

# Neue Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik

Philipp Lindenau  
CERN | 12.10.2016

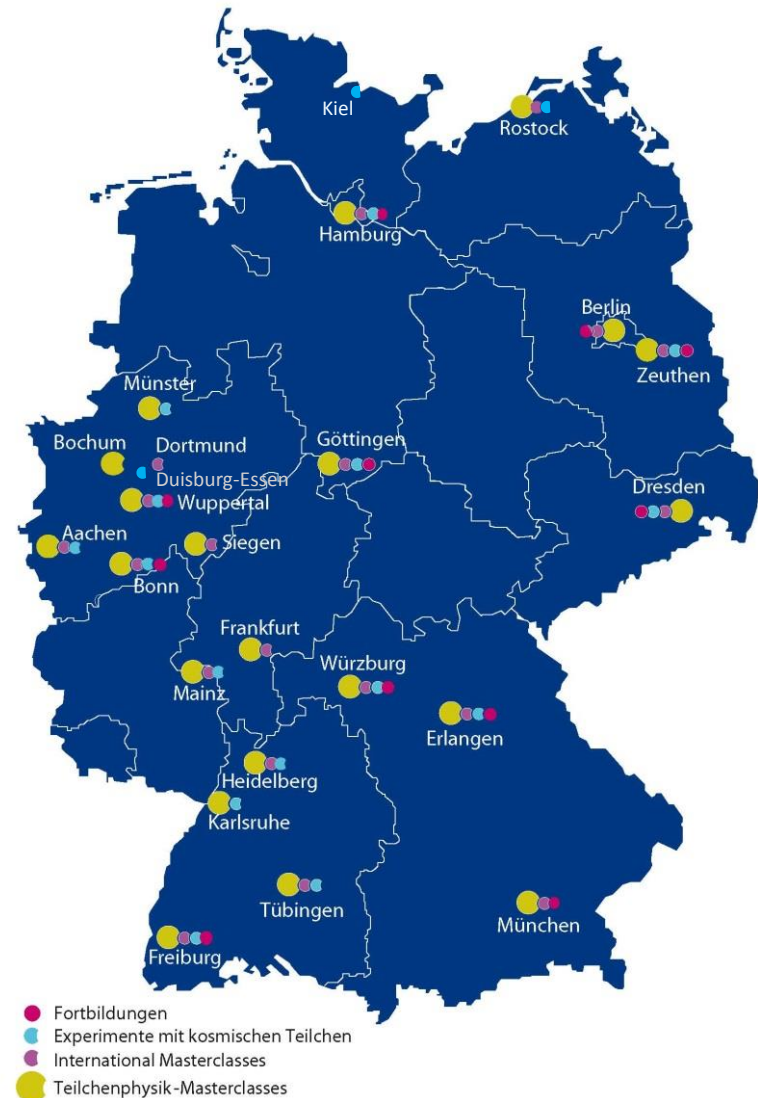
**Herzlich willkommen!**



NETZWERK  
TEILCHENWELT

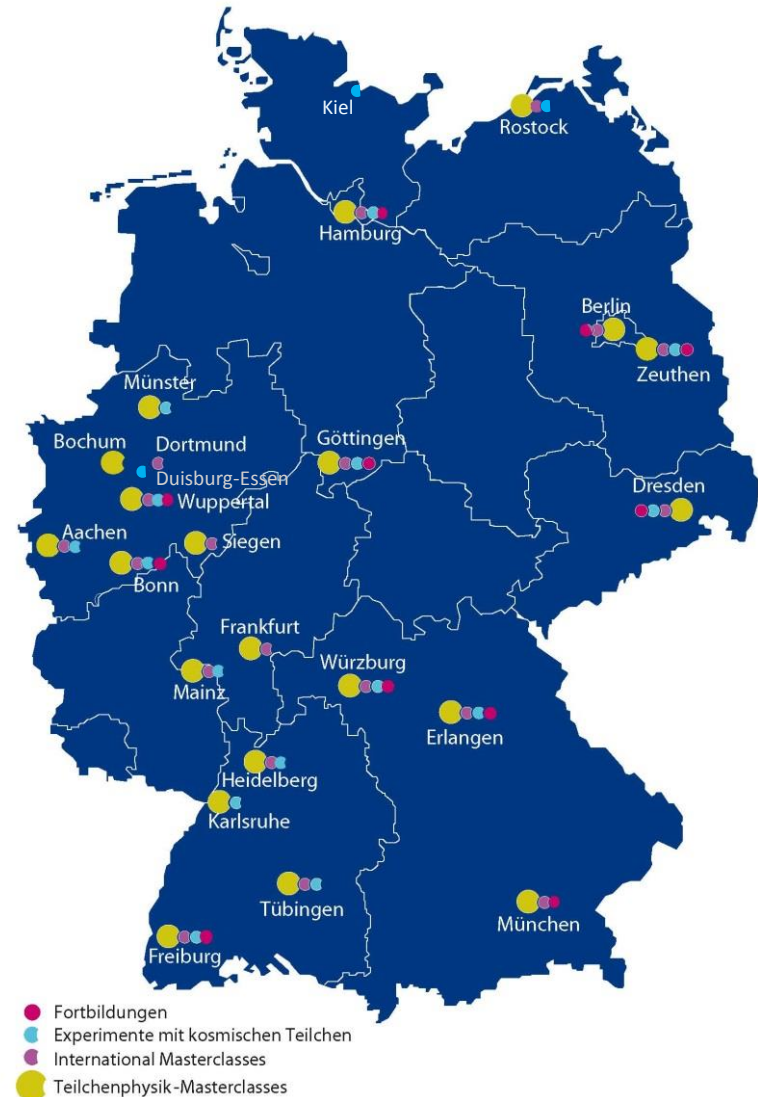
# Netzwerk Teilchenwelt

- ▶ 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

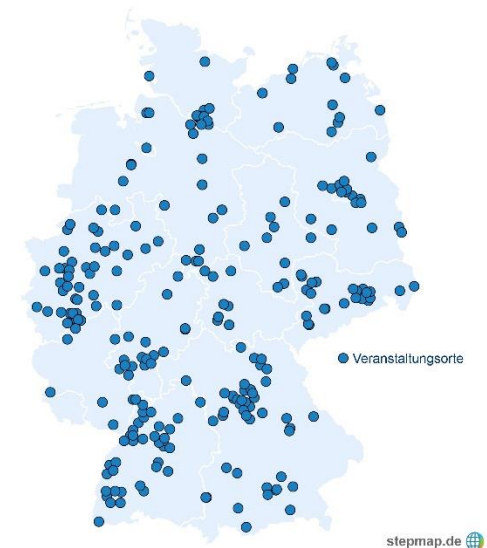


# Das Konzept: Stufenprogramm



# 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



stepmap.de 

# 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  
6



# 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-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:	antior, 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:	antior, 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:	antior, 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 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  $+\frac{2}{3}$  trägt das

1. Generation

Quarks

2. Generation

Quarks

3. Generation

Quarks

Elektrisch geladene Leptonen

Elektrisch neutrale Leptonen

stark (Gluonen)  
elektromagnetisch (Photon)  
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

# TEILCHENPHYSIK

UNTERRICHTSMATERIAL AB KLASSE 10  
Erstellt in Kooperation mit Netzwerk Teilchenwelt

KOSMISCHE STRAHLUNG



# Band 3: Kosmische Strahlung

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

## 2 INFORMATIONEN FÜR LEHRKRÄFTE

### 2.1 INHALTLICHE ANKÜPFUNGSPUNKTE IM LEHRPLAN

Die Themen Kosmische Strahlung, Teilchenphysik und die Erzeugung von Myonen sind im Lehrplan der Klassenstufe 10/11 enthalten. Die Themen sind im Zusammenhang mit der Erzeugung von Myonen zu behandeln. Die Themen sind im Zusammenhang mit der Erzeugung von Myonen zu behandeln.

### 2.2 WISSENSINISSE

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 2.3 LEHRZIELE

Die Schüler/innen sollen die folgenden Ziele erreichen:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 2.4 ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 2.5 ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

## 3.3 WOHER KOMMEN DIE MYONEN?

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 3.3.1 ERZEUGUNG DER ERZEUGUNG VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 3.3.2 ERZEUGUNG DER ERZEUGUNG VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 3.3.3 ERZEUGUNG DER ERZEUGUNG VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 3.3.4 ERZEUGUNG DER ERZEUGUNG VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 3.3.5 ERZEUGUNG DER ERZEUGUNG VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 3.3.6 ERZEUGUNG DER ERZEUGUNG VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 3.3.7 ERZEUGUNG DER ERZEUGUNG VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 3.3.8 ERZEUGUNG DER ERZEUGUNG VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 3.3.9 ERZEUGUNG DER ERZEUGUNG VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 3.3.10 ERZEUGUNG DER ERZEUGUNG VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

## AUFGABEN

### 1 EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER MITTLEREN LEBENSDAUER

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 1.1 EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER MITTLEREN LEBENSDAUER

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 1.2 EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER MITTLEREN LEBENSDAUER

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 1.3 EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER MITTLEREN LEBENSDAUER

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 1.4 EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER MITTLEREN LEBENSDAUER

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 1.5 EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER MITTLEREN LEBENSDAUER

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 2 BERECHNUNG DER LEBENSDAUER VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 2.1 BERECHNUNG DER LEBENSDAUER VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 2.2 BERECHNUNG DER LEBENSDAUER VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 2.3 BERECHNUNG DER LEBENSDAUER VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen

### 2.4 BERECHNUNG DER LEBENSDAUER VON MYONEN

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:
 

- Erzeugung kosmischer Teilchen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen
- Erzeugung von Myonen durch Kollisionen







## Band 1: Wechselwirkungen, Ladungen und Teilchen

- Ca. 100 Seiten Hintergrundinformationen für Lehrkräfte
- Einführung in das Standardmodell über das Konzept von Ladungen und Wechselwirkungen
- 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
- ▶ Klärung von fachlichen Fragen
- ▶ Vernetzung mit anderen Lehrkräften und Wissenschaftler
- ▶ Teilen und diskutieren eigener Unterrichtsideen
- ▶ Ideen und Anregungen zur Verbesserung der Arbeit von NTW

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

ORIGINALSCHAUPLATZ



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

JOACHIM  
HERZ  
STIFTUNG



Neue Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik, CERN



# Was ist Physik?



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



# Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

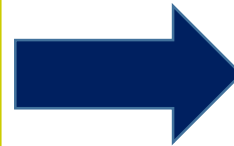
- ▶ **Newtonsche Mechanik** (17. Jhd.): „irdische“ Fallgesetze (Galilei) und Bewegung der Himmelskörper (Kepler) als Folgen der Gravitation
- ▶ **Elektromagnetismus** (19. Jhd.): Zusammenfassung elektrischer und magnetischer Phänomene durch J. C. Maxwell
- ▶ **Relativitätstheorie** (20. Jhd.): Vereinheitlichung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

# Reduktion

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

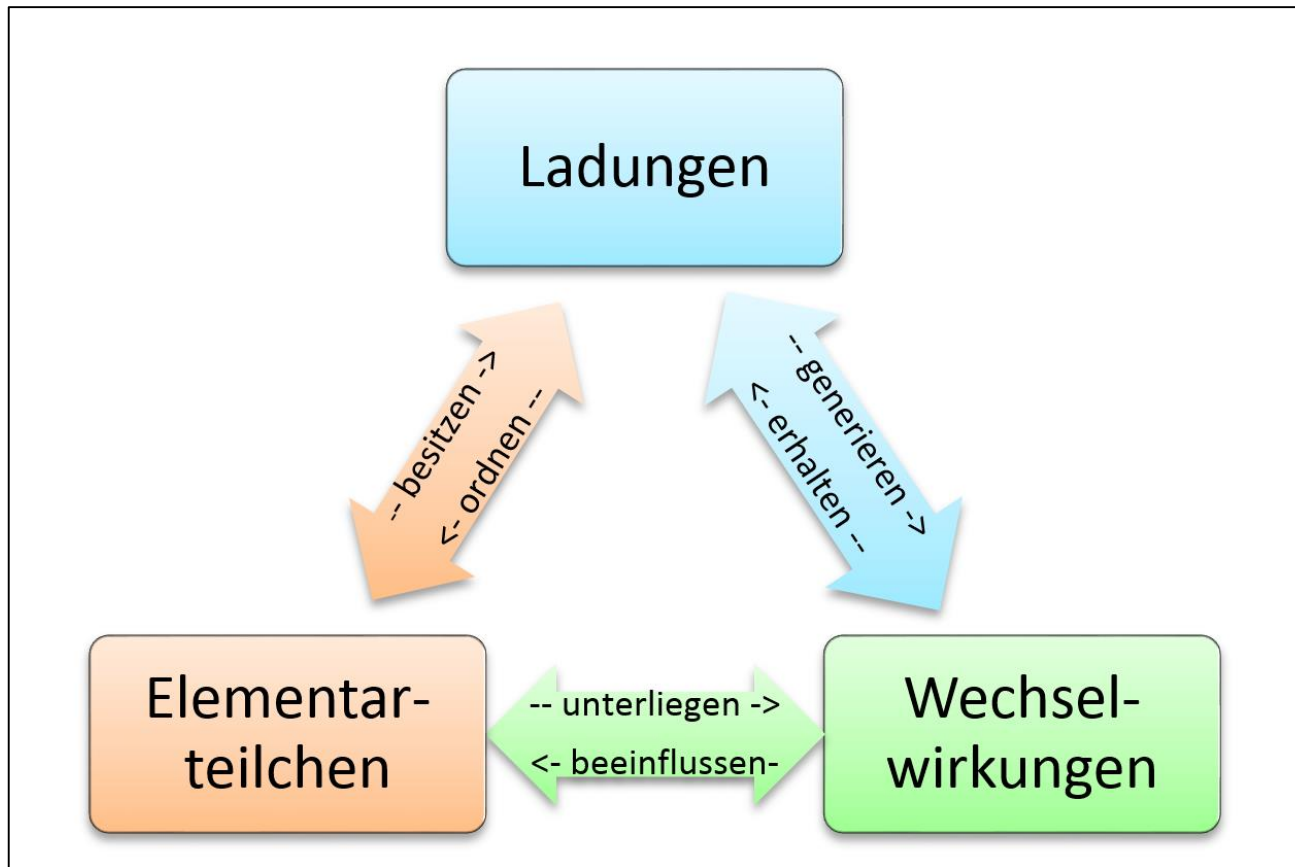
- ▶ Alle Vorgänge / Phänomene lassen sich auf 4 Wechselwirkungen zurückführen

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



**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**

# 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)

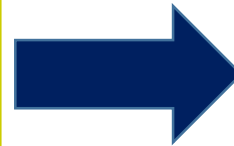
	I	II	III		
mass	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	7 GeV/c <sup>2</sup>
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
name	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon	<b>H</b> Higgs boson
	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</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

# 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

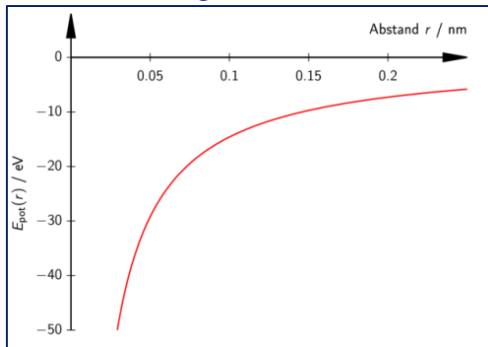
- Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B.  $\beta$ -Umwandlung)
- Erzeugung von Materie+Antimaterie (z.B. Elektron+Positron)
- Vernichtung in Botenteilchen (z.B. PET: 2 Photonen)

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

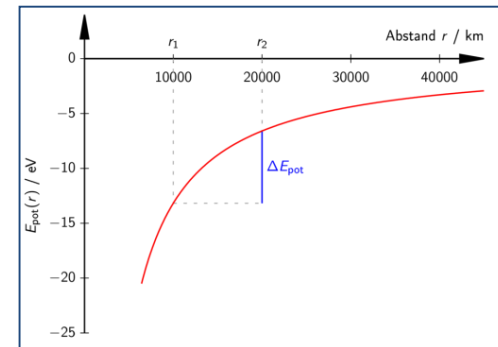
## ▶ Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

# Ausgangspunkt: Beschreibung der Vorgänge mit 2 bekannten Wechselwirkungen

## ► Elektromagnetische WW

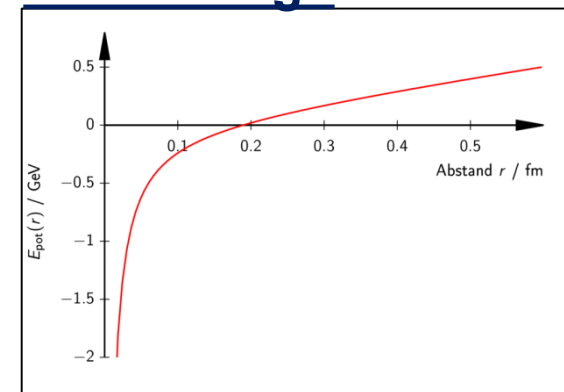


## ► Gravitation



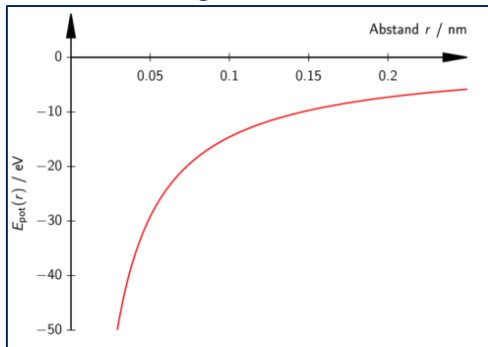
► Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen? ( $r \sim \text{fm}$ )

## ► Einführung: starke WW

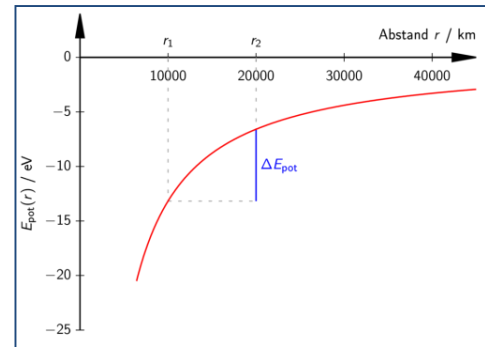


# Die vierte fundamentale Wechselwirkung

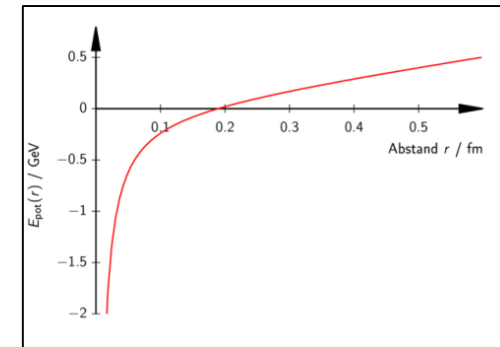
## ▶ Elektromagnetische WW



## ▶ Gravitation

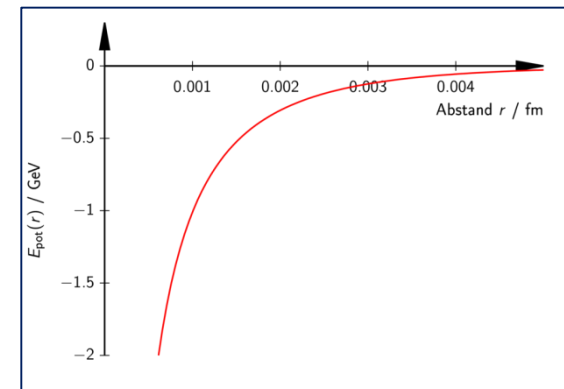


## ▶ starke WW



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

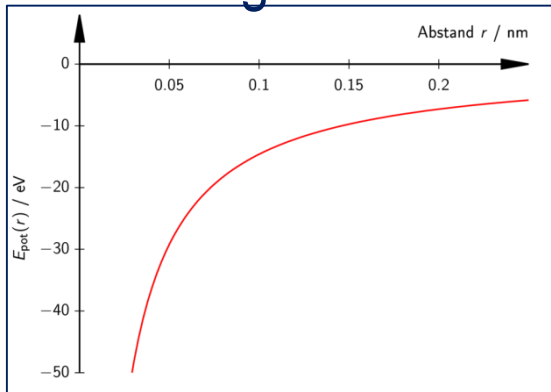
Umwandlung  $2p \rightarrow 2n$   
( $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$ )  
passiert **innerhalb** des Protons  
 $r \sim 0.001$  fm



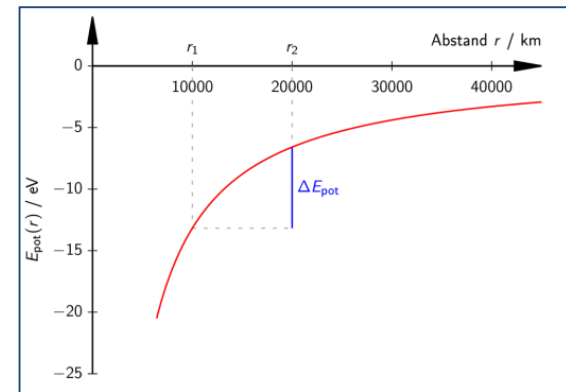


# Vergleich der potenziellen Energien

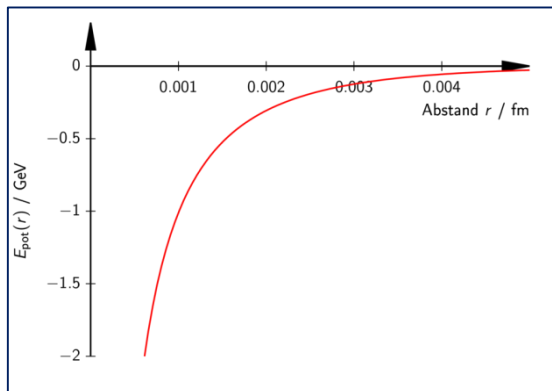
## ▶ Elektromagnetische WW



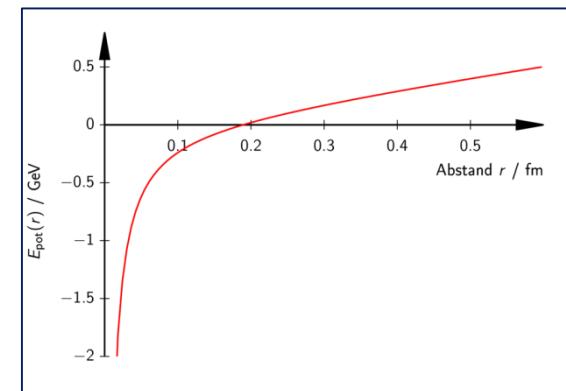
## ▶ Gravitation



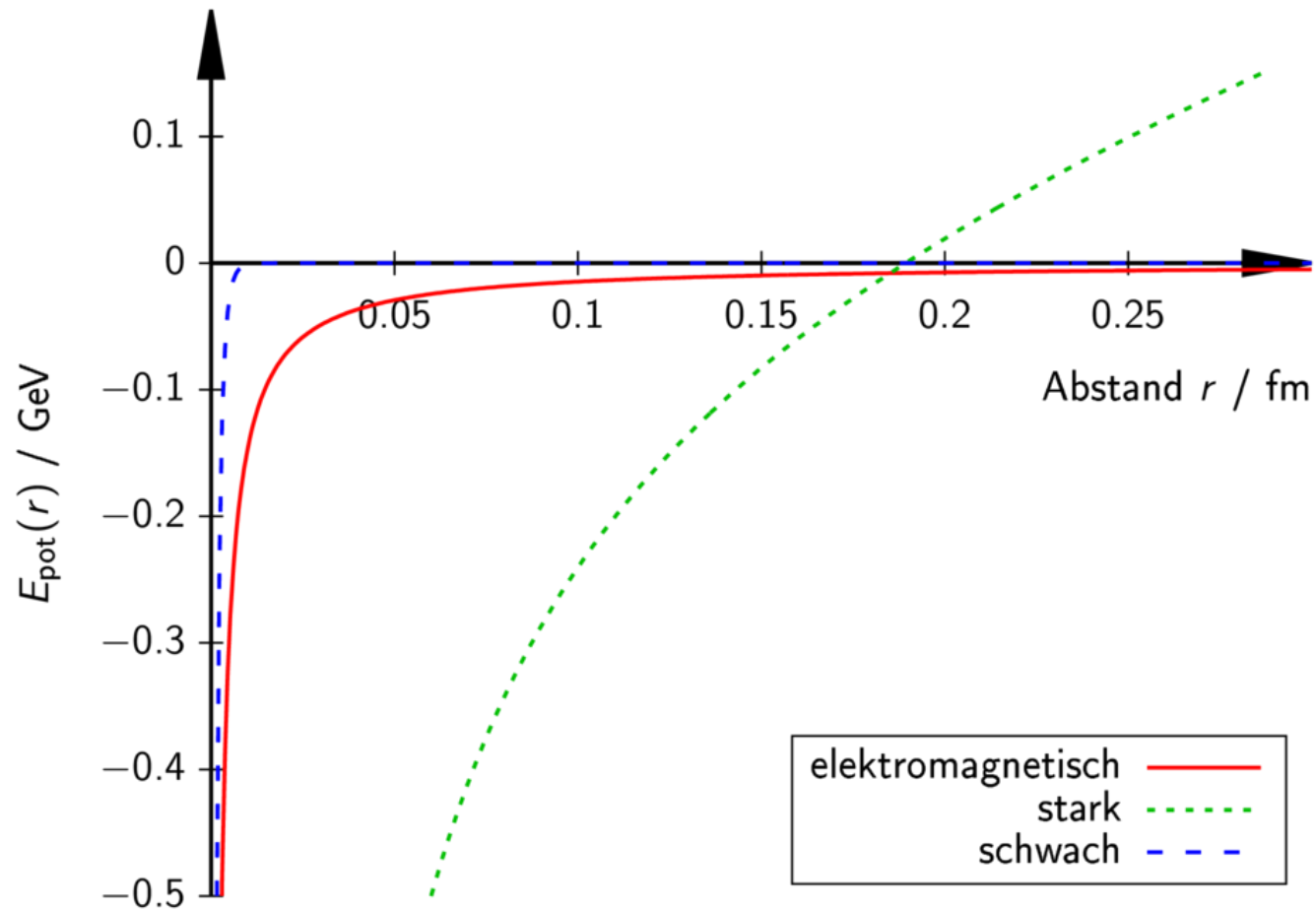
## ▶ schwache WW



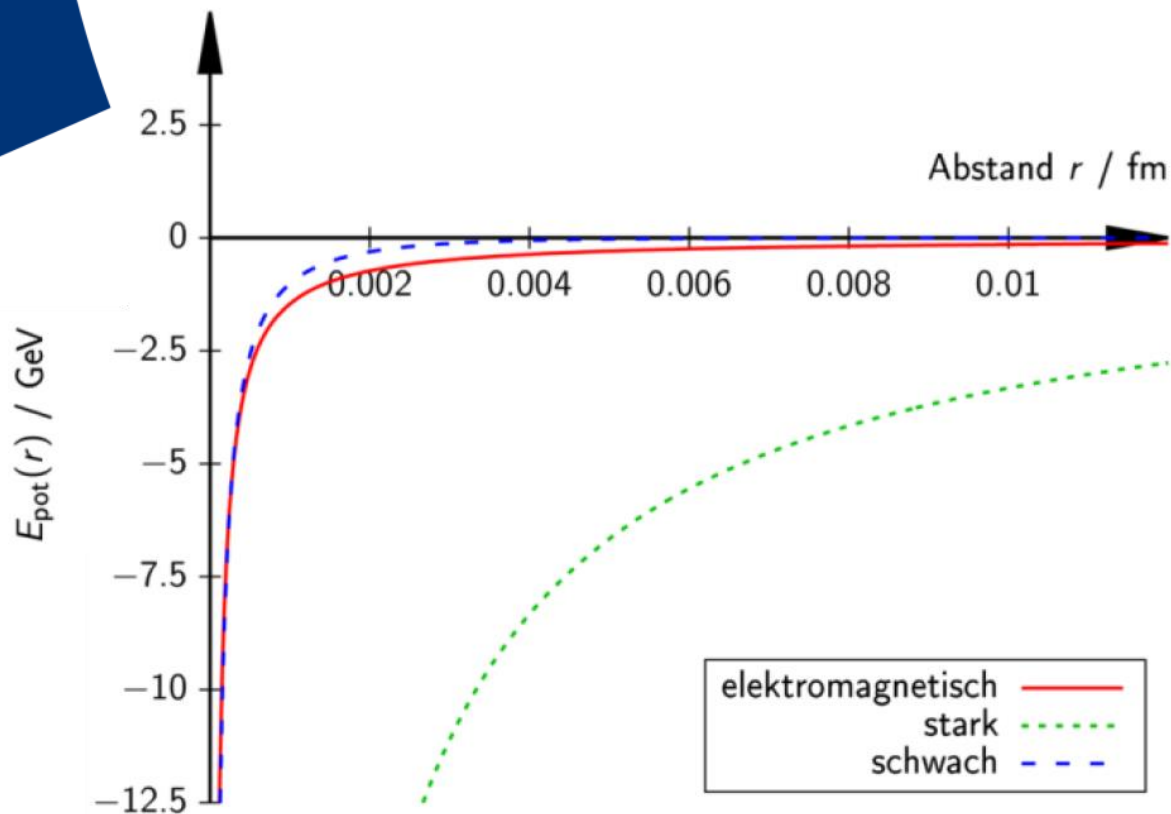
## ▶ starke WW



# Vergleich der potenziellen Energien

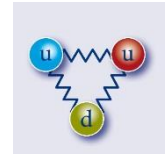
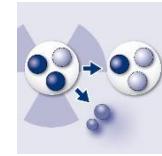


# Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen



- ▶ 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)

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

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

# Basiskonzept der Ladung



- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:

- Elektrische Ladung

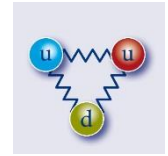
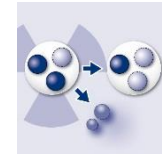
$$Q = q \cdot e$$

Elektrische  
Ladungszahl

Elementarladung

- ▶ Elementarladung ist nun im Kopplungsparameter  $\alpha$  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  $q$

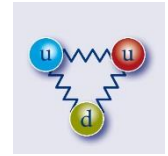
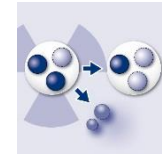
schwache Ladungszahl  $I$

starker Farbladungsvektor  $\vec{C}$

- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv oder negativ sein



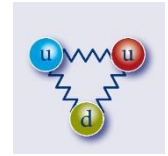
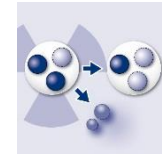
# Erweiterung: Konzept der Ladung



- ▶ 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?

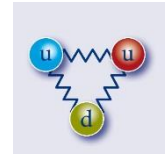
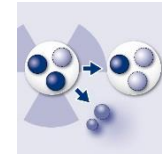
## ► Schulniveau:

- 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



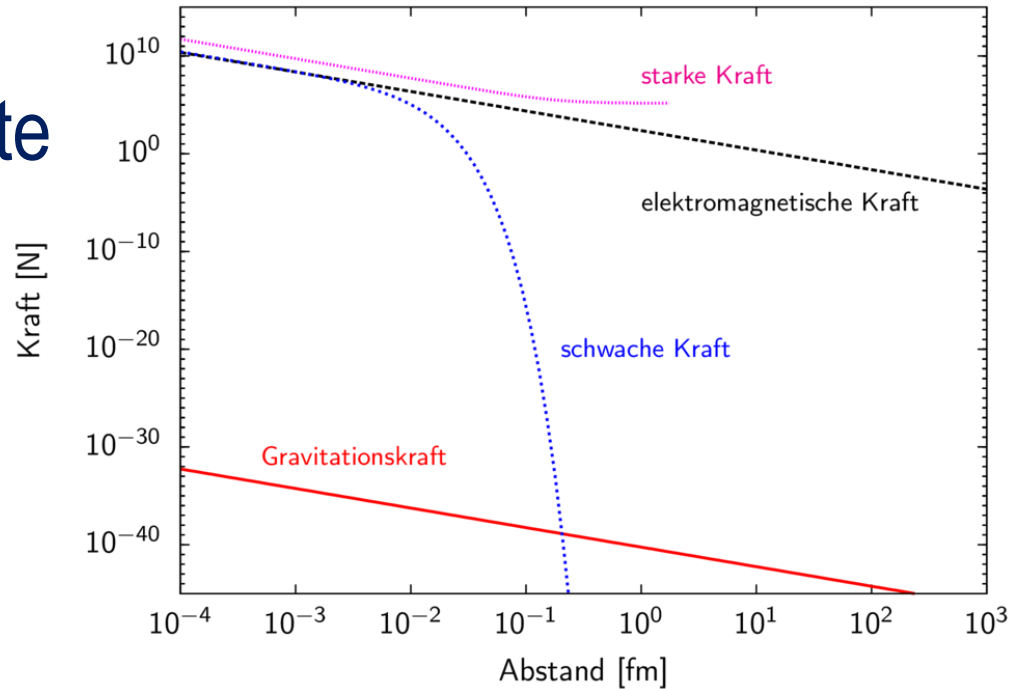
- ▶ Ladungen sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ Teilchen nehmen nur dann an einer bestimmten WW teil, wenn sie die Ladung der entsprechenden **Wechselwirkung** besitzen

Und:

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

# Vergleich der Kräfte

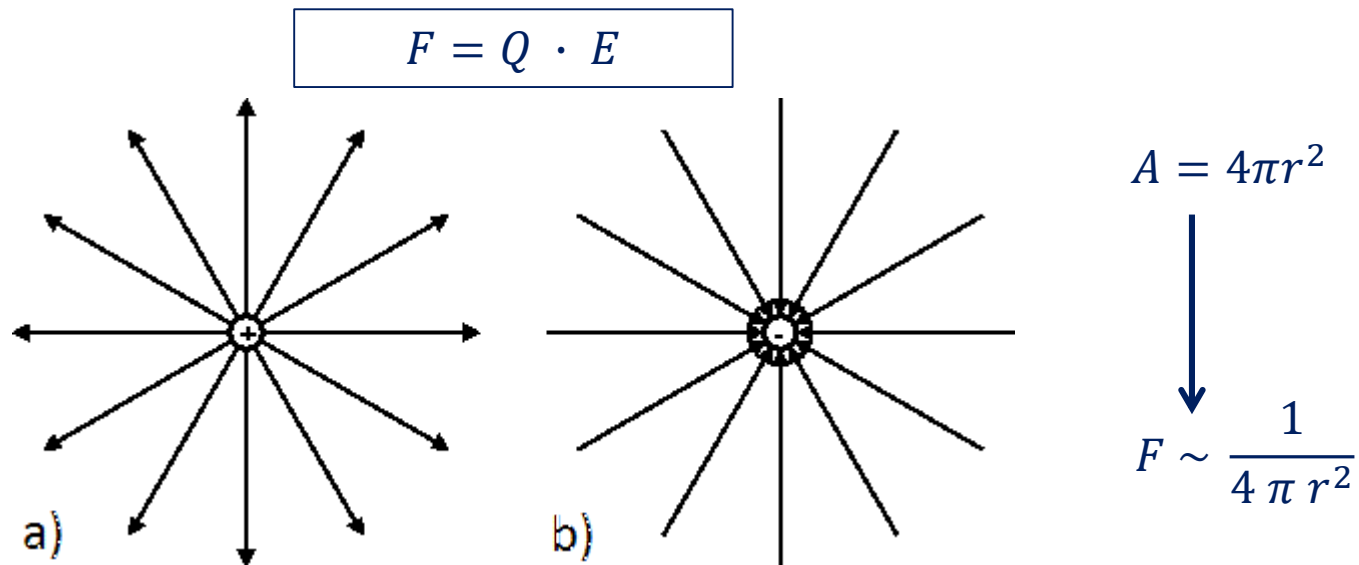
- Tiefe Einsicht:  
Alle  $\sim \frac{1}{r^2}$  für kleine  $r$



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	$F_W = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

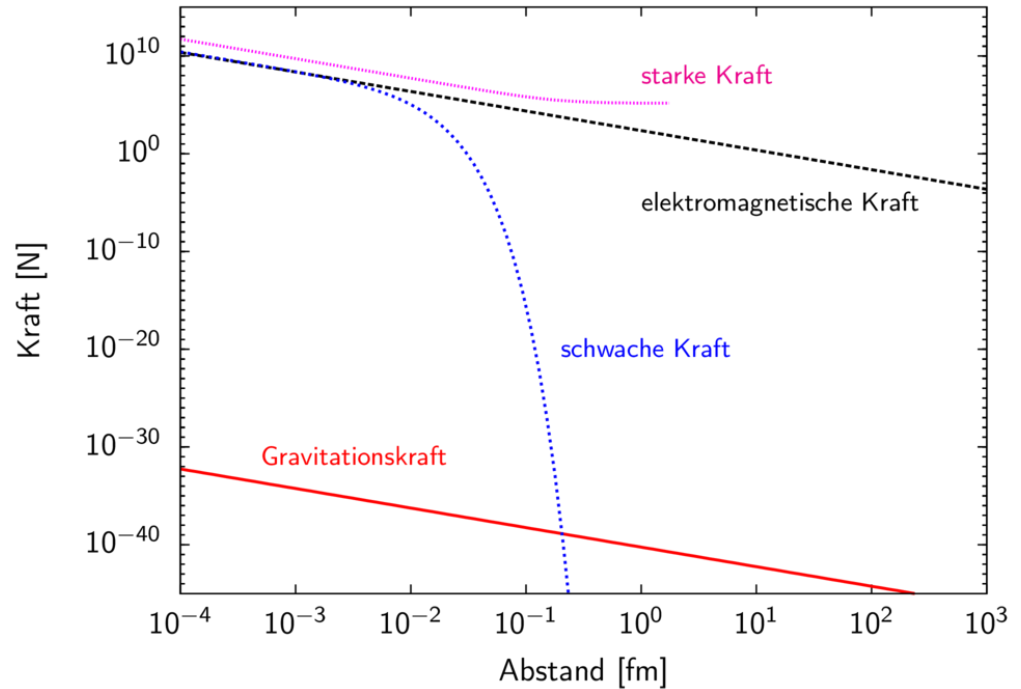
# Geometrische Betrachtung

- ▶ 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



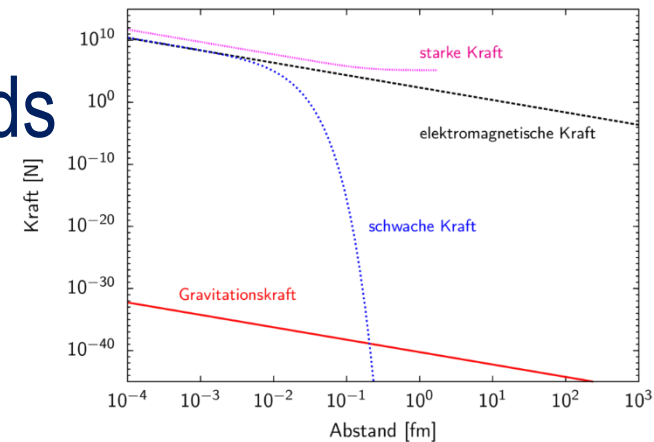
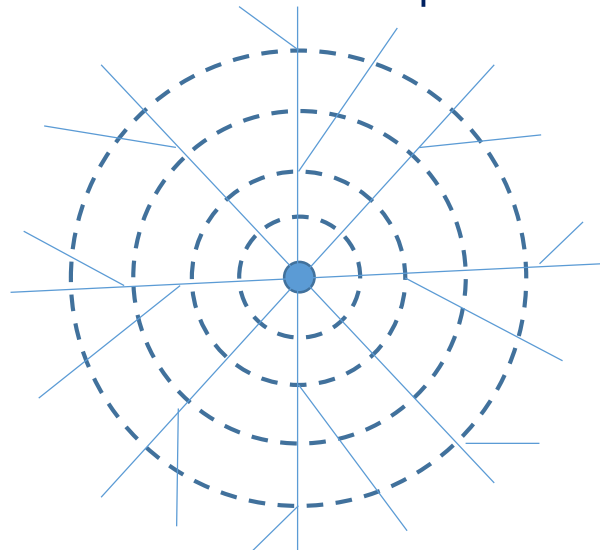
Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter $\alpha$
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$	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:

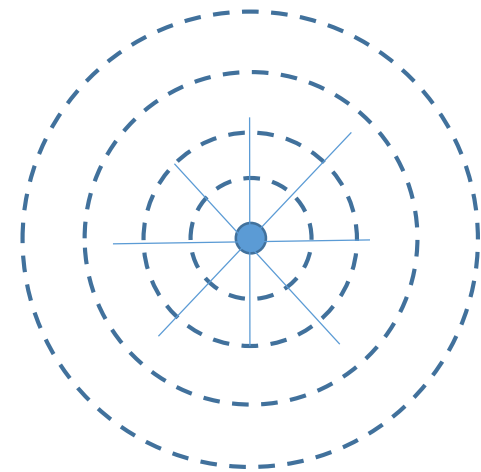
► stark

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



schwach

Kraft strebt rasch gegen Null  
Feldlinien enden „im Nichts“



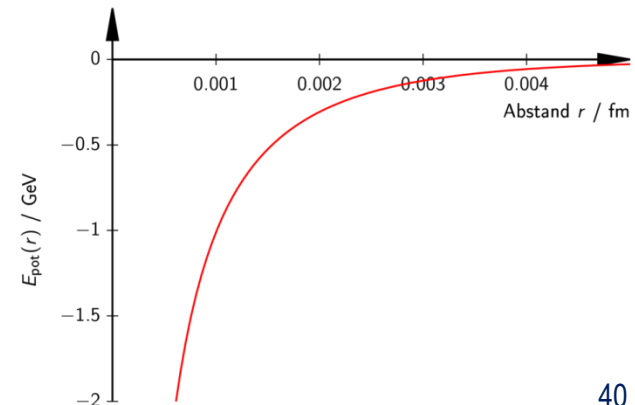
# Endliche Reichweiten

## ► 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

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

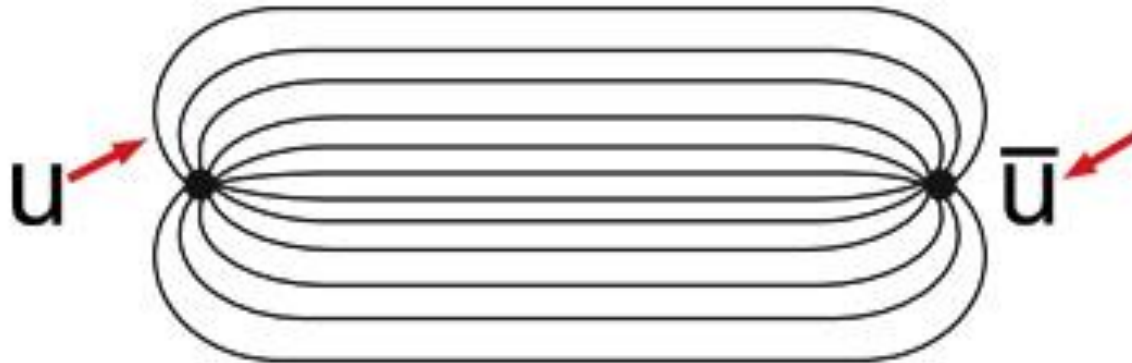
$$\text{► } \text{Mit } \lambda_W = \frac{\hbar}{m_W c} \approx 0,0024 \text{ fm}$$





# Endliche Reichweiten

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

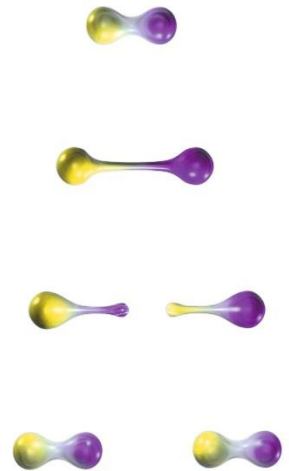
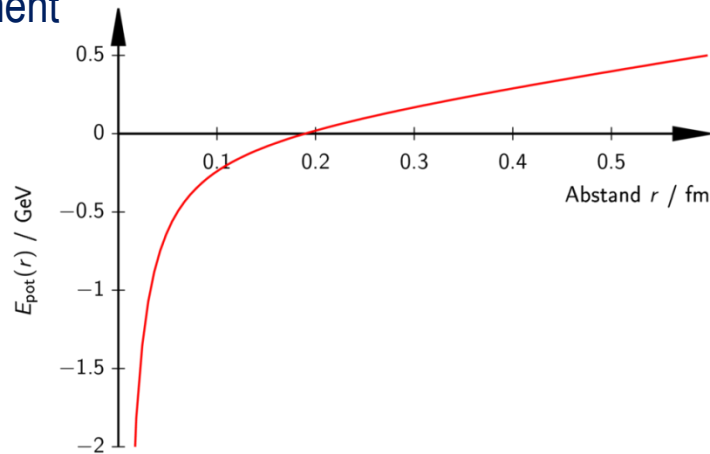


# Endliche Reichweiten

▶ 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



# Zusammenfassung: Wechselwirkungen

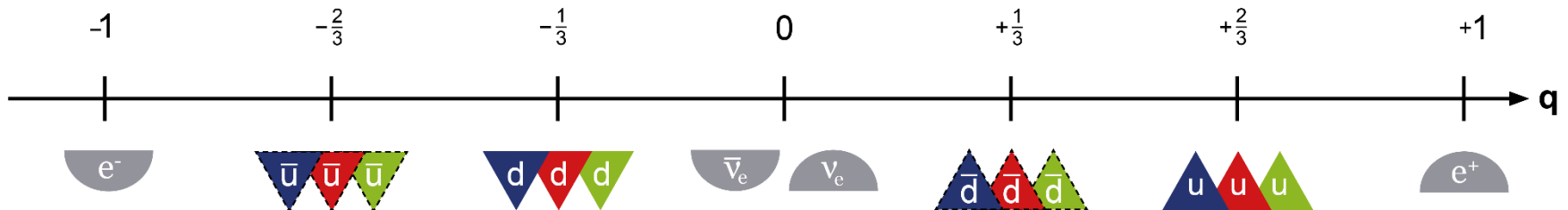
- ▶ Alle bekannten Vorgänge im Universum lassen sich auf 4 fundamentale Wechselwirkungen zurückführen
  - (Gravitation, elektromagnetische, schwache und starke WW)
- ▶ 3 dieser WWn werden im Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben **und besitzen sehr ähnliche Grundprinzipien**
- ▶ Nur 2 WWn besitzen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

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

# Elektrische Ladung

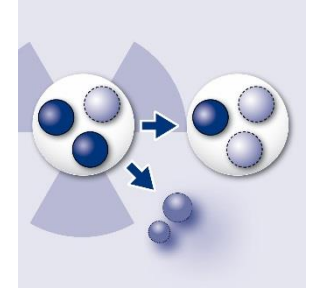


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen  $q$  einiger Anti-/Materieteilchen

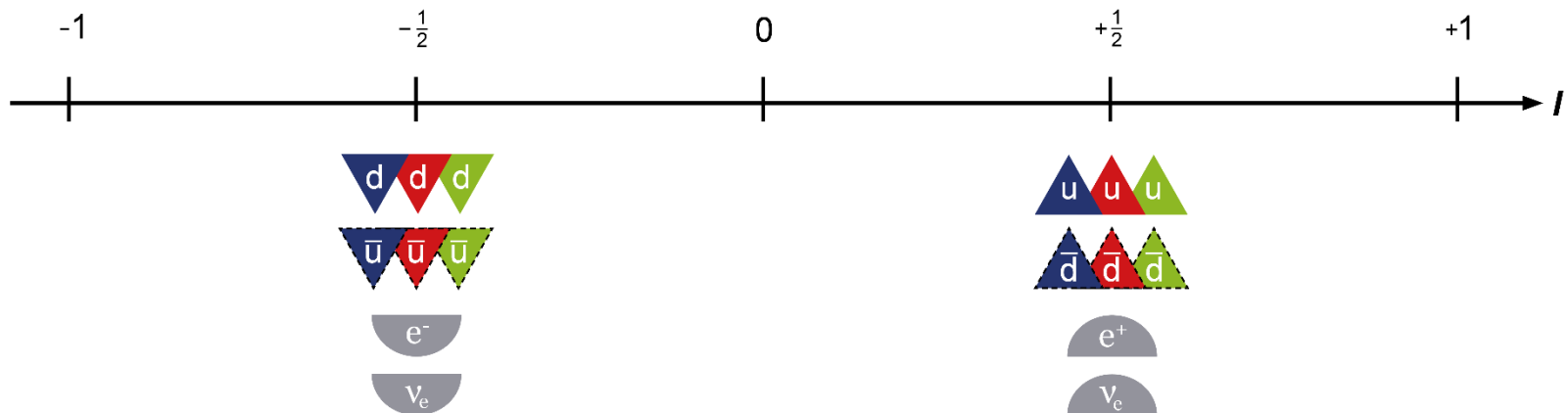


- Elektrische Ladung ist gequantelt

# Schwache Ladung



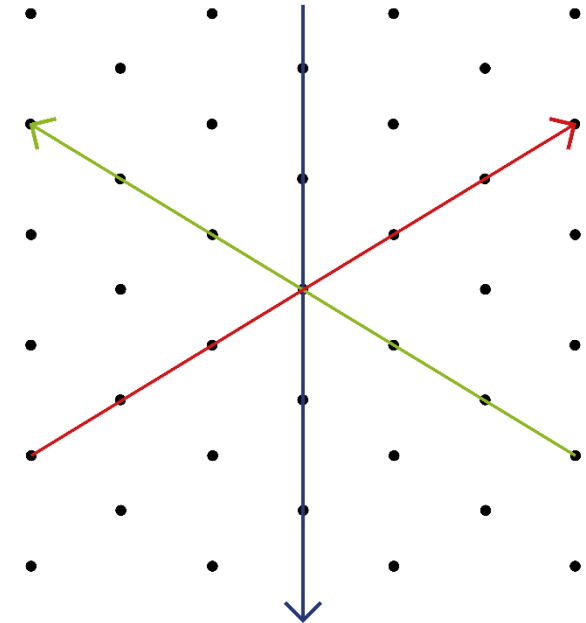
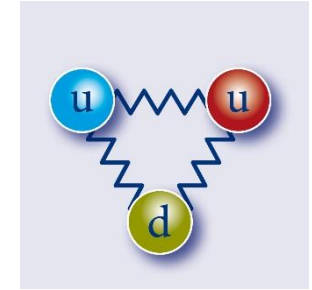
- ▶ Materieteilchen besitzen entweder eine schwache Ladungszahl von  $I = +\frac{1}{2}$  oder  $I = -\frac{1}{2}$ 
  - alle Materieteilchen nehmen an der schwachen WW teil



- ▶ Schwache Ladung ist gequantelt

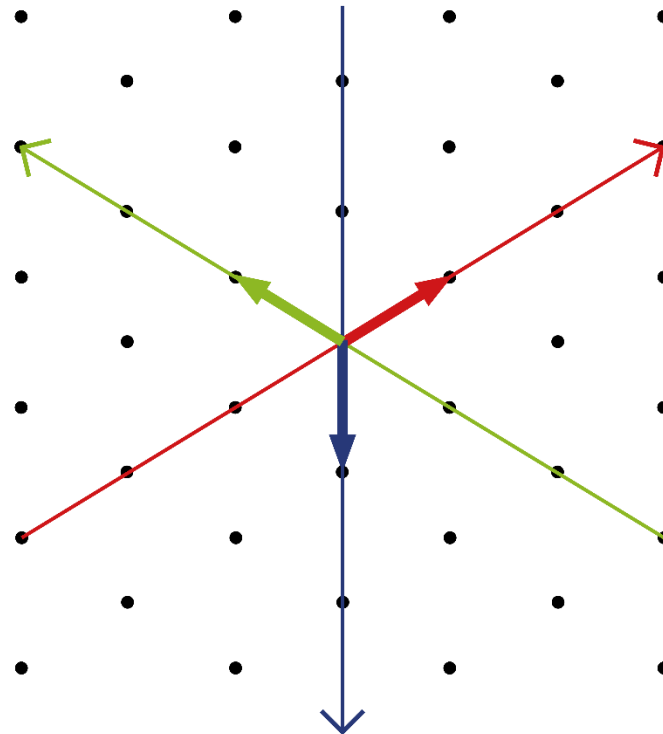
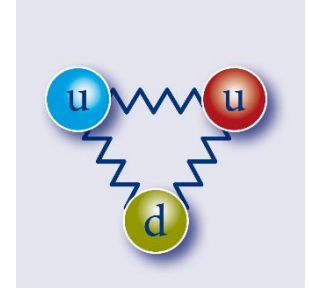
# Starke Ladung

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



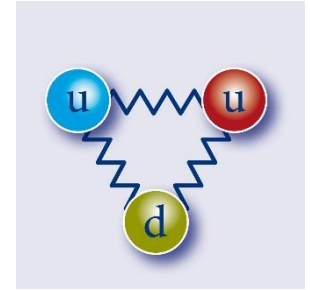
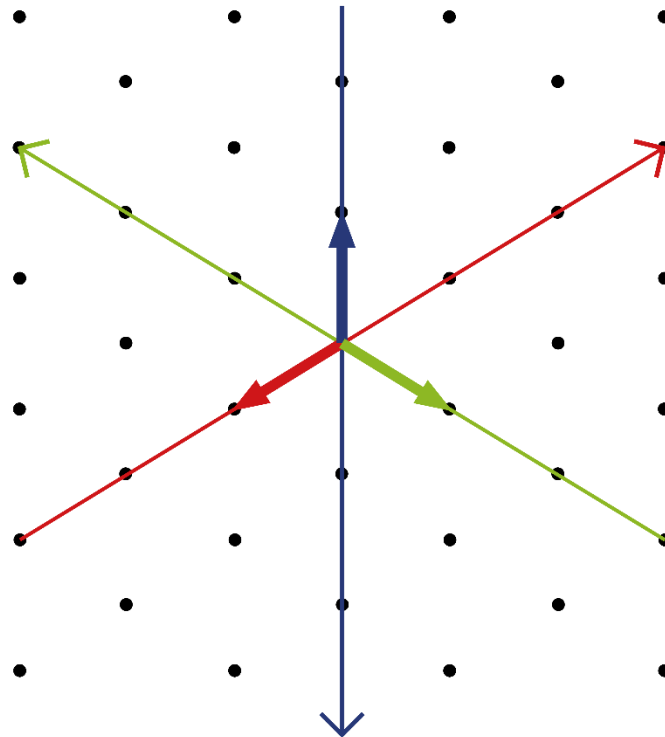
# Starke Ladung

## ► Farbladungsvektoren von Quarks

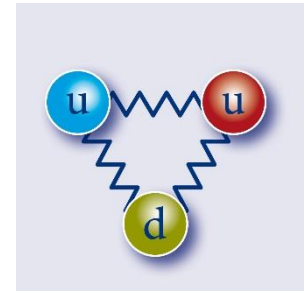
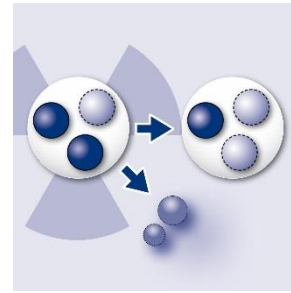


# Starke Ladung

## ► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks







- ▶ Alle drei Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

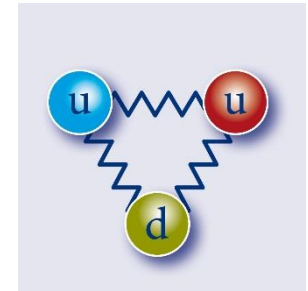
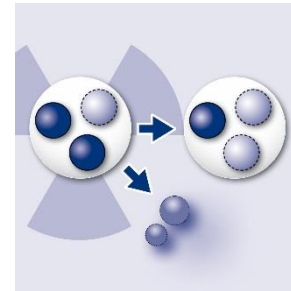
$$q_p = q_u + q_u + q_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- 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:

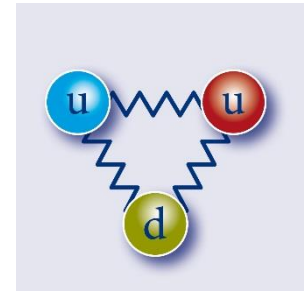
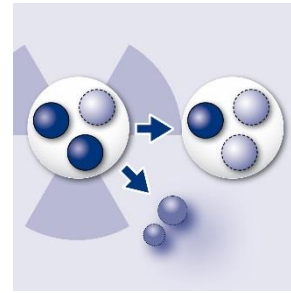
$$0 \rightarrow +1 - 1 + 0 = 0$$

- 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

	1. Generation	$l$	$q$	$\bar{c}$
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 ↓

starke Wechselwirkung  
 elektromagnetische Wechselwirkung  
 schwache Wechselwirkung

	1. Generation	$l$	$q$	$\bar{c}$
Quarks		$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	antiblau ↑
		$-\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	antiblau ↑
.....				
elektrisch geladene Leptonen		$+\frac{1}{2}$	+1	$\bar{0}$
.....				
elektrisch neutrale Leptonen		$-\frac{1}{2}$	0	$\bar{0}$

schwache Wechselwirkung  
 elektromagnetische Wechselwirkung  
 starke Wechselwirkung

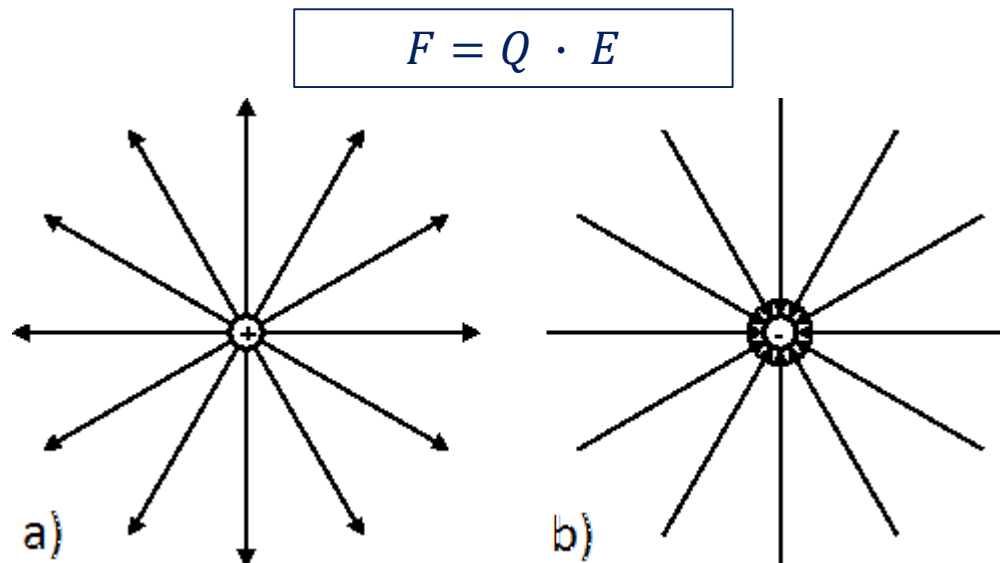
# Diskussion / Fragen



# Darstellen von Wechselwirkungen

## ► Klassische Physik: Feldlinien

für Wechselwirkungen mit unendlicher Reichweite  
hier: elektromagnetische Wechselwirkung



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

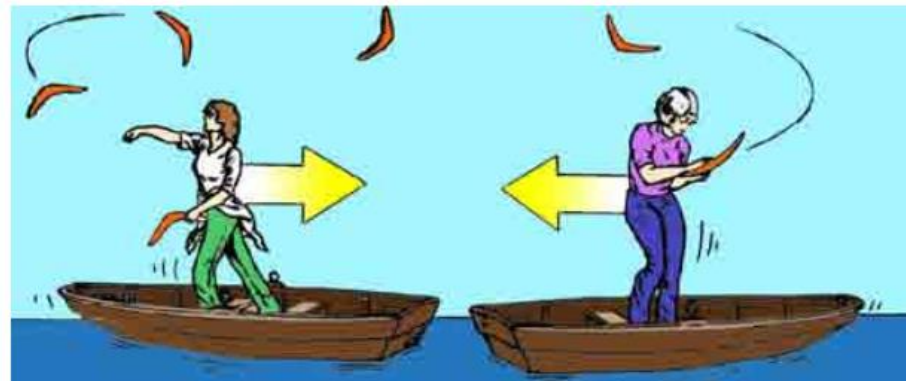
↓

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

# Darstellen von Wechselwirkungen

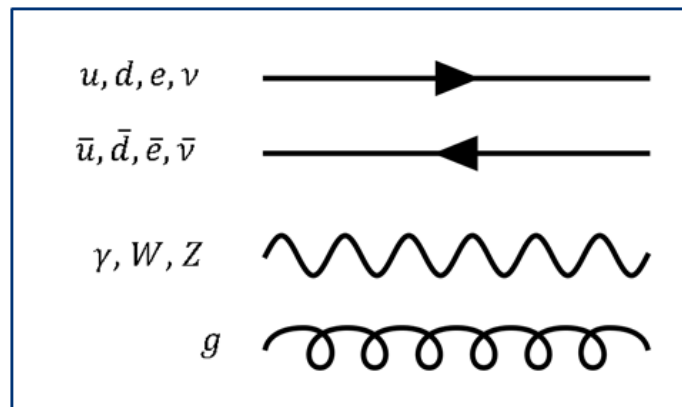
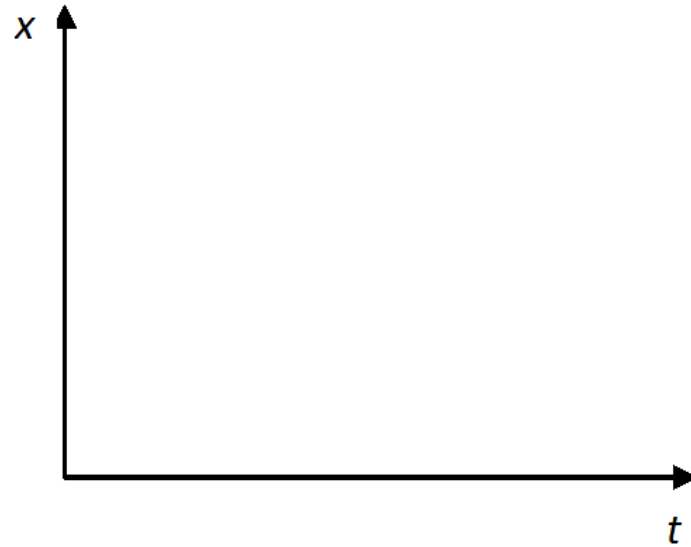
## ► Analogie: Austausch eines Botenteilchens

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



# Feynman-Diagramme

► Aufbau

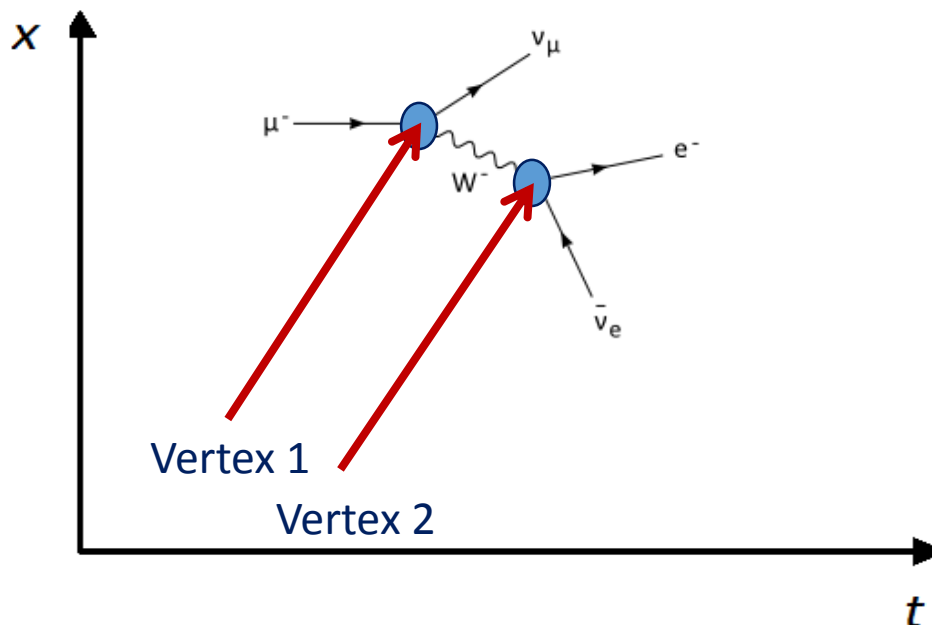




# Feynman-Diagramme

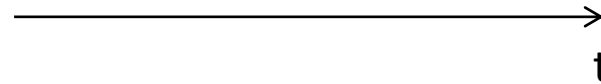
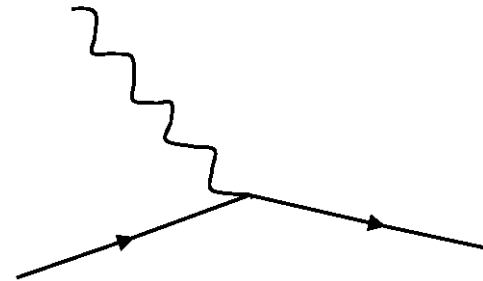
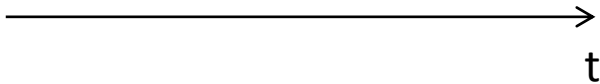
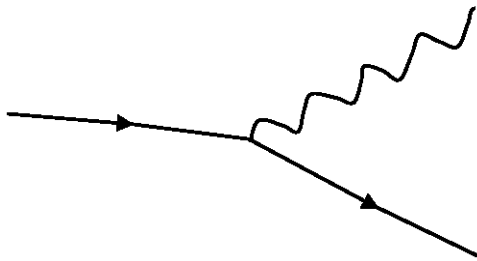
## ► Begriffsklärung:

