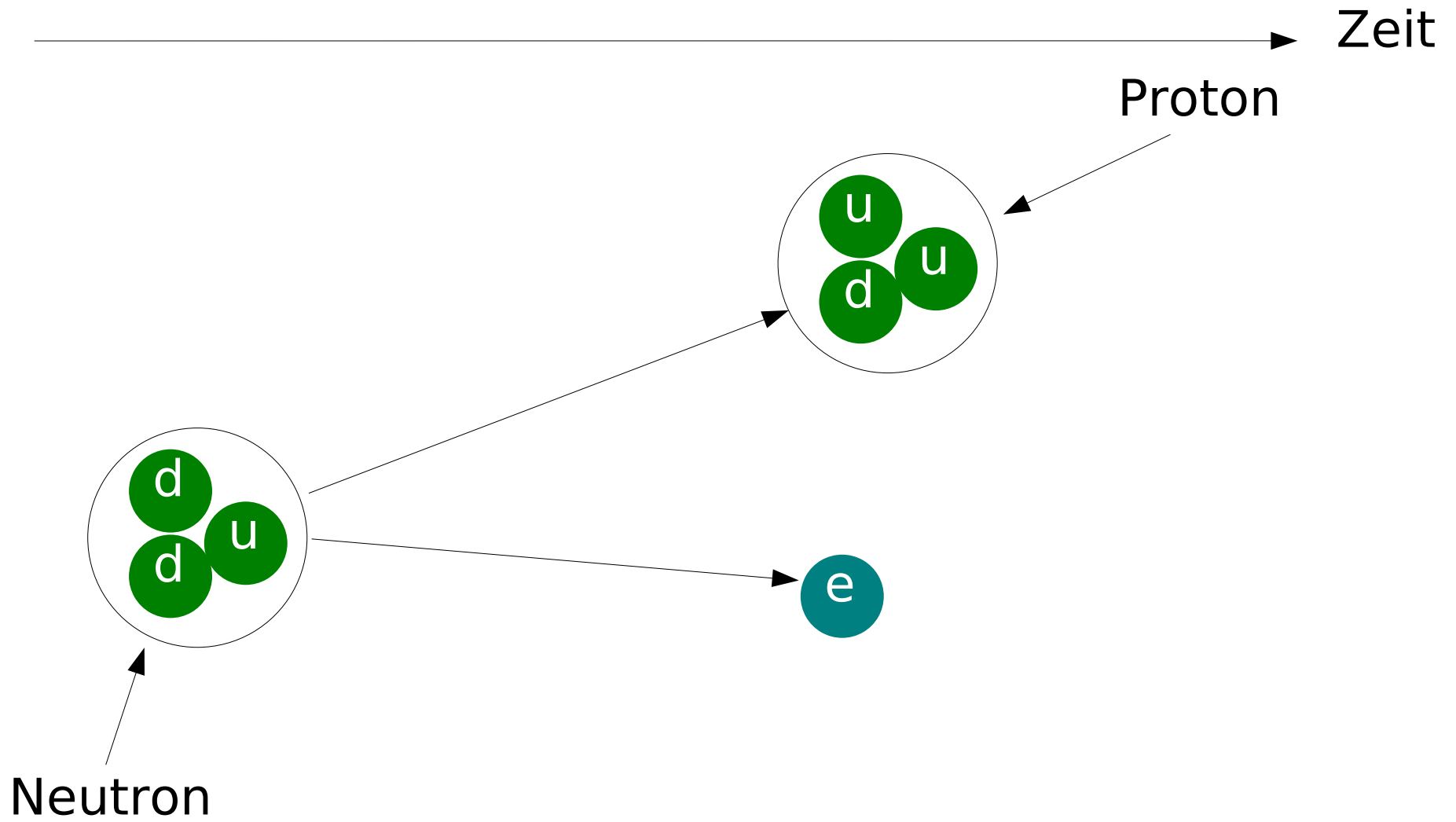


Neutron

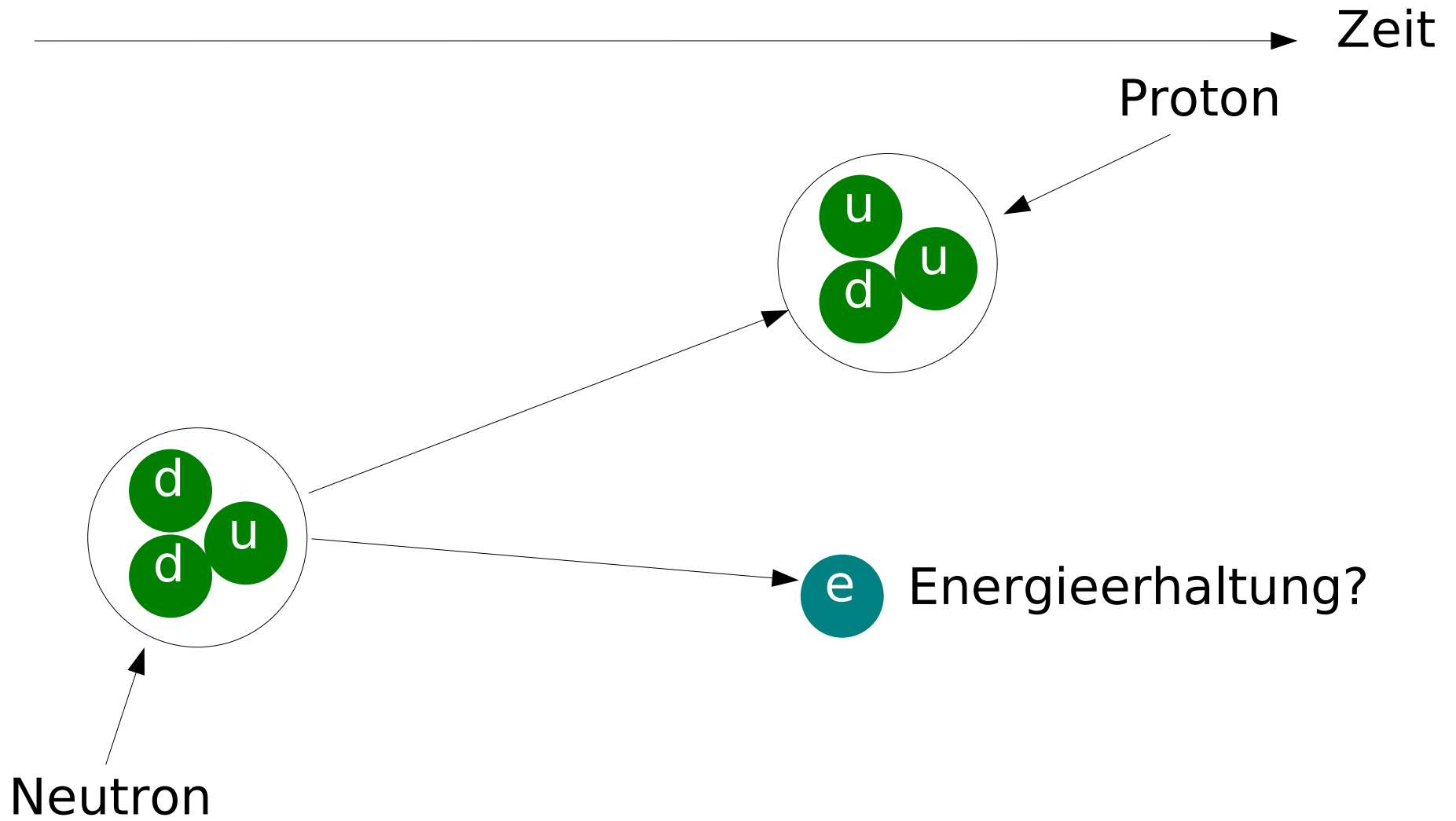


Neutron

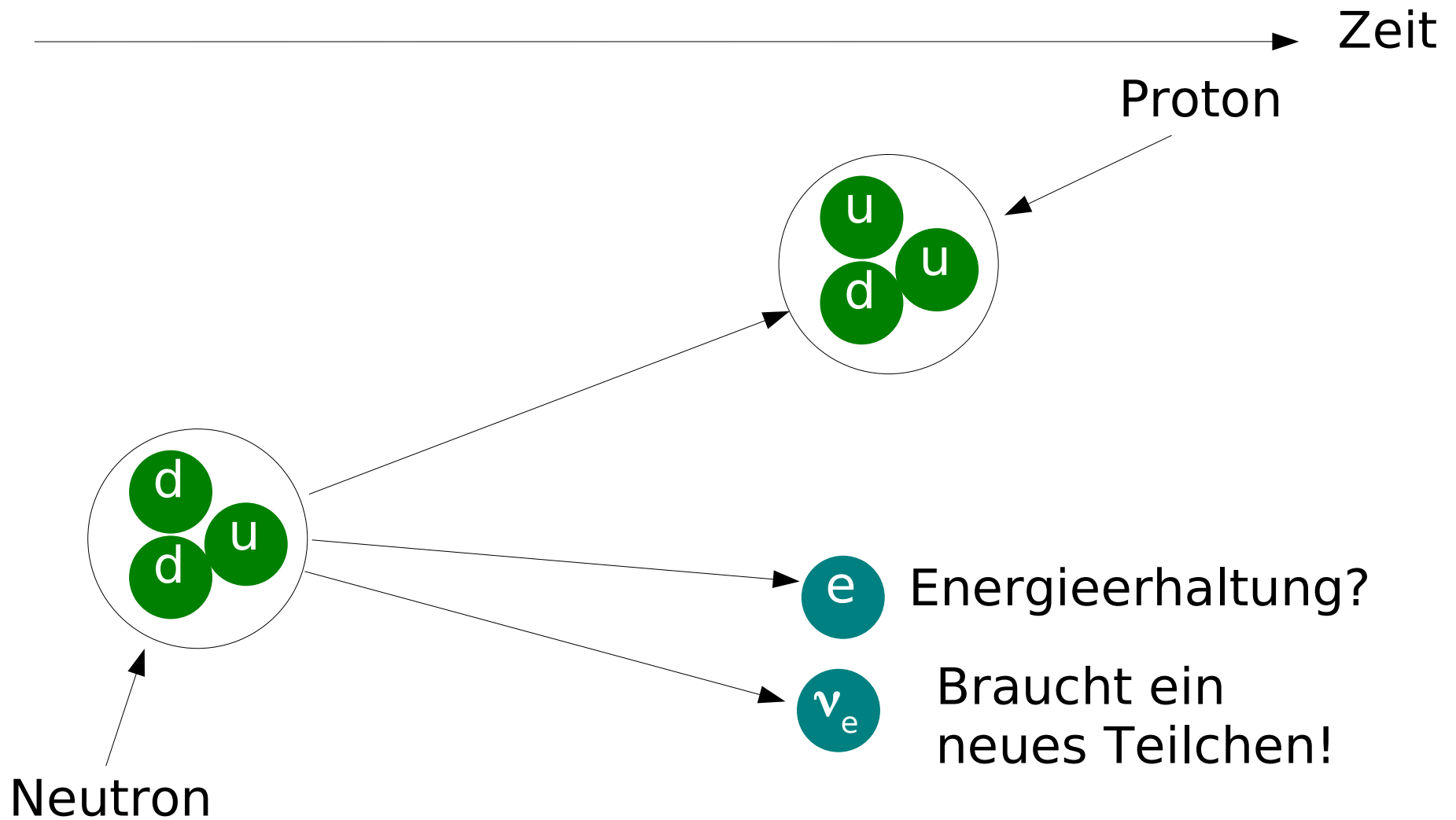
Neutron



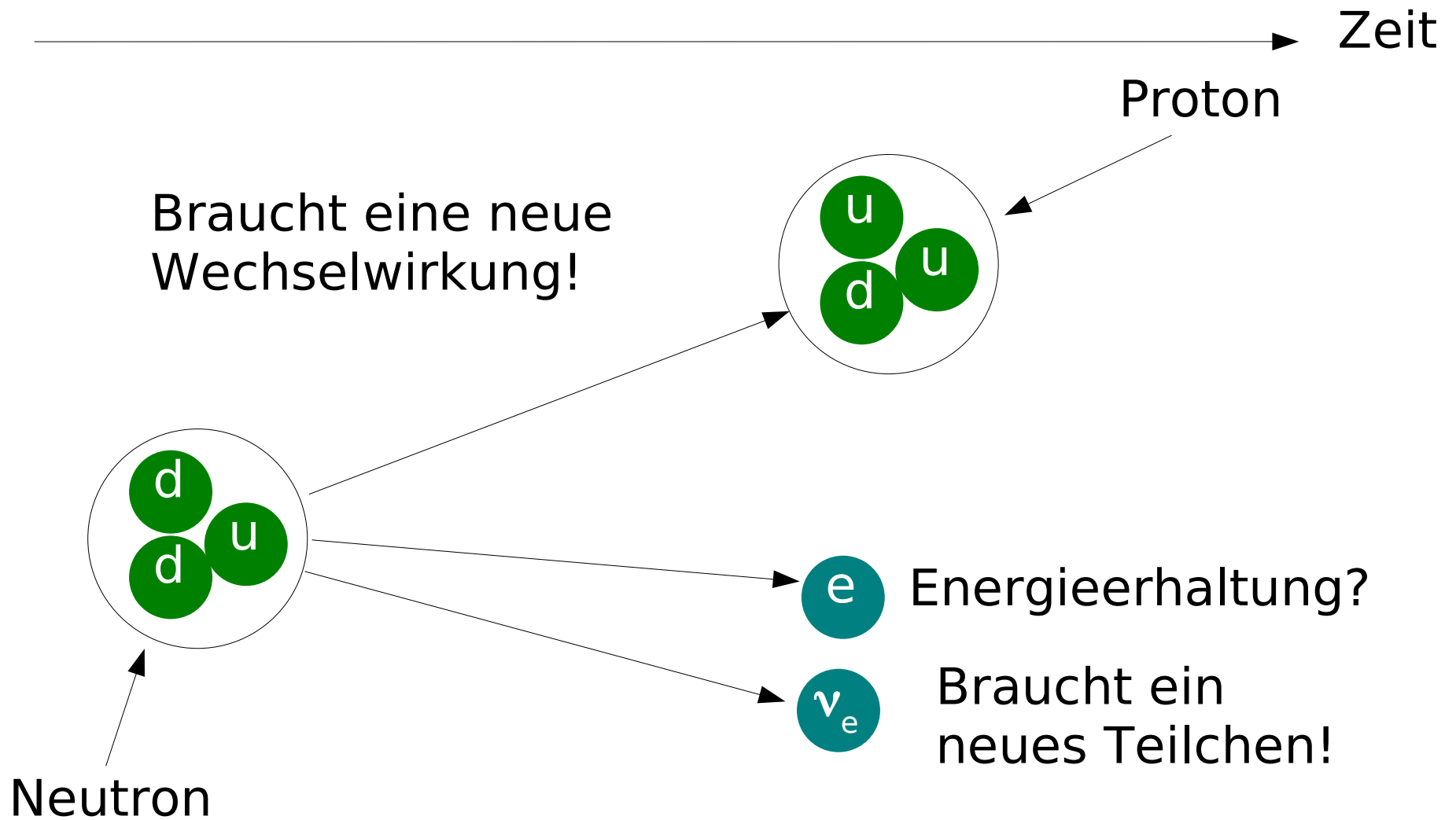
Neutron



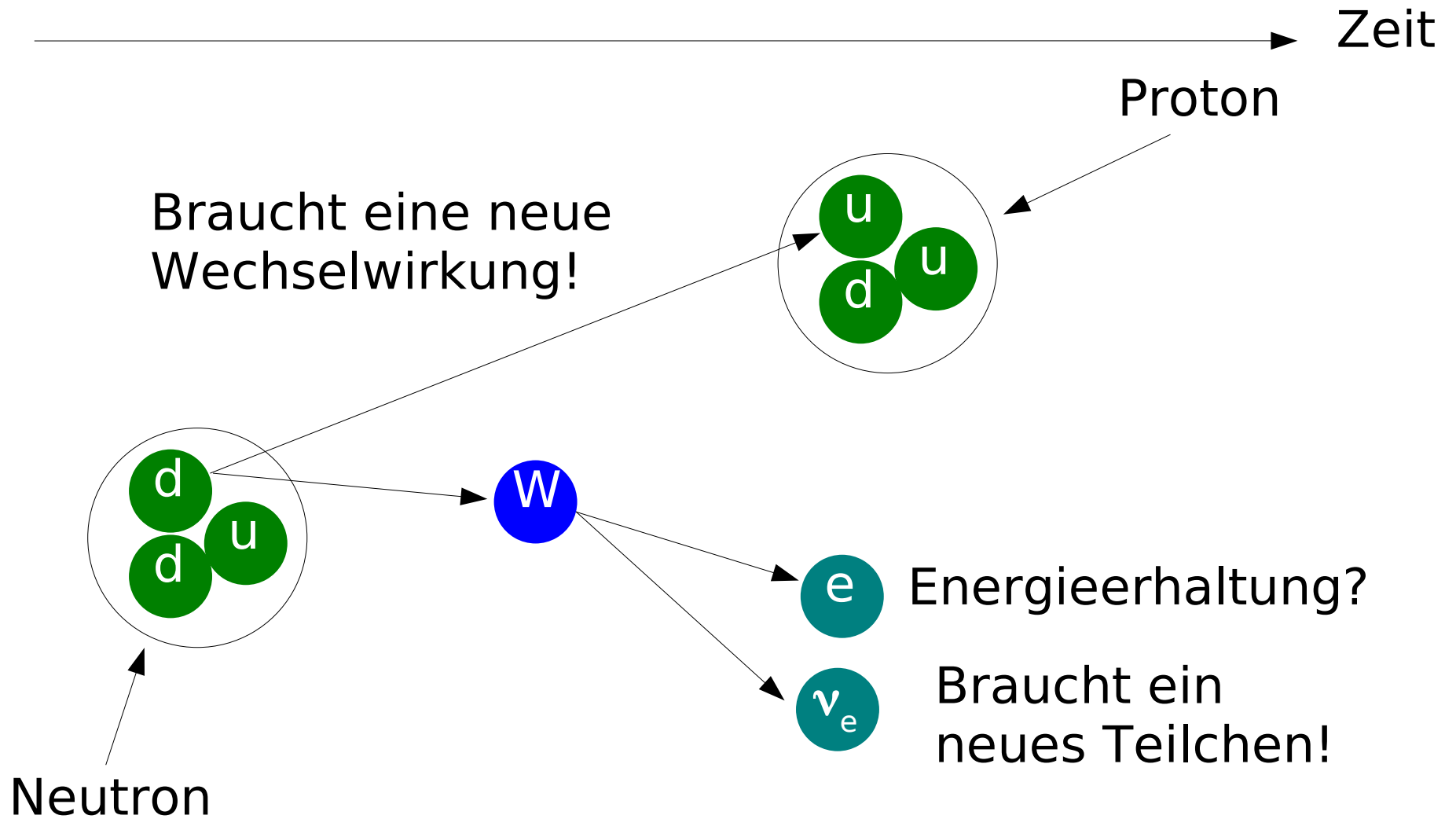
Neutron



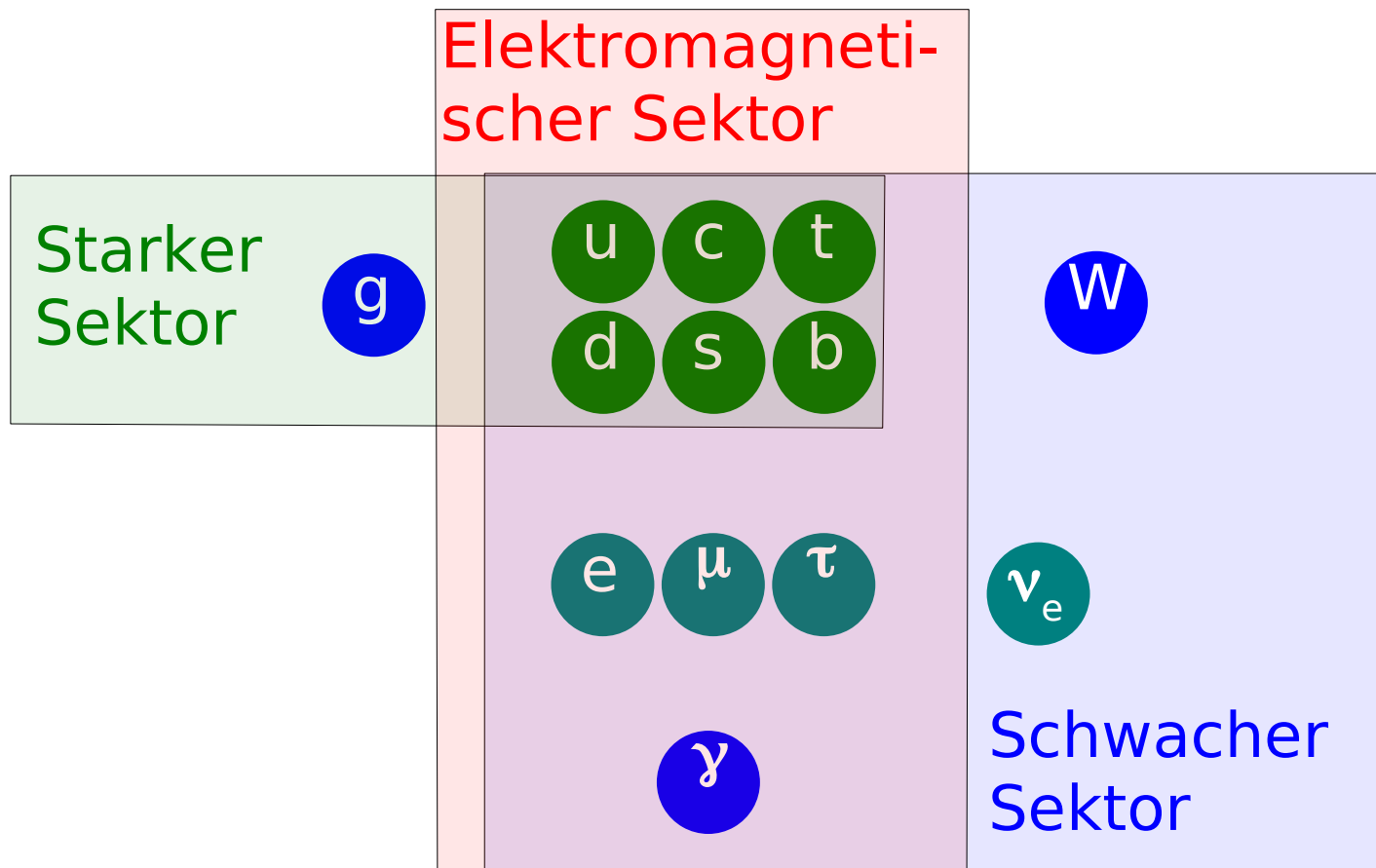
Neutron



Neutron

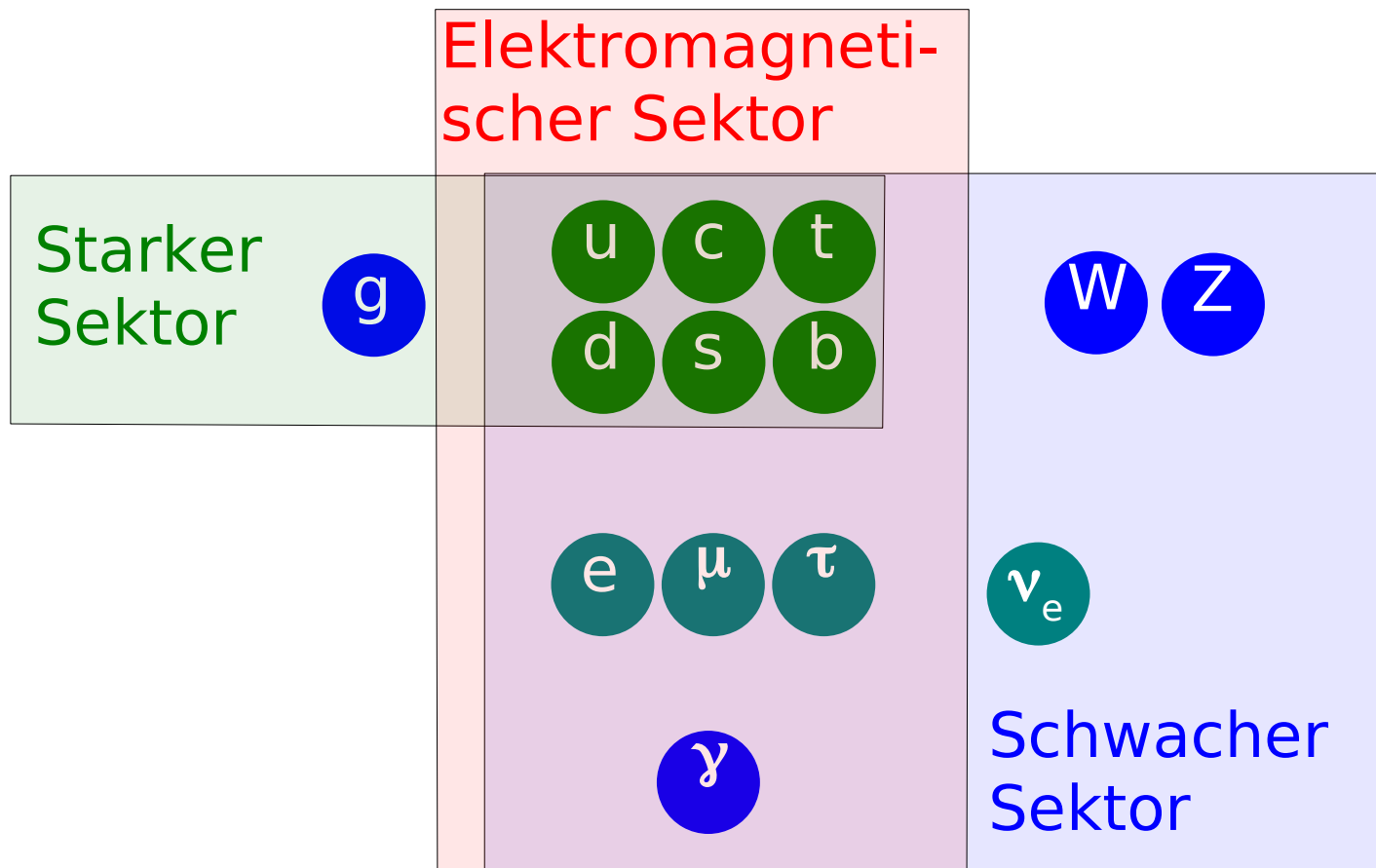


Sektoren



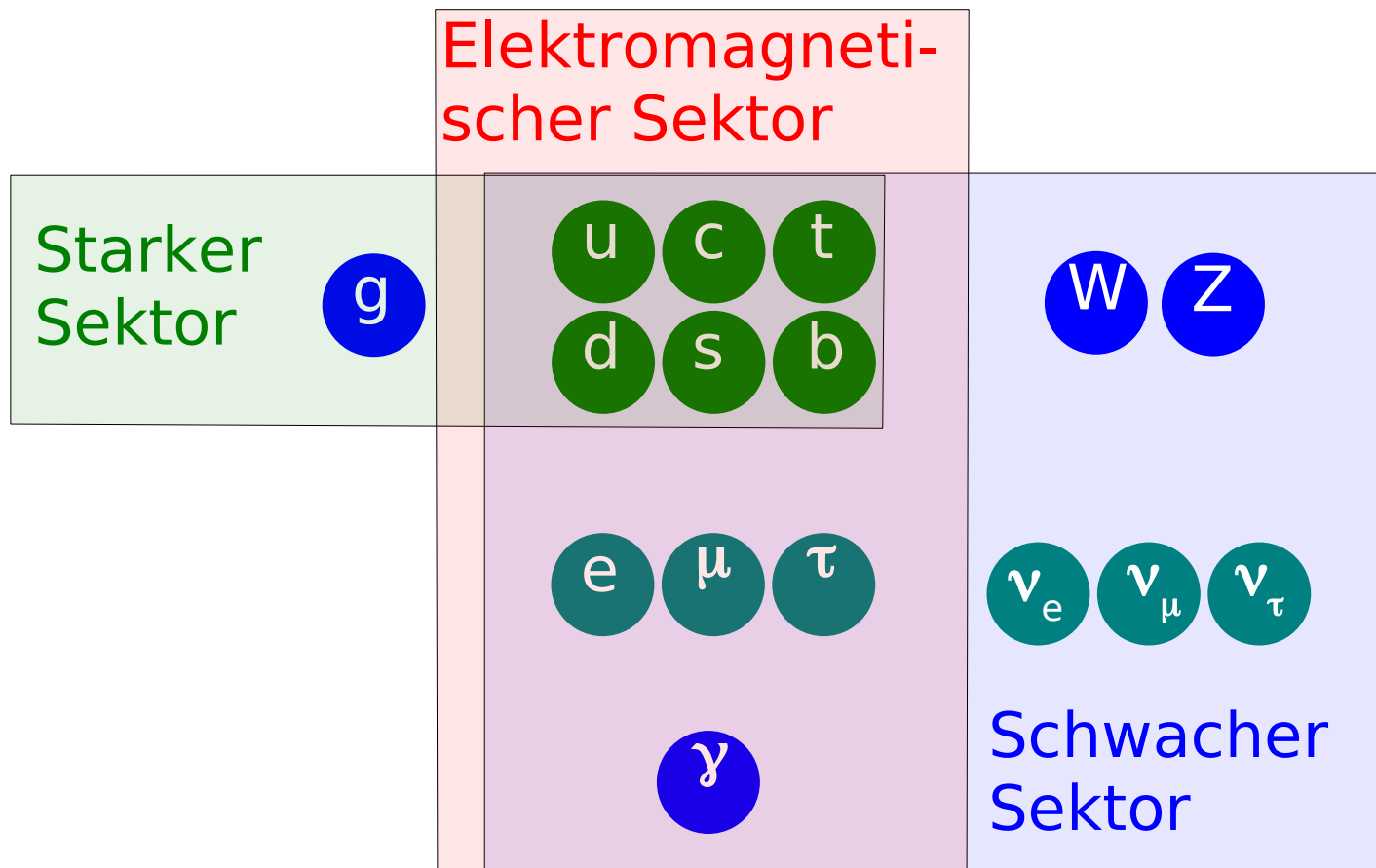
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
 - Elektromagnetische Kräfte (QED)
 - Starke (Kern)kräfte (QCD)
 - Schwache (Kern)kräfte

Sektoren



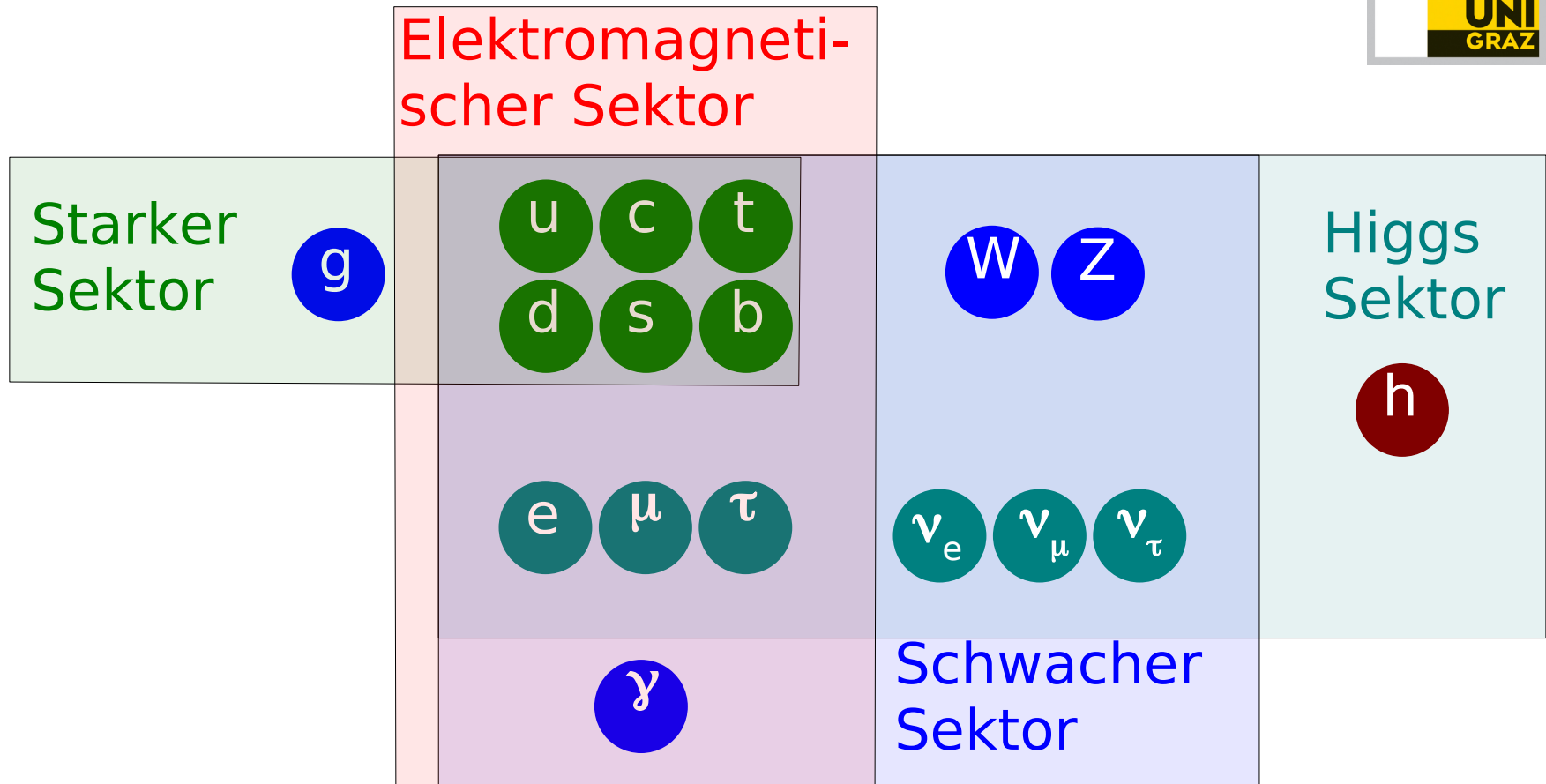
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
 - Elektromagnetische Kräfte (QED)
 - Starke (Kern)kräfte (QCD)
 - Schwache (Kern)kräfte

Sektoren



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

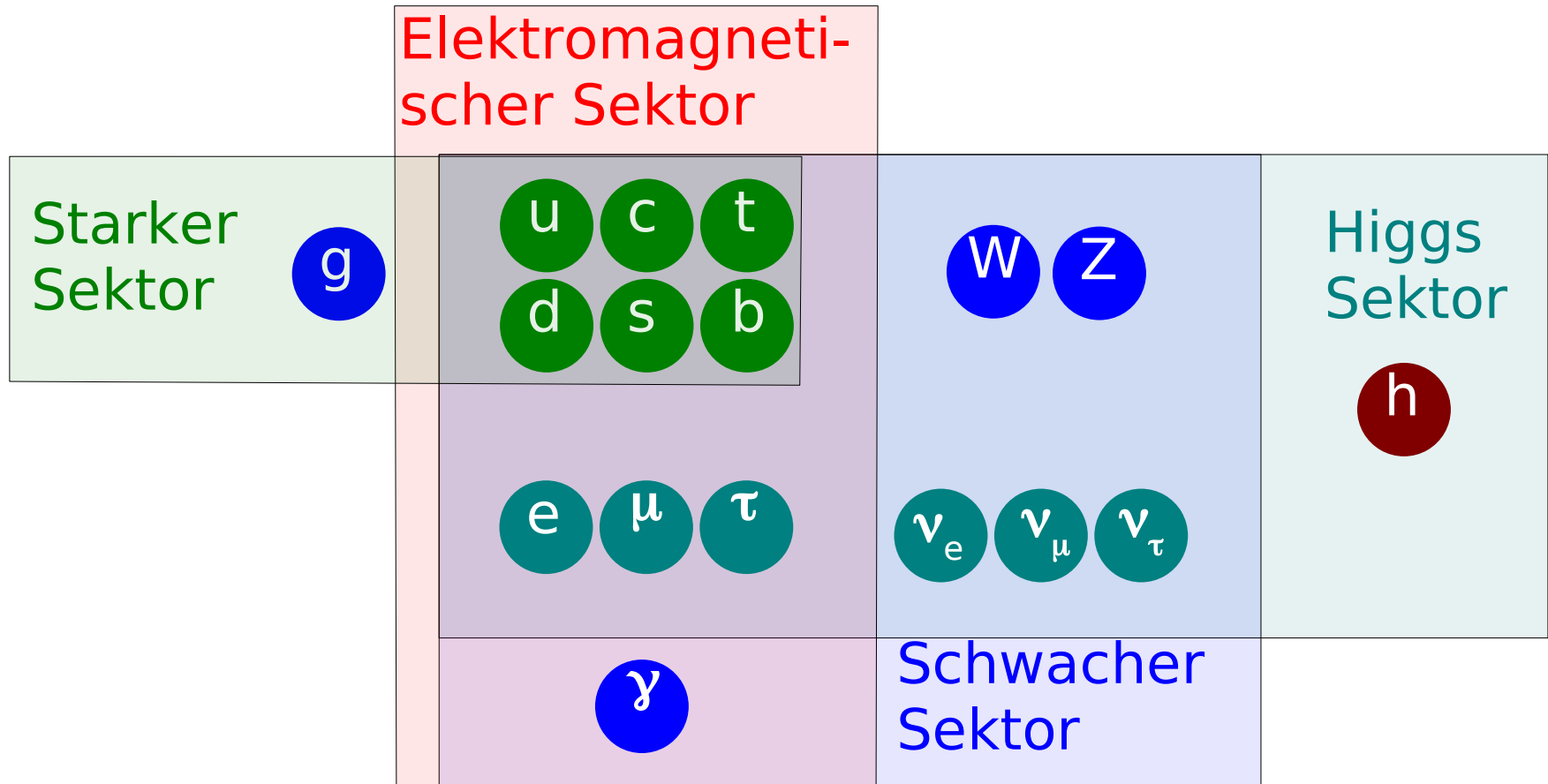
Sektoren



- Gruppierung der Teilchen nach Kräften

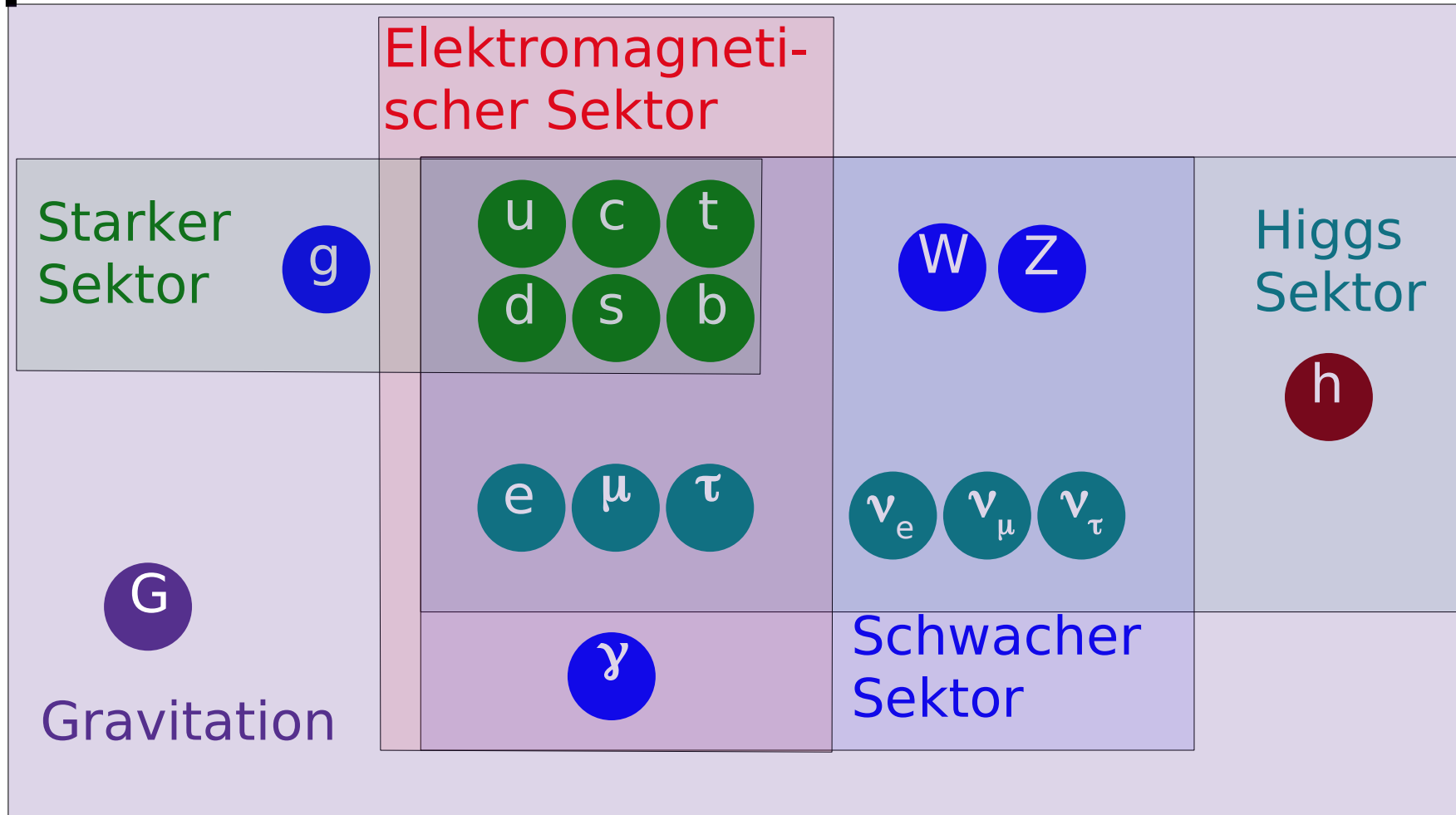
- Elektromagnetische Kräfte (QED)
- Starke (Kern)kräfte (QCD)
- Schwache (Kern)kräfte
- Higgs

Sektoren



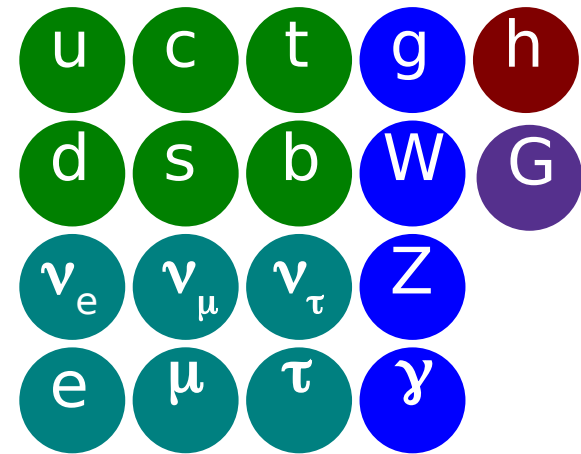
- Standardmodell der Teilchenphysik

Sektoren



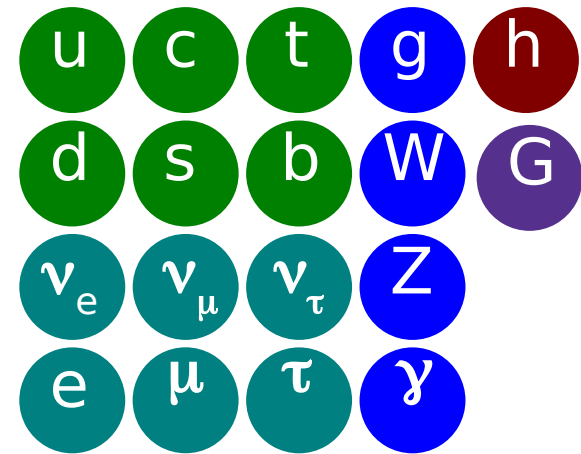
- Standardmodell der Teilchenphysik
- Gravitation als Quantengravitation umfassend
 - Wirkt auf Energie, nicht nur auf Masse
 - Vieles unklar – hier gut motivierte Variante

Standardmodell der Teilchenphysik



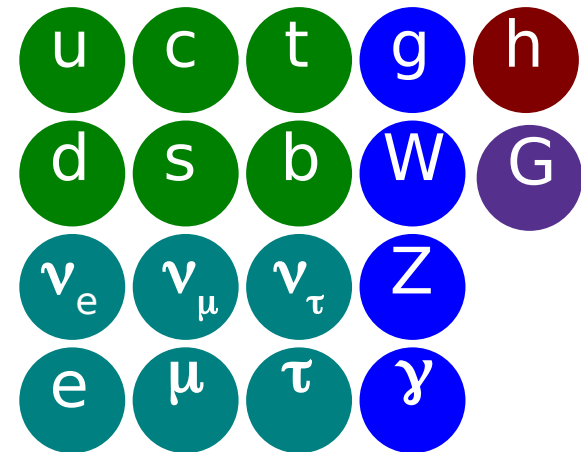
Standardmodell der Teilchenphysik

- Enthält zwei Sorten Teilchen



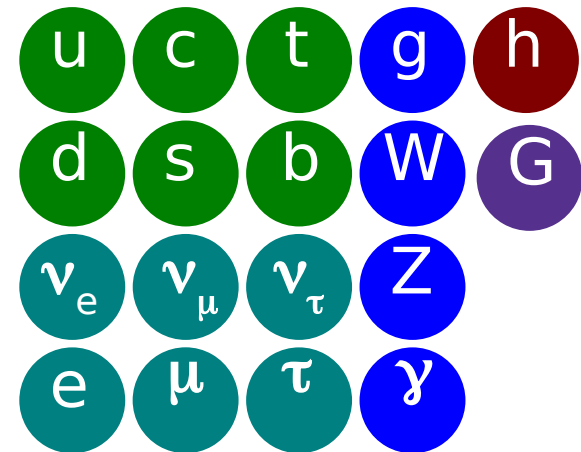
Standardmodell der Teilchenphysik

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



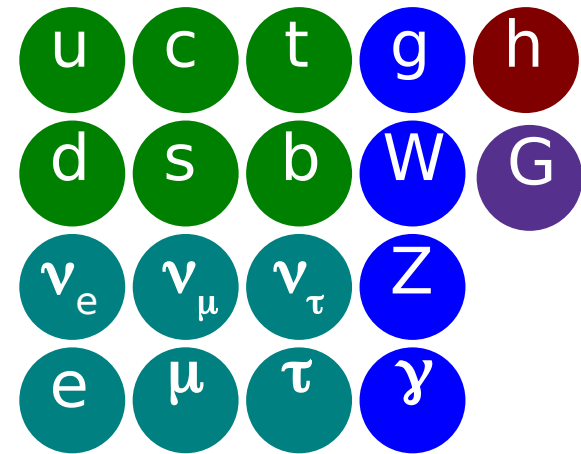
Standardmodell der Teilchenphysik

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



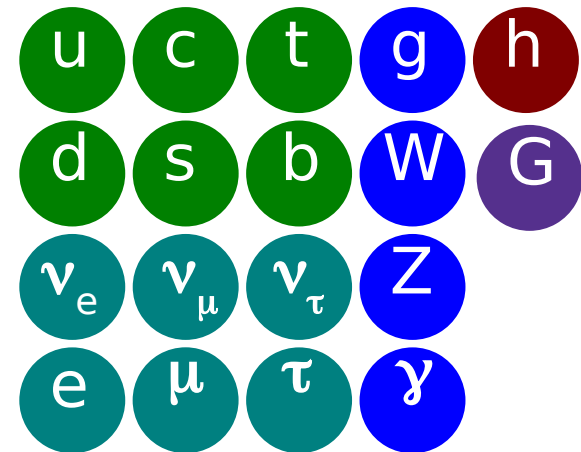
Standardmodell der Teilchenphysik

- 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



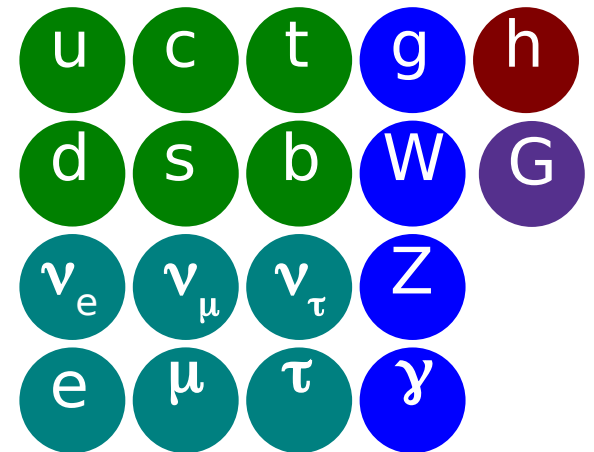
Standardmodell der Teilchenphysik

- 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

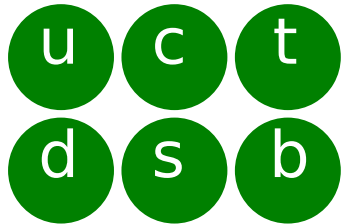
- Sehr unterschiedliche Eigenschaften



Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

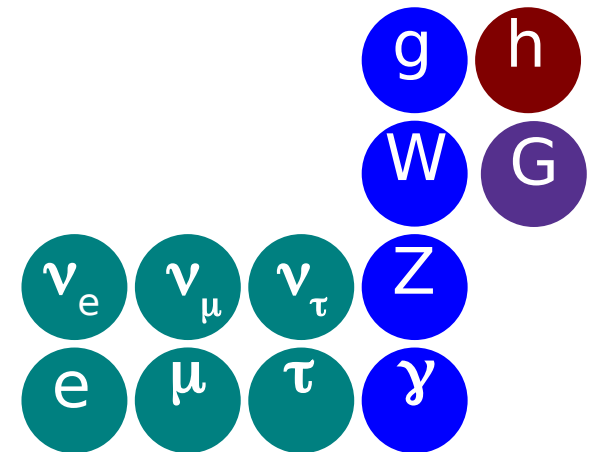
Down: 0.5%

Strange: 10%

Charm: 130%

Bottom: 420%

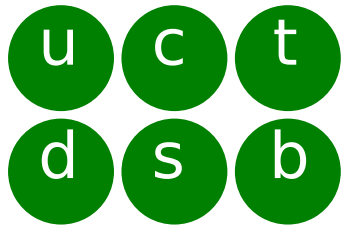
Top: 17500%



Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

Down: 0.5%

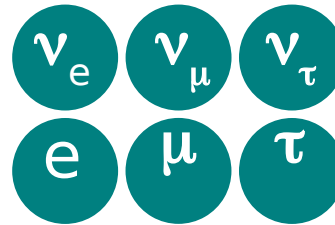
Strange: 10%

Charm: 130%

Bottom: 420%

Top: 17500%

Leptonen: Fermionen



Massen relativ zu H:

Elektron: 0.05%

Muon: 10%

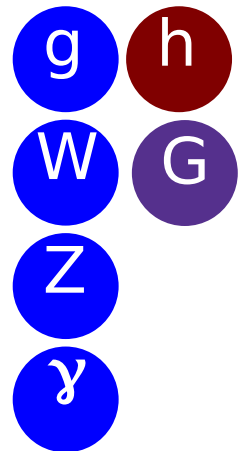
Tauon: 180%

Neutrinos:

Massen < 0.0000002%

Reihenfolge unbekannt,

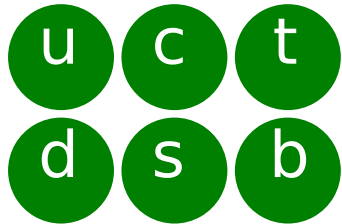
Massen unterschiedlich



Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

Down: 0.5%

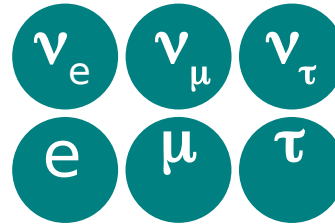
Strange: 10%

Charm: 130%

Bottom: 420%

Top: 17500%

Leptonen: Fermionen



Massen relativ zu H:

Elektron: 0.05%

Muon: 10%

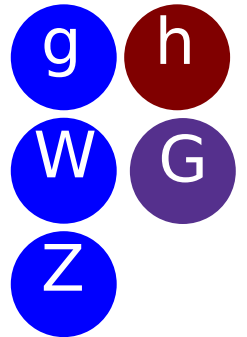
Tauon: 180%

Neutrinos:

Massen < 0.0000002%

Reihenfolge unbekannt,

Massen unterschiedlich

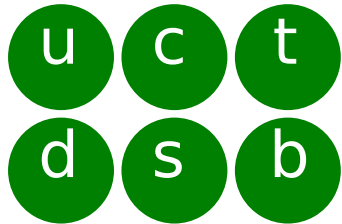


Photon: Masseloses Boson

Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

Down: 0.5%

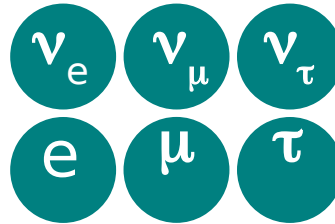
Strange: 10%

Charm: 130%

Bottom: 420%

Top: 17500%

Leptonen: Fermionen



Massen relativ zu H:

Elektron: 0.05%

Muon: 10%

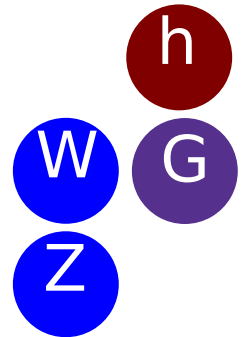
Tauon: 180%

Neutrinos:

Massen < 0.0000002%

Reihenfolge unbekannt,

Massen unterschiedlich

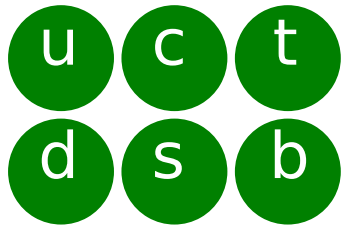


 Photon: Masseloses Boson  Gluon: Massloses Boson

Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

Down: 0.5%

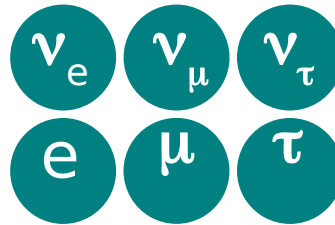
Strange: 10%

Charm: 130%

Bottom: 420%

Top: 17500%

Leptonen: Fermionen



Massen relativ zu H:

Elektron: 0.05%

Muon: 10%

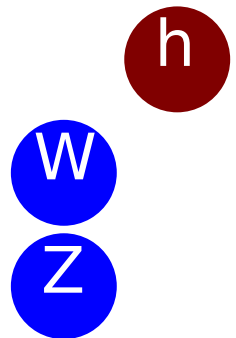
Tauon: 180%

Neutrinos:

Massen < 0.0000002%

Reihenfolge unbekannt,

Massen unterschiedlich



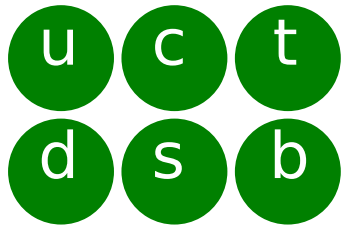
 Photon: Masseloses Boson  Gluon: Massloses Boson

 Graviton: Masseloses Boson

Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

Down: 0.5%

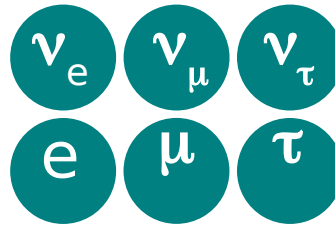
Strange: 10%

Charm: 130%

Bottom: 420%

Top: 17500%

Leptonen: Fermionen



Massen relativ zu H:

Elektron: 0.05%

Muon: 10%

Tauon: 180%

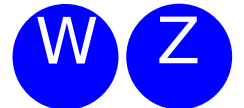
Neutrinos:

Massen < 0.0000002%

Reihenfolge unbekannt,

Massen unterschiedlich

 Schwache Bosonen



W: 8000%

Z: 9100%

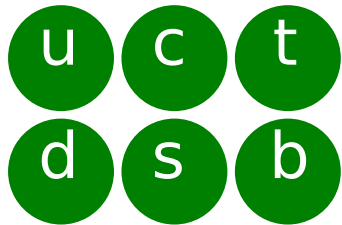
 Photon: Masseloses Boson  Gluon: Massloses Boson

 Graviton: Masseloses Boson

Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen



Massen relativ zu H:

Up: 0.3%

Down: 0.5%

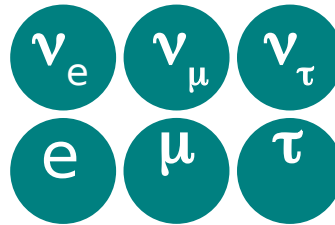
Strange: 10%

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,

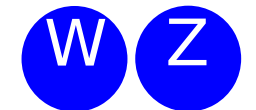
Massen unterschiedlich

Higgs: Boson



12500%

Schwache Bosonen



Elektron: 0.05%

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?

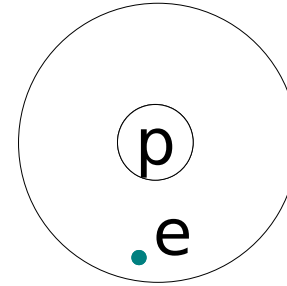
Lösung: Zusammensetzen

Lösung: Zusammensetzen

- Teilchen können kombiniert werden:
Bindungszustand

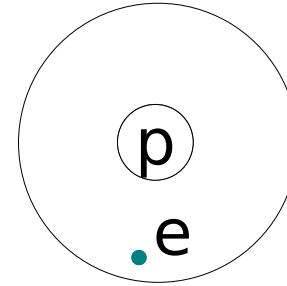
Lösung: Zusammensetzen

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



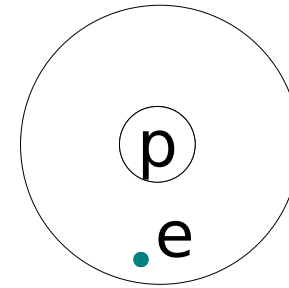
Lösung: Zusammensetzen

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



Lösung: Zusammensetzen

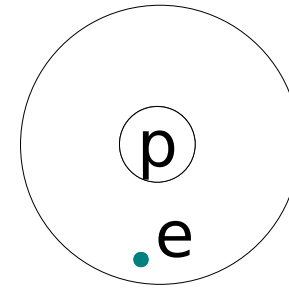
- Teilchen können kombiniert werden:
Bindungszustand



- 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

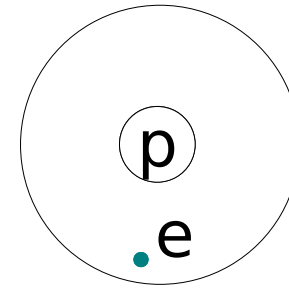
- Teilchen können kombiniert werden:
Bindungszustand



- 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

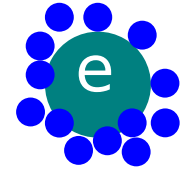


- Z.B.: Wasserstoffatom aus Elektron und Proton
- Geht auch mit Elementarteilchen
- Bindungszustände sind invariant und physikalisch beobachtbar
 - Für alle drei (vier) Grundkräfte unterschiedlich
- Warum reden wir dann noch von Elementarteilchen?
 - Unterschied ist messbar in Größe und Form

Lösung: Elektromagnetismus

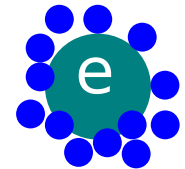
Lösung: Elektromagnetismus

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



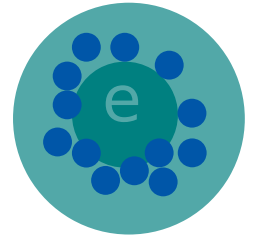
Lösung: Elektromagnetismus

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



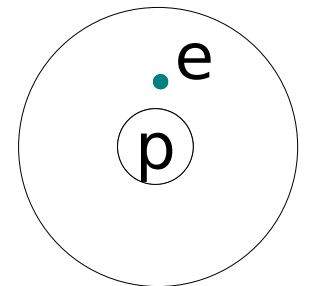
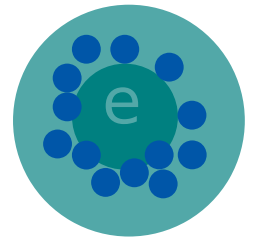
Lösung: Elektromagnetismus

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



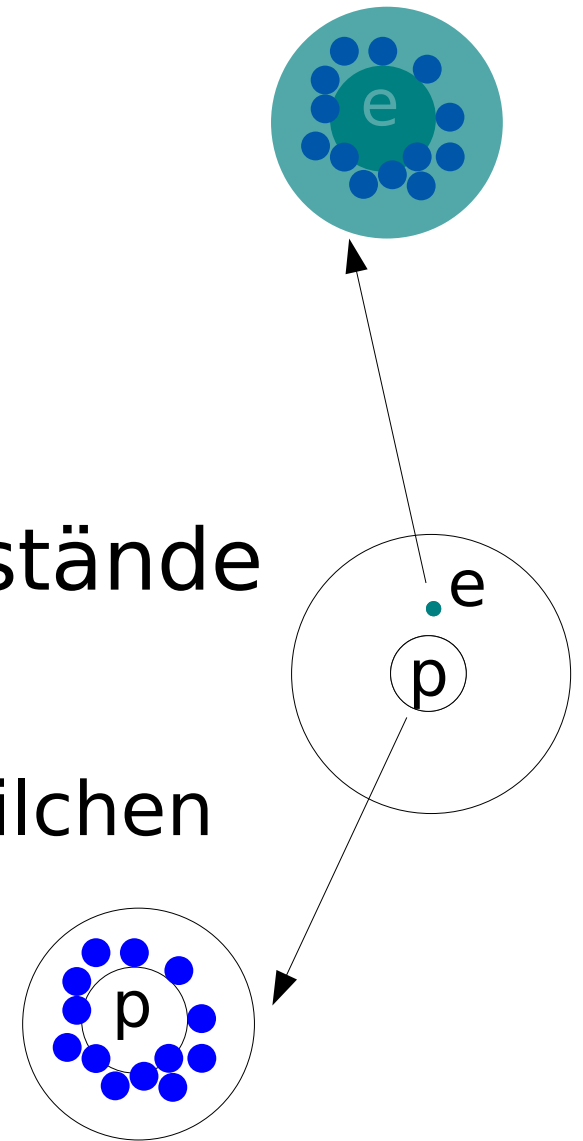
Lösung: Elektromagnetismus

- 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

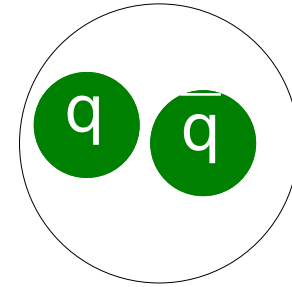
- Die starke Wechselwirkung bindet Quarks (und Gluonen) immer in Hadronen: Confinement

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

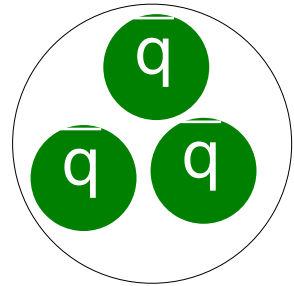
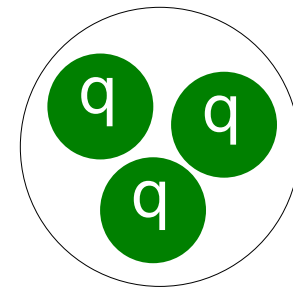
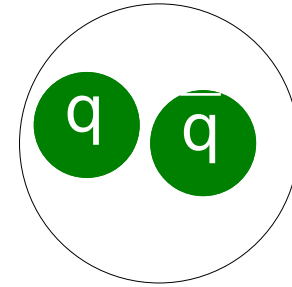
Lösung: Starke Wechselwirkung

- 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)



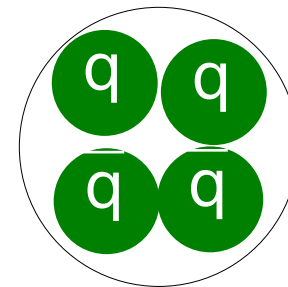
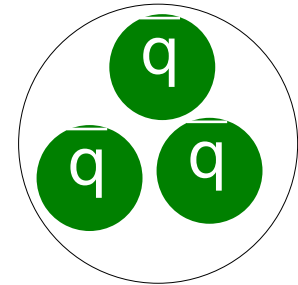
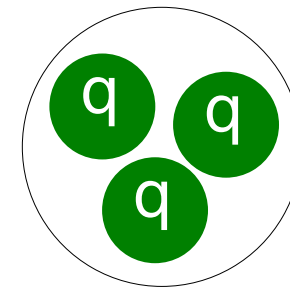
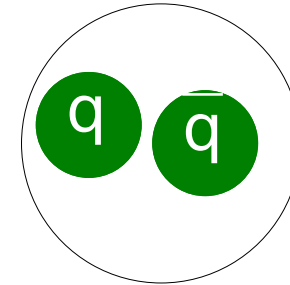
Lösung: Starke Wechselwirkung

- 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)



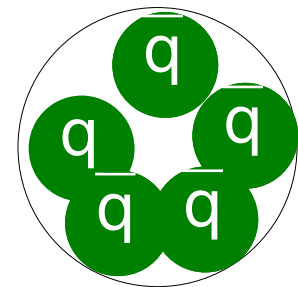
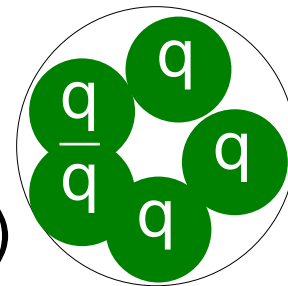
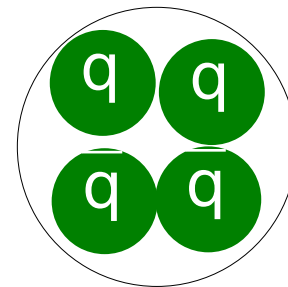
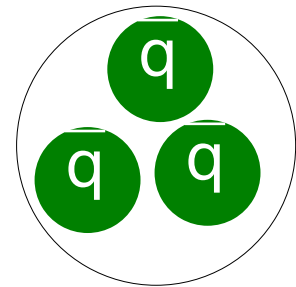
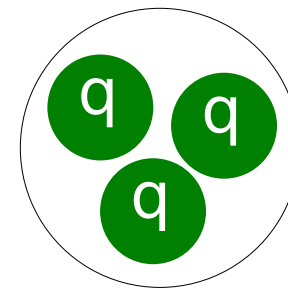
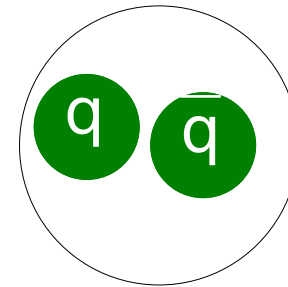
Lösung: Starke Wechselwirkung

- 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)



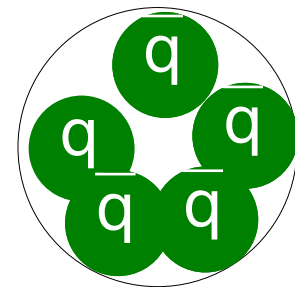
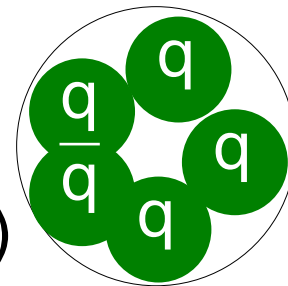
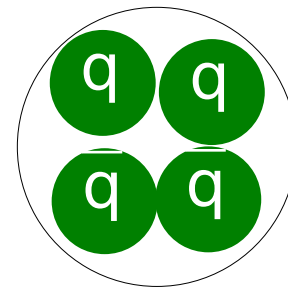
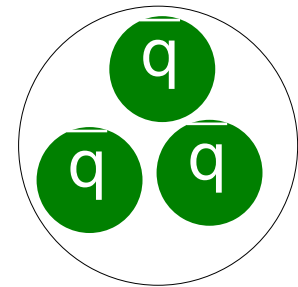
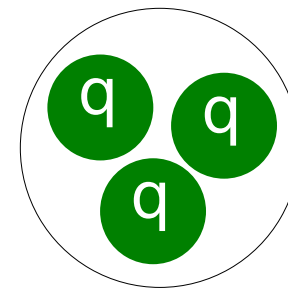
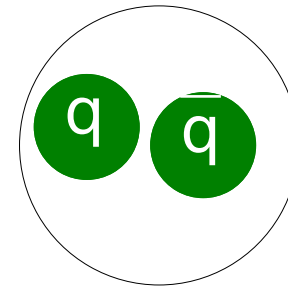
Lösung: Starke Wechselwirkung

- 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

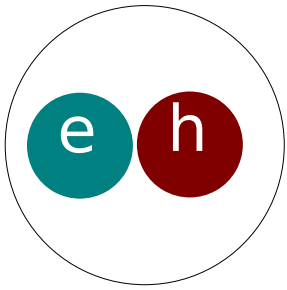
- Die starke Wechselwirkung bindet Quarks (und Gluonen) immer in Hadronen: Confinement
- Es gibt viele Varianten
 - Alle Sorten sind möglich, aber nicht alle Kombinationen von Quarks und Antiquarks
 - Mesonen (viele Hundert beobachtet)
 - Baryonen (Mehr als Hundert beobachtet)
 - Tetraquarks (eine Handvoll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



Lösung: Schwache Wechselwirkung

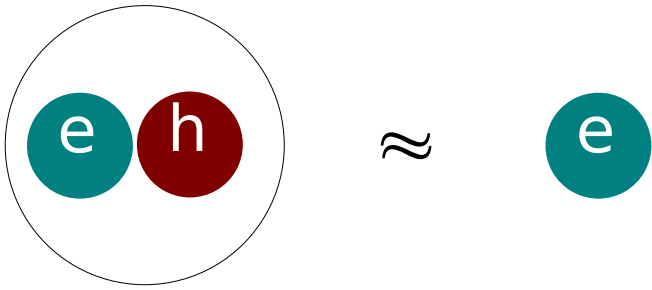
Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen



Lösung: Schwache Wechselwirkung

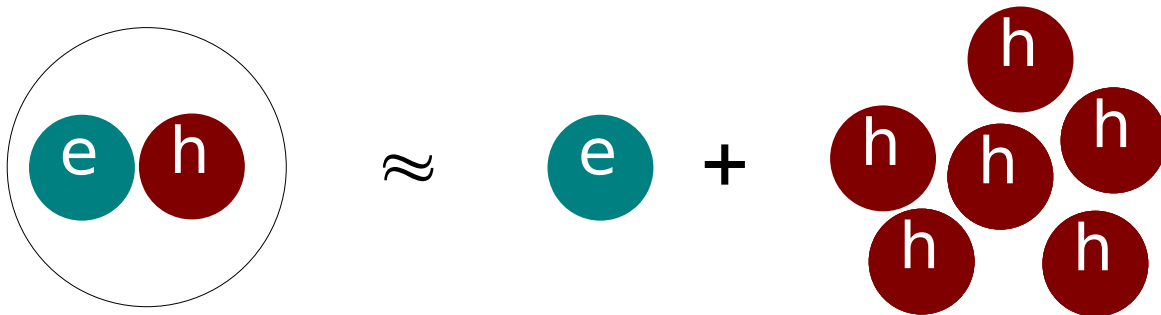
- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen



Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen

Higgskondensat

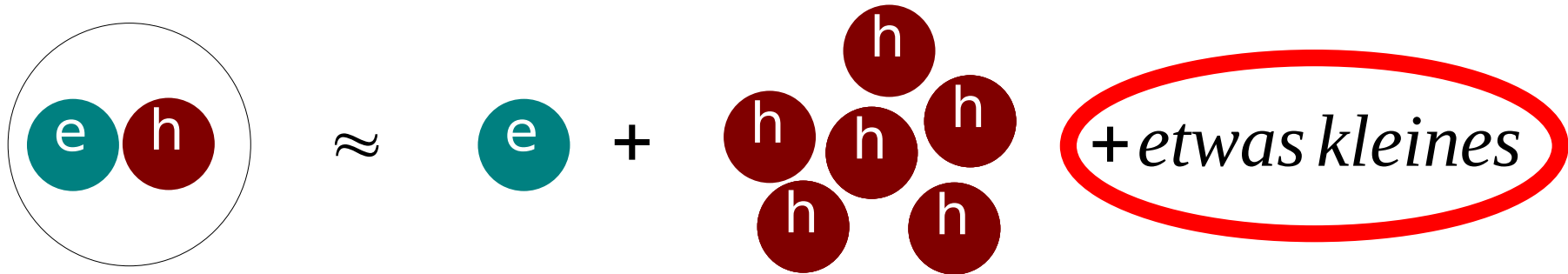


- Subtiler Effekt aufgrund des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus: Fröhlich-Morocchio-Strocchi Effekt

Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen

Higgskondensat

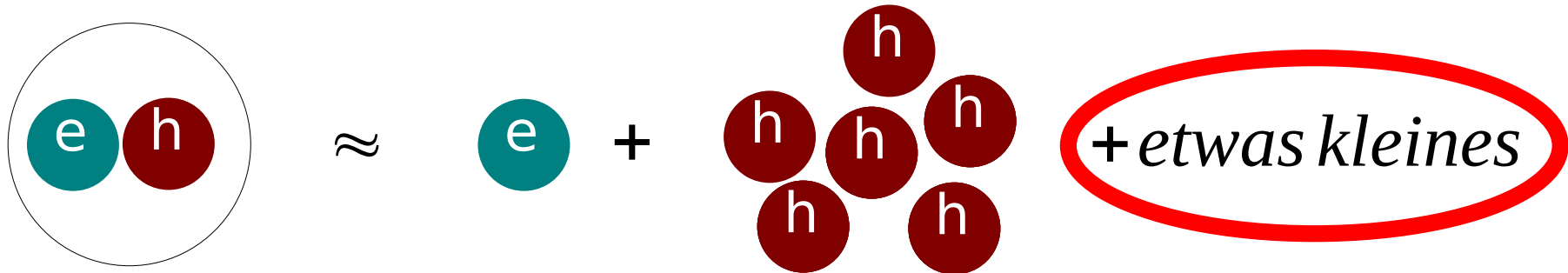


- Subtiler Effekt aufgrund des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus: Fröhlich-Morocchio-Strocchi Effekt

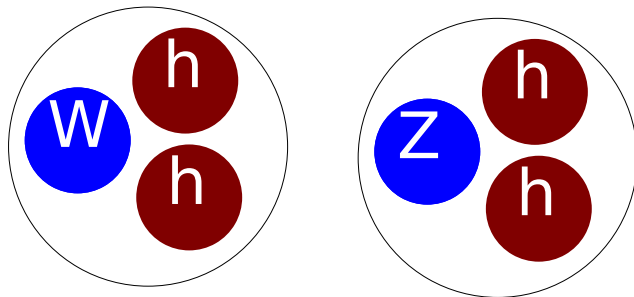
Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen

Higgskondensat



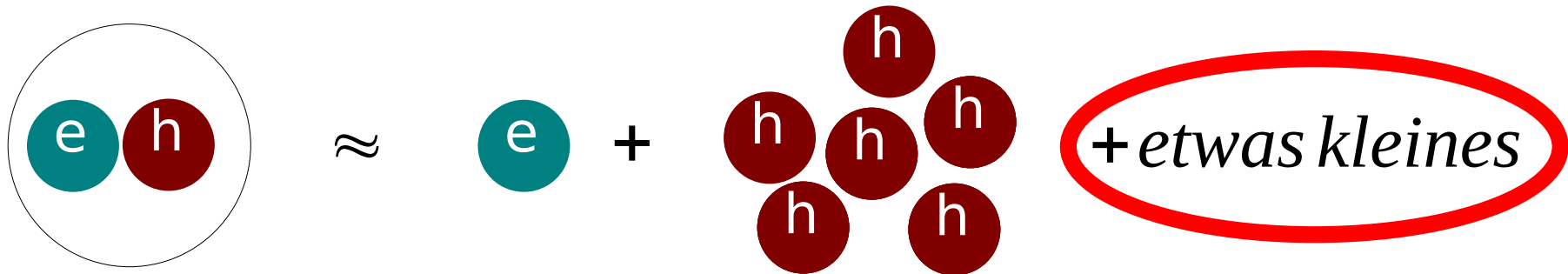
- Subtiler Effekt aufgrund des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus: Fröhlich-Morcchio-Strocchi Effekt
 - Gilt für alle schwach wechselwirkende Teilchen



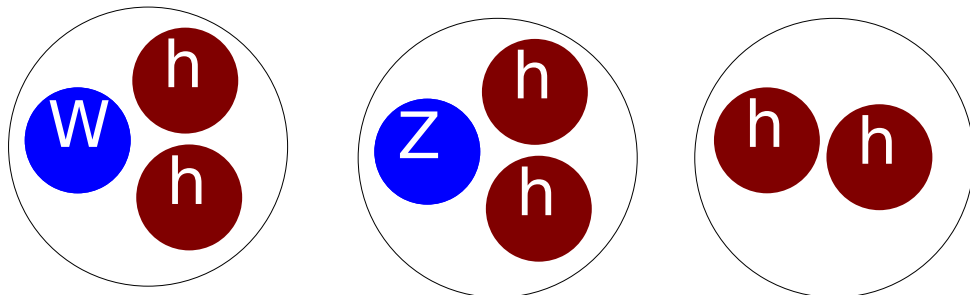
Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen

Higgskondensat



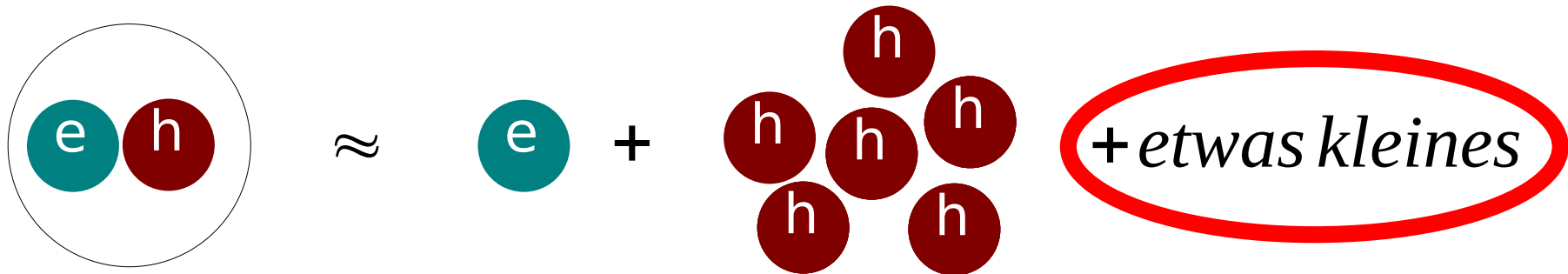
- Subtiler Effekt aufgrund des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus: Fröhlich-Morcchio-Strocchi Effekt
 - Gilt für alle schwach wechselwirkende Teilchen



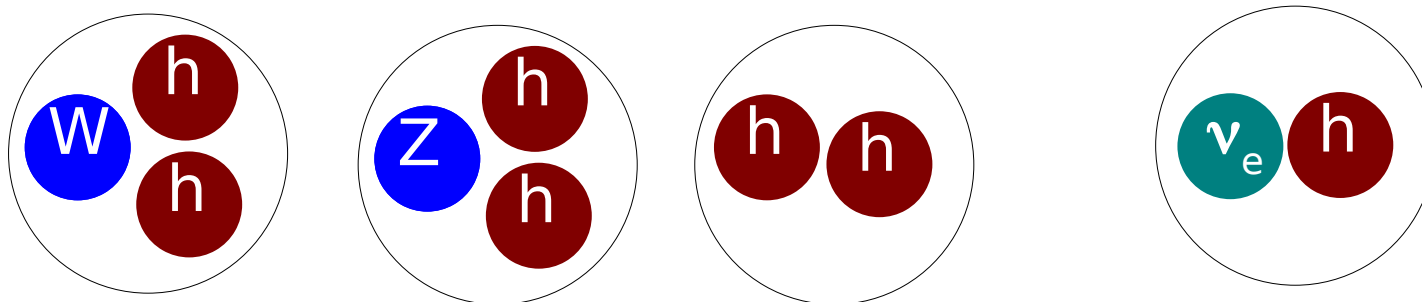
Lösung: Schwache Wechselwirkung

- Bindungszustand sieht (fast) aus wie einzelne Teilchen

Higgskondensat



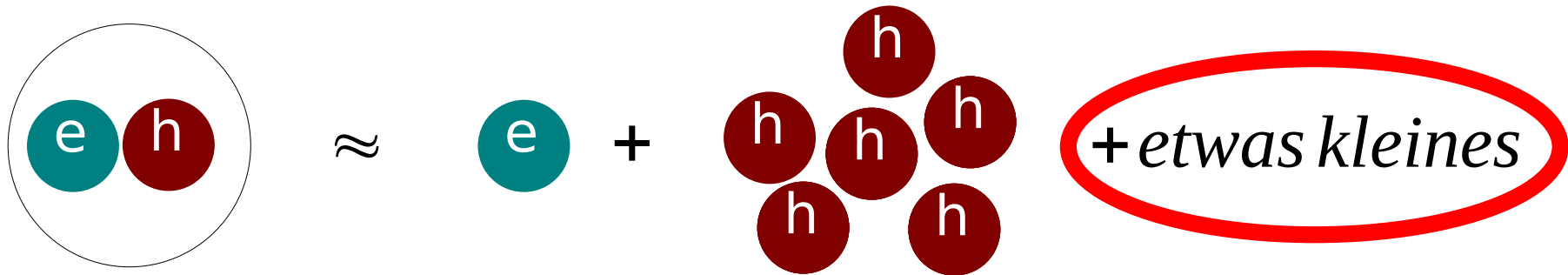
- Subtiler Effekt aufgrund des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus: Fröhlich-Morcchio-Strocchi Effekt
 - Gilt für alle schwach wechselwirkende Teilchen



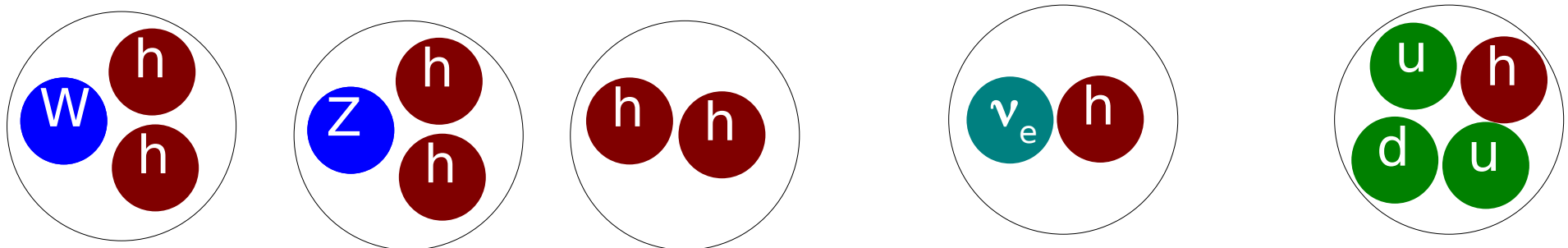
Lösung: Schwache Wechselwirkung

- 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

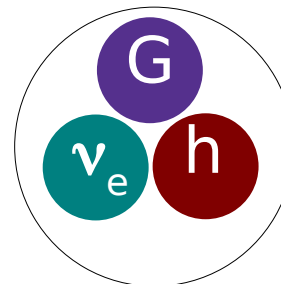
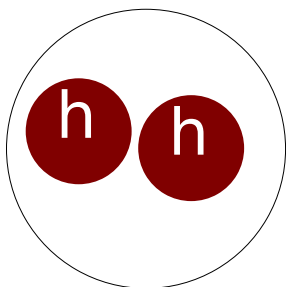
Lösung: Gravitation

- 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

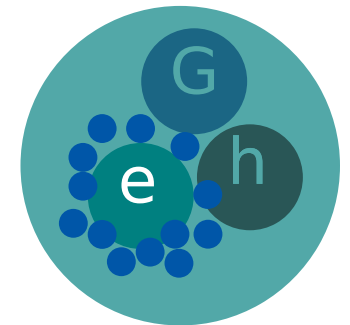
Zusammenfassung

- 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

