

# Neue Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik

Michael Kobel, Philipp Lindenau  
Vitzthum-Gymnasium Dresden | 04.02.2017

**Herzlich willkommen!**



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Ziele der Fortbildung

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



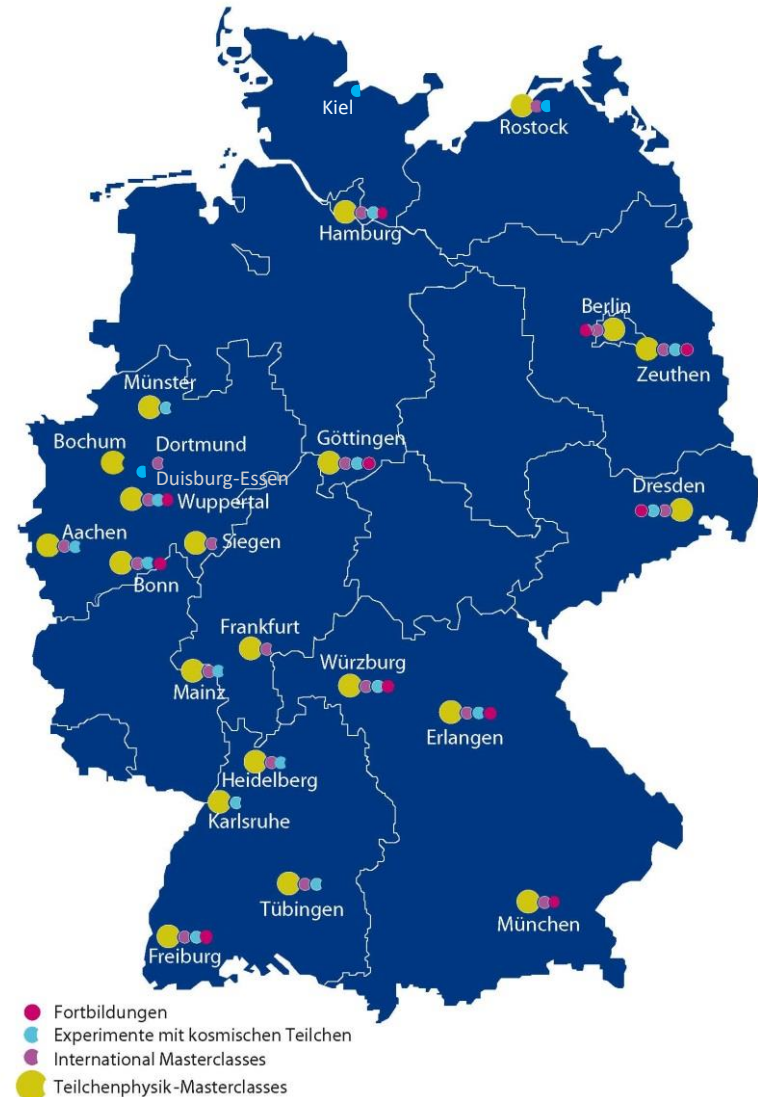


# Ablauf

1. Vorstellung NTW
2. Aufwärmübung
3. Vortrag: Das Standardmodell der Teilchenphysik im Schulunterricht
4. Gruppenarbeit: Sequenzplanung
5. Präsentation und Diskussion der Ergebnisse

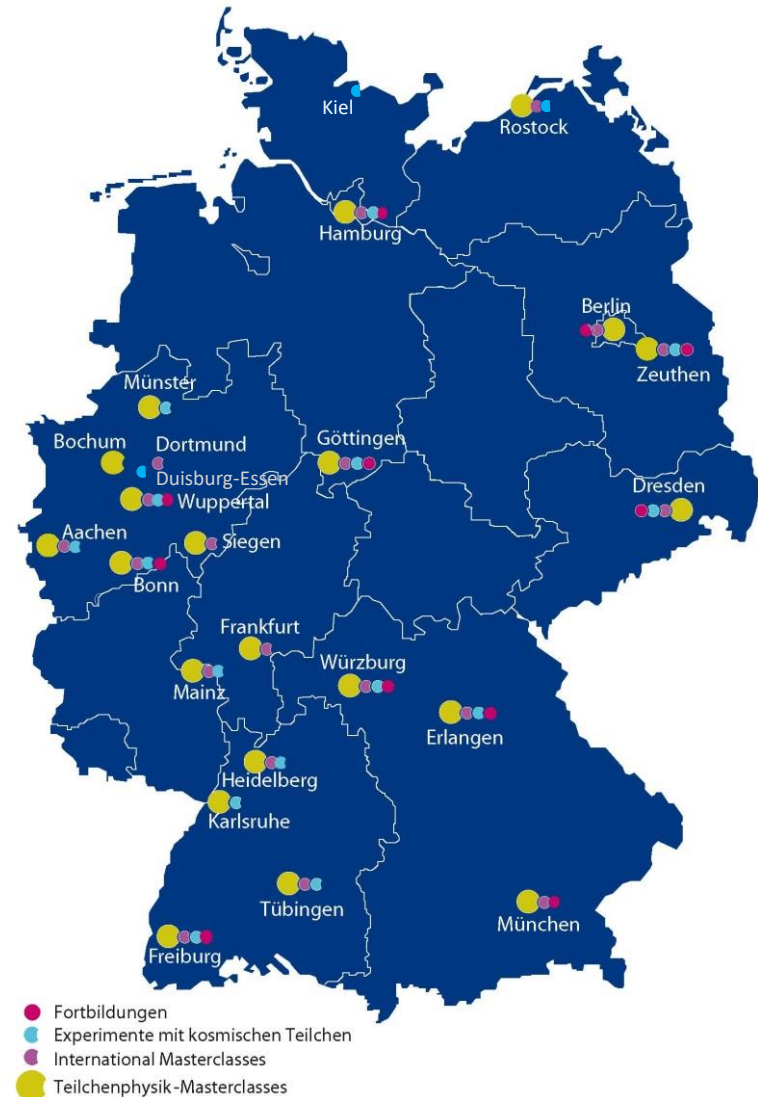
# Netzwerk Teilchenwelt

- ▶ 24 Standorte in 12 Bundesländern
  - insgesamt 26 Institute
  - Leitung: TU Dresden
- ▶ Netzwerk zwischen Wissenschaftlern, Jugendlichen im Alter von 15-19 Jahren und Lehrkräften mit direktem Kontakt zum CERN



# Netzwerk Teilchenwelt

- Forschungsthemen aus der Teilchen- und Astroteilchenphysik mit aktuellen Daten und einfachen Experimenten in die Schulen bringen
- Projektziele:
  - Faszination Astro-/Teilchenphysik erleben
  - Wissenschaft kommunizieren
  - Forschung vor Ort und im Unterricht
  - Wertschätzung von Erkenntnisgewinn durch Grundlagenforschung



# Das Konzept: Stufenprogramm





# Mehrstufiges Angebot für Lehrkräfte

## Mehrstufiges Angebot für Lehrkräfte im Überblick

### Teilchenphysik erleben

1

BASIS-  
PROGRAMM



#### Teilnahme

- Lehrertage der „Internationalen Masterclasses“
- Andere einführende Veranstaltungen

### Teilchenphysik vermitteln

2

QUALIFIZIERUNGS-  
PROGRAMM



#### Mitarbeit - Teilchenwelt-MultiplikatorIn

- Organisation von Projekttagen in Ihrer Einrichtung mit dem Netzwerk Teilchenwelt:
- Teilchenwelt-Masterclasses
  - Experimente mit kosmischer Strahlung

### Teilchenphysik erforschen

3

VERTIEFUNGSPROGRAMM/  
FORSCHUNGSMITARBEIT



#### Projekte an Originalschauplätzen

- Workshops für Teilchenwelt-MultiplikatorInnen am CERN
- Forschungsabordnung an lokale Forschungseinrichtungen



# Mehrstufiges Angebot für Jugendliche

## Mehrstufiges Angebot für Jugendliche im Überblick

### Teilchenphysik erleben

1

BASIS-  
PROGRAMM



#### Teilnahme

- Teilchenwelt – Masterclasses
- Internationale Masterclasses
- Experimente mit kosmischer Strahlung



### Teilchenphysik vermitteln

2

QUALIFIZIERUNGS-  
PROGRAMM



#### Mitarbeit - Teilchenwelt-BotschafterIn

- TutorIn bei Masterclasses und Cosmic- Experimenten
- Mithilfe bei Vermittlungsangeboten
- Weitergabe der Faszination Teilchenwelt über Präsentationen, Internet & Co



### Teilchenphysik erforschen

3

VERTIEFUNGSPROGRAMM/  
FORSCHUNGSMITARBEIT



#### Projekte an Originalschauplätzen

- Workshops für Teilchenwelt-BotschafterInnen am CERN
- Projektarbeiten an lokalen Forschungseinrichtungen

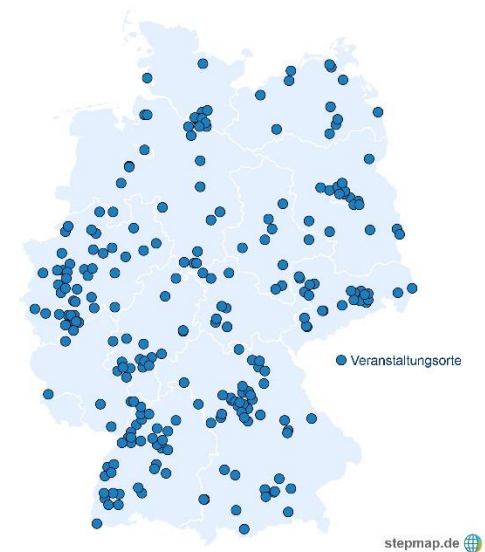




# Basisprogramm: Teilchenphysik-Masterclass

## ► Eintägige Veranstaltung in Schulen

- Durchgeführt von Nachwuchswissenschaftler/inne/n (Doktorand/inn/en)
- Einführungsvorträge
- Eigene Messungen mit Daten der LHC-Experimente ATLAS, CMS, ALICE oder LHCb
- Auch als Lehrerfortbildung
- > 100 Teilchenphysik-Masterclasses im Jahr im Netzwerk Teilchenwelt



# Astroteilchen-Projekte

- ▶ Szintillator-Experiment „CosMO“ und „Kamiokanne“-Experiment
  - Zur Ausleihe nach vorheriger Fortbildung
  - Geeignet für kleinere Gruppen in allen Programmstufen
  - Verschiedene Messungen (Winkel, Lebensdauer, Abschirmung)
- ▶ Nebelkammer-Sets
- ▶ Auger-Masterclasses
- ▶ IceCube Masterclasses



Kamiokannen



Szintillationszähler



Nebelkammer

# Materialsammlung

## ► Hintergrundinformationen und Arbeitsblätter zu

- Teilchenphysik - Forschung und Anwendungen
- Standardmodell der Teilchenphysik
- Vier Wechselwirkungen
- ATLAS-Detektor
- Selbstbau einer Nebelkammer
- Teilchensteckbriefe

## ► Erhältlich als...

- Gedruckte Version
- Download als pdf [www.teilchenwelt.de/material](http://www.teilchenwelt.de/material)





# Mögliche experimentelle Diskussionspunkte für den Unterricht

Woher weiß man,:

- ▶ dass es Quarks gibt?
- ▶ dass es drei verschieden 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





# 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

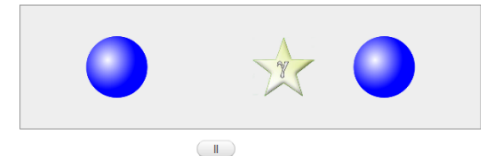
Wechselwirkung	 Starke Wechselwirkung	 Schwache Wechselwirkung	 Elektromagnetische Wechselwirkung	 Gravitation
Beispiele für Wirkung	Zusammenhalt des Protons	Betazerfall: Ein Proton wandelt sich in ein Neutron um (oder umgekehrt). Kernfusion: In der Sonne verschmelzen vier Protonen zu einem Heliumkern.	Magnetismus, Licht, ... Chemische Bindungen; Photoeffekt	Anziehung zwischen Massen; Schwerkraft; Umlauf der Planeten um
Reichweite	$10^{-16}\text{m}$ (Protonendurchmesser)	$10^{-18}\text{m}$ ( $\frac{1}{1000}$ 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 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  $+\frac{2}{3}$  trägt das

1. Generation 2. Generation 3. Generation

$u$   $c$   $t$  stark (Gluonen)

$d$   $s$   $b$  Quarks

$e^-$   $\mu^-$   $\tau^-$  Elektrisch geladene Leptonen

$\nu_e$   $\nu_\mu$   $\nu_\tau$  Elektrisch neutrale Leptonen schwach ( $W^+, W^-, Z^0$ )

Übersicht über die Bausteinteilchen der Materie





#### 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.

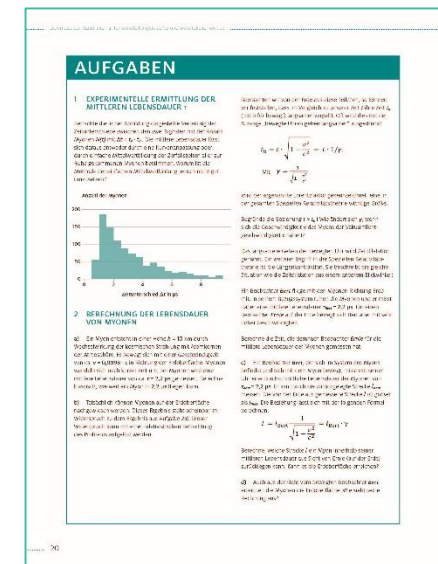
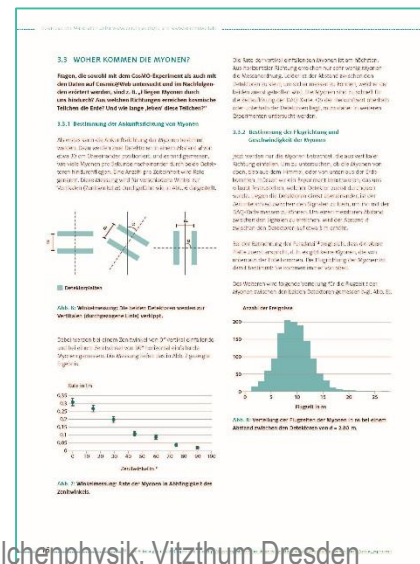
Die Materialien können per E-Mail an [info@leifiphysik.de](mailto:info@leifiphysik.de) angefordert oder unter [www.leifiphysik.de/tp](http://www.leifiphysik.de/tp) heruntergeladen werden.

# Materialentwicklung

- Kooperation mit der Joachim Herz Stiftung
- Laufzeit: 2013 – 2016
- enge Kooperation mit Lehrkräften (NTW-Alumni), u.a. 3 Workshops
- modulare Sammlung von Handreichungen für Lehrkräfte (4 Bände)
- Kostenfrei erhältlich auf:
  - [www.teilchenwelt.de/tp](http://www.teilchenwelt.de/tp)
  - [www.leifiphysik.de/tp](http://www.leifiphysik.de/tp)
  - Online oder als Druckexemplar
- Band 3 und 4 bereits erschienen
- Band 1 und 2 folgen im Lauf des Jahres

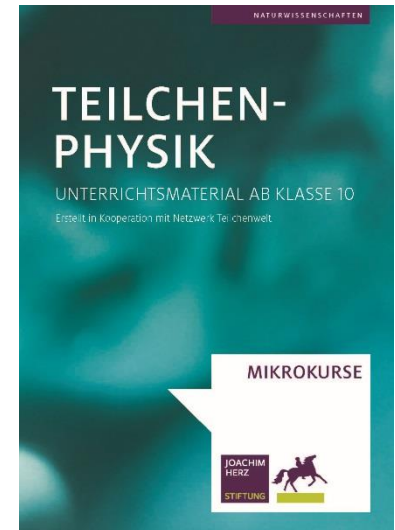
# Band 3: Kosmische Strahlung

- 32 Seiten
- Fokus: Untersuchung von Myonen
- Hintergrundinfos für Lehrkräfte
- Fachtext für Schüler/innen
- Aktivitäten, Aufgaben und Lösungen



# Band 4: Mikrokurse

- 28 Seiten
- 4 Kurse
- Zeitbedarf 1-2 Unterrichtsstunden
- Anknüpfung an klassische Lehrplanthemen, z.B. waagerechter Wurf mit Anti-Wasserstoff
- mit Aufgaben und Lösungen





# Band 1: Wechselwirkungen, Ladungen und Teilchen

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

## Band 2: Forschungsmethoden

- Forschungsziele
- Beschleuniger
- Detektoren
- Zahlreiche Aufgaben





# Forum

<http://www.teilchenwelt.de/forum/>

- ▶ Diskussion zu unseren Materialien
- ▶ Teilen und diskutieren eigener Unterrichtsideen
- ▶ Ideen und Anregungen zur Verbesserung der Arbeit von NTW
- ▶ Vernetzung mit anderen Lehrkräften und Wissenschaftler
- ▶ Klärung von fachlichen Fragen

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

ORIGINALSCHAUPLATZ



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

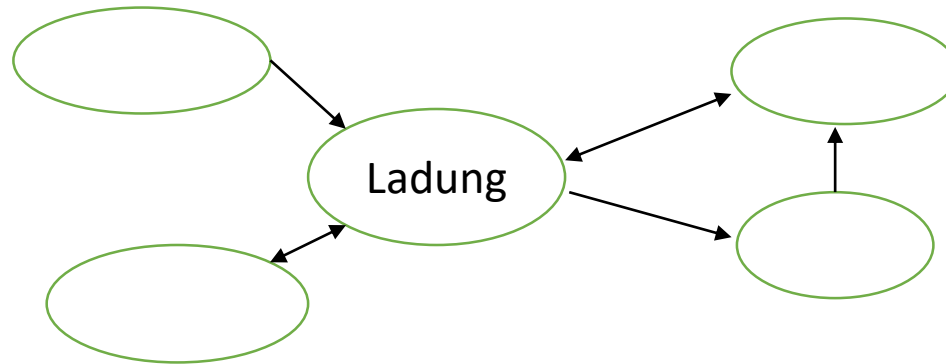
JOACHIM  
HERZ  
STIFTUNG



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Aufwärmübung

- ▶ Erstellen Sie in Gruppen eine Concept-Map zum Begriff Ladung.



- ▶ Formulieren Sie einen kurzen fachlichen Kommentar dazu.



Fachvortrag

# **Das Standardmodell der Teilchenphysik im Schulunterricht**

# Was ist Physik?



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







# Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

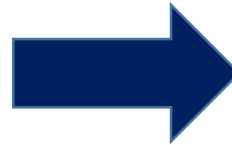
- ▶ **Newtonsche Mechanik** (17. Jhd.): „irdische“ Fallgesetze (Galilei) und Bewegung der Himmelskörper (Kepler) als Folgen der Gravitation
- ▶ **Elektromagnetismus** (19. Jhd.): Zusammenfassung elektrischer und magnetischer Phänomene durch J. C. Maxwell
- ▶ **Relativitätstheorie** (20. Jhd.): Vereinheitlichung 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,  
...  
...



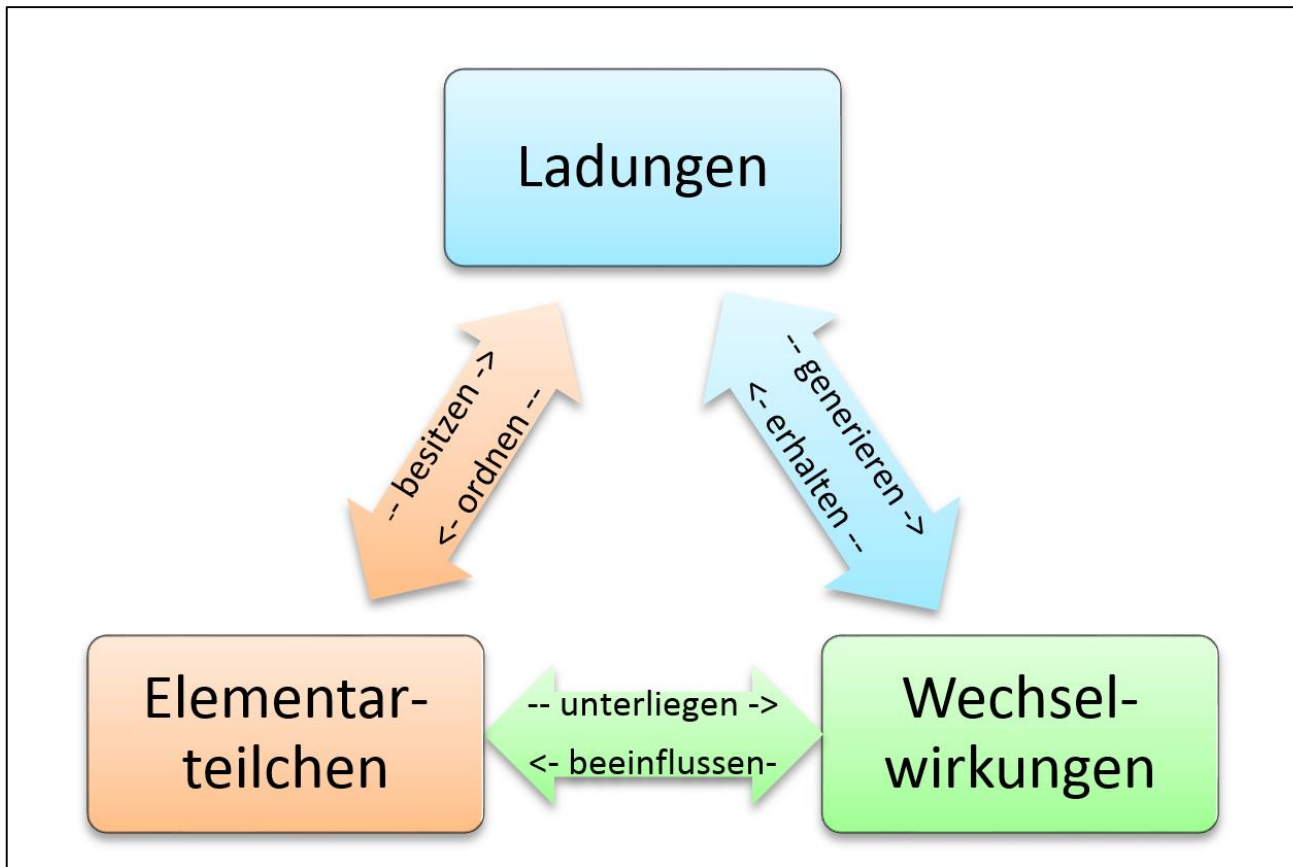
**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**



# 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,...

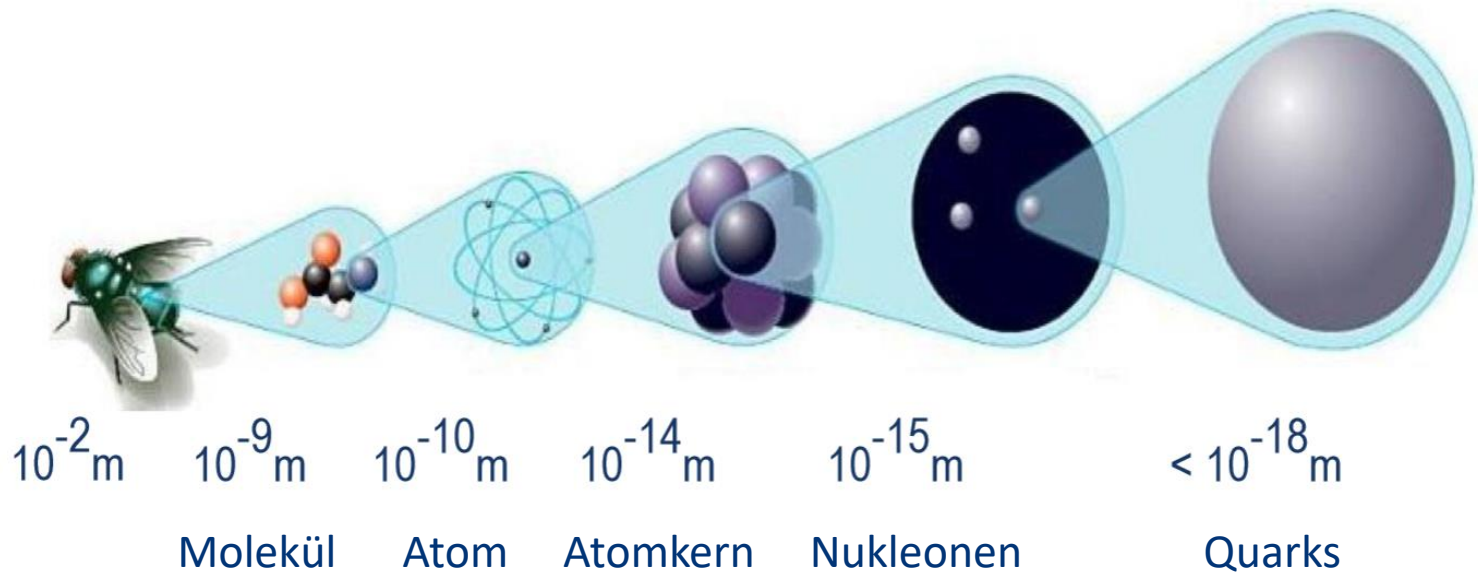
- ▶ **Wieso also bei der Behandlung des Standardmodells damit beginnen??**
  - Nur u,d,e sind für Aufbau der Materie nötig
  - Warum es genau diese Teilchen gibt, kann nicht vorhergesagt werden (nicht verstanden!)
  - Das Standardmodell ist eine **Theorie der Wechselwirkungen**

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 →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon	<b>H</b> Higgs boson
Quarks	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon	
Leptons	<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	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	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	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<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

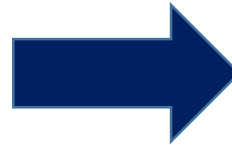


# Reduktion

**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

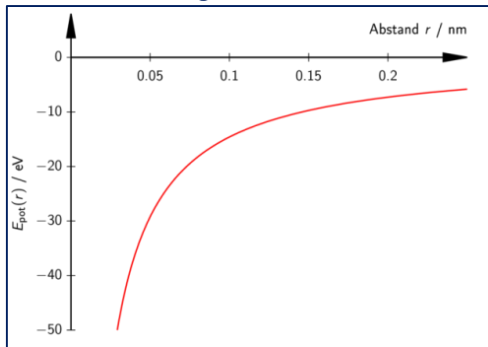
- Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B.  $\beta$ -Umwandlung)
- Erzeugung von Materie+Antimaterie (z.B. Elektron+Positron)
- Vernichtung in Botenteilchen (z.B. PET: 2 Photonen)

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

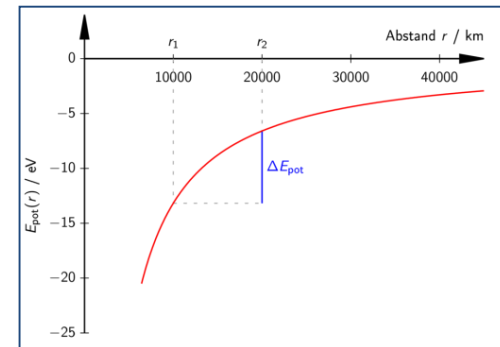
### ► Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

# Ausgangspunkt: Beschreibung der Vorgänge mit 2 bekannten Wechselwirkungen

## ► Elektromagnetische WW

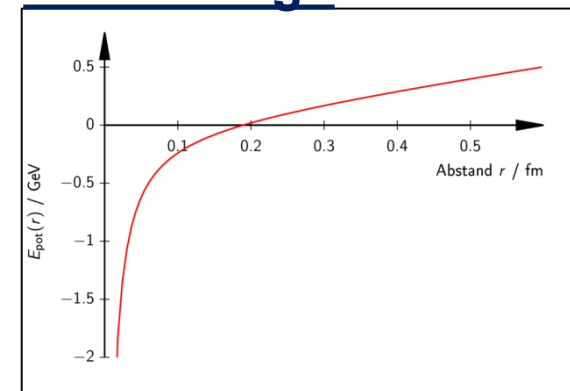


## ► Gravitation



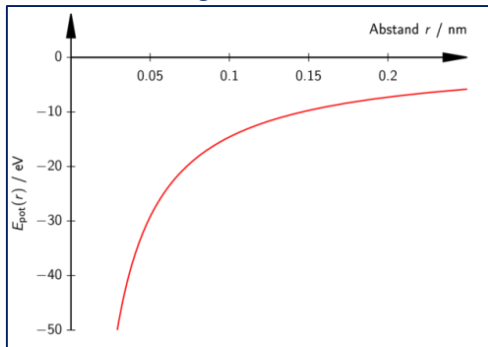
► Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen? ( $r \sim \text{fm}$ )

## ► Einführung: starke WW

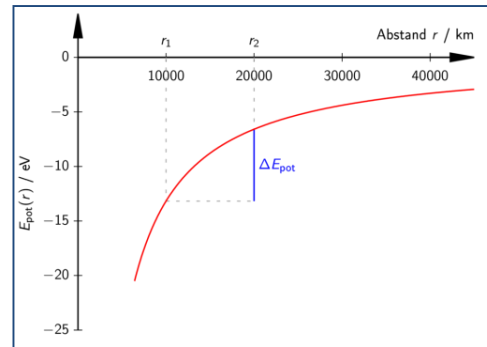


# Die vierte fundamentale Wechselwirkung

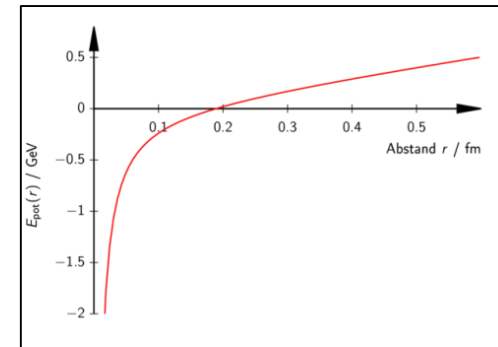
## ► Elektromagnetische WW



## ► Gravitation



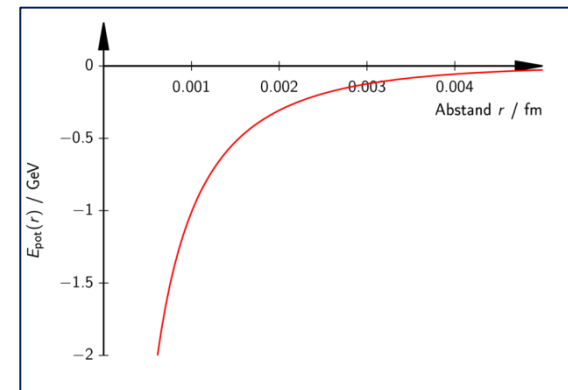
## ► starke WW



## ► Warum scheint die Sonne seit nunmehr über vier Milliarden Jahren?

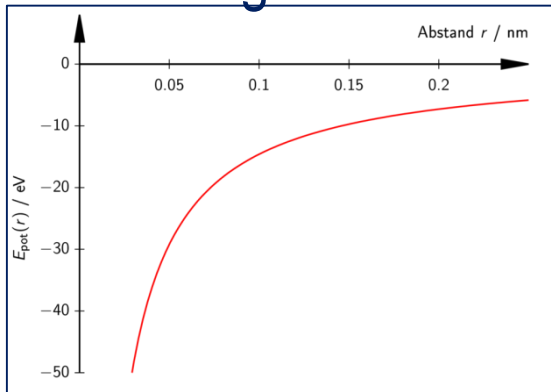
Umwandlung  $2p \rightarrow 2n$   
( $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$ )  
passiert **innerhalb** des Protons  
 $r \sim 0.001$  fm

## ► Einführung: schwache WW

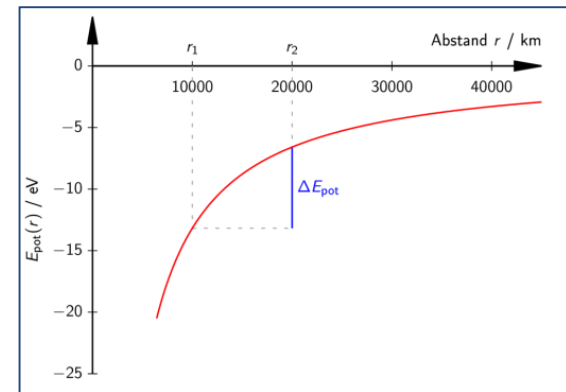


# Vergleich der potenziellen Energien

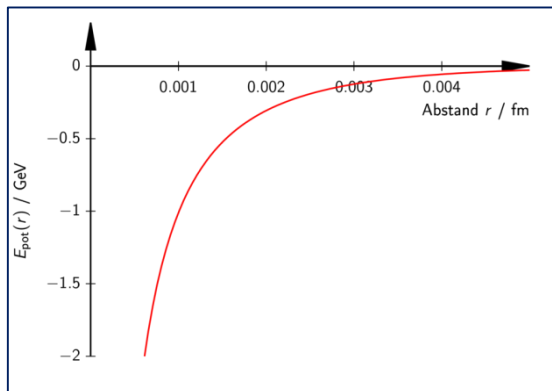
## ► Elektromagnetische WW



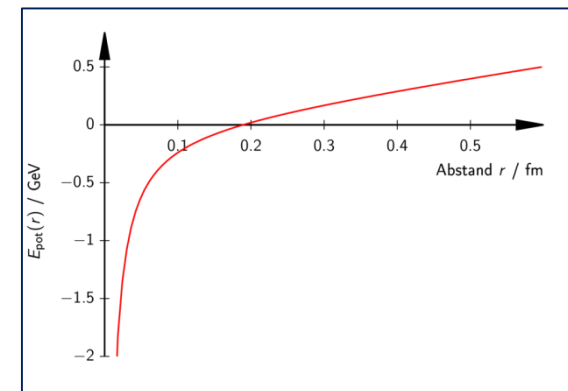
## ► Gravitation



## ► schwache WW

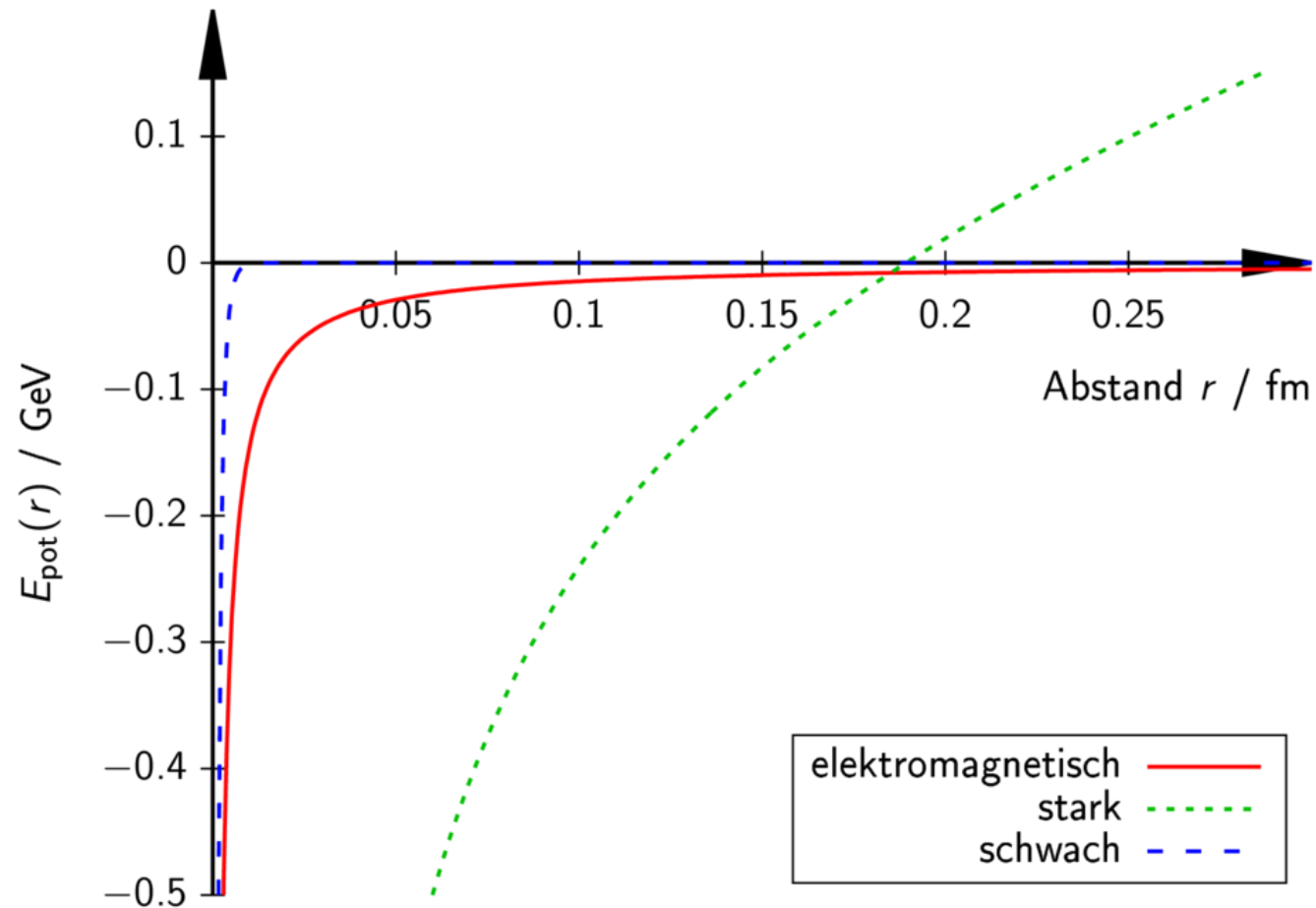


## ► starke WW

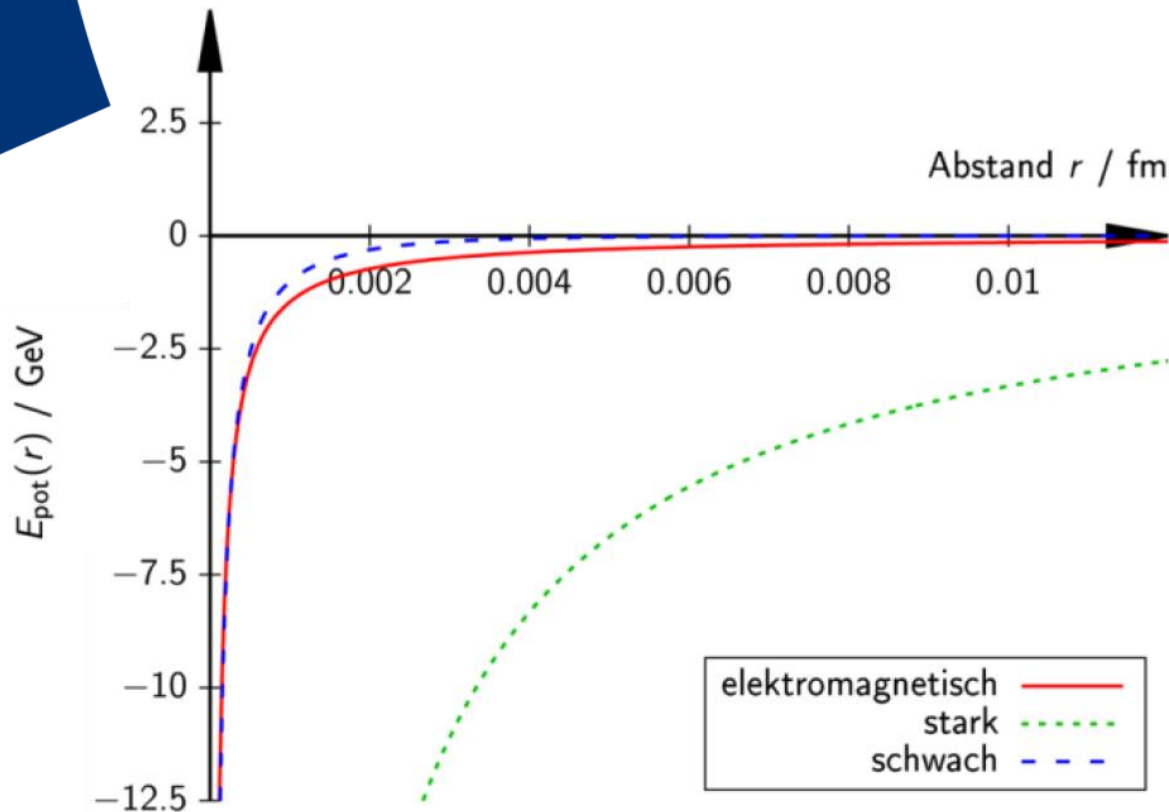




# Vergleich der potenziellen Energien

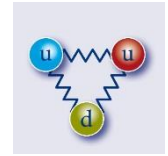
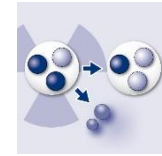


# Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen



- ▶ 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

$$\text{► } F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2} = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$$

- 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

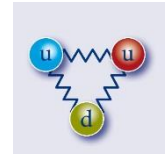
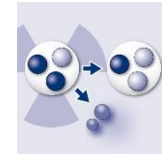
$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische  
Ladungszahl

Elementarladung

- ▶ Elementarladung ist nun im Kopplungsparameter  $\alpha$  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

$Z$

schwache Ladungszahl

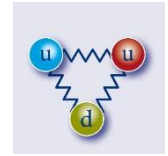
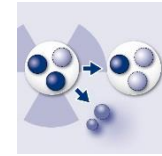
$I$

starker Farbladungsvektor

$\vec{C}$

- ▶ Produkt zweier Ladungen  
kann positiv oder negativ sein

# Erweiterung: Konzept der Ladung

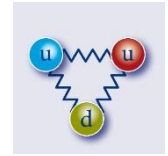
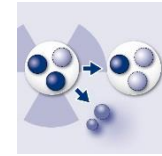


- ▶ Kopplungsparameter der Gravitation zwischen Teilchen1 und Teilchen2:  $\alpha_{grav}^{1\ 2} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{\hbar c}$

- ▶ 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:

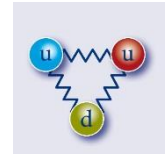
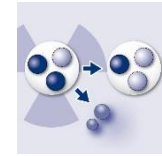
- Masse ist keine Erhaltungsgröße
- Produkt zweier Massen  $m_1 \cdot m_2$  kann nicht negativ sein

## ► Theorie:

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



# Konzept der Ladung



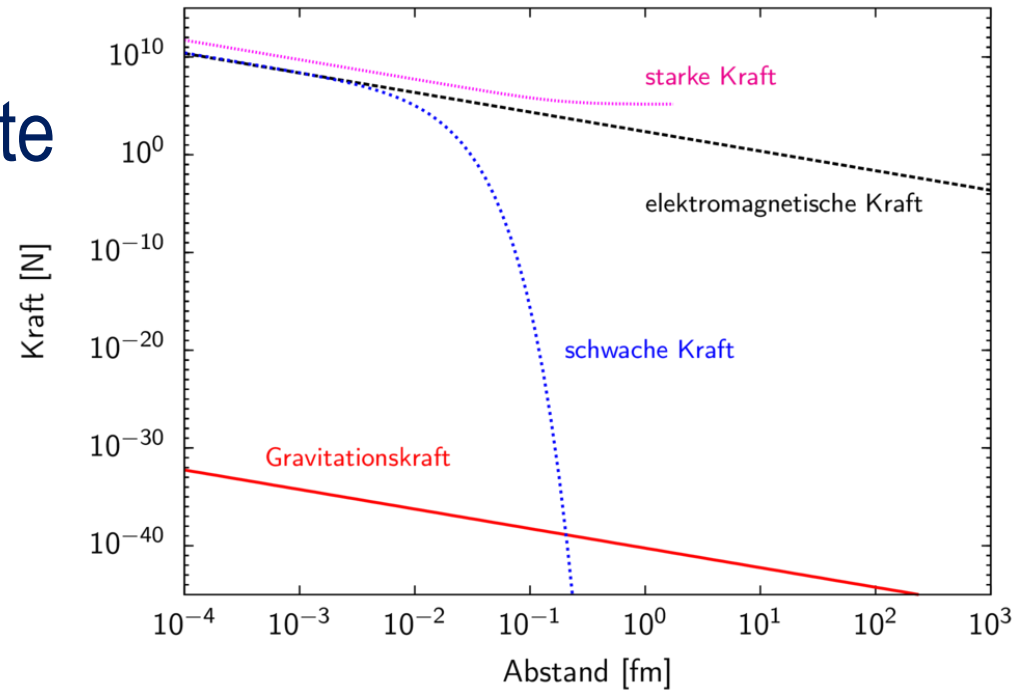
- ▶ Ladungen sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ Teilchen nehmen nur dann an einer bestimmten WW teil, wenn sie die Ladung der entsprechenden **Wechselwirkung** besitzen

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  $r$

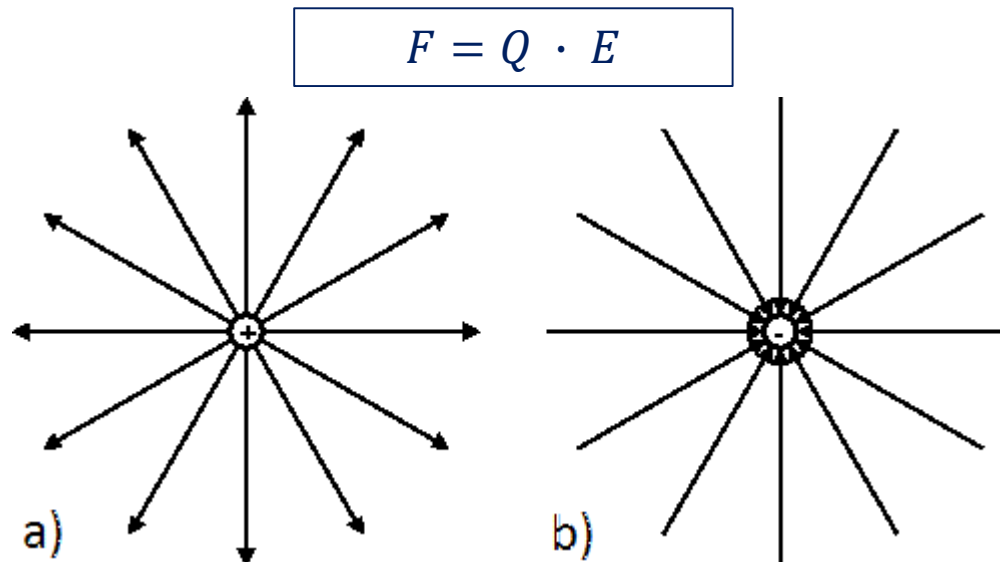


Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter $\alpha$
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$	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



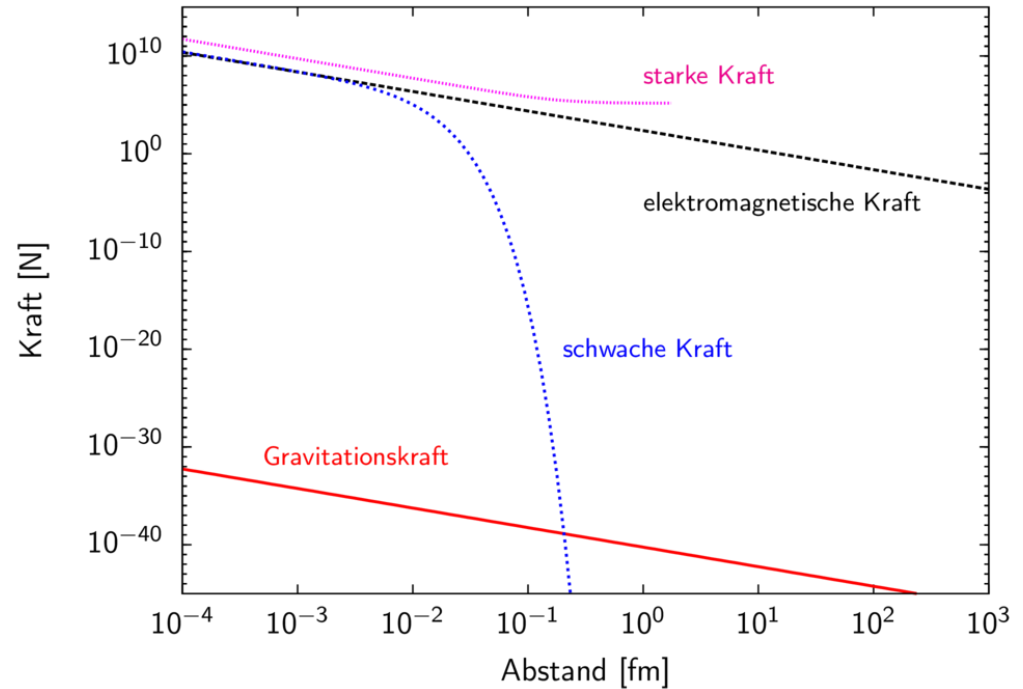
$$A = 4\pi r^2$$

↓

$$F \sim \frac{1}{4\pi r^2}$$

# Reichweiten der Kräfte

- Unendlich: im Alltag spürbar
- Endlich: nur subatomar



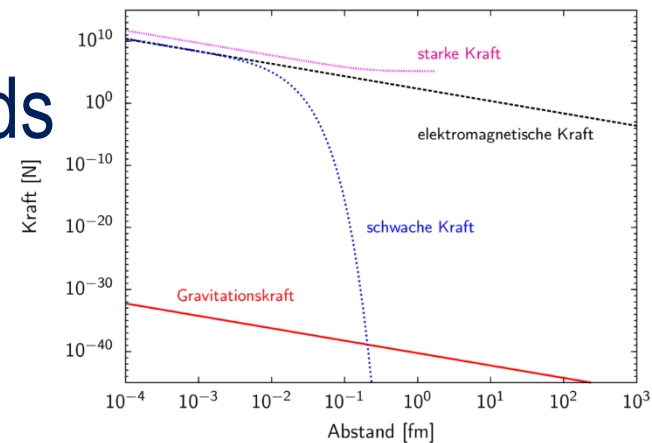
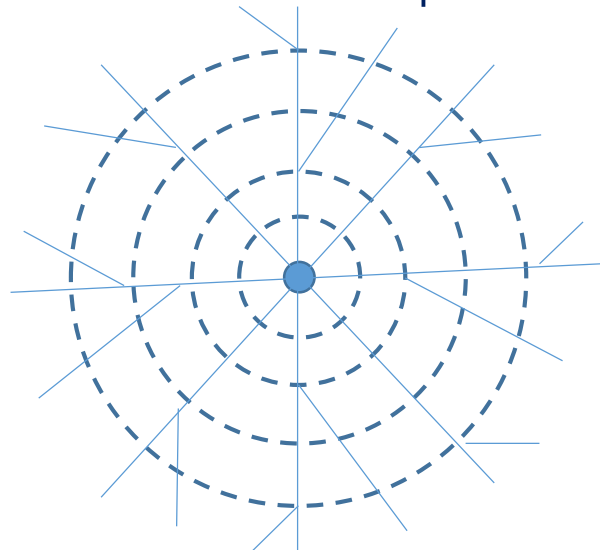
Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter $\alpha$
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$	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:

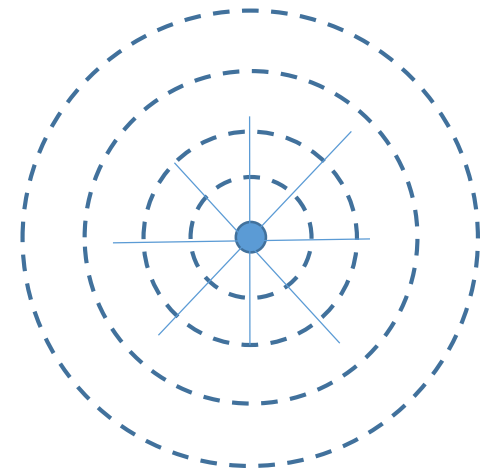
- stark

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



- schwach

Kraft strebt rasch gegen Null  
Feldlinien enden „im Nichts“



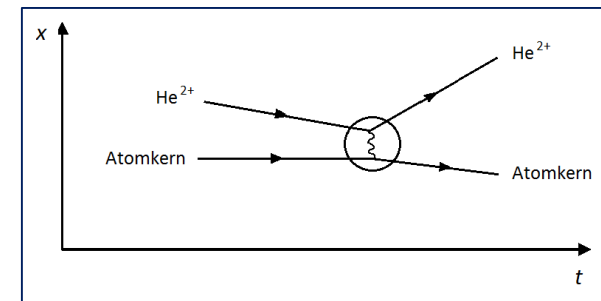
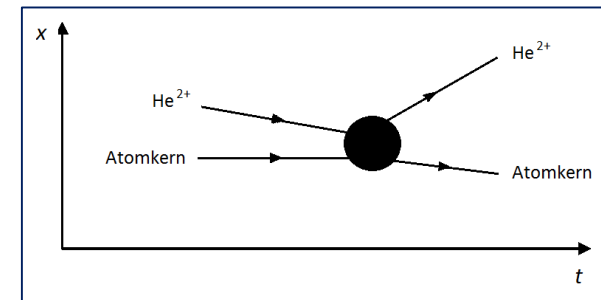
# Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

## ► 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



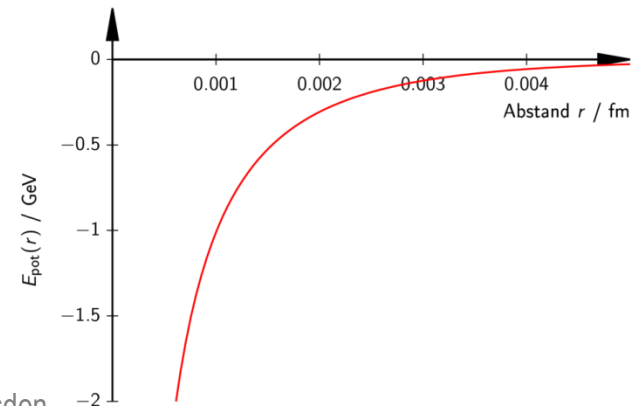
# Endliche Reichweiten

## ► 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

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

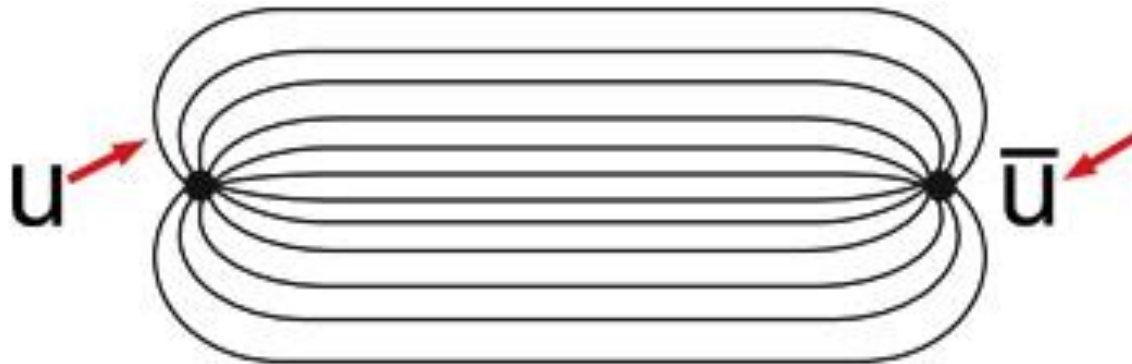
$$► \text{Mit } \lambda_w = \frac{\hbar}{m_w c} \approx 0,0024 \text{ fm}$$





# Endliche Reichweiten

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

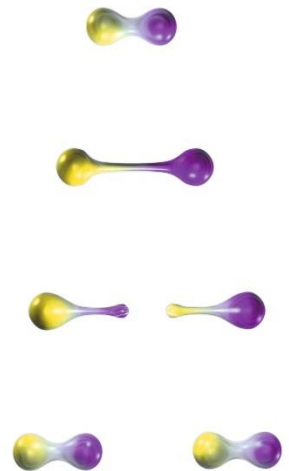
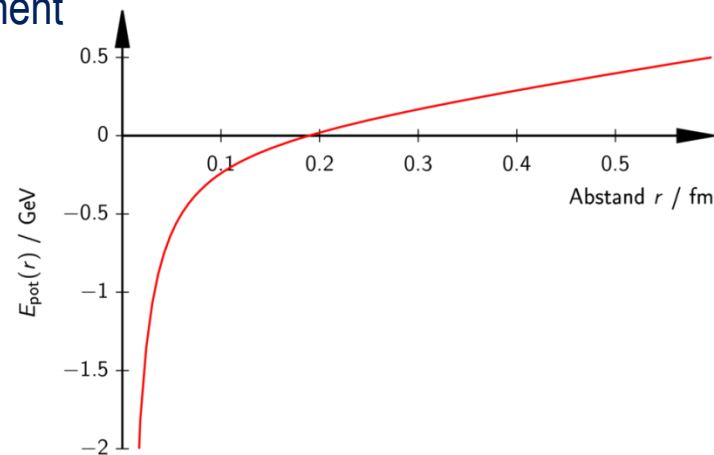


# Endliche Reichweiten

► 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

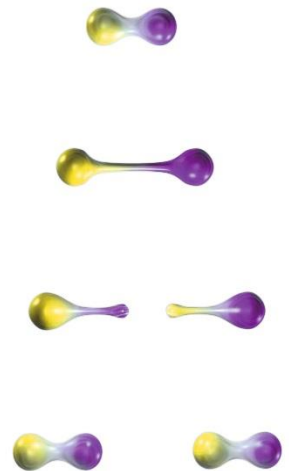


# Endliche Reichweiten

## ► 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

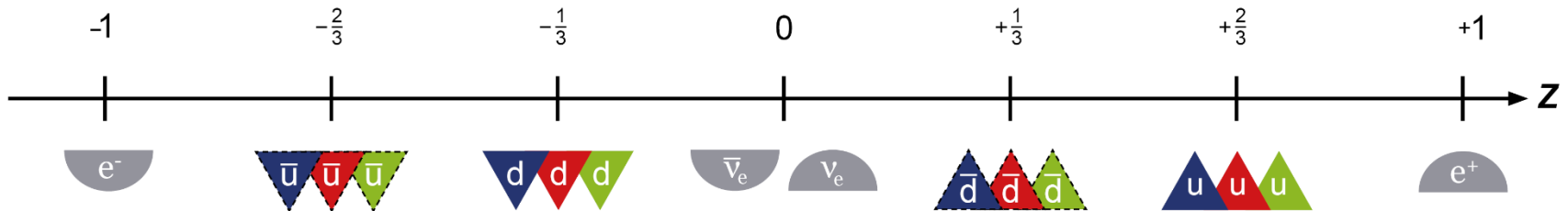
- ▶ Alle bekannten Vorgänge im Universum lassen sich auf 4 fundamentale Wechselwirkungen zurückführen
  - (Gravitation, elektromagnetische, schwache und starke WW)
- ▶ 3 dieser WWn werden im Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben **und besitzen sehr ähnliche Grundprinzipien**
- ▶ Nur 2 WWn besitzen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

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

# Elektrische Ladung

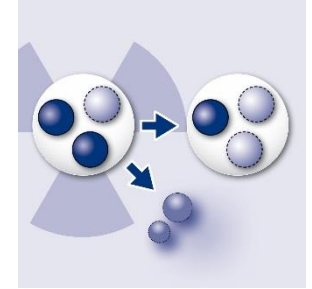


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen  $Z$  einiger Anti-/Materieteilchen

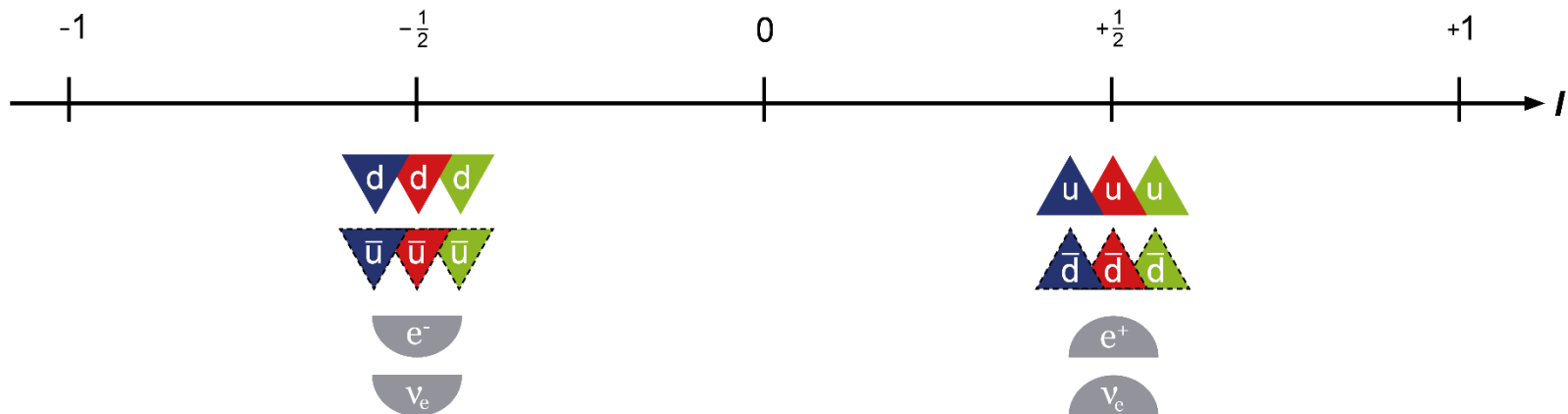


- Elektrische Ladung ist gequantelt

# 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

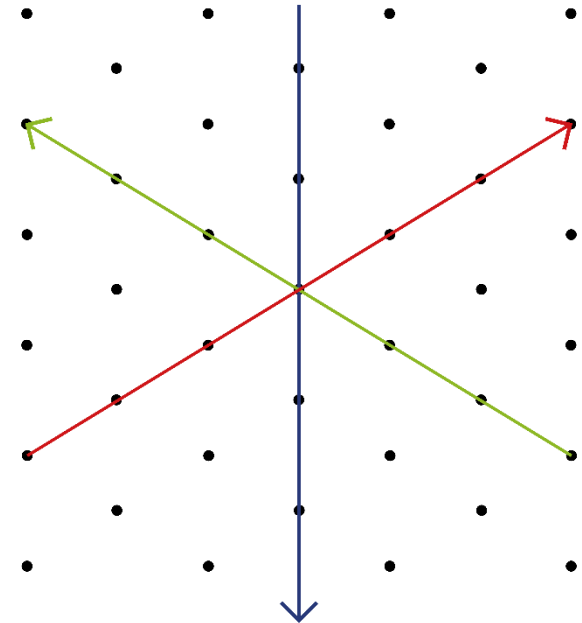
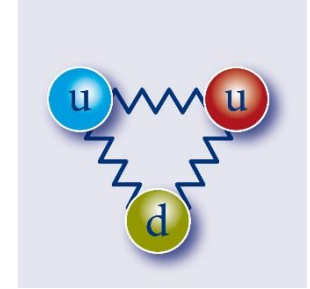


- ▶ Schwache Ladung ist gequantelt



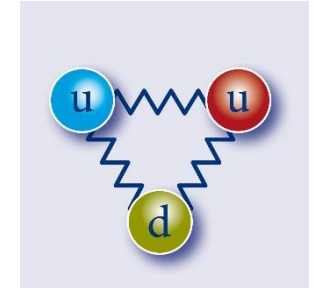
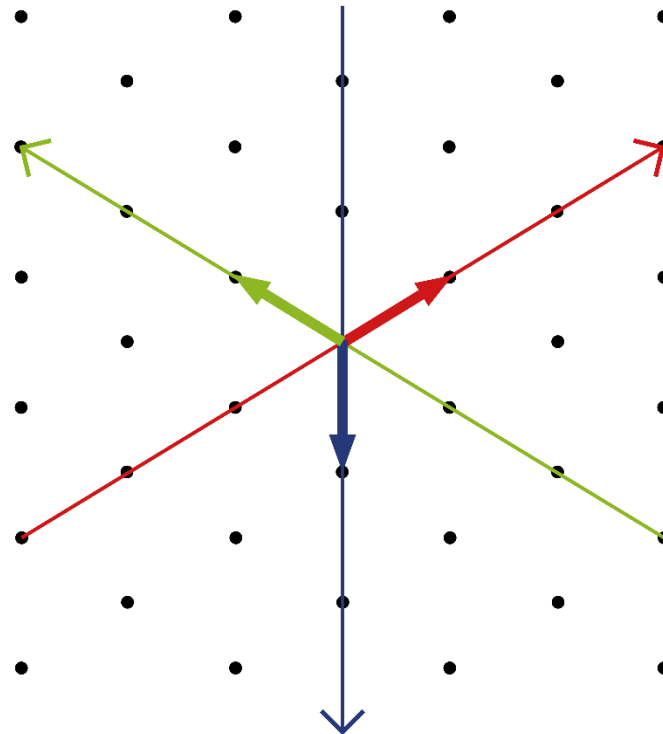
# Starke Ladung

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



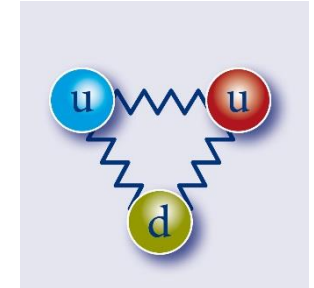
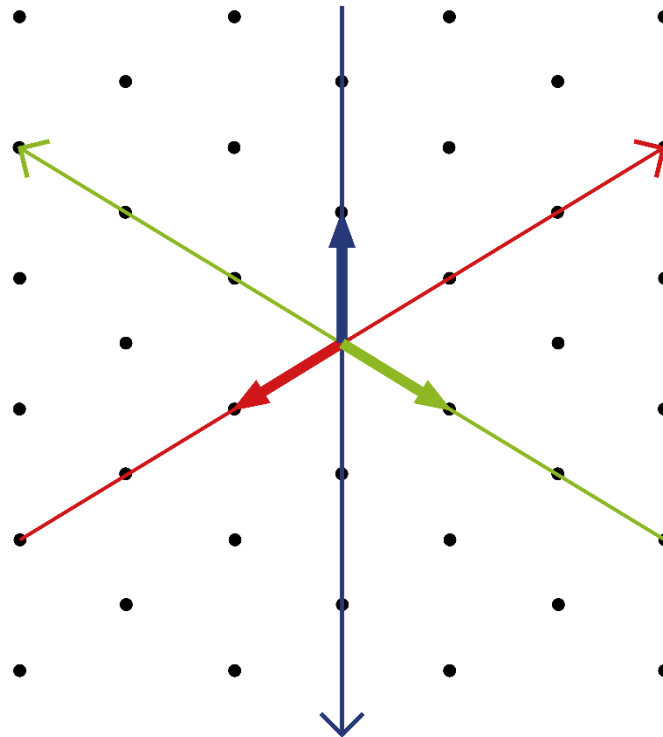
# Starke Ladung

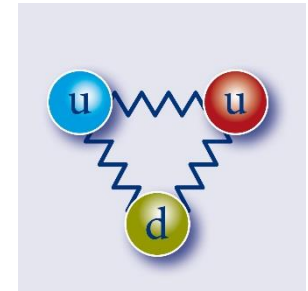
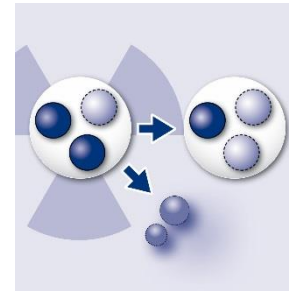
## ► Farbladungsvektoren von Quarks



# Starke Ladung

## ► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





► Alle drei Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

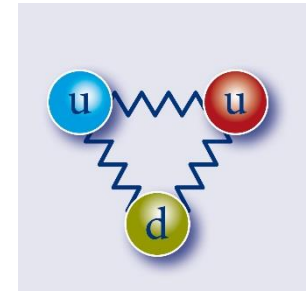
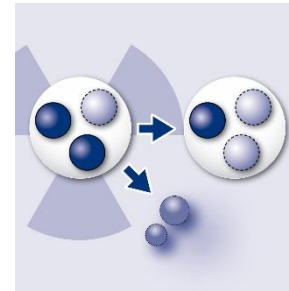
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- 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 drei Ladungen sind erhalten

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

- Elektrische Ladungszahl:

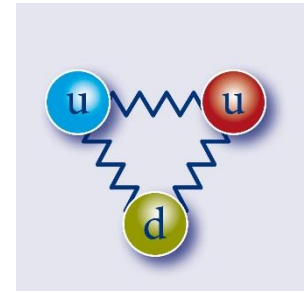
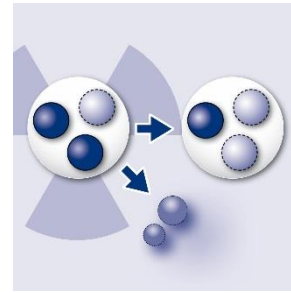
$$0 \rightarrow +1 - 1 + 0 = 0$$

- 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

	1. Generation	$I$	$q$	$\bar{C}$
elektrisch neutrale Leptonen		$+\frac{1}{2}$	0	$\bar{0}$
.....				
elektrisch geladene Leptonen		$-\frac{1}{2}$	-1	farblos $\bar{0}$
.....				
Quarks		$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	blau ↓
		$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	blau ↓
				rot ↓
				rot ↓
				grün ↓
				grün ↓
	starke Wechselwirkung elektromagnetische Wechselwirkung schwache Wechselwirkung			

	1. Generation	$I$	$q$	$\bar{C}$
Quarks	schwache Wechselwirkung elektromagnetische Wechselwirkung starke Wechselwirkung 	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	antiblau ↑ antitrot ↓ antigrün ↓
		$-\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	antiblau ↑ antitrot ↓ antigrün ↓
.....				
elektrisch geladene Leptonen		$+\frac{1}{2}$	+1	$\bar{0}$
.....				
elektrisch neutrale Leptonen		$-\frac{1}{2}$	0	$\bar{0}$

# Zusammenfassung: Ladungen

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



# Diskussion / Fragen – zum Fachvortrag I

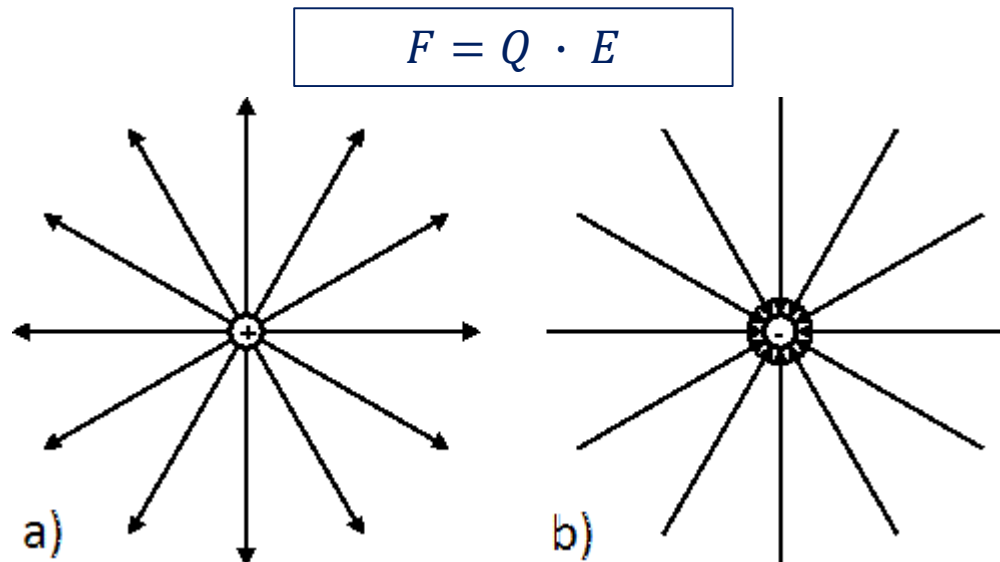


10 Minuten Pause

# Darstellen von Wechselwirkungen

## ► Klassische Physik: Feldlinien

für Wechselwirkungen mit unendlicher Reichweite  
hier: elektromagnetische Wechselwirkung



$$A = 4\pi r^2$$

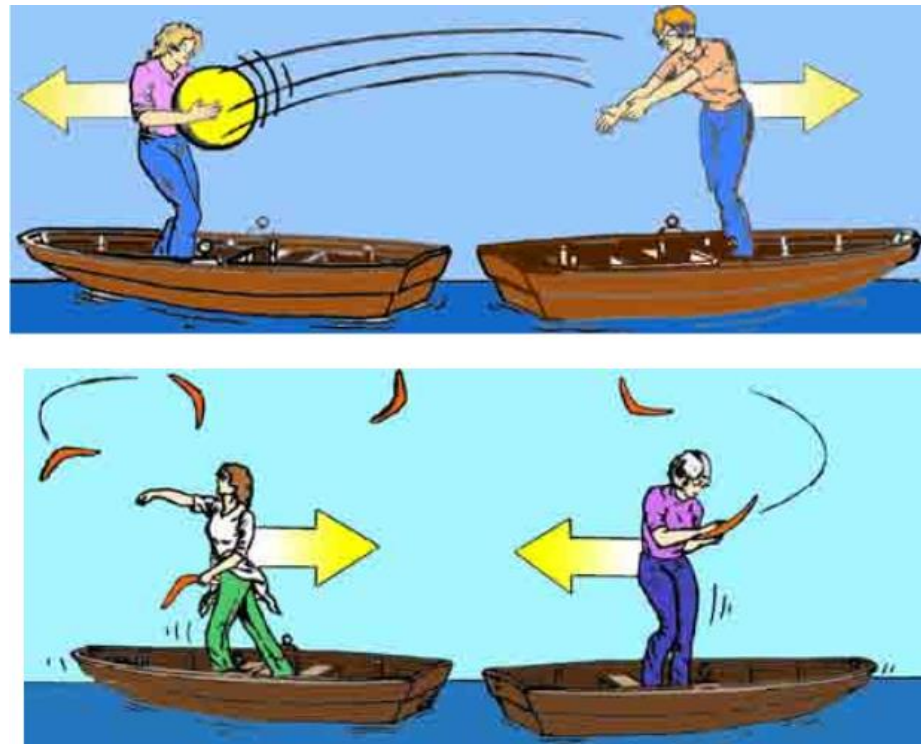
↓

$$F \sim \frac{1}{4\pi r^2}$$

# Darstellen von Wechselwirkungen

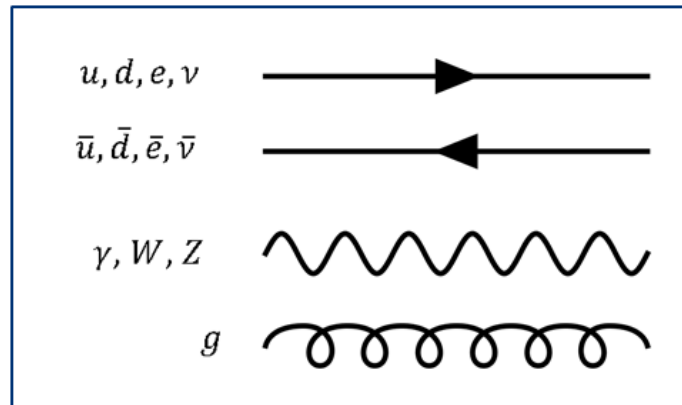
## ► Analogie: Austausch eines Botenteilchens

Anstelle der Feldlinien kann die elektromagnetische Wechselwirkung auch durch den Austausch eines Botenteilchens beschrieben werden



# Feynman-Diagramme

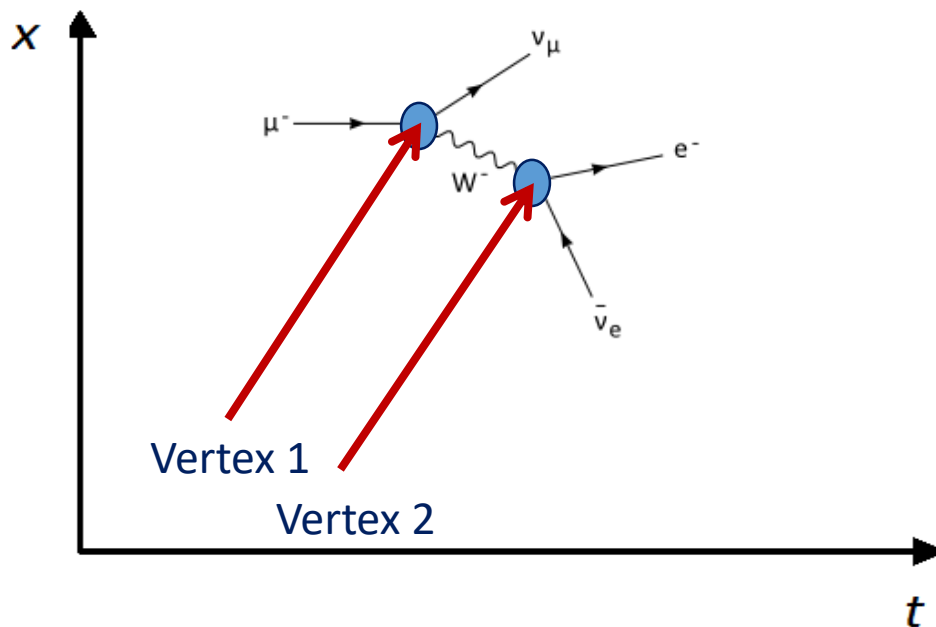
## ► Aufbau



# Feynman-Diagramme

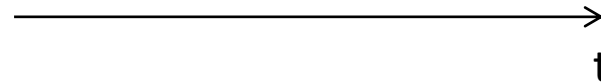
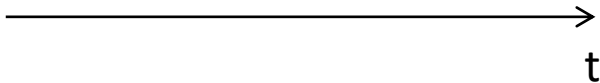
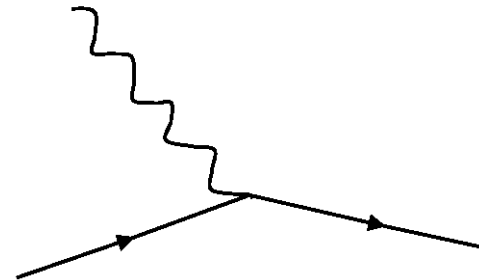
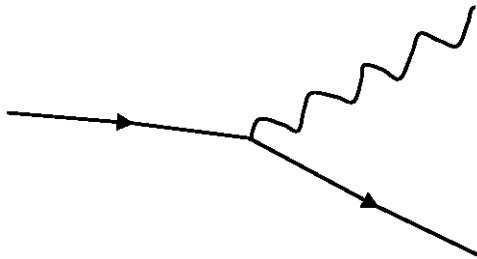
## ► Begriffsklärung:

- Vertex / Vertices (plural)
- Wechselwirkung wird dadurch dargestellt, dass sich die Teilchen treffen (an einem „bestimmtem Ort“, zur einer „bestimmten Zeit“)



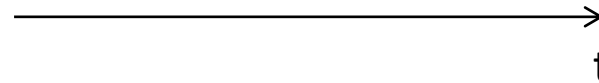
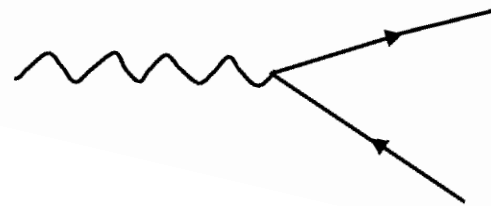
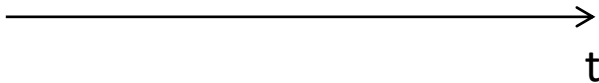
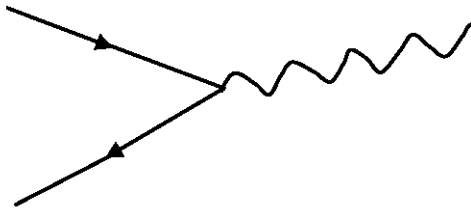
# Grundbausteine 1/2

## ► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



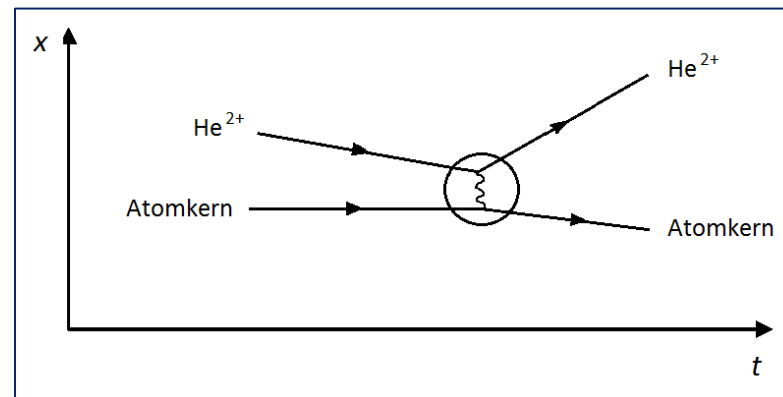
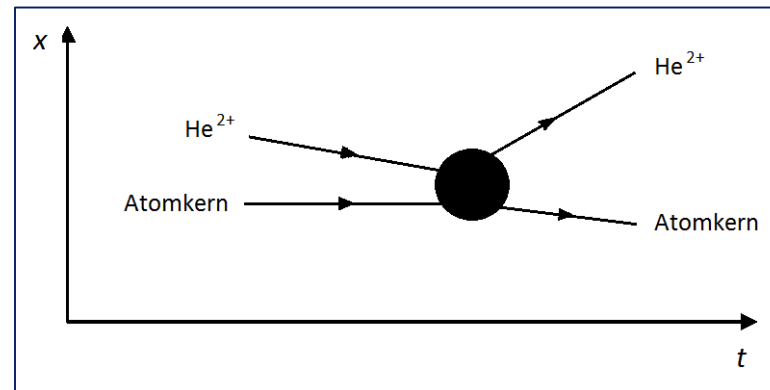
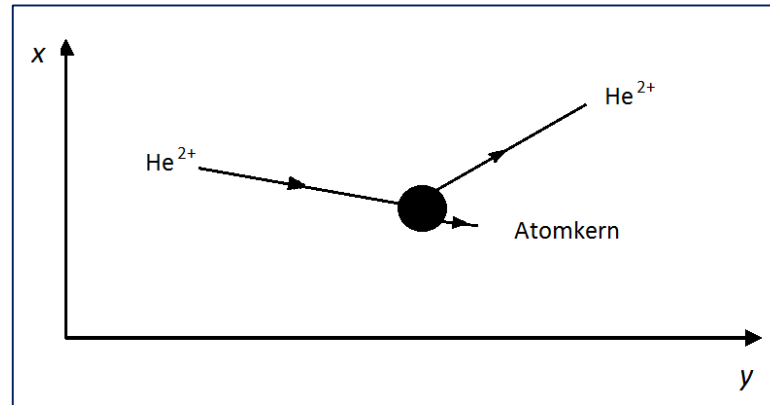
# Grundbausteine 2/2

## ► Paarvernichtung und Paarerzeugung



# Prozesse

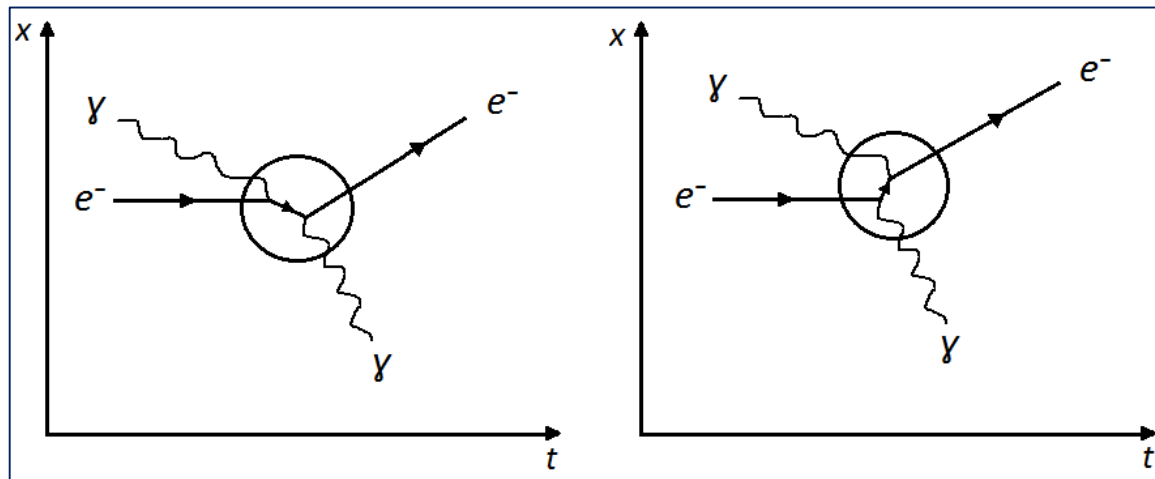
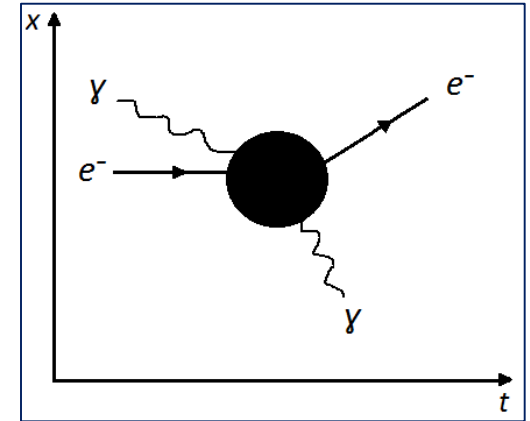
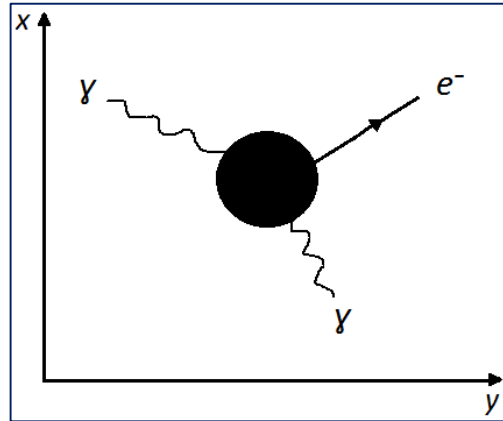
## ► Rutherford-Streuung





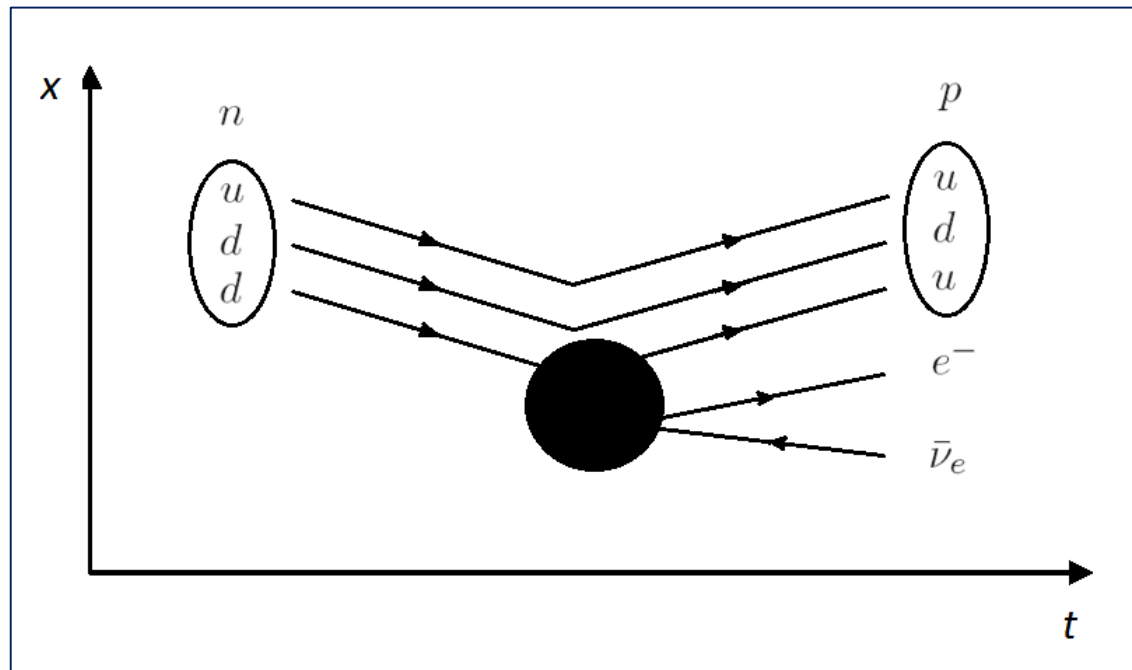
# Prozesse

## ► Compton-Streuung



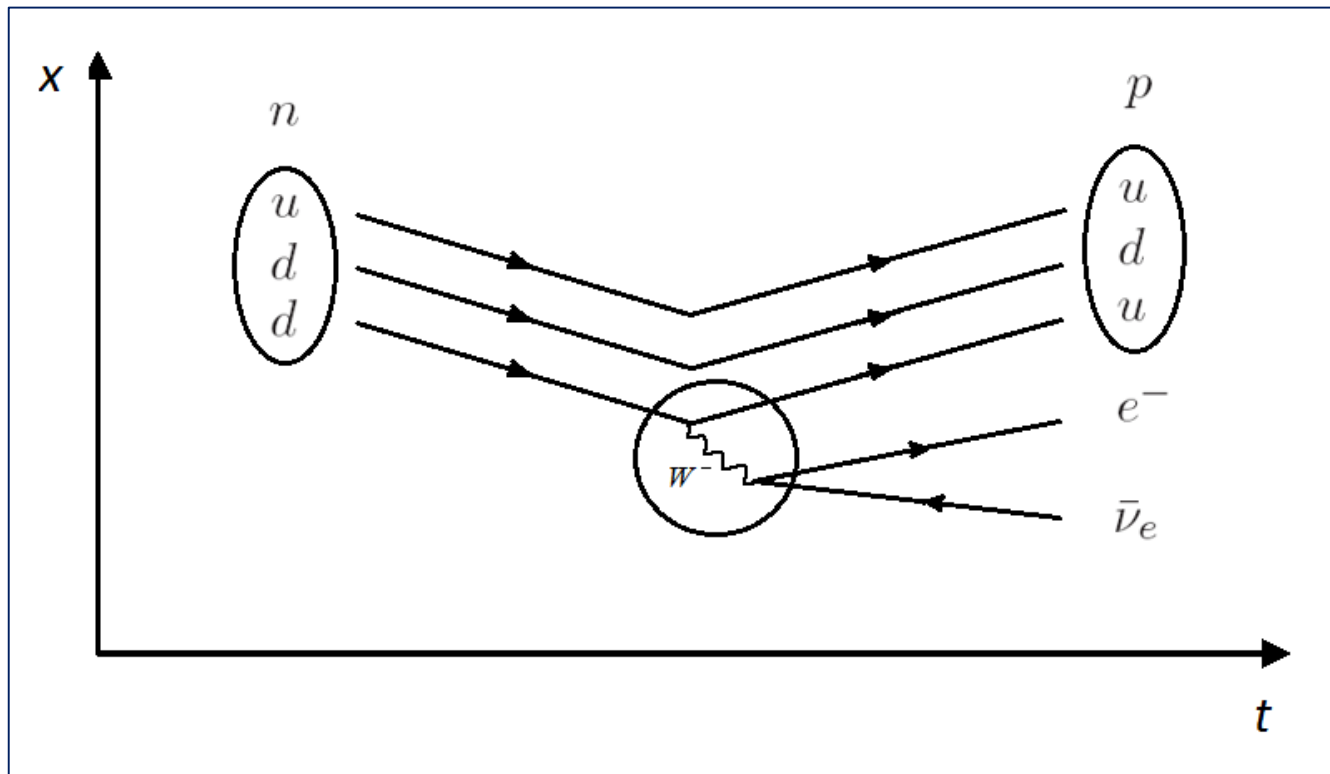
# Prozesse

## ► $\beta^-$ - Umwandlung

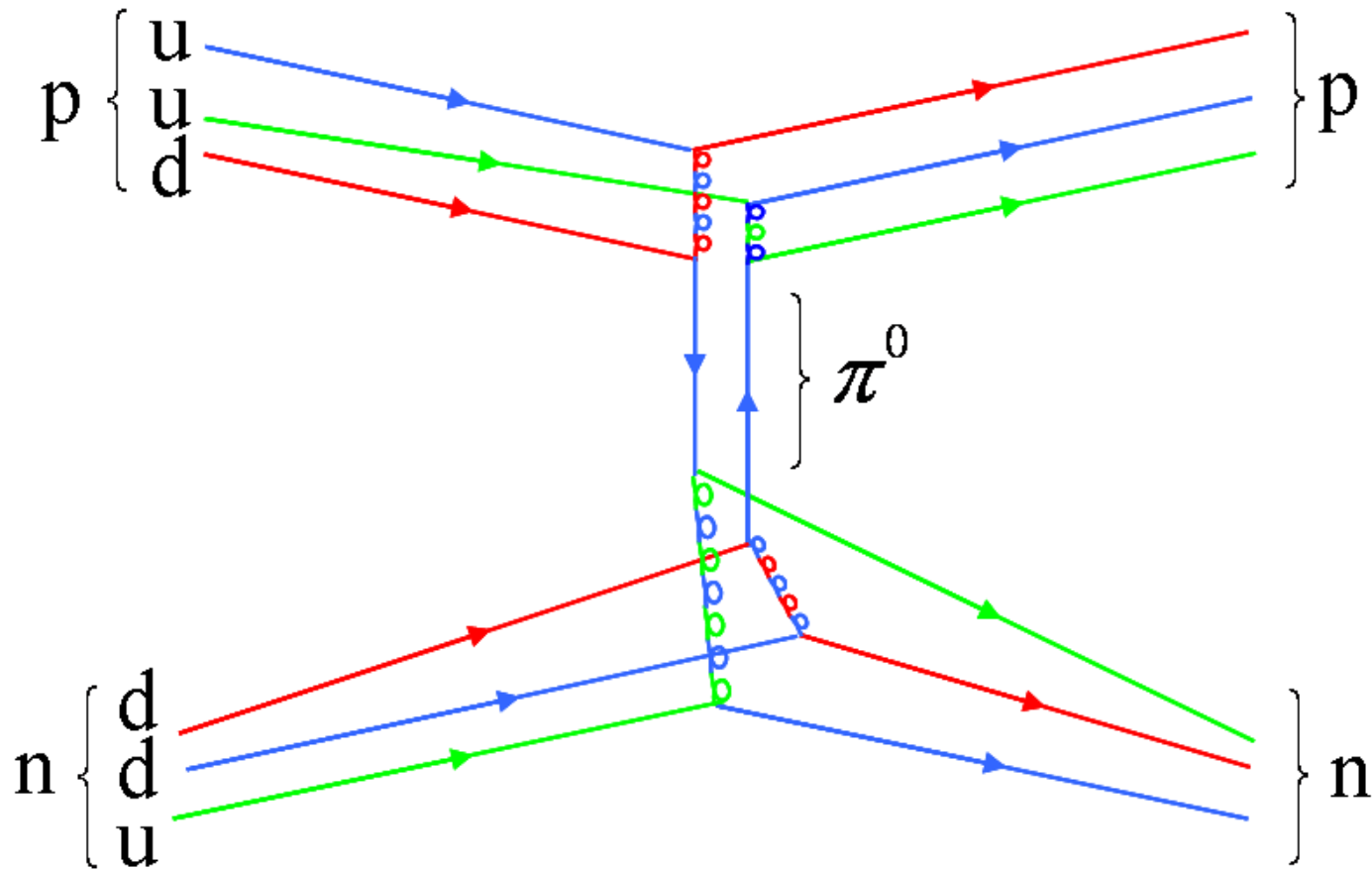


# Prozesse

## ► $\beta^-$ - Umwandlung



# Feynman-Diagramme: Ladungsfluss-Diagramme



# 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
- ▶ Eine Vorstufe der Feynman-Diagramme ist das x-y-Diagramm
- ▶ Ein Feynman-Diagramm ist ein x-t-Diagramm (Zeitachse nach rechts)
- ▶ Wechselwirkungen werden durch Vertices symbolisiert, an denen Teilchen emittiert, absorbiert, erzeugt oder vernichtet werden

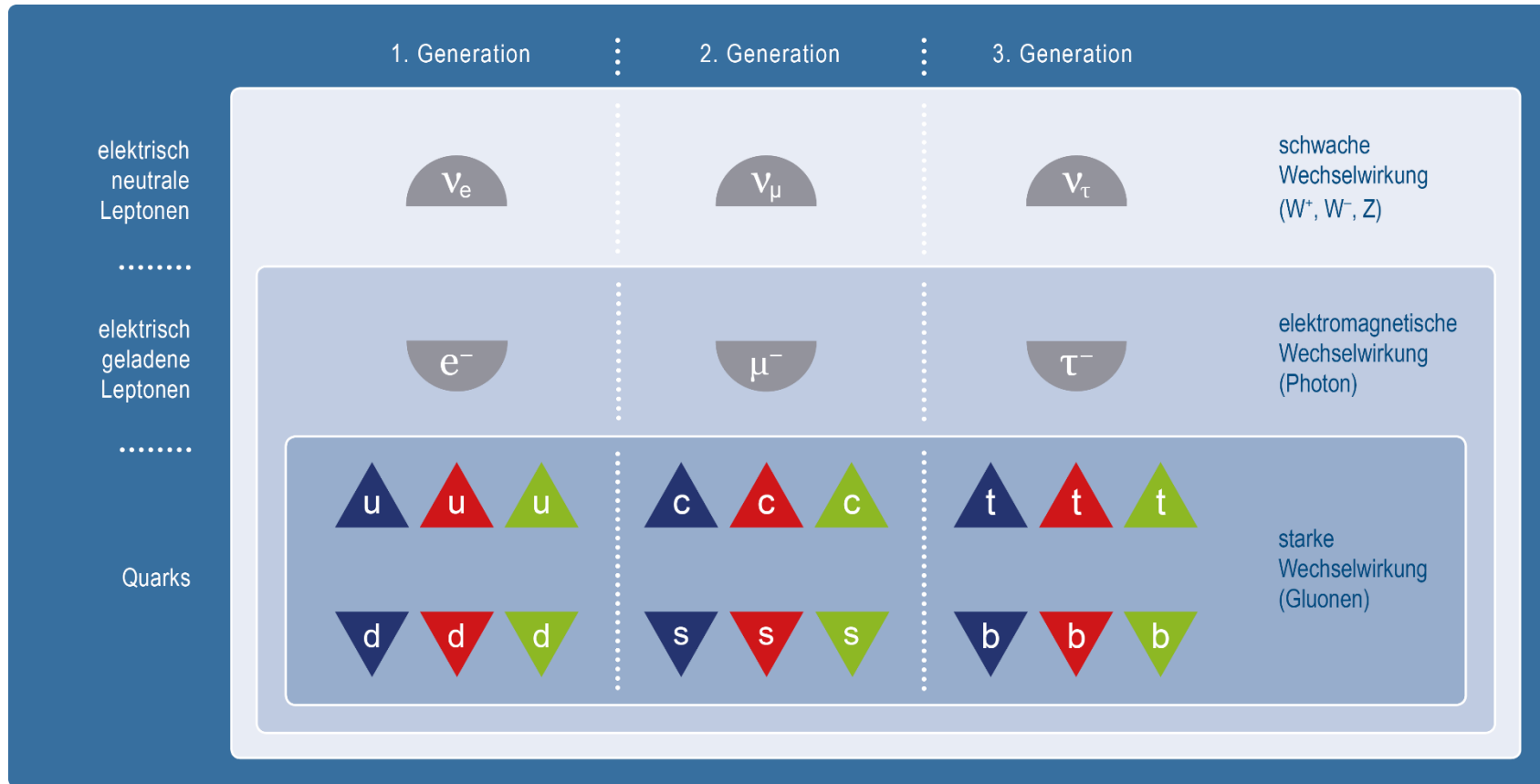
# „Teilchenzoo“ oder Ordnung?

- ▶ Uns umgebende Materie besteht aus Up-und Down-Quarks, Elektronen und Elektron-Neutrinos
- ▶ 1936: Entdeckung des Myons
  - Gleiche Ladungszahlen wie das Elektron
  - 200 Mal schwerer als das Elektron (Schwere „Kopie“ des Elektrons)
- ▶ 1975: Entdeckung des Tauons: schwere „Kopie“ des Myons

# „Teilchenzoo“ oder Ordnung?

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

# Anordnung von Teilchen in Generationen







# Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

- ▶ Analogie zum Periodensystem der Elemente (PSE) in der Chemie
- ▶ Drehen der Abbildung um  $90^\circ$  im Uhrzeigersinn
  - 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 aufsteigend geordnet
  - Analog dazu sind auch die Elementarteilchen in den um  $90^\circ$  gedrehten Darstellungen bezüglich der drei Generationen aufsteigend von oben nach unten nach ihrer Masse geordnet

<b>IA</b>	<b>1</b> 1.00794 <b>H</b> Hydrogen	<b>IIA</b>	<b>3</b> 6.941 <b>Li</b> Lithium	<b>4</b> 9.0122 <b>Be</b> Beryllium	<b>III</b>	<b>5</b> 10.811 <b>B</b> Boron	<b>IVA</b>	<b>6</b> 12.011 <b>C</b> Carbon	<b>V/A</b>	<b>7</b> 14.007 <b>N</b> Nitrogen	<b>VIA</b>	<b>8</b> 15.999 <b>O</b> Oxygen	<b>VIIA</b>	<b>9</b> 18.998 <b>F</b> Fluorine	<b>VIIIA</b>	<b>10</b> 20.180 <b>Ne</b> Neon																		
<b>2</b> 4.0026 <b>He</b> Helium	<b>11</b> 22.990 <b>Na</b> Sodium	<b>12</b> 24.305 <b>Mg</b> Magnesium	<b>13</b> 26.982 <b>Al</b> Aluminum	<b>14</b> 28.086 <b>Si</b> Silicon	<b>15</b> 30.974 <b>P</b> Phosphorus	<b>16</b> 32.062 <b>S</b> Sulfur	<b>17</b> 35.453 <b>Cl</b> Chlorine	<b>18</b> 39.948 <b>Ar</b> Argon	<b>19</b> 39.098 <b>K</b> Potassium	<b>20</b> 39.098 <b>Ca</b> Calcium	<b>21</b> 39.098 <b>Sc</b> Scandium	<b>22</b> 40.078 <b>Ti</b> Titanium	<b>23</b> 40.078 <b>V</b> Vanadium	<b>24</b> 50.942 <b>Cr</b> Chromium	<b>25</b> 51.996 <b>Mn</b> Manganese	<b>26</b> 55.937 <b>Fe</b> Iron	<b>27</b> 58.933 <b>Co</b> Cobalt	<b>28</b> 58.933 <b>Ni</b> Nickel	<b>29</b> 63.546 <b>Cu</b> Copper	<b>30</b> 65.38 <b>Zn</b> Zinc	<b>31</b> 69.723 <b>Ga</b> Gallium	<b>32</b> 72.64 <b>Ge</b> Germanium	<b>33</b> 74.922 <b>As</b> Arsenic	<b>34</b> 78.96 <b>Se</b> Selenium	<b>35</b> 79.904 <b>Br</b> Bromine	<b>36</b> 83.80 <b>Kr</b> Krypton								
<b>37</b> 85.468 <b>Rb</b> Rubidium	<b>38</b> 87.62 <b>Sr</b> Strontium	<b>39</b> 88.906 <b>Y</b> Yttrium	<b>40</b> 90.906 <b>Zr</b> Zirconium	<b>41</b> 91.224 <b>Nb</b> Niobium	<b>42</b> 95.94 <b>Mo</b> Molybdenum	<b>43</b> 97.94 <b>Tc</b> Technetium	<b>44</b> 101.08 <b>Ru</b> Ruthenium	<b>45</b> 101.08 <b>Rh</b> Rhodium	<b>46</b> 106.92 <b>Pd</b> Palladium	<b>47</b> 107.87 <b>Ag</b> Silver	<b>48</b> 112.41 <b>Cd</b> Cadmium	<b>49</b> 114.82 <b>In</b> Indium	<b>50</b> 118.71 <b>Sn</b> Tin	<b>51</b> 127.60 <b>Sb</b> Antimony	<b>52</b> 127.60 <b>Te</b> Tellurium	<b>53</b> 126.91 <b>I</b> Iodine	<b>54</b> 131.29 <b>Xe</b> Xenon	<b>55</b> 132.91 <b>Cs</b> Cesium	<b>56</b> 137.33 <b>Ba</b> Barium	<b>57</b> 175.08 <b>La</b> Lanthanum	<b>58</b> 175.08 <b>Ce</b> Cerium	<b>59</b> 175.08 <b>Pr</b> Praseodymium	<b>60</b> 175.08 <b>Nd</b> Neodymium	<b>61</b> 175.08 <b>Pm</b> Promethium	<b>62</b> 175.08 <b>Sm</b> Samarium	<b>63</b> 175.08 <b>Eu</b> Europium	<b>64</b> 175.08 <b>Gd</b> Gadolinium	<b>65</b> 175.08 <b>Tb</b> Terbium	<b>66</b> 175.08 <b>Dy</b> Dysprosium	<b>67</b> 175.08 <b>Ho</b> Holmium	<b>68</b> 175.08 <b>Er</b> Erbium	<b>69</b> 175.08 <b>Tm</b> Thulium	<b>70</b> 175.08 <b>Yb</b> Ytterbium	<b>71</b> 175.08 <b>Lu</b> Lutetium
<b>72</b> 175.08 <b>Hf</b> Hafnium	<b>73</b> 175.08 <b>Ta</b> Tantalum	<b>74</b> 175.08 <b>W</b> Tungsten	<b>75</b> 175.08 <b>Re</b> Rhenium	<b>76</b> 175.08 <b>Os</b> Osmium	<b>77</b> 175.08 <b>Ir</b> Iridium	<b>78</b> 175.08 <b>Pt</b> Platinum	<b>79</b> 175.08 <b>Au</b> Gold	<b>80</b> 175.08 <b>Hg</b> Mercury	<b>81</b> 175.08 <b>Tl</b> Thallium	<b>82</b> 175.08 <b>Pb</b> Lead	<b>83</b> 175.08 <b>Bi</b> Bismuth	<b>84</b> 175.08 <b>Po</b> Polonium	<b>85</b> 175.08 <b>At</b> Astatine	<b>86</b> 175.08 <b>Rn</b> Radon	<b>87</b> 175.08 <b>Fr</b> Francium	<b>88</b> 175.08 <b>Ra</b> Radium	<b>89</b> 175.08 <b>Ac</b> Actinium	<b>90</b> 175.08 <b>Th</b> Thorium	<b>91</b> 175.08 <b>Pa</b> Protactinium	<b>92</b> 175.08 <b>U</b> Uranium	<b>93</b> 175.08 <b>Np</b> Neptunium	<b>94</b> 175.08 <b>Pu</b> Plutonium	<b>95</b> 175.08 <b>Am</b> Americium	<b>96</b> 175.08 <b>Cm</b> Curium	<b>97</b> 175.08 <b>Bk</b> Berkelium	<b>98</b> 175.08 <b>Cf</b> Californium	<b>99</b> 175.08 <b>Es</b> Einsteinium	<b>100</b> 175.08 <b>Fm</b> Fermium	<b>101</b> 175.08 <b>Md</b> Mendelevium	<b>102</b> 175.08 <b>No</b> Nobelium	<b>103</b> 175.08 <b>Lr</b> Lawrencium			

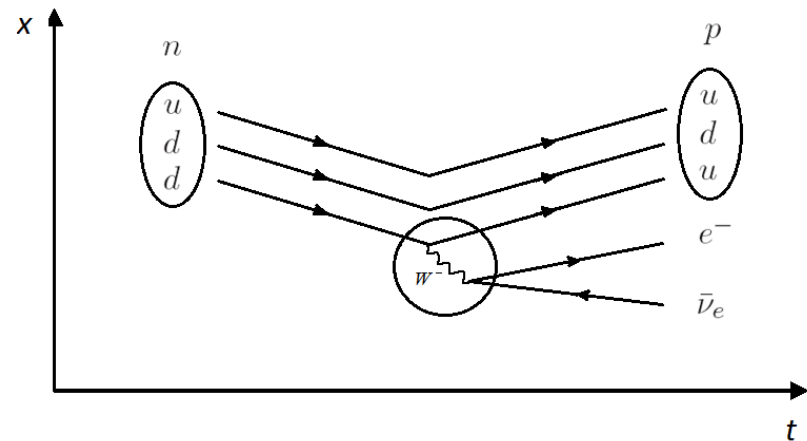
- |                                    | 1. Generation  | 2. Generation  | 3. Generation  |  |
|------------------------------------|--|--|--|--|
| elektrisch<br>neutrale<br>Leptonen | $\nu_e$  | $\nu_\mu$  | $\nu_\tau$   | schwache<br>Wechselwirkung<br>( $W^+, W^-, Z$ )  |
| .....                              |  |  |  |  |
| elektrisch<br>geladene<br>Leptonen | $e^-$  | $\mu^-$  | $\tau^-$   | elektromagnetische<br>Wechselwirkung<br>(Photon) |
| .....                              |  |  |  |  |
| Quarks                             | $\begin{matrix} u & d \\ d & u \end{matrix}$                         | $\begin{matrix} c & s \\ s & c \end{matrix}$                         | $\begin{matrix} t & b \\ b & t \end{matrix}$                         | starke<br>Wechselwirkung<br>(Gluonen)            |
|                                    | $\begin{matrix} \bar{u} & \bar{d} \\ \bar{d} & \bar{u} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \bar{c} & \bar{s} \\ \bar{s} & \bar{c} \end{matrix}$ | $\begin{matrix} \bar{t} & \bar{b} \\ \bar{b} & \bar{t} \end{matrix}$ |  |

# 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

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



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung

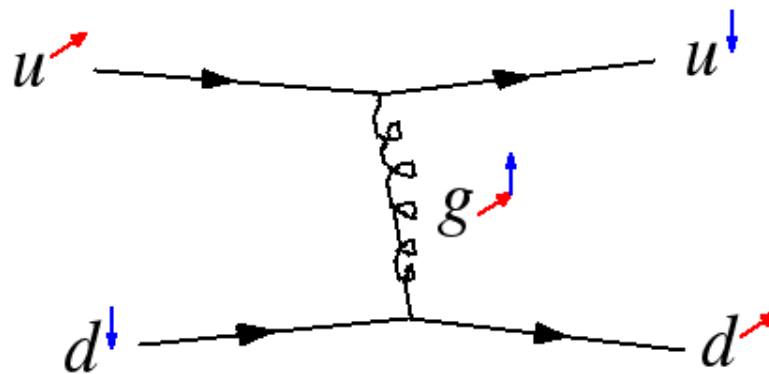
- Drei Up-Quarks mit Farbladungsvektoren  ,  , oder  haben alle schwache Ladungszahl  $I = +\frac{1}{2}$ , Down-Quarks hingegen  $I = -\frac{1}{2}$
- $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$

# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Starke Wechselwirkung

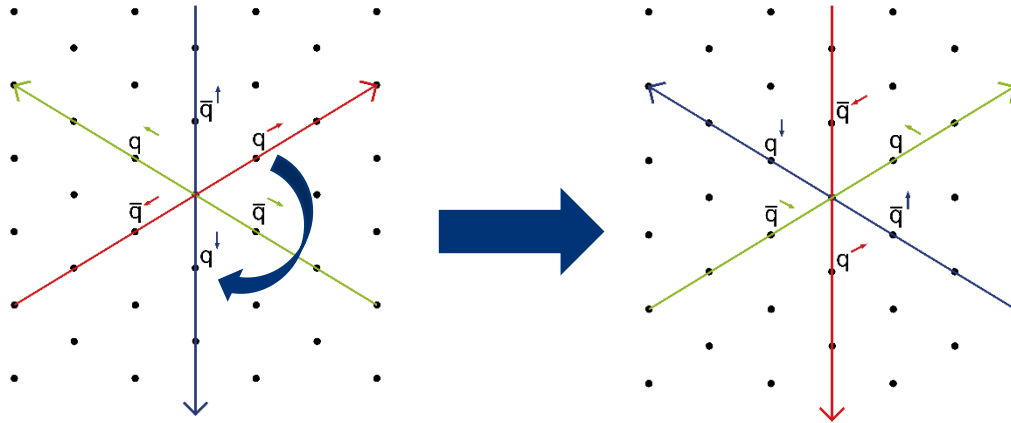
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks:  
Quarks bilden **Triplets** bezüglich der starken Ladung

►  $(u \rightarrow u \rightarrow u)$

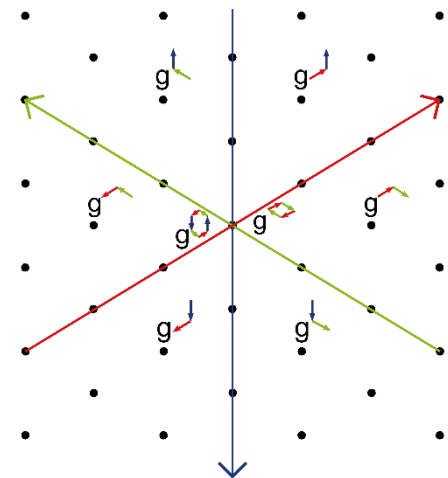
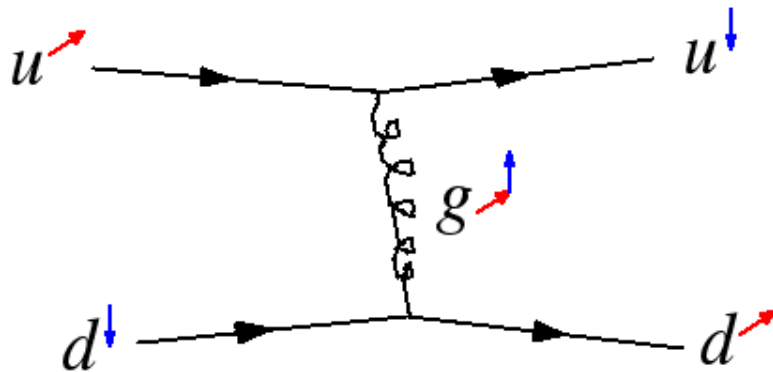


# Botenteilchen: Umwandlung innerhalb Multipletts

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



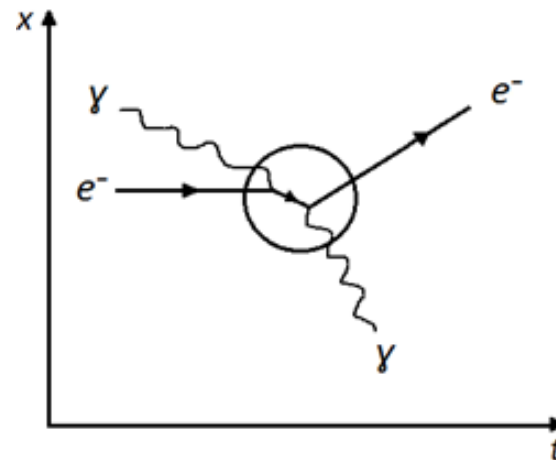
- hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

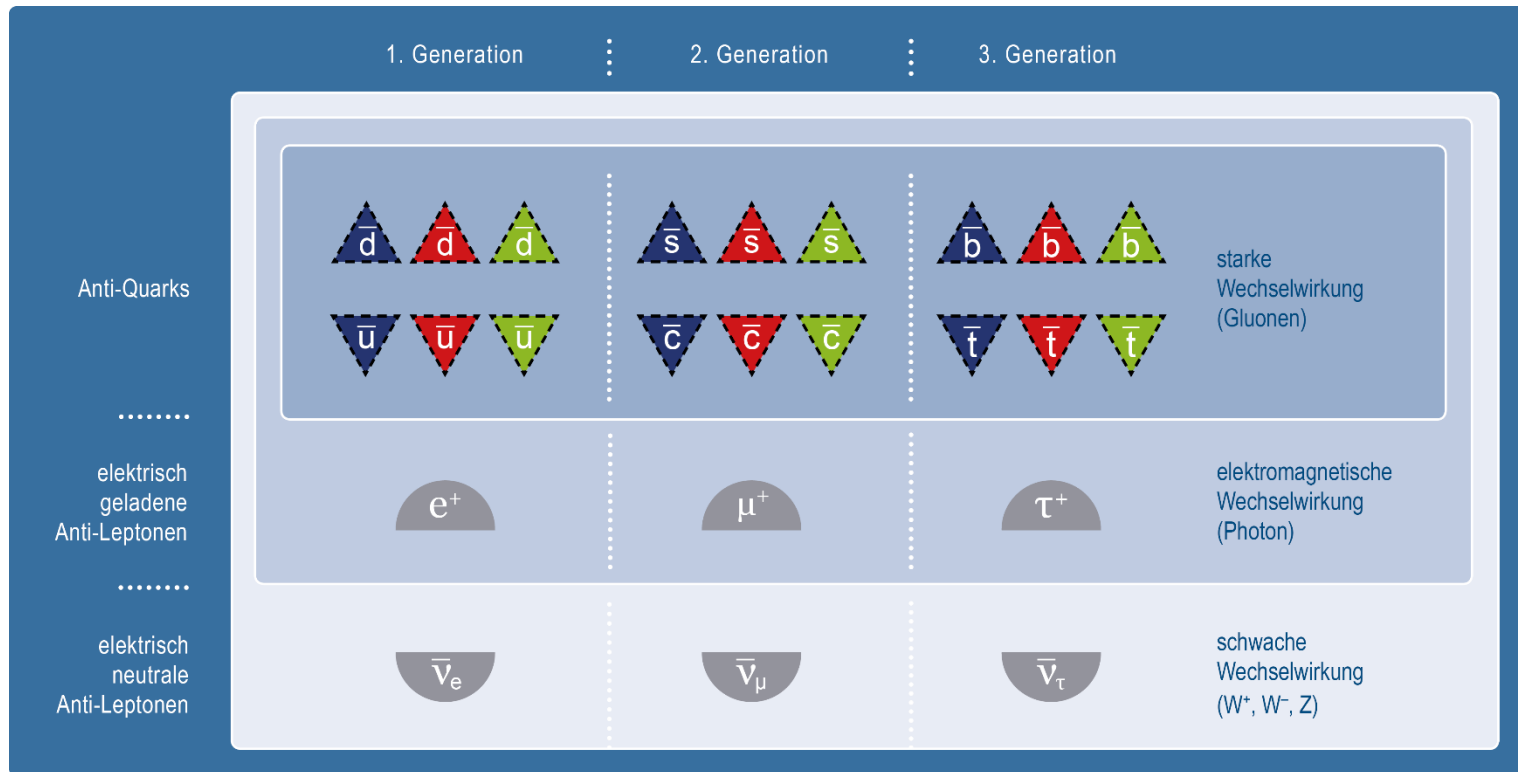
## ► Elektromagnetische Wechselwirkung

- 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

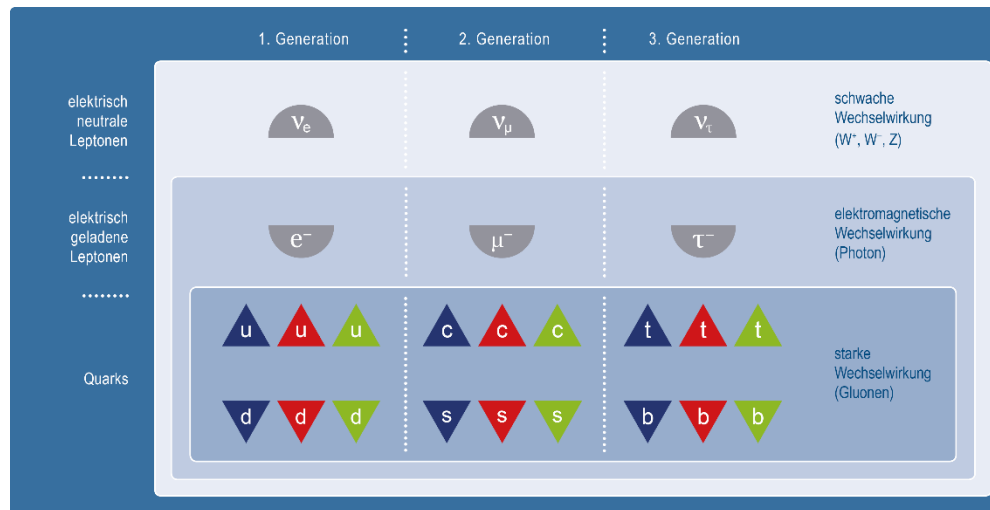
- ▶ Zu jedem Teilchen gibt es ein zugehöriges Teilchen, mit gleicher Masse jedoch entgegengesetzten Ladungen
- ▶ Anti-Materieteilchen ebenfalls in drei Generationen





# Zusammenfassung: Multipletts

- ▶ Teilchen lassen sich anhand ihrer Ladungen ordnen
- ▶ Experimentell findet man (nicht vorhersagbar!)
  - Dupletts der schwachen Wechselwirkung
  - Tripletts der starken Wechselwirkung
  - Singulets der elektromagnetischen Wechselwirkung



- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich



# Mögliche experimentelle Diskussionspunkte für den Unterricht

Woher weiß man,:

- ▶ dass es Quarks gibt?
- ▶ dass es drei verschieden 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](http://www.teilchenwelt.de)

ORIGINALSCHAUPLATZ



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

JOACHIM  
HERZ  
STIFTUNG



04.02.2017



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Diskussion / Fragen





Unterrichts-Sequenzplanung

# Gruppenarbeit



# Gruppenauftrag

## ► Sequenzplanung

- Planen Sie eine Unterrichtseinheit mit einem ausgewählten teilchenphysikalischen Schwerpunkt.
- Halten Sie die groben Lernziele der UE fest.
- Geben Sie an, welches Vorwissen benötigt wird.

## ► Präsentation der Ergebnisse

- Ergebnispräsentation pro Gruppe vor Plenum (morgen)
- Pro Gruppe ca. 5 min Präsentation und 10 min Diskussion

# Gruppeneinteilung

Gruppe 1:  
Konzept der Wechselwirkungen

Gruppe 2:  
Ladungen als Ordnungsprinzip

Gruppe 3:  
Darstellen von Wechselwirkungen