

# Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen

Das Standardmodell der Teilchenphysik



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Philipp Lindenau  
25.07.2022





# Was ist Physik?

- ▶ Physik versucht die Wirklichkeit / Welt zu beschreiben
- ▶ Am Besten: Möglichst einfach

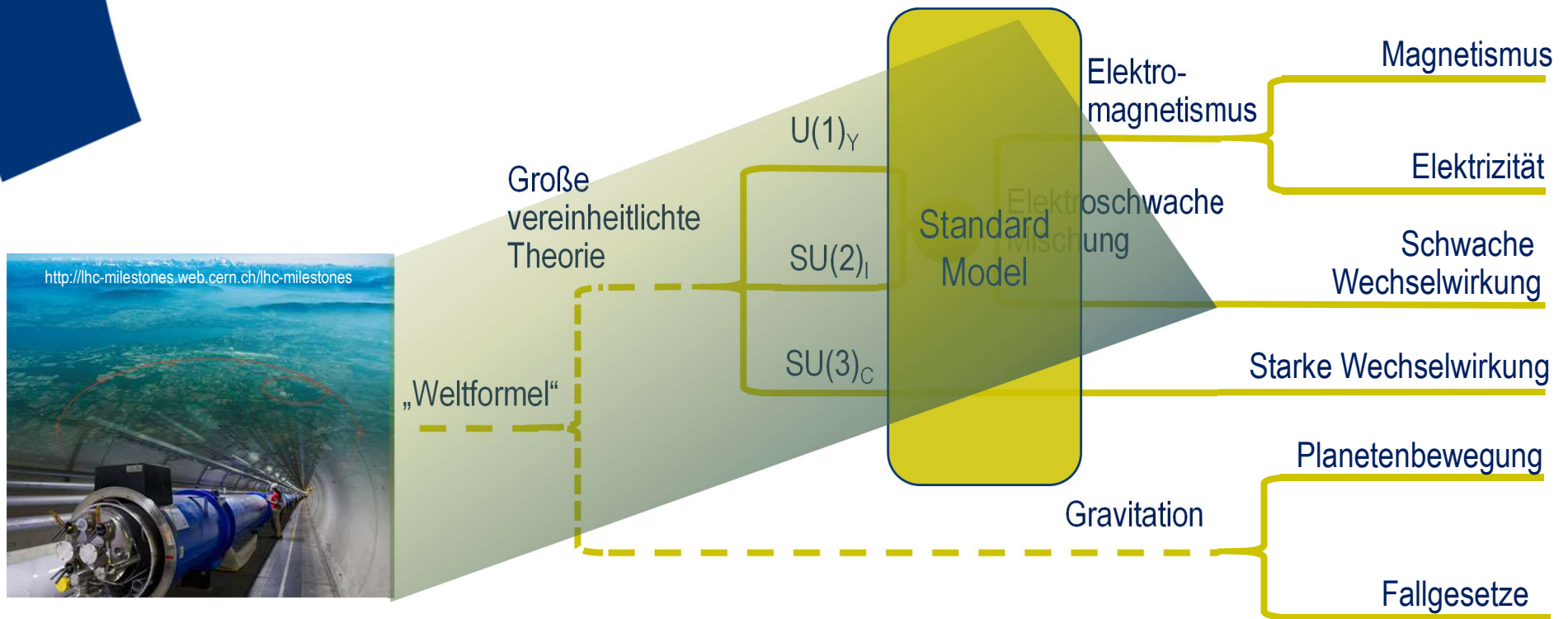




# Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

- ▶ **Newtonsche Mechanik** (17. Jhd.): „irdische“ Fallgesetze (Galilei) und Bewegung der Himmelskörper (Kepler) als Folgen der Gravitation
- ▶ **Elektromagnetismus** (19. Jhd.): Zusammenfassung elektrischer und magnetischer Phänomene durch J. C. Maxwell
- ▶ **Relativitätstheorie** (20. Jhd.): Vereinheitlichung von Raum und Zeit zur *Raumzeit* und von Masse und Energie ( $E = mc^2$ ) durch A. Einstein

# Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“





# Vereinheitlichungen

- ▶ Alle Vorgänge / Phänomene lassen sich auf 4 Wechselwirkungen zurückführen

Hangabtriebskraft,  
Wasserkraft,  
Gasdruck,  
Radiowellen,  
Luftreibung,  
Radioaktive Umwandlungen,  
...



**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**

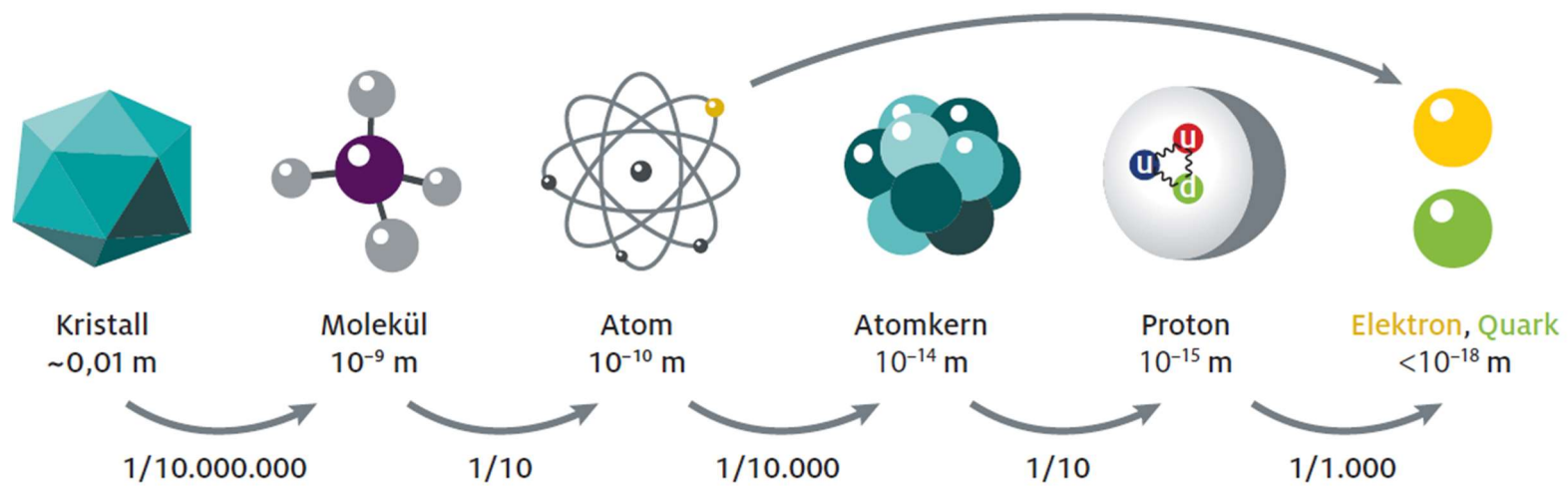


# Das Standardmodell der Teilchenphysik

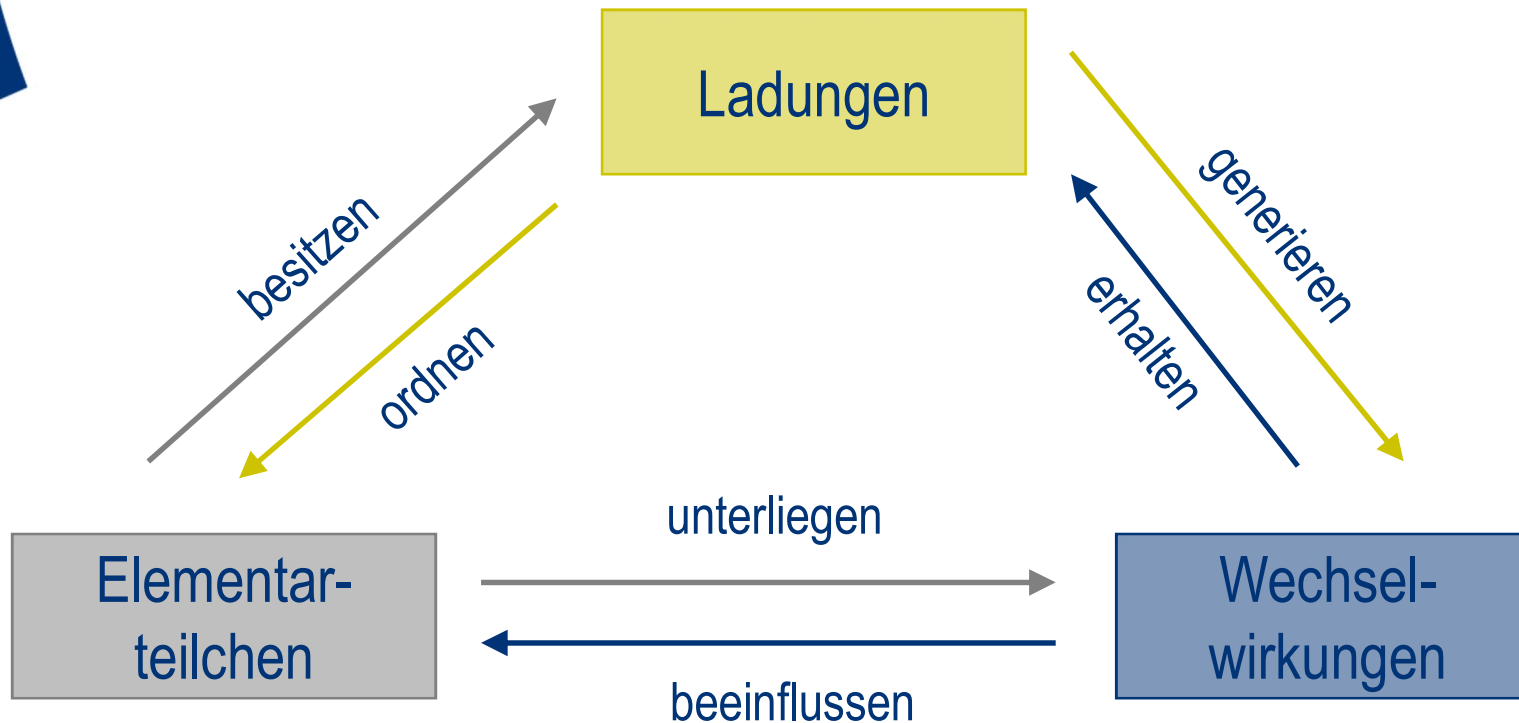
## ► Das Standardmodell

- Elegantes Theoriegebäude („Quantenfeldtheorie“) mit großer Vorhersagekraft  
angereichert mit experimentellen Erkenntnissen
- Grundlage: Fundamentale Symmetrien (lokale Eichsymmetrien)
- Beschreibt alle bekannten Wechselwirkungen auf Teilchenebene
- Wurde 1960er und 1970er Jahren entwickelt.  
Seitdem in zahlreichen Experimenten überprüft und bestätigt

# Größenordnungen



# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells







# Fußball - Analogie

- ▶ Wie erklärt man jemandem etwas Unbekanntes? z.B. Fußball...
  - Man beginnt nicht mit der Anzahl der Spieler oder gar deren Positionen, sondern mit den Grundregeln

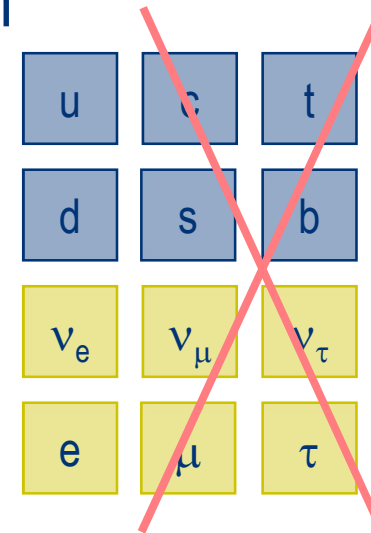
# Fußball - Analogie

- ▶ Wie erklärt man jemandem etwas Unbekanntes? z.B. Fußball...
  - Man beginnt nicht mit der Anzahl der Spieler oder gar deren Positionen, sondern mit den Grundregeln
  - Spieler = Elementarteilchen
  - Regeln = Wechselwirkungen, Erhaltungssätze,...
- ▶ Wieso also bei der Behandlung des Standardmodells damit beginnen??
  - Nur u,d,e sind für Aufbau der Materie nötig
  - Warum es genau diese Teilchen gibt, kann nicht vorhergesagt werden (nicht verstanden!)

u	c	t
d	s	b
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
e	$\mu$	$\tau$

# Fußball - Analogie

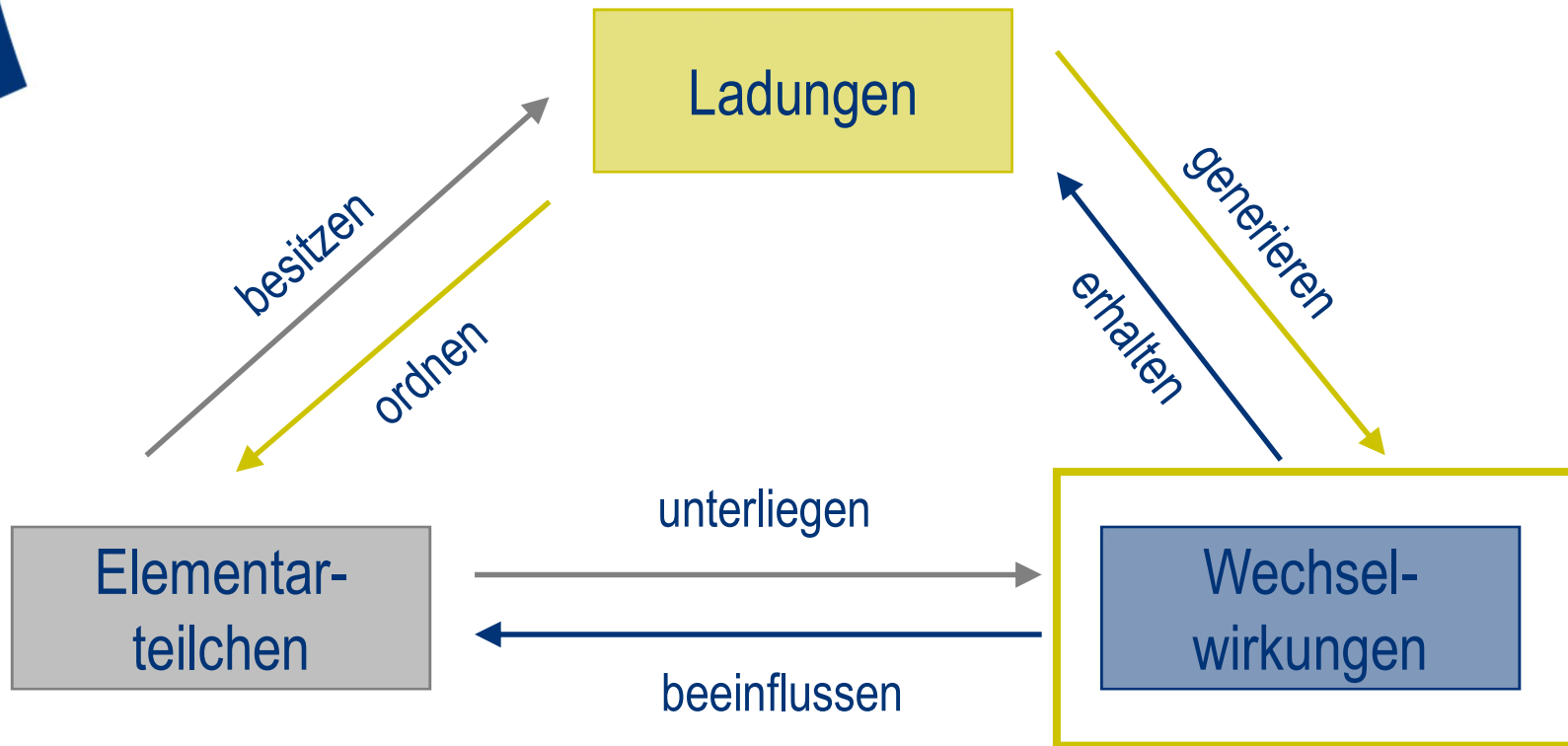
- ▶ Wie erklärt man jemandem etwas Unbekanntes? z.B. Fußball...
  - Man beginnt nicht mit der Anzahl der Spieler oder gar deren Positionen, sondern mit den Grundregeln
  - Spieler = Elementarteilchen
  - Regeln = Wechselwirkungen, Erhaltungssätze,...
- ▶ Nicht: Liste der existierenden Teilchen
- ▶ Sondern: Regeln, die beschreiben, wie diese wechselwirken



A 4x3 grid of particle symbols. The top two rows (u, c, t and d, s, b) are in blue boxes. The bottom two rows (ν<sub>e</sub>, ν<sub>μ</sub>, ν<sub>τ</sub> and e, μ, τ) are in yellow boxes. A large red 'X' is drawn over the entire grid, indicating that a simple list of particles is not the correct approach.

u	c	t
d	s	b
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
e	$\mu$	$\tau$

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells





# Basiskonzept: Wechselwirkung

**Basiskonzept:  
Wechselwirkung**  
= Kraft + Umwandlung +  
Erzeugung + Vernichtung

▶ Umfasst die Phänomene

- Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B. Beta-Umwandlung)
- Erzeugung von Materie + Antimaterie (z.B. Elektron + Positron)
- Vernichtung in Botenteilchen (z.B. PET: 2 Photonen)

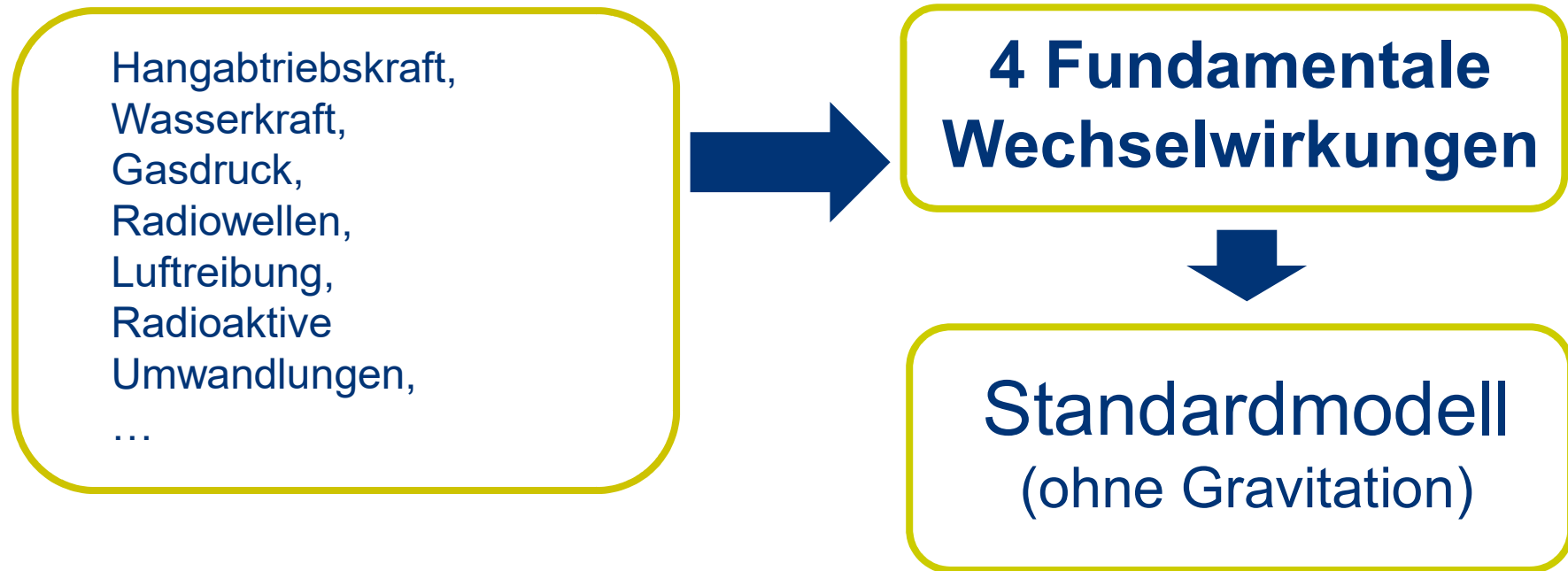
▶ Begriffe Kraft und Wechselwirkung sind klar zu trennen

▶ Kraft ist nur ein Aspekt von Wechselwirkung

▶ Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

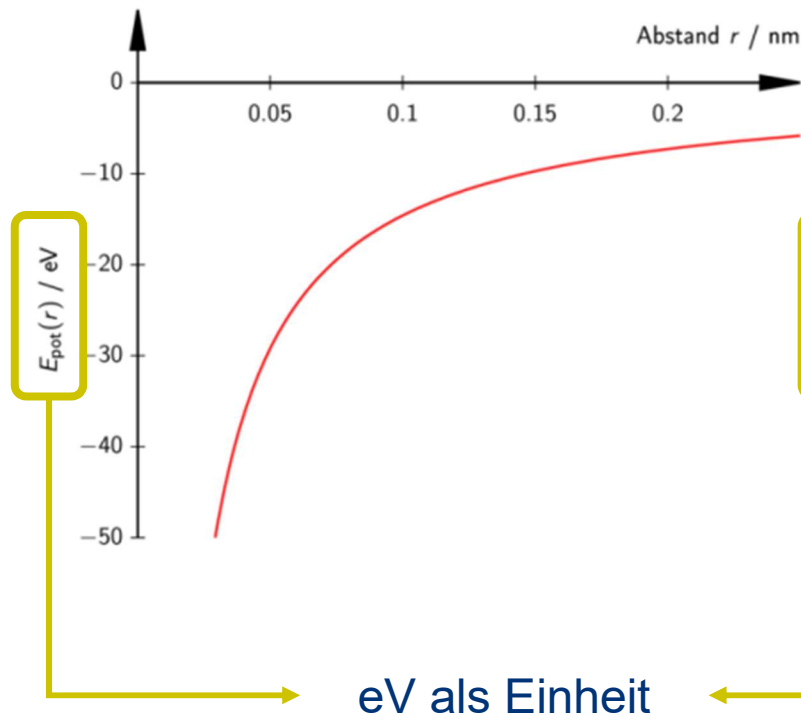
# Vereinheitlichungen

- ▶ Alle Vorgänge / Phänomene lassen sich auf 4 Wechselwirkungen zurückführen

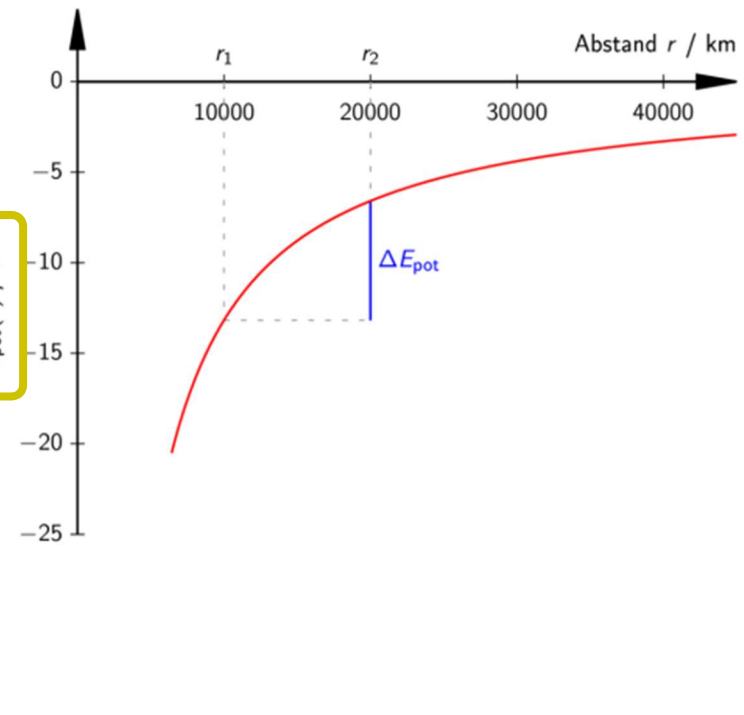


# Ausgangspunkt: Zwei Bekannte Wechselwirkungen

## ► Elektromagnetische Wechselwirkung



## ► Gravitation ( $\text{O}_2$ und Erde)



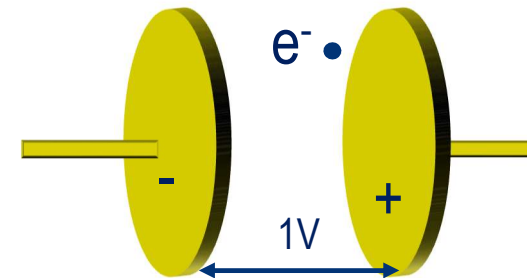
## Einschub: Elektronenvolt

▶ 1 eV ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Spannung von 1 Volt durchläuft.

- 1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Joule
- 1 GeV =  $10^9$  eV
- 1 TeV =  $10^{12}$  eV

▶ Wegen  $E=mc^2$  können Massen in  $\text{eV}/c^2$  angegeben werden! (c: Lichtgeschwindigkeit)

- Elektron  $0,5 \text{ MeV}/c^2$
- Proton  $938 \text{ MeV}/c^2 \sim 1 \text{ GeV}/c^2$
- Higgs-Teilchen  $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$

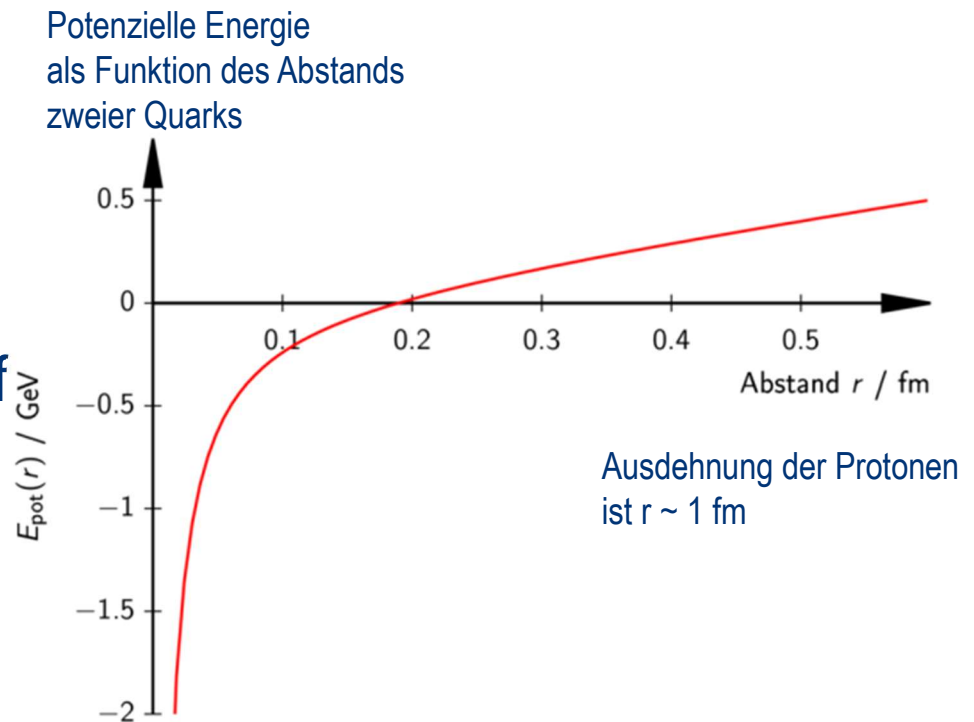




# Die Starke Wechselwirkung

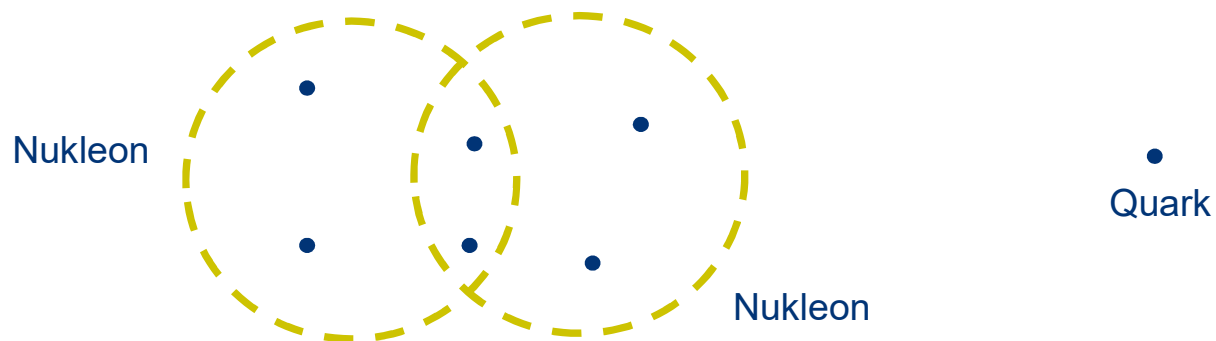
- ▶ Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen?

