

# Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen

Das Standardmodell der Teilchenphysik



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Philipp Lindenau, Niklas Herff  
Bad Wildbad | 20.12.-22.12.2023



NETZWERK  
TEILCHENWELT



#### FOLGENDE BÄNDE SIND VERFÜGBAR:

- Mikrokurse
- Kosmische Strahlung
- Forschungsmethoden
- Wechselwirkungen  
und Teilchen



**KOSTENFREI  
ERHÄLTlich!**

## UNTERRICHTS- MATERIALIEN ZUR TEILCHENPHYSIK

Teilchenphysik ist aktuell und spannend. Die Joachim Herz Stiftung und das Netzwerk Teilchenwelt haben gemeinsam mit Wissenschaftlern und Lehrkräften dieses Thema für den Physikunterricht aufgegriffen und eine Heftreihe mit Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik entwickelt. Sie soll Lehrkräften Ideen, Anregungen und Hintergrundinformationen für ihren Unterricht geben.

Die Materialien können per E-Mail an [info@leifphysik.de](mailto:info@leifphysik.de) angefordert oder unter [www.leifphysik.de/tp](http://www.leifphysik.de/tp) heruntergeladen werden.



PHYSIK



NETZWERK  
TEILCHENWELT





# Band 1: Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen

- ▶ Ca. 100 Seiten Hintergrundinformationen für Lehrkräfte
- ▶ Einführung in das Standardmodell
- ▶ Spiralcurriculum, didaktische und fachliche Hinweise
- ▶ Aufgaben



# Was ist Physik?

# Was ist Physik?

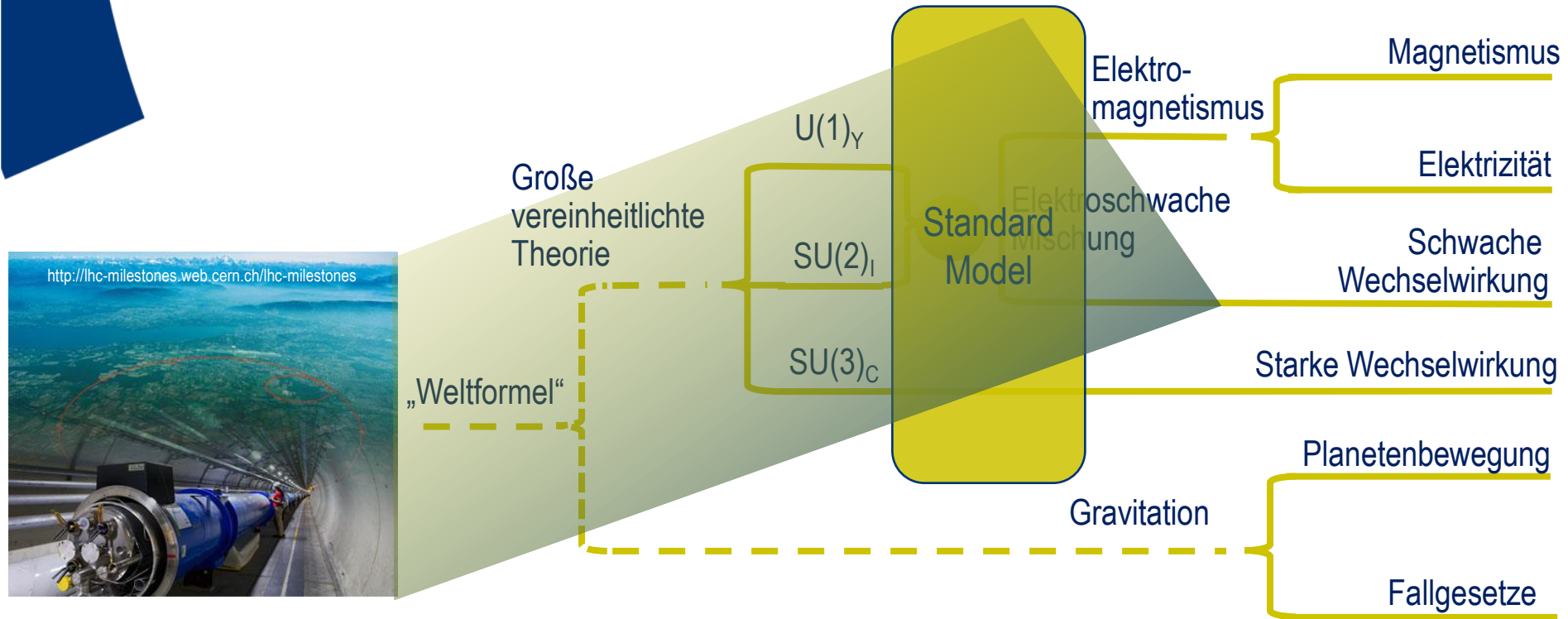
- ▶ Physik versucht die Wirklichkeit / Welt zu beschreiben
- ▶ Am Besten: Möglichst einfach



# 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

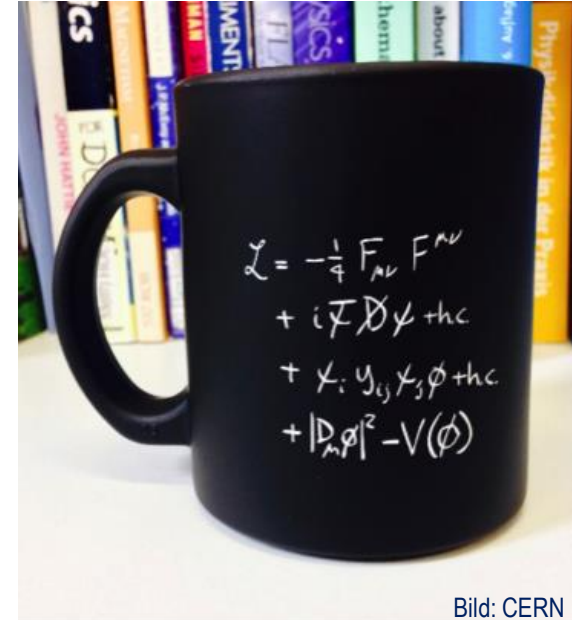
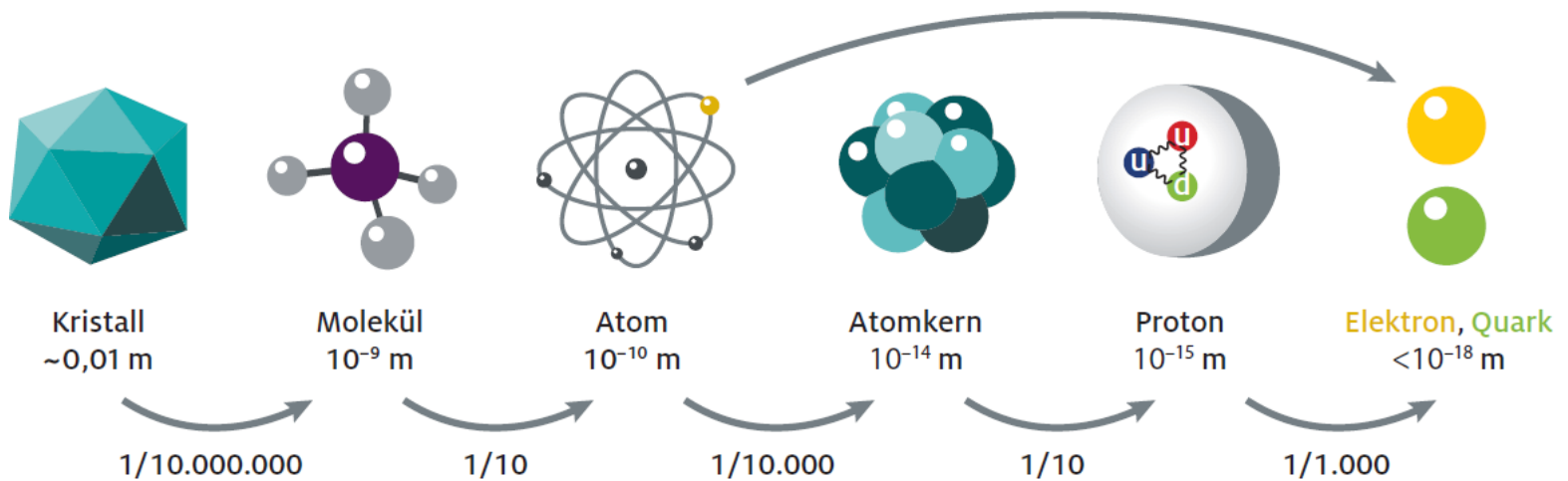
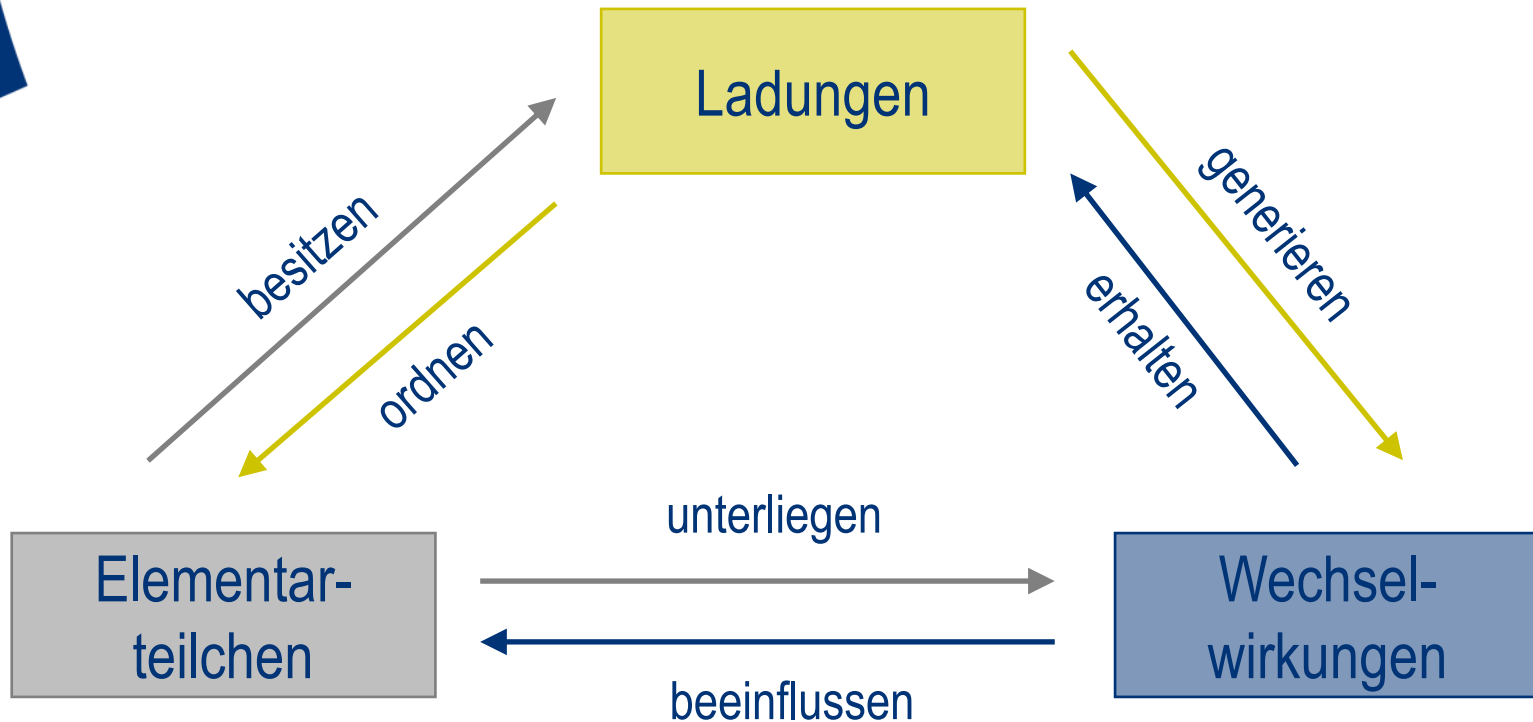


Bild: CERN

# 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!)

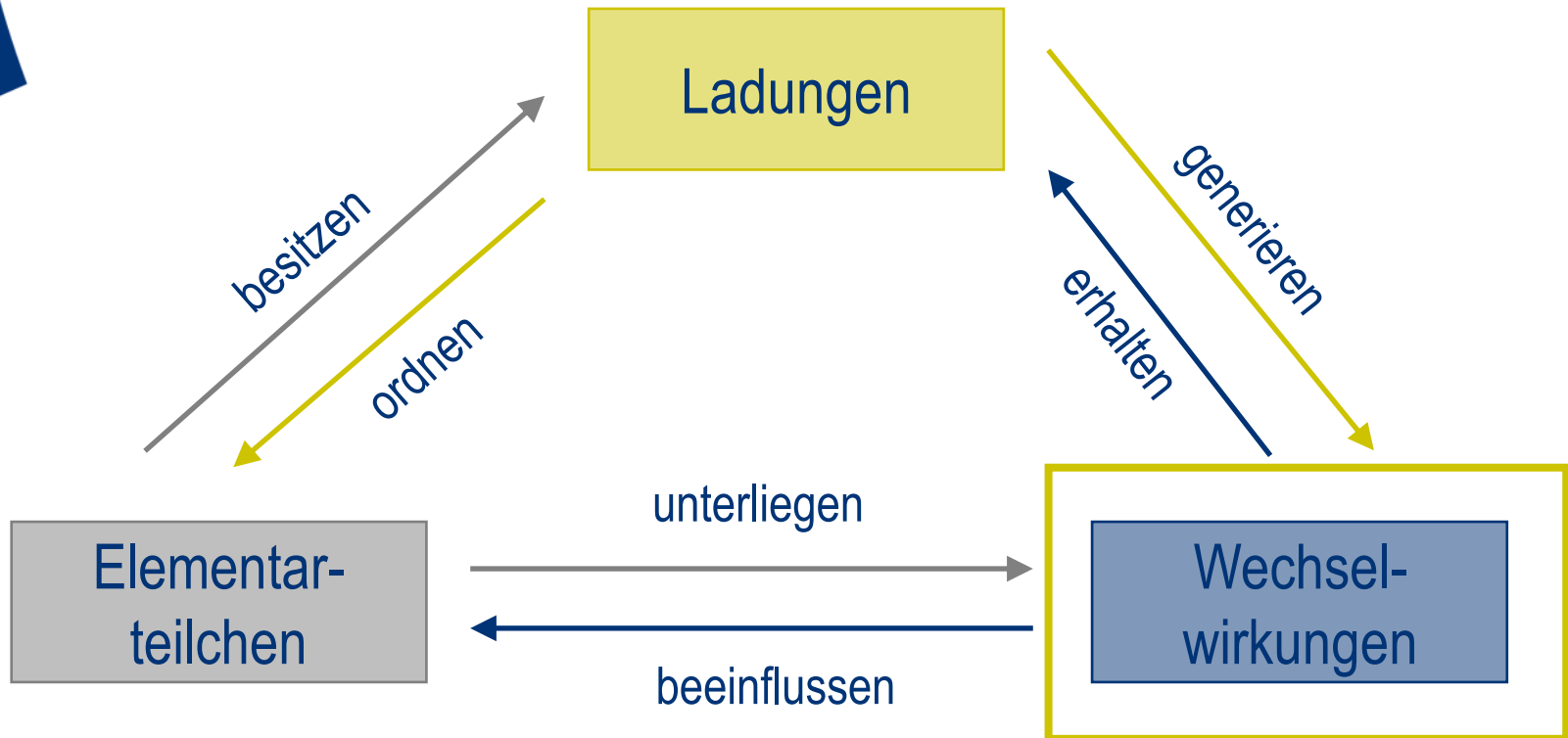
u	c	t
d	s	b
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
e	$\mu$	$\tau$

# 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

u	c	t
d	s	b
$v_e$	$v_\mu$	$v_\tau$
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

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



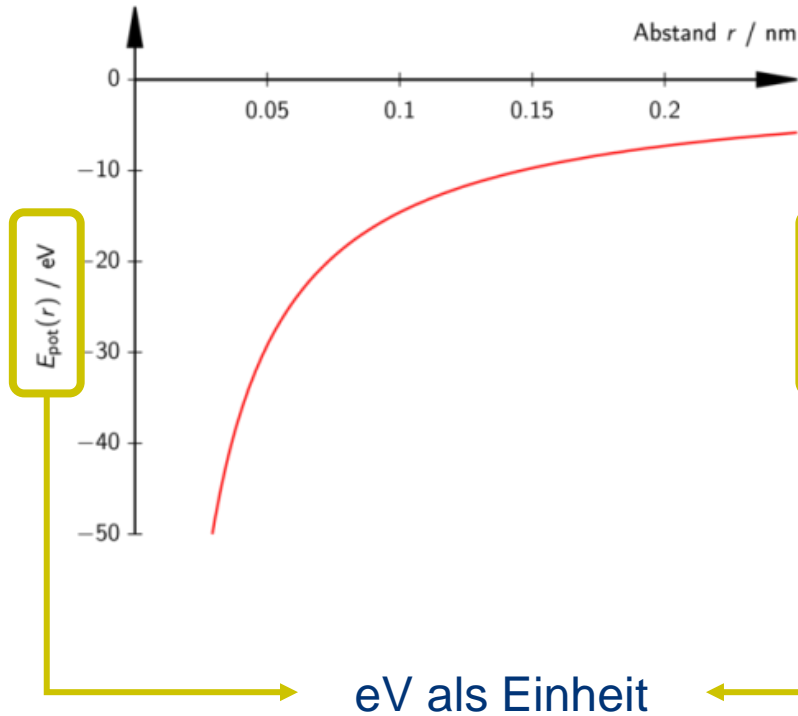
**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**



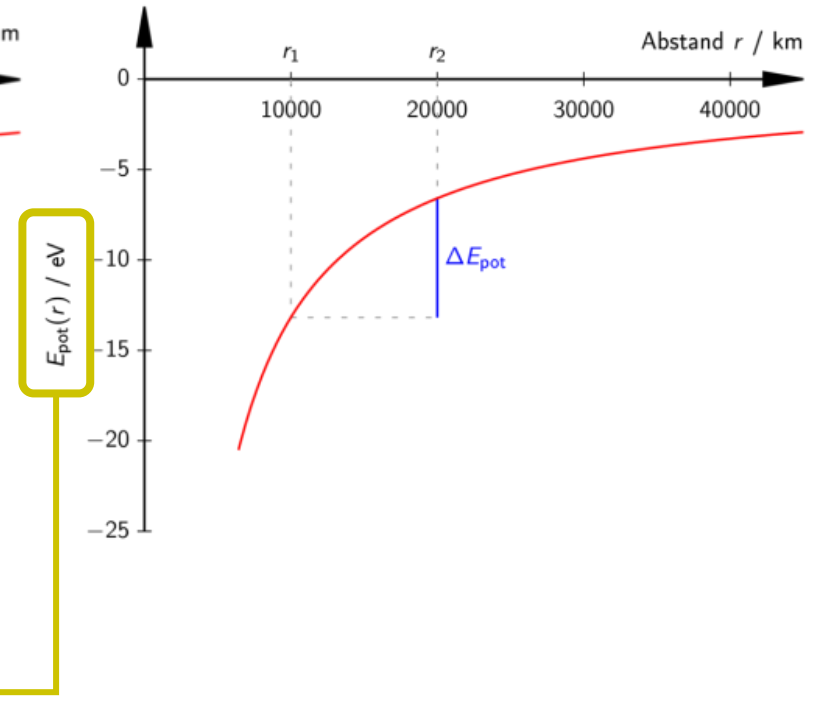
**Standardmodell  
(ohne Gravitation)**

# Ausgangspunkt: Zwei Bekannte Wechselwirkungen

► Elektromagnetische Wechselwirkung



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



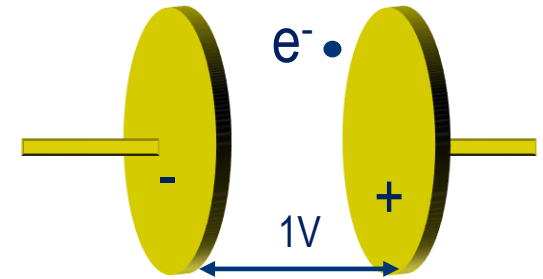
# Einheit Elektronenvolt

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

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

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

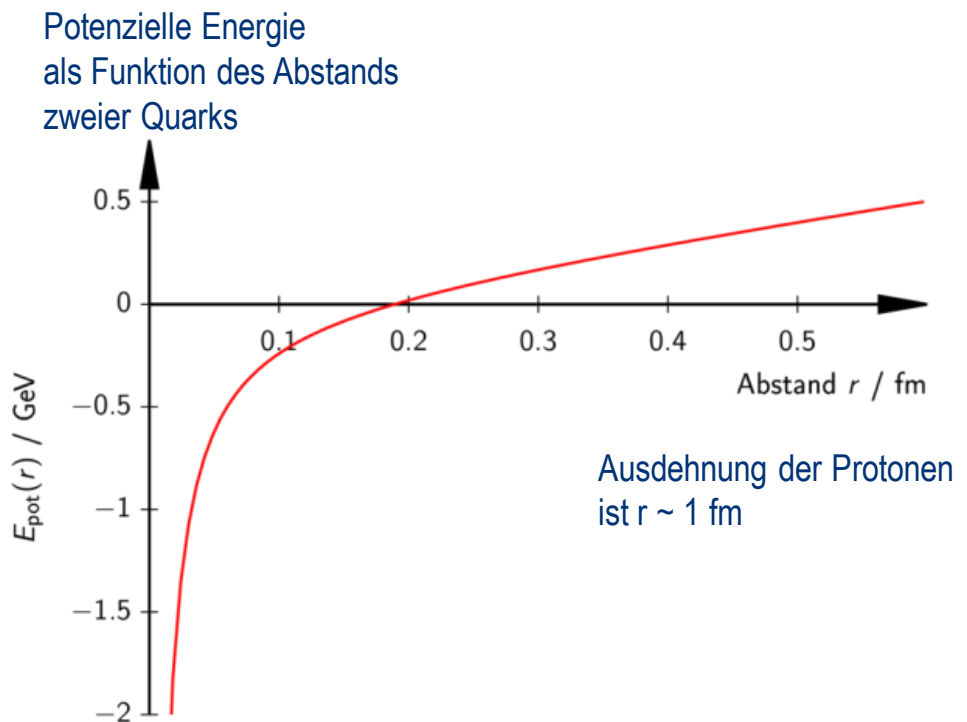
- Elektron  $0,5 \text{ MeV}/c^2$
- Proton  $938 \text{ MeV}/c^2 \sim 1 \text{ GeV}/c^2$
- Higgs-Teilchen  $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$



# Die Starke Wechselwirkung

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

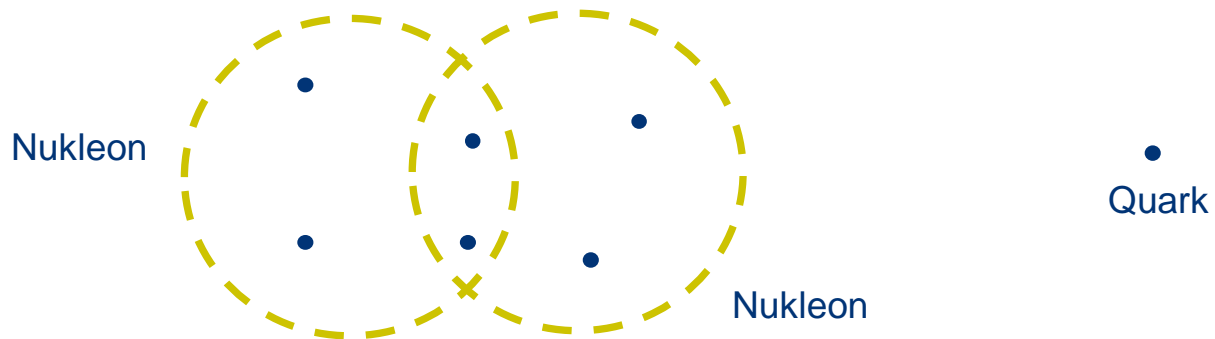
- ▶ **Substruktur:**  
Nukleonen bestehen aus Quarks, die starke Wechselwirkung spüren.  
Die starke Kernkraft geht auf diese Substruktur zurück



# Bindung von Nukleonen

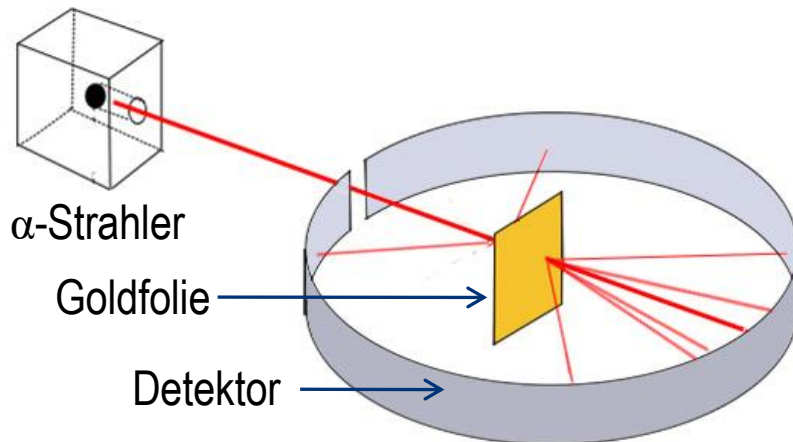
► Zusammenhalt von Nukleonen analog zur Elektronenpaarbindung bei Atomen

- Kurze Abstände: Nukleonen im Kern „teilen“ sich kurzzeitig ein Quark-Paar

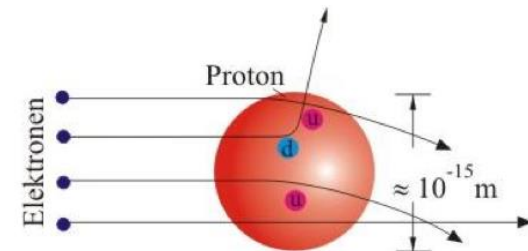


- Bessere Vorstellung: Nukleonengas
- Größere Abstände: Austausch von „Pionen“ (geb.  $q\bar{q}$  Zustände)

# 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

Mehr zu Forschungsmethoden gibt es morgen!

# 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

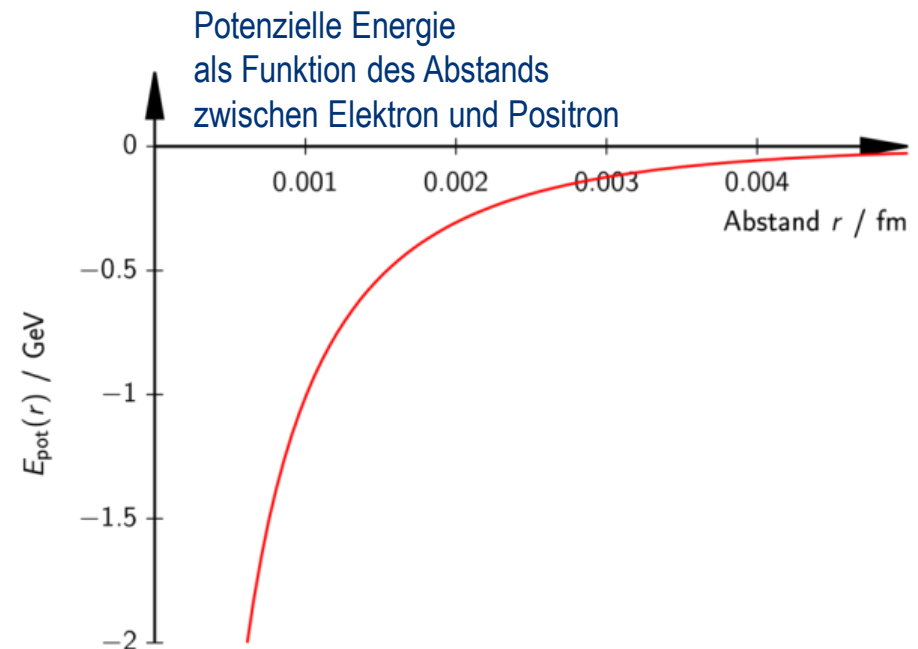
# Die Schwache Wechselwirkung

## ▶ 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

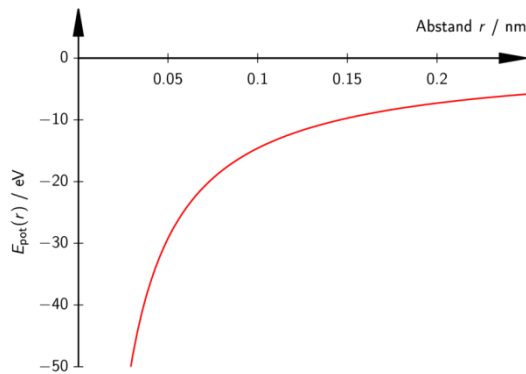
- z.B.  $\beta^+$ -Umwandlung



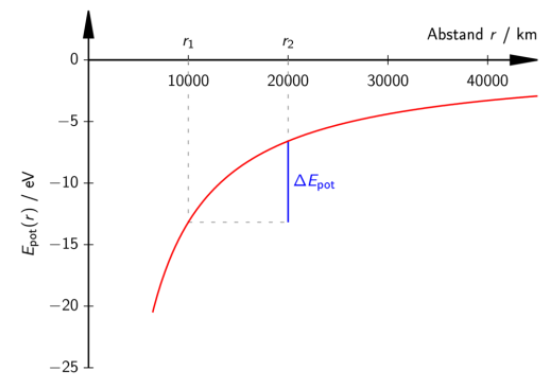


# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

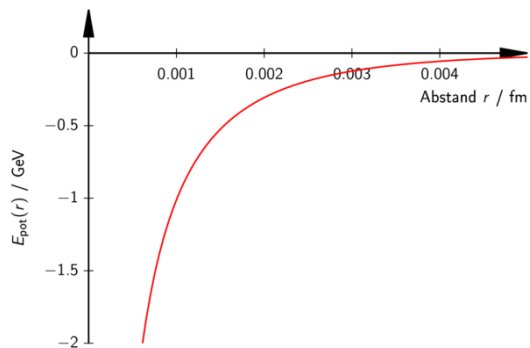
## ► Elektromagnetische WW



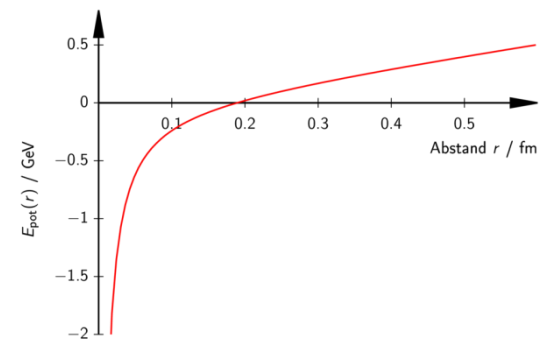
## ► Gravitation



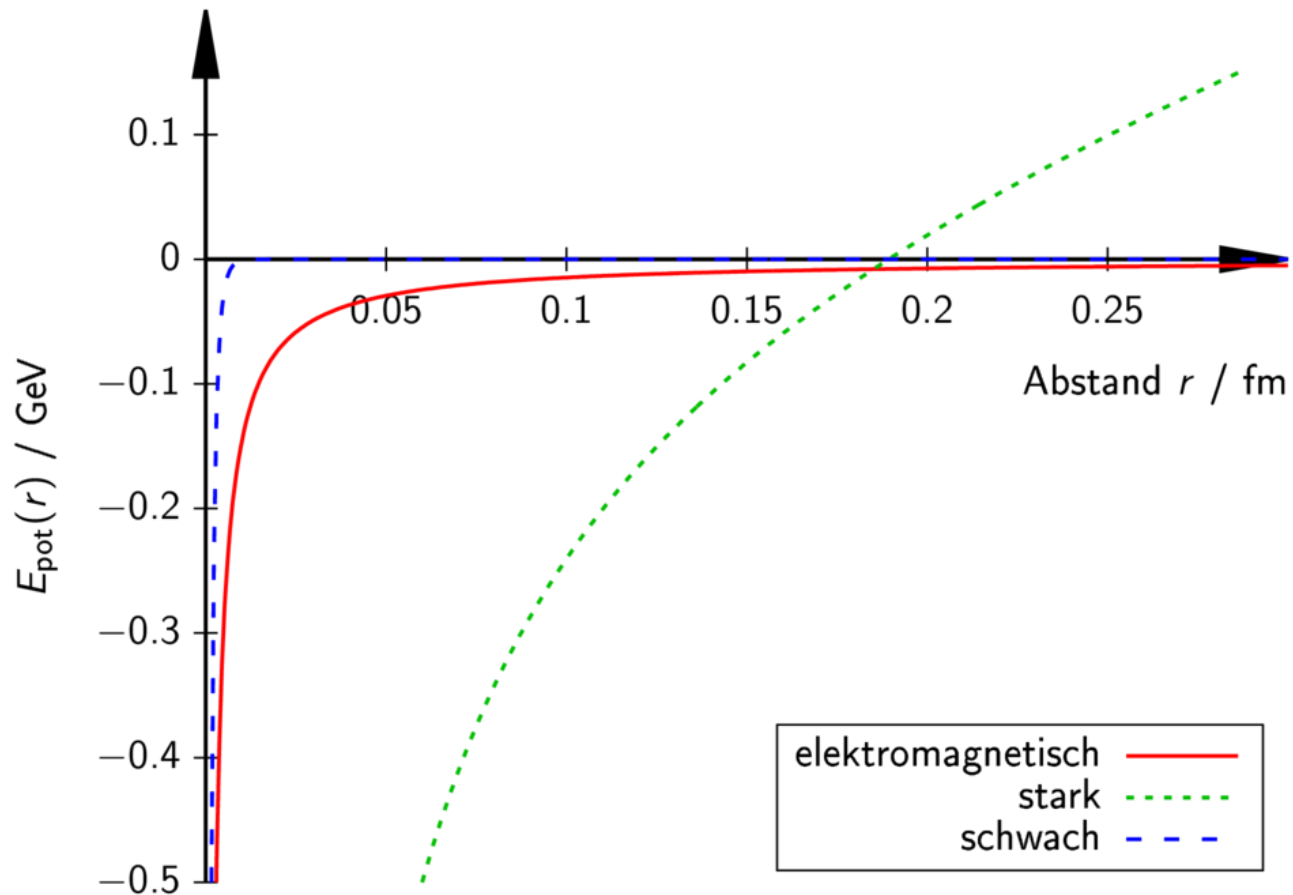
## ► Schwache WW



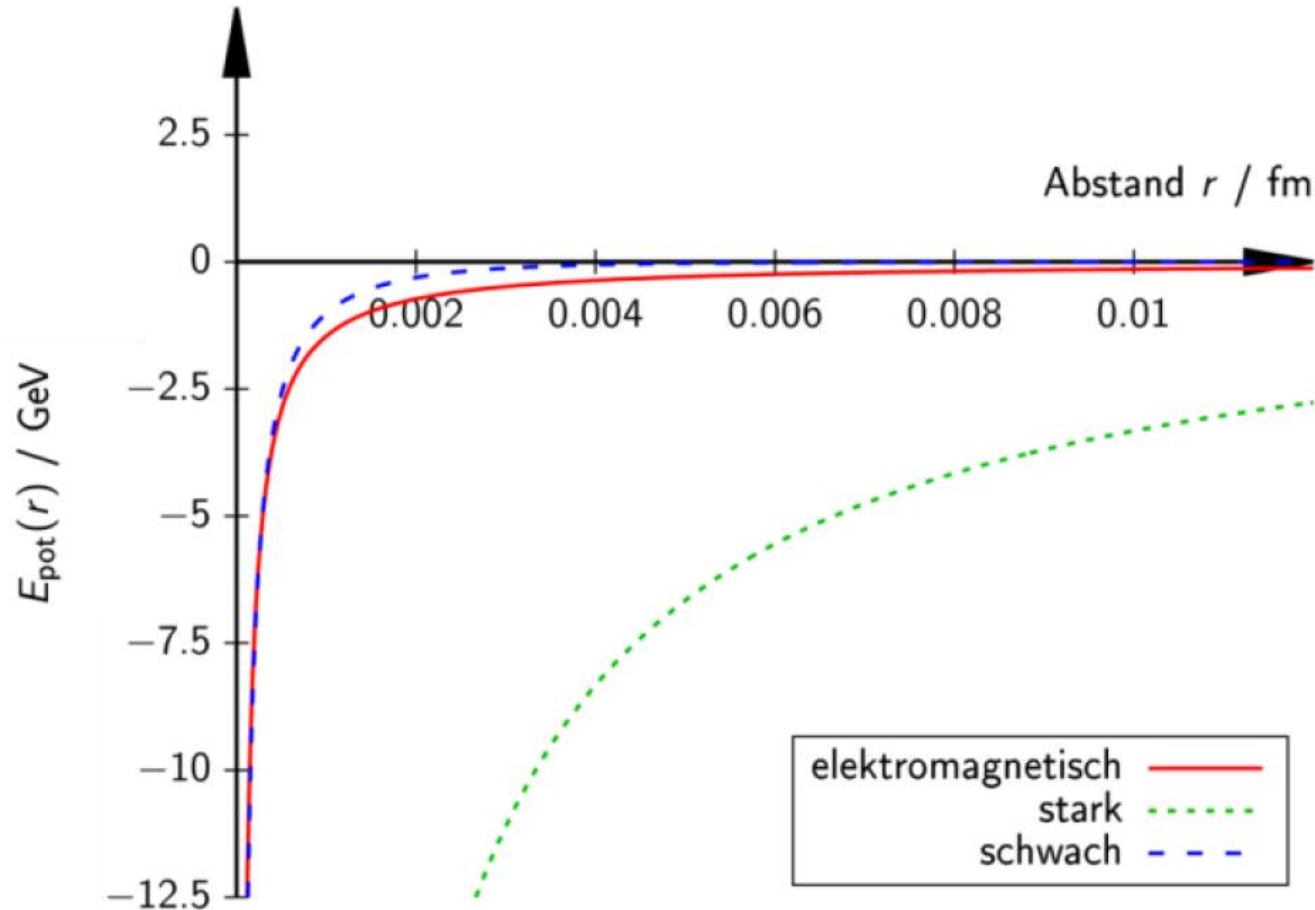
## ► Starke WW



# Vergleich der potenziellen Energien



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



# Potenzielle Energien bei sehr kleinen Abständen

Wechselwirkung	Potenzielle Energie
gravitativ	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{grav} \frac{-1}{r}$
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	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r}$

## Quiz:

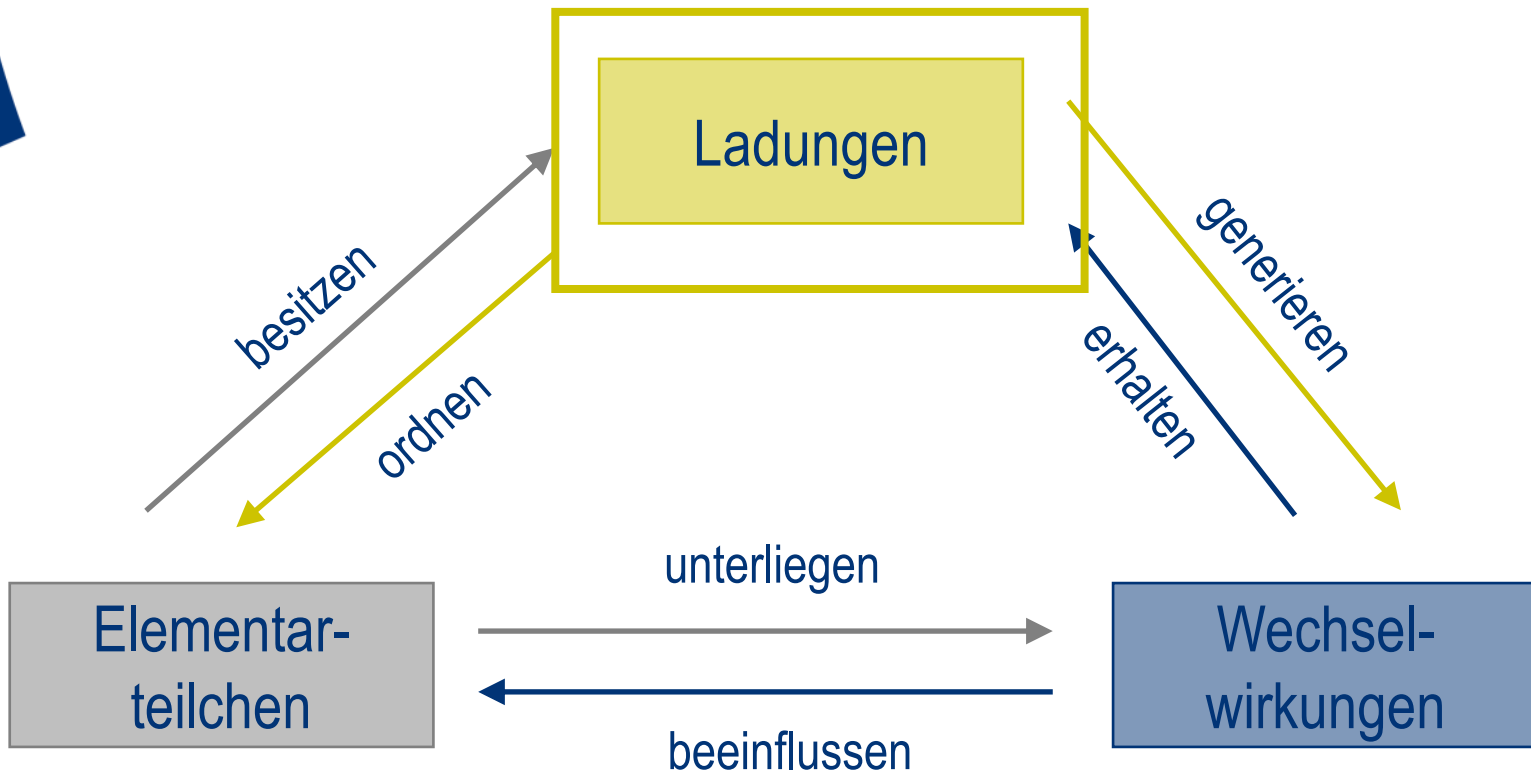
# Welche Wechselwirkung ist verantwortlich?

1. Öffne **www.slido.com** und gib den Code **3634483** ein oder scanne den **QR-Code**



2. Gib deinen Namen oder einen Fantasienamen ein
3. 8 Situationen – 8 Entscheidungen – Welche WW ist (haupt)verantwortlich ist.  
Jeweils 20 s Zeit zur Entscheidung. „Senden“ drücken!

# 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)
- ▶ Zu jeder Wechselwirkung existiert eine **Ladung**
- ▶ Ein Kopplungsparameter  $\alpha$  existiert auch für andere Wechselwirkungen
  - $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$

# 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

# Die Kopplungsparameter der fundamentalen WW

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

# Und Gravitation?

- ▶ Ladung und Kopplungsparameter der Gravitation quantenfeldtheoretisch (noch) nicht definierbar
- ▶ Keine Elementarmasse → kein teilchenunabhängigen Kopplungsparameter.
- ▶ Masse als „Ladung“ der Gravitation ungeeignet, da keine Erhaltungsgröße
- ▶ 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:  $\frac{\alpha_{em}^{p,e}}{\alpha_{grav}^{p,e}} \approx 2 \cdot 10^{39}$

# Konzept der Ladung

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

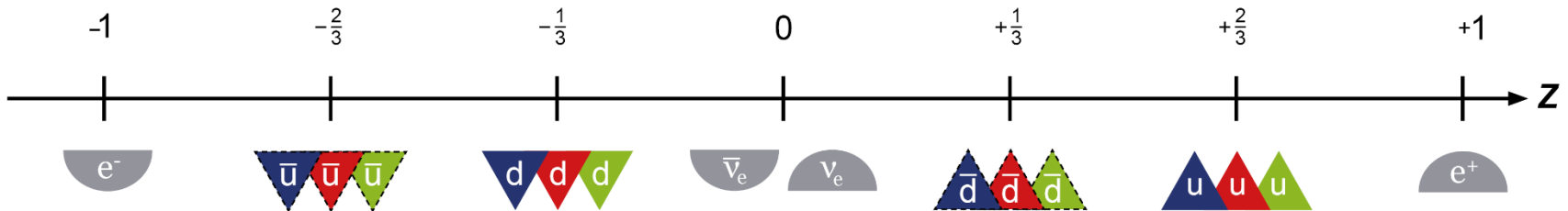
Und:

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

# Elektrische Ladung

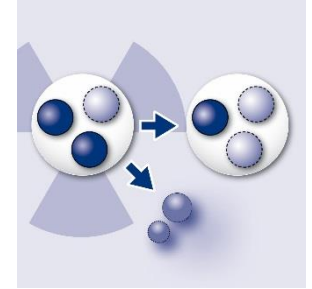


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen  $Z$  einiger Anti-/Materieteilchen

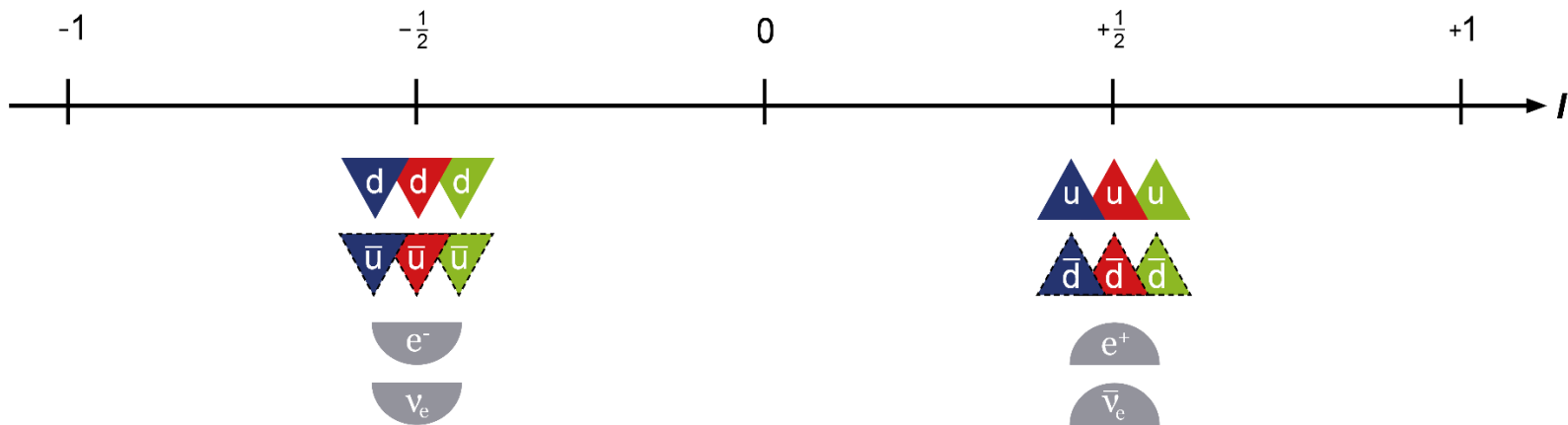


- Elektrische Ladung ist gequantelt

# 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

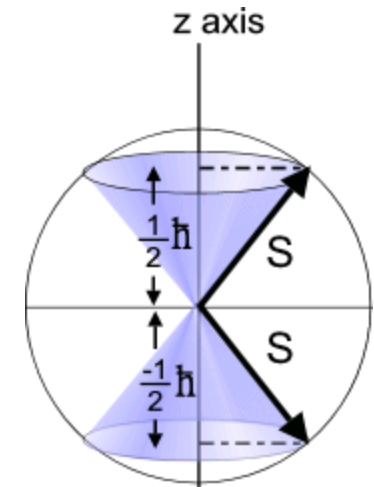
$$Q_{em} = e \cdot Z$$

$$Q_w = g_w \cdot I$$

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

Ladungszahl

- ▶ Schwache Ladung hat eigentlich einen vektoriellen Charakter
- vollständige Bezeichnung. **Schwache Isospin-Ladung**
- ▶ Zugrundeliegende Symmetrie genau dieselbe wie beim Spin
- ▶ Jeweils Vektor mit 3 Komponenten
  - Spin  $\mathcal{S} = (S_x, S_y, S_z)$  im Ortsraum
  - Schwacher Isospin  $\mathbf{I}^W = (I_1^W, I_2^W, I_3^W)$  im abstrakten schwachen Isospinraum
- ▶ Messbar bei beiden nur:
  - gesamter Betrag und eine Komponente (meist gewählt: die 3.)
  - zwischen den Komponenten existieren Unbestimmtheitsrelationen
- ▶ Wir sprechen daher nur von schwacher Ladungszahl  $I := I_3^W$

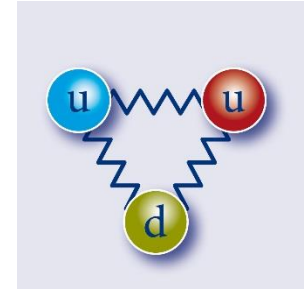


<http://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch>



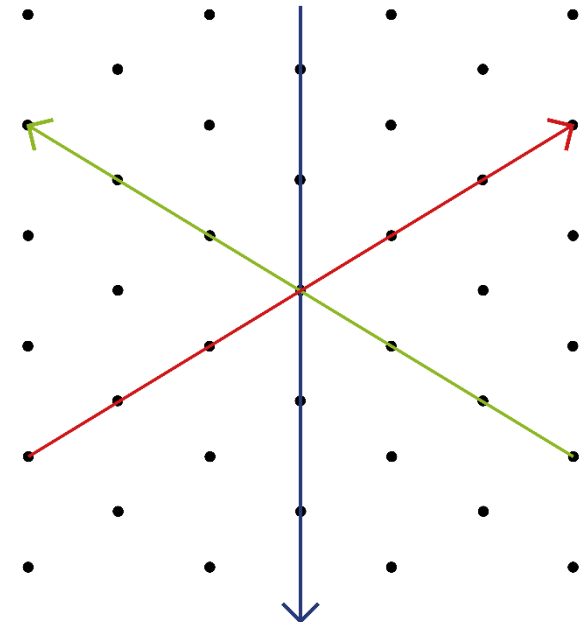
# Starke Ladung

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



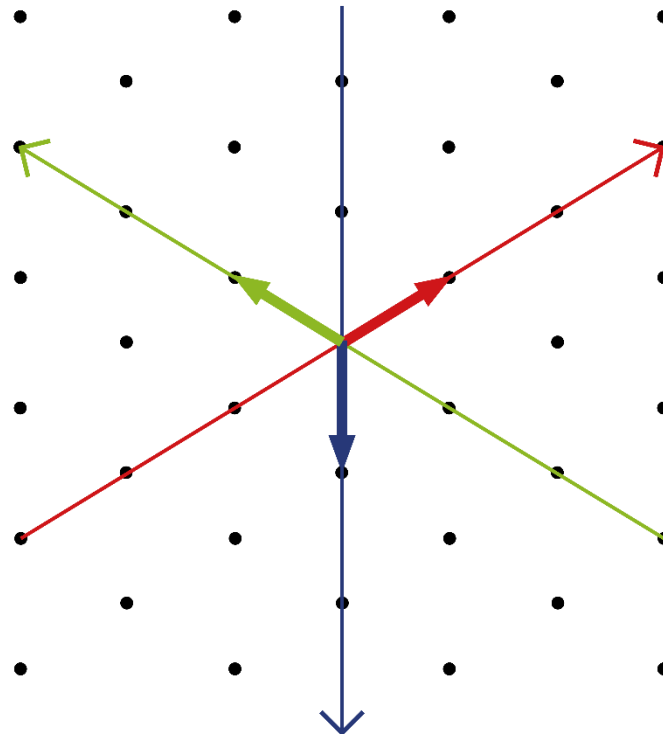
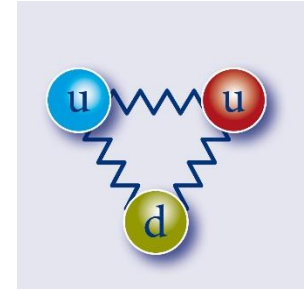
▶ Farbgitter:

- 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



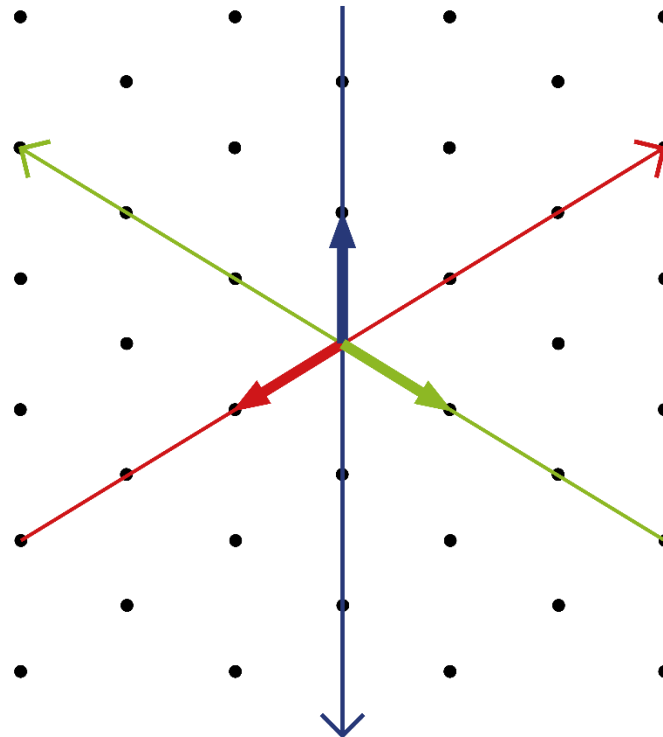
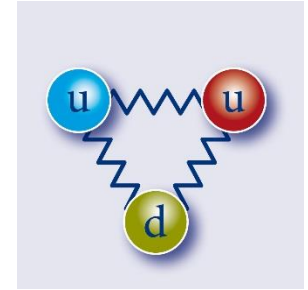
# Starke Ladung

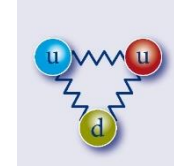
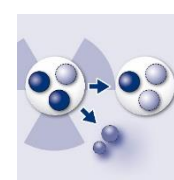
► Farbladungsvektoren von Quarks



# Starke Ladung

► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





# Alle Ladungen sind additiv

► Beispiel: Ladungszahlen eines Protons  $p(u, u, d)$

- Elektrische Ladungszahl:

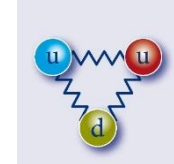
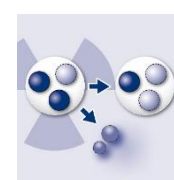
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

$$\vec{C}_p = \vec{C}_u + \vec{C}_u + \vec{C}_d = \begin{array}{c} \color{red}{\rightarrow} \\ + \\ \color{green}{\leftarrow} \\ + \\ \color{blue}{\downarrow} \end{array} = \color{red}{\rightarrow} + \color{green}{\leftarrow} + \color{blue}{\downarrow} = \vec{0}$$



# 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

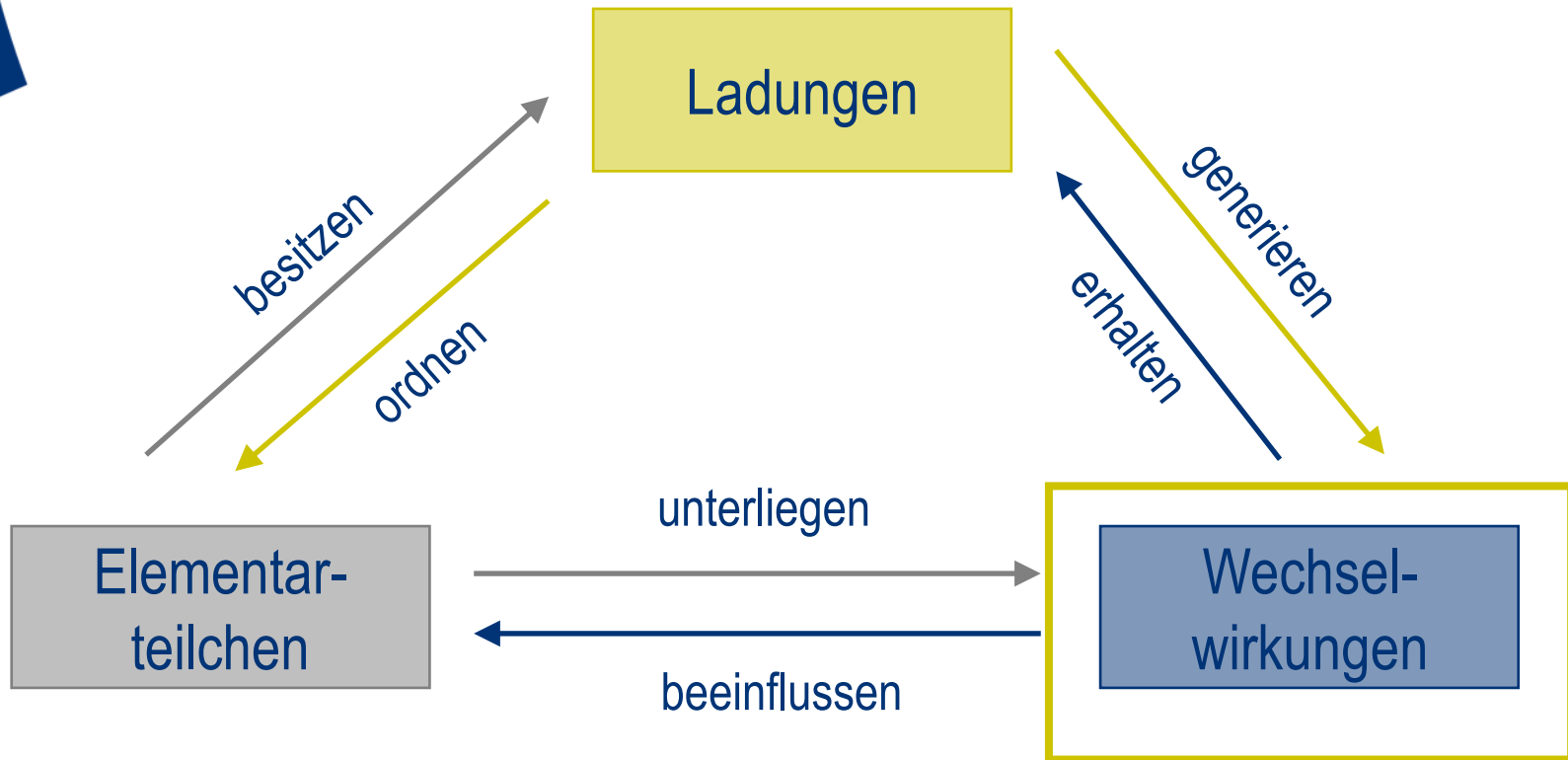
# Diskussion / Fragen

- ▶ Murmelphase: Diskutiert und formuliert die für euch wichtigsten Erkenntnisse aus dem bisherigen Vortrag.
  - Formuliert Fragen, die ihr zu den bisherigen Inhalten habt.
  - Zeit: 5 Minuten





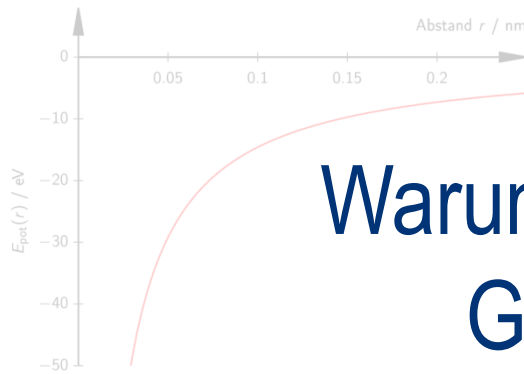
# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW

► Gravitation

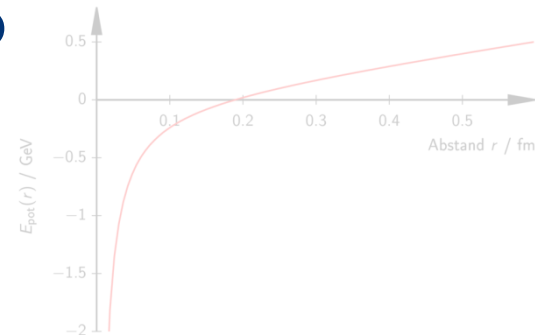
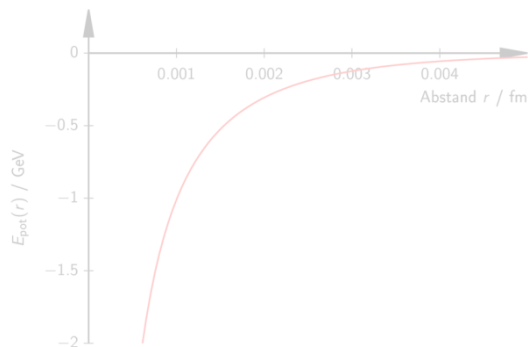


Warum erfahren wir nur  
Gravitation und

► Schwache WW

Elektromagnetismus

im Alltag?



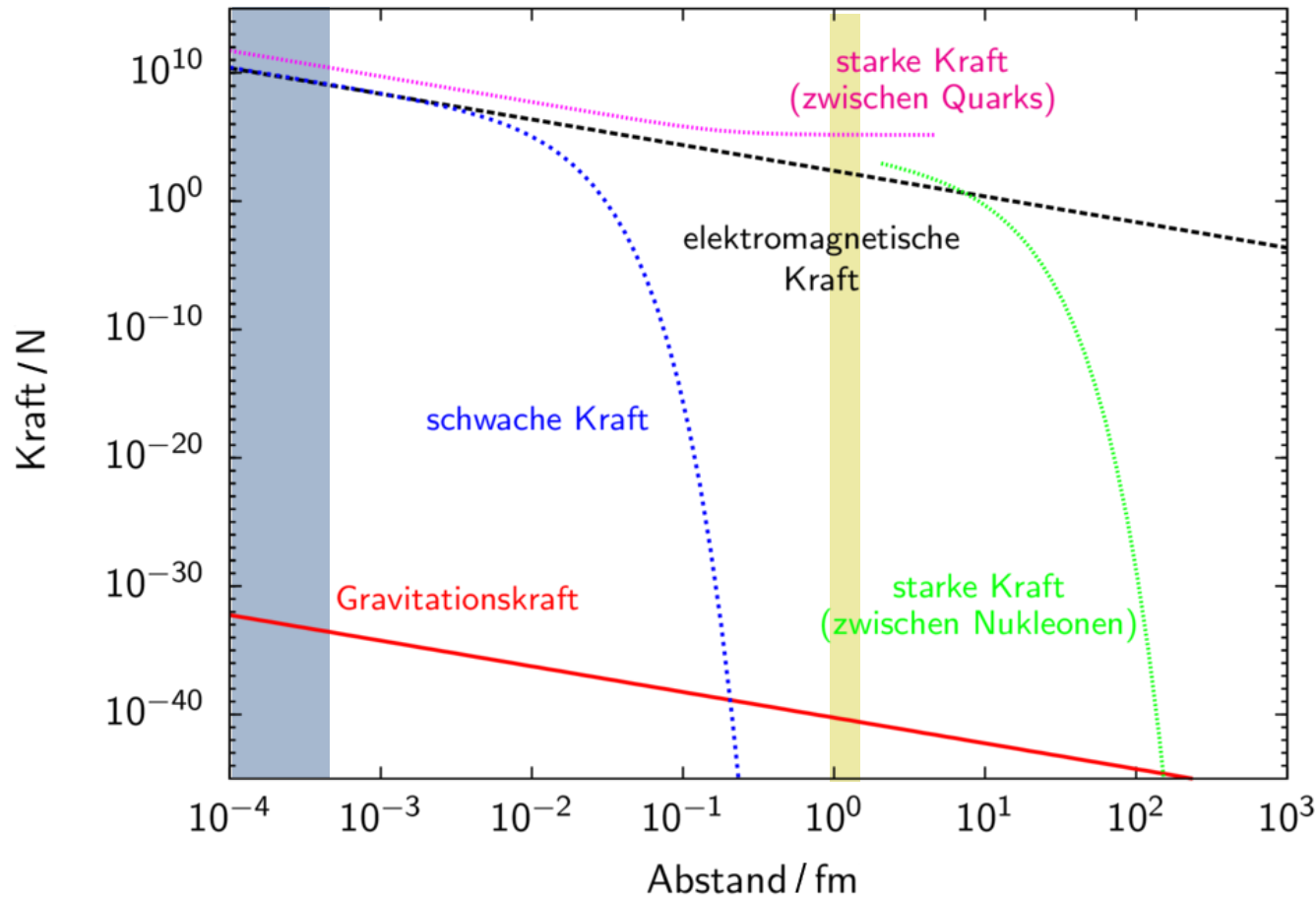
# Kräfte der Wechselwirkungen

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

Grenze exper. Auflösung  
(stark, schwach, em)

Protondurchmesser

\*Wir sind ~1m weiter dort →



# Kräfte der Wechselwirkungen

- ▶ 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)

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

# 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	$\alpha_{grav} \approx 10^{-38}$
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

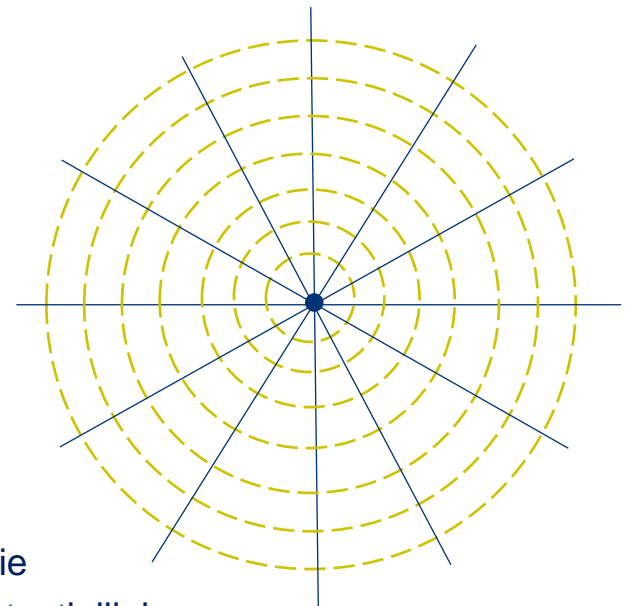
▶ Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW

▶ **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

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

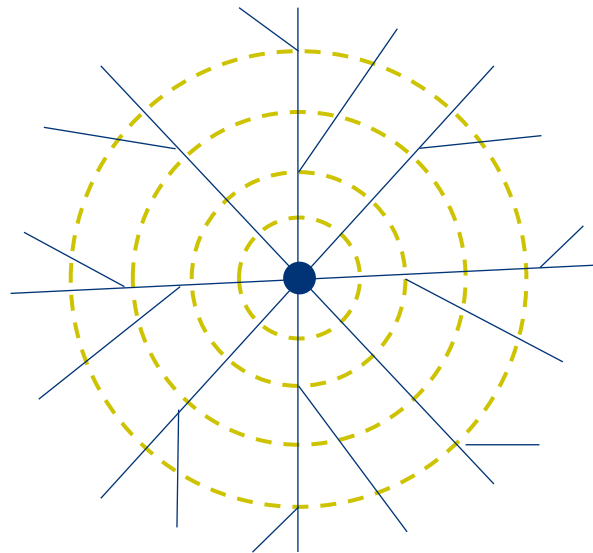


— Feldlinie  
- - - Äquipotentiallinie

# Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

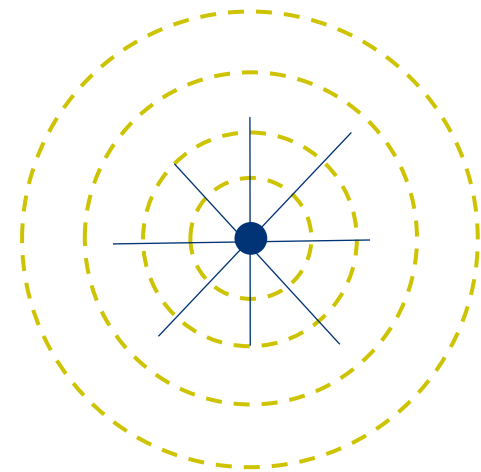
## ▶ Stark

- 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:

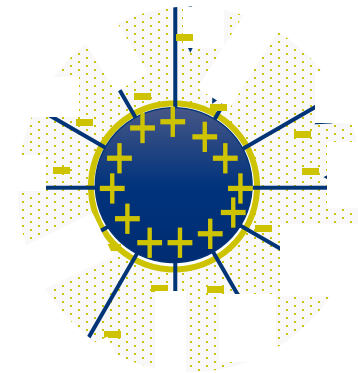
## ► Abschirmung von Feldlinien im Kugelkondensator

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

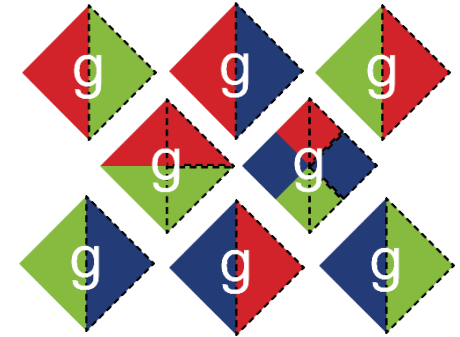
## ► Brout-Englert-Higgs Feld schirmt schwache Ladungen ab

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

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



# Starke WW - Gluonen



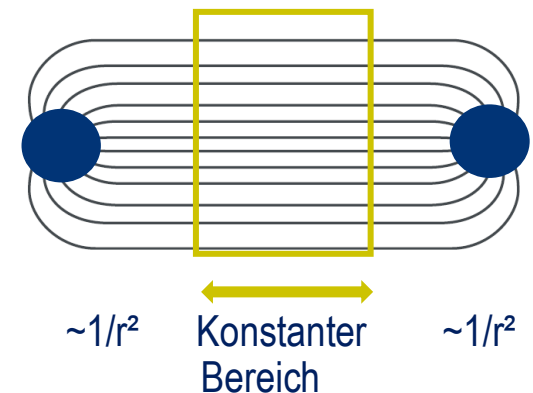
▶ Vergleich: Stark  $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$

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

→ Linearer  $kr$ -Term im Potenzial

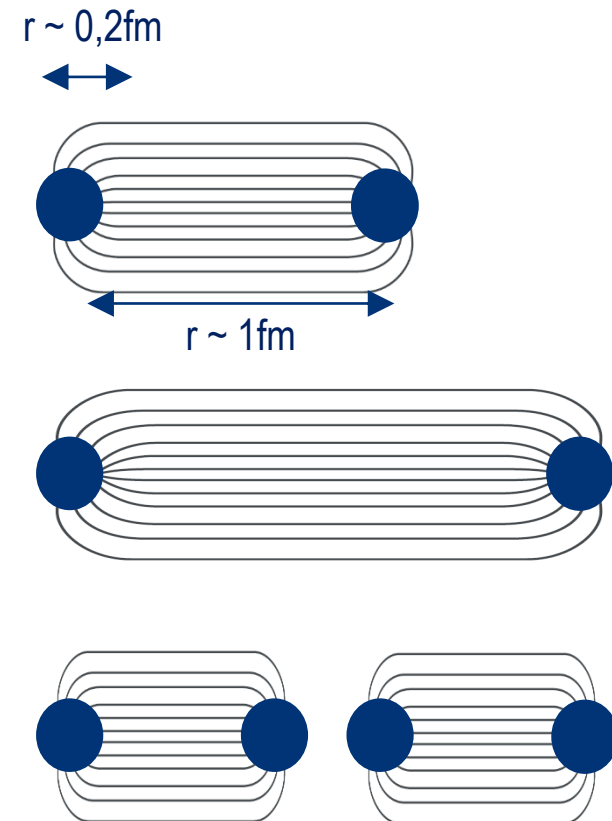
# Starke Wechselwirkung

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





## Quiz: Was stimmt?

1. Öffne **www.slido.com** und gib den Code **3634483** ein oder scanne den **QR-Code**



2. Gib deinen Namen oder einen Fantasienamen ein
3. Mehrere Aussagen – Welche stimmen? Mehrfachauswahl möglich. Jeweils 90 s Zeit zur Entscheidung. „Senden“ drücken!

# Diskussion / Fragen



# Übung: Botenteilchen

Ziel: Lösen der Aufgaben 1-3



# Lösungen

	$e^-$	$\nu_e$	$e^+$	$d^{\uparrow}$
el. Ladungszahl $Z$	$-1$	$0$	$+1$	$-\frac{1}{3}$
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$	$\uparrow$
schwache Ladungszahl $I$	$-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$
elektromagnetische WW	ja	nein	ja	ja
starke WW	nein	nein	nein	ja
schwache WW	ja	ja	ja	ja
Mögliche Botenteilchen	$\gamma, W^+, W^-, Z$	$W^+, W^-, Z$	$\gamma, W^+, W^-, Z$	$\gamma, g, W^+, W^-, Z$

# Lösungen

3. Für die vorgegebenen Teilchen können folgende Reaktionsgleichungen formuliert werden:

- Elektron:  $e^- \rightarrow W^- + ?$

Berechnung der Ladung des gesuchten Teilchens:

$$\begin{array}{ll} \text{Elektrische Ladung:} & -1 = -1 + Z_? = & Z_? = 0 \\ \text{Starke Ladung:} & \vec{0} = \vec{0} + \vec{C}_? & \vec{C}_? = \vec{0} \\ \text{Schwache Ladung:} & -\frac{1}{2} = -1 + I_? & I_? = +\frac{1}{2} \end{array}$$

Das gesuchte Teilchen ist ein Elektron-Neutrino:  $e^- \rightarrow W^- + \nu_e$ .

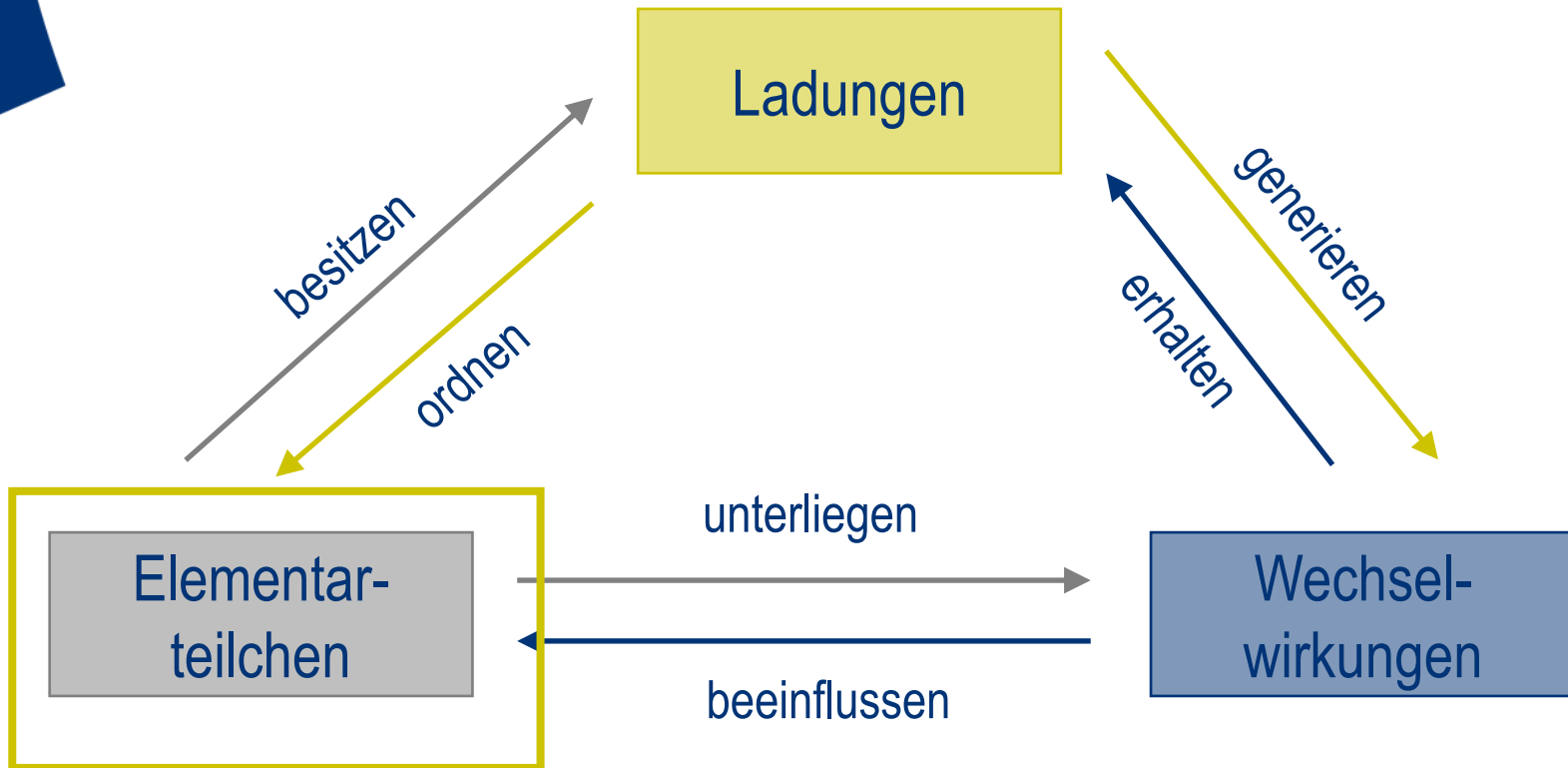
- Elektron-Neutrino:  $\nu_e \rightarrow W^- + ?$

Berechnung der Ladung des gesuchten Teilchens:

$$\begin{array}{ll} \text{Elektrische Ladung:} & 0 = -1 + Z_? = & Z_? = +1 \\ \text{Starke Ladung:} & \vec{0} = \vec{0} + \vec{C}_? & \vec{C}_? = \vec{0} \\ \text{Schwache Ladung:} & +\frac{1}{2} = -1 + I_? & I_? = +\frac{3}{2} \end{array}$$

Es existiert kein bekanntes Elementarteilchen mit den errechneten Eigenschaften.

# 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

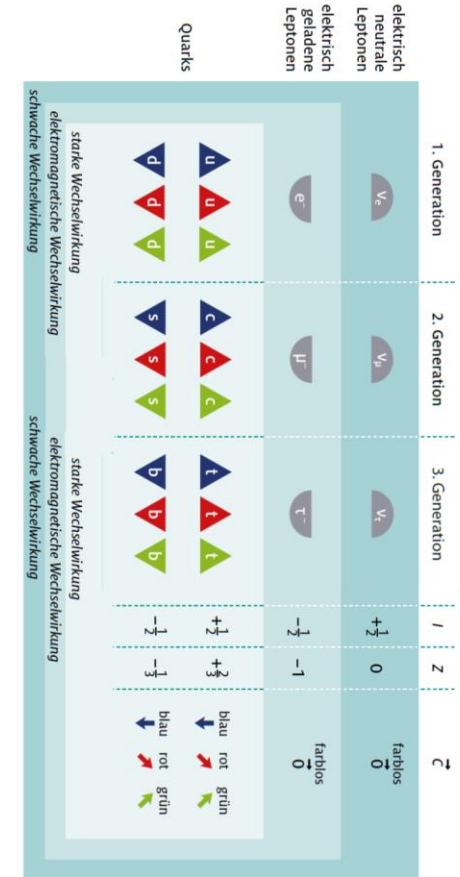


# Anordnung von Teilchen in Generationen

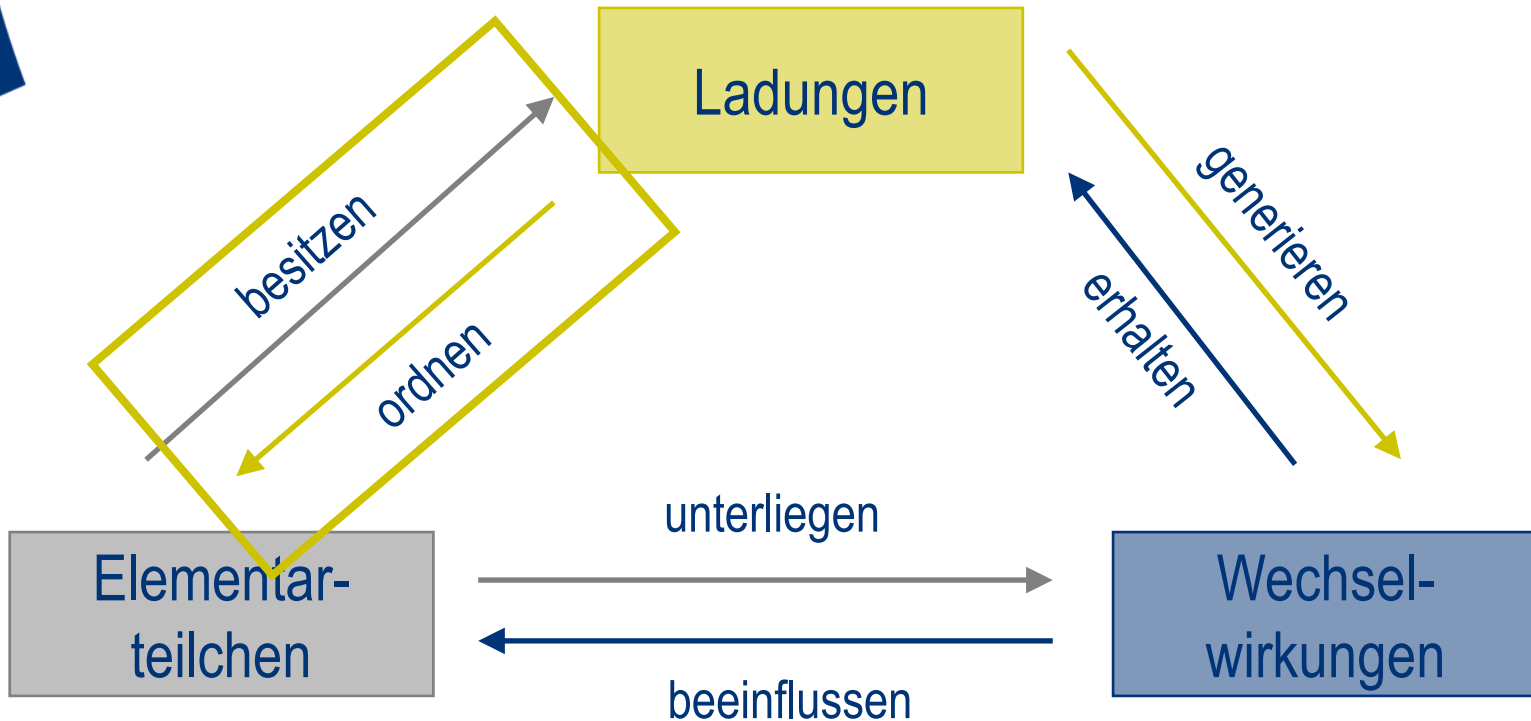
	1. Generation	2. Generation	3. Generation	I	Z	$\vec{C}$
elektrisch neutrale Leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$+\frac{1}{2}$	0	farblos $\vec{0}$
elektrisch geladene Leptonen	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	$-\frac{1}{2}$	-1	farblos $\vec{0}$
Quarks	$u$ $u$ $u$ $d$ $d$ $d$	$c$ $c$ $c$ $s$ $s$ $s$	$t$ $t$ $t$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



# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



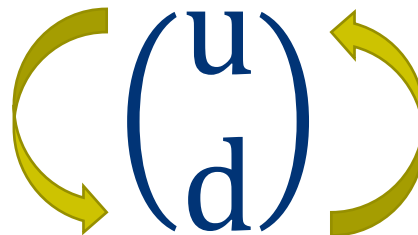
# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► 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

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




$W^+$  - Abstrahlung oder  
 $W^-$  - Absorption



$W^-$  - Abstrahlung oder  
 $W^+$  - Absorption

# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung

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

- $\begin{pmatrix} u \text{ (red arrow)} \\ d \text{ (red arrow)} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \text{ (green arrow)} \\ d \text{ (green arrow)} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \text{ (blue arrow)} \\ d \text{ (blue arrow)} \end{pmatrix}$

# Ladungsbilanz: $\beta^-$ -Umwandlung

► Prozess:  $d \rightarrow u + W^- \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$

- Elektrische Ladungszahl:  $Z$

$$-\frac{1}{3} = +\frac{2}{3} - 1 = +\frac{2}{3} - 1 + 0$$

- Schwache Ladungszahl:  $I$

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

- Starker Farbladungsvektor:  $\vec{C}$

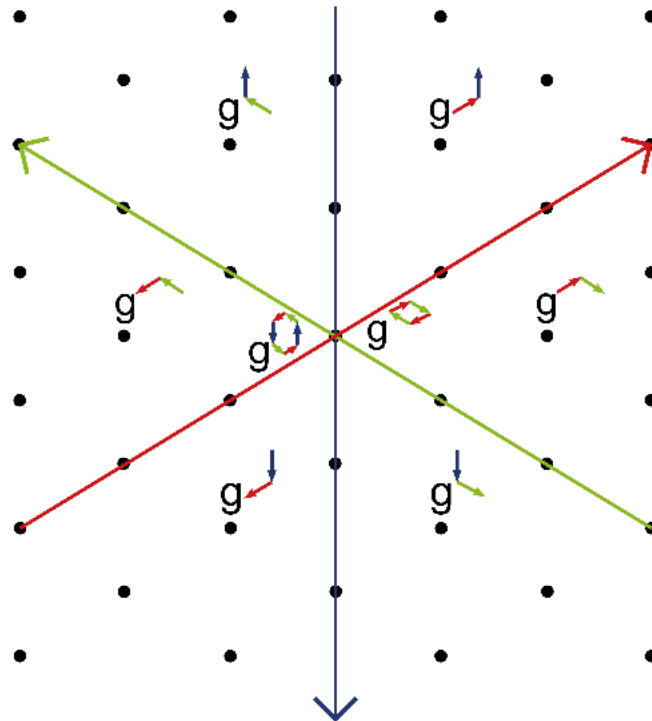
$$\vec{C} = \vec{C} + \vec{0} = \vec{C} + \vec{0} + \vec{0}$$

► Alle Ladungen sind erhalten

# Erinnerung: Starke Wechselwirkung

▶  $F_s = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r^2} + k$

▶ Botenteilchen (Gluonen) besitzen selbst Ladung



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ▶ Starke Wechselwirkung

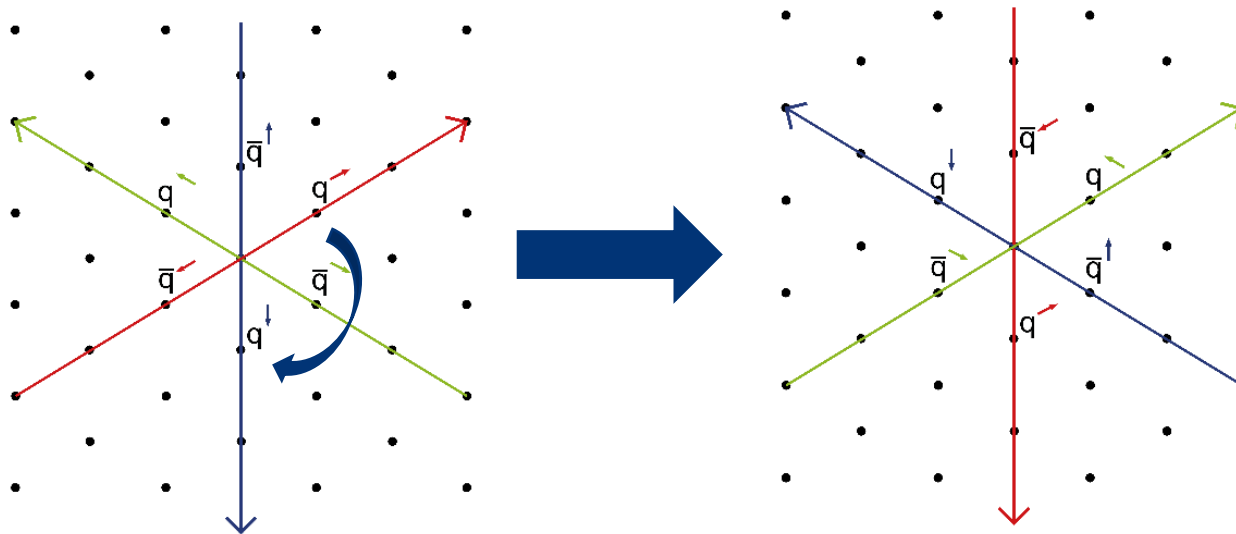
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks:  
Quarks bilden **Triplets** bezüglich der starken Ladung

▶  $(u \rightarrow u \downarrow)$



# Umwandlung innerhalb Multipletts

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



- ▶ hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

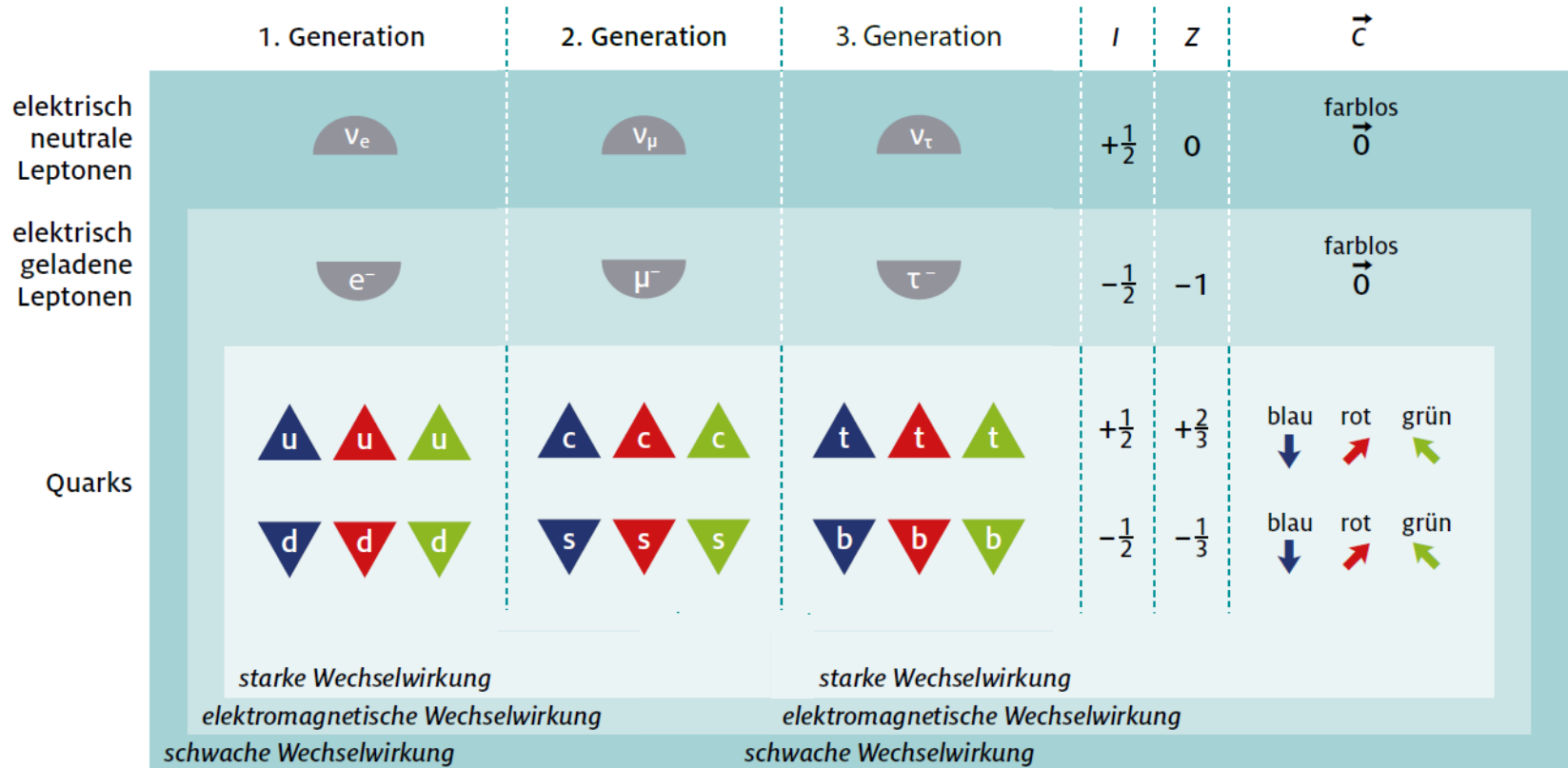
## ▶ Elektromagnetische Wechselwirkung

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

# Übung: Ordnungsschema des Standardmodells

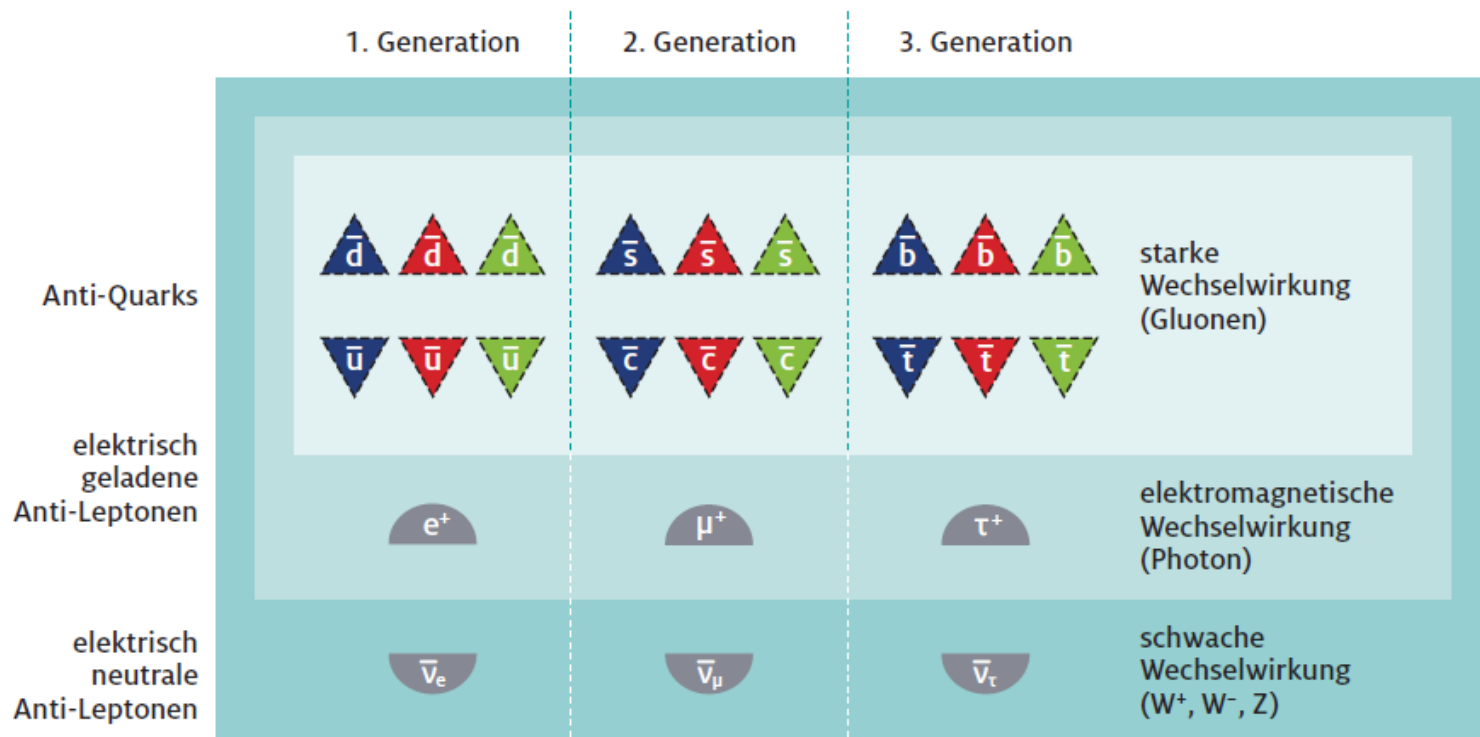


# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip



# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

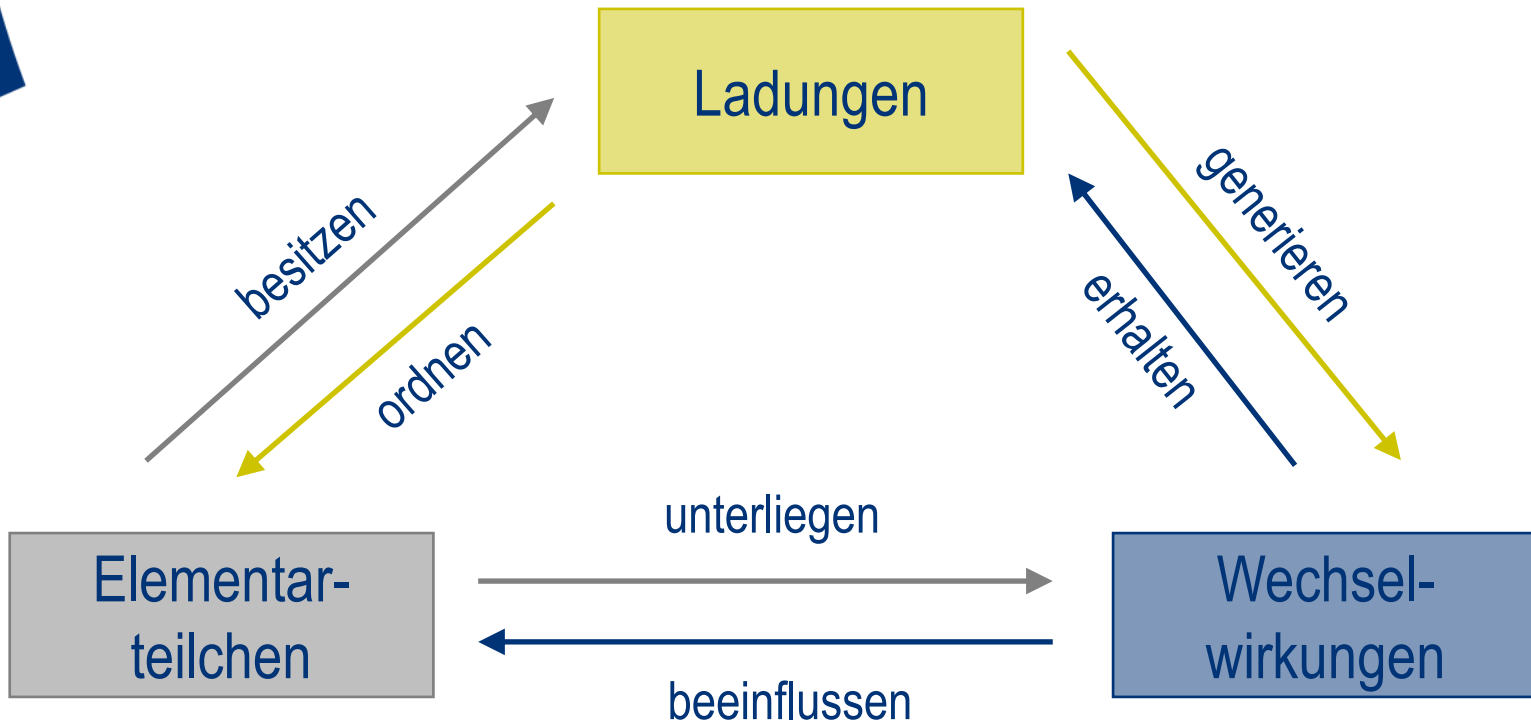
- ▶ Zu jedem Teilchen gibt es ein zugehöriges Anti-Teilchen, mit gleicher Masse jedoch entgegengesetzten Ladungen
- ▶ Anti-Materieteilchen ebenfalls in drei Generationen



# 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!)
  - Singulett der elektromagnetischen Wechselwirkung (vorhersagbar)
- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich
  - (zuzüglich: hier nicht diskutierte Effekte der Zustandsmischung)

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells





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

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



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



Instagram



NETZWERK  
TEILCHENWELT