

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

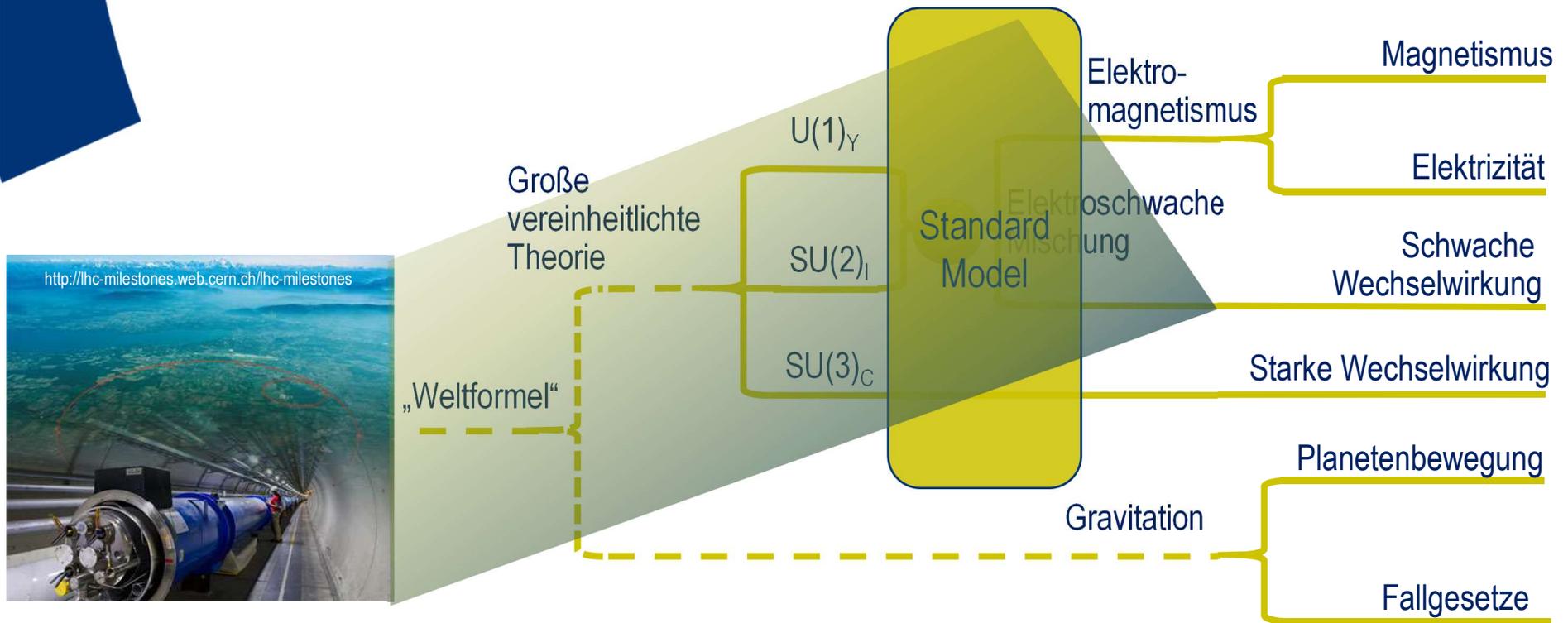




Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

- ▶ **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

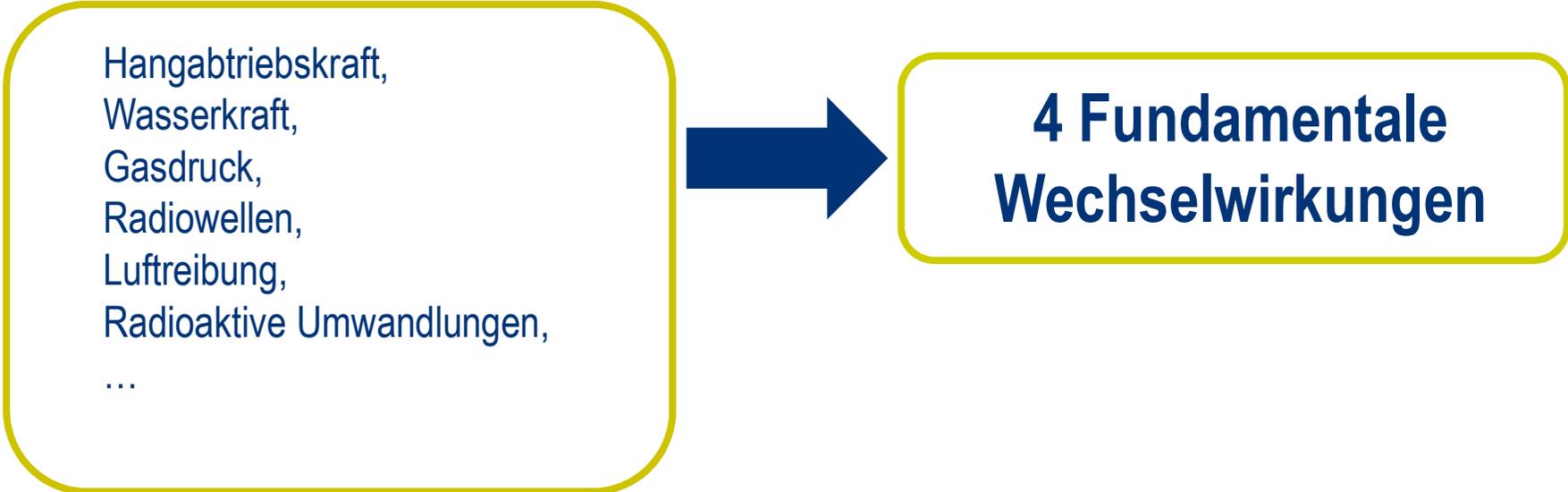
Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“





Vereinheitlichungen

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



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

**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**

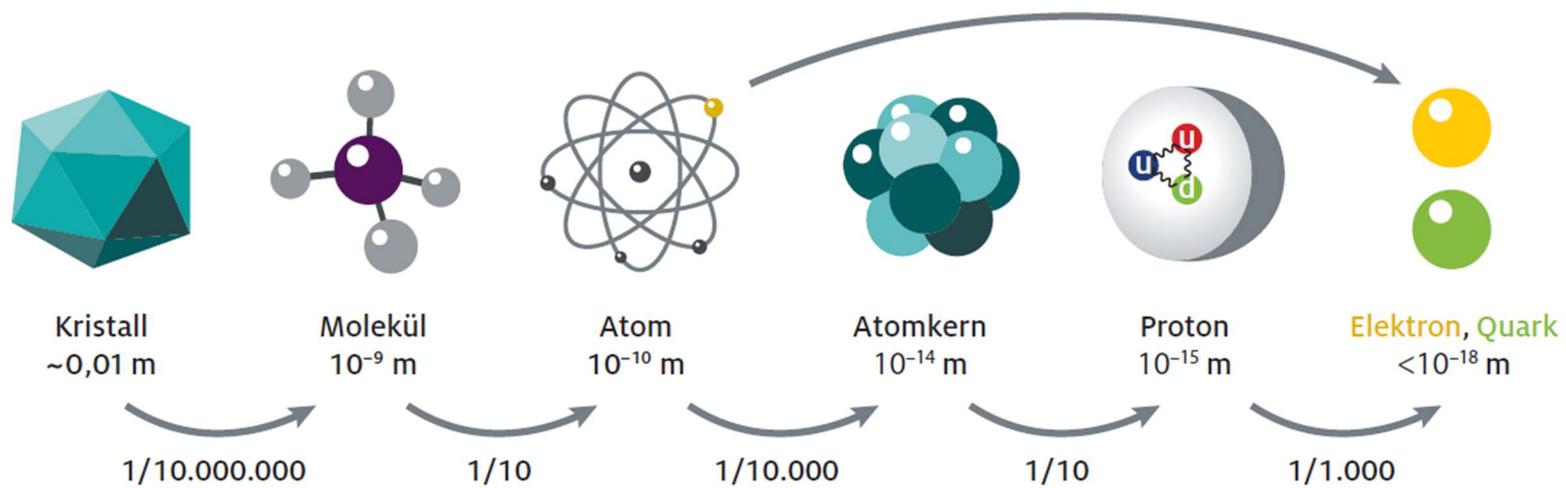


Das Standardmodell der Teilchenphysik

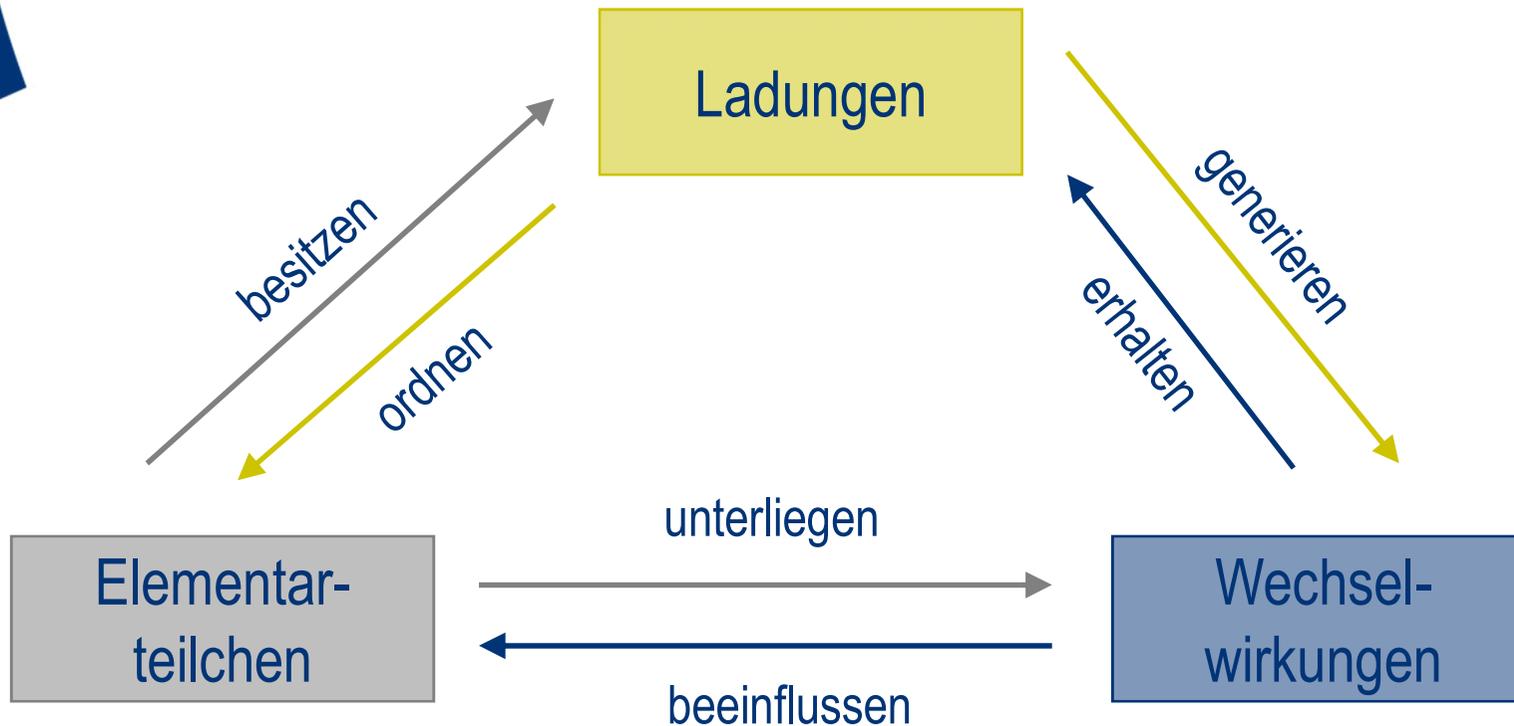
► Das Standardmodell

- 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
ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

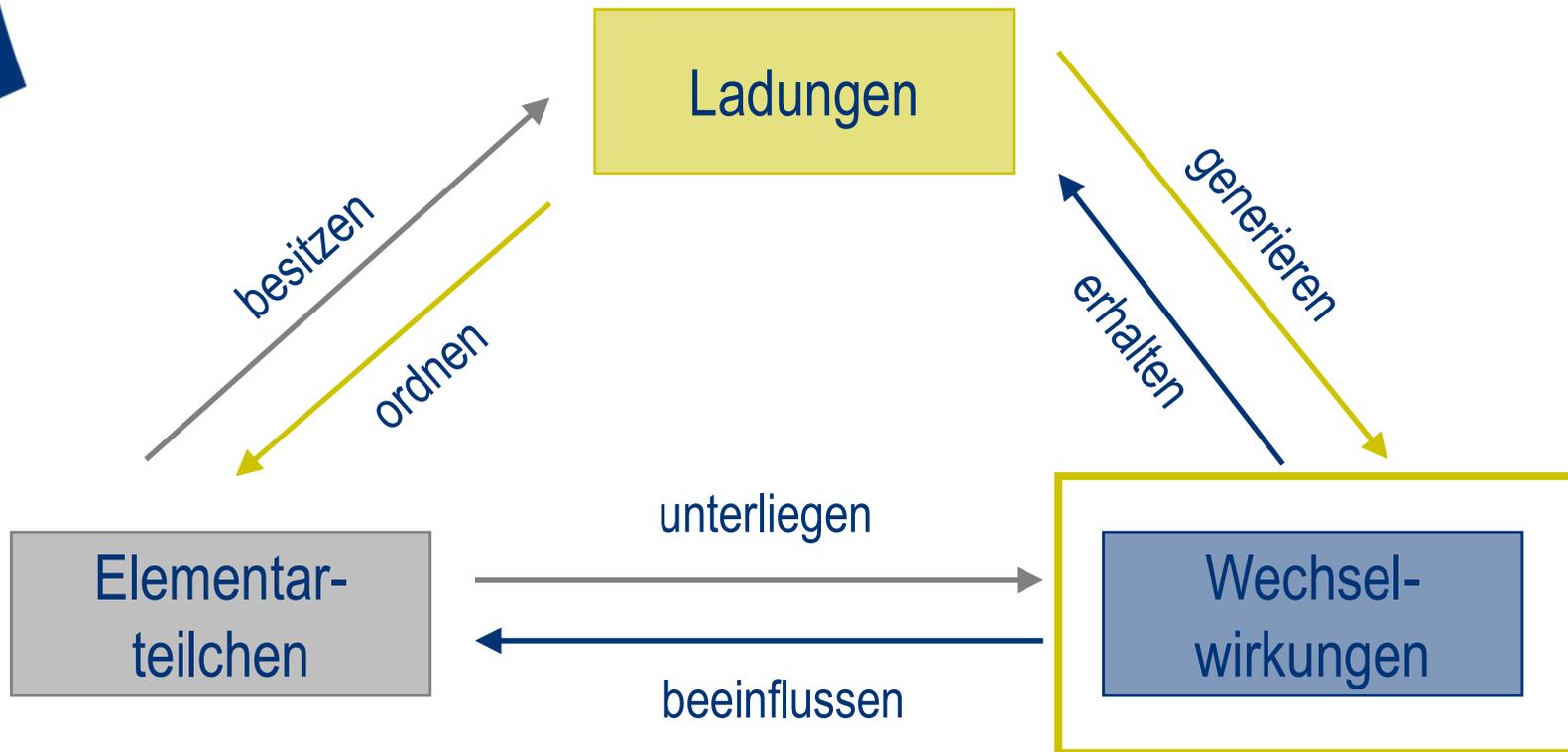
Fußball - Analogie

- ▶ 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_e, ν_μ, ν_τ 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
ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

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)

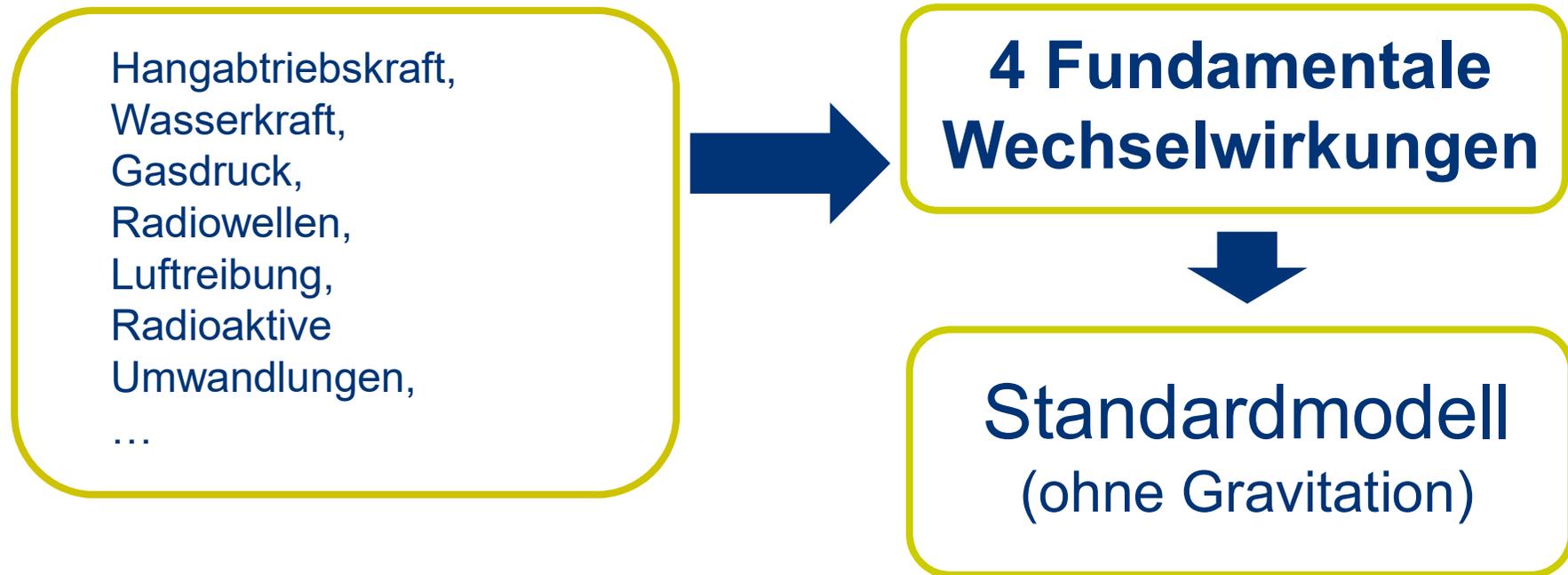
▶ Begriffe Kraft und Wechselwirkung sind klar zu trennen

▶ Kraft ist nur ein Aspekt von Wechselwirkung

▶ Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

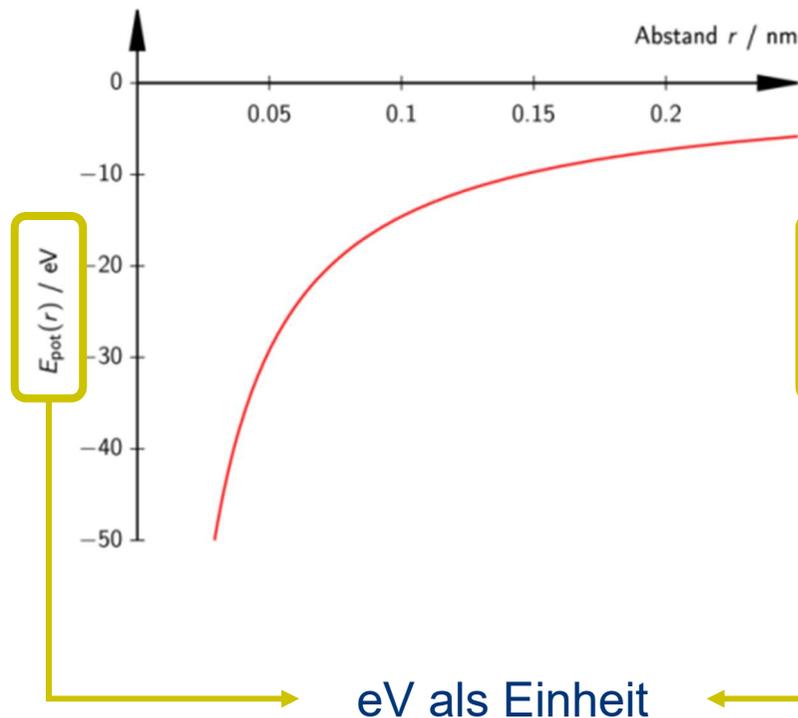
Vereinheitlichungen

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

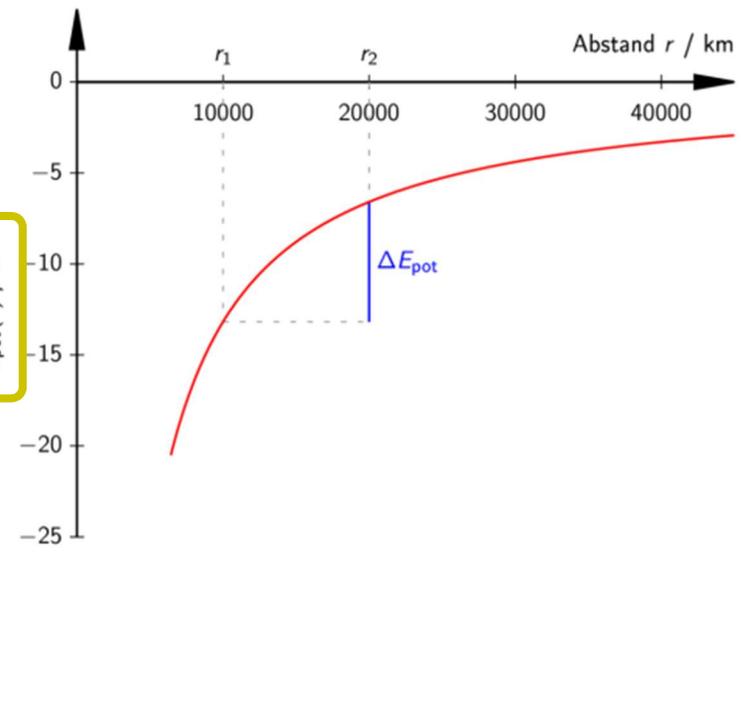


Ausgangspunkt: Zwei Bekannte Wechselwirkungen

► Elektromagnetische Wechselwirkung



► Gravitation (O_2 und Erde)



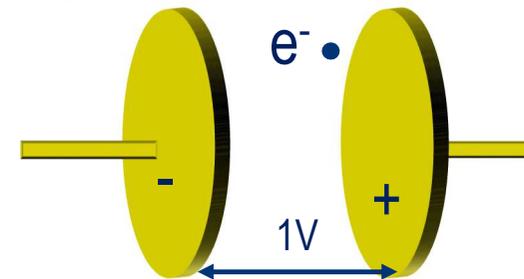
Einschub: Elektronenvolt

▶ 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 eV/c^2 angegeben werden! (c: Lichtgeschwindigkeit)

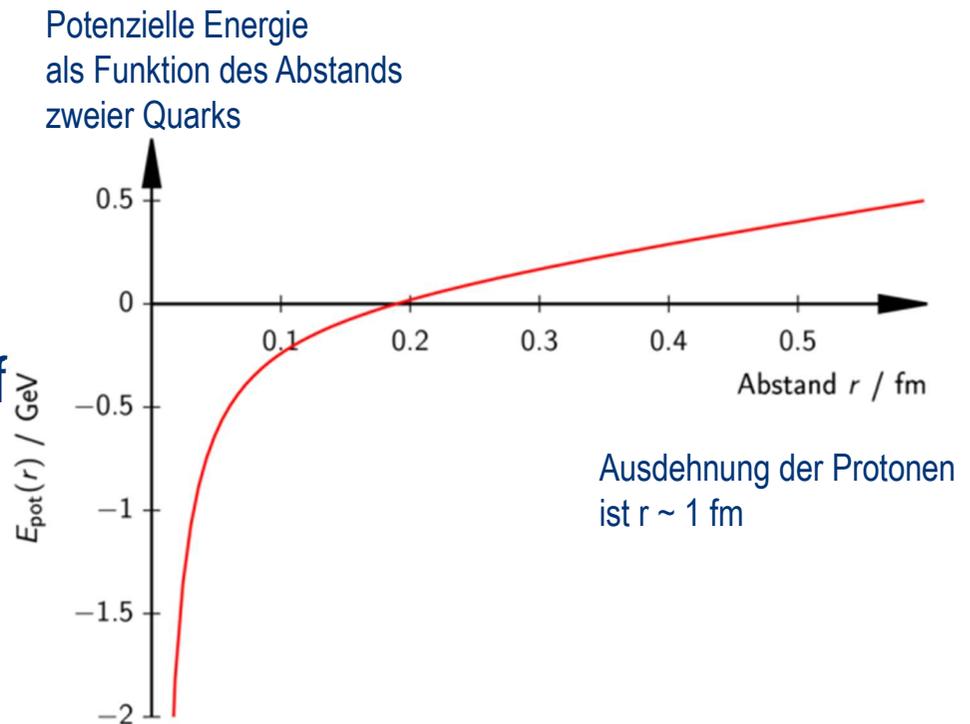
- Elektron $0,5 \text{ MeV}/c^2$
- Proton $938 \text{ MeV}/c^2 \sim 1 \text{ GeV}/c^2$
- Higgs-Teilchen $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$



Die Starke Wechselwirkung

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

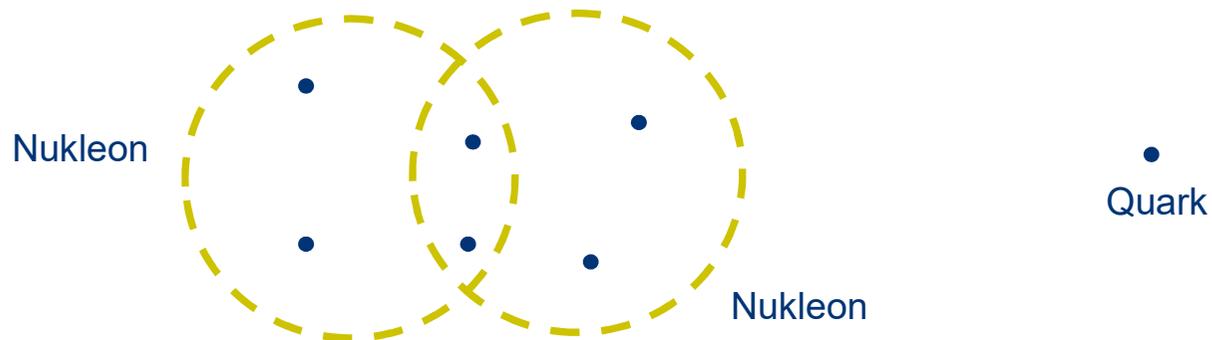
- ▶ **Substruktur:**
Nukleonen bestehen aus Quarks, die starke Wechselwirkung spüren.
Die starke Kernkraft geht auf diese Substruktur zurück



Bindung von Nukleonen

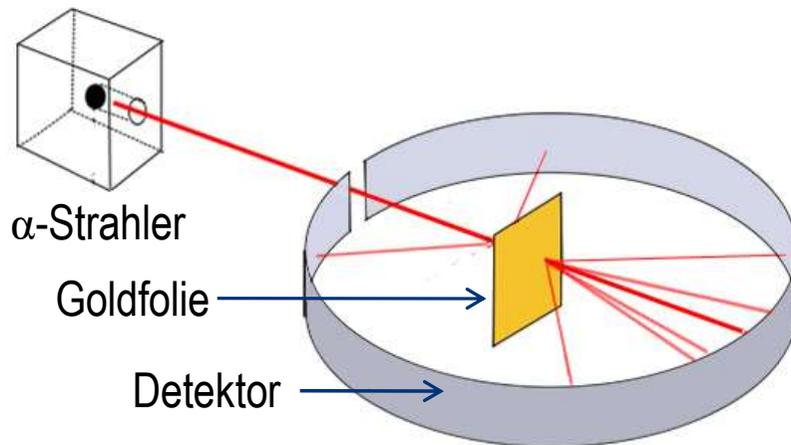
▶ Zusammenhalt von Nukleonen analog zur Elektronenpaarbindung bei Atomen

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

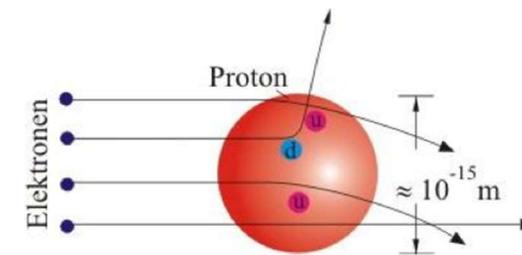


- Bessere Vorstellung: Nukleonengas
- Austausch von „Pionen“ (geb. $q\bar{q}$ Zustände)

Experimenteller Nachweis von Quarks



Rutherford-Streuexperiment (1911)
Streuung von α -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. β^+ -Umwandlung

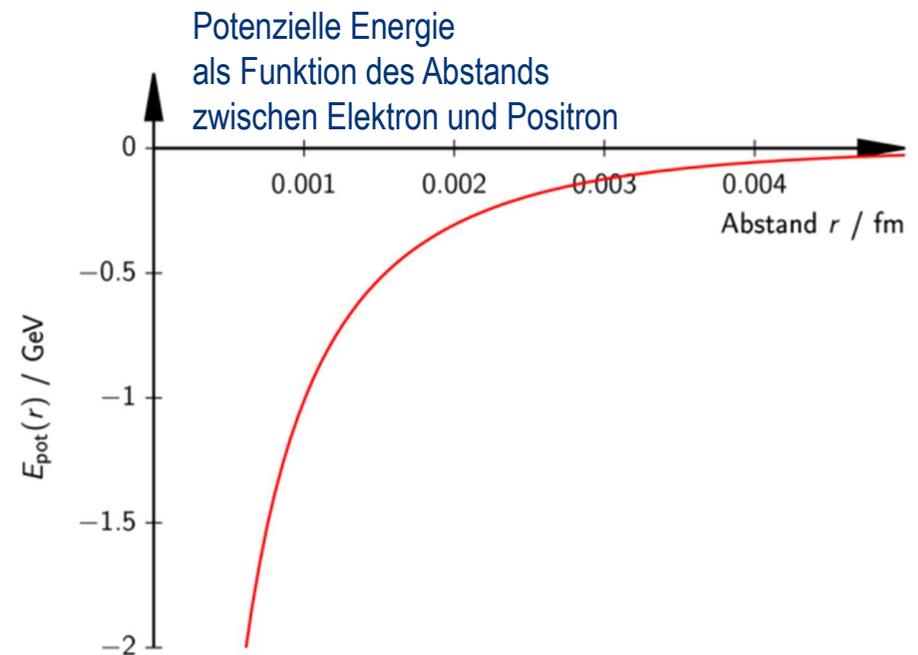
Die Schwache Wechselwirkung

▶ Warum scheint die Sonne?

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

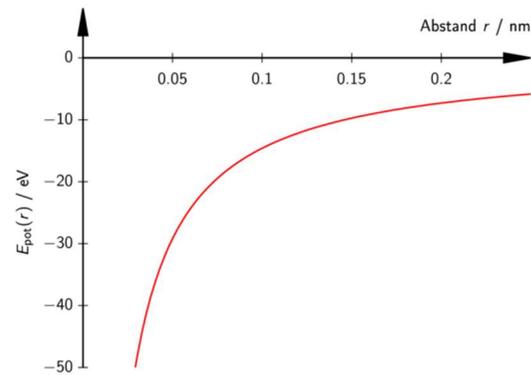
▶ schwache Wechselwirkung

- z.B. β^+ -Umwandlung

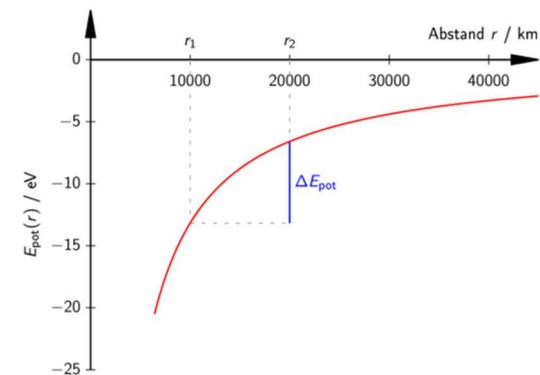


Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

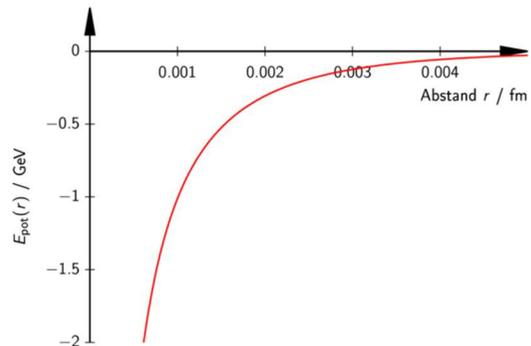
► Elektromagnetische WW



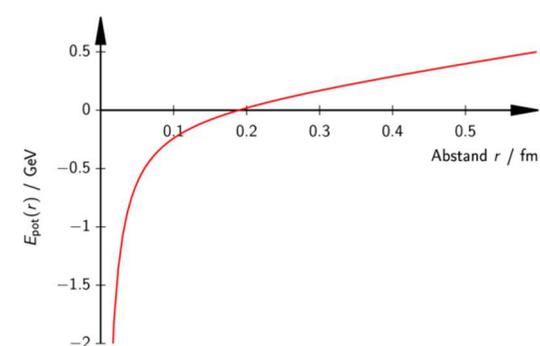
► Gravitation



► Schwache WW



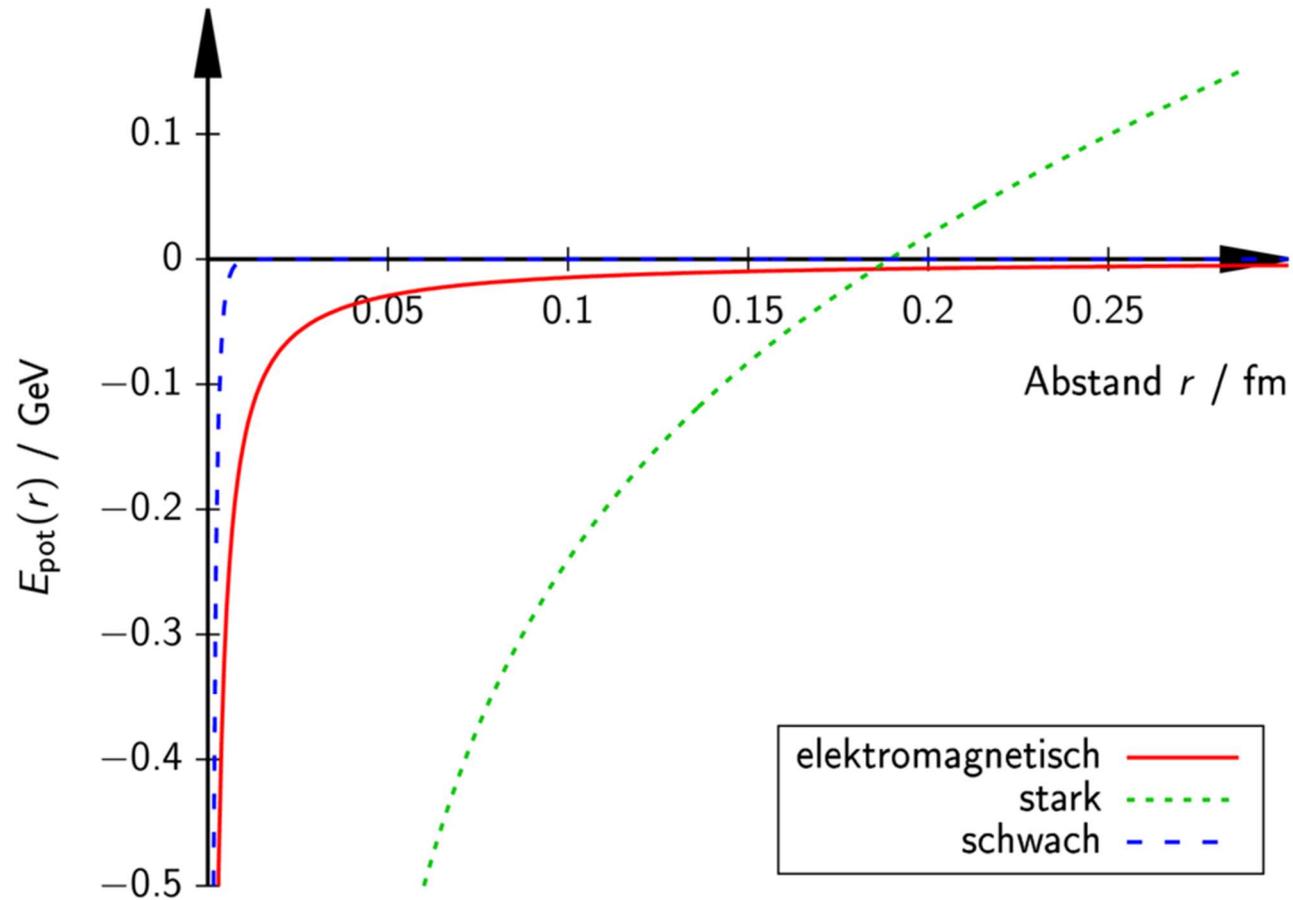
► Starke WW



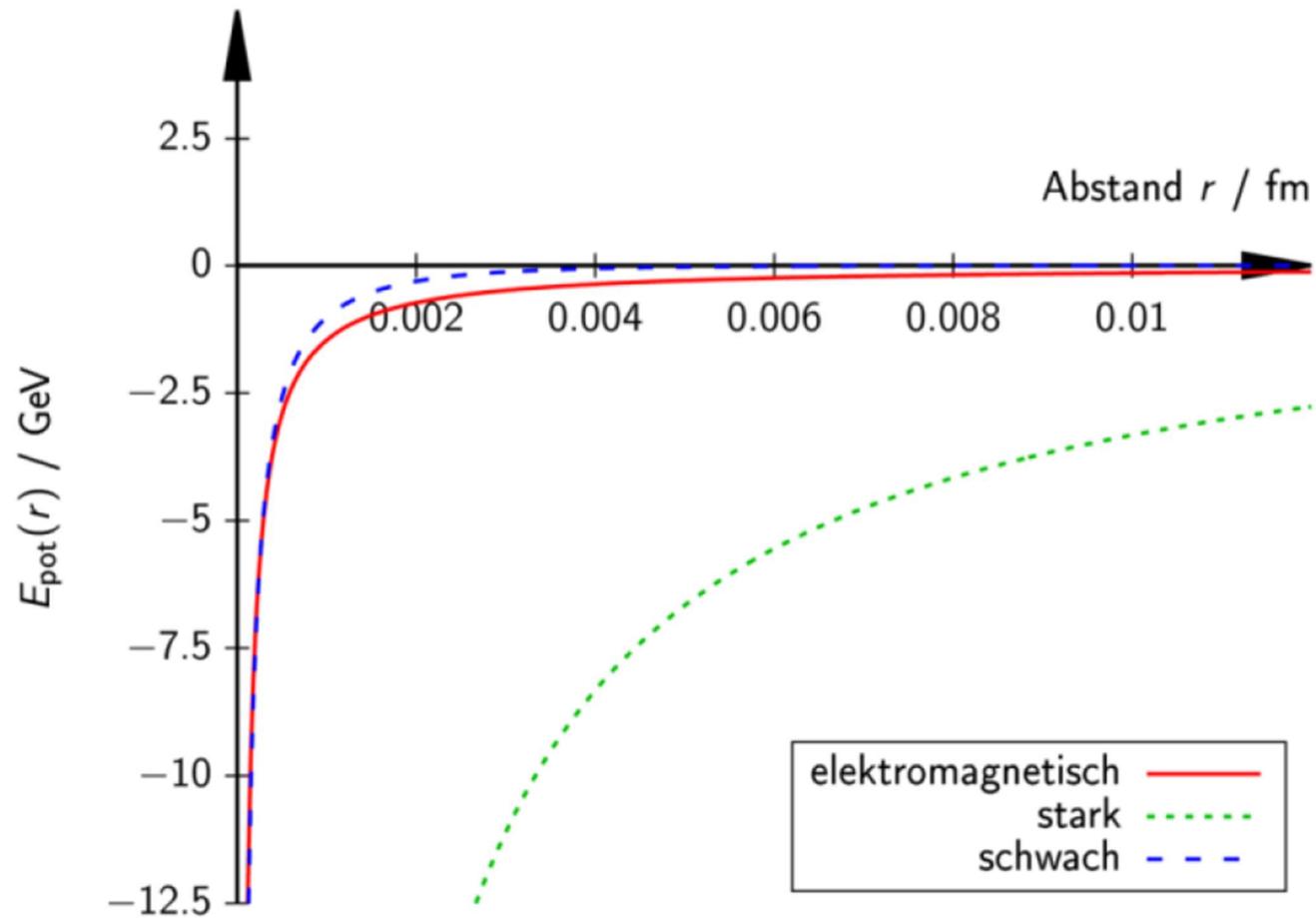


Vergleich der potenziellen Energien

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	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r}$

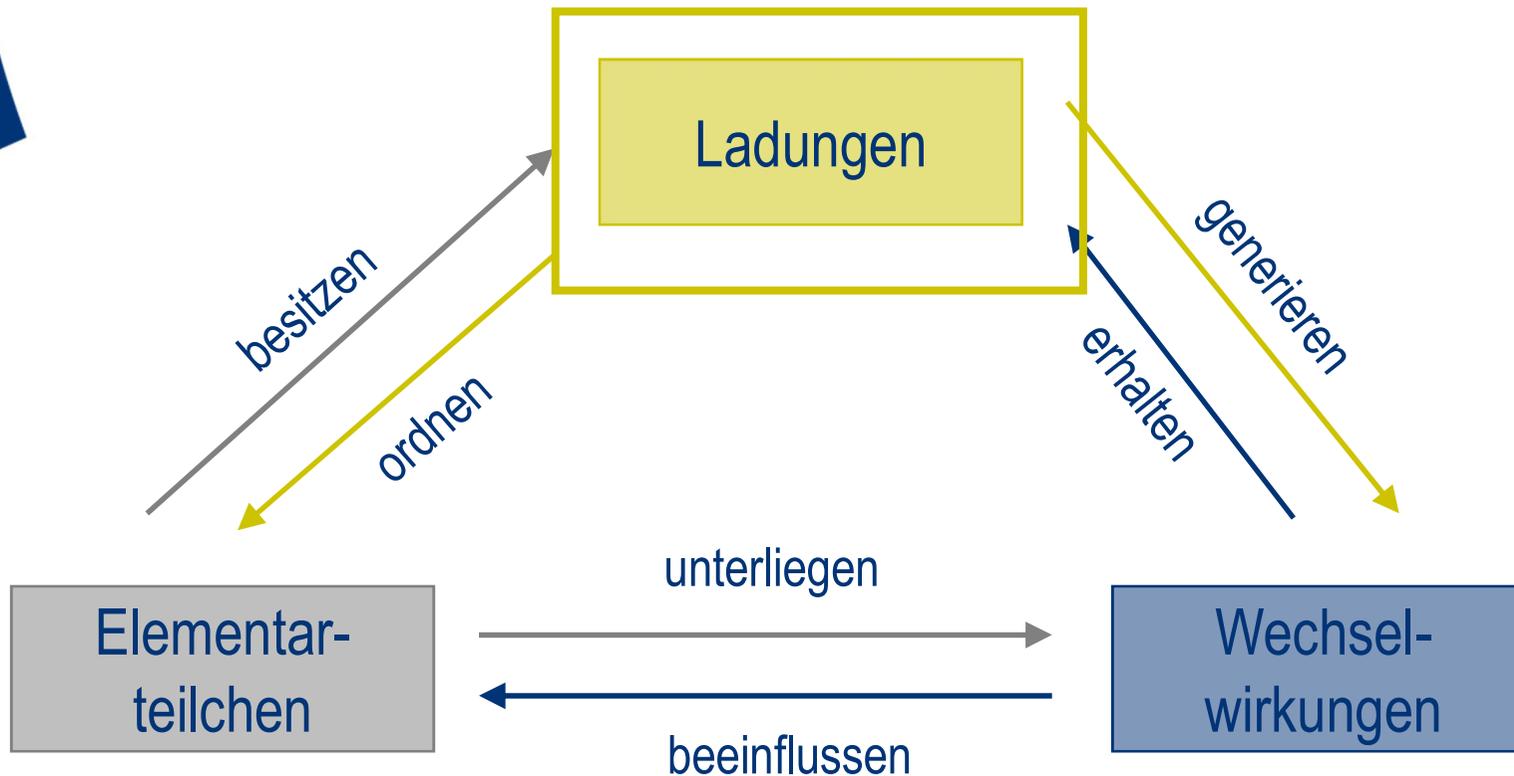


Digitales Murmeln

▶ 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 α existiert auch für andere Wechselwirkungen
 - $\alpha_w, \alpha_S, \alpha_{grav}$
- ▶ Zu jeder Wechselwirkung existiert eine **Ladung**



Erweiterung: Konzept der Ladung

► **Einführung:** eines Kopplungsparameters α auch für andere Wechselwirkungen

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

Wechselwirkung	Kopplungsparameter α
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: α_{grav} zwischen Proton (p) und Elektron (e⁻)
 - $\alpha_{grav}^{p,e} = G \frac{m_p m_e}{\hbar c} \approx \frac{1}{3 \cdot 10^{41}}$
 - 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 α
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

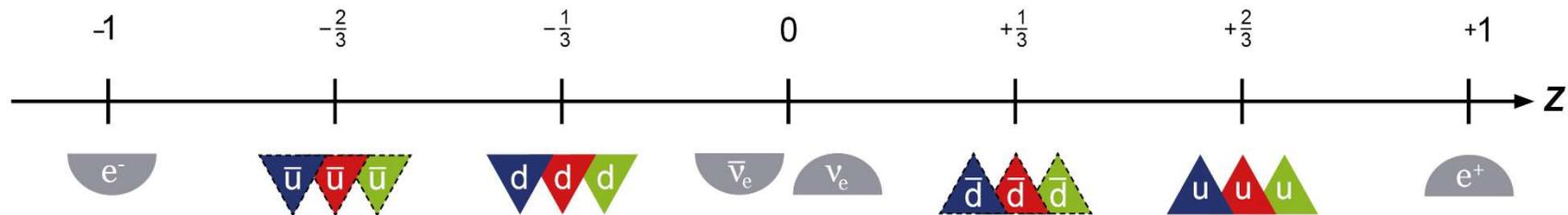
Und:

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

Elektrische Ladung

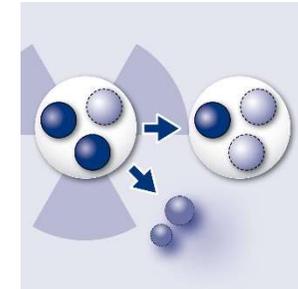


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen Z einiger Anti-/Materieteilchen

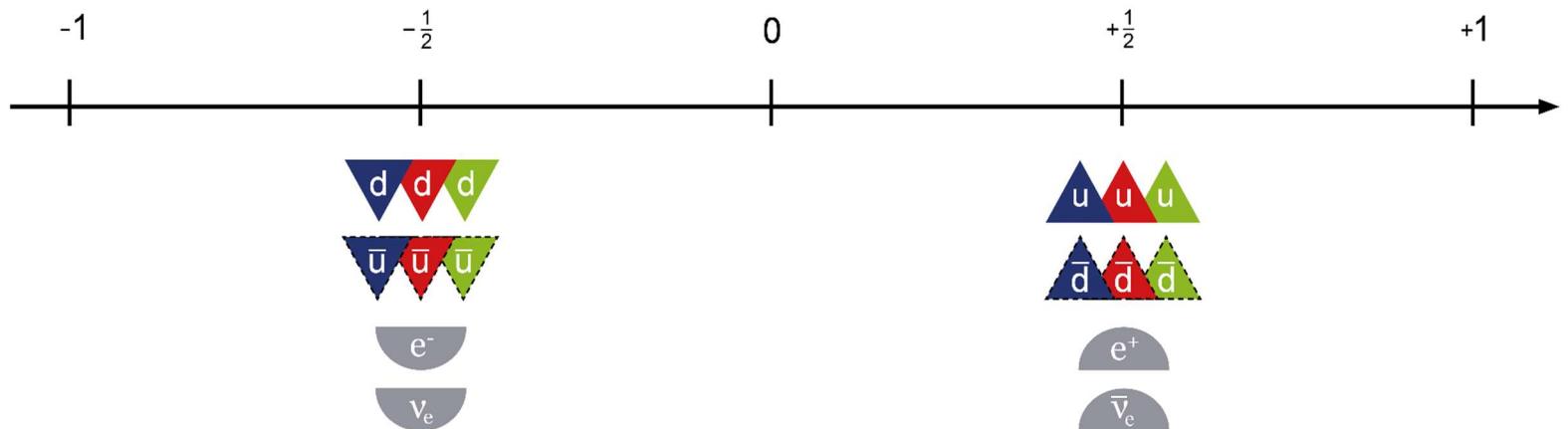


- Elektrische Ladung ist gequantelt

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

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

$$Q_w = g_w \cdot I$$

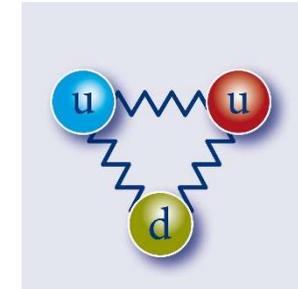
Kopplungsstärke g_w
 $\rightarrow \alpha_w = \frac{g_w^2}{4\pi}$

Ladungs-
zahl

- Die schwache Ladung hat eigentlich einen vektoriellen Charakter, daher die 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.

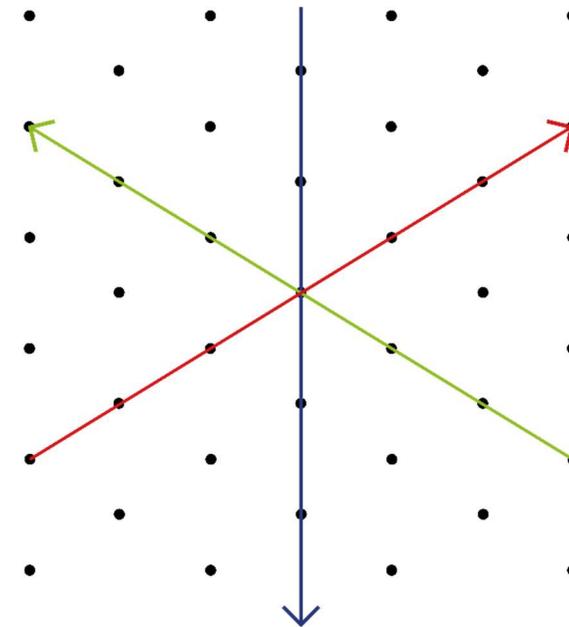
Starke Ladung

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



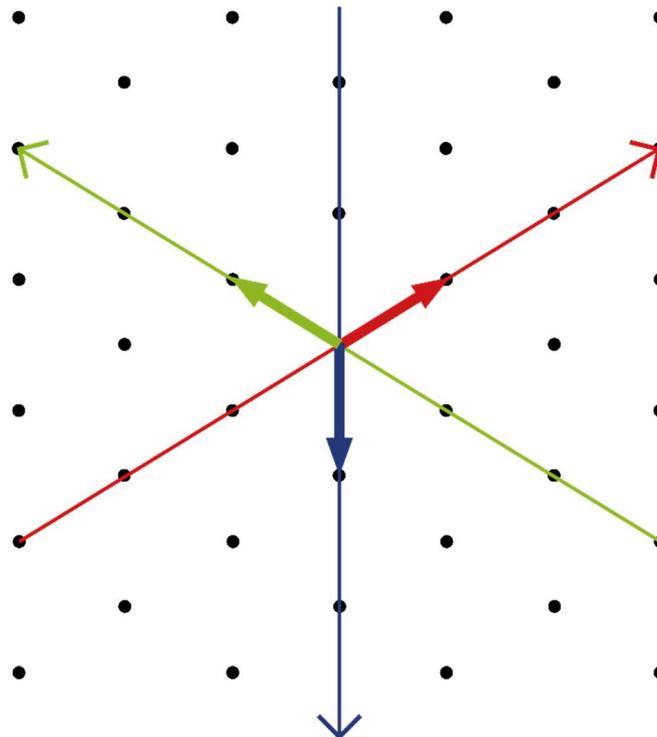
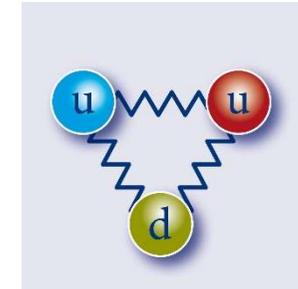
▶ Farbgitter:

- 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



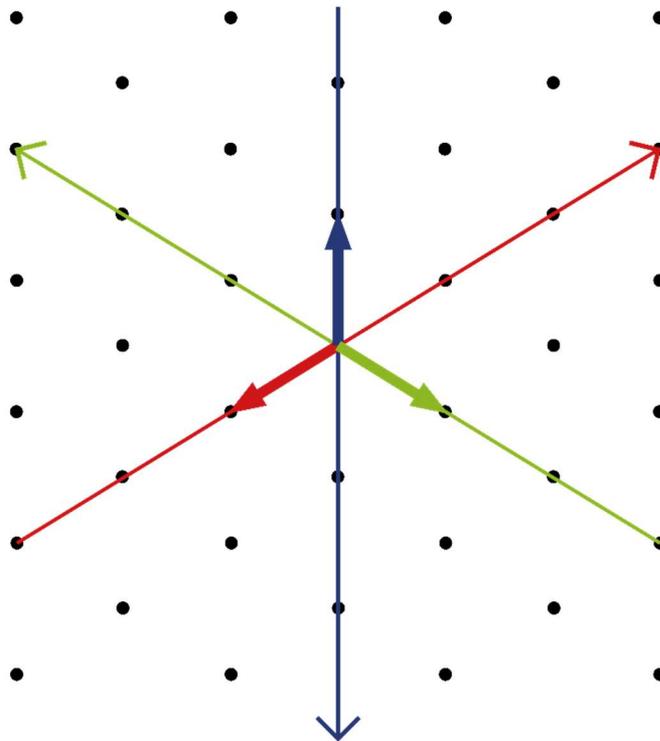
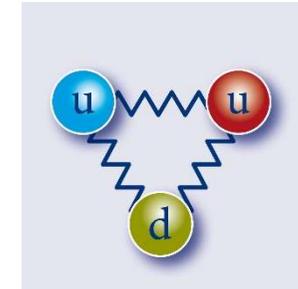
Starke Ladung

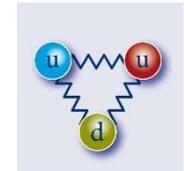
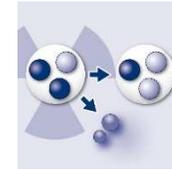
► Farbladungsvektoren von Quarks



Starke Ladung

► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





Alle Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

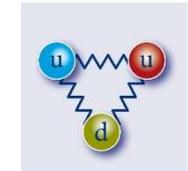
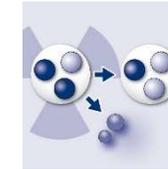
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

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



Alle Ladungen sind jeweils erhalten

▶ Beispiel: β^- -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

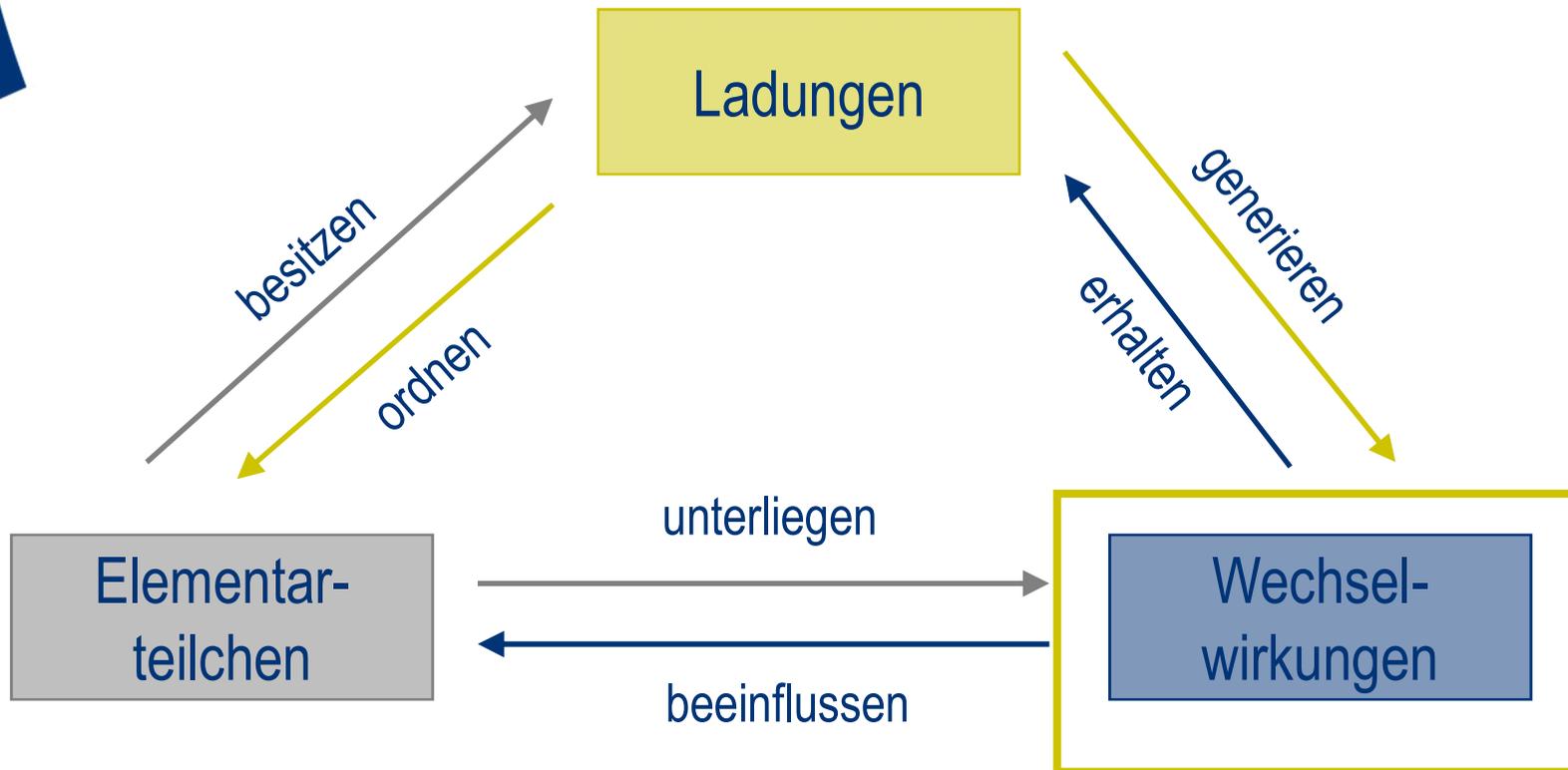
- ▶ ob bestimmte Prozesse erlaubt oder unmöglich sind (und sogar ihrer Wahrscheinlichkeiten) aus
 - Energie- und Impulserhaltung
 - **Erhaltung aller drei Ladungen**
 - Beachtung der Teilchen-“Multipletts“ (später)



Zusammenfassung: Ladungen

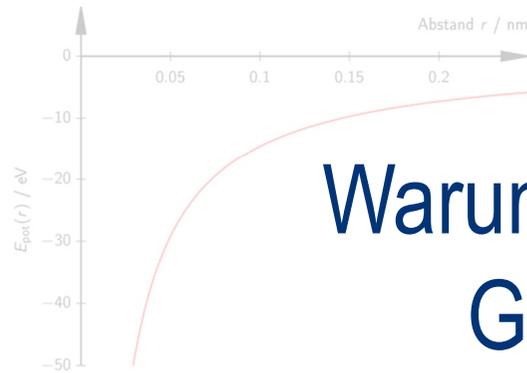
- ▶ Drei verschiedene Ladungen
 - Elektrisch
 - Schwach
 - Stark
- ▶ Ladungen sind
 - Additiv
 - Erhalten
→ Vorhersage von erlaubten Prozessen
 - Gequantelt
- ▶ Antimaterie: Alle Ladungen entgegengesetzt

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW

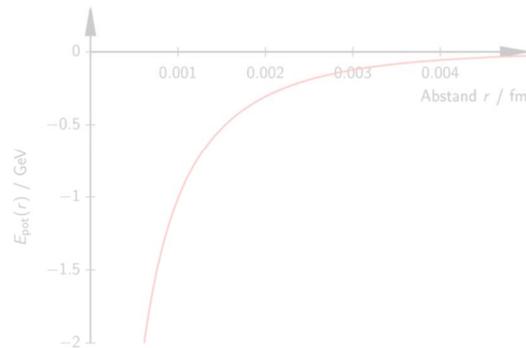


► Gravitation

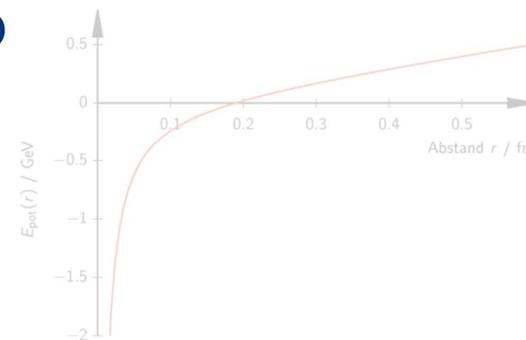


Warum erfahren wir nur
Gravitation und

► Schwache WW **Elektromagnetismus**



im Alltag?



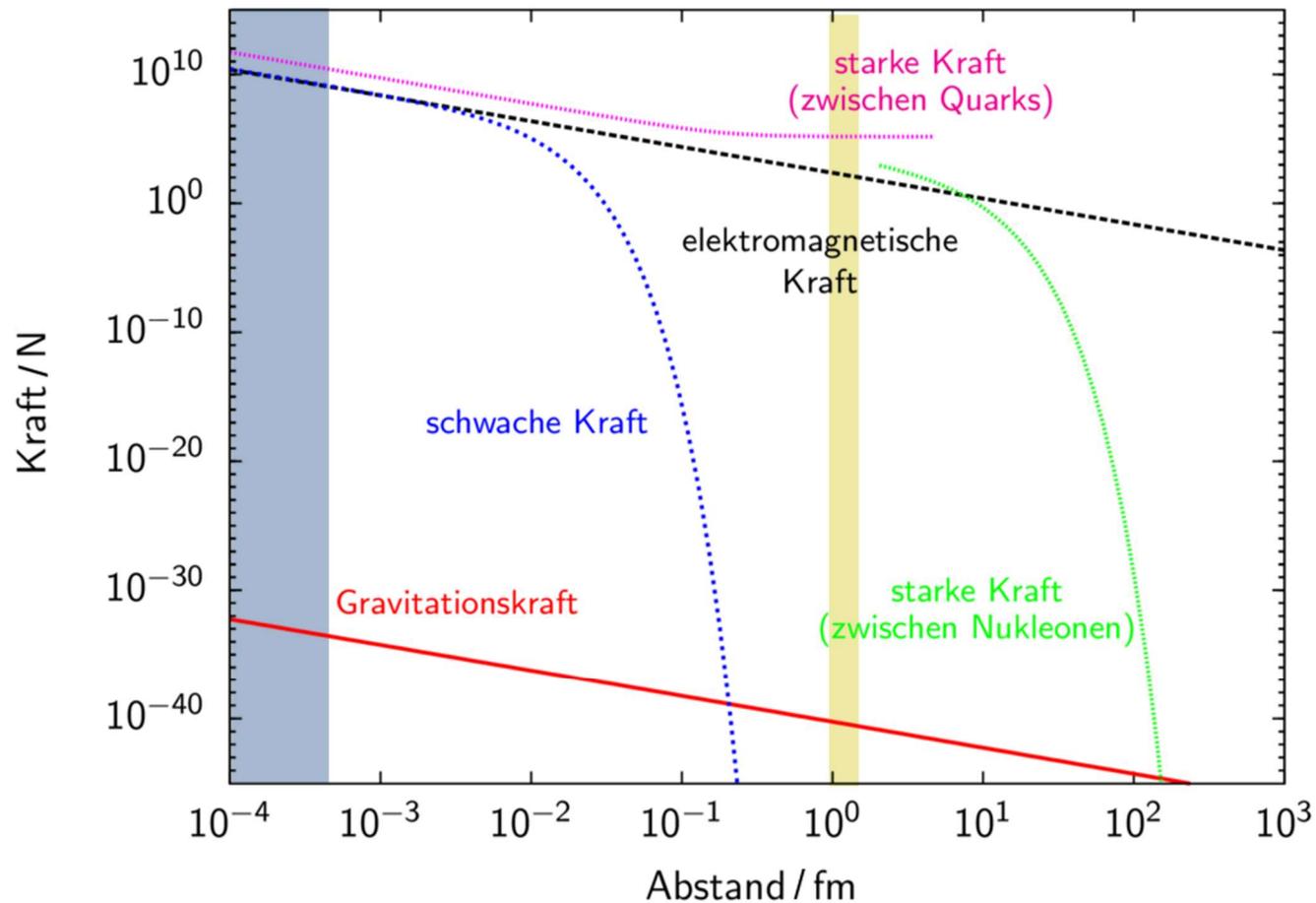
Kräfte der Wechselwirkungen

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: α !
- ▶ Stärken aller **Wechselwirkungen sehr** ähnlich (außer für Gravitation)

Stärke der Wechselwirkungen

► Einführung: eines Kopplungsparameters α auch für andere Wechselwirkungen

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



Warum erfahren wir nur

Wechselwirkung	Kopplungsparameter α
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

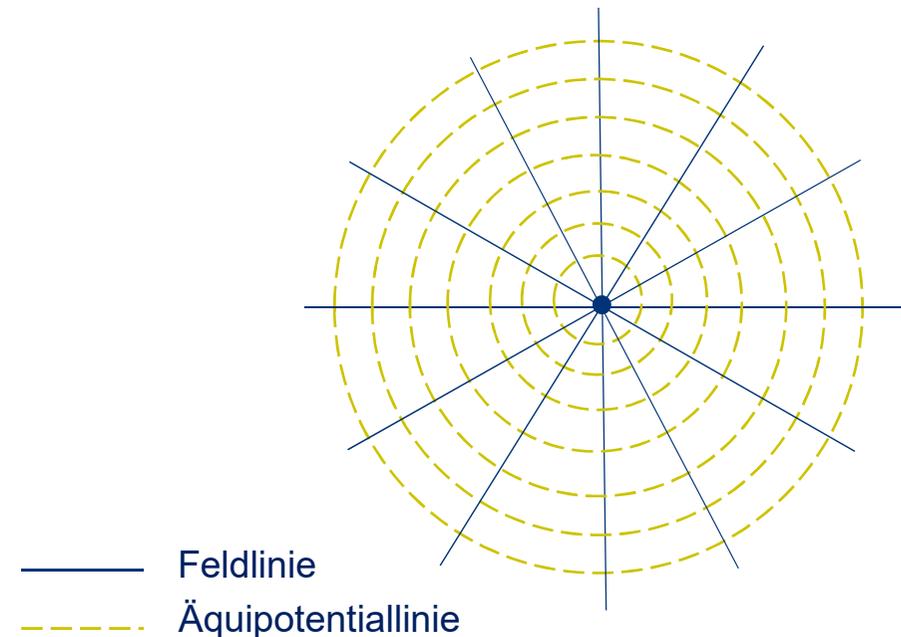
▶ Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW

▶ **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

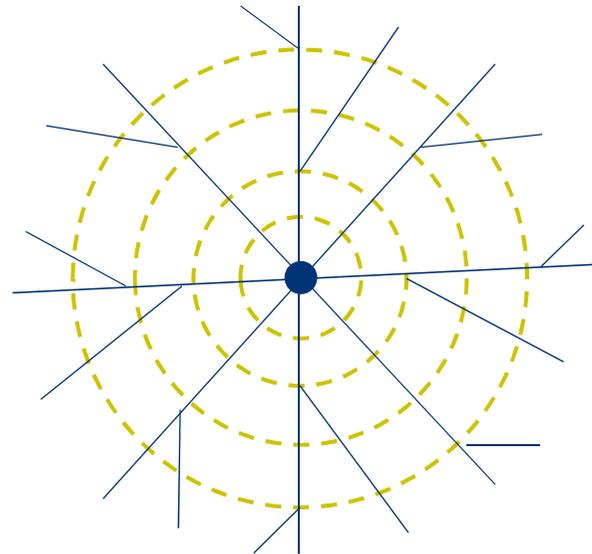
- $F_C = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$



Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

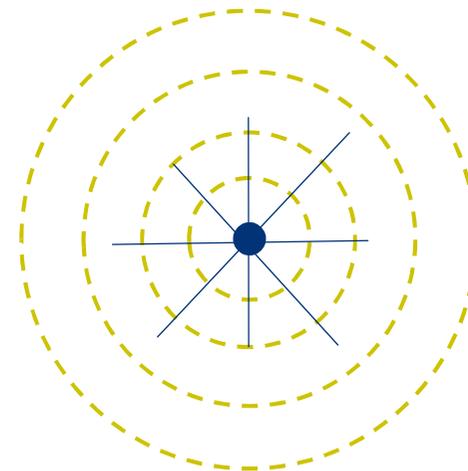
► Stark

- 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:

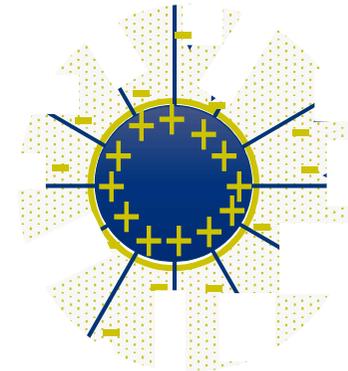
► Abschirmung von Feldlinien im Kugelkondensator

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

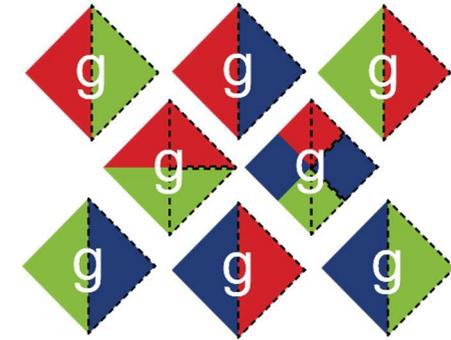
► Brout-Englert-Higgs Feld schirmt schwache Ladungen ab

- 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



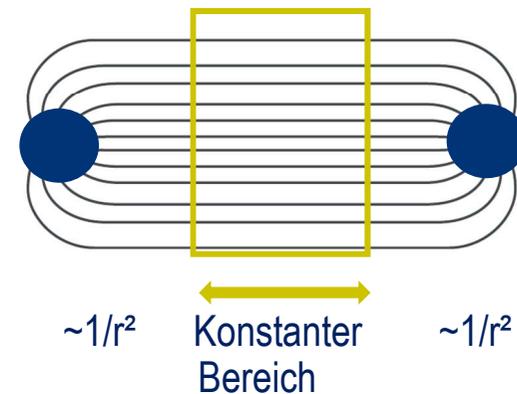
▶ Vergleich: Stark $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$

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

→ Linearer kr -Term im Potenzial

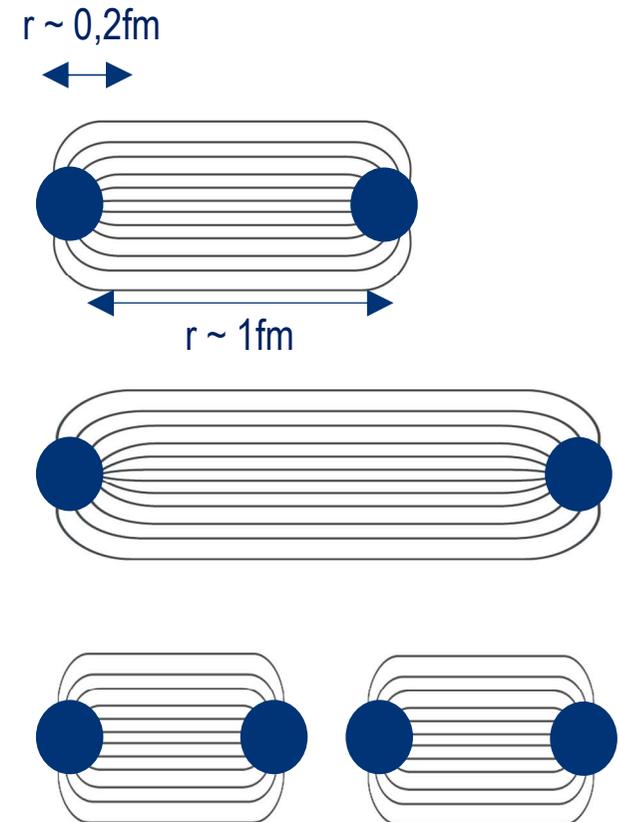
Starke Wechselwirkung

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

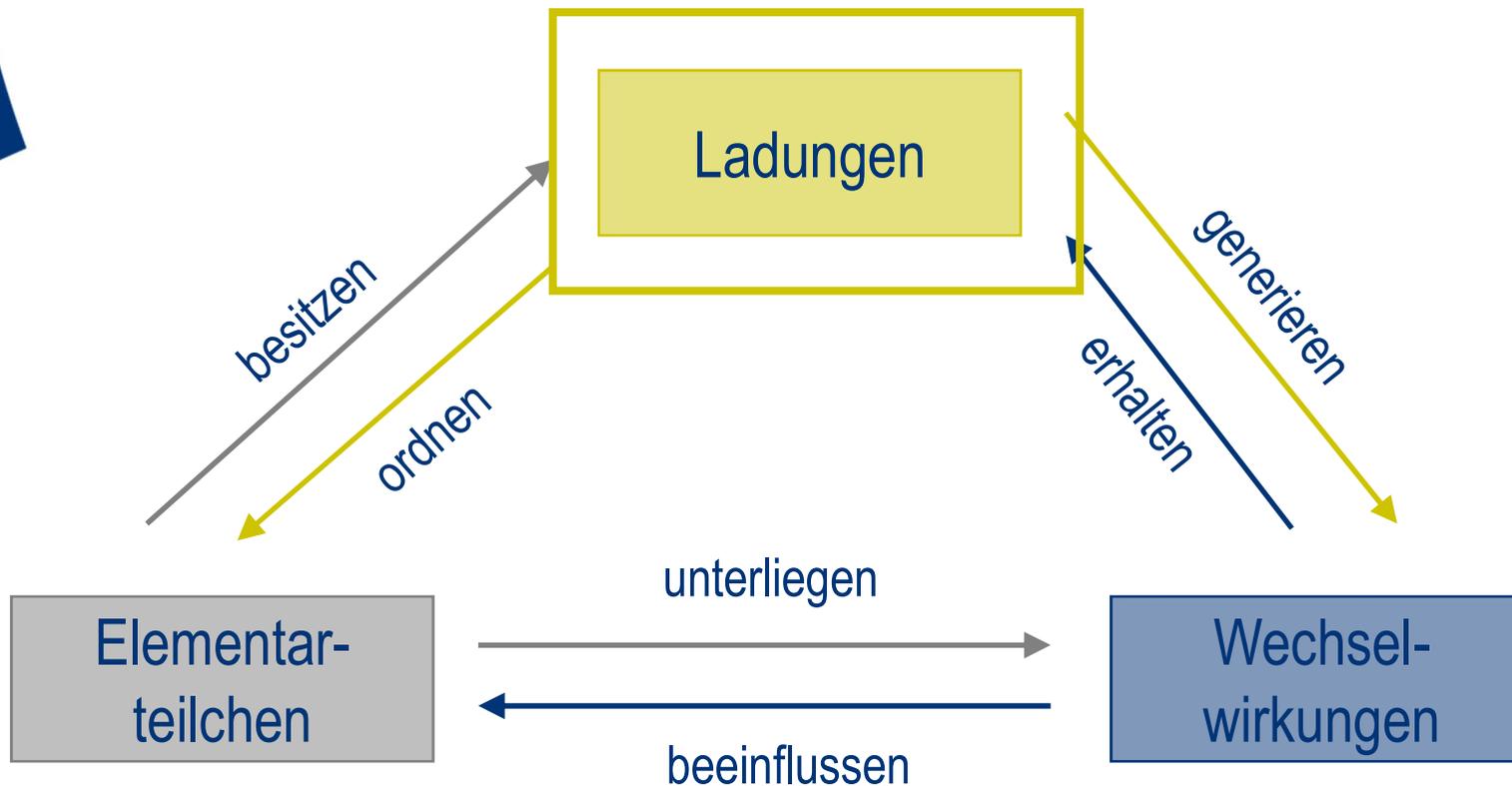
- ▶ Reichweite und Potenziale der fundamentalen WW des Standardmodells lassen sich durch die Eigenschaften der zugehörigen Botenteilchen erklären
- ▶ Elektromagn. WW: Photon
 - Ungeladen, masselos
- ▶ Schwache WW: W- und Z-Teilchen
 - Große Masse → kleine Reichweite der WW
- ▶ Starke WW: Gluonen
 - Besitzen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



Diskussion / Fragen



Die drei Basiskonzepte des Standardmodells

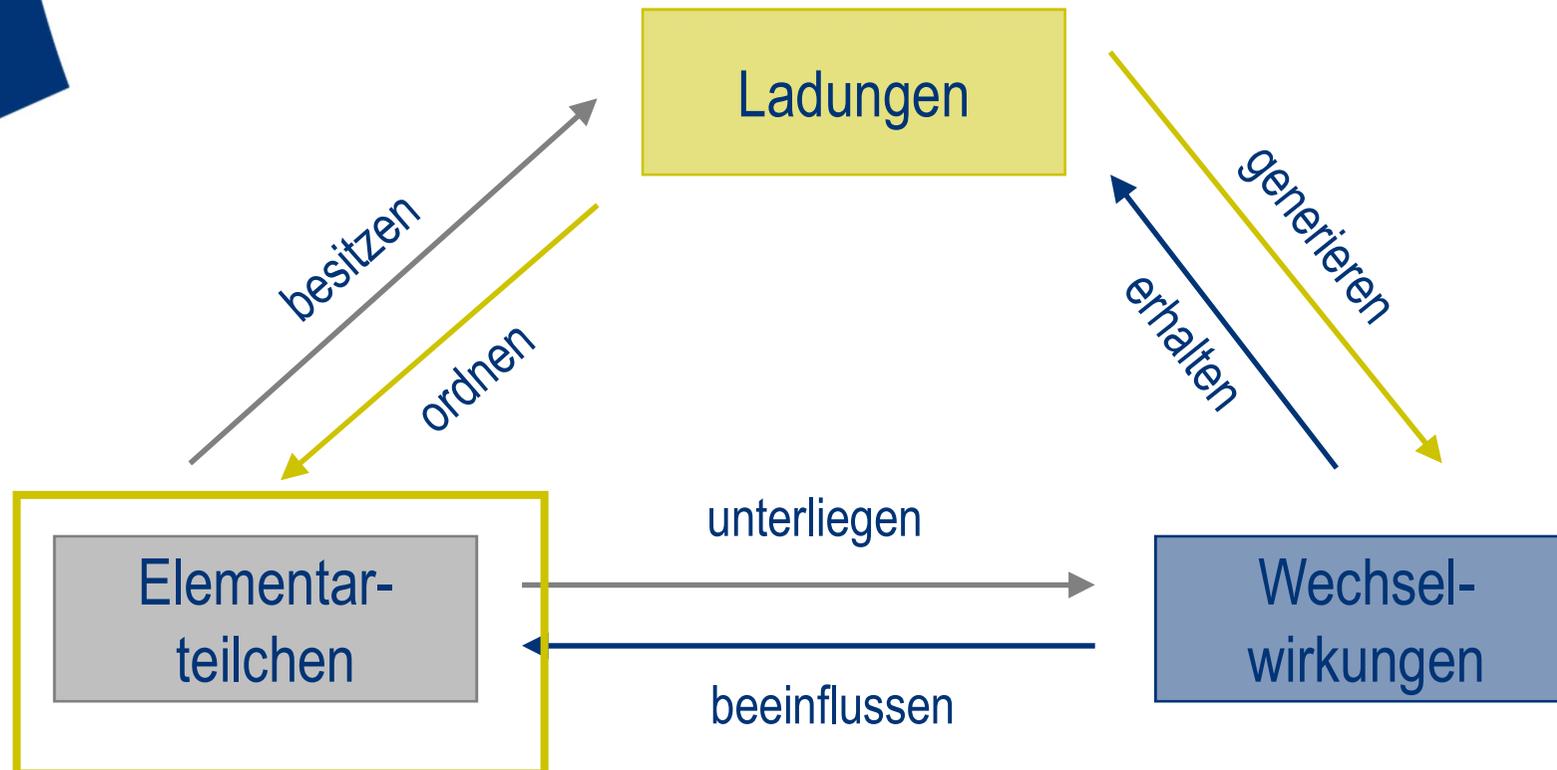




Übung: AB Botenteilchen

▶ Ziel: Lösen der Aufgaben 1-3

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells





Ordnung der Elementarteilchen

- ▶ **Materieteilchen** der uns umgebenden Materie: u, d, e^-, ν_e
- ▶ 1936: Entdeckung des Myons μ^- (Rabi: „who ordered that?“)
 - Gleiche Ladungszahlen wie das Elektron, aber ~ 200 Mal schwerer
 - Schwere „Kopie“ des Elektrons
- ▶ 1961: Nachweis des Myon-Neutrinos ν_μ
- ▶ 1961: Postulierung von Up-, Down- und Strange-Quarks
- ▶ 1964: Entdeckung des Ω^- (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 ν_τ



„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^-, ν_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	ν_e	ν_μ	ν_τ	$+\frac{1}{2}$	0	farblos $\vec{0}$
elektrisch geladene Leptonen	e^-	μ^-	τ^-	$-\frac{1}{2}$	-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 \swarrow
	d d d	s s s	b b b	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	blau \downarrow rot \nearrow grün \swarrow
	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:

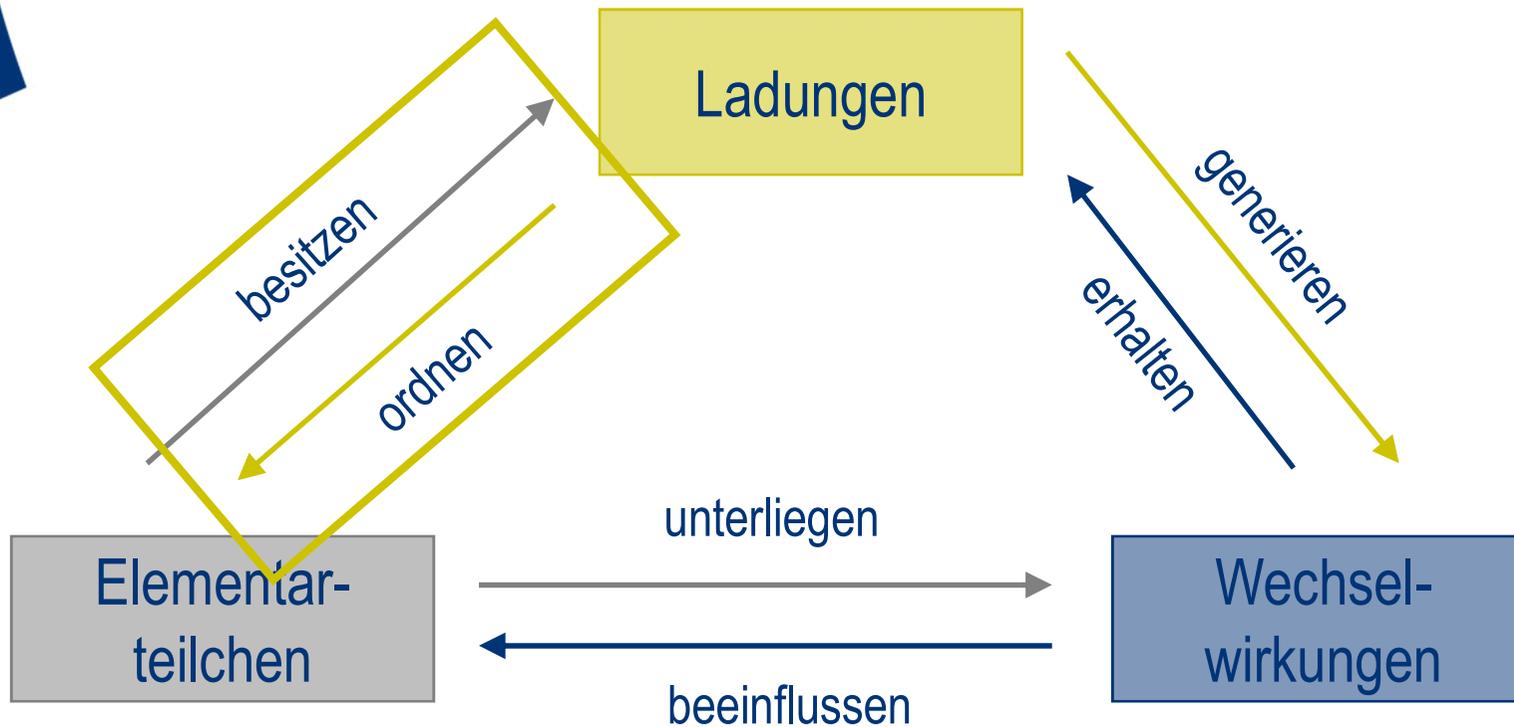
- Alkali:** Light blue
- Alkalische Erden:** Yellow
- Übergangsmetalle:** Green
- Metalloide:** Purple
- Halogene:** Red
- Edelgas:** Pink

 The legend also includes:

- Metalle:** Light blue
- Metalloide:** Purple
- Halogene:** Red
- Edelgas:** Pink
- Übergangsmetalle:** Green
- Alkali:** Light blue
- Alkalische Erden:** Yellow



Die drei Basiskonzepte des Standardmodells

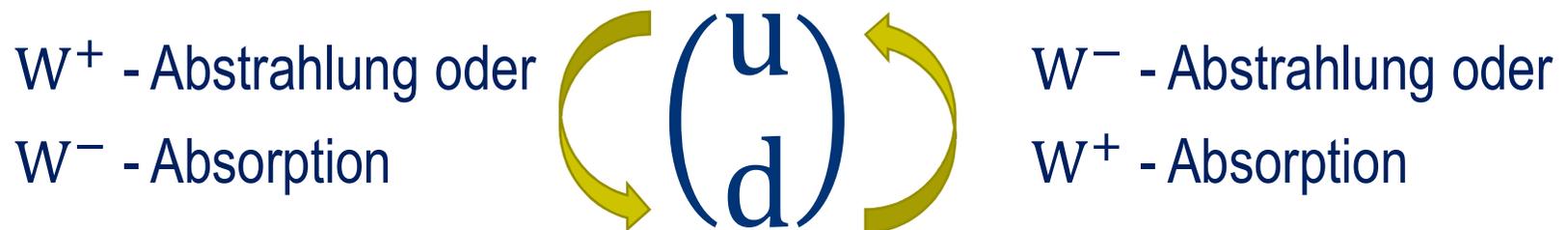


Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► 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

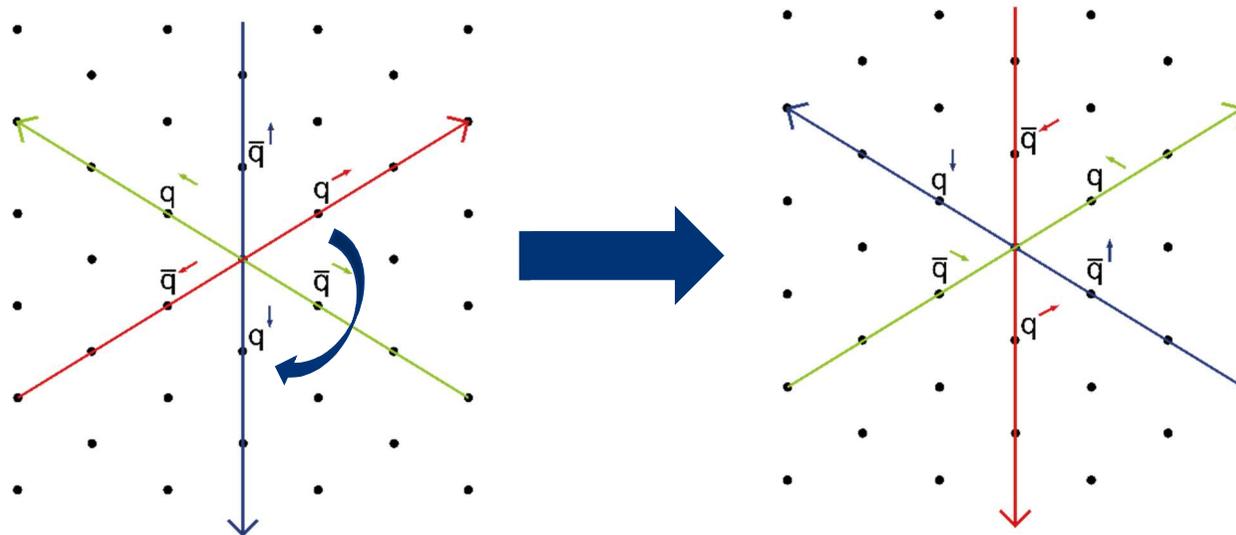
▶ Starke Wechselwirkung

- 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

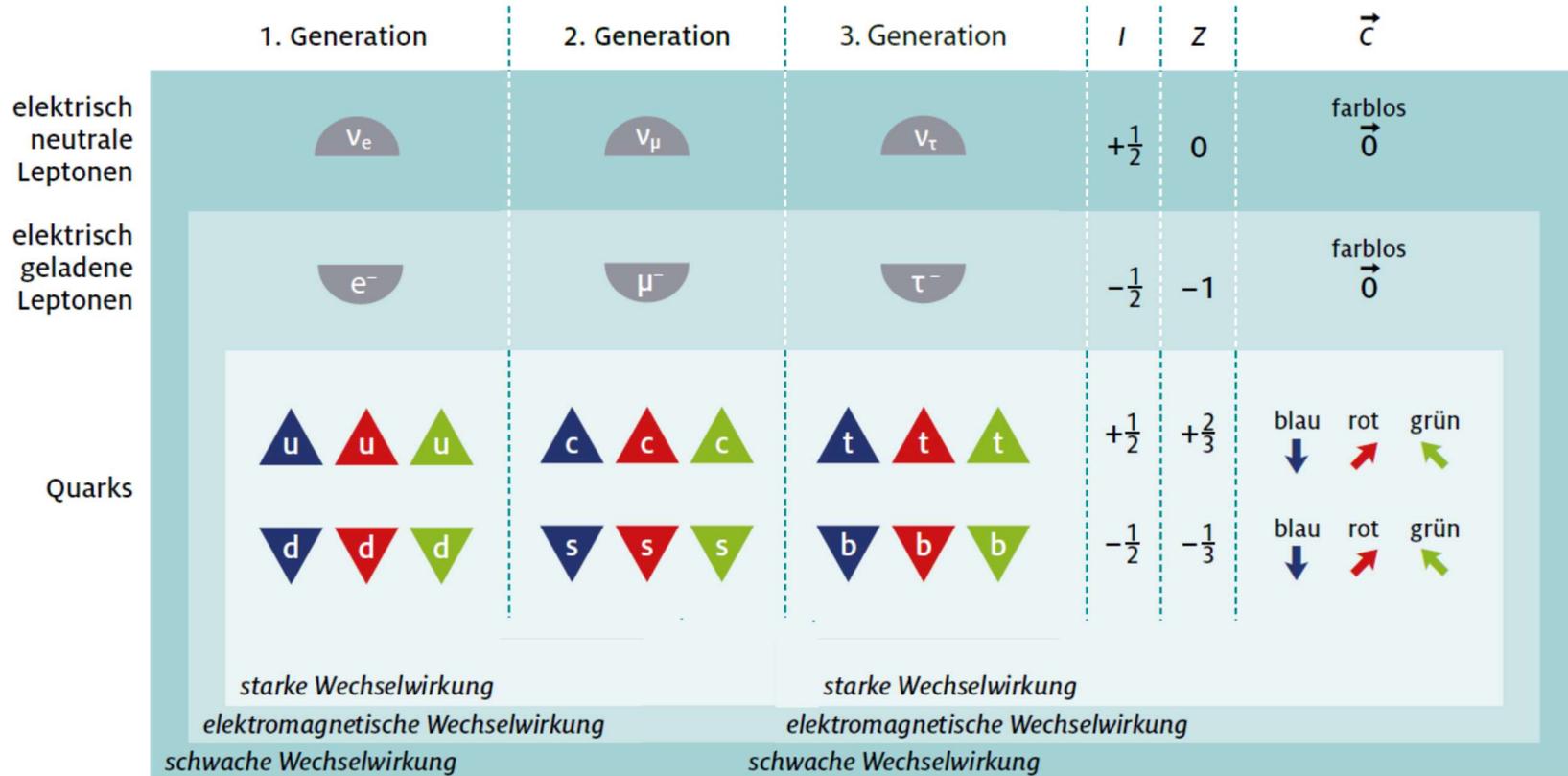


Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

▶ Elektromagnetische Wechselwirkung

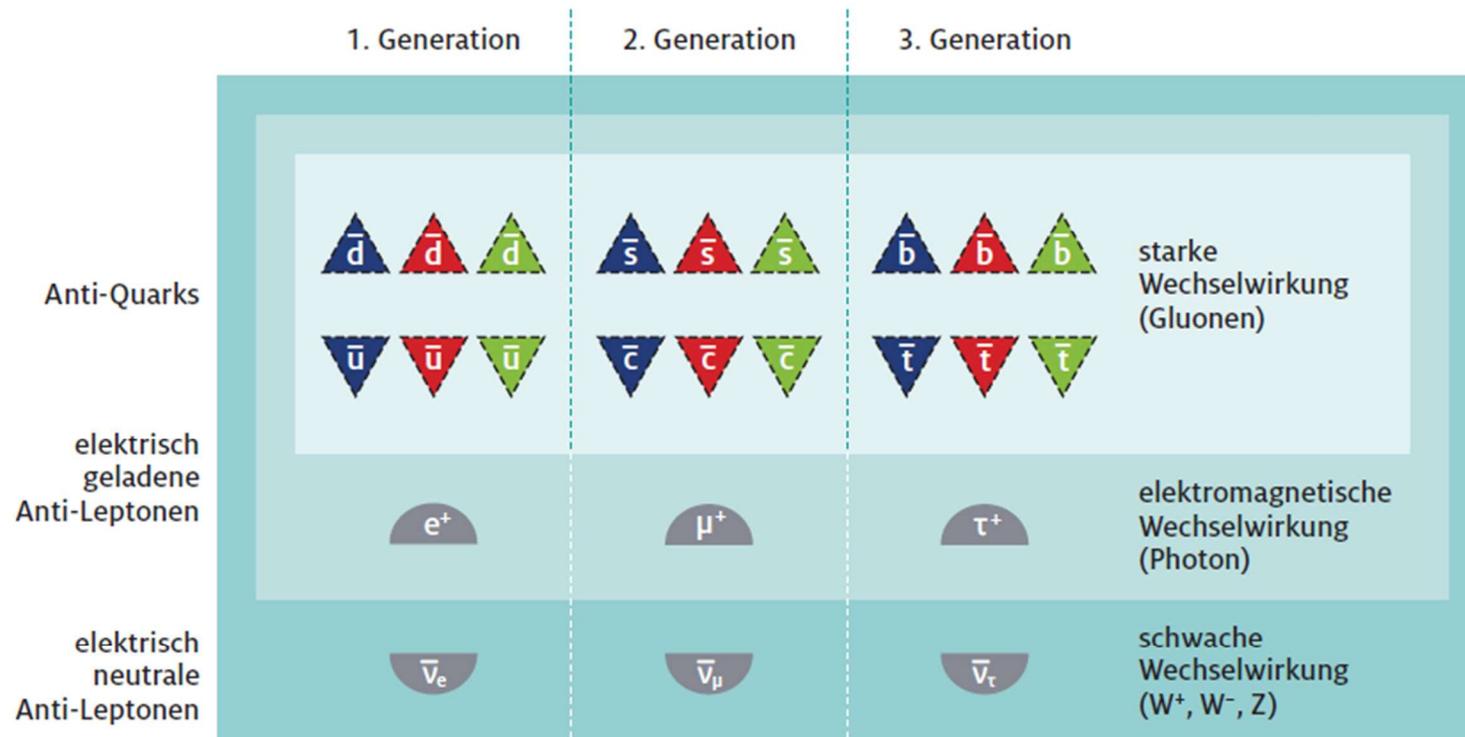
- Photonen besitzen keine Ladungen: durch elektromagnetische Wechselwirkung können die Ladungen eines Teilchens nicht geändert werden
- Alle Teilchen sind **Singulett**s bezüglich der elektrischen Ladung

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

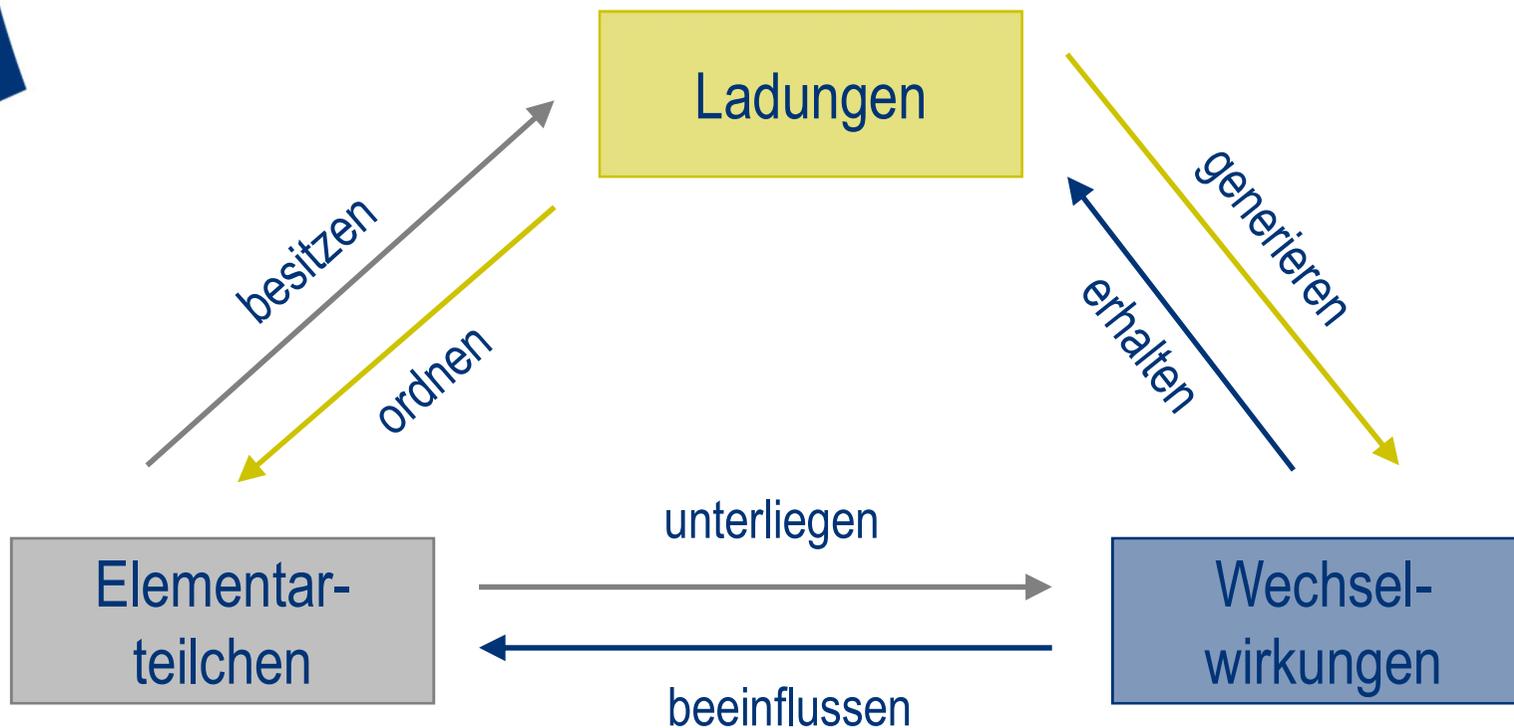




Zusammenfassung: Multipletts

- ▶ 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

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



www.facebook.de/teilchenwelt/



Instagram



NETZWERK
TEILCHENWELT