

# Neue Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik

Philipp Lindenau  
Dresden | 12.03.2016

**Herzlich willkommen!**



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Ziele der Fortbildung

- ▶ 1) Eigenes Wissen über Teilchenphysik erweitern
- ▶ 2) Konkreten Sequenzplan erarbeiten und mit nach Hause nehmen



# Ablauf I

- ▶ 09:45 – 10:45 Fachvortrag I
- ▶ 10:45 – 11:00 Diskussion / Fragen
- ▶ 11:00 – 11:15 *Kaffeepause*
  
- ▶ 11:15 – 12:00 Fachvortrag II
- ▶ 12:00 – 12:15 Diskussion / Fragen
- ▶ 12:15 – 13:00 *Mittagspause*

Vortrag  
1



Vortrag  
2



# Ablauf II

- ▶ 13:00 – 15:00 Gruppenarbeit
- ▶ 15:00 – 15:15 *Kaffeepause*
- ▶ 15:15 – 16:00 Präsentation der Ergebnisse
- ▶ 16:00 – 16:15 Möglichkeiten im NTW
- ▶ 16:15 – 16:30 Evaluation, Ausgabe Zertifikate

Gruppen-  
arbeit

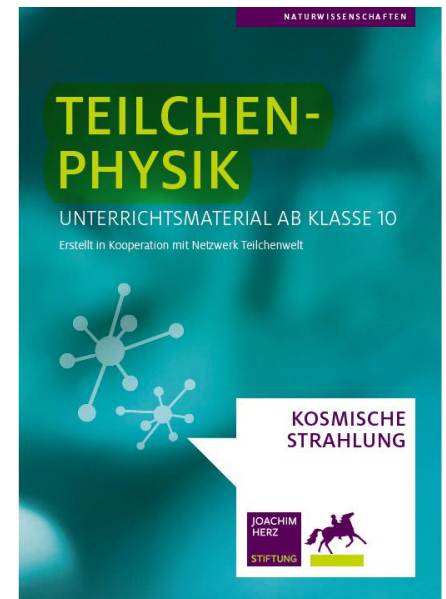


Präsentation

NTW  
Vorstellung

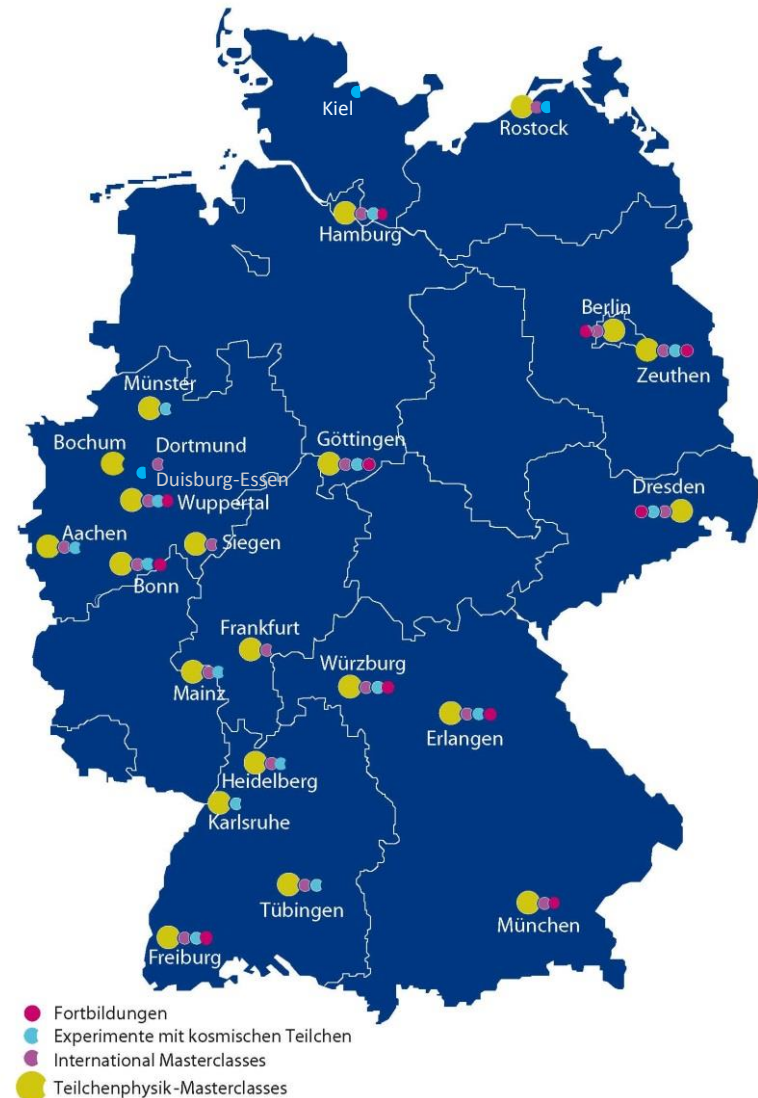
# Grundlage der Fortbildung

- ▶ Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik, erstellt vom Netzwerk Teilchenwelt in Kooperation mit der Joachim-Herz-Stiftung
  - Fachtexte, Aufgaben und Lösungen, Arbeitsblätter, Anknüpfungspunkte an den Lehrplan, Vorkenntnisse, Lernziele, methodische Hinweise, fachliche Hinweise
  - Vier Teile, heute: Konzentration auf Teil 1
    - Teil 1: Wechselwirkungen, Ladungen und Teilchen
    - Teil 2: Forschungsmethoden der Teilchenphysik
    - Teil 3: Kosmische Strahlung
    - Teil 4: Mikrokurse



# Netzwerk Teilchenwelt

- ▶ 24 Standorte in 12 Bundesländern
  - insgesamt 26 Institute + CERN
  - Leitung: TU Dresden
- ▶ Daten aus der Teilchenphysik und Astroteilchenphysik in die Schulen bringen
- ▶ Projektziele:
  - Faszination Teilchenphysik erleben
  - Wissenschaft kommunizieren
  - Forschung vor Ort und im Unterricht
  - Wertschätzung von Erkenntnisgewinn durch Grundlagenforschung



# Materialsammlung

- ▶ Broschüre, 72 S.
- ▶ Hintergrundinformationen und Arbeitsblätter zu
  - Methoden
  - Anwendungen
  - Kosmologie
- ▶ Erhältlich als...
  - Gedruckte Version
  - Download als PDF-Datei

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



# Teilchensteckbriefe

- ▶ 2 Varianten
- ▶ Gelegenheit zu eigenen Aktivitäten
- ▶ Ordnen, diskutieren, vertraut werden



## AUSTAUSCHTEILCHEN

<b>PHOTON</b>  $m = 0$ $q = 0$	<b>W<sup>-</sup>-BOSON</b>  $m = 80\,400 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1$
<b>GLUONEN</b>  $m = 0$ $q = 0$	<b>W<sup>-</sup>-BOSON</b>  $m = 80\,400 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$
	<b>Z<sup>0</sup>-BOSON</b>  $m = 91\,200 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$

<b>UP-ANTIQUARKS</b> <small>NACHWEIS: 1969</small>	
	
<b>ANTIMATERIETEILCHEN</b>	
Masse:	2 MeV/c <sup>2</sup>
Elektrische Ladung:	-2/3
Starke Ladung:	antirod, antigrün, antiblau
Schwache Ladung:	-1/2
Mittlere Lebensdauer:	unbegrenzt

<b>CHARM-ANTIQUARKS</b> <small>NACHWEIS: 1974</small>	
	
<b>ANTIMATERIETEILCHEN</b>	
Masse:	1300 MeV/c <sup>2</sup>
Elektrische Ladung:	-2/3
Starke Ladung:	antirod, antigrün, antiblau
Schwache Ladung:	-1/2
Mittlere Lebensdauer:	10 <sup>-25</sup> s

<b>TOP-ANTIQUARKS</b> <small>NACHWEIS: 1995</small>	
	
<b>ANTIMATERIETEILCHEN</b>	
Masse:	173 000 MeV/c <sup>2</sup>
Elektrische Ladung:	-2/3
Starke Ladung:	antirod, antigrün, antiblau
Schwache Ladung:	-1/2
Mittlere Lebensdauer:	6 · 10 <sup>-25</sup> s



# LEIFI Physik Portal

JOACHIM  
HERZ  
STIFTUNG



[www.leifiphysik.de/themenbereiche/teilchenphysik](http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/teilchenphysik)

- seit 9/2013 mit Joachim Herz Stiftung
- über 40 Seiten Texte u. Animationen

Wechselwirkung	Starke Wechselwirkung	Schwache Wechselwirkung	Elektromagnetische Wechselwirkung	Gravitation
Beispiele für Wirkung	Zusammenhalt des Protons	Betazerfall: Ein Proton wandelt sich in ein Neutron um (oder umgekehrt). Kernfusion: In der Sonne verschmelzen vier Protonen zu einem Heliumkern.	Magnetismus, Licht, ... Chemische Bindungen; Photoeffekt	Anziehung zwischen Massen; Schwerkraft; Umlauf der Planeten um
Reichweite	$10^{-16}$ m (Protonendurchmesser)	$10^{-18}$ m ( $\frac{1}{1000}$ Protonendurchmesser)	unbegrenzt	unbegrenzt
Botenteilchen	Gluonen	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$	Photon	
Ladung	Starke Ladung (Farbladung)	Schwache Ladung	Elektrische Ladung	
Kopplungsstärke/-konstante	$\alpha_g = \frac{1}{8}$	$\alpha_w = \frac{1}{30}$	$\alpha_{em} = \frac{1}{137}$	$\alpha_g \sim 10^{-44}$

## Photon - das Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung

Das Botenteilchen der **elektromagnetischen Wechselwirkung** ist das **Photon**.



Die folgende Animation soll die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen zwei geladenen Elementarteilchen durch den Austausch von Photonen darstellen.



Grundwissen | Versuche | Aufgaben | Ausblicke | Geschichte | Weiterführende Links

• Mehr anzeigen

Die 12 Bausteinteilchen lassen sich zunächst in drei Generation (oder auch: Familien; in der Tabelle rechts die drei Spalten) einteilen. Die drei Generationen beinhalten jeweils sehr ähnliche Teilchen, lediglich die Masse der Teilchen ändert sich zwischen den Generationen erheblich.

Am geläufigsten sind die Mitglieder der 1. Generation in der 1. Spalte, denn sie sind die Grundbausteine der Materie, mit der man gewöhnlich in Berührung kommt: Für den Aufbau der Nukleonen und somit des Atomkerns dienen die Quarks  $u$  und  $d$ . Von den Leptonen gehört zur 1. Generation das Elektron  $e$ , das die Hülle eines Atoms aufbaut sowie das nahezu masselose Elektron-Neutrino  $\nu_e$ , das von den  $\beta$ -Zerfällen her bekannt ist und auch in großer Zahl von der Sonne zur Erde gelangt.

Die Mitglieder der 2. und 3. Generation in der 2. und 3. Spalte treten nur unter extremen Bedingungen auf, wie sie z.B. in Teilchenbeschleunigern oder in den oberen Schichten unserer Atmosphäre herrschen, wo die kosmische Strahlung auf Teilchen in unserer Atmosphäre trifft. Die Mitglieder der 3. Generation besitzen im Vergleich zu ihren Verwandten eine sehr große Masse und können daher nur in Teilchenbeschleunigern nachgewiesen werden, denn man benötigt sehr hohe Energien um diese Teilchen zu erzeugen.

Man kann die 12 Teilchen aber auch nach ihrer Ladung in verschiedene Gruppen einteilen (in der Tabelle rechts die drei Zeilen), wodurch ein erstaunlich übersichtliches Schema entsteht. Je höher die Teilchen in der Tabelle stehen, desto mehr unterschiedliche Ladungen besitzen sie.

Die **elektrisch neutralen Leptonen** in der untersten Zeile tragen lediglich eine schwache Ladung. Somit werden sie "nur" von der **schwachen Wechselwirkung** beeinflusst und tauschen "nur" die Botenteilchen  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  aus.

Die **elektrisch geladenen Leptonen** in der mittleren Zeile tragen zusätzlich eine **elektrische Ladung**. Somit werden sie auch von der **elektromagnetischen Wechselwirkung** beeinflusst und tauschen neben  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  auch **Photonen** als Botenteilchen aus.

Die **Quarks** in der obersten Zeile schließlich tragen auch noch eine **starke Ladung**. Sie werden also zusätzlich von der **starken Wechselwirkung** beeinflusst und tauschen somit außer Photonen und  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  **Gluonen** als Botenteilchen aus.

Das gleiche Bild ergibt sich für die jeweiligen Antiteilchen. Hier sind lediglich alle Ladungen umgekehrt, statt einer elektrischen Ladung von  $+$  trägt das

1. Generation

Quarks

2. Generation

Quarks

3. Generation

Quarks

stark  
(Gluonen)

$e^-$

Elektrisch geladene Leptonen

$\mu^-$

Elektrisch geladene Leptonen

$\tau^-$

Elektrisch geladene Leptonen

schwach, elektromagnetisch  
( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ )  
(Photon)

$\nu_e$

Elektrisch neutrale Leptonen

$\nu_\mu$

Elektrisch neutrale Leptonen

$\nu_\tau$

Elektrisch neutrale Leptonen

Übersicht über die Bausteinteilchen der **Materie**

# Unterrichtsmaterial



▶ 300 Seiten Texte für Lehrkräfte und Schüler, Aufgaben, Arbeitsblätter uvm., dazu:

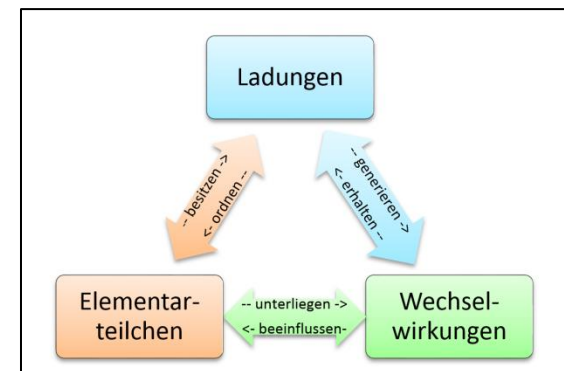
- Anknüpfung an den Lehrplan
- Lernziele
- Methodische und fachliche Hinweise
- Spiralcurriculum

▶ 4 Kapitel

- **Wechselwirkungen, Ladungen und Teilchen**
- Forschungsmethoden der TP
- Kosmische Strahlung
- Mikrokurse

... Dazu jetzt mehr ...

	1. Generation	$I$	$q$
elektrisch neutrale Leptonen		$+1/2$	$0$
elektrisch geladene Leptonen		$-1/2$	$-1$
Quarks		$+1/2$	$+2/3$
		$-1/2$	$-1/3$
	blau    rot    grün		



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

ORIGINALSCHAUPLATZ



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

JOACHIM  
HERZ  
STIFTUNG





09:45 – 10:045 Uhr

# Fachvortrag I

# Was ist Physik?



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





# Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

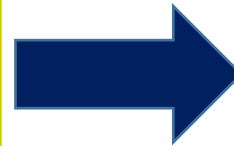
- ▶ **Newtonsche Mechanik** (17. Jhd.): „irdische“ Fallgesetze (Galilei) und Bewegung der Himmelskörper (Kepler) als Folgen der Gravitation
- ▶ **Elektromagnetismus** (19. Jhd.): Zusammenfassung elektrischer und magnetischer Phänomene durch J. C. Maxwell
- ▶ **Relativitätstheorie** (20. Jhd.): Vereinheitlichung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

# Reduktion

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

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

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



**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**

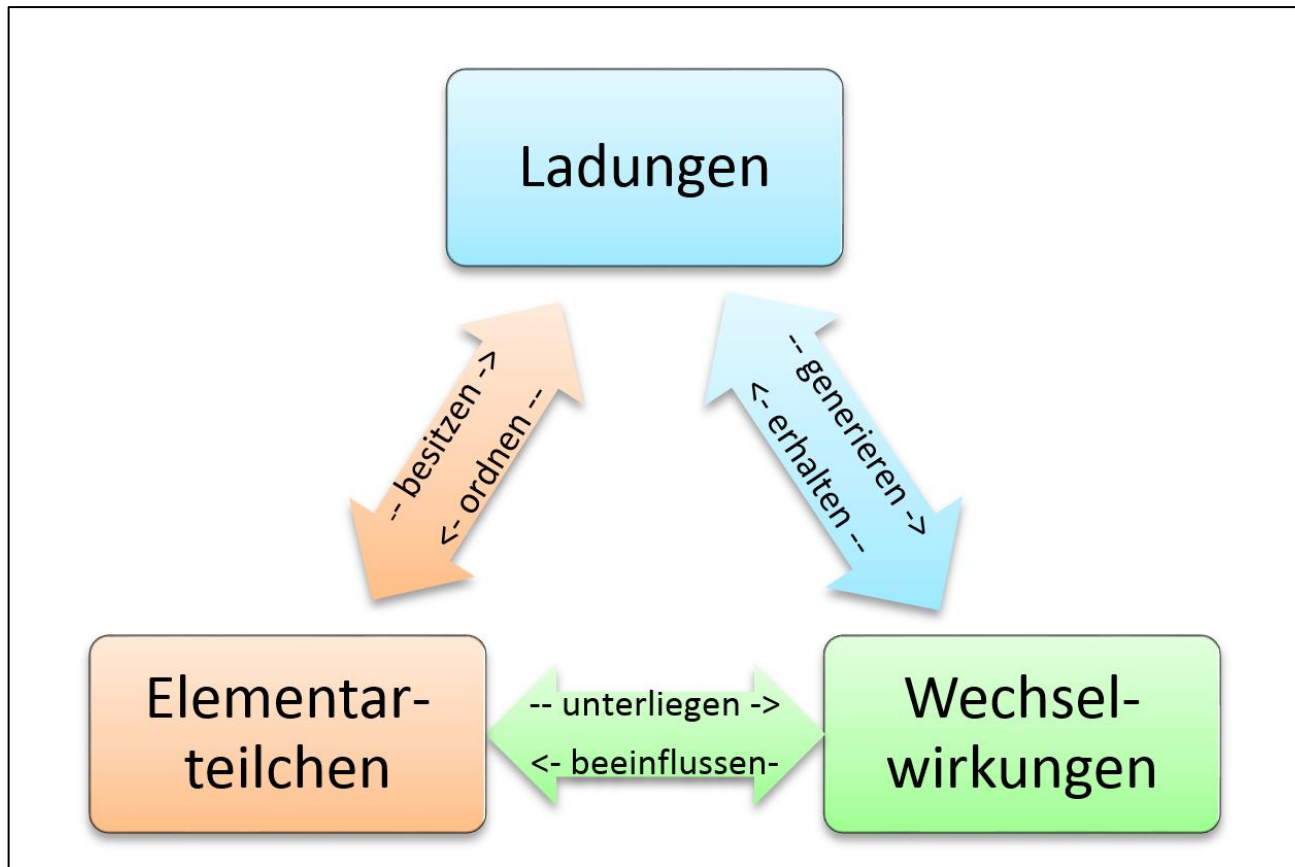


# Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ▶ In den 1960er und 1970er Jahren entwickelt
- ▶ Seitdem in zahlreichen Experimenten überprüft und bestätigt
- ▶ Präziseste Beschreibung der Vorgänge in unserem Universum, die uns aktuell zur Verfügung steht
- ▶ Elegantes Theoriegebäude mit großer Vorhersagekraft angereichert durch experimentelle Erkenntnisse



# Die drei Grundpfeiler des Standardmodells





# Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ▶ Grundlage: fundamentale Symmetrien (lokale Eichsymmetrien)
  - Ladungen und Wechselwirkungen
  - nicht: Spektrum der existierenden Elementarteilchen, dies ist rein experimentelle Erkenntnis
  
- ▶ **Fundamentale Bedeutung des Ladungsbegriffs!**

# 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??

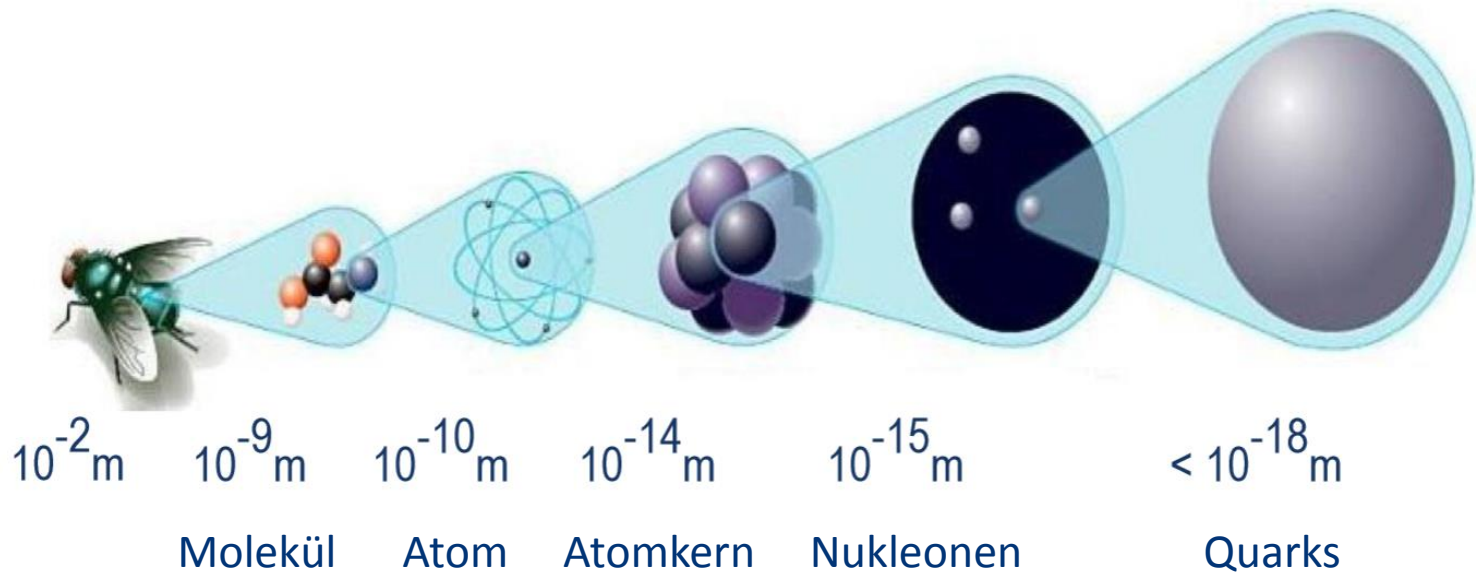
- Nur u,d,e sind für Aufbau der Materie nötig
- Warum es genau diese Teilchen gibt, kann nicht vorhergesagt werden (nicht verstanden!)
- Das Standardmodell ist eine **Theorie der Wechselwirkungen**

Three generations of matter (fermions)

	I	II	III		
mass	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	7 GeV/c <sup>2</sup>
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
name	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon	<b>H</b> Higgs boson
	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
Quarks	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon	
	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
Leptons	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> W boson	

Gauge bosons

# Größenordnungen in der Teilchenphysik

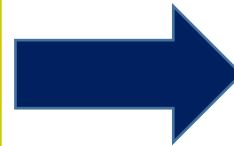


# Reduktion

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

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

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



**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**

# Basiskonzept Wechselwirkung

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

## ► Umfasst die Phänomene

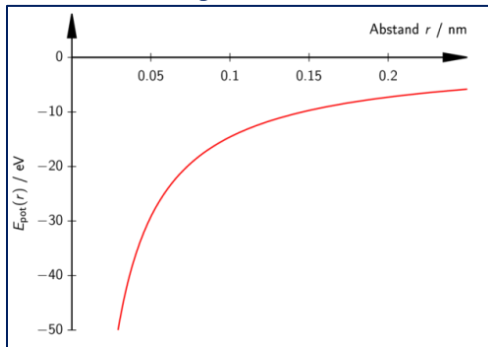
- Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B.  $\beta$ -Umwandlung)
- Erzeugung von Materie+Antimaterie (z.B. Elektron+Positron)
- Vernichtung in Botenteilchen (z.B. PET: 2 Photonen)

## ► Begriffe **Kraft** und **Wechselwirkung** sind klar zu trennen

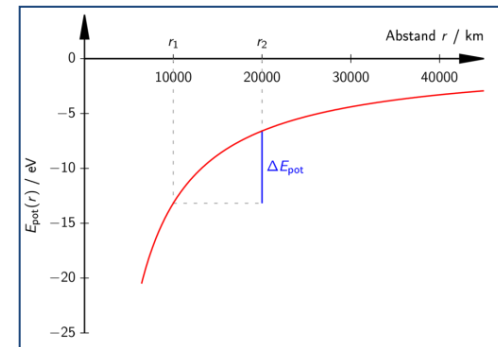
## ► Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

# Ausgangspunkt: Beschreibung der Vorgänge mit 2 bekannten Wechselwirkungen

## ► Elektromagnetische WW

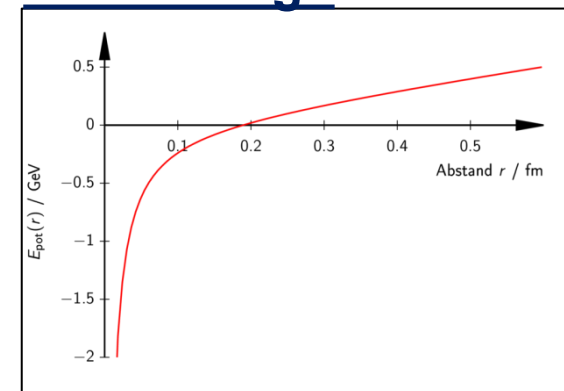


## ► Gravitation



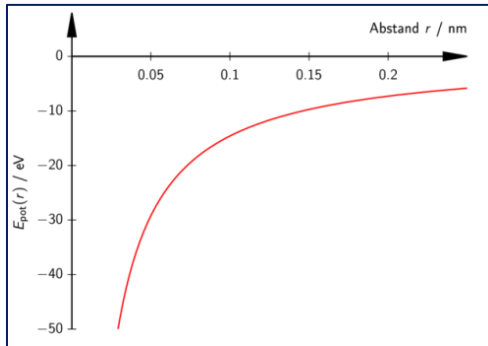
► Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen? ( $r \sim \text{fm}$ )

## ► Einführung: starke WW

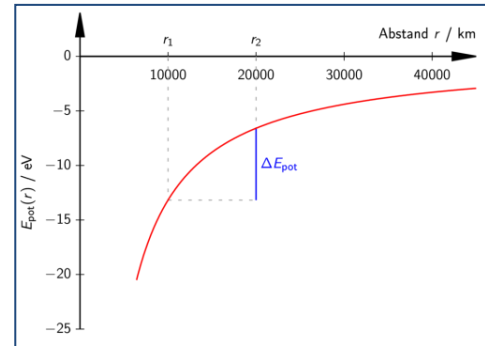


# Die vierte fundamentale Wechselwirkung

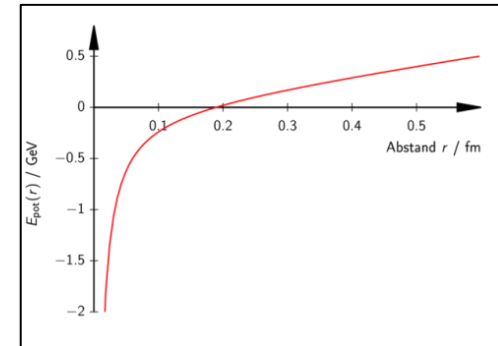
## ▶ Elektromagnetische WW



## ▶ Gravitation

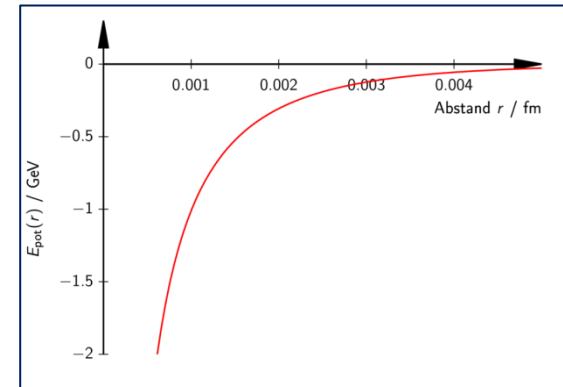


## ▶ starke WW



## ▶ Warum scheint die Sonne seit nunmehr über vier Milliarden Jahren? ▶ Einführung: schwache WW

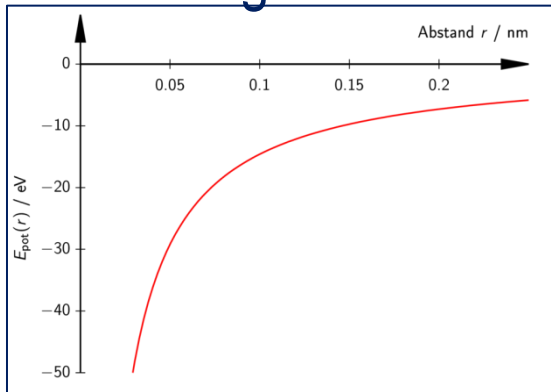
Umwandlung  $2p \rightarrow 2n$   
 $(4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2n_e)$   
 passiert **innerhalb** des Protons  
 $r \sim 0.001 \text{ fm}$



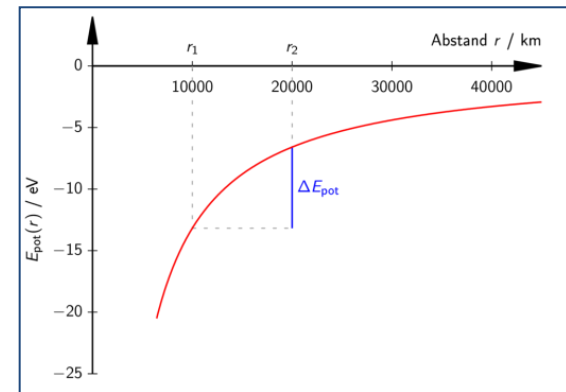


# Vergleich der potenziellen Energien

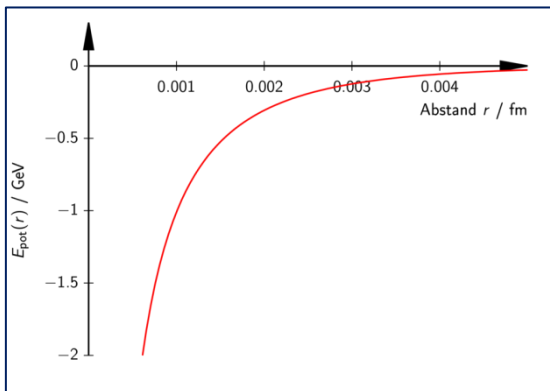
## ► Elektromagnetische WW



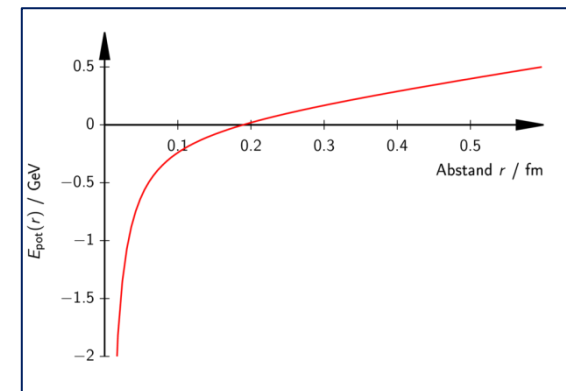
## ► Gravitation



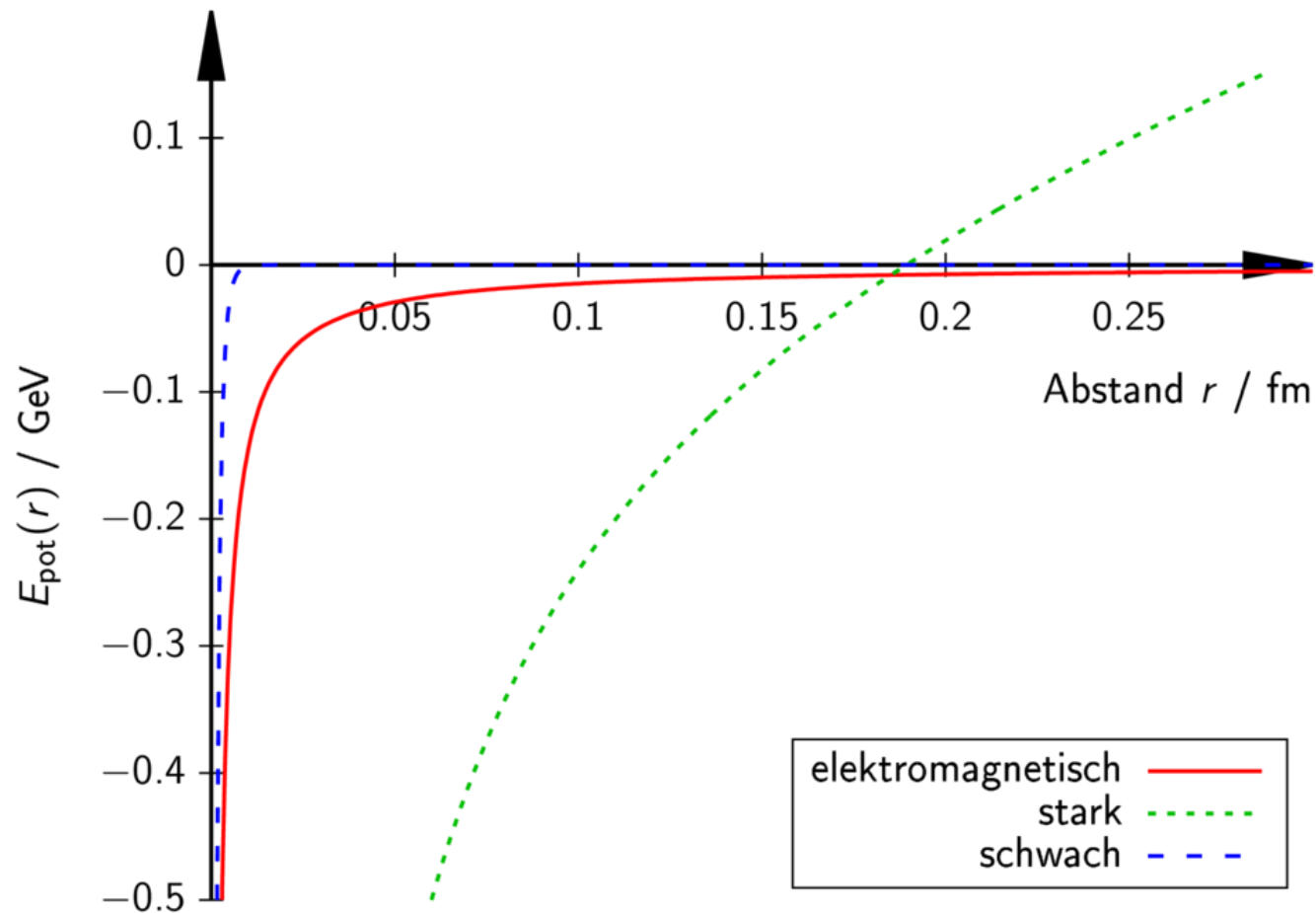
## ► schwache WW



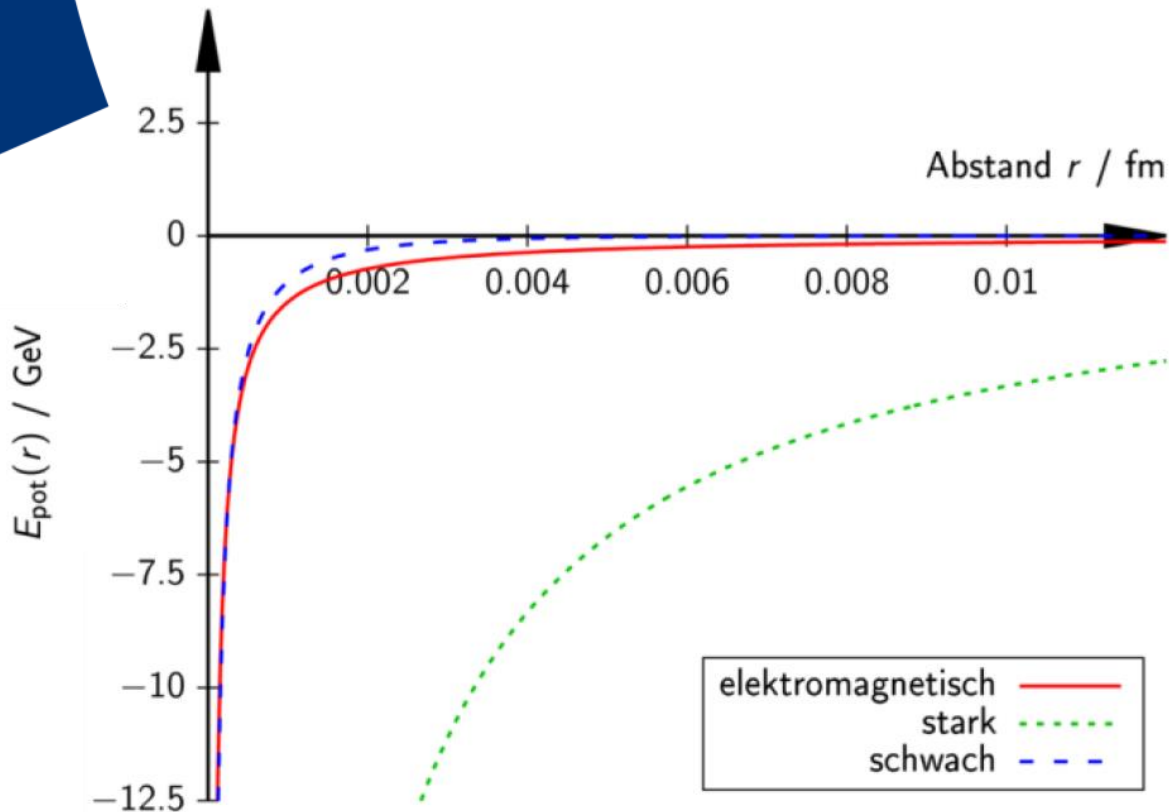
## ► starke WW



# Vergleich der potenziellen Energien

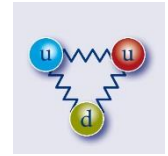
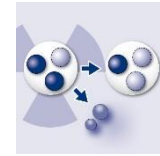


# Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen



- ▶ Erkennbar: mit wenigen, ähnlichen Prinzipien die Vorgänge der Welt beschreiben
- ▶ Das Konzept der Ladung (elektrische Ladung) sollte erweitert werden

# Erweiterung: Konzept der Ladung



## ► Coulombsches Gesetz

$$\text{► } F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

- Mit  $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$  Kopplungsparameter (historisch: Feinstrukturkonstante)
- Übergang zur Quantenphysik! ( $\epsilon_0 \rightarrow \hbar c$ )

## ► Einführung Kopplungsparameter $\alpha$ auch für andere Wechselwirkungen

$$\text{► } \alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$$

# Basiskonzept der Ladung



- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:

- Elektrische Ladung

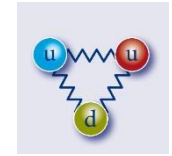
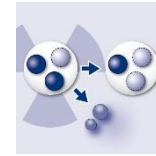
$$Q = q \cdot e$$

Elektrische  
Ladungszahl

Elementarladung

- ▶ Elementarladung ist nun im Kopplungsparameter  $a$  enthalten (ist damit Eigenschaft der Wechselwirkung!)
- ▶ Die Teilcheneigenschaft ist eigentlich nur die Ladungszahl (analog zur üblichen Kernladungszahl  $Z$ )

# Erweiterung: Konzept der Ladung



- ▶ Einführung: Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft

## ▶ Bekannt:

- Elektrische Ladung

## ▶ Neu:

- Schwache Ladung
- Starke (Farb-)Ladung

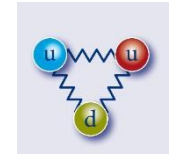
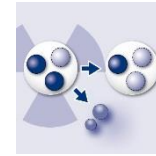
elektrische Ladungszahl  $q$

schwache Ladungszahl  $I$

starker Farbladungsvektor  $\vec{C}$

- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv oder negativ sein

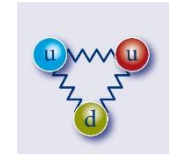
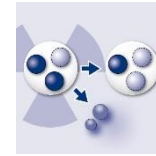
# Erweiterung: Konzept der Ladung



- ▶ Kopplungsparameter der Gravitation zwischen Teilchen1 und Teilchen2:  $\alpha_{grav}^{12} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{\hbar c}$
- ▶ Beispiel:  $\alpha_{grav}$  zwischen Proton (p) und Elektron (e)

- $\alpha_{grav}^{p e} = G \cdot \frac{m_p \cdot m_e}{\hbar c} \approx \frac{1}{3 \cdot 10^{41}}$
- Erinnerung:  $\alpha_{em}^{p e} \approx \frac{1}{137}$
- 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:

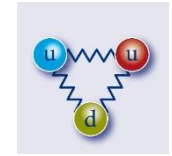
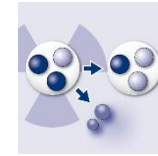
- Masse ist keine Erhaltungsgröße
- Produkt zweier Massen  $m_1 \cdot m_2$  kann nicht negativ sein

## ► Theorie:

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



# Konzept der Ladung



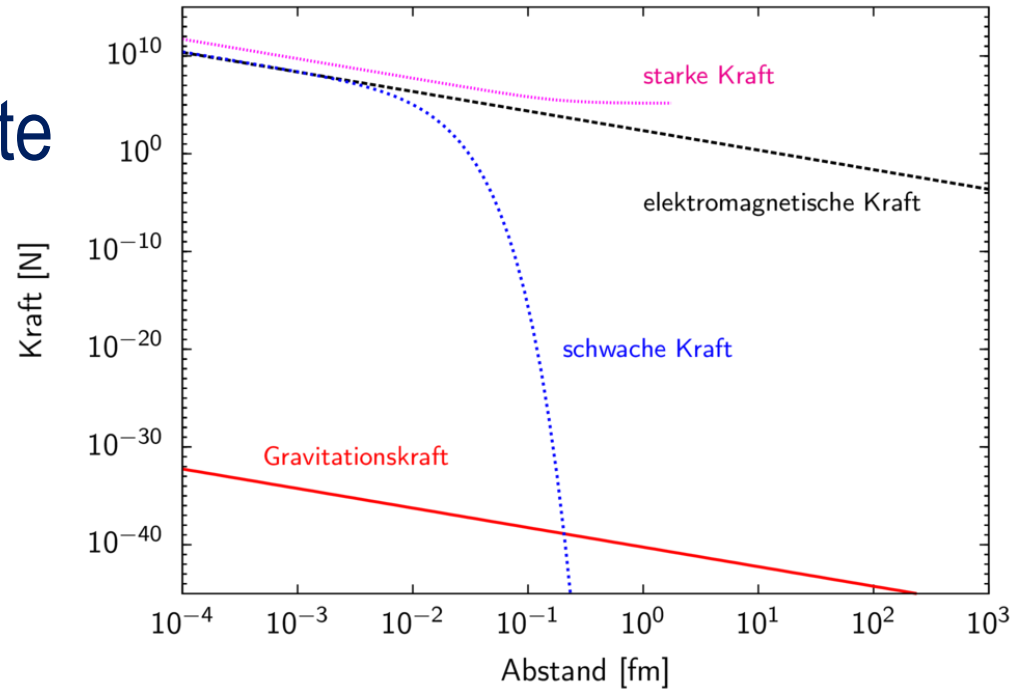
- ▶ Ladungen sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ Teilchen nehmen nur dann an einer bestimmten WW teil, wenn sie die Ladung der entsprechenden **Wechselwirkung** besitzen

Und:

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

# Vergleich der Kräfte

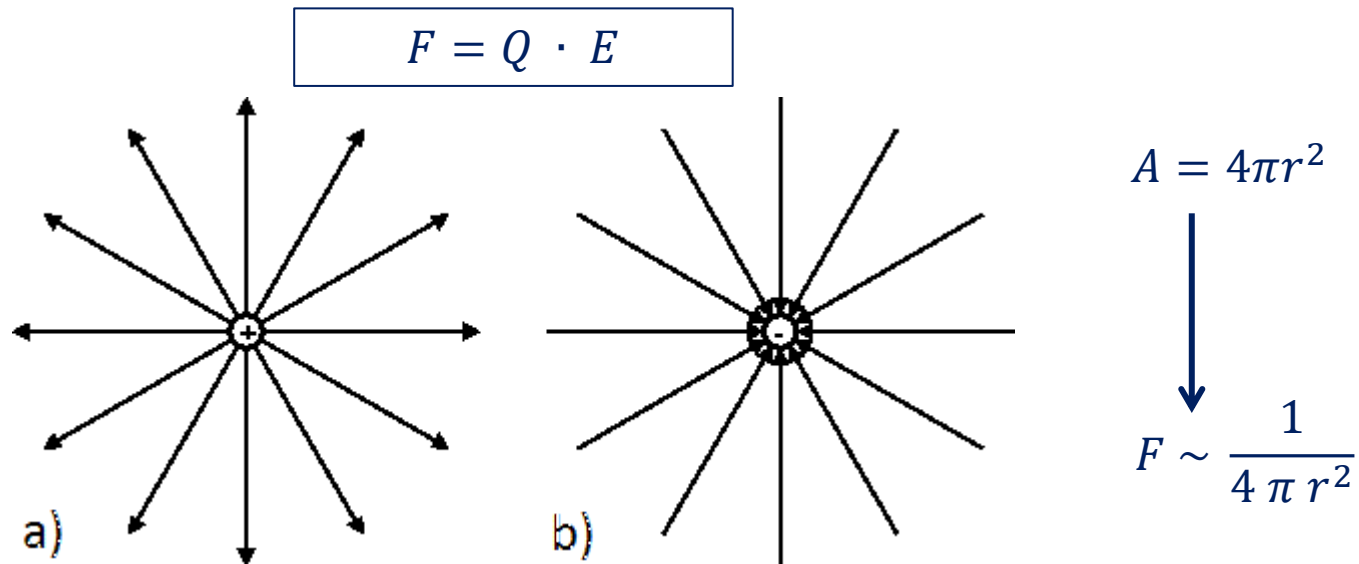
- Tiefe Einsicht:  
Alle  $\sim \frac{1}{r^2}$  für kleine  $r$



Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter $\alpha$
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$F_S = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$
schwach	$F_W = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

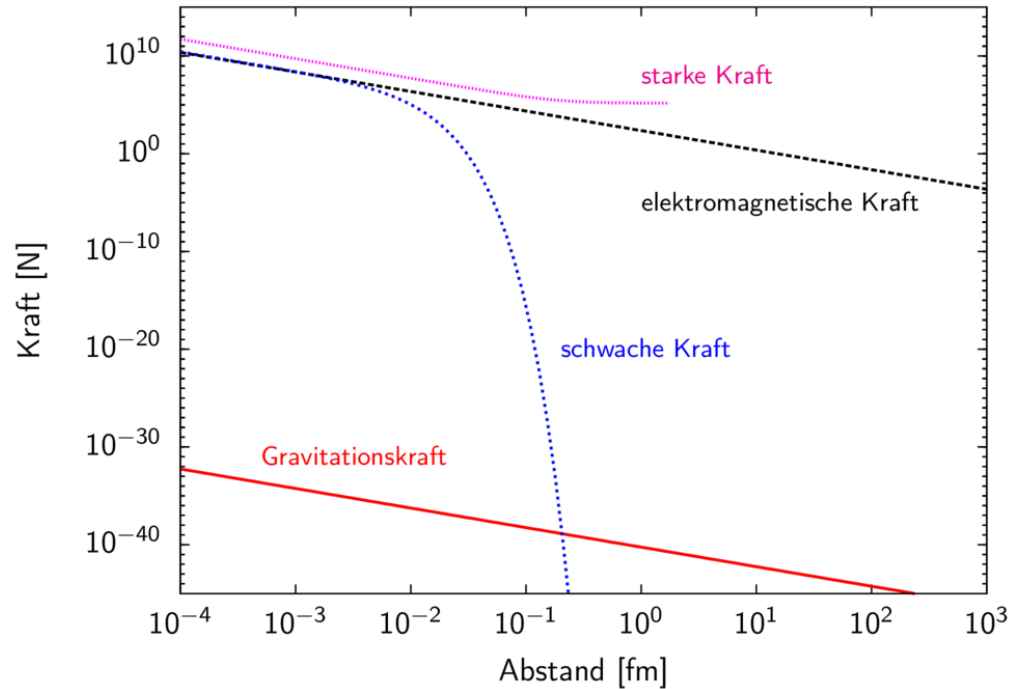
# Geometrische Betrachtung

- ▶ Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW  
**Dichte** der Feldlinien ist **proportional** zur **Stärke** der Kraft



# Reichweiten der Kräfte

- Unendlich: im Alltag spürbar
- Endlich: nur subatomar



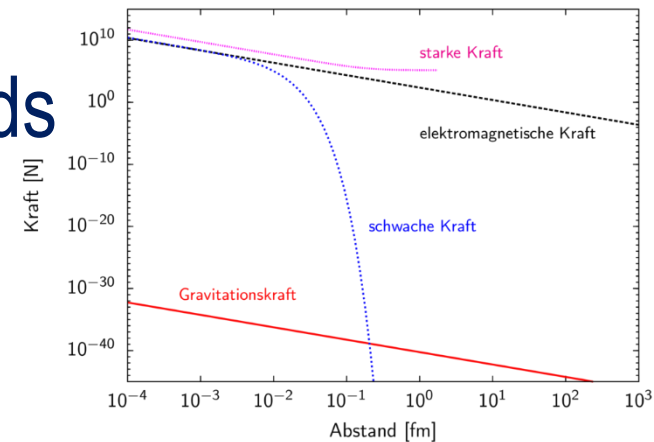
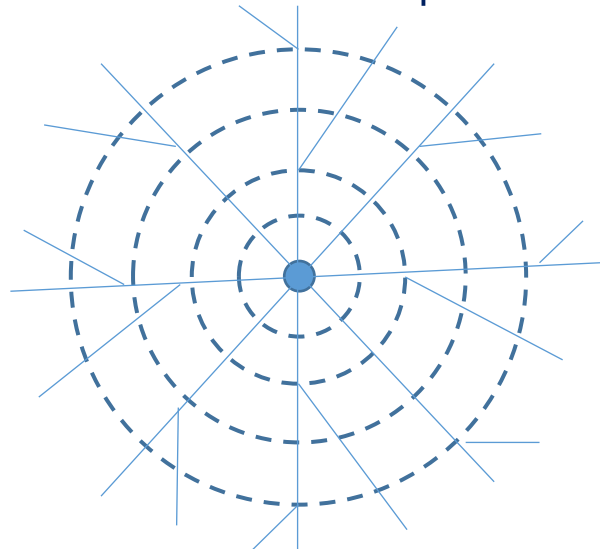
Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter $\alpha$
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$F_S = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$
schwach	$F_W = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

# Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

► Ungewöhnliche Feldlinien für WW, deren Kräfte zunächst  $F \sim 1/r^2$  folgen, dann aber abweichen:

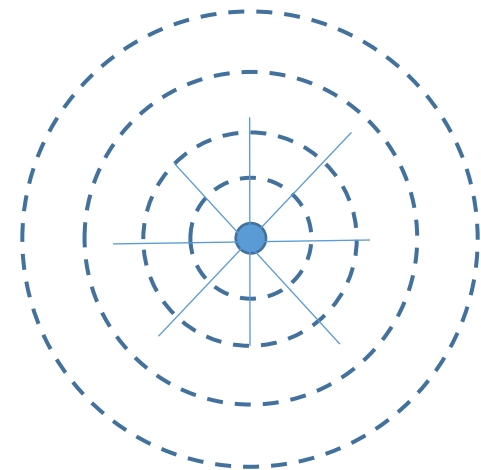
► stark

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



schwach

Kraft strebt rasch gegen Null  
Feldlinien enden „im Nichts“



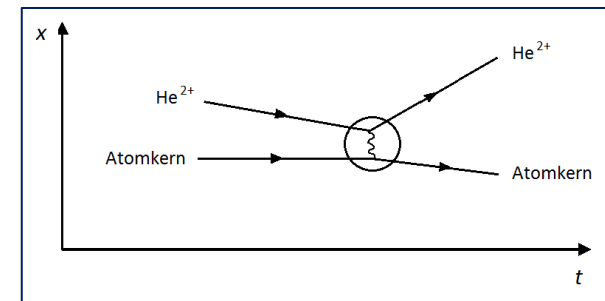
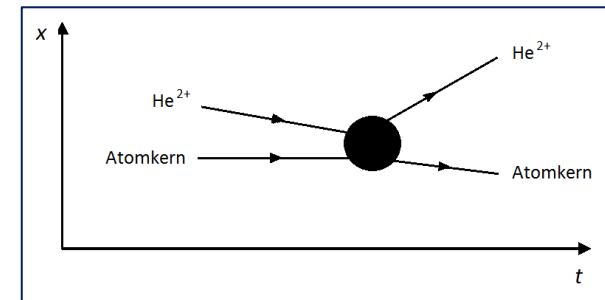
# Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

## ► Makroskopisch:

- Feldliniendichte --> Feldstärke --> Kraft in ausgedehnten Feldern
- klassische Bahnen berechenbar

## ► Mikroskopisch:

- Wechselwirkung ohne Bahnbegriff (z.B. Streuung: Unbestimmtheit von Ort u. Zeit)
- Messbar sind nur (für jedes Teilchen)
  - Energie  $E$  und Impuls  $\vec{p}$  **vorher**
  - Energie  $E$  und Impuls  $\vec{p}$  **nachher**
  - Energiedifferenz  $\Delta E$  und Impulsdifferenz  $\Delta \vec{p}$  wird durch Botenteilchen übertragen



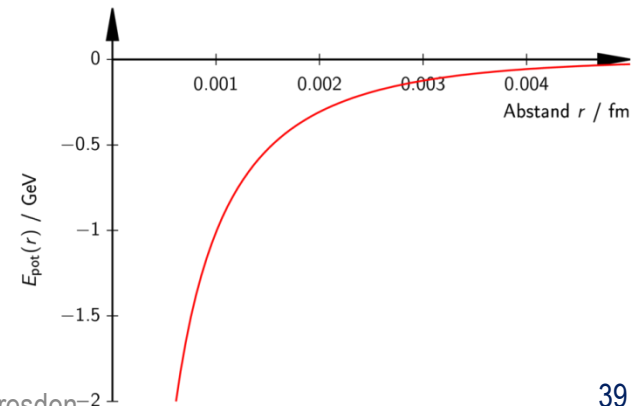
# Endliche Reichweiten

## ► Schwache Wechselwirkung

- **Massereiche Botenteilchen** (W- und Z-Teilchen): ergeben endliche Reichweite
  - Heisenberg'sche Unschärferelation
  - Exakte Argumentation schwierig
  - Mathematische Herleitung möglich (Feynman-Propagatoren), liegt außerhalb der hier behandelten Themen
- **Klassisches Analogon: Abschirmung von Feldlinien**
  - Abschirmung von (unendlichen) Feldlinien durch entgegengesetzte Feldlinien
  - Brout-Englert-Higgs Feld (BEH-Feld) schirmt schwache Ladungen ab

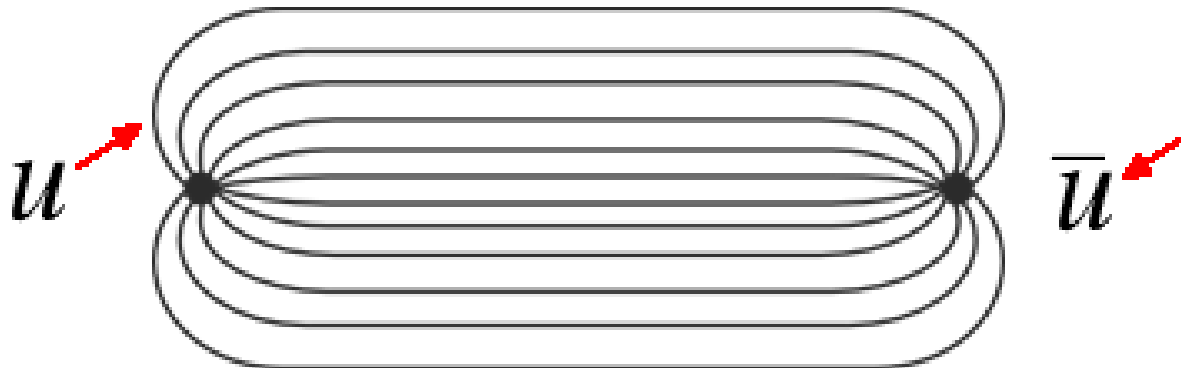
$$\text{► } E_{Pot}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_W \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_W}}$$

$$\text{► Mit } \lambda_W = \frac{\hbar}{m_W c} \approx 0,0024 \text{ fm}$$



# Endliche Reichweiten

- ▶ Starke Wechselwirkung wird vermittelt durch masselose Botenteilchen (Gluonen)
- ▶ Aber: Gluonen sind selbst stark geladen, wechselwirken also miteinander



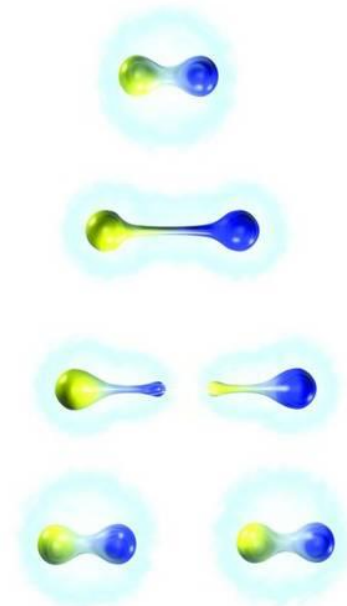
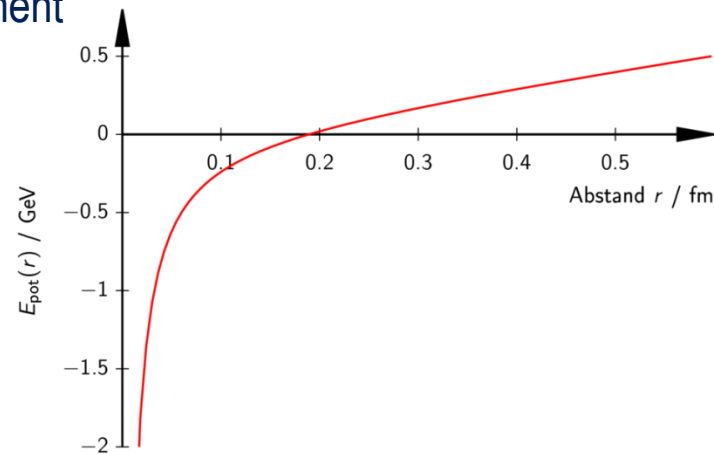


# Endliche Reichweiten

▶ Starke Wechselwirkung: Confinement („Eingesperrtheit“)

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

- Linearer Term, ab  $r \approx 1$  fm
- Im Feld gespeicherte Energie steigt streng monoton
- Genügend Energie um neue Teilchen(-paare) zu erzeugen!
- Begriff: Confinement

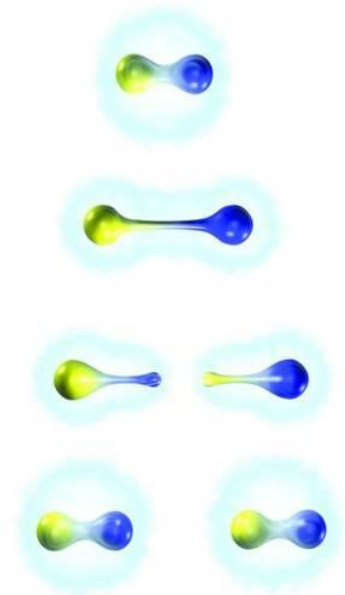


# Endliche Reichweiten

## ► Confinement

## ► Beispielrechnung: Separation eines Quark-Anti-Quark-Paares

- $W = k \cdot \Delta r = 930 \frac{\text{MeV}}{\text{fm}} \cdot \mathbf{0,7 \text{ fm}} = 650 \text{ MeV}$
- Folgerung: Bereits bei einer zusätzlichen Separation von  $\Delta r = \mathbf{0,7 \text{ fm}}$  über den typischen Bindungsabstand von  $r \approx 0,3 - 1,3 \text{ fm}$  hinaus können neue Quark-Anti-Quark-Paare entstehen.



# Endliche Reichweiten: Botenteilchen

## ▶ Stark: Gluonen

- Masselos
- Besitzen selber starke Ladung
- Gluonen können selber Gluonen abstrahlen (im Gegensatz zu Photonen)
- Feldliniendichte bleibt konstant

## ▶ Schwach: „Weakonen“ (W und Z-Teilchen)

- Große Masse
- Quantenmechanik --> Endliche Reichweite
- Masse entsteht durch BEHiggs-Hintergrundfeld
- Abschirmung der Feldlinien (analog: Dielektrikum)

# Zusammenfassung: Wechselwirkungen

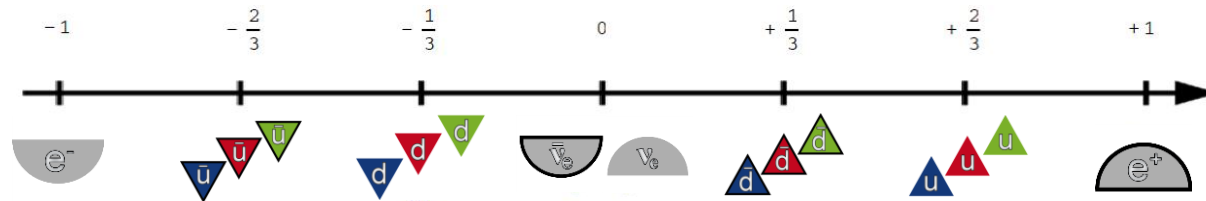
- ▶ Alle bekannten Vorgänge im Universum lassen sich auf 4 fundamentale Wechselwirkungen zurückführen
  - (Gravitation, elektromagnetische, schwache und starke WW)
- ▶ 3 dieser WWn werden im Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben **und besitzen sehr ähnliche Grundprinzipien**
- ▶ Nur 2 WWn besitzen eine unendliche Reichweite, während die beiden anderen auf subnukleare Abstände beschränkt sind

→ **Die Wechselwirkungen des Standardmodells werden durch Ladungen hervorgerufen**

# Elektrische Ladung

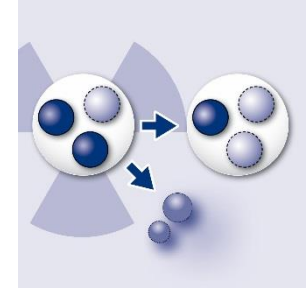


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen  $q$  einiger Anti-/Materieteilchen

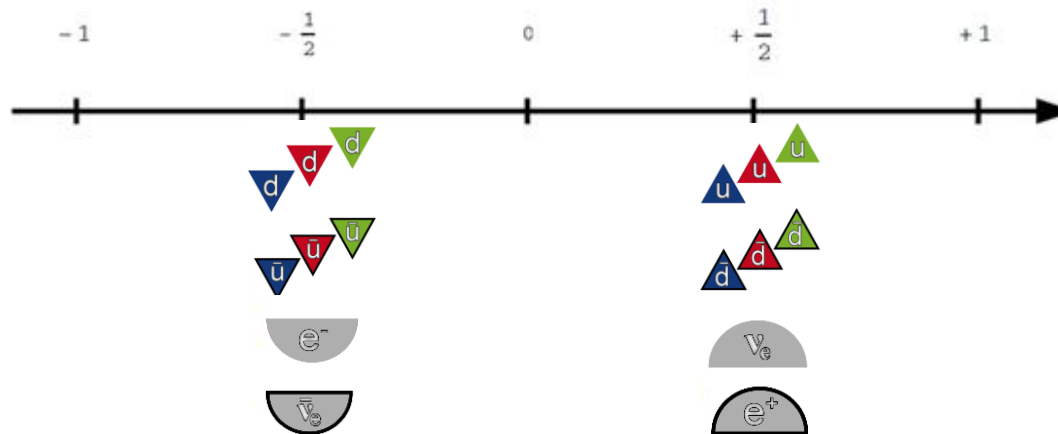


- Elektrische Ladung ist gequantelt

# Schwache Ladung



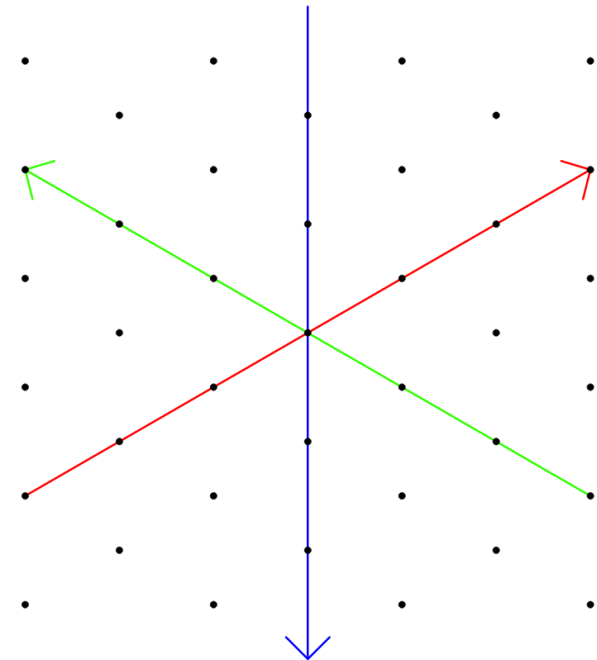
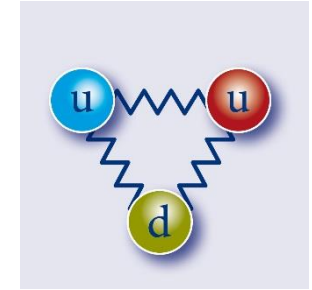
- ▶ Materieteilchen besitzen entweder eine schwache Ladungszahl von  $I = +\frac{1}{2}$  oder  $I = -\frac{1}{2}$ 
  - alle Materieteilchen nehmen an der schwachen WW teil



- ▶ Schwache Ladung ist gequantelt

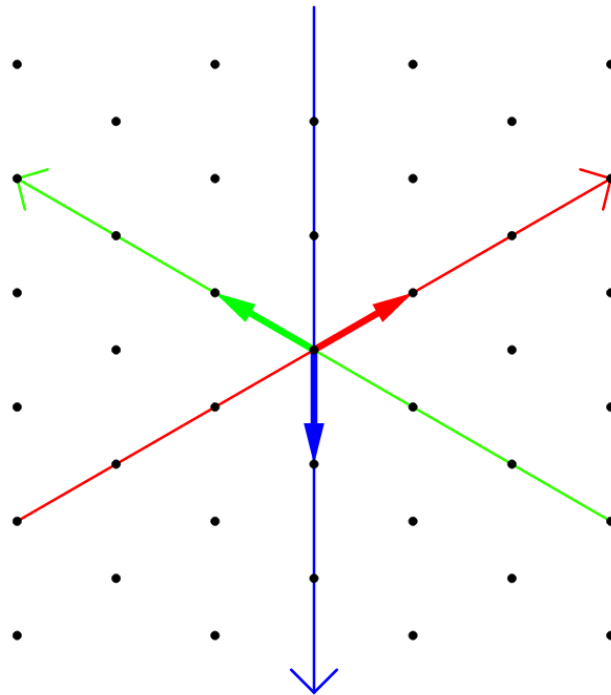
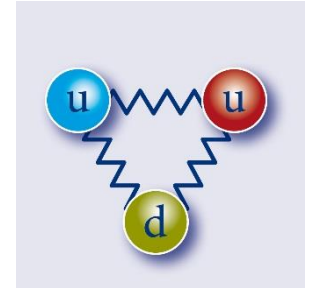
# Starke Ladung

- ▶ Quarks und Anti-Quarks besitzen eine starke Ladung (auch: „Farbladung“)
  - Protonen und Neutronen bspw. bestehen aus Quarks
- ▶ Ladung mit Vektorcharakter: Farbgitter



# Starke Ladung

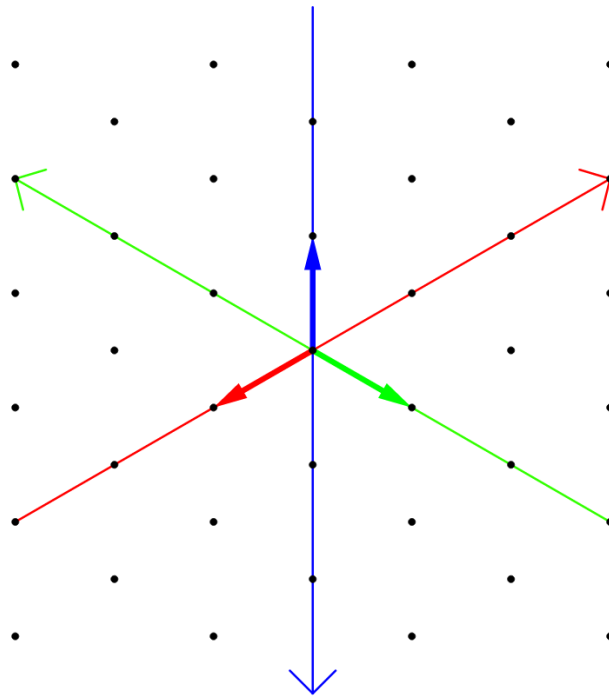
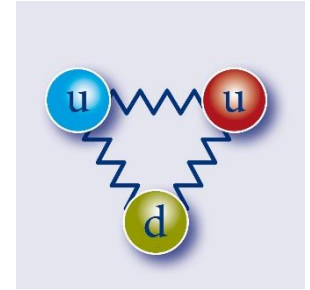
## ► Farbladungsvektoren von Quarks

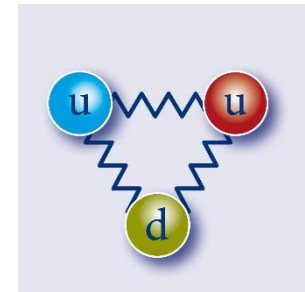
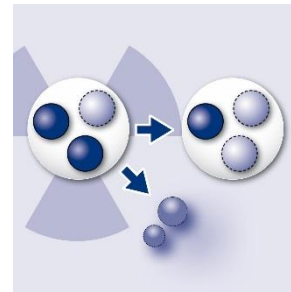




# Starke Ladung

## ► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





- ▶ Alle drei Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

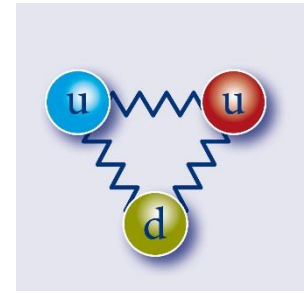
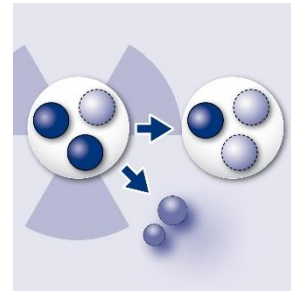
$$q_p = q_u + q_u + q_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

$$\vec{C}_p = \vec{C}_u + \vec{C}_u + \vec{C}_d = \color{red}{\rightarrow} + \color{green}{\rightarrow} + \color{blue}{\downarrow} = \color{red}{\rightarrow} + \color{green}{\rightarrow} = \vec{0}$$



- ▶ Alle drei Ladungen sind erhalten

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

- Elektrische Ladungszahl:

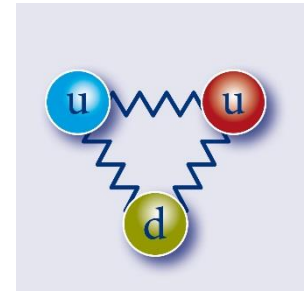
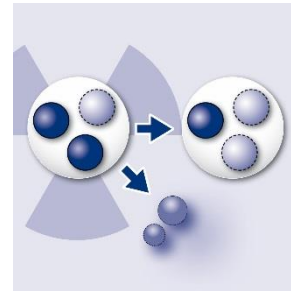
$$0 \rightarrow +1 - 1 + 0 = 0$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

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

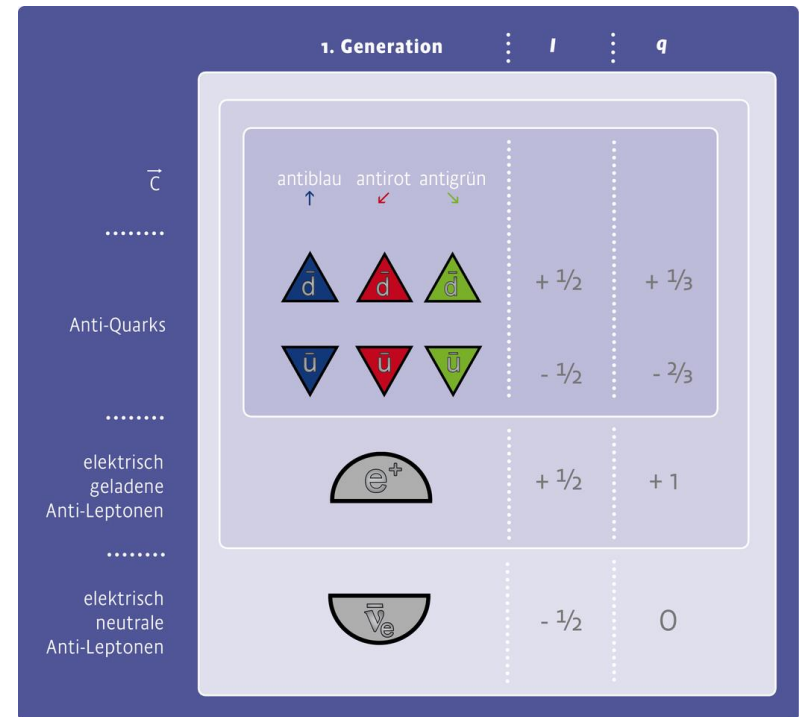


▶ Alle drei Ladungen sind erhalten

➔ mit Energie- und Impulserhaltung ist eine **Vorhersage** möglich, ob bestimmte Prozesse erlaubt oder unmöglich sind

# Übersichten

## ► Antimaterie: Alle Ladungen entgegengesetzt



# Zusammenfassung: Ladungen

- ▶ Drei verschiedene Ladungen
  - elektrisch
  - schwach
  - stark
- ▶ Ladungen sind
  - additiv
  - erhalten
    - > Vorhersage zu erlaubten Prozessen
  - gequantelt

# Diskussion / Fragen – zum Fachvortrag I



15 Minuten Pause