- ▶ **Substruktur:**  
Nukleonen bestehen aus Quarks, die starke Wechselwirkung spüren.  
Die starke Kernkraft geht auf diese Substruktur zurück



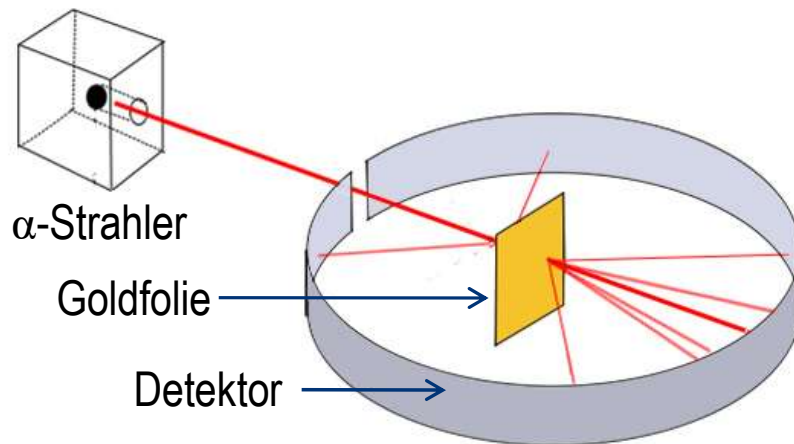
# Bindung von Nukleonen

- ▶ Zusammenhalt von Nukleonen analog zur Elektronenpaarbindung bei Atomen
  - Kurze Abstände: Nukleonen im Kern „teilen“ sich kurzzeitig ein Quark-Paar

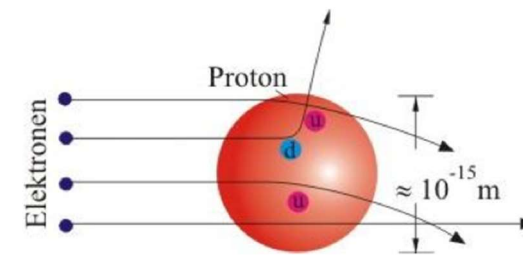


- Bessere Vorstellung: Nukleonengas
- Austausch von „Pionen“ (geb.  $q\bar{q}$  Zustände)

# Experimenteller Nachweis von Quarks



**Rutherford-Streuexperiment (1911)**  
Streuung von  $\alpha$ -Teilchen an Goldatomen  
→ Entdeckung des Atomkern



**Experiment am SLAC (1969)**  
Streuung von Elektronen an Protonen  
→ Entdeckung der Quarks



# Die Schwache Wechselwirkung

- ▶ Warum scheint die Sonne?
  - Protonen (H) fusionieren zu He unter Entstehung von Positronen und Neutrinos
  - Wie „verwandelt“ sich ein Proton in ein Neutron?
- ▶ schwache Wechselwirkung
  - z.B.  $\beta^+$ -Umwandlung

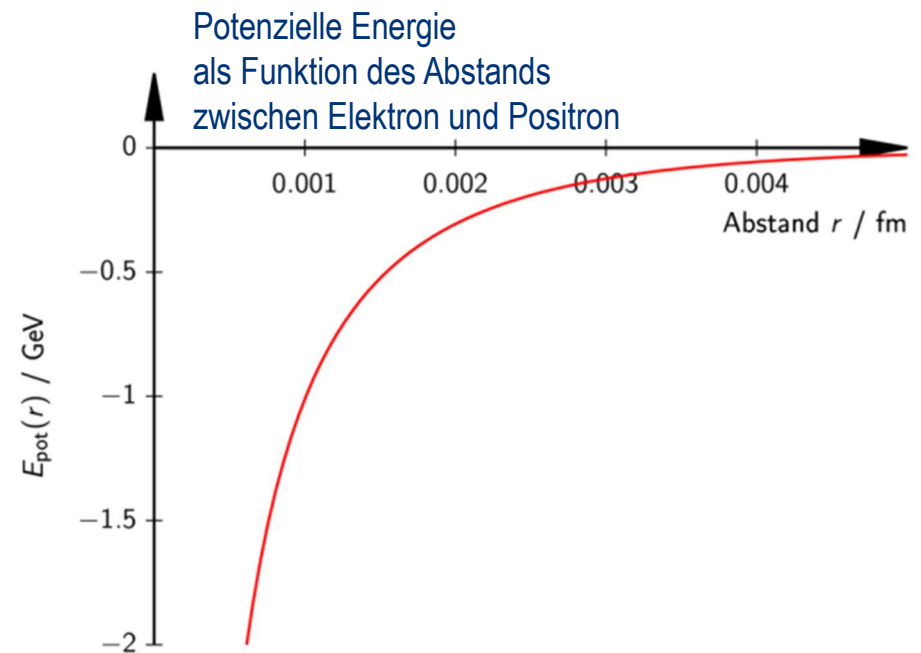
# Die Schwache Wechselwirkung

## ▶ Warum scheint die Sonne?

- Protonen (H) fusionieren zu He unter Entstehung von Positronen und Neutrinos
- Wie „verwandelt“ sich ein Proton in ein Neutron?

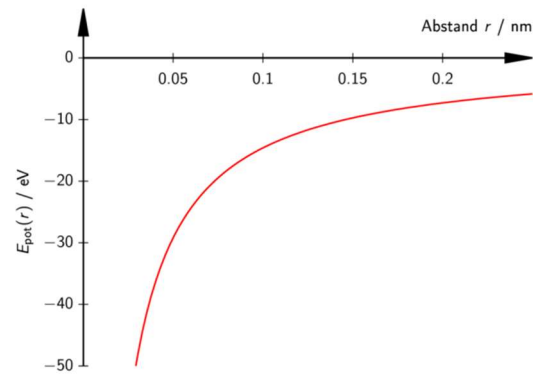
## ▶ schwache Wechselwirkung

- z.B.  $\beta^+$ -Umwandlung

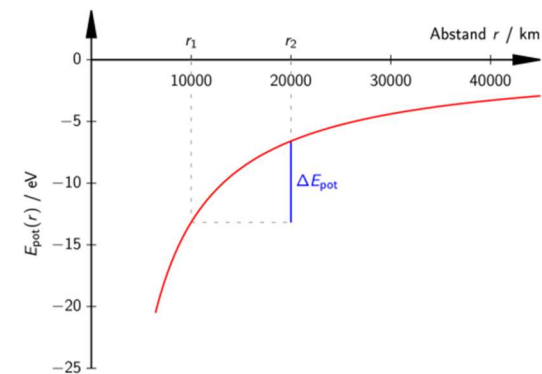


# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

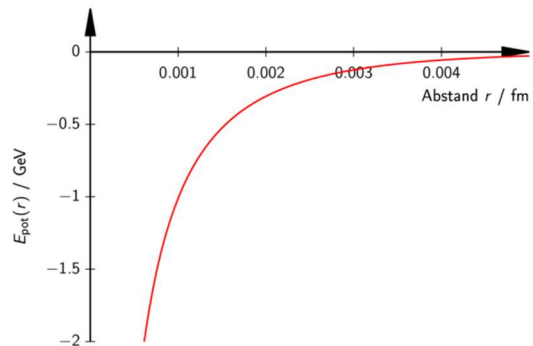
## ► Elektromagnetische WW



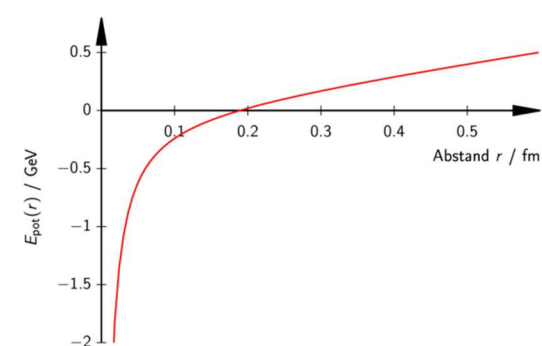
## ► Gravitation



## ► Schwache WW



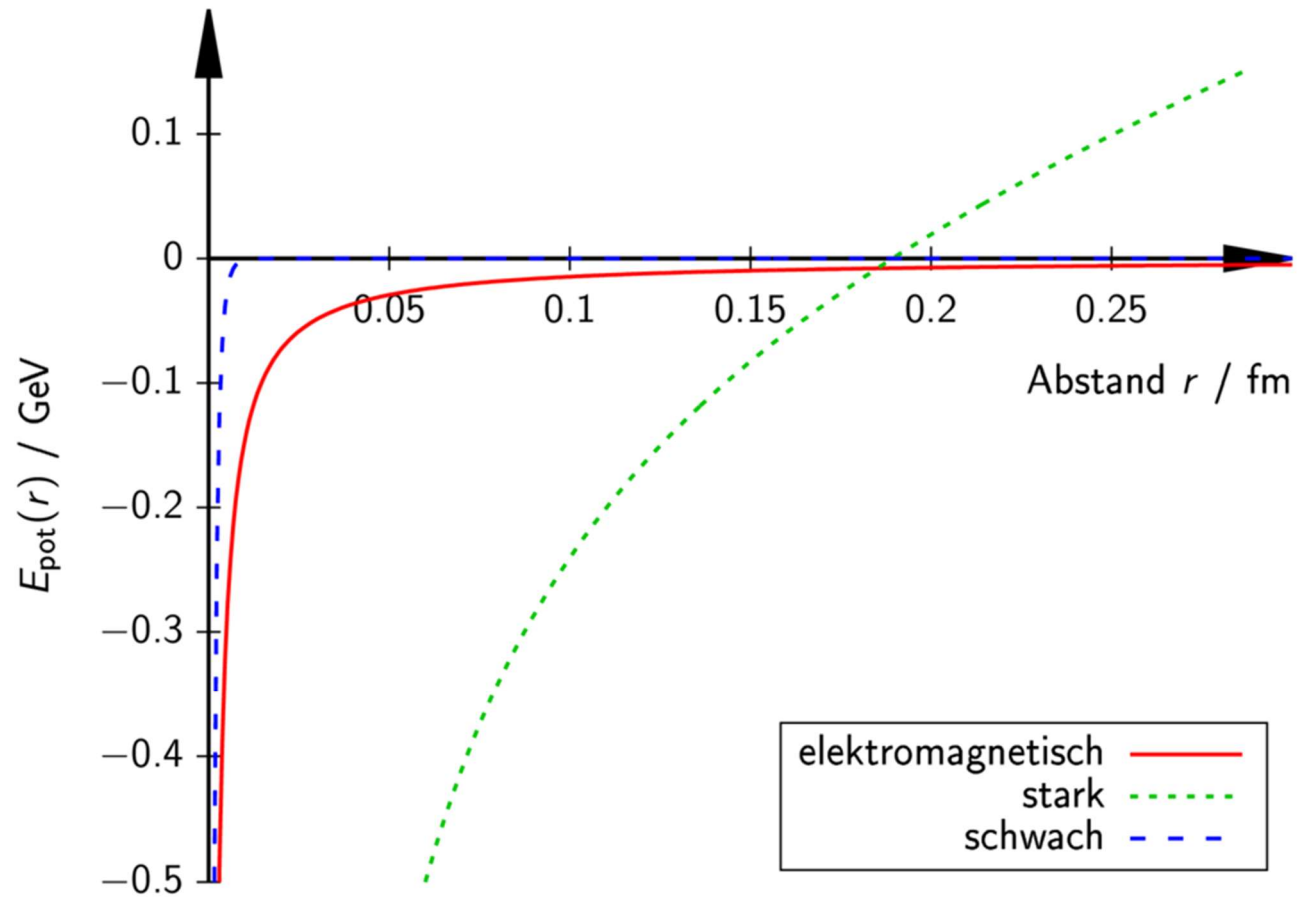
## ► Starke WW





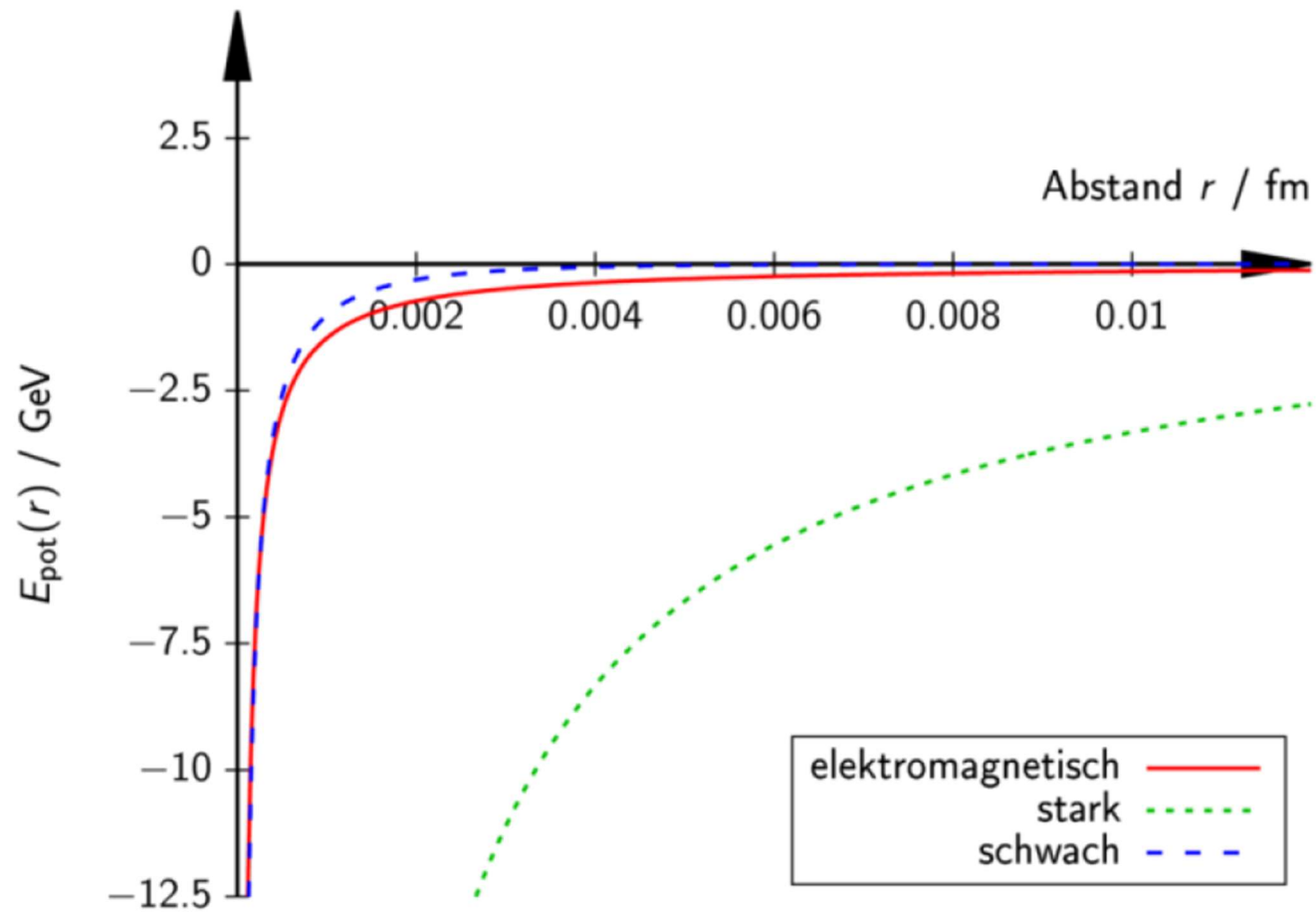
# Vergleich der potenziellen Energien

# Vergleich der potenziellen Energien





## Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen (Achsen jeweils mit Faktor 25 gedehnt bzw gestaucht)



# Potenzielle Energien bei sehr kleinen Abständen

Wechselwirkung	Potenzielle Energie
gravitativ	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{\text{grav}} \frac{-1}{r}$
elektromagnetisch	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r}$
stark	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r}$
schwach	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r}$

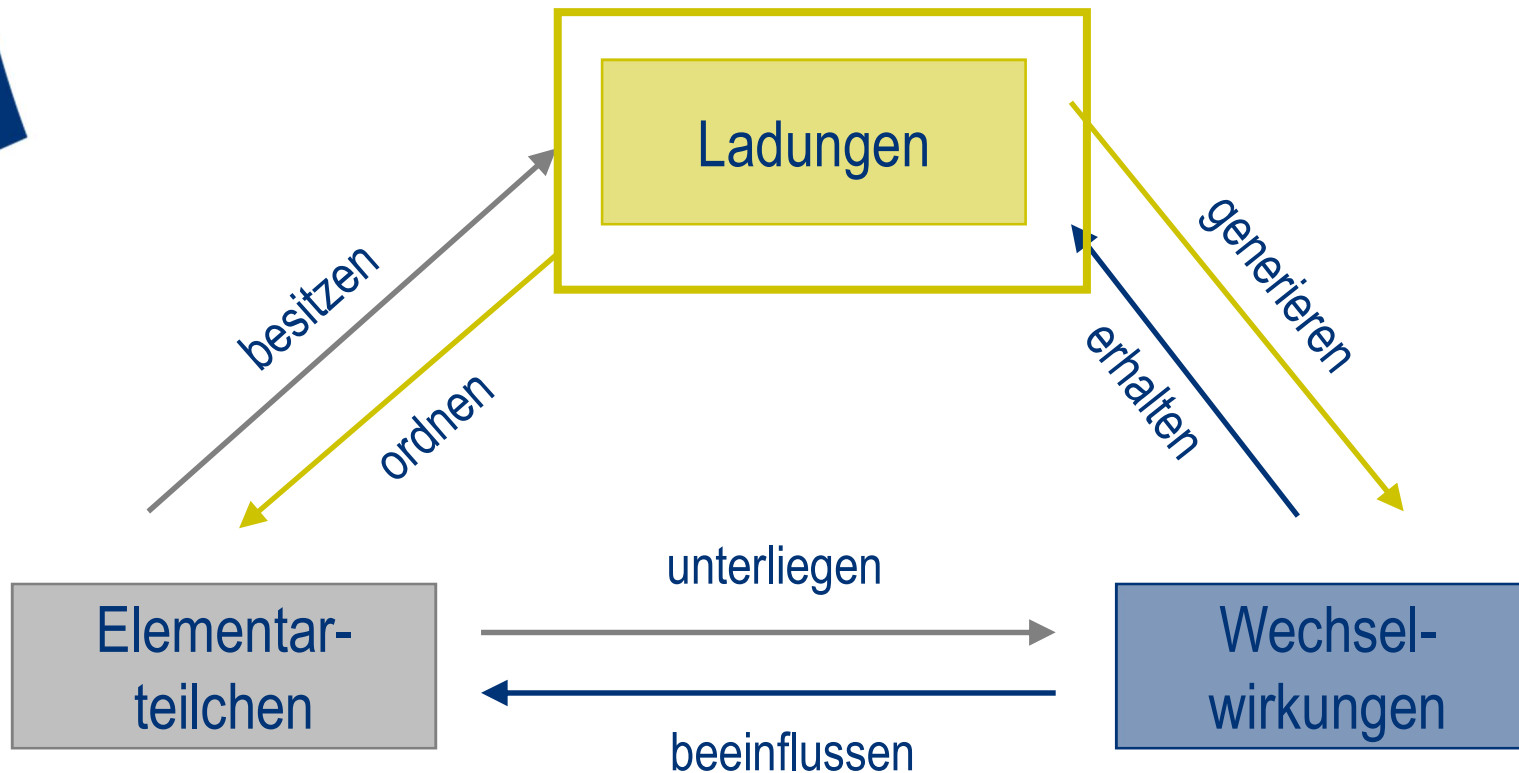


# Digitales Murmeln

## ▶ Murrelphase in Breakout-Räumen

- Diskutiert und formuliert die für euch wichtigsten Erkenntnisse aus dem ersten Teil des Vortrags.
- Formuliert Fragen, die ihr zu den bisherigen Inhalten habt.
- Zeit: 4 Minuten

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells





## Basiskonzept der Ladung

- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:
  - Elektrische Ladung

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische  
Ladungszahl

Elementarladung

# Erweiterung auf andere Wechselwirkungen

- ▶ Coulombsches Gesetz:  $F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2}{r^2} = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$
- $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$   
Kopplungsparameter (Feinstrukturkonstante)

# Erweiterung auf andere Wechselwirkungen

- ▶ Coulombsches Gesetz:  $F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2}{r^2} = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$ 
  - $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$   
Kopplungsparameter (Feinstrukturkonstante)
- ▶ Ein Kopplungsparameter  $\alpha$  existiert auch für andere Wechselwirkungen
  - $\alpha_w, \alpha_S, \alpha_{grav}$
- ▶ Zu jeder Wechselwirkung existiert eine **Ladung**



# Erweiterung: Konzept der Ladung

► **Einführung:** eines Kopplungsparameters  $\alpha$  auch für andere Wechselwirkungen

- $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$

Wechselwirkung	Kopplungsparameter $\alpha$
elektromagnetisch	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$



# Erweiterung des Ladungsbegriffs

- ▶ Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
  - ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren sind charakteristische Teilcheneigenschaften
  - ▶ Bekannt:
    - Elektrische Ladung
  - ▶ Neu:
    - Schwache Ladung
    - Starke (Farb-)Ladung
- |                           |           |
|---------------------------|-----------|
| elektrische Ladungszahl   | $Z$       |
| schwache Ladungszahl      | $I$       |
| starker Farbladungsvektor | $\vec{C}$ |
- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv oder negativ sein



## Und Gravitation?

- ▶ Ladung und Kopplungsparameter der Gravitation quantenfeldtheoretisch (noch) nicht definierbar
- ▶ Keine Elementarmasse → kein teilchenunabhängigen Kopplungsparameter
- ▶ Praktikabel: zwischen Teilchen 1 und Teilchen 2:

$$\alpha_{grav}^{1,2} = G \frac{m_1 m_2}{\hbar c}$$

- ▶ Beispiel:  $\alpha_{grav}$  zwischen Proton (p) und Elektron (e<sup>-</sup>)
  - $\alpha_{grav}^{p,e} = G \frac{m_p m_e}{\hbar c} \approx \frac{1}{3 \cdot 10^{41}}$
  - Erinnerung elektromagnetisch:  $\alpha_{em}^{p,e} \approx \frac{1}{137}$
  - Vergleich:  $\frac{\alpha_{em}^{p,e}}{\alpha_{grav}^{p,e}} \approx 2 \cdot 10^{39}$



# Und Gravitation?

Wechselwirkung	Kopplungsparameter $\alpha$
gravitativ	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$



# Ladung der Gravitation?

Warum kann die Masse  $m$  eines Teilchens nicht die Ladung der Gravitation sein?

▶ Schulniveau:

- Masse ist keine Erhaltungsgröße
- Produkt zweier Massen kann nicht negativ sein

▶ Theorie:

- Massen können keine Eichsymmetrie **in** Raum und Zeit erzeugen, denn Raum und Zeit selbst müssen „verdreht“ werden



# Konzept der Ladung

- ▶ Ladungen sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ Teilchen nehmen nur dann an einer bestimmten Wechselwirkung teil, wenn sie die Ladung der entsprechenden **Wechselwirkung** besitzen

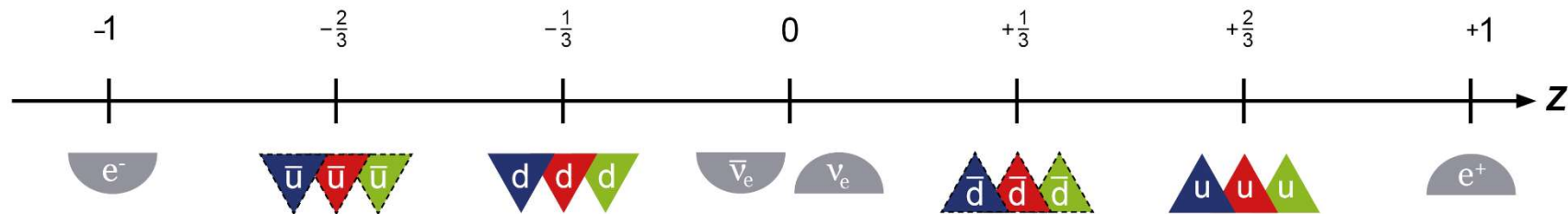
Und:

- ▶ Ladungen dienen als **Ordnungsprinzip** für Teilchen
- ▶ Ladungen sind fundamentale **Erhaltungsgrößen**
  - Grundlage der Symmetrien des Standardmodells

# Elektrische Ladung

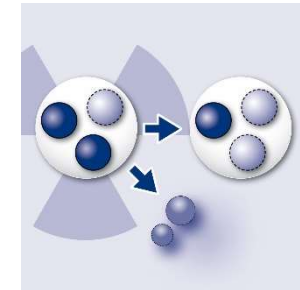


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen  $Z$  einiger Anti-/Materieteilchen

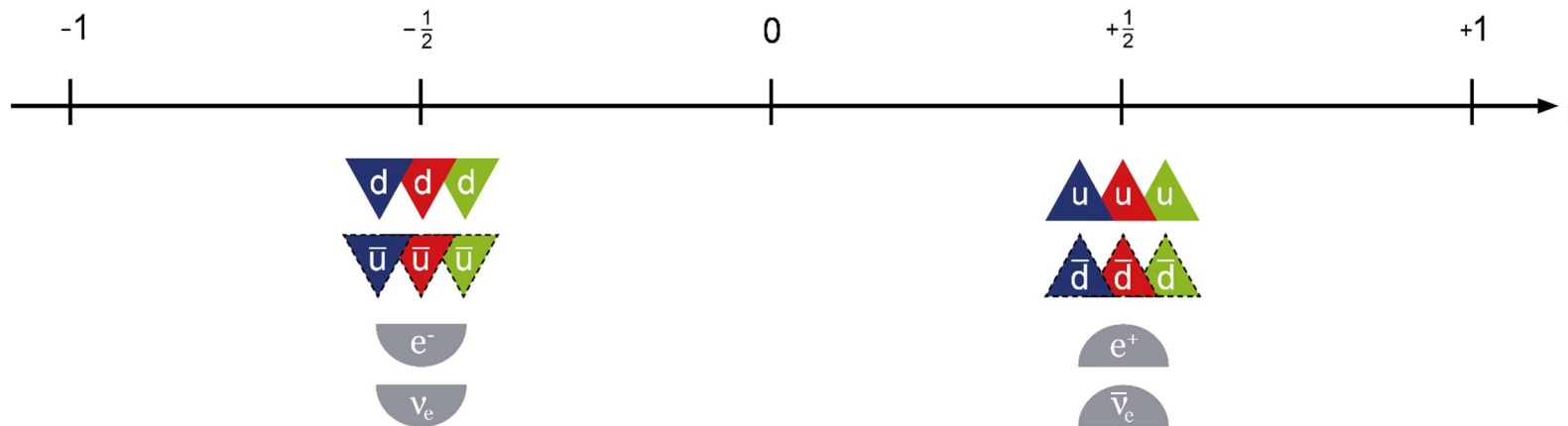


- Elektrische Ladung ist gequantelt

# Schwache Ladung



- ▶ Materieteilchen besitzen entweder eine schwache Ladungszahl von  $I = +\frac{1}{2}$  oder  $I = -\frac{1}{2}$ 
  - alle Materieteilchen nehmen an der schwachen WW teil



- ▶ Schwache Ladung ist gequantelt



# Schwache Ladungszahl

$$Q_{em} = e \cdot Z$$

$$Q_w = g_w \cdot I$$

Kopplungsstärke  $g_w$   
 $\rightarrow \alpha_w = \frac{g_w^2}{4\pi}$

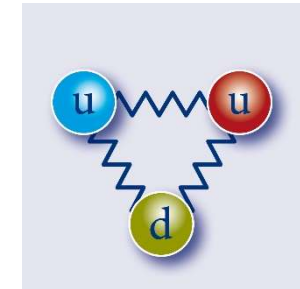
Ladungs-  
zahl

- Die schwache Ladung hat eigentlich einen vektoriellen Charakter, daher die **vollständige** Bezeichnung „Schwache **Isospin-Ladung**“
- Wie beim Spin (z.B. in Atomorbitalen die magnetische Quantenzahl  $m$ ) ist nur eine Komponente (die schwache **Ladungszahl**) messbar. (Daher der „**Isospin**“ Begriff)
- Sie darf außerdem nicht verwechselt werden mit dem „starken Isospin“, der insbesondere zur Ordnung von gebundenen Quark-Zuständen dient. Er ist **keine Ladung** im Sinne einer Wechselwirkung.



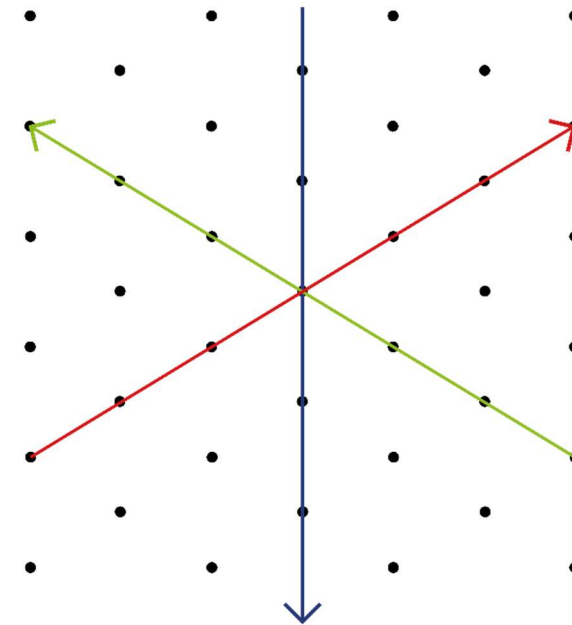
# Starke Ladung

▶ Quarks und Anti-Quarks besitzen eine starke Ladung (auch: starke „Farbladung“)



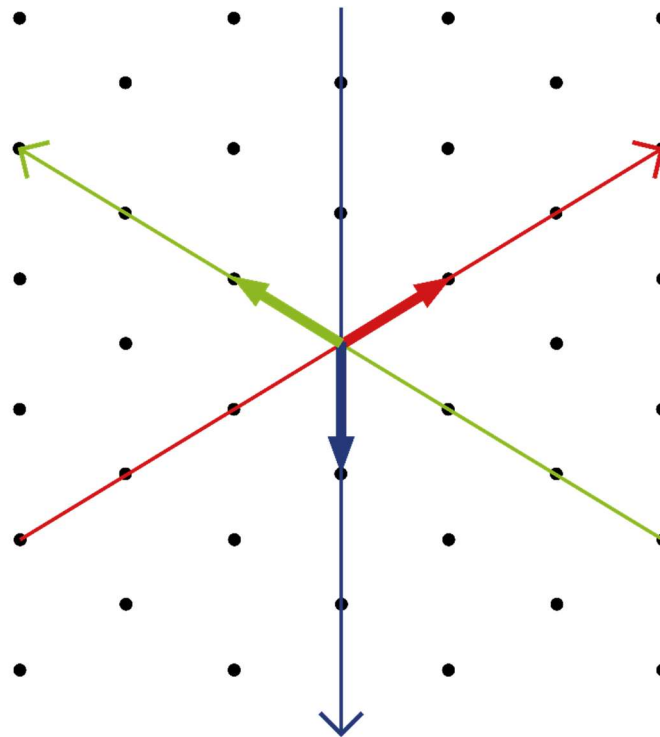
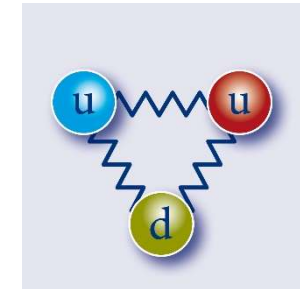
▶ Farbgitter:

- Experimentell nachgewiesen: Alle starken Ladungen haben gleichen Betrag
- 3 Ladungen addieren sich zu 0 (Protonen und Neutronen bspw. bestehen aus 3 Quarks)  
→ geht nur mit Vektoren
- Theorie: 2 Komponenten messbar  
→ 2-dim Farbgitter



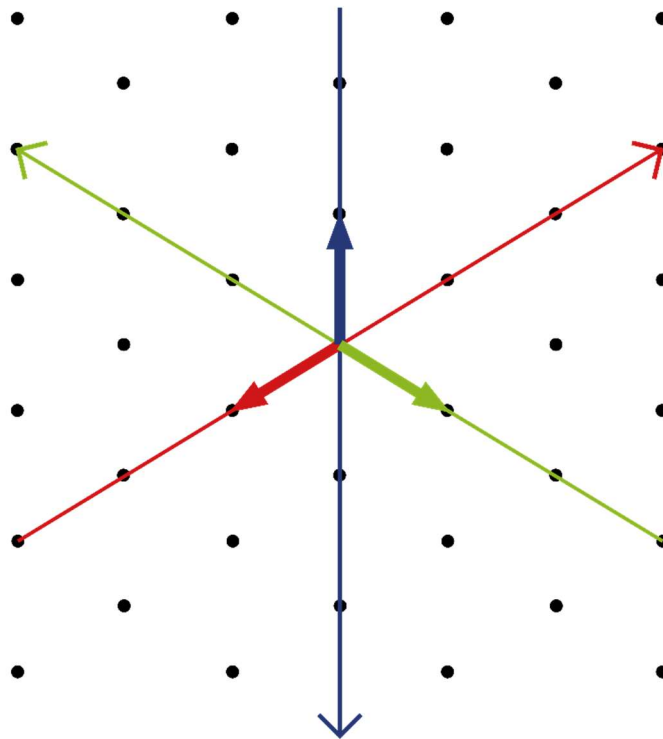
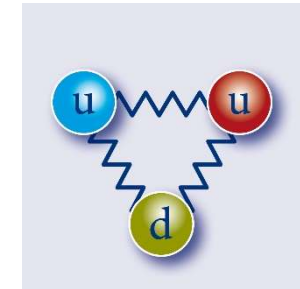
# Starke Ladung

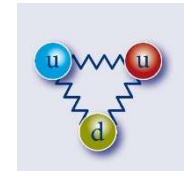
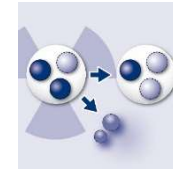
► Farbladungsvektoren von Quarks



# Starke Ladung

► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





# Alle Ladungen sind additiv

## ▶ Beispiel: Ladungszahlen eines Protons p(u, u, d)

- Elektrische Ladungszahl:

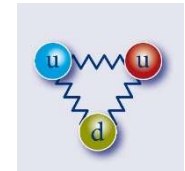
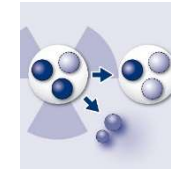
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

$$I_p = I_u + I_u + I_d = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = +\frac{1}{2}$$

- Starker Farbladungsvektor:

$$\vec{C}_p = \vec{C}_u + \vec{C}_u + \vec{C}_d = \begin{matrix} \text{red arrow} \\ + \\ \text{green arrow} \\ + \\ \text{blue arrow} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{red arrow} \\ \text{green arrow} \\ \text{blue arrow} \end{matrix} = \vec{0}$$



# Alle Ladungen sind jeweils erhalten

▶ Beispiel:  $\beta^-$ -Umwandlung  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

- Elektrische Ladungszahl:

$$0 \rightarrow +1 - 1 + 0 = 0$$

- Schwache Ladungszahl:

$$-\frac{1}{2} \rightarrow +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = -\frac{1}{2}$$

- Starker Farbladungsvektor:

$$\vec{0} \rightarrow \vec{0} + \vec{0} + \vec{0} = \vec{0}$$



## Eindeutige Vorhersage möglich

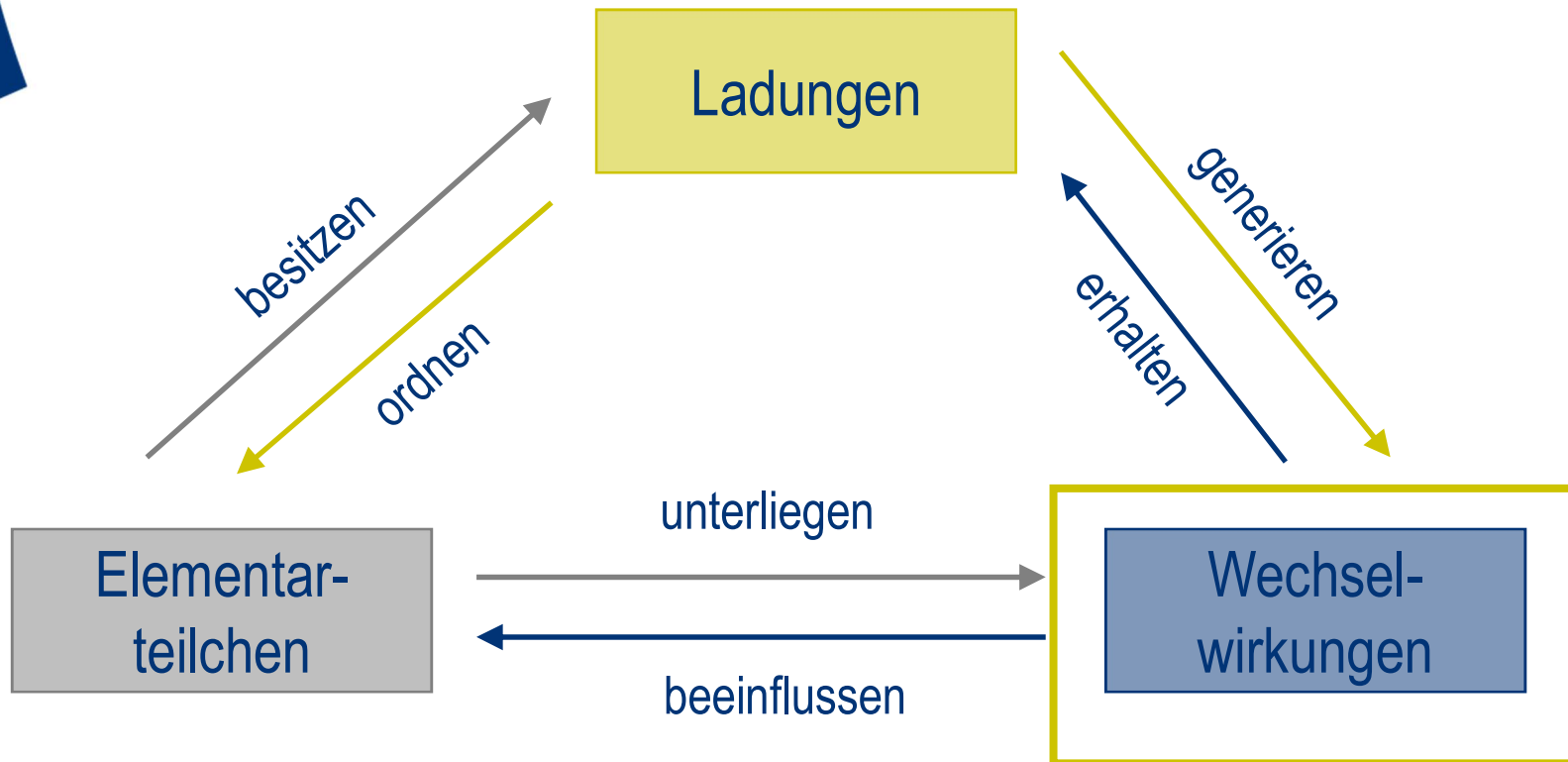
- ▶ ob bestimmte Prozesse erlaubt oder unmöglich sind (und sogar ihrer Wahrscheinlichkeiten) aus
  - Energie- und Impulserhaltung
  - **Erhaltung aller drei Ladungen**
  - Beachtung der Teilchen-“Multipletts“ (später)



# Zusammenfassung: Ladungen

- ▶ Drei verschiedene Ladungen
  - Elektrisch
  - Schwach
  - Stark
- ▶ Ladungen sind
  - Additiv
  - Erhalten  
→ Vorhersage von erlaubten Prozessen
  - Gequantelt
- ▶ Antimaterie: Alle Ladungen entgegengesetzt

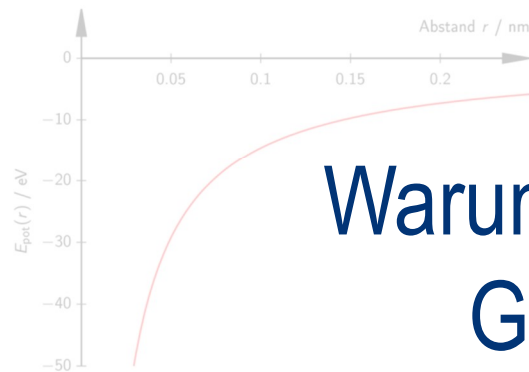
# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells





# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW

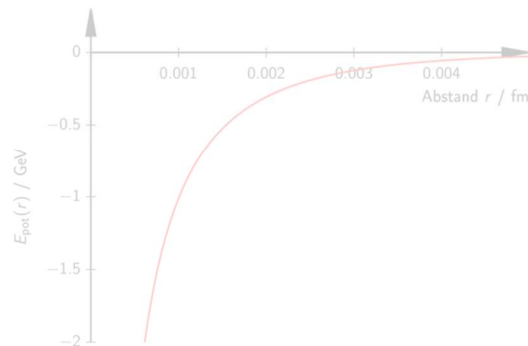


► Gravitation

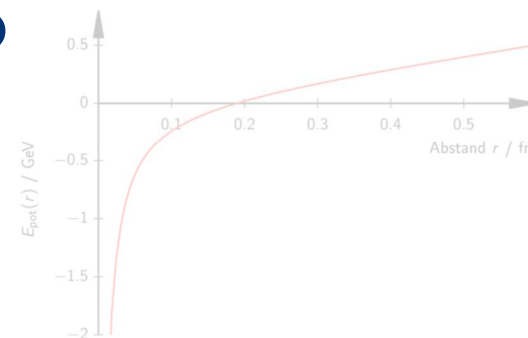


Warum erfahren wir nur  
Gravitation und

► Schwache WW **Elektromagnetismus**



im Alltag?



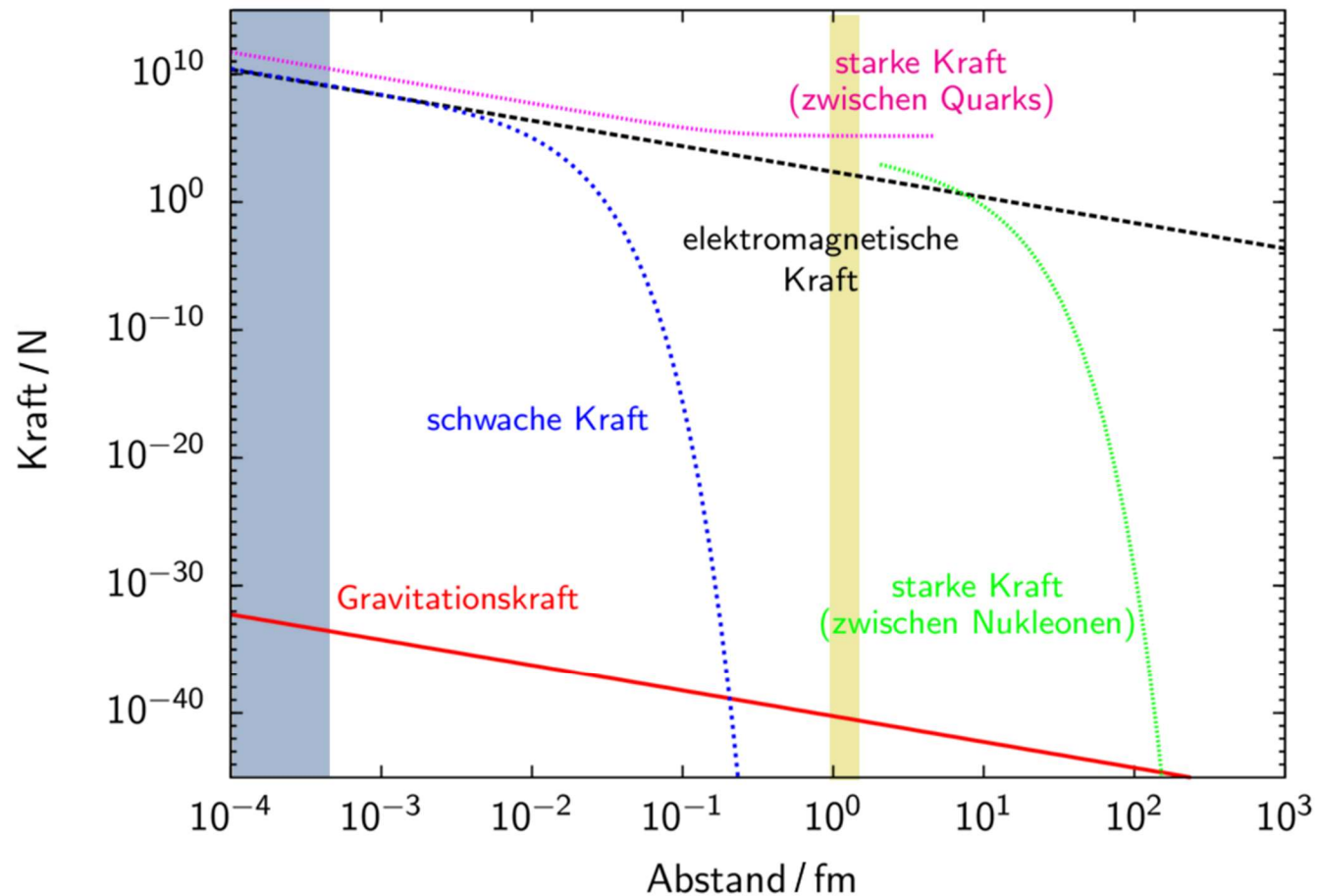
# Kräfte der Wechselwirkungen

**Basiskonzept:**  
**Wechselwirkung**  
= Kraft + Umwandlung +  
Erzeugung + Vernichtung

Grenze exper. Auflösung  
(stark, schwach, em)

Protondurchmesser

\*Wir sind ~1m weiter dort →





# Kräfte der Wechselwirkungen

**Basiskonzept:**  
**Wechselwirkung**  
= Kraft + Umwandlung +  
Erzeugung + Vernichtung

- ▶ Alle Kraftgesetze beinhalten den Abstand  $r$ 
  - Bei kleinen Abständen  $F \sim 1/r^2$
- ▶ Reichweiten sind Konsequenzen dieser Kraftgesetze
  - Unendlich: im Alltag spürbar
  - Endlich: nur subatomar
- ▶ Reihenfolge der Stärken
  - Kann für Kräfte nicht definiert werden wegen  $F(r)$
  - Kann nur für Wechselwirkungen definiert werden:  $\alpha$  !
- ▶ Stärken aller **Wechselwirkungen sehr** ähnlich (außer für Gravitation)

# Stärke der Wechselwirkungen

► Einführung: eines Kopplungsparameters  $\alpha$  auch für andere Wechselwirkungen

- $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$



Warum erfahren wir nur

Wechselwirkung	Kopplungsparameter $\alpha$
Gravitation	$\alpha_{grav} \approx 10^{-39}$
elektromagnetisch	$\alpha \approx \frac{1}{137}$
stark	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

Gravitation und Elektromagnetismus

im Alltag?

# Ausgangspunkt: Geometrische Betrachtung

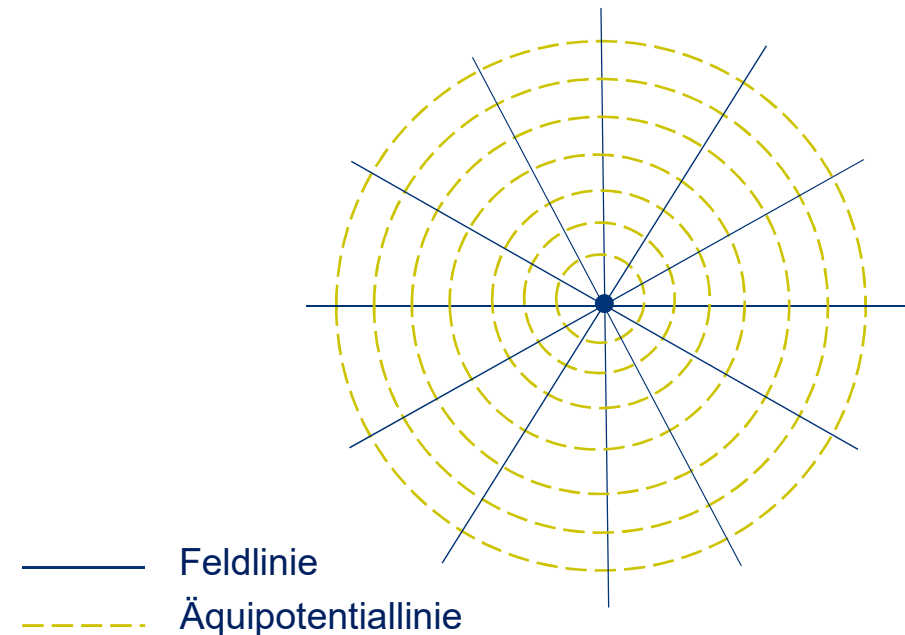
▶ Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW

▶ **Dichte** der Feldlinien ist **proportional** zur Kraft

- Idee Ladung im Zentrum
- Kugeloberfläche  $A = 4\pi r^2$
- $F \sim \frac{1}{4\pi r^2}$

▶ Stimmt bei

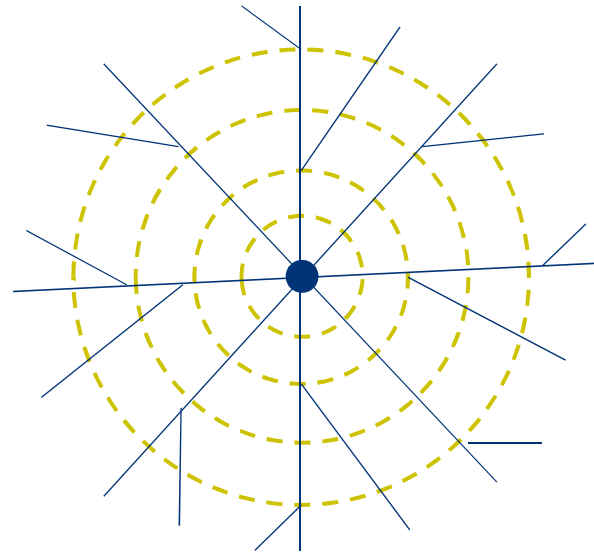
- $F_C = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$



# Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

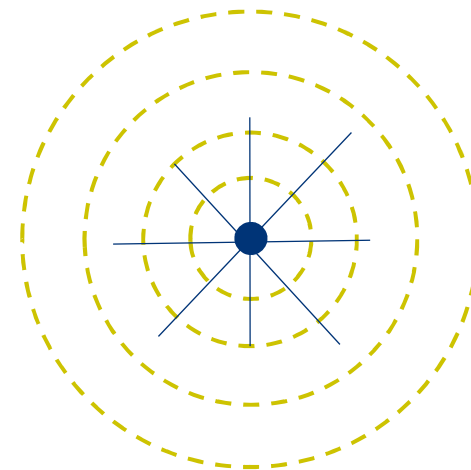
## ► Stark

- Kraft konstant →  
Feldliniendichte wird konstant
- Feldlinien entstehen spontan



## ► Schwach

- Kraft strebt rasch gegen Null
- Feldlinien enden „im Nichts“





## Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

- ▶ Modell in der ETP: Wechselwirkungen werden durch Botenteilchen vermittelt
- ▶ Energieübertrag, Impulsübertrag und Teilchenumwandlungen werden durch Abstrahlung/Absorption von Botenteilchen beschrieben

$$e^{-} \rightarrow e^{-} + \gamma \text{ (Photon)}$$

$$e^{-} + \gamma \rightarrow e^{-}$$

$$e^{-} + W^{+} \rightarrow \nu_e$$

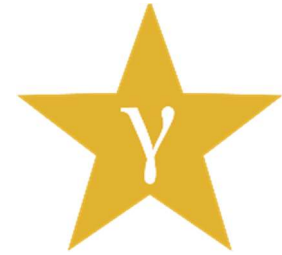


# Ausgangspunkt: Elektromagnetische Wechselwirkung

▶ Botenteilchen (Photon) ist:

- masselos
- elektrisch neutral

$$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r}$$





## Schwache WW - W- und Z-Teilchen



▶  $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_w}}$

▶ Grund: Massereiche Botenteilchen (  $W^+$ ,  $W^-$  und Z-Teilchen) verursachen kurze Reichweite

- Compton-Wellenlänge  $\lambda_w = \frac{\hbar}{m_w c} \approx 0,0024 \text{ fm}$
- Exakte Argumentation schwierig. Mathematische Herleitung möglich, liegt außerhalb der hier behandelten Themen

## Klassisches Analogon:

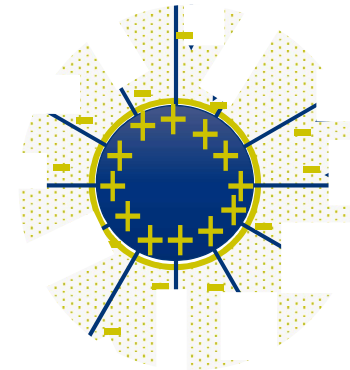
### ► Abschirmung von Feldlinien im Kugelkondensator

- Einfügen von Dielektrikum
- Abschirmung von (unendlichen) Feldlinien durch Polarisation
- Abgeschirmtes Feld  
→ Endliche Reichweite  $\lambda$

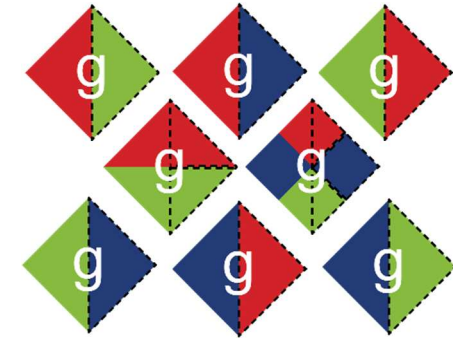
### ► Brout-Englert-Higgs Feld schirmt schwache Ladungen ab

- Polarisierbares Medium der Schwachen Wechselwirkung → „Dischwachladikum“
- Abgeschirmtes Feld  
→ Masse der Botenteilchen

$$m_W c^2 = \frac{\hbar c}{\lambda_W} = \frac{0,2 \text{ GeV} f m}{\lambda_W}$$



# Starke Wechselwirkung – Gluonen



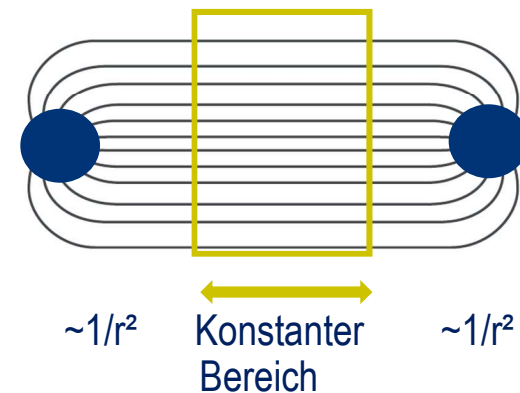
▶ Vergleich: Stark  $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$

- ▶ Grund: die Botenteilchen besitzen selbst starke Ladung
- Gluonen können selbst Gluonen abstrahlen/absorbieren
  - Sie wechselwirken also miteinander

→ Linearer  $kr$ -Term im Potenzial

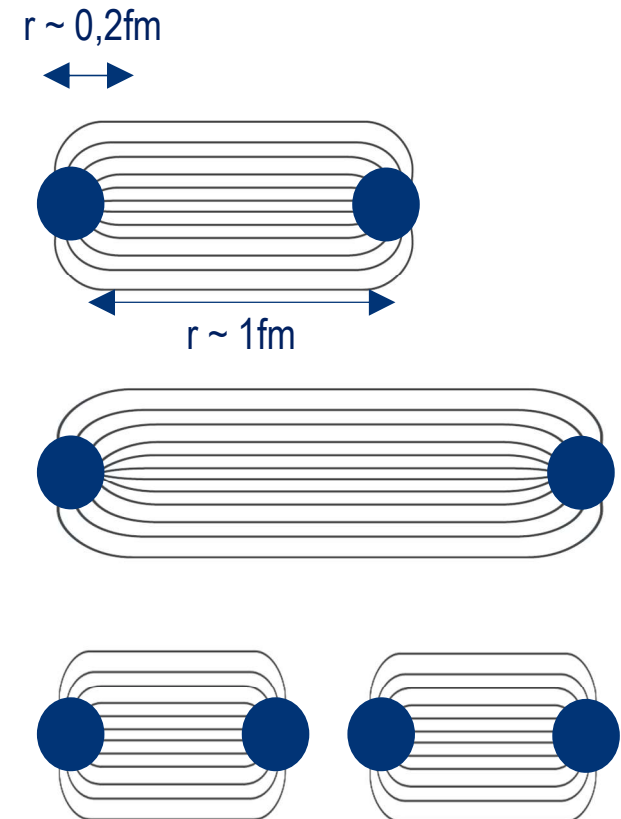
# Starke Wechselwirkung

- ▶  $E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$
- ▶ Einführung: die Botenteilchen (Gluonen) besitzen selbst starke Ladung
  - Gluonen können selbst Gluonen abstrahlen
  - Sie wechselwirken miteinander
  - Es entsteht ein „Feldlinienschlauch“
- ▶ Feldliniendichte bleibt konstant
  - Potential linear → Kraft konstant



# Starke Wechselwirkung

- ▶  $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{c}_1 \vec{c}_2}{r} + kr$
- ▶ Linearer Term, dominiert ab  $r \approx 0,2 \text{ fm}$ 
  - Die im Feld gespeicherte Energie steigt linear
  - Genügend Energie um neue Teilchen(-paare) zu erzeugen!
- ▶ „Confinement“



# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Potenzielle Energie	Reichweite
gravitativ	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{grav} \frac{-1}{r}$	unendlich
elektromagnetisch	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r}$	unendlich
stark	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$	$5 \cdot 10^{-15} \text{m}$
schwach	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_w}}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{m}$

# Zusammenfassung: Botenteilchen

- ▶ Reichweite und Potenziale der fundamentalen WW des Standardmodells lassen sich durch die Eigenschaften der zugehörigen Botenteilchen erklären
- ▶ Elektromagn. WW: Photon
  - Ungeladen, masselos
- ▶ Schwache WW: W- und Z-Teilchen
  - Große Masse → kleine Reichweite der WW
- ▶ Starke WW: Gluonen
  - Besitzen selbst starke (Farb-) Ladung → Selbstwechselwirkung → Confinement → effektiv beschränkte Reichweite

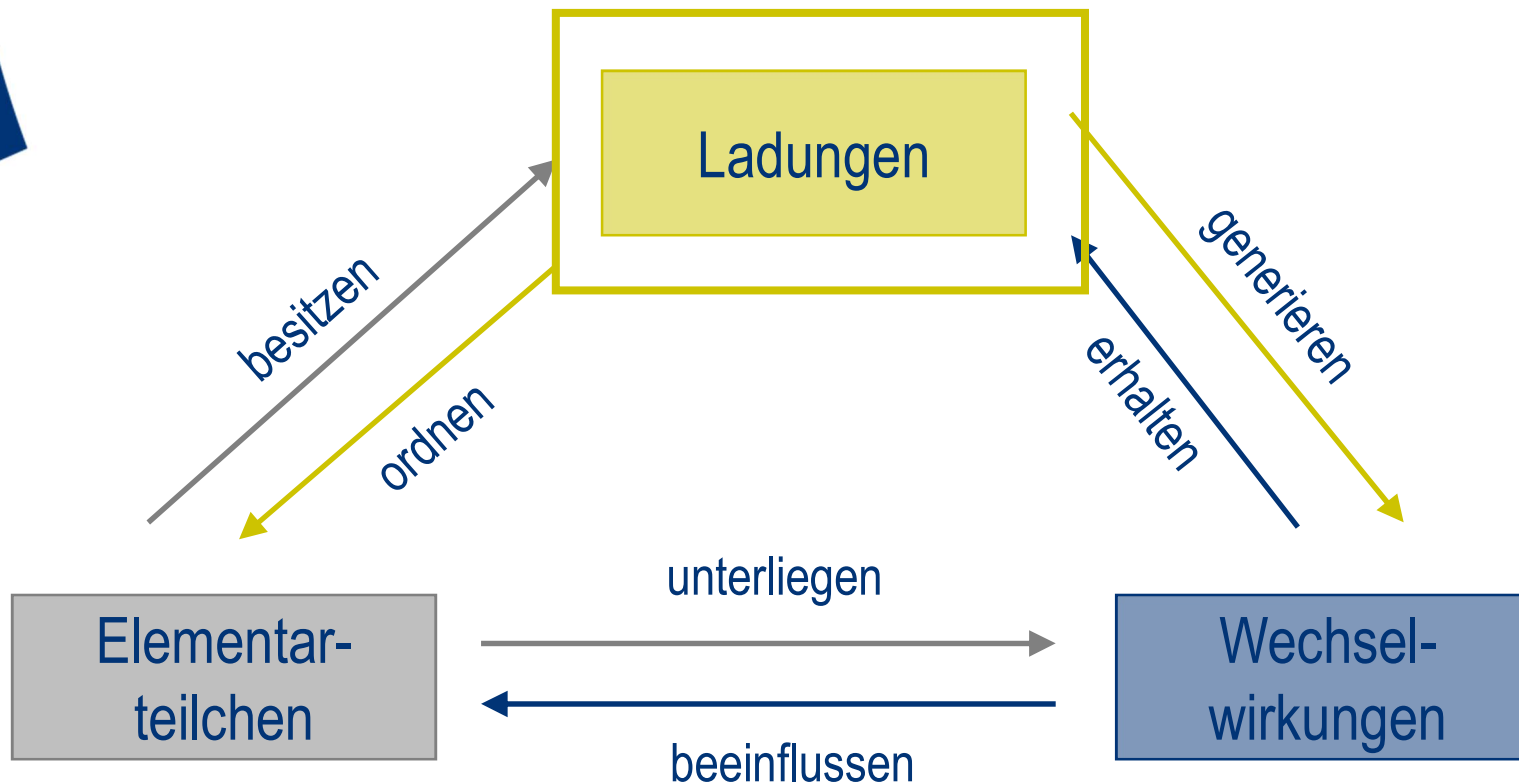


# Diskussion / Fragen





# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells

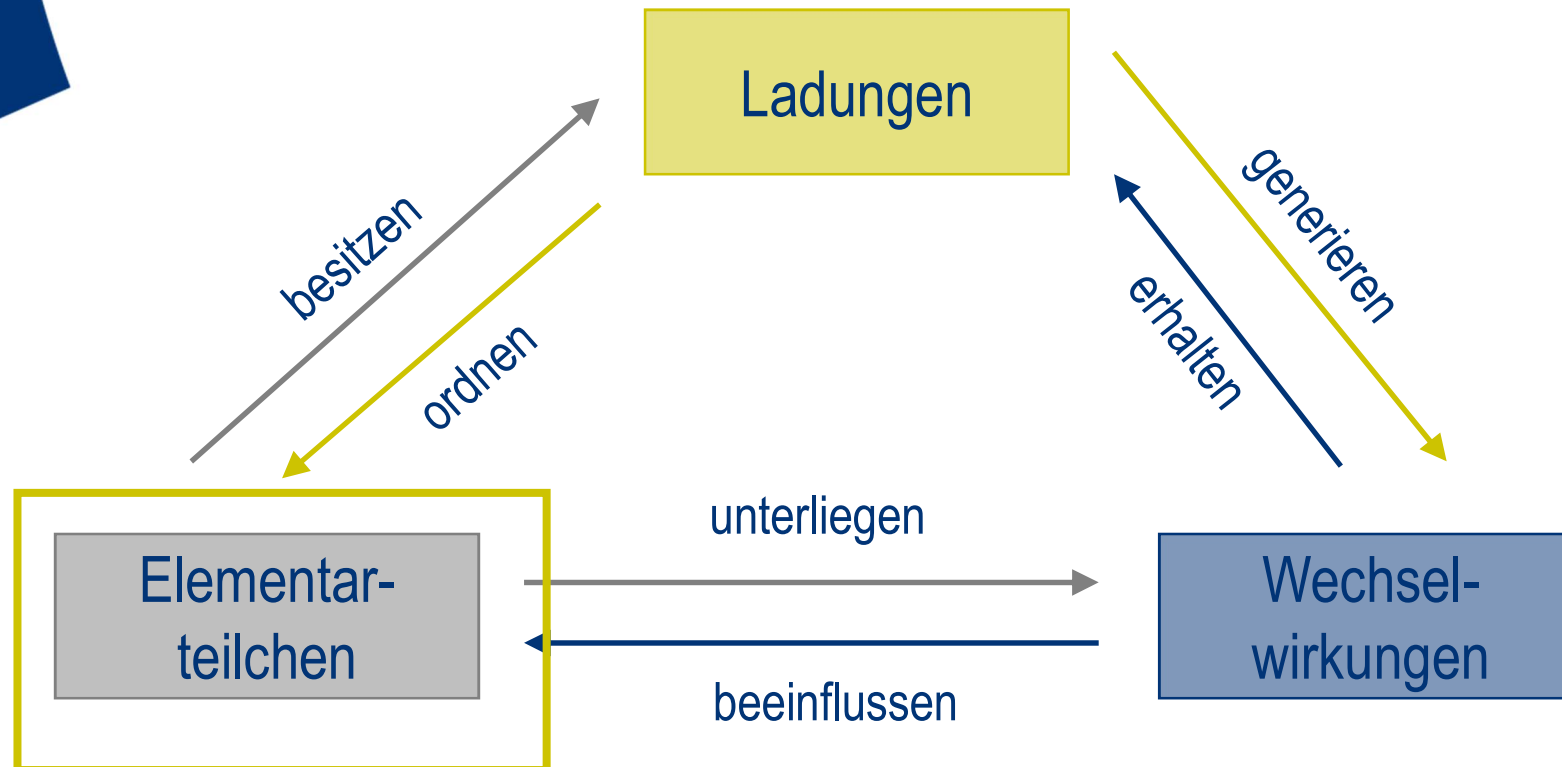




# Übung: AB Botenteilchen

▶ Ziel: Lösen der Aufgaben 1-3

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells





# Ordnung der Elementarteilchen

- ▶ **Materieteilchen** der uns umgebenden Materie:  $u, d, e^-, \nu_e$
- ▶ 1936: Entdeckung des Myons  $\mu^-$  (Rabi: „who ordered that?“)
  - Gleiche Ladungszahlen wie das Elektron, aber  $\sim 200$  Mal schwerer
    - Schwere „Kopie“ des Elektrons
- ▶ 1961: Nachweis des Myon-Neutrinos  $\nu_\mu$
- ▶ 1961: Postulierung von Up-, Down- und Strange-Quarks
- ▶ 1964: Entdeckung des  $\Omega^-$  (sss)
- ▶ 1975: Entdeckung des Tauons: schwere „Kopie“ des Myons
- ▶ 1974-1994: weitere „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks
  - 1974: Charm
  - 1977: Bottom
  - 1994: Top
- ▶ 2000: Nachweis des Tauon-Neutrinos  $\nu_\tau$



## „Teilchenzoo“ oder Ordnung?

- ▶ Entdeckung weiterer Teilchen
- ▶ ausschließlich „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks sowie des Elektrons und des Elektron-Neutrinos
  - Von jedem der leichten Materieteilchen ( $u, d, e^-, \nu_e$ ) gibt es je zwei Kopien, die größere Massen besitzen.
- ▶ Wie lassen sich Teilchen ordnen?
- ▶ Gleiche Ladungen  $\leftrightarrow$  Gleiche Eigenschaften

# Anordnung von Teilchen in Generationen

	1. Generation	2. Generation	3. Generation	I	Z	$\vec{c}$
elektrisch neutrale Leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$+\frac{1}{2}$	0	farblos $\vec{0}$
elektrisch geladene Leptonen	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	$-\frac{1}{2}$	-1	farblos $\vec{0}$
Quarks	$u$ $u$ $u$	$c$ $c$ $c$	$t$ $t$ $t$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	blau $\downarrow$ rot $\nearrow$ grün $\nwarrow$
	$d$ $d$ $d$	$s$ $s$ $s$	$b$ $b$ $b$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	blau $\downarrow$ rot $\nearrow$ grün $\nwarrow$
	starke Wechselwirkung		starke Wechselwirkung			
	elektromagnetische Wechselwirkung			elektromagnetische Wechselwirkung		
	schwache Wechselwirkung			schwache Wechselwirkung		

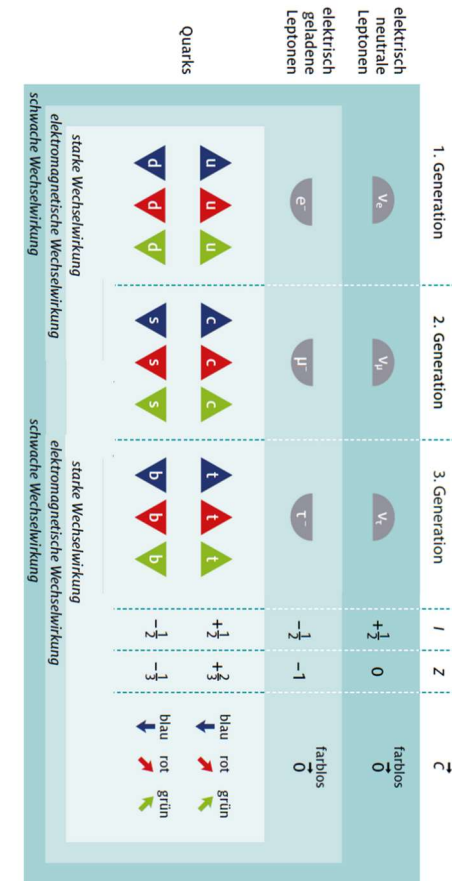
# Analogie zum Periodensystem

- ▶ Teilchen sind nach Ladungen geordnet, analog den chemischen Elementen in den Hauptgruppen
- ▶ Im PSE sind die chemischen Elemente innerhalb einer Hauptgruppe von oben nach unten nach ihrer Masse aufsteigen geordnet

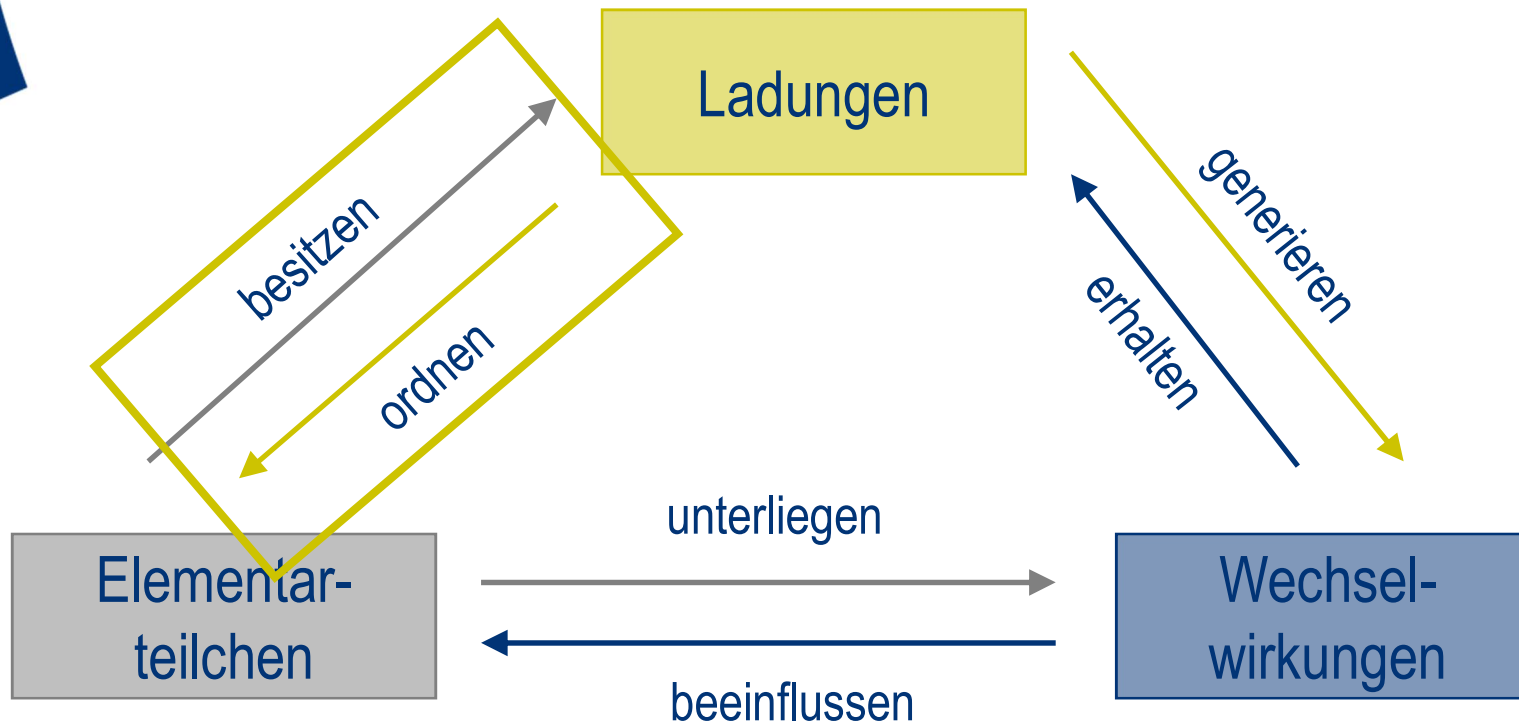
The image shows a standard periodic table of elements. It is color-coded by groups:
 

- Group I (Alkali):** Light blue
- Group II (Alkaline Earth):** Yellow
- Group III (Boron):** Light green
- Group IV (Carbon):** Light blue
- Group V (Nitrogen):** Light green
- Group VI (Oxygen):** Light blue
- Group VII (Halogens):** Light green
- Group VIII (Noble Gases):** Light blue

 The elements in the first three groups are highlighted with colored arrows pointing to their respective positions in the particle diagram on the right.



# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



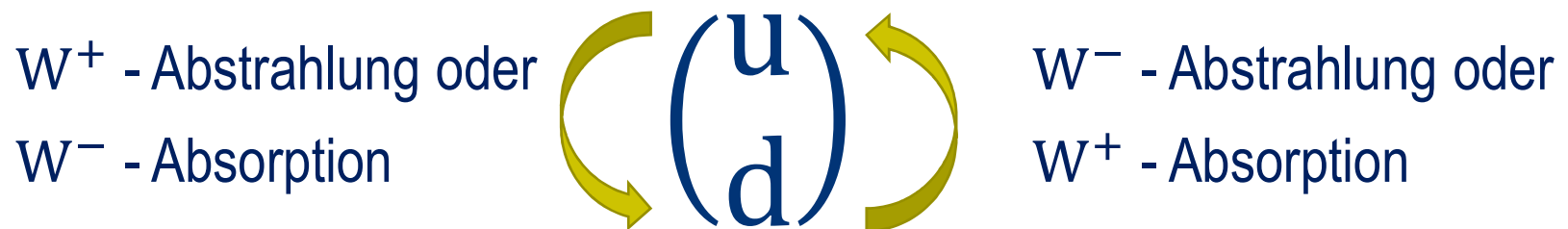


# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung

- Nur bestimmte Paare von Teilchen beteiligt
- Unterscheiden sich in schwacher Ladungszahl  $I$  und in elektrischer Ladungszahl  $Z$  immer genau um Betrag 1
- **Dupletts** bezüglich der schwachen Ladung

►  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad I = +1/2 \quad Z = +2/3$   
 $\quad \quad \quad I = -1/2 \quad Z = -1/3$



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung

- Drei Up-Quarks mit Farbladungsvektoren  $\rightarrow$ ,  $\swarrow$ , oder  $\downarrow$  haben alle schwache Ladungszahl  $I = +\frac{1}{2}$ , Down-Quarks hingegen  $I = -\frac{1}{2}$

- $\begin{pmatrix} u \rightarrow \\ d \rightarrow \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \swarrow \\ d \swarrow \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \downarrow \\ d \downarrow \end{pmatrix}$



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

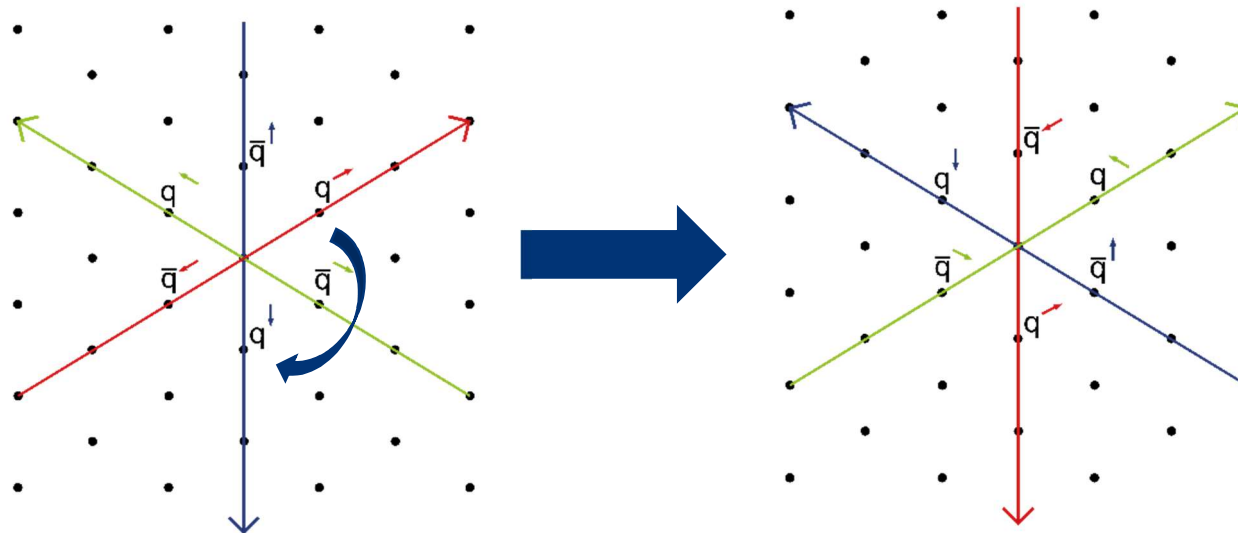
## ▶ Starke Wechselwirkung

- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks:  
Quarks bilden **Tripletts** bezüglich der starken Ladung

▶  $(u \rightarrow u \downarrow)$

# Umwandlung innerhalb Multipletts

- ▶ Eine Rotation ( $\sim$ Eichsymmetrie) eines Quark-Multipletts



- ▶ hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons

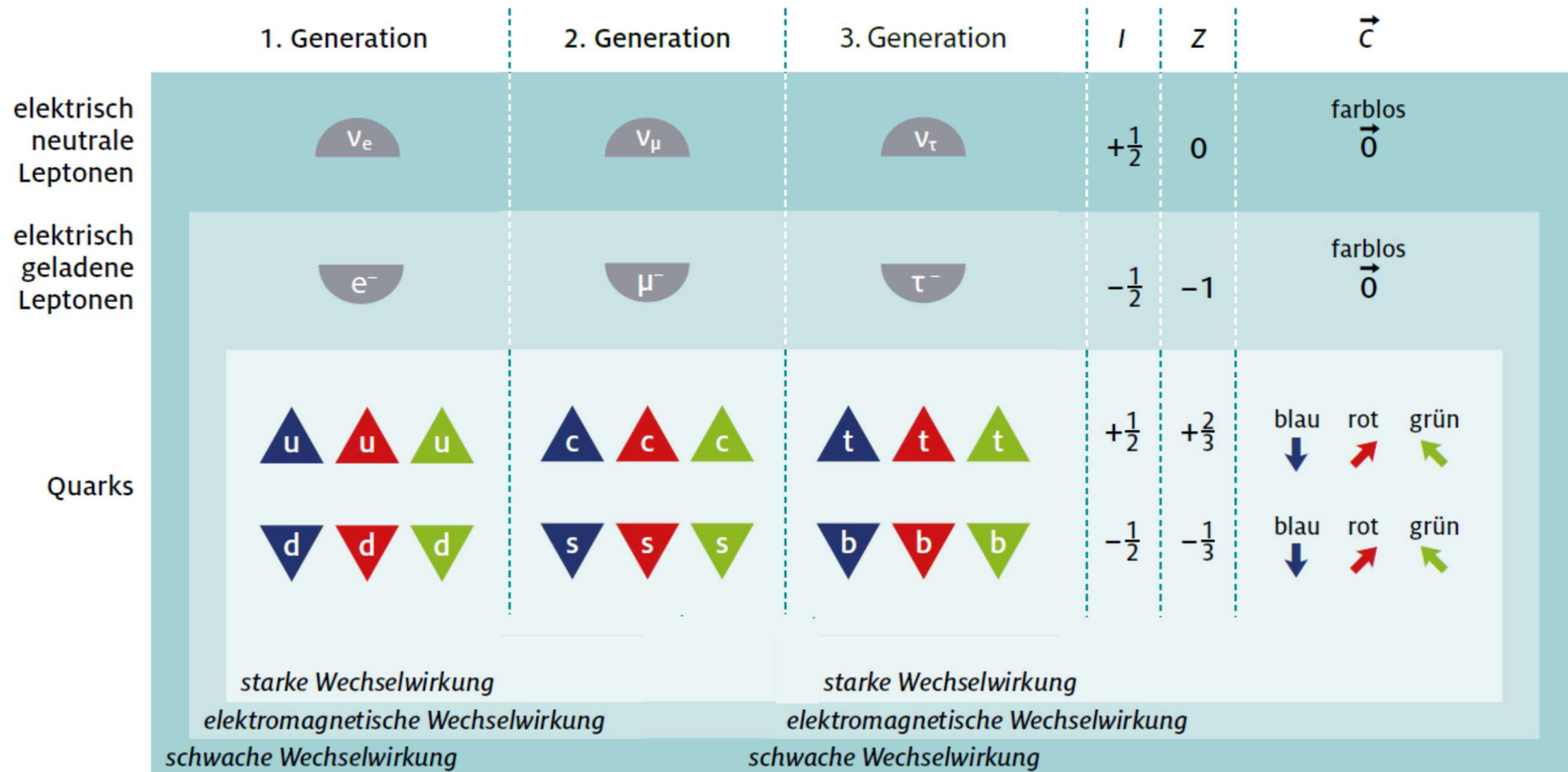


# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ▶ Elektromagnetische Wechselwirkung

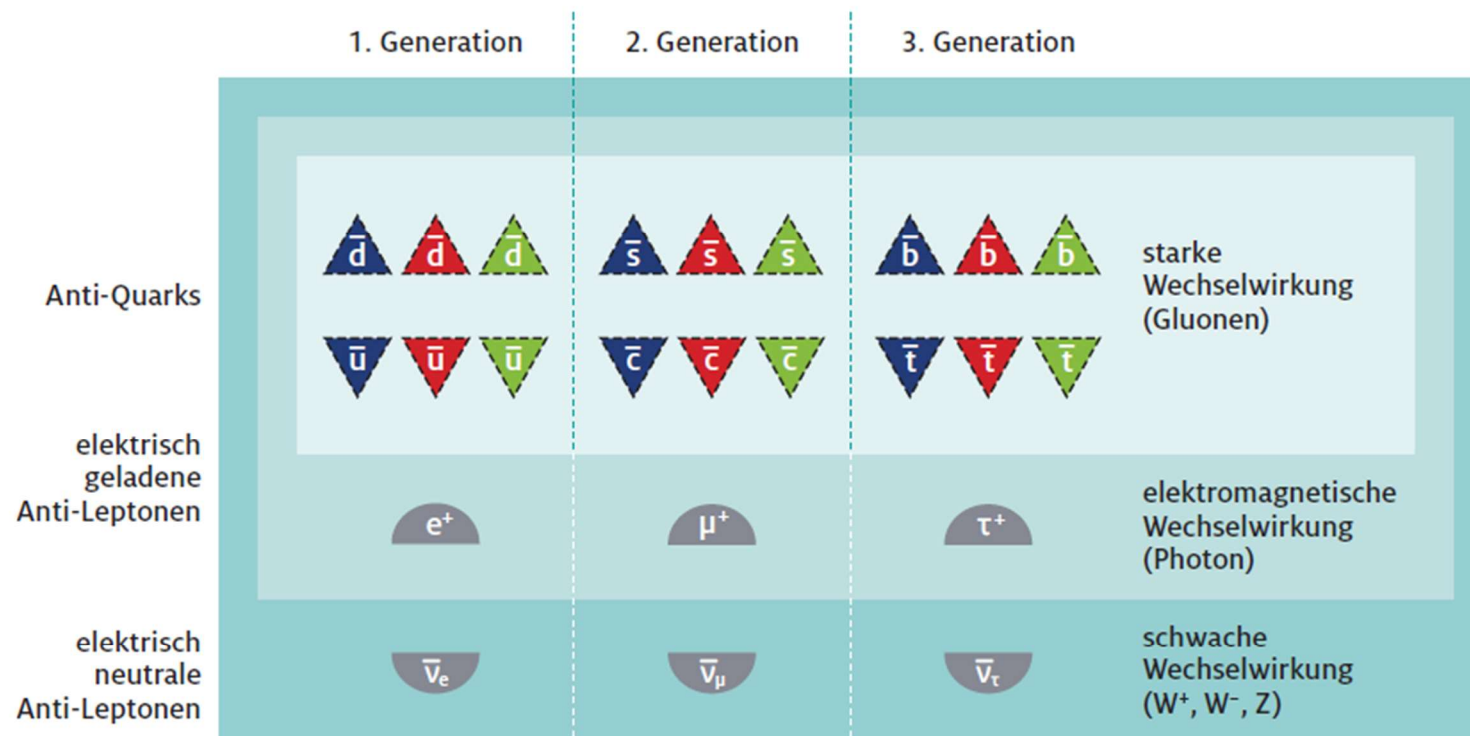
- Photonen besitzen keine Ladungen: durch elektromagnetische Wechselwirkung können die Ladungen eines Teilchens nicht geändert werden
- Alle Teilchen sind **Singulett**s bezüglich der elektrischen Ladung

# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip



# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

- ▶ Zu jedem Teilchen gibt es ein zugehöriges Anti-Teilchen, mit gleicher Masse jedoch entgegengesetzten Ladungen
- ▶ Anti-Materieteilchen ebenfalls in drei Generationen



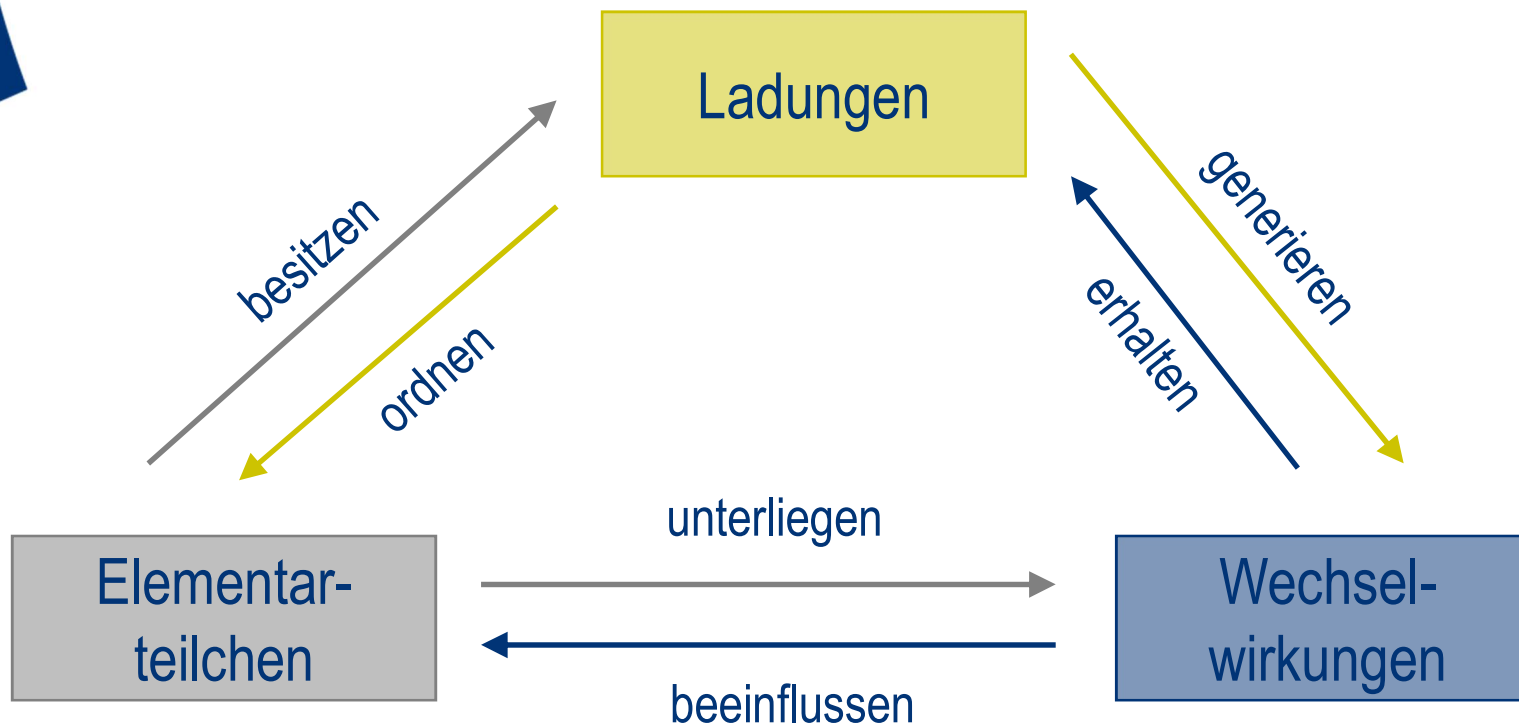


# Zusammenfassung: Multipletts

- ▶ Teilchen lassen sich anhand ihrer Ladungen ordnen
- ▶ Die Zahl der Botenteilchen werden aus den Symmetrien des Standardmodells vorhergesagt
- ▶ Für die Materieteilchen findet man experimentell
  - Dupletts der schwachen Wechselwirkung (nicht vorhersagbar!)
  - Tripletts der starken Wechselwirkung (nicht vorhersagbar!)
  - Singulettts der elektromagnetischen Wechselwirkung (vorhersagbar)
- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich
  - (zuzüglich: hier nicht diskutierte Effekte der Zustandsmischung)



# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Vielen Dank für Eure Aufmerksamkeit!

[www.teilchenwelt.de](http://www.teilchenwelt.de)

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



[www.facebook.de/teilchenwelt/](http://www.facebook.de/teilchenwelt/)



Instagram



NETZWERK  
TEILCHENWELT