

Das Standardmodell der Teilchenphysik im Schulunterricht

Fachvortrag



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Prof. Michael Kobel, Philipp Lindenau
Meißen | 29. – 30.11.2017



NETZWERK
TEILCHENWELT



**FOLGENDE BÄNDE
SIND VERFÜGBAR:**

- Mikrokurse
- Kosmische Strahlung
- Forschungsmethoden
- Wechselwirkungen
und Teilchen

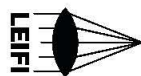


**KOSTENFREI
ERHÄLTlich!**

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@leifiphysik.de angefordert oder unter www.leifiphysik.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
- ▶ Aufgabenblätter bald online
 - Werden hier teilweise eingesetzt

Was ist Physik?



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





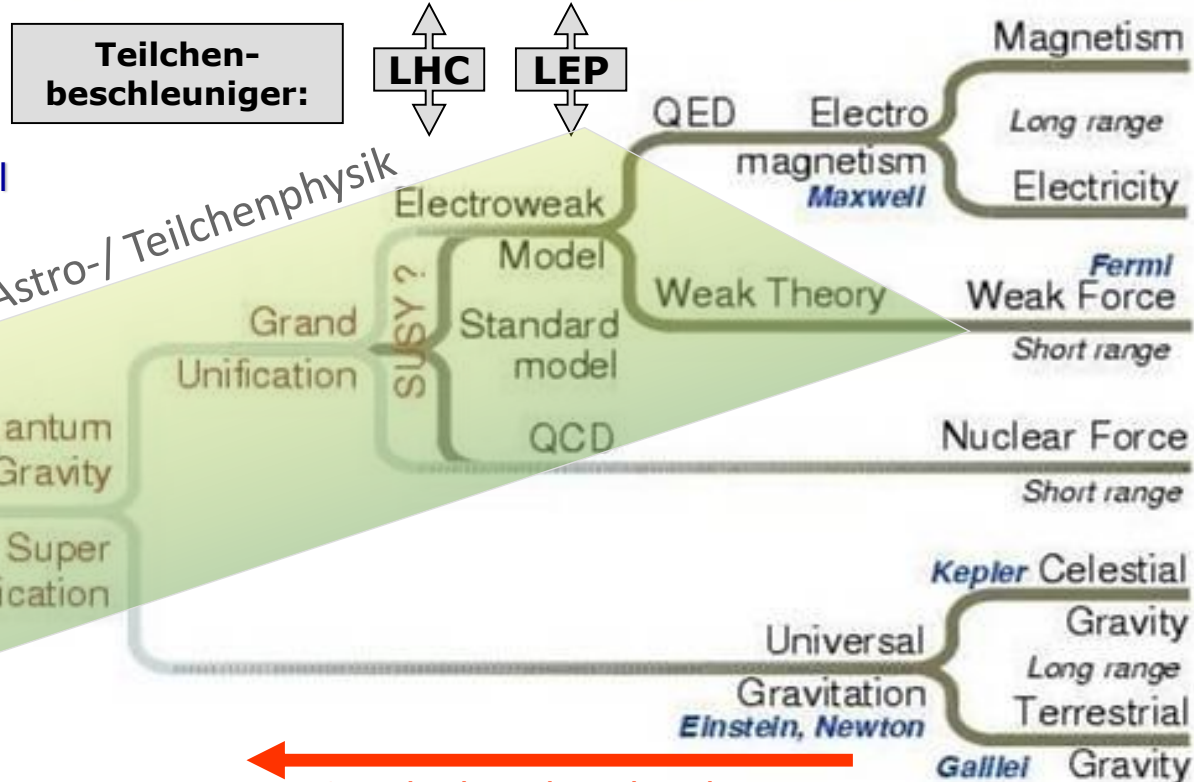
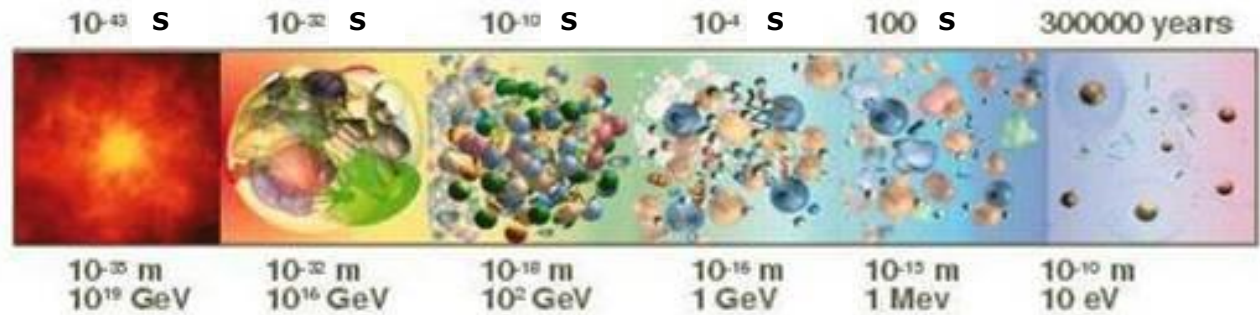
Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

- ▶ **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

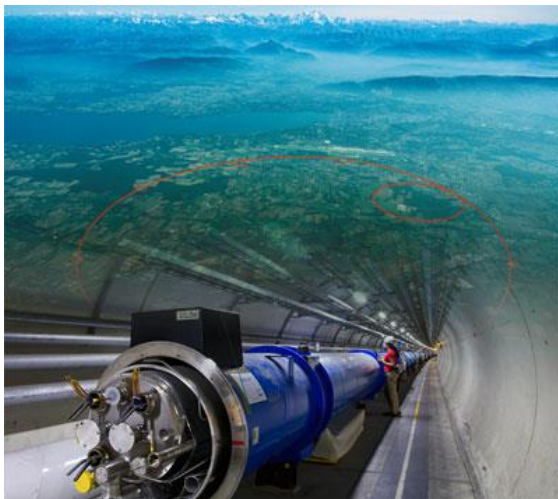
Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“

- LHC:**

Nachstellen der Prozesse zwischen Elementarteilchen 10^{-12} s nach dem Urknall



Geschichte der Physik
Zurück zum Urknall



Vereinheitlichungen

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

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



**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**

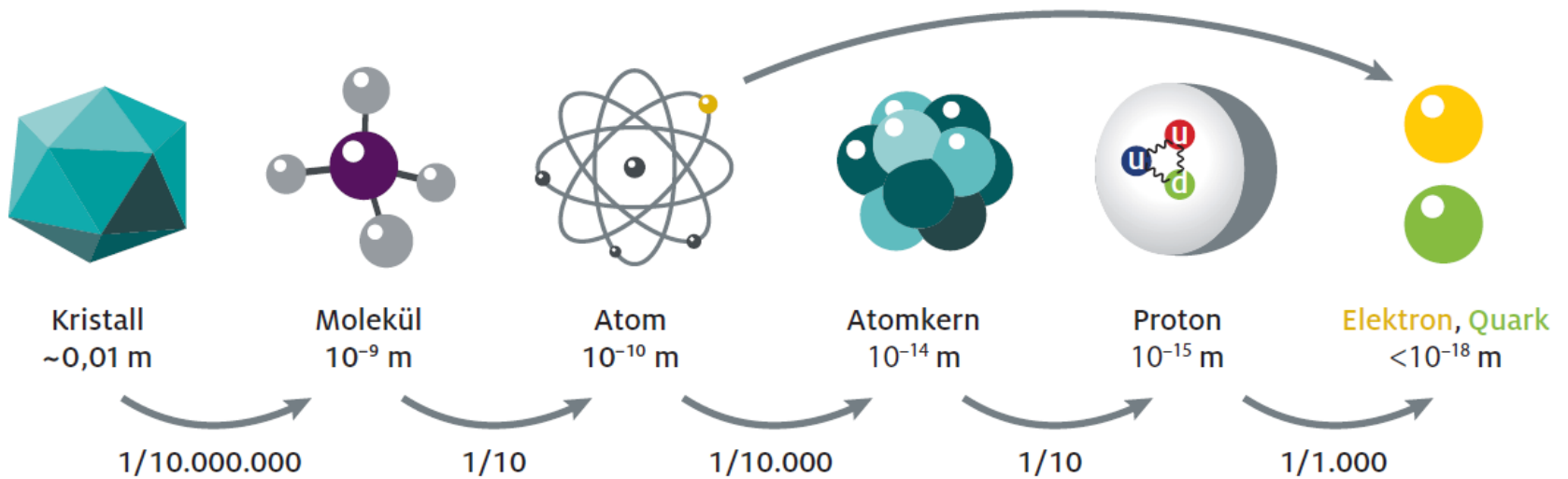


Das Standardmodell der Teilchenphysik

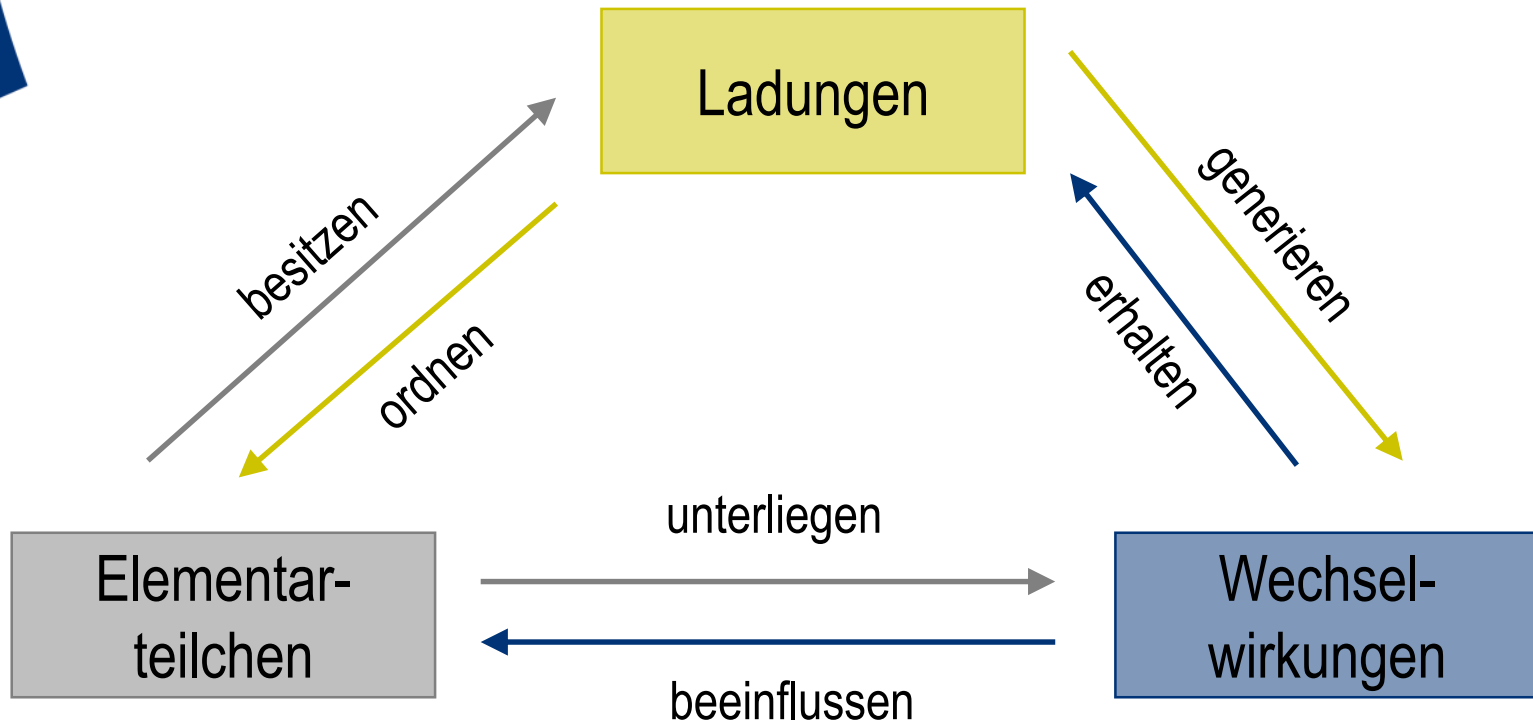
► Das Standardmodell

- 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

Einschub: Größenordnungen



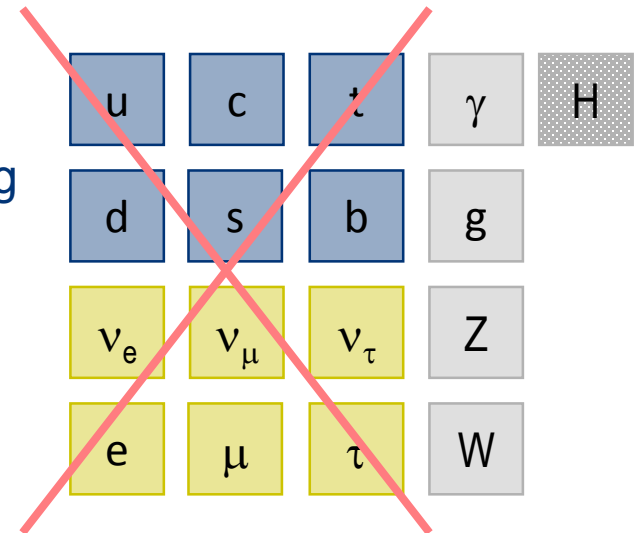
Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



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
 - 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!)

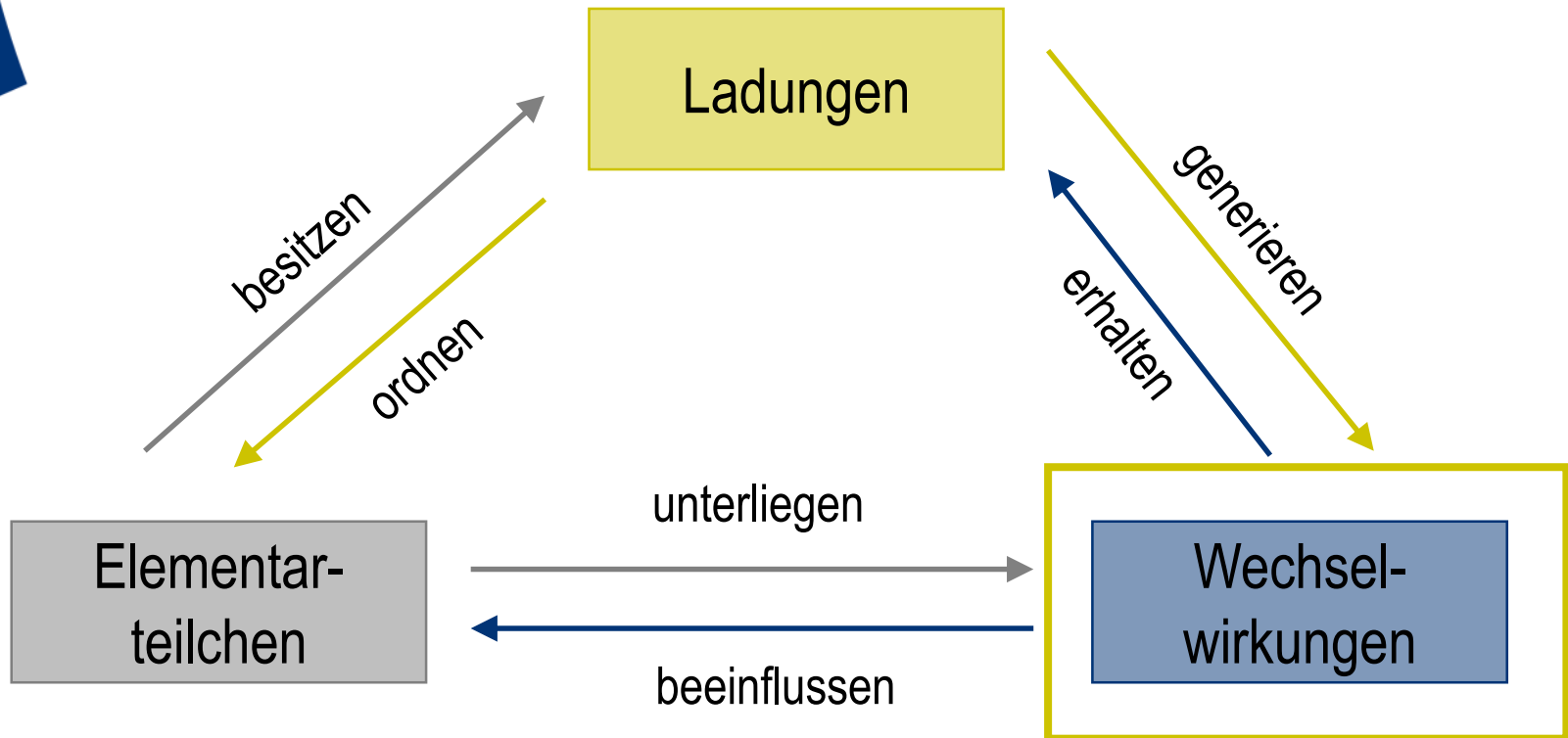


Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ▶ Grundlage: Konsequenzen fundamentaler Symmetrien (lokale Eichsymmetrien)
 - Ladungen und Wechselwirkungen
 - Nicht: Liste der existierenden Teilchen
 - Sondern: Regeln, die beschreiben, wie diese wechselwirken

u	c	t	γ	H
d	s	b	g	
ν_e	ν_μ	ν_τ	Z	
e	μ	τ	W	

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. β -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,
...



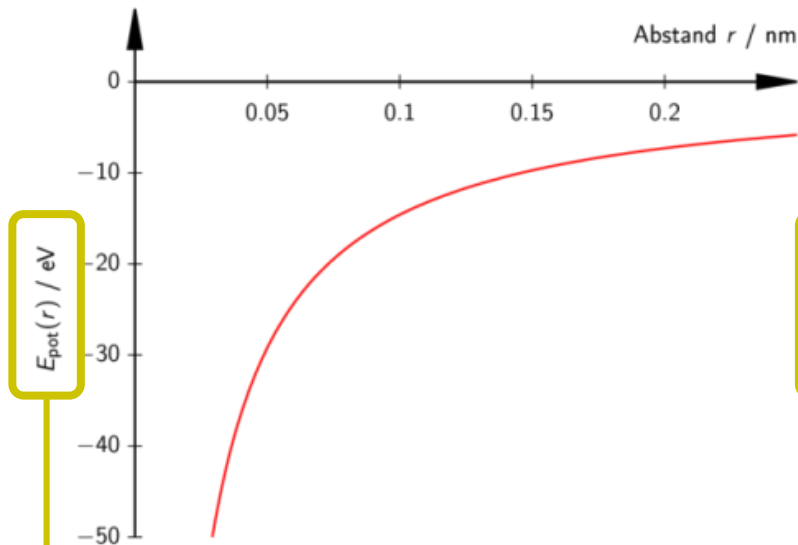
**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**



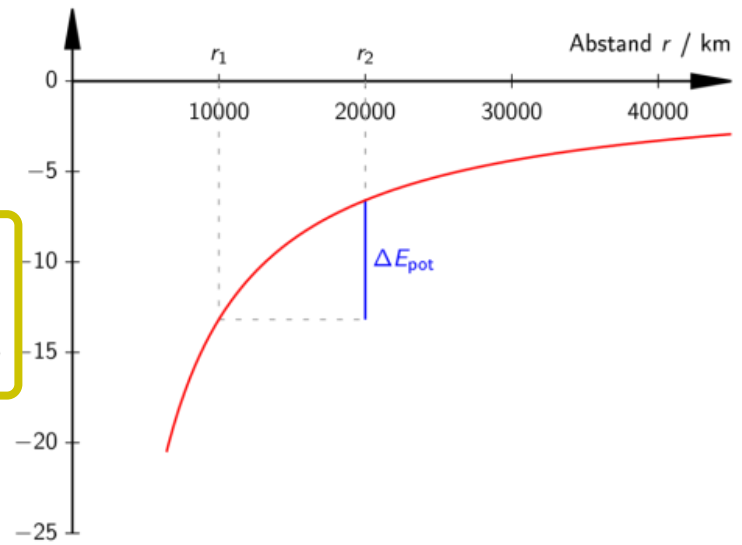
**Standardmodell
(ohne Gravitation)**

Ausgangspunkt: Zwei Bekannte Wechselwirkungen

► Elektromagnetische Wechselwirkung



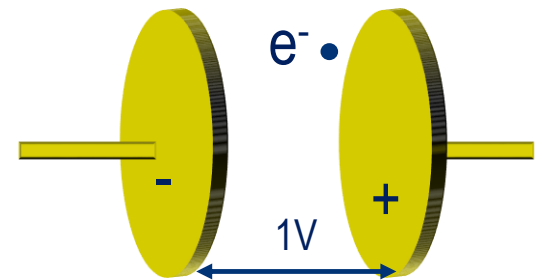
► Gravitation (O_2 und Erde)



eV als Einheit

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 $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$





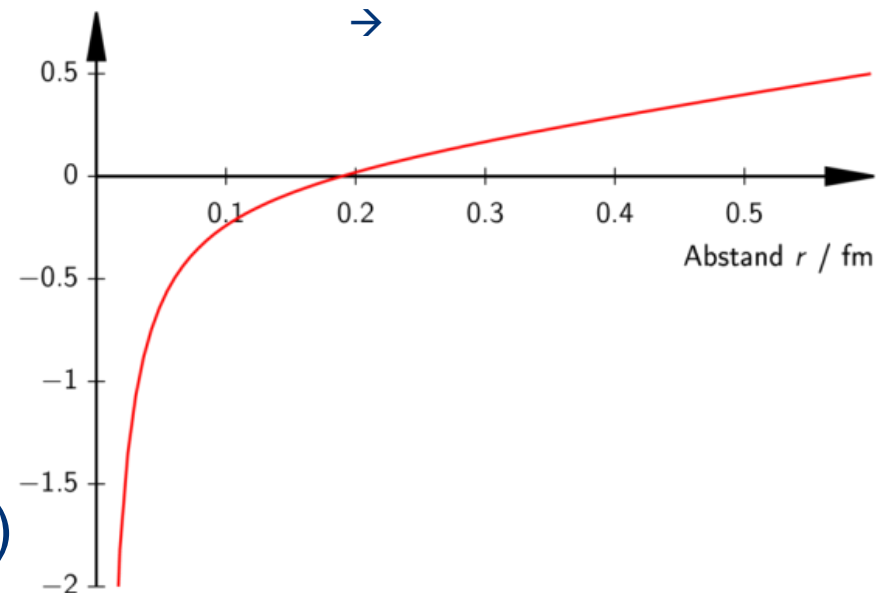
Die Starke Wechselwirkung

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

- ▶ **Substruktur:**
Nukleonen bestehen aus Quarks, die „neue“ starke Wechselwirkung spüren.
Kernkraft geht auf diese Substruktur zurück
(Ähnlich Molekül \leftrightarrow Atom)

Potenzielle Energie
als Funktion des Abstands
zweier Quarks

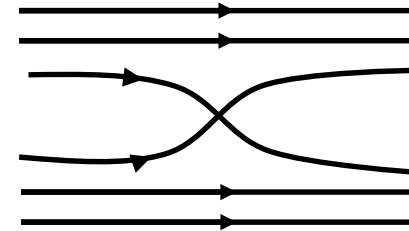
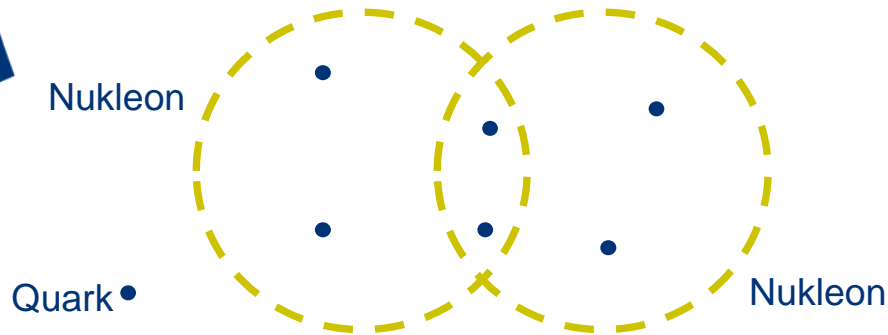
Abstand der Protonen
zueinander ist $r \sim 1$ fm



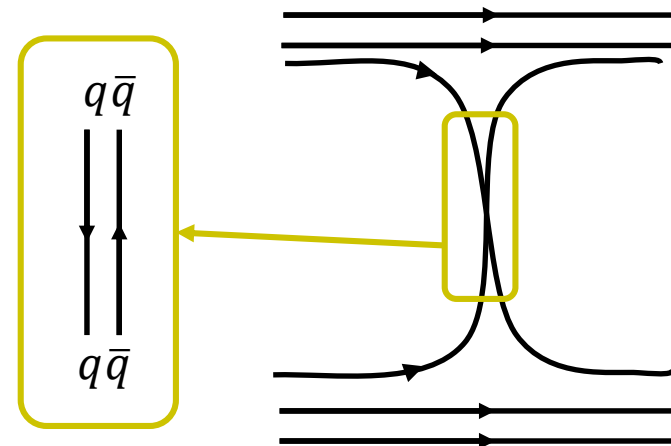
Bindung von Nukleonen

► Zusammenhalt von Nukleonen analog zur Elektronenpaarbindung bei Atomen

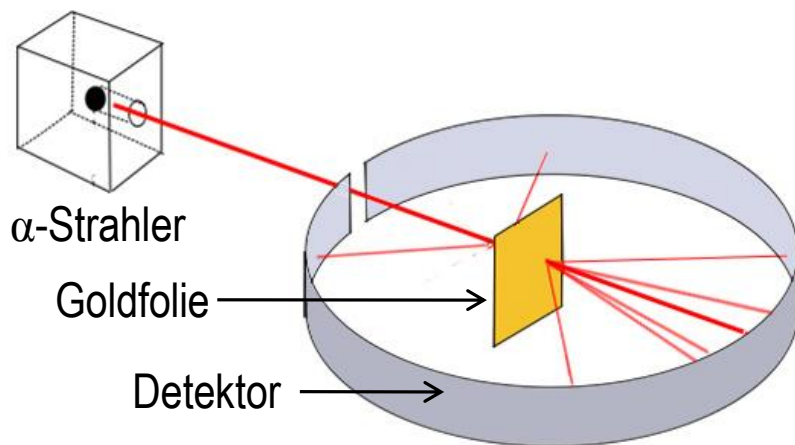
- Kurze Abstände: Nukleonen im Kern „teilen“ sich kurzzeitig ein Quark-Paar



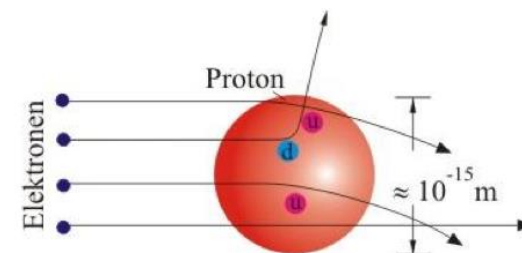
- Größere Abstände: Austausch von „Pionen“ (geb. $q\bar{q}$ Zustände)



Einschub: 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

Mehr zu Forschungsmethoden gibt es morgen ;-)



Die Schwache Wechselwirkung

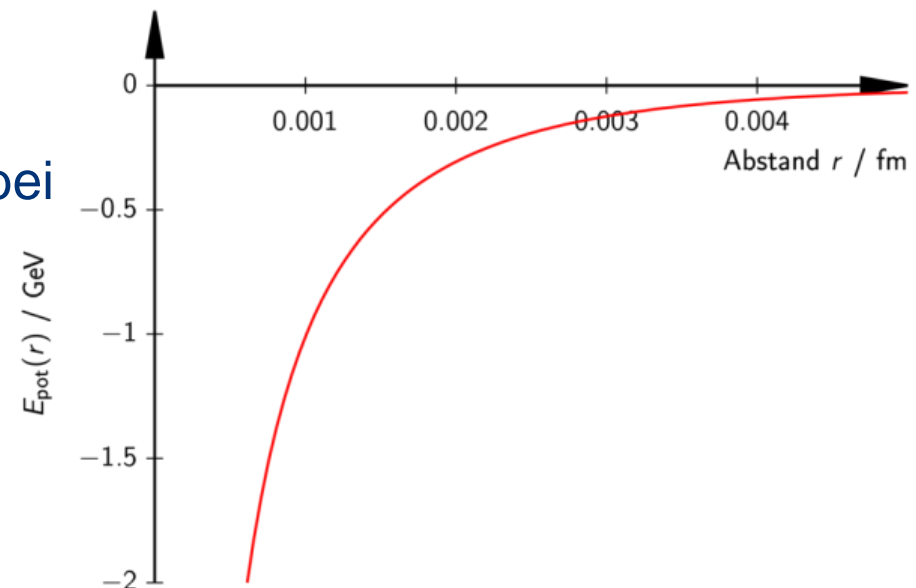
► Warum scheint die Sonne?

- 4 Protonen fusionieren zu ${}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$
- Wie „verwandelt“ sich ein Proton in ein Neutron?

► Einführung:

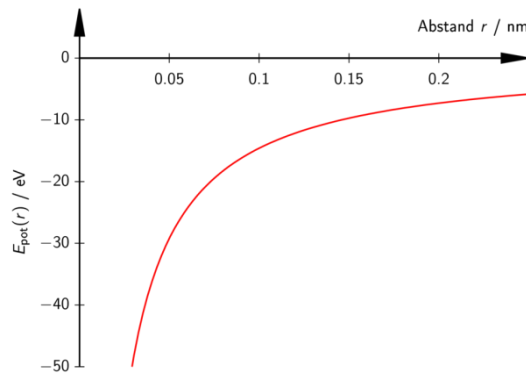
schwache Wechselwirkung
(z.B. Quarks der Nukleonen bei
 $r \sim 0.001$ fm)

- z.B. β^+ -Umwandlung
 $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$

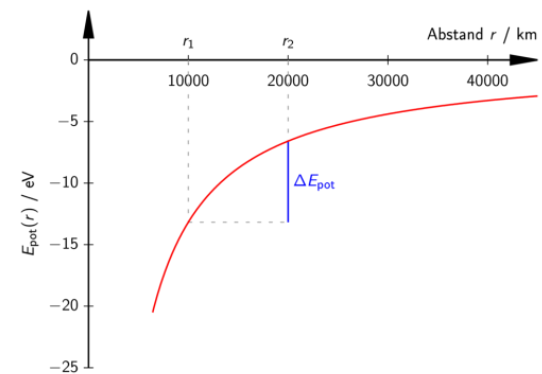


Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

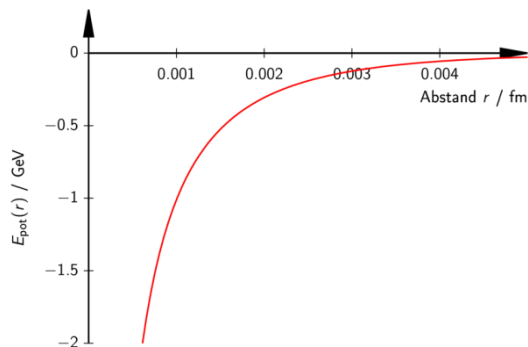
► Elektromagnetische WW



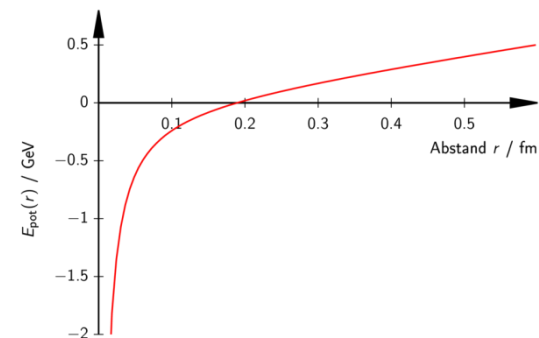
► Gravitation



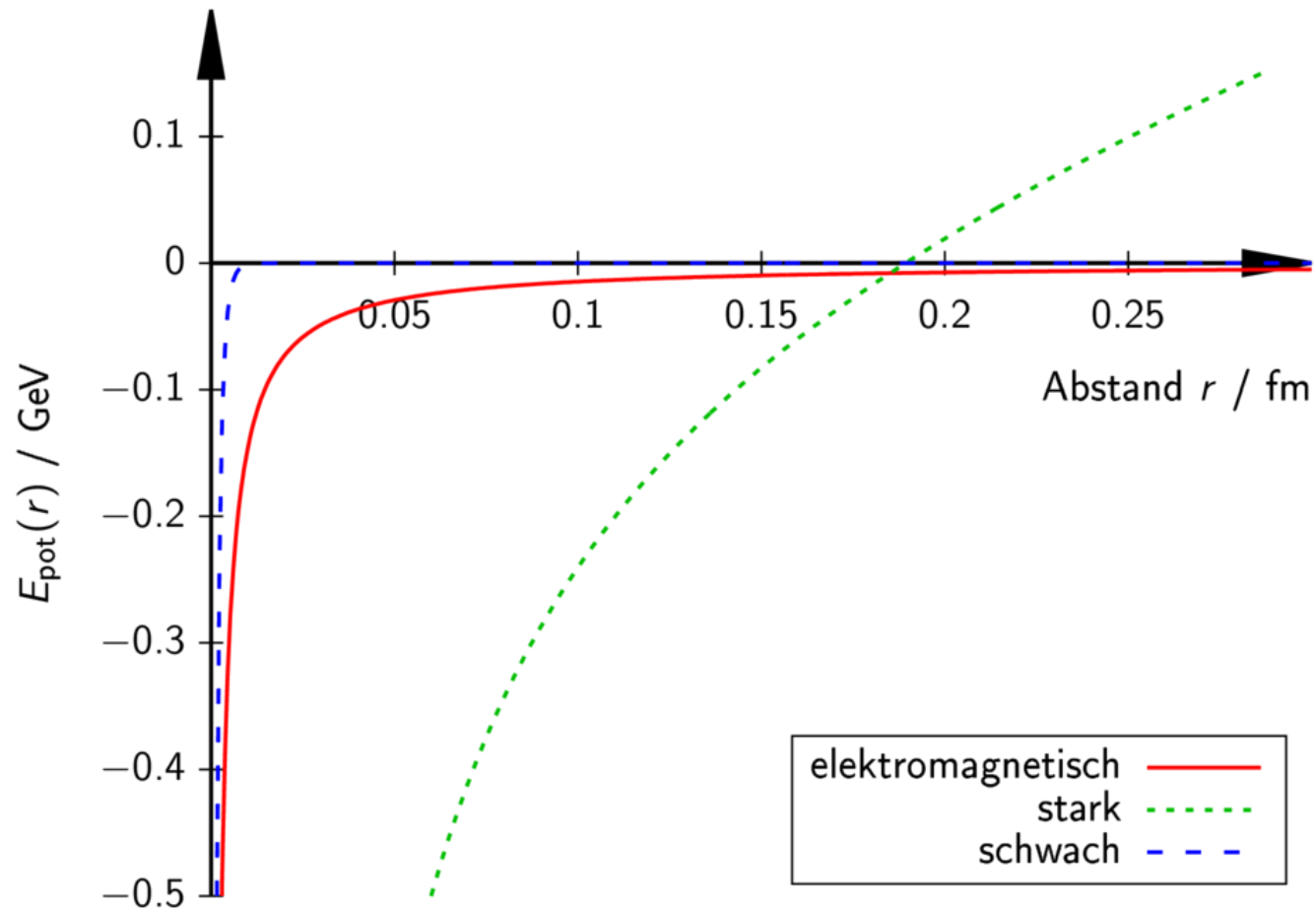
► Schwache WW



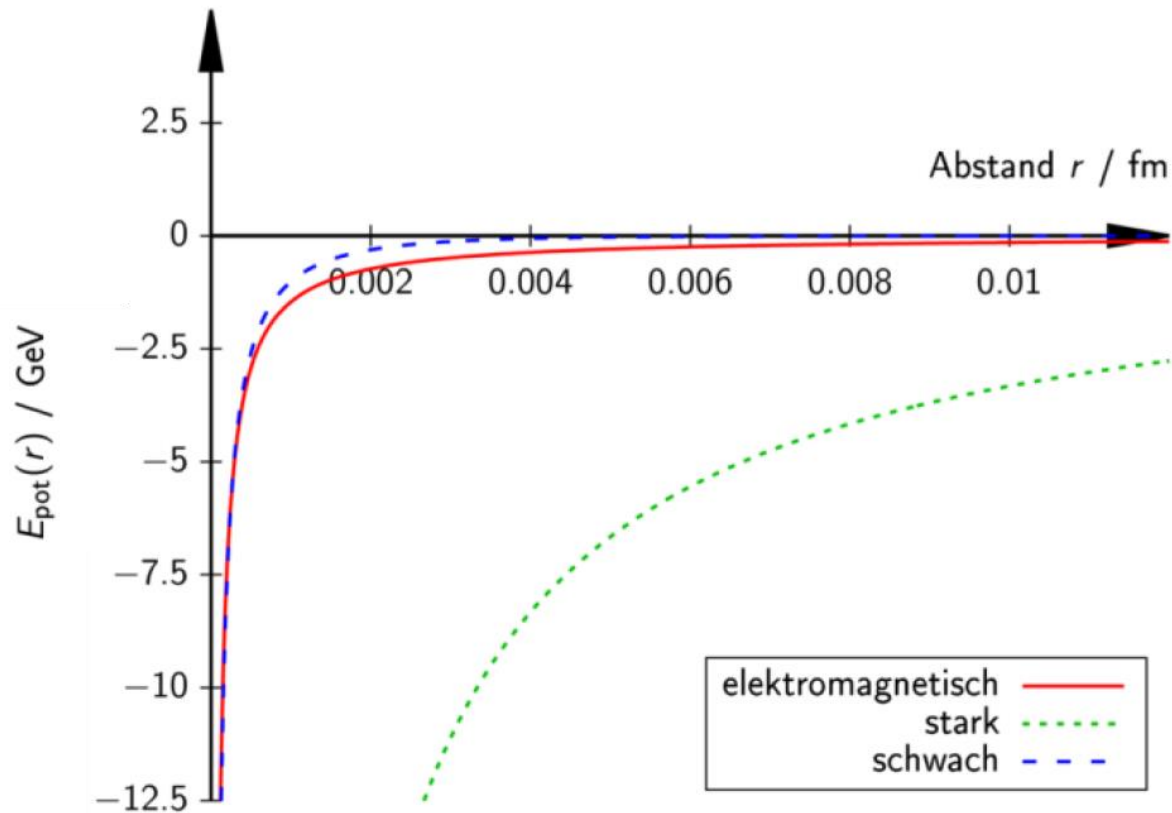
► Starke WW



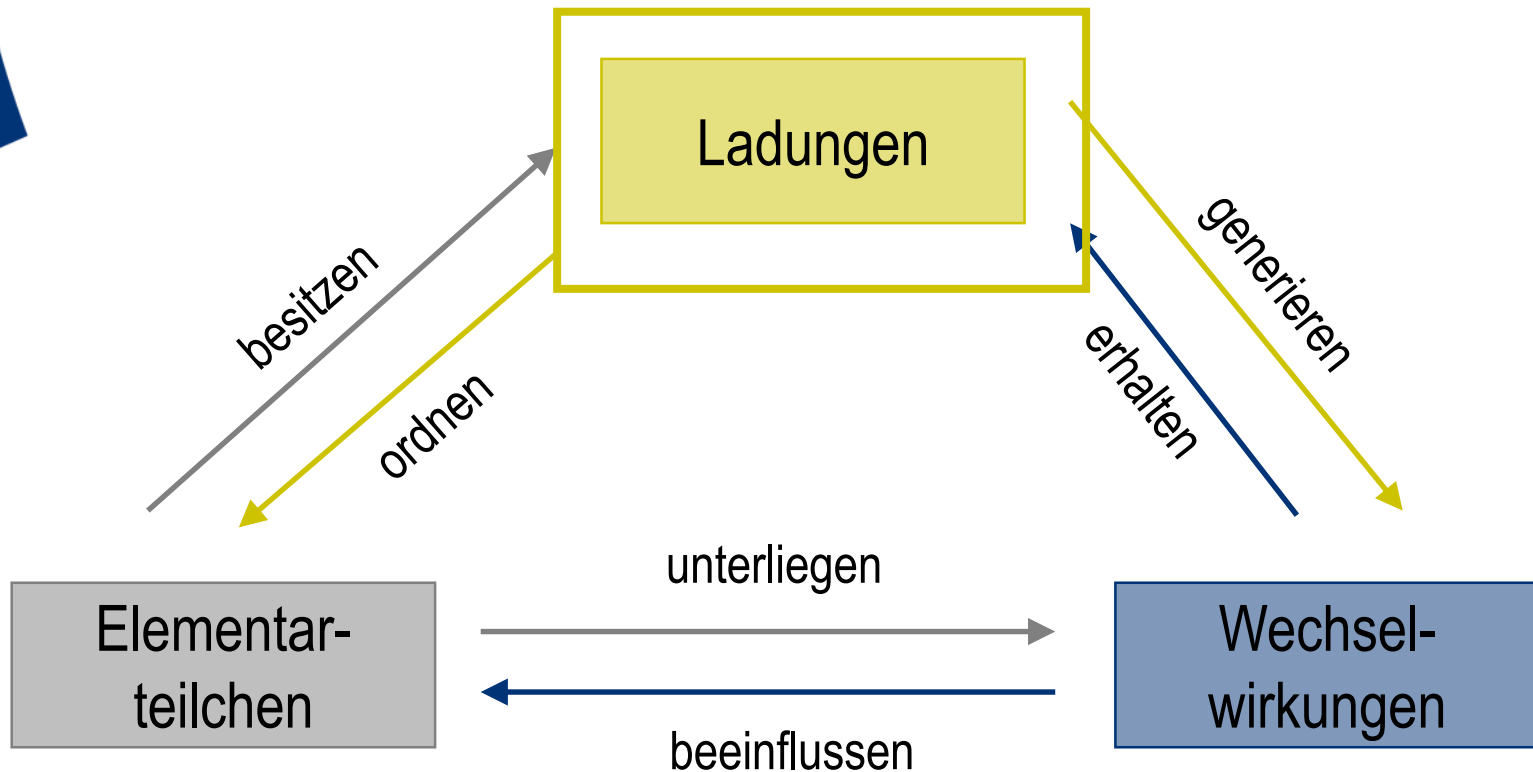
Vergleich der potenziellen Energien



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



Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



Basiskonzept der Ladung

- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft

- ▶ Bekannt:

- Elektrische Ladung

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische
Ladungszahl

Elementarladung

Konzept der Ladung

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)

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

■ $\alpha_w, \alpha_S, \alpha_{grav}$

Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ **Einführung:** eines Kopplungsparameters α auch für andere Wechselwirkungen
 - $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$

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

Konzept der Ladung

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)

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

■ $\alpha_w, \alpha_S, \alpha_{grav}$

► **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine **Ladung**

■ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft

Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
 - ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren als 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
- ▶ 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: $\frac{\alpha_{em}^{p,e}}{\alpha_{grav}^{p,e}} \approx 2 \cdot 10^{39}$



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



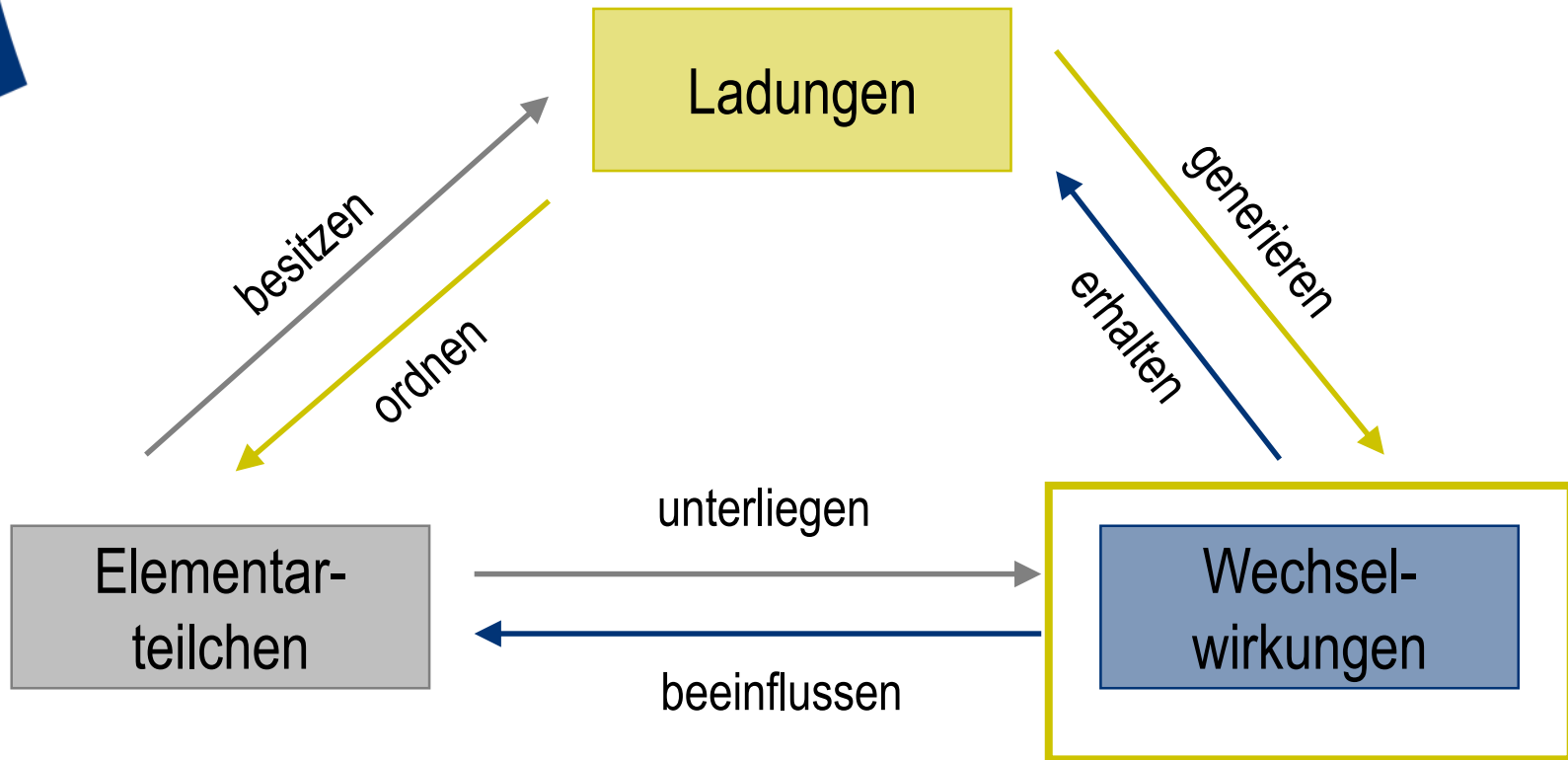
Konzept der Ladung

- ▶ 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

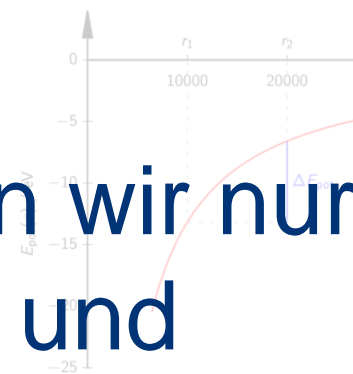
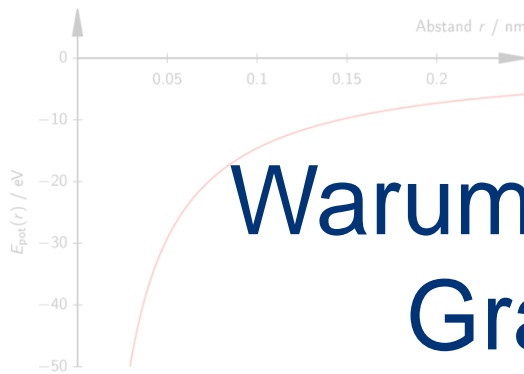
Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW

► Gravitation

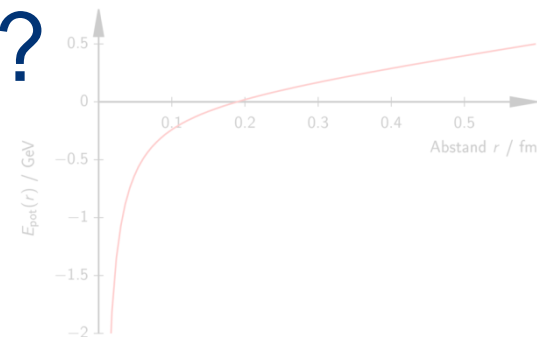
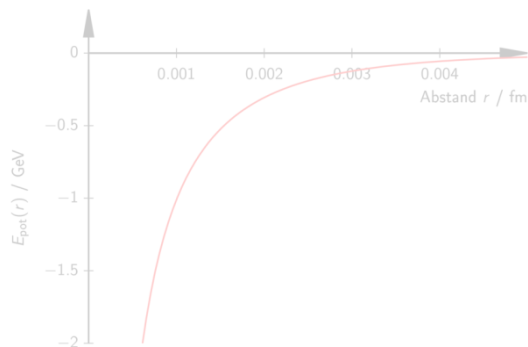


Warum erfahren wir nur
Gravitation und

► Schwache WW

Elektromagnetismus

im Alltag?



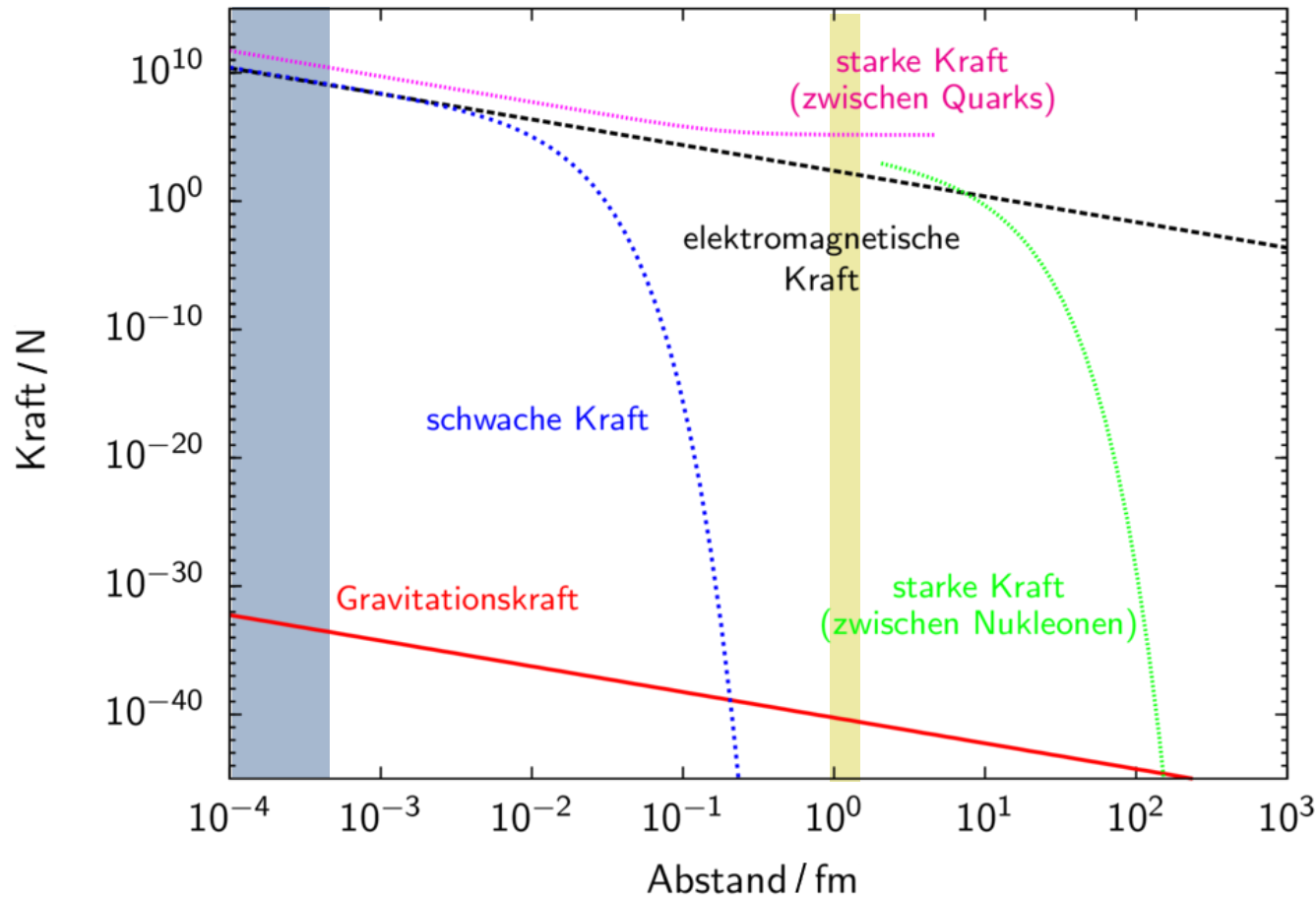
Kräfte der Wechselwirkungen

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

Grenze exper. Auflösung

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*)

*Darüber spekulieren wir später nochmal ;-)

Stärke der Wechselwirkungen

- Einführung: eines Kopplungsparameters α auch für Wechselwirkungen



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

Warum erfahren wir nur

Gravitation und

Elektromagnetismus

im Alltag?

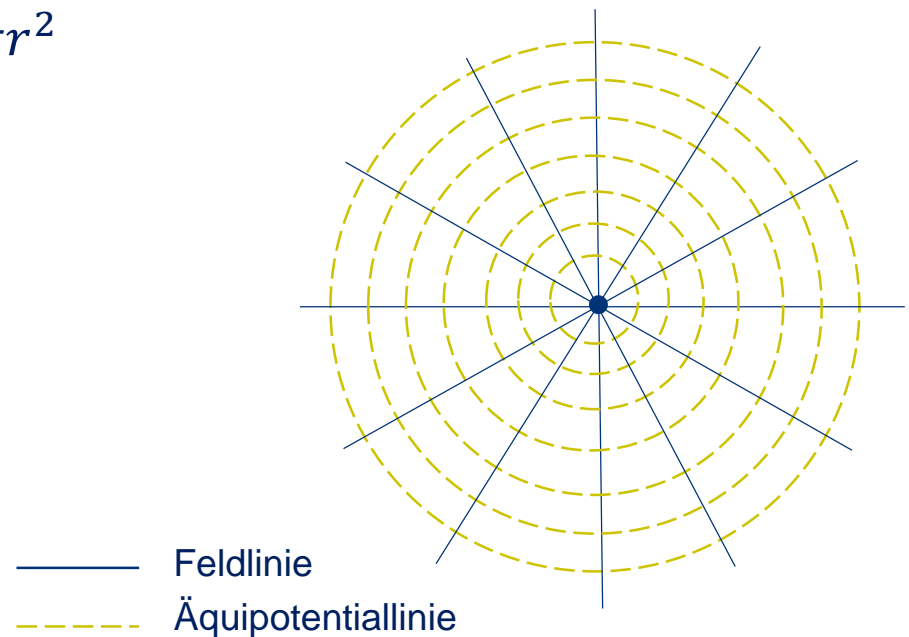
Wechselwirkung	Kopplungsparameter
Gravitation	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

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	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_w}}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{m}$

Ausgangspunkt: Geometrische Betrachtung

- ▶ Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW
- ▶ **Dichte** der Feldlinien ist **proportional** zur **Stärke** der Kraft
 - Idee Ladung im Zentrum
 - Kugeloberfläche $A = 4\pi r^2$
 - $F \sim \frac{1}{4\pi r^2}$
- ▶ Stimmt bei
 - $F_C = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$



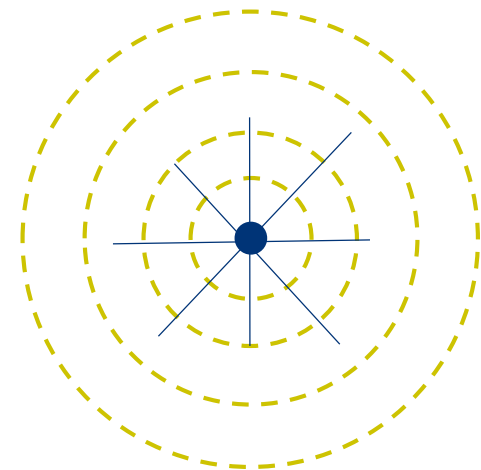
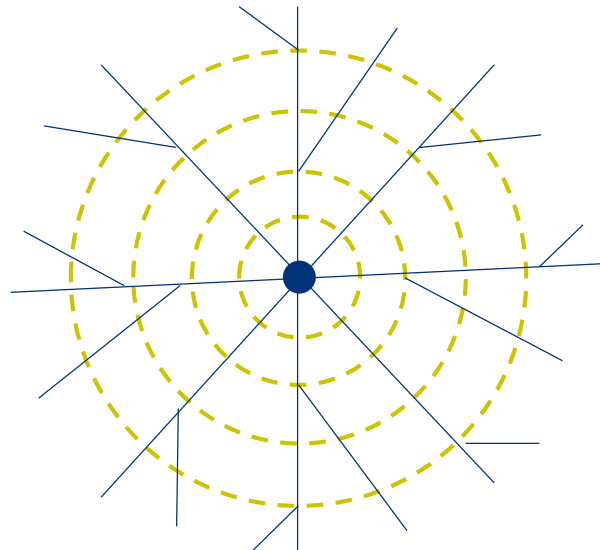
Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

► Stark

- Kraft linear \rightarrow
Feldliniendichte wird konstant
- Feldlinien entstehen spontan

► Schwach

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

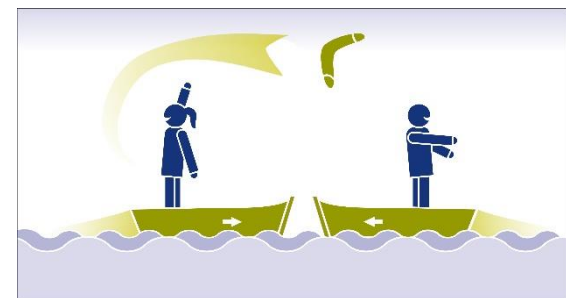
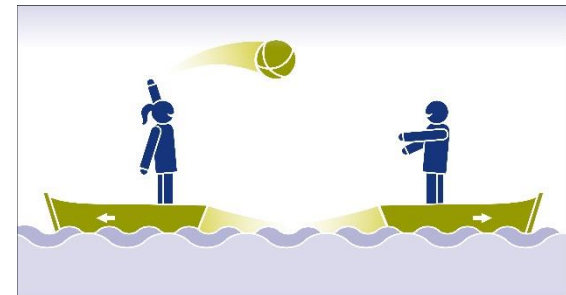


Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

- ▶ **Einführung:** Wechselwirkungen werden von Botenteilchen übermittelt

- ▶ Bekannt ist:

- Energie E und Impuls \vec{p} **vorher**
- Energie E und Impuls \vec{p} **nachher**
- Energiedifferenz ΔE und Impulsdifferenz $\Delta \vec{p}$ wird durch Botenteilchen übertragen

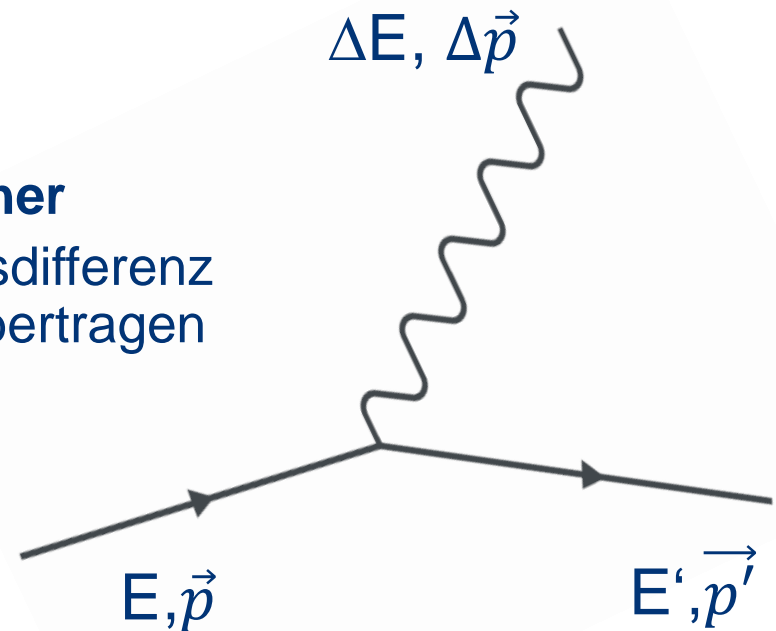


Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

► **Einführung:** Wechselwirkungen werden von Botenteilchen übermittelt

► Bekannt ist:

- Energie E und Impuls \vec{p} **vorher**
- Energie E' und Impuls \vec{p}' **nachher**
- Energiedifferenz ΔE und Impulsdifferenz $\Delta\vec{p}$ wird durch Botenteilchen übertragen



Ausgangspunkt: Elektromagnetische Wechselwirkung

▶ Botenteilchen (Photon) ist

- masselos
- ungeladen

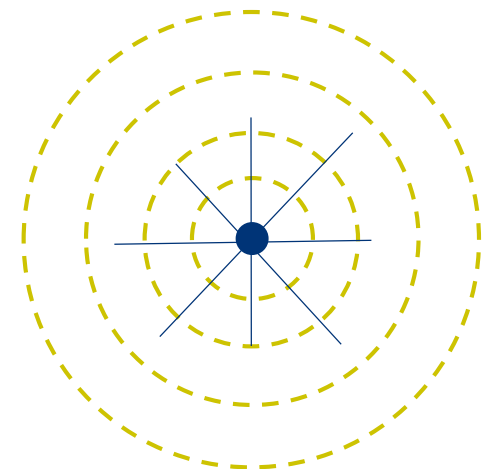
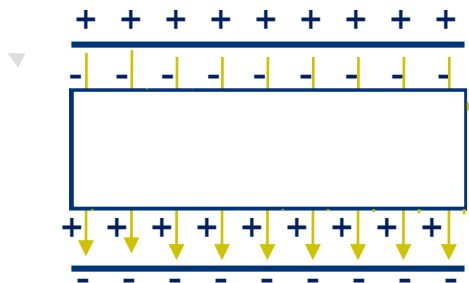
▶ Vergleich schwach: $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_{\text{W}} \frac{I_1 I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_{\text{W}}}}$

▶ Grund: Massereiche Botenteilchen (W- und Z-Teilchen) verursachen kurze Reichweite

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

Schwache Wechselwirkung

- ▶ Klassisches Analogon: Abschirmung von Feldlinien
 - Abschirmung von (unendlichen) Feldlinien durch entgegengesetzte Feldlinien
 - Brout-Englert-Higgs Feld schirmt schwache Ladungen ab



Ausgangspunkt: Elektromagnetische Wechselwirkung

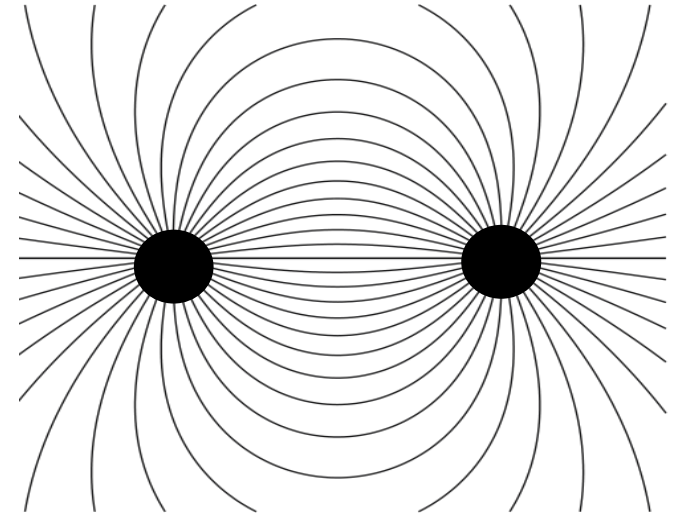
▶ Botenteilchen (Photon) ist

- masselos
- ungeladen

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

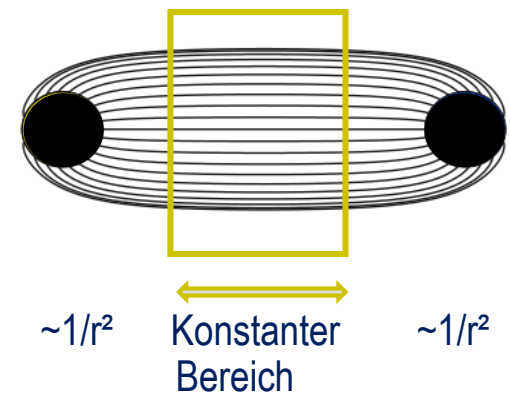
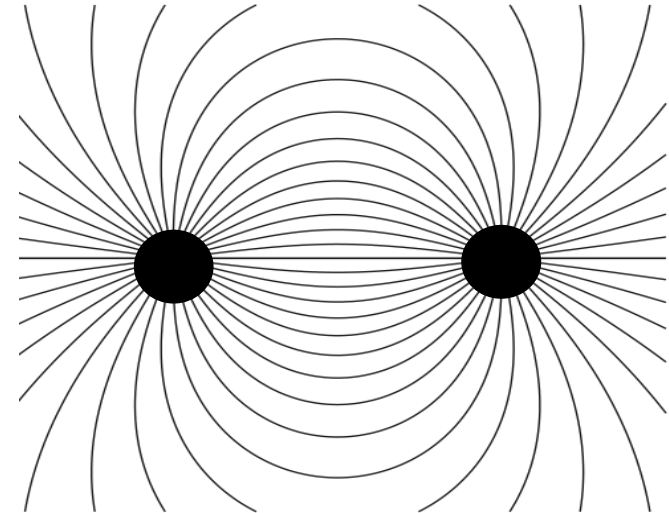
▶ Vergleich: Stark $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{c}_1 \vec{c}_2}{r} + kr$

▶ Grund: die Botenteilchen besitzen selbst starke Ladung



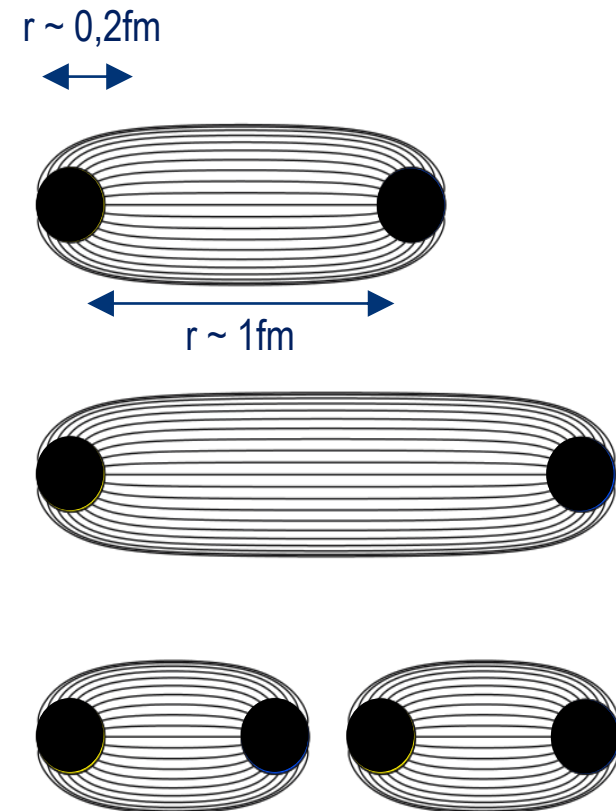
Starke Wechselwirkung

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



Starke Wechselwirkung

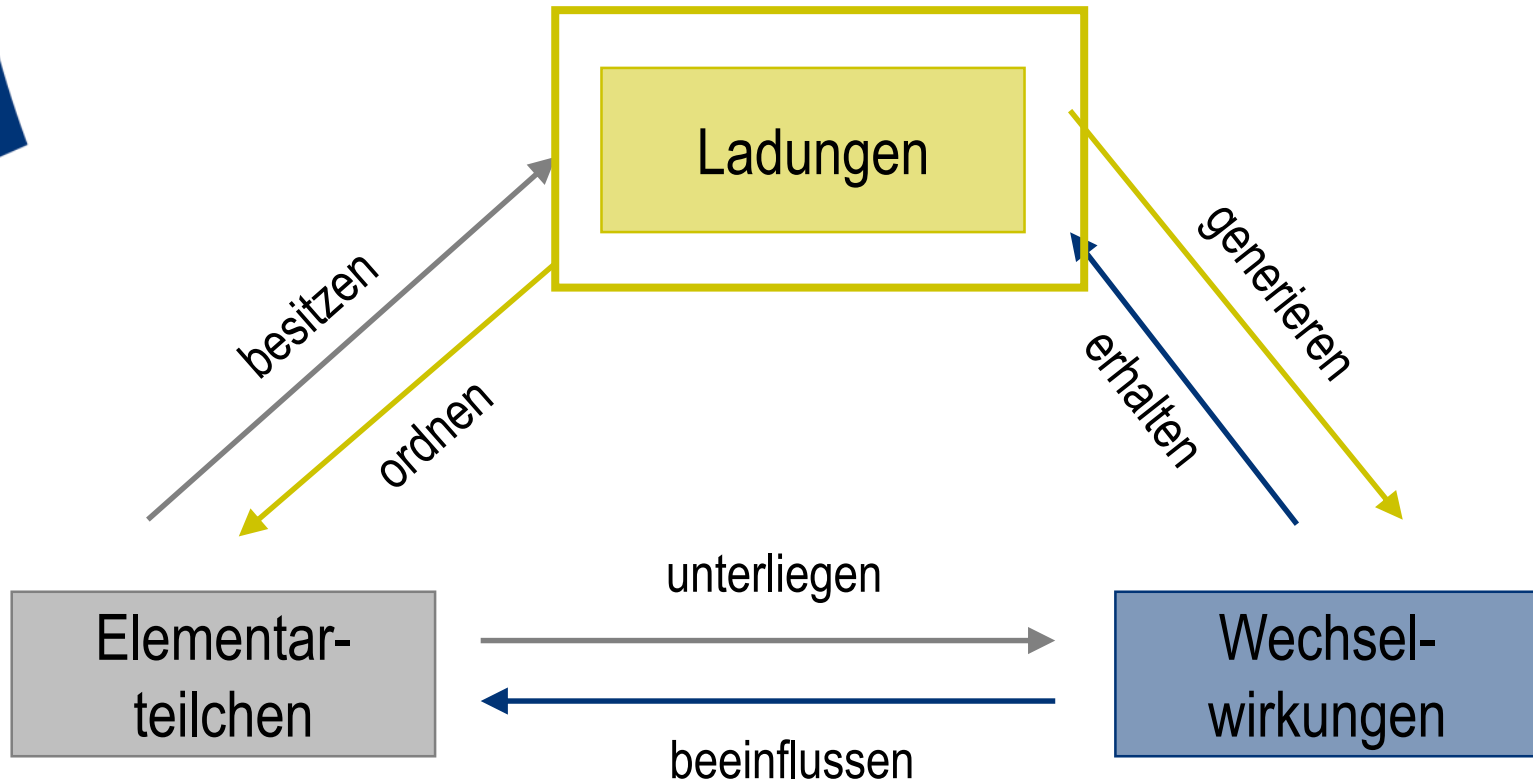
- ▶ $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{c}_1 \vec{c}_2}{r} + kr$
- ▶ Linearer Term, dominiert ab $r \approx 0,2 \text{ fm}$
 - Die im Feld gespeicherte Energie steigt linear
 - Genügend Energie um neue Teilchen(-paare) zu erzeugen!
- ▶ **Einführung:** „Confinement“



Diskussion / Fragen



Die drei Basiskonzepte des Standardmodells





Konzept der Ladung

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

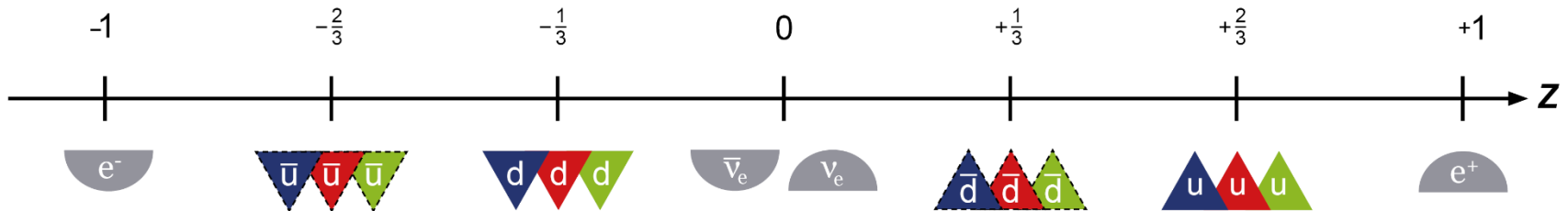
Und:

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

Elektrische Ladung

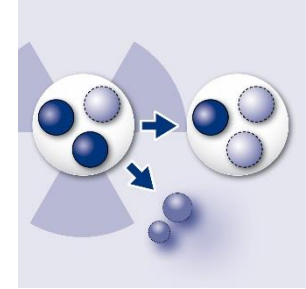


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen Z einiger Anti-/Materieteilchen

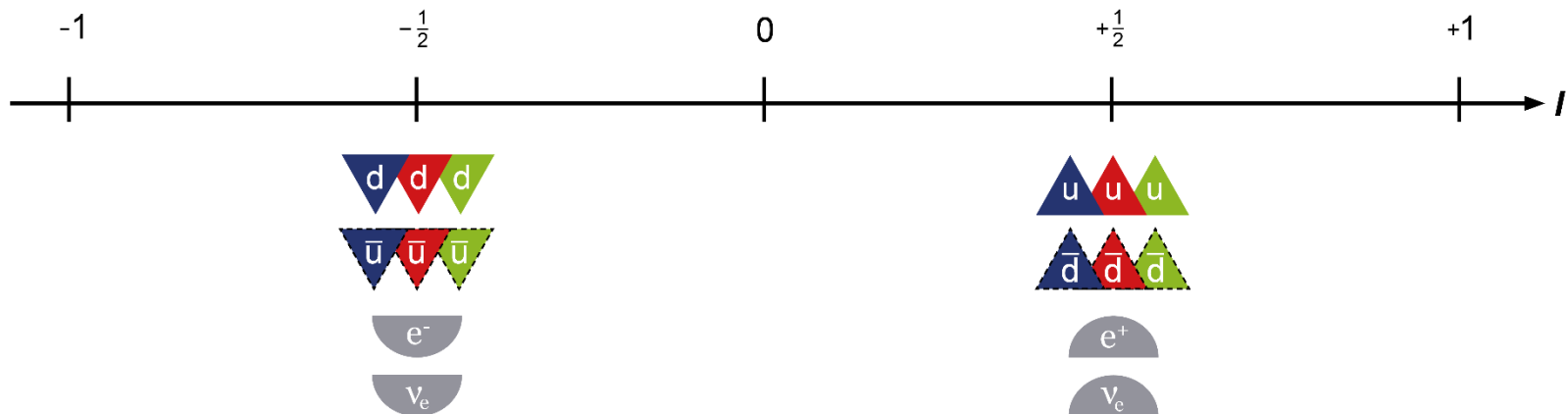


- Elektrische Ladung ist gequantelt

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

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

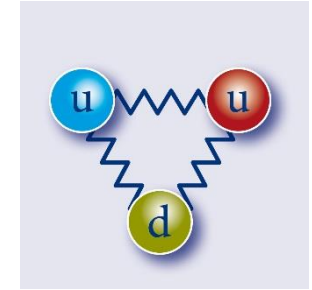
Ladungszahl

► Fachlicher Hinweis

- 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.

► Bei Literatur und Webrecherche ist daher **größte** Vorsicht geboten

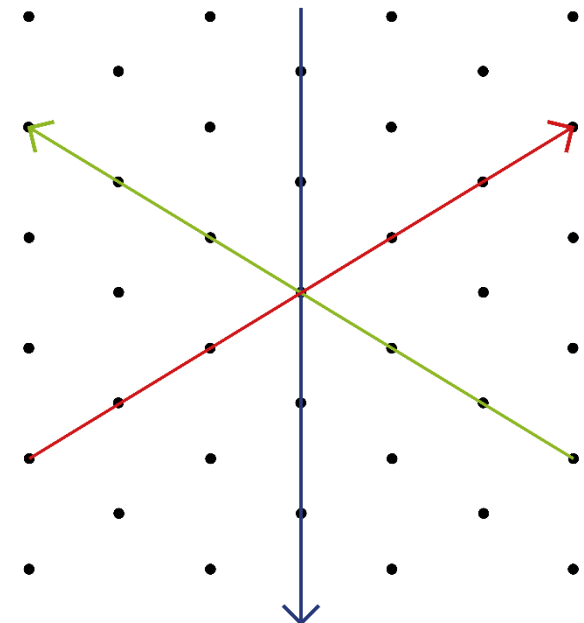
Starke Ladung



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

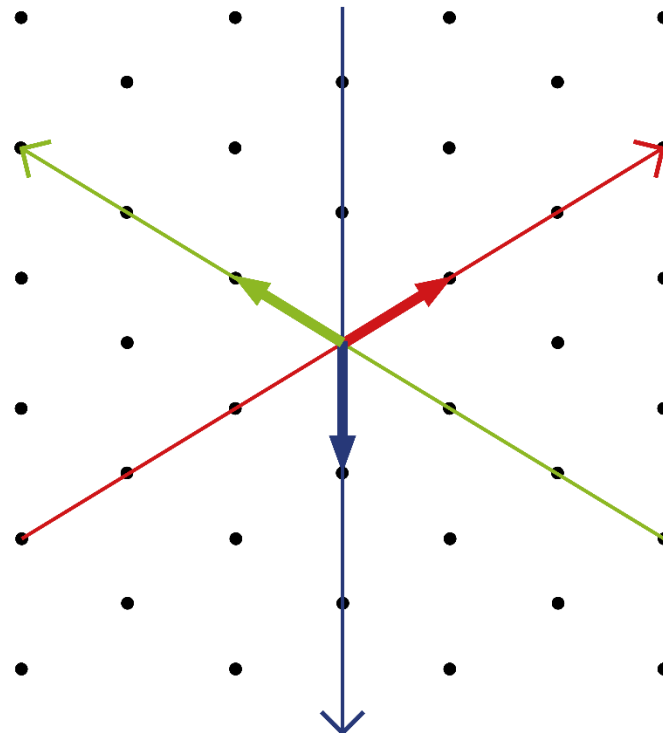
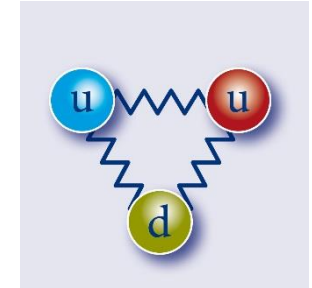
- ▶ Farbgitter:

- Exp: Alle starken Ladungen haben gleichen Betrag (aus WWirkung)
- 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



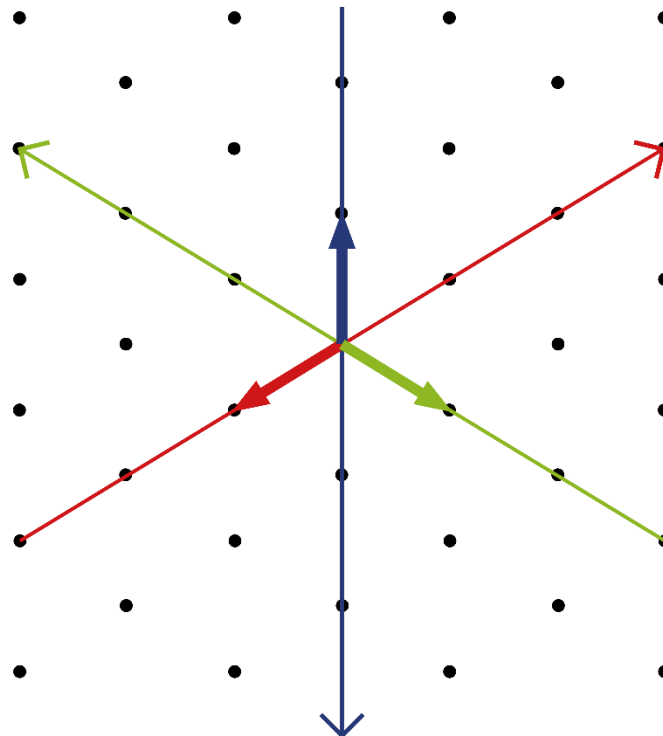
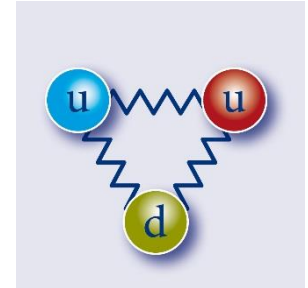
Starke Ladung

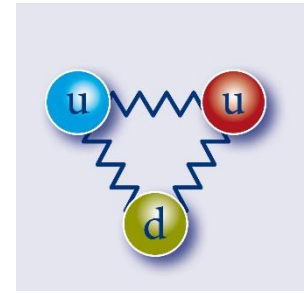
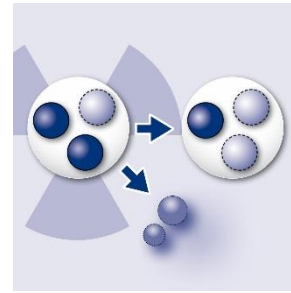
► Farbladungsvektoren von Quarks



Starke Ladung

► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





► Alle Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

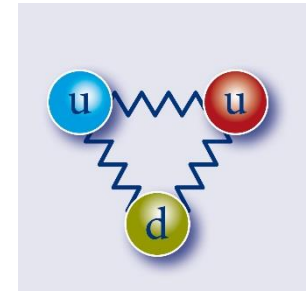
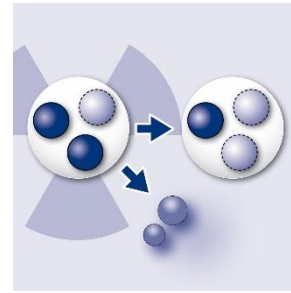
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

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



► Alle Ladungen sind jeweils erhalten

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

- Elektrische Ladungszahl:

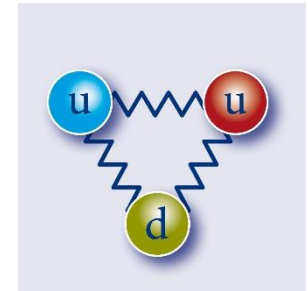
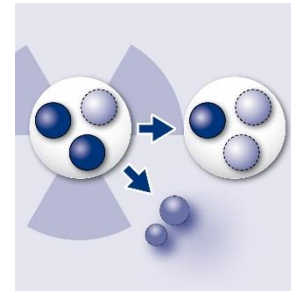
$$0 \rightarrow +1 - 1 + 0 = 0$$

- 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

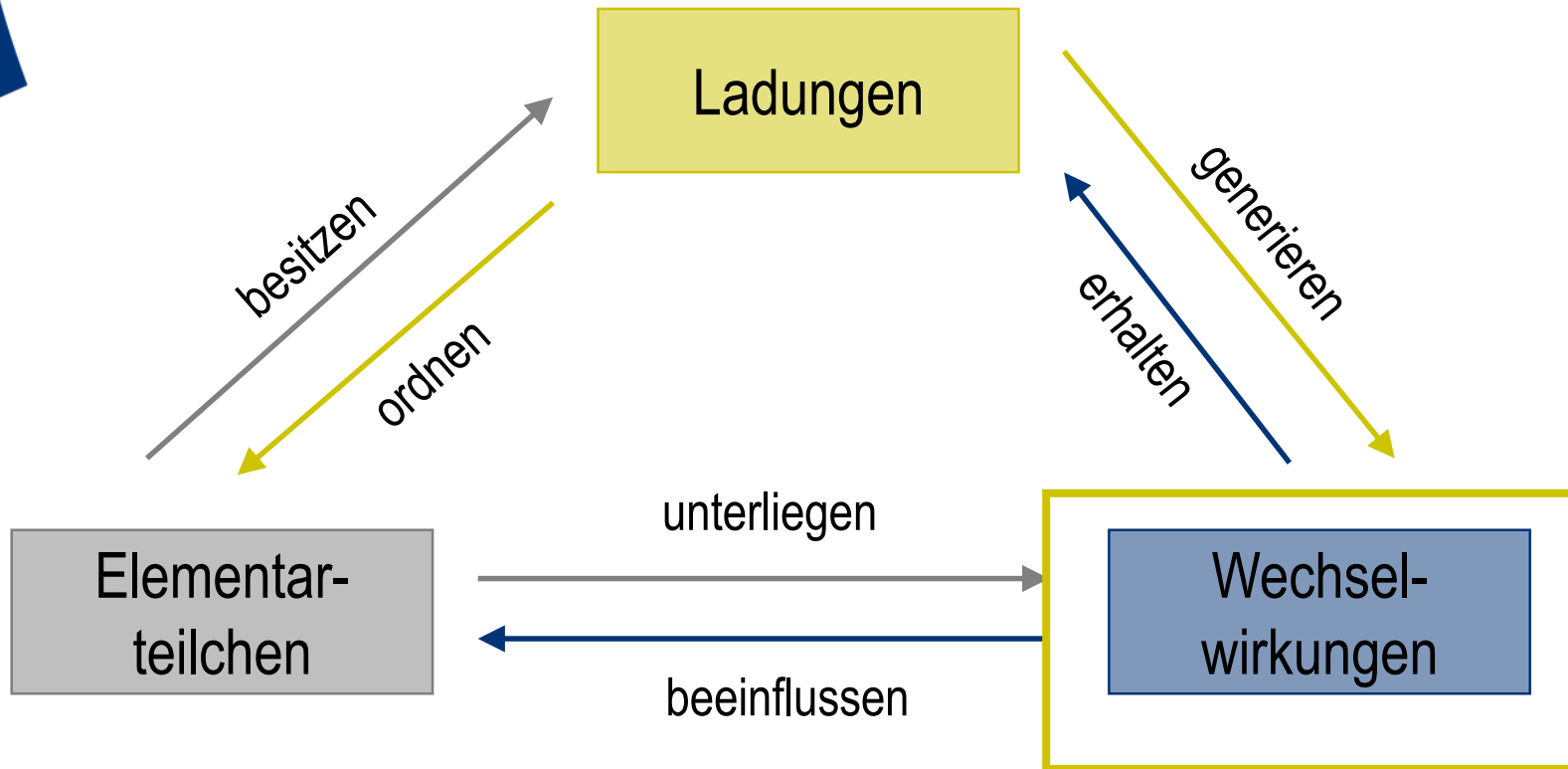
- ▶ Drei verschiedene Ladungen
 - Elektrisch
 - Schwach
 - Stark
- ▶ Ladungen sind
 - Additiv
 - Erhalten
→ Vorhersage von erlaubten Prozessen
 - Gequantelt
- ▶ Antimaterie: Alle Ladungen entgegengesetzt



Übung: Botenteilchen

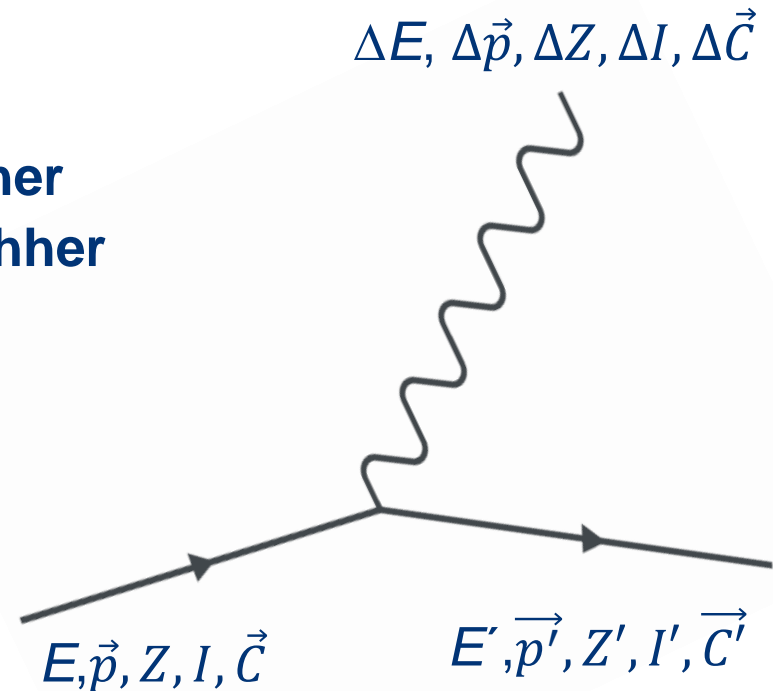
- ▶ Ziel: Lösen der Aufgaben 1-3

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



Darstellung durch Botenteilchen

- ▶ Wechselwirkungen werden von Botenteilchen übermittelt
- ▶ Bekannt ist:
 - Energie, Impuls, Ladungen **vorher**
 - Energie, Impuls, Ladungen **nachher**
 - Differenzen werden durch Botenteilchen übertragen
- ▶ Feynman Diagramme



Feynman - Diagramme

► „Zeit - Ort“ Diagramm

- Wo passiert etwas
- Wann passiert etwas



► Bausteine:

- Materie Teilchen
- Materie Antiteilchen
- Botenteilchen

u, d, e, ν 

$\bar{u}, \bar{d}, \bar{e}, \bar{\nu}$ 

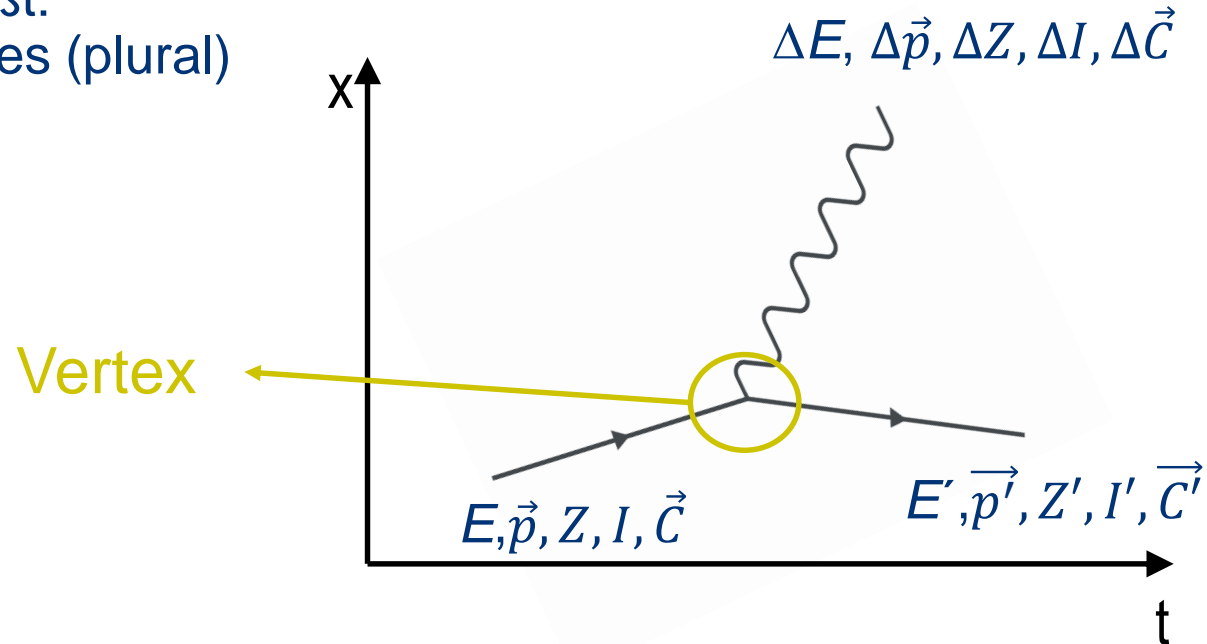
γ, W, Z 

g 

Feynman - Diagramme

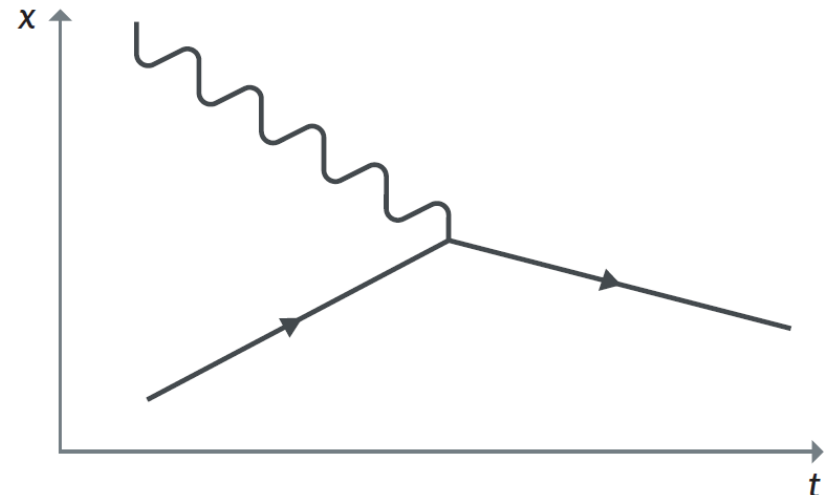
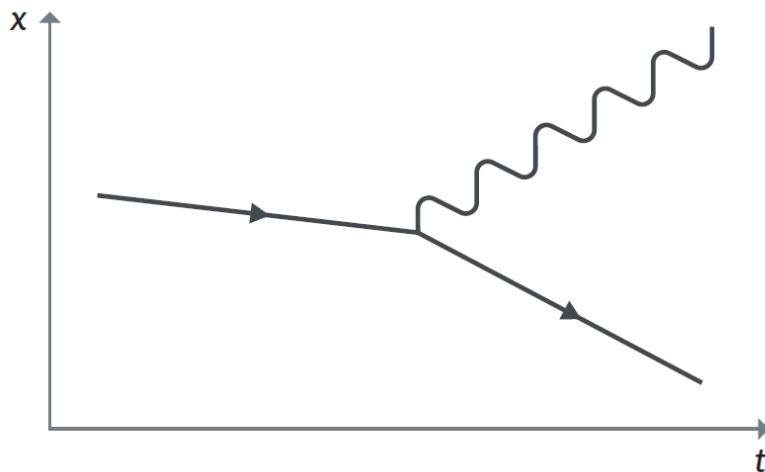
► Begriffsklärung:

- Wechselwirkung wird dadurch dargestellt, dass sich die Teilchen treffen
- Treffpunkt heißt:
Vertex / Vertices (plural)



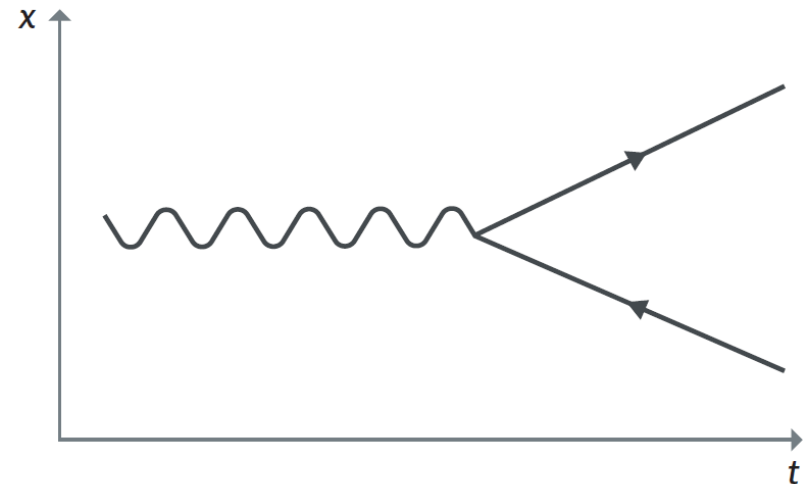
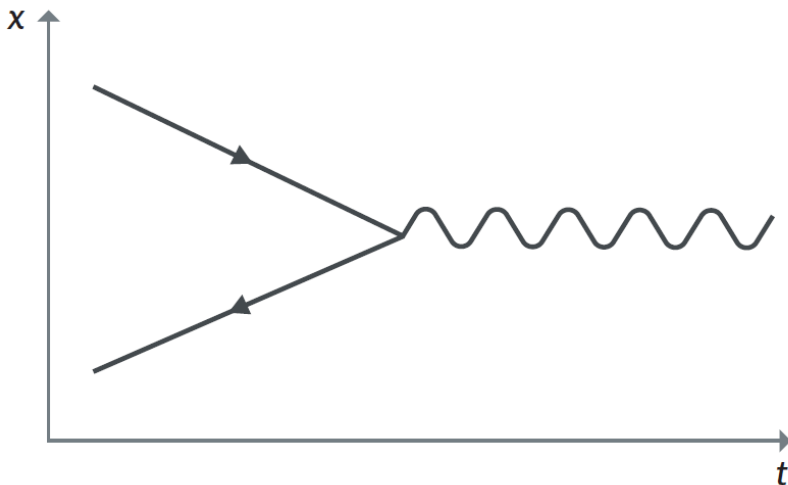
Grundbausteine 1/2

► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



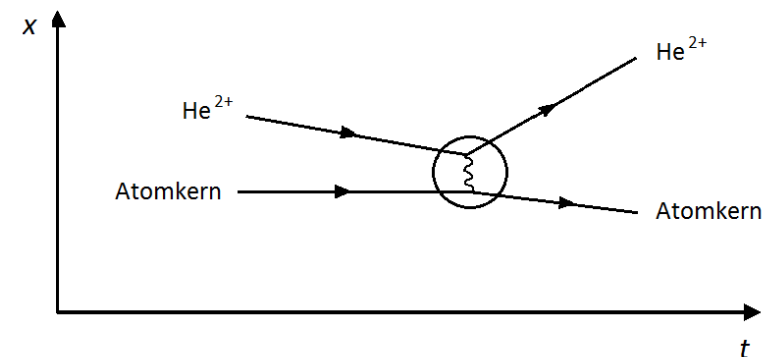
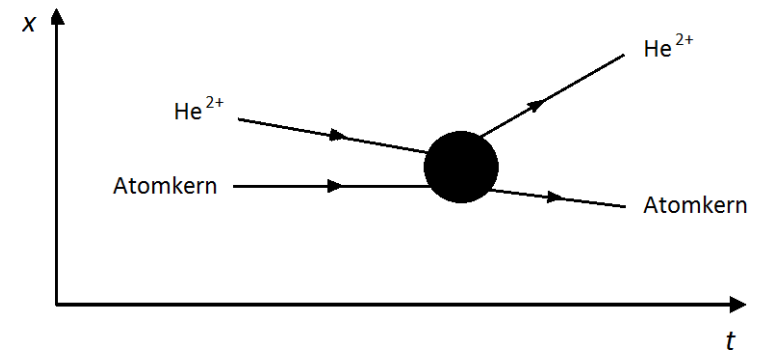
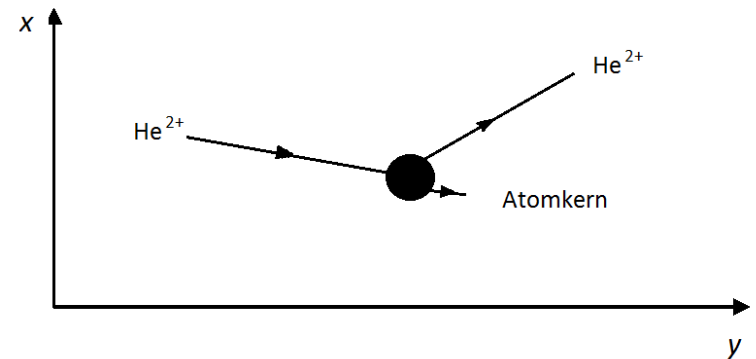
Grundbausteine 2/2

► Paarvernichtung und Paarerzeugung



Prozesse

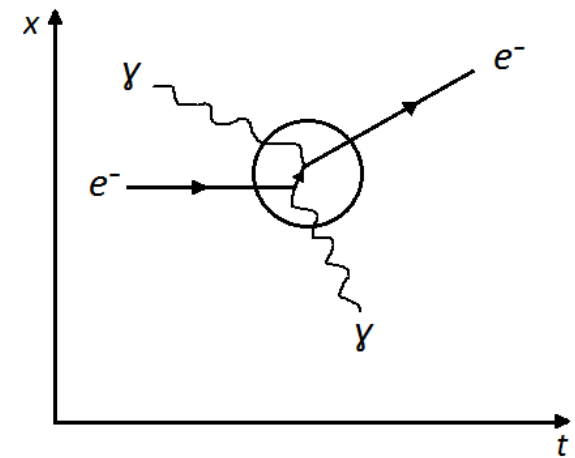
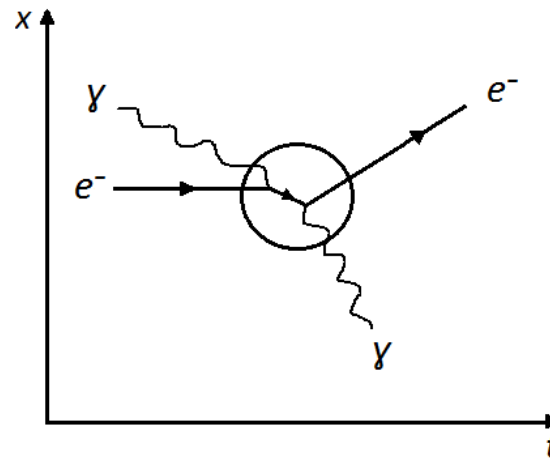
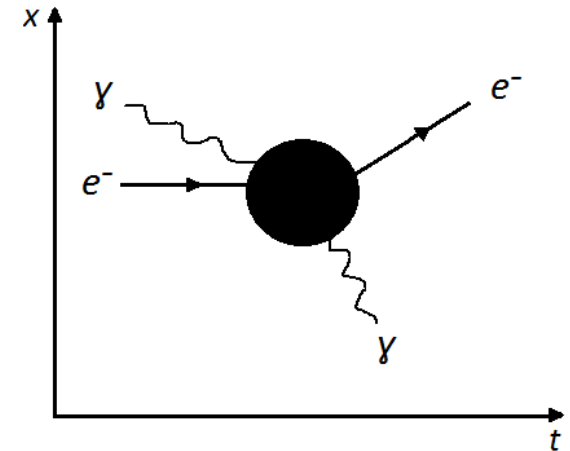
- ▶ Rutherford-Streuung
 - „Ort - Ort“ Diagramm
 - „Ort - Zeit“ Diagramm „Blackbox“ Vertex
 - „Ort - Zeit“ Diagramm detaillierter Vertex



Blackbox Vertex

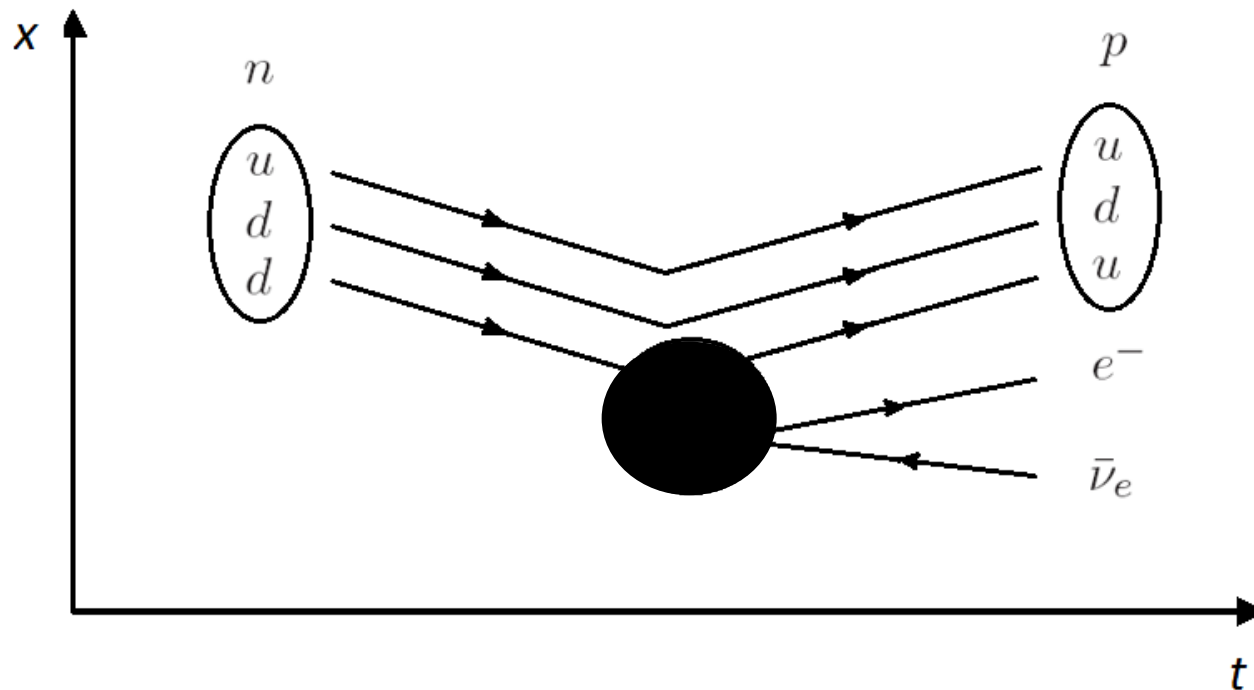
► Compton-Streuung

- Blackbox Vertex zeigt nicht das Botenteilchen
- In diesem Fall 2 gleichberechtigte Prozesse



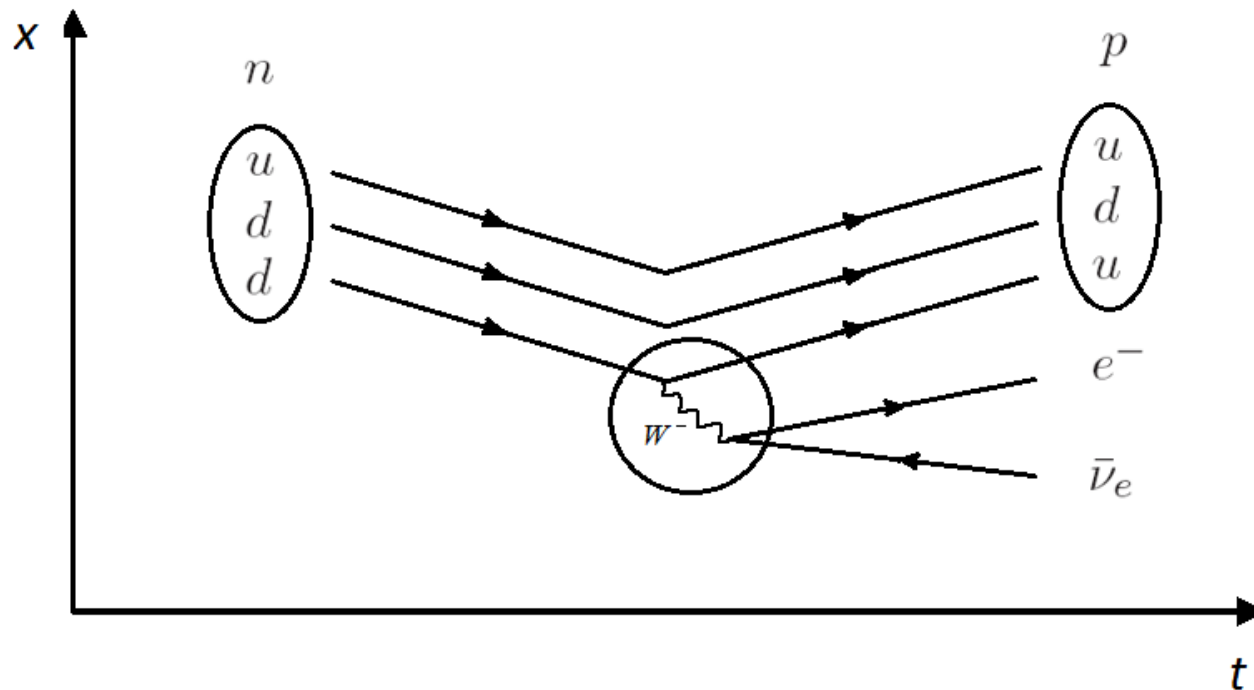
Prozesse

► β^- - Umwandlung



Prozesse

► β^- - Umwandlung



Ladungsbilanz: β^- -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

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

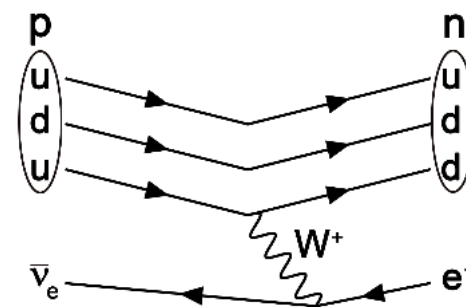
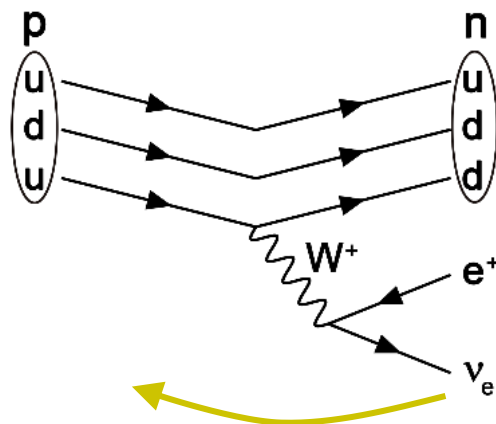
- Starker Farbladungsvektor: \vec{C}

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

► Alle Ladungen sind erhalten

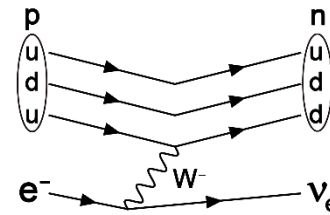
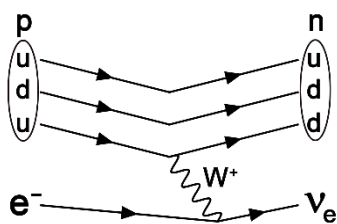
„Umklappen“ von Linien

- ▶ Durch „umklappen“ von Linien können mögliche Prozesse vorhergesagt werden
- ▶ Beispiel:
 - Von der β^+ Umwandlung zum Nachweis der Elektron Anti Neutrinos

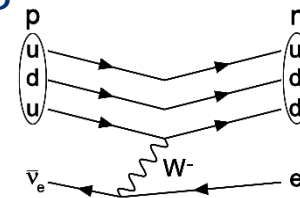
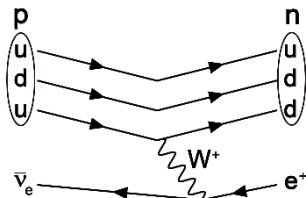


„Umklappen“ von Linien

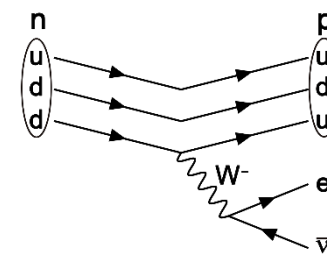
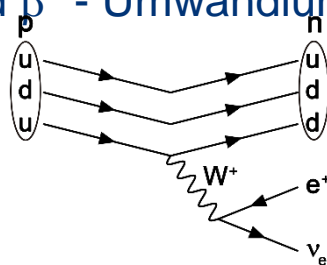
- ▶ Atomphysik: K-Einfang eines Elektrons der K-Schale



- ▶ Erster Nachweis von (Anti-)neutrinos 1953



- ▶ β^+ und β^- - Umwandlungen von Kernen





Zusammenfassung: Feynman-Diagramme

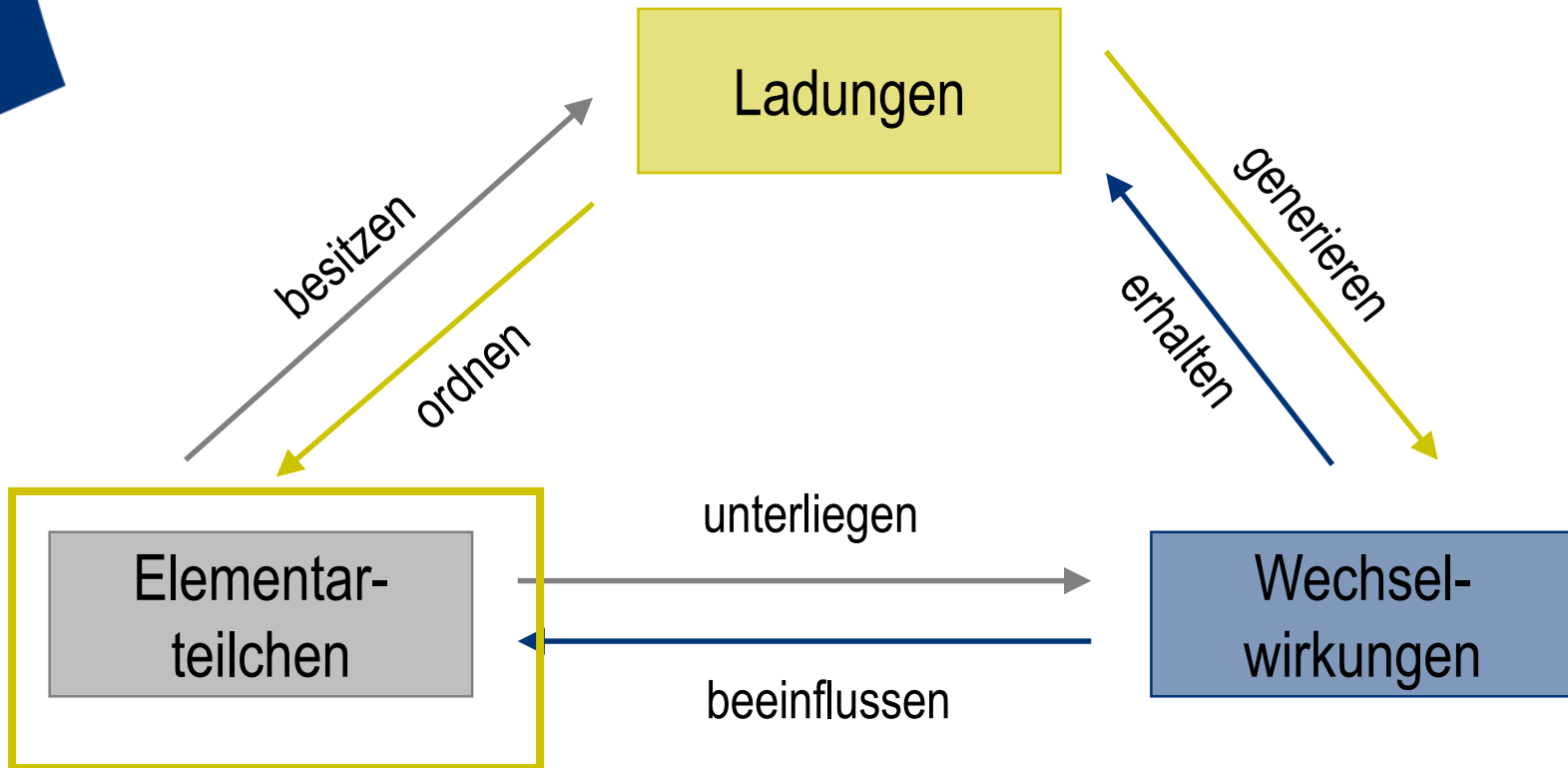
- ▶ Wechselwirkungen werden in der Teilchenphysik durch den Austausch von Botenteilchen beschrieben
- ▶ Wechselwirkungen werden mittels Feynman-Diagrammen dargestellt
 - Diese können auch zur quantitativen Berechnung dienen
- ▶ Ein Feynman-Diagramm ist ein x-t-Diagramm (Zeitachse nach rechts)
 - Eine Vorstufe der Feynman-Diagramme ist das x-y-Diagramm
- ▶ Wechselwirkungen werden durch Vertices symbolisiert, an denen Teilchen emittiert, absorbiert, erzeugt oder vernichtet werden



Übung: Feynman-Diagramme

- ▶ Arbeitsblatt mit Aufgaben zu Feynman-Diagrammen
- ▶ Weiter mögliche Übungen in „Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen“
 - Aufgaben 9-12

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?

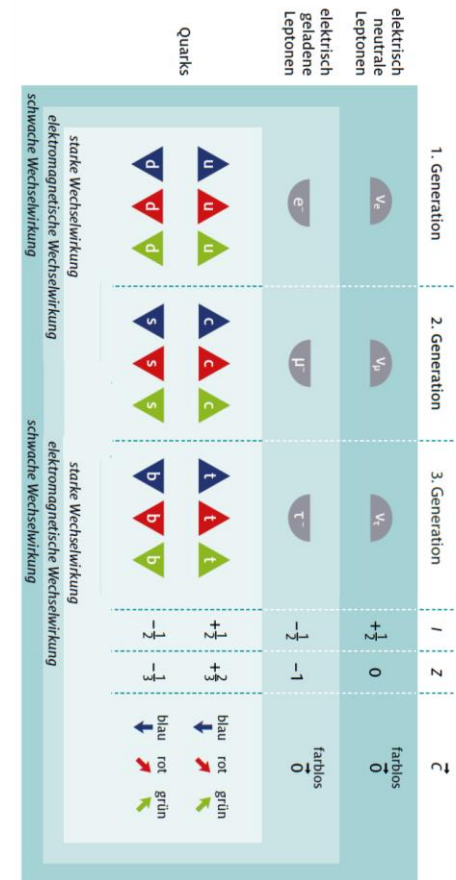
- ▶ Entdeckung weiterer Teilchen
- ▶ ausschließlich „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks sowie des Elektrons und des Elektron-Neutrinos
 - Von jedem der leichten Materieteilchen (u, d, e^-, ν_e) gibt es je zwei Kopien, die größere Massen besitzen.
- ▶ Wie lassen sich Teilchen ordnen?
- ▶ Gleiche 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	$\begin{matrix} \triangle_u & \triangle_u & \triangle_u \\ \triangle_d & \triangle_d & \triangle_d \end{matrix}$	$\begin{matrix} \triangle_c & \triangle_c & \triangle_c \\ \triangle_s & \triangle_s & \triangle_s \end{matrix}$	$\begin{matrix} \triangle_t & \triangle_t & \triangle_t \\ \triangle_b & \triangle_b & \triangle_b \end{matrix}$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	blau \downarrow
	$\begin{matrix} \triangle_u & \triangle_u & \triangle_u \\ \triangle_d & \triangle_d & \triangle_d \end{matrix}$	$\begin{matrix} \triangle_c & \triangle_c & \triangle_c \\ \triangle_s & \triangle_s & \triangle_s \end{matrix}$	$\begin{matrix} \triangle_t & \triangle_t & \triangle_t \\ \triangle_b & \triangle_b & \triangle_b \end{matrix}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	rot \nearrow
						grün \searrow
	starke Wechselwirkung		starke Wechselwirkung			
	elektromagnetische Wechselwirkung		elektromagnetische Wechselwirkung			
	schwache Wechselwirkung		schwache Wechselwirkung			

Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

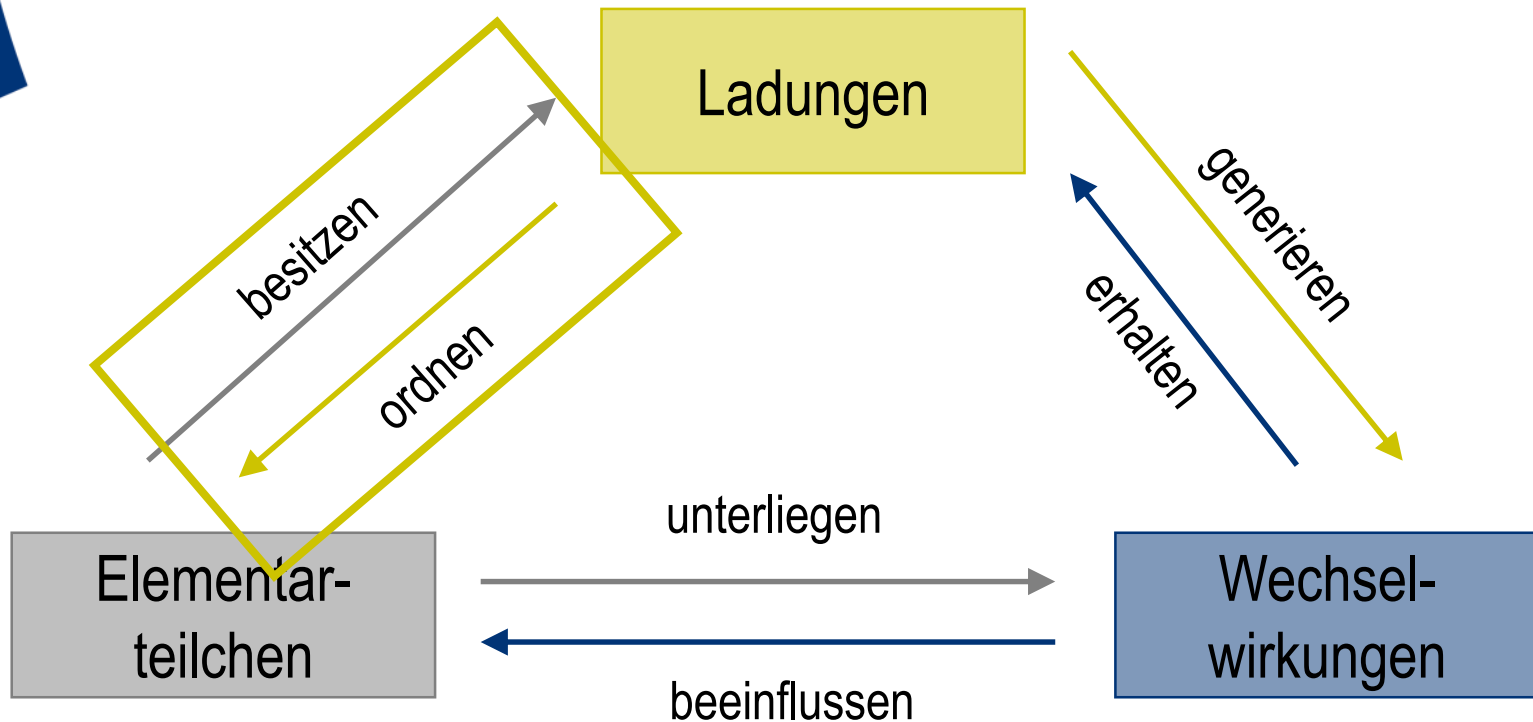
- ▶ Teilchen sind nach Ladungen geordnet analog den chemischen Elementen in die Hauptgruppen
- ▶ Im PSE sind die chemischen Elemente innerhalb einer Hauptgruppe von oben nach unten nach ihrer Masse aufsteigen geordnet



1. HG	2. HG	3. HG	4. HG	5. HG	6. HG	7. HG	8. HG
H							He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Nebengruppen

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells

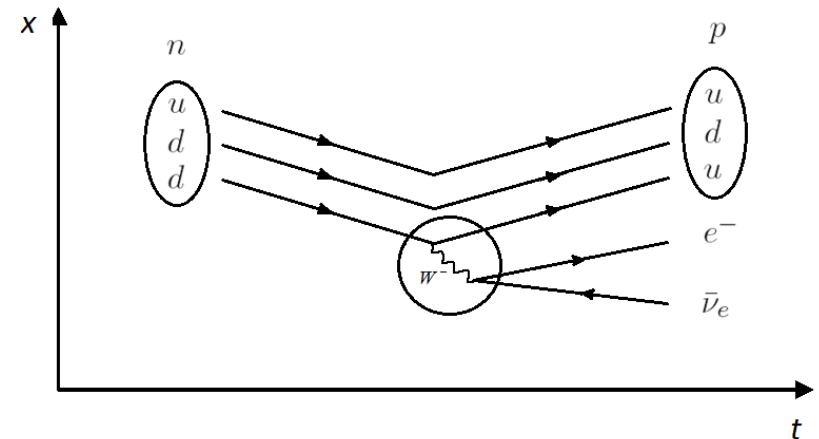


Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► 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

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



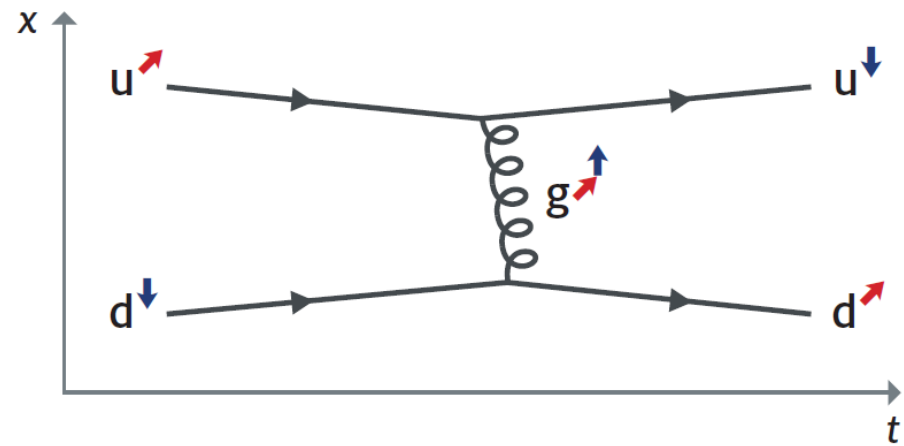
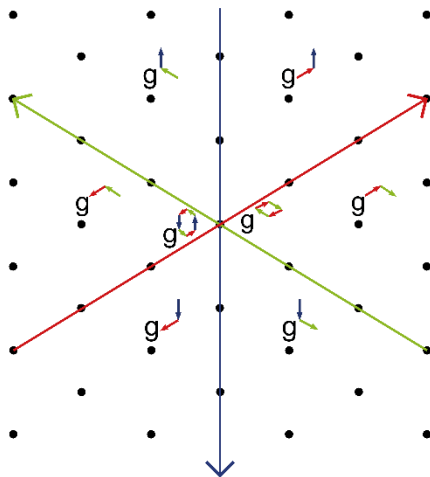
Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Schwache Wechselwirkung

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

Erinnerung: Starke Wechselwirkung

- ▶ $F_S = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r^2} + k$
- ▶ Botenteilchen (Gluonen) besitzen selbst Ladung

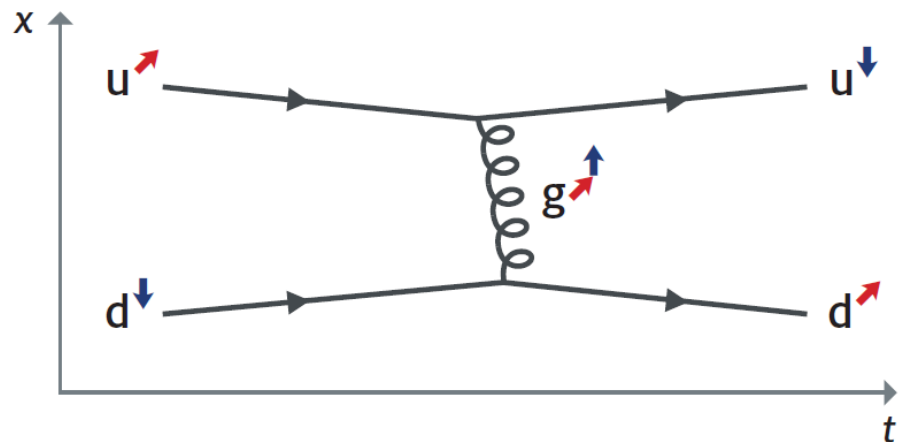


Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

▶ Starke Wechselwirkung

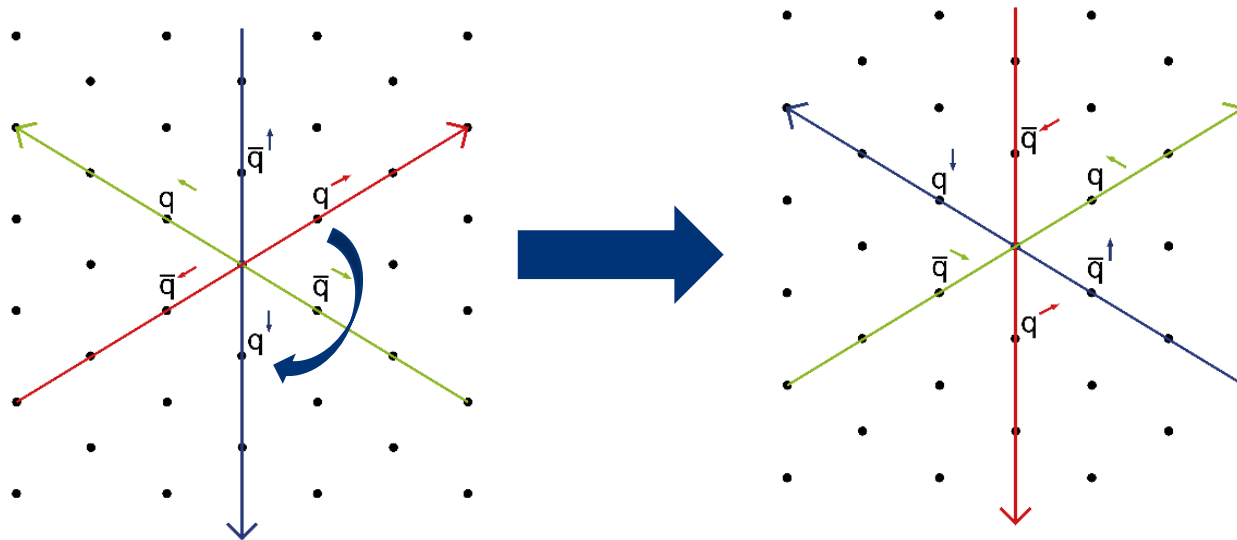
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks: Quarks bilden **Tripletts** bezüglich der starken Ladung

▶ $(u \rightarrow u \rightarrow u)$

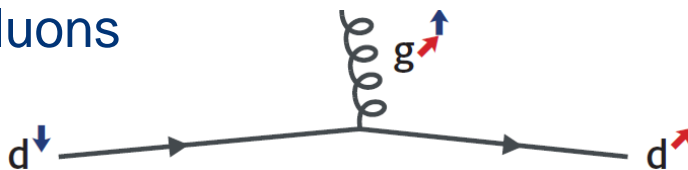


Umwandlung innerhalb Multipletts

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



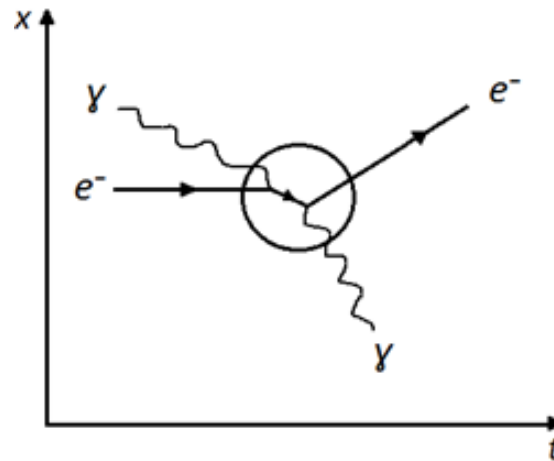
- ▶ hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Elektromagnetische Wechselwirkung

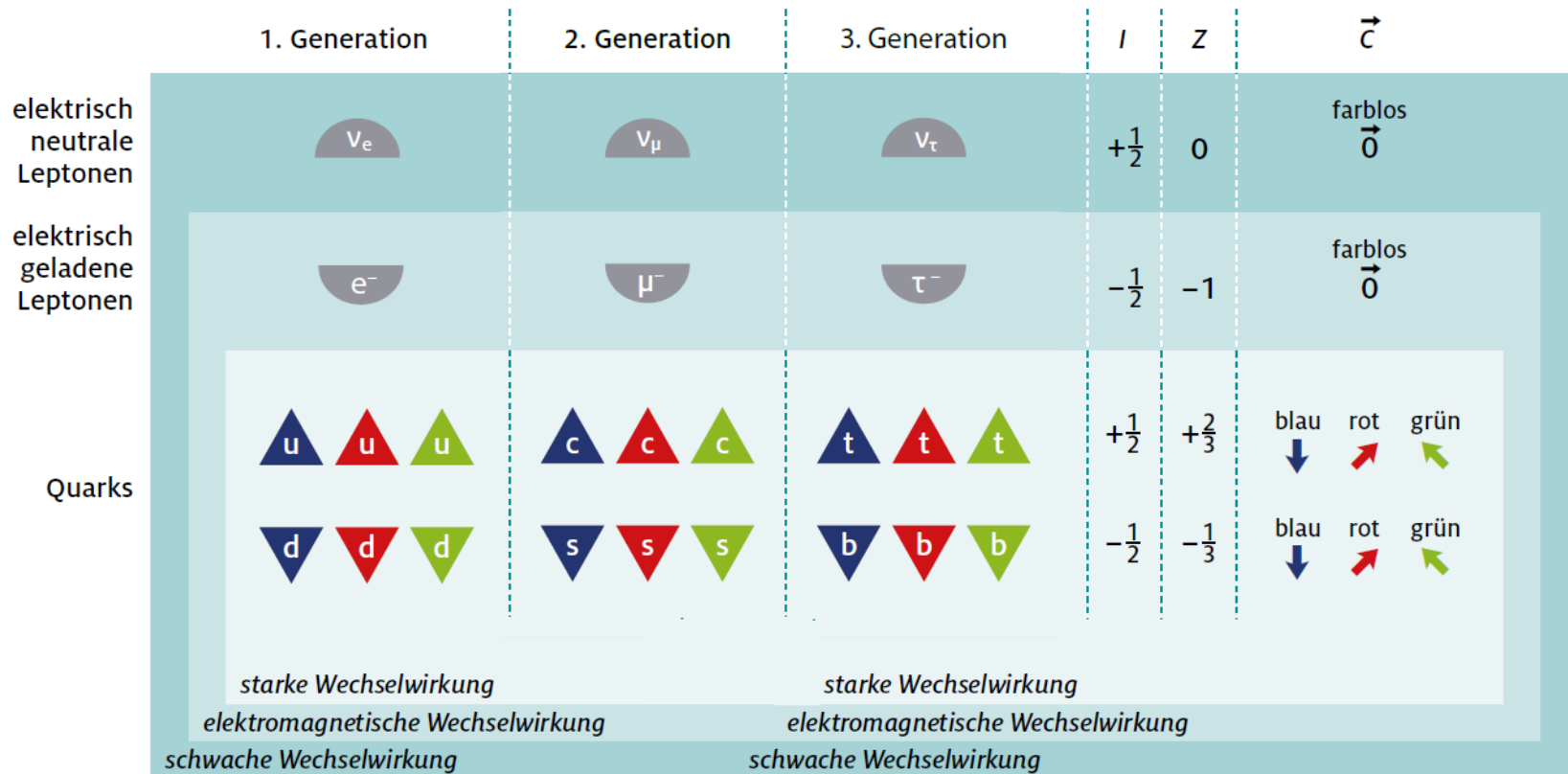
- Photonen besitzen keine Ladungen: durch elektromagnetische Wechselwirkung können die Ladungen eines Teilchens nicht geändert werden
- Alle Teilchen sind **Singulett**s bezüglich der elektrischen Ladung





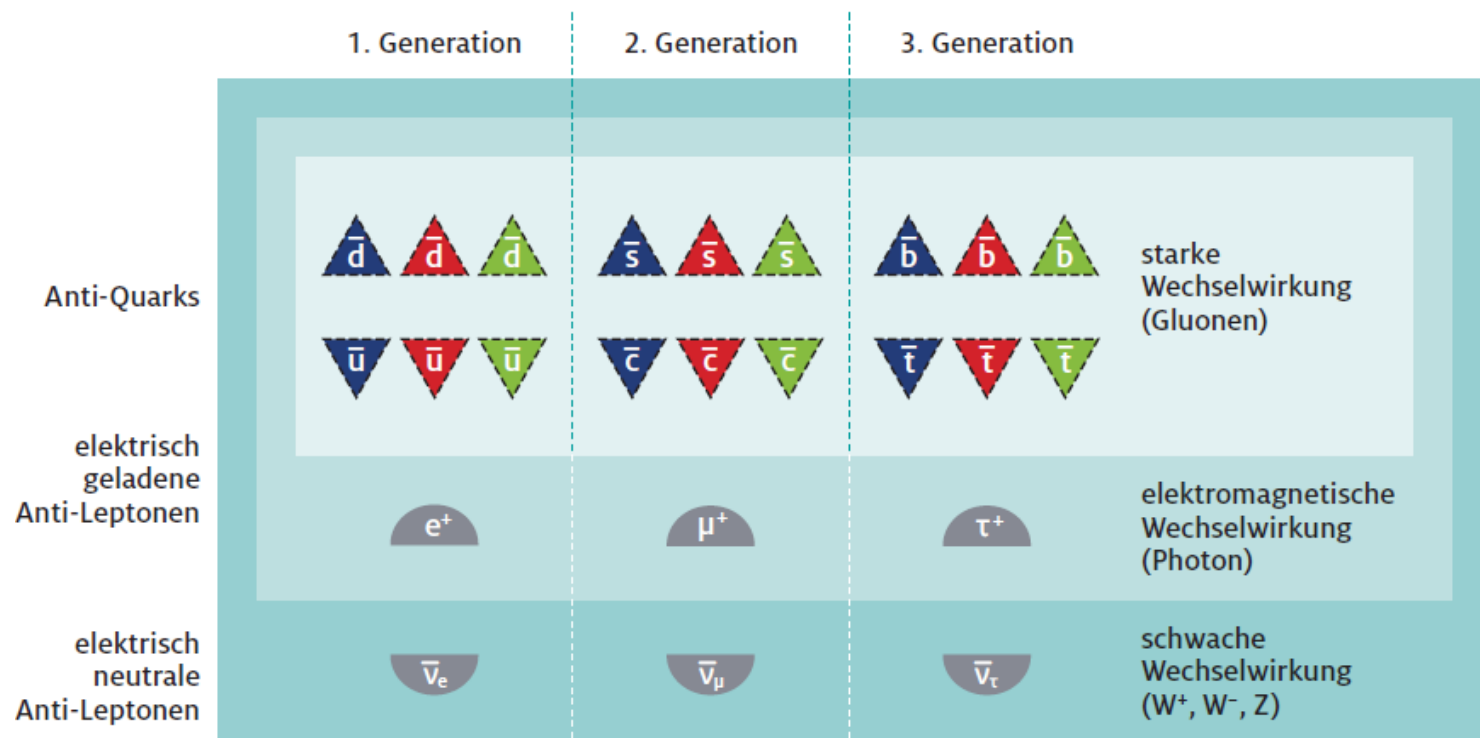
Übung: Ordnungsschema des Standardmodells

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

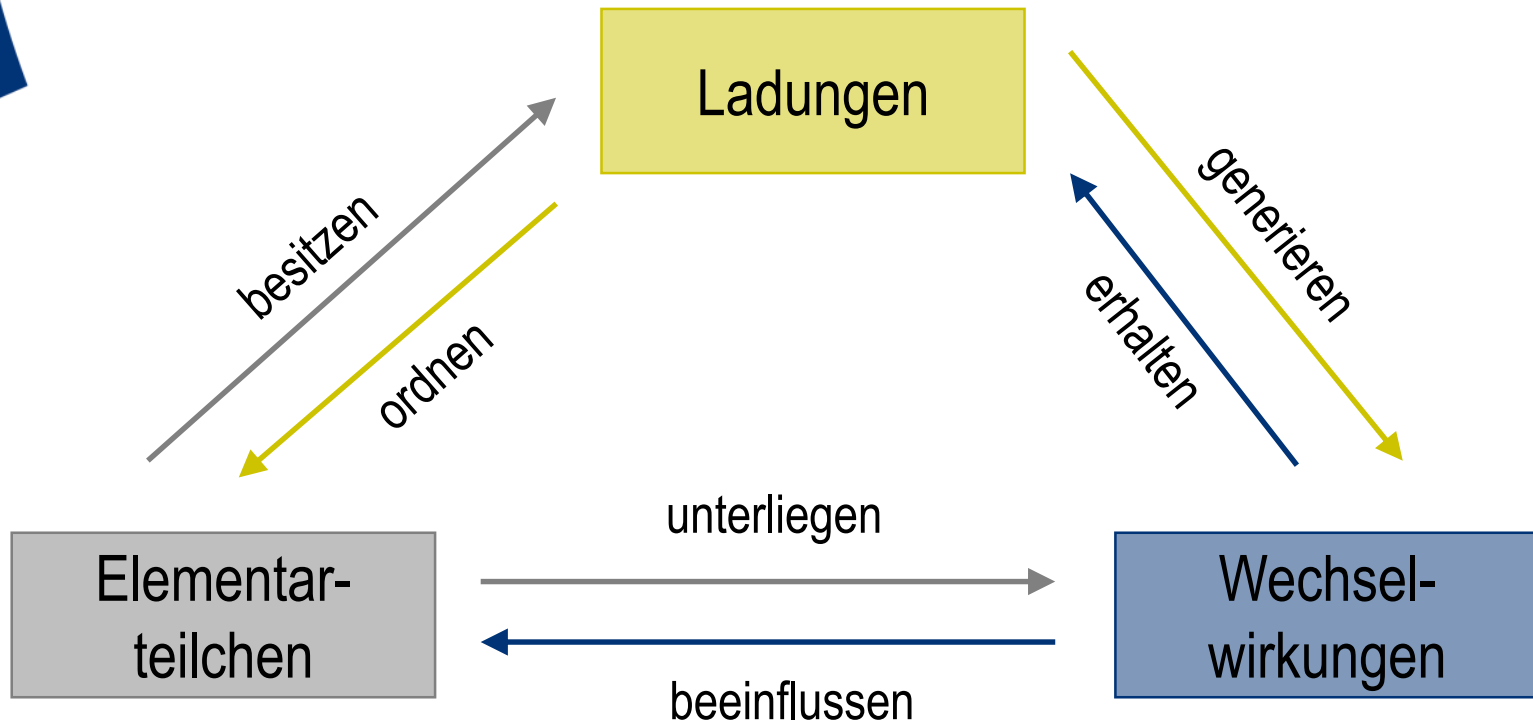




Zusammenfassung: Multipletts

- ▶ Teilchen lassen sich anhand ihrer Ladungen ordnen
- ▶ Die Zahl und Multipletts 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!)
 - Singulets der elektromagnetischen Wechselwirkung (vorhersagbar)
- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich
 - (zuzüglich: hier nicht diskutierte Effekte der Zustandsmischung)

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells





Mögliche experimentelle Diskussionspunkte für den Unterricht

Woher weiß man,:

- ▶ dass es Quarks gibt?
- ▶ dass es drei verschiedenen Farbladungen gibt?
- ▶ dass Farbladungen vektoriellen Charakter haben?
- ▶ dass die Leptonenuniversalität gilt?
- ▶ dass es drei Arten leichter Neutrinos gibt?
- ▶ Welche Werte die Kopplungsparameter der fundamentalen Wechselwirkungen haben?

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

www.teilchenwelt.de

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



www.facebook.de/teilchenwelt/



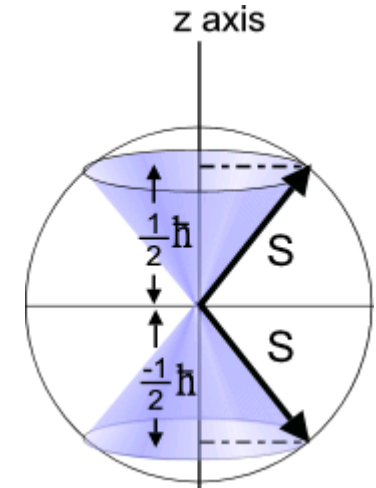
NETZWERK
TEILCHENWELT

Diskussion / Fragen



Exkurs: warum schwache „Isospin“-Ladung?

- ▶ Zugrundeliegende Symmetrie genau dieselbe wie bei Spin
- ▶ Jeweils Vektor mit 3 Komponenten
 - Spin $\mathbf{S} = (S_x, S_y, S_z)$ im Ortsraum
 - Schwacher Isospin $\mathbf{I}^W = (I_1^W, I_2^W, I_3^W)$ im abstrakten schwachen Isospinraum



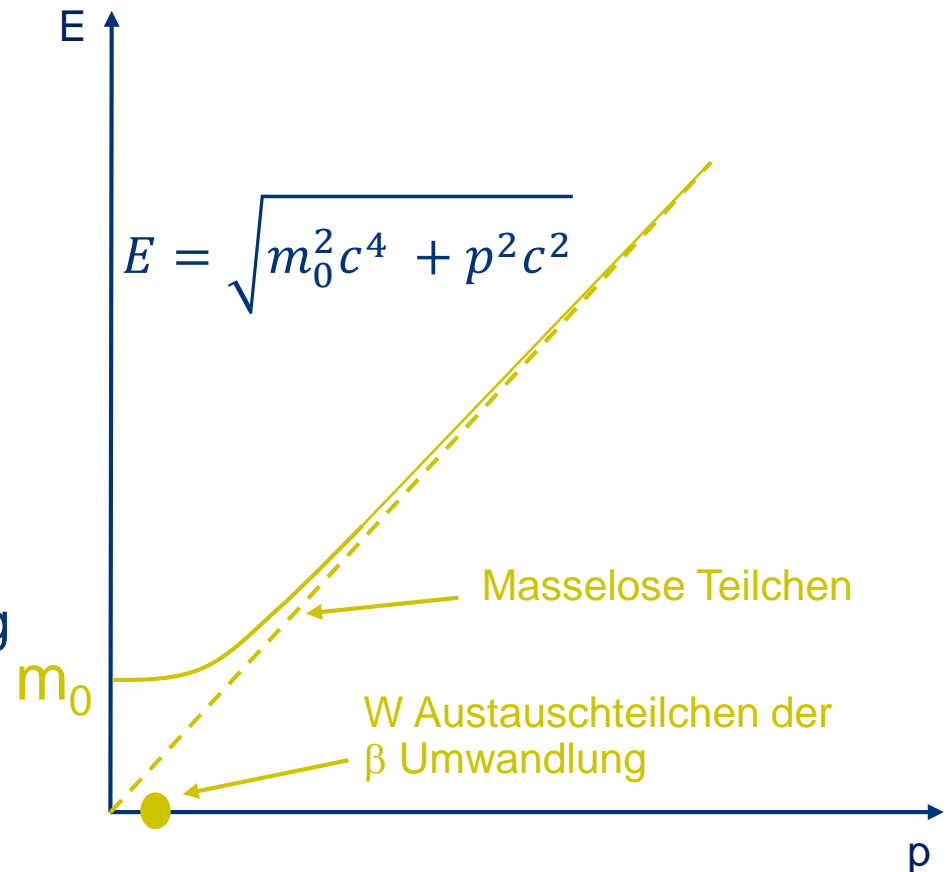
<http://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch>

- ▶ Messbar bei beiden nur:
 - Gesamter Betrag und eine Komponente (meist gewählt: die 3.)
 - die beiden anderen Komponenten sind „unscharf“ (Heisenberg)
- ▶ Wir sprechen daher nur von schwacher Ladungszahl $I := I_3^W$
- ▶ Ordnung in Multipletts von $I := I_3^W$

$$\begin{pmatrix} I_3^W \\ +\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} : \left(\begin{matrix} \nu_e \\ e^- \end{matrix} \right), \left(\begin{matrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{matrix} \right), \dots, \left(\begin{matrix} u \\ d \end{matrix} \right), \dots, \left(\begin{matrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{matrix} \right), \dots, \left(\begin{matrix} \bar{d} \\ \bar{u} \end{matrix} \right), \dots, \left(\begin{matrix} \Phi^+ \\ \Phi^0 \end{matrix} \right) = \left(\begin{matrix} 0 \\ \mathbf{v} + H(\mathbf{x}) \end{matrix} \right) \quad \begin{pmatrix} I_3^W \\ +1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} W^+ \\ Z^0 \\ W^- \end{pmatrix}$$

Virtuelle Teilchen

- ▶ Für reelle Teilchen muss die Energie-Impuls Beziehung gelten:
- ▶ Für virtuelle Teilchen ist dies nicht der Fall
- ▶ Je weiter ein virtuelles Teilchen von der Energie Impuls Beziehung entfernt ist, desto unwahrscheinlicher wird der Prozess

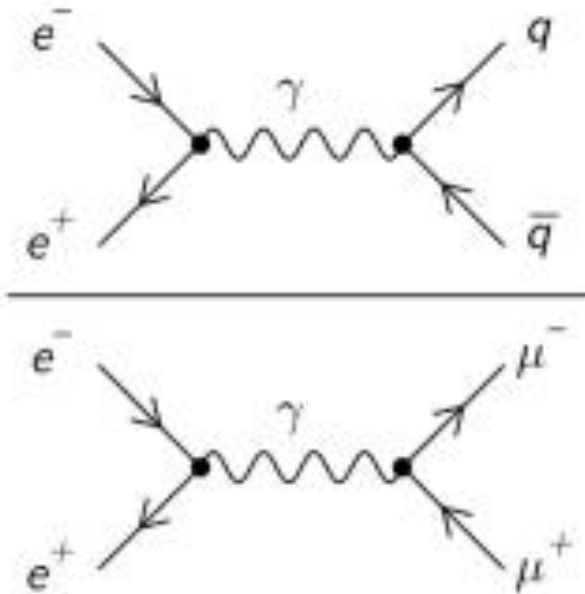


Anzahl der Farben

- ▶ Idee: Messung des Verhältnisses von $q\bar{q}$ zu $\mu^+\mu^-$

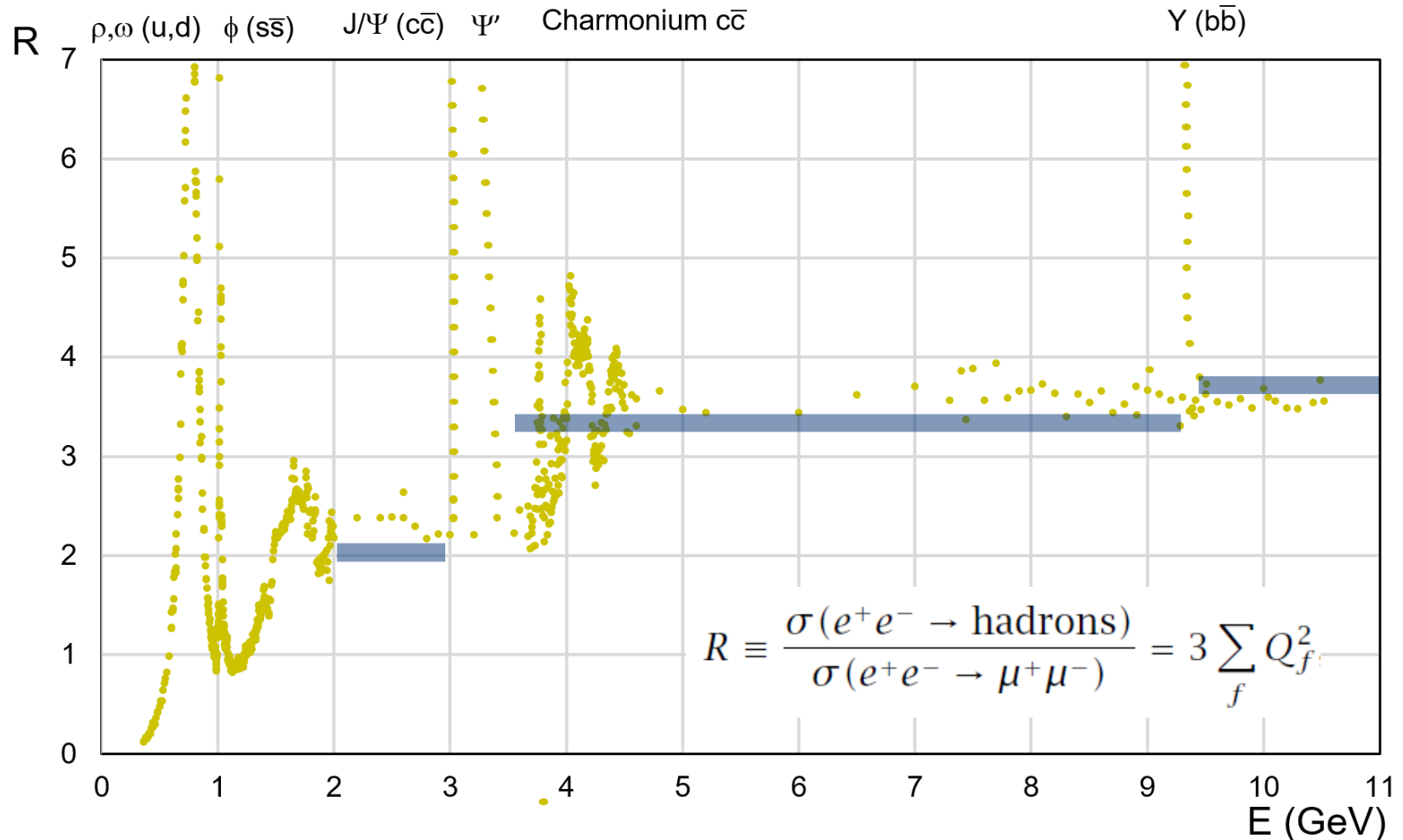
$$R = \frac{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+)}$$

\approx



$$\begin{aligned}
 R &= 3[(2/3)^2 + (1/3)^2 + (2/3)^2] = 2 \text{ for } u, d, s \\
 &= 2 + 3(2/3)^2 = 10/3 \text{ for } u, d, s, c, \\
 &= 10/3 + 3(1/3)^2 = 11/3 \text{ for } u, d, s, c, b.
 \end{aligned}$$

Anzahl der Farben

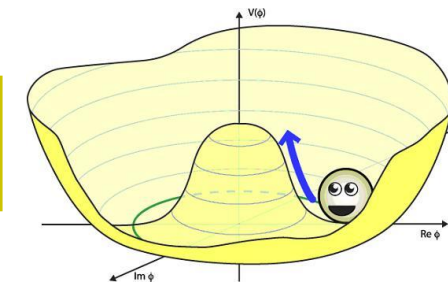
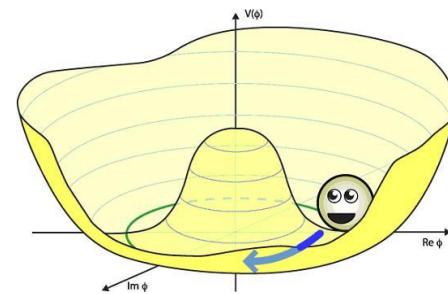
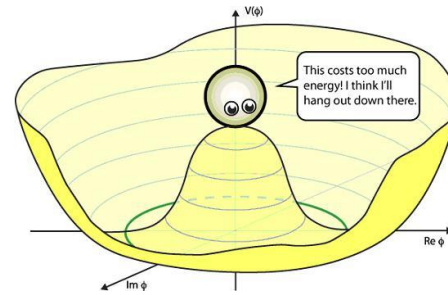
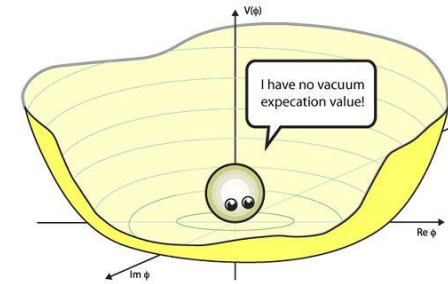


Higgs Feld

- ▶ Symmetriebrechung
 - Symmetrisches Potential
Grundzustand symmetrisch
 - Symmetrisches Potential
Grundzustand nichtsymmetrisch
- ▶ Klassisch analog Dielektrikum :
Abschirmung der Feldlinien
 - Abschirmung „schwacher Felder“
durch BEHiggs-Hintergrundfeld
= unendlicher See schwacher Ladung
 - Abschirmendes Feld
Duplett in schw. Ladung
Komponente $v = 246$ GeV im Vakuum
 - Anregung = Higgs-Teilchen

$$\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$

$$\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + H \end{pmatrix}$$



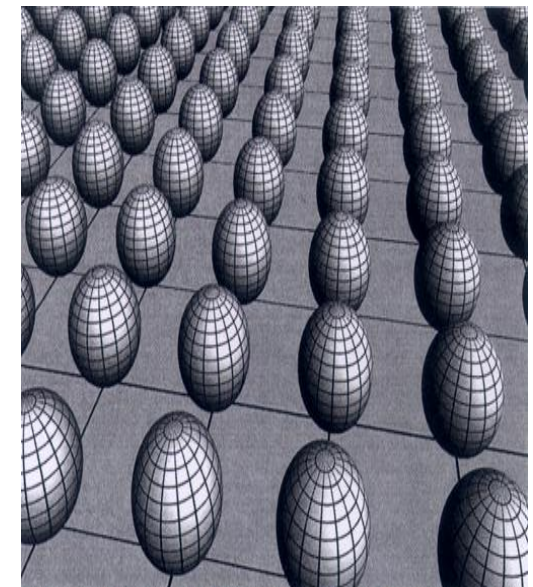
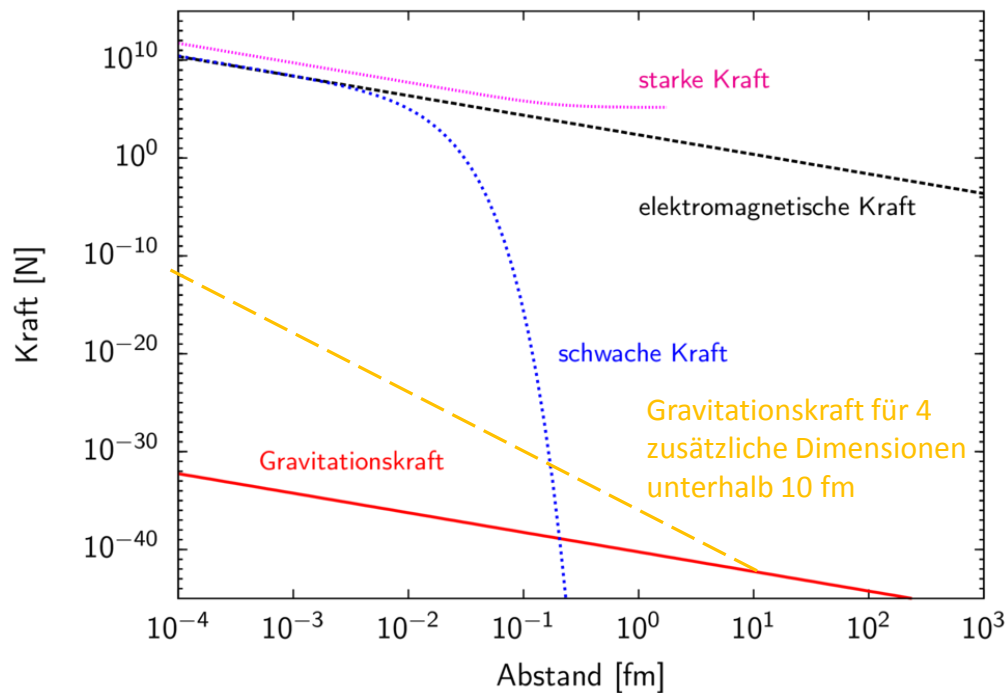
Einschub:

**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)

Spekulationen

- Zusätzliche Dimensionen für Gravitation könnten die Kräfte „vereinigen“



Zustandsmischung

- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich
- ▶ Multipletts sind für Massen (bzw. starke) Eigenzustände definiert
- ▶ **Aber:** Die Masseneigenzustände von Quarks sind **nicht** identisch mit den schwachen Eigenzuständen!

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cabibbo-} \\ \text{Kobayashi-} \\ \text{Maskawa Matrix} \\ \text{(CKM Matrix)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Schwache Eigenzustände

Massen Eigenzustände

Zustandsmischung

- ▶ Die Elemente der CKM Matrix beschreiben die Wahrscheinlichkeit des auftretenden schwache Eigenzustandes bei einer Umwandlung
- ▶ Beispiel: Wandelt sich ein u Quark in einem schwachen Prozess um, wird es mit der Wahrscheinlichkeit V_{ud} zu einem d Quark

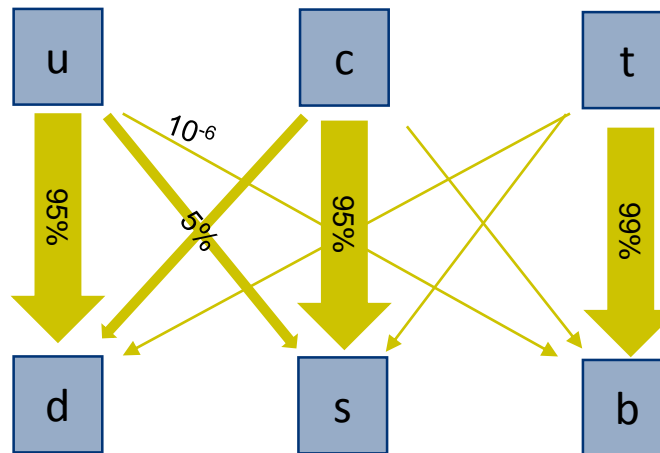
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Schwache
Eigenzustände

Massen
Eigenzustände

Zustandsmischung

- ▶ Beispiel: Wandelt sich ein u Quark in einem schwachen Prozess um, wird es mit der Wahrscheinlichkeit $(V_{ud})^2$ zu einem d Quark
- ▶ Die Mischungen der Quarks in der schwachen Wechselwirkung sind eher klein
 - Große Wahrscheinlichkeit für Umwandlung „innerhalb“ des Multipletts



Zustandsmischung

- ▶ Beispiel: Wandelt sich ein u Quark in einem schwachen Prozess um, wird es mit der Wahrscheinlichkeit $(V_{ud})^2$ zu einem d Quark
- ▶ Die Mischungen der Quarks in der schwachen Wechselwirkung sind eher klein
 - Große Wahrscheinlichkeit innerhalb des Multipletts zu bleiben

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,974 & 0,225 & 0,003 \\ 0,225 & 0,974 & 0,041 \\ 0,009 & 0,040 & 0,999 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Schwache
Eigenzustände

Massen
Eigenzustände

Zustandsmischung

- ▶ Die Mischungen der Quarks in der schwachen Wechselwirkung sind eher klein
 - Große Wahrscheinlichkeit für Umwandlung „innerhalb“ des Multipletts
- ▶ Die Mischungen der Neutrinos in der schwachen Wechselwirkung fast maximal
 - Maki-Nakagawa-Sakata-Matrix
 - „Neutrino Oszillation“

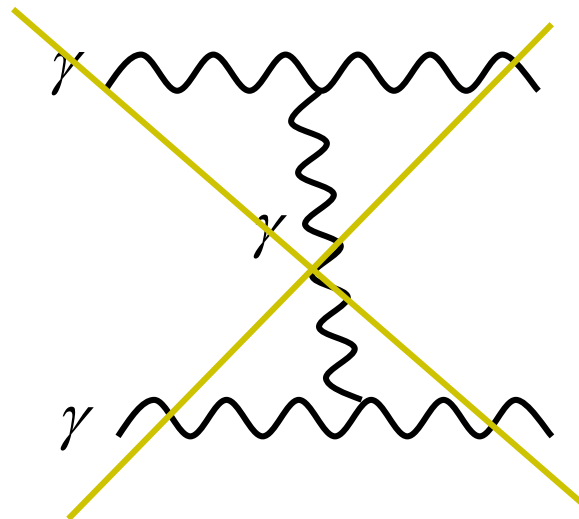
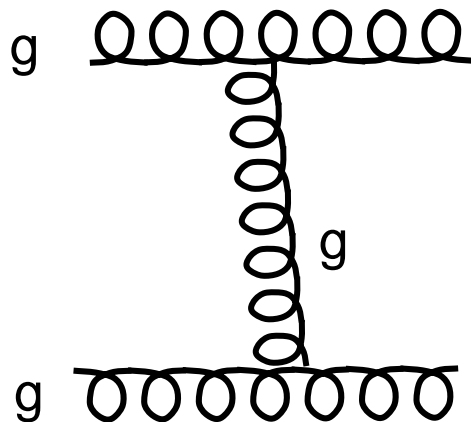
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,82 & 0,55 & -0,150 \\ -0,36 & 0,70 & 0,61 \\ 0,44 & 0,45 & 0,77 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Schwache
Eigenzustände

Massen
Eigenzustände

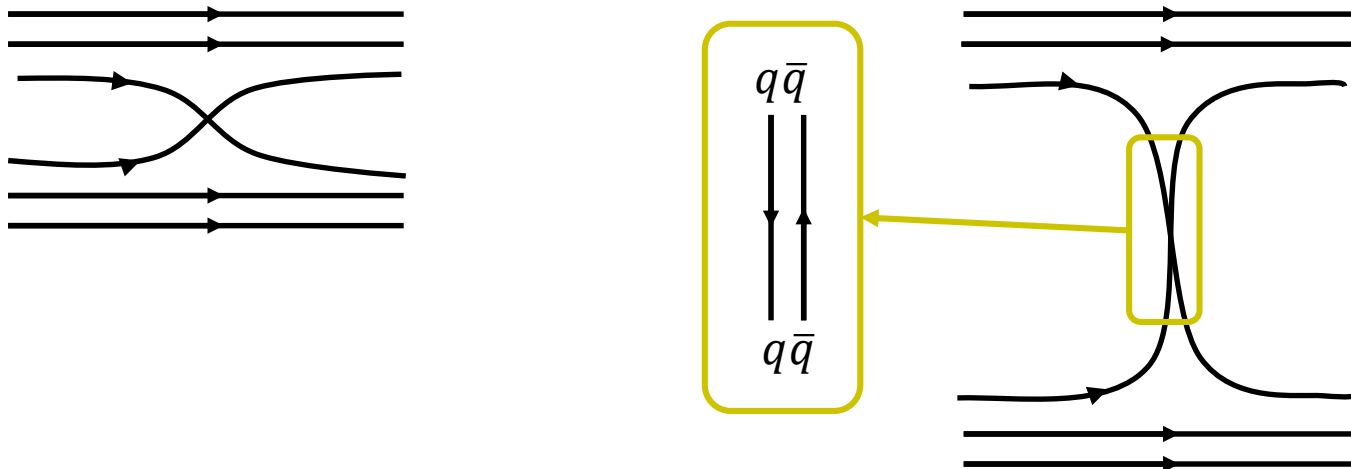
Glukon Selbstwechselwirkung

- ▶ Glukonen besitzen selbst starke Ladung
 - Glukonen können selbst Glukonen abstrahlen

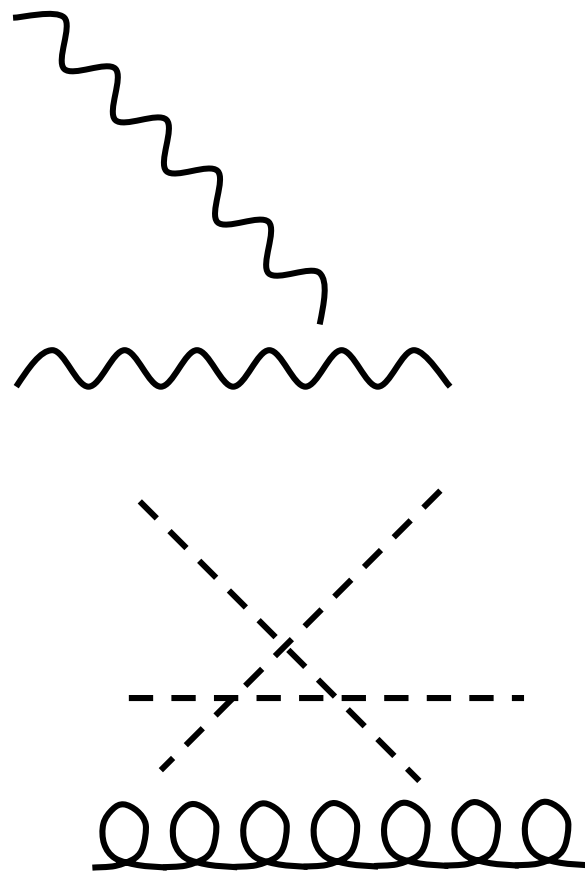
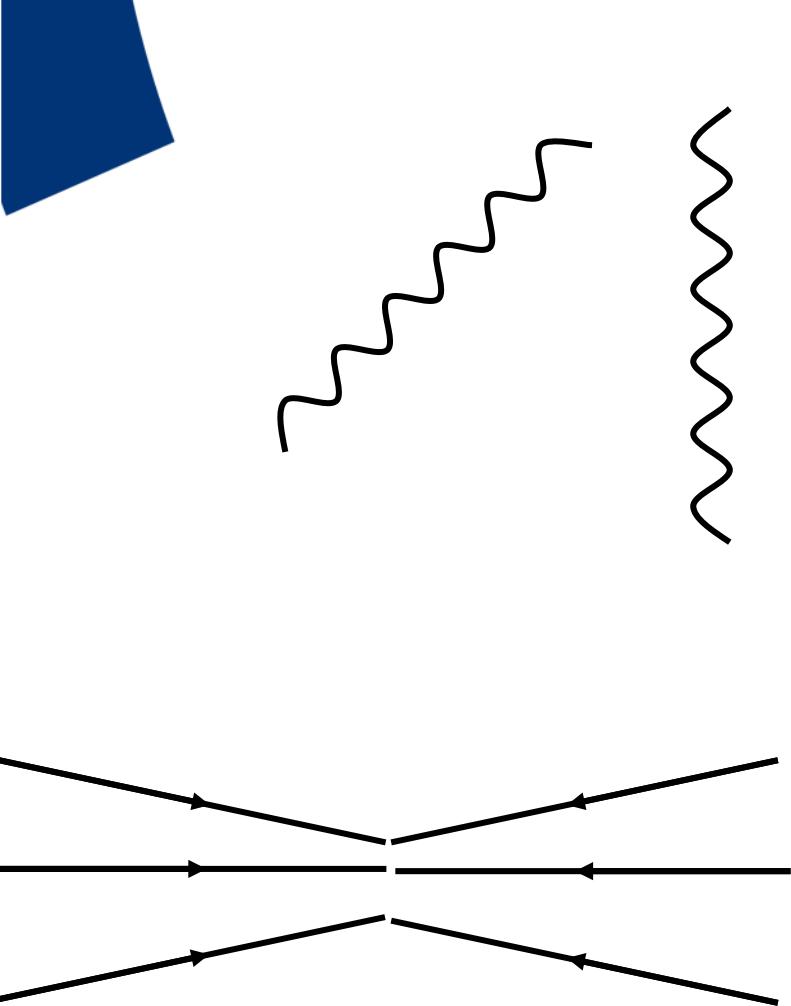


Die Kernkraft (keine eigene fundamentale Kraft)

- ▶ „kovalentes“ Teilen von Quarks
 - Kleine Abstände
- ▶ Austausch von Pionen (gebundene $q\bar{q}$ Zustände)
 - Große Abstände



Feynman Diagramm Tool kit



e^- e^+ γ
 p^- p^+ n^0
 π^- π^+ π^0
 $\bar{\nu}_e$ $\bar{\nu}_\tau$ $\bar{\nu}_\mu$
 W^- W^+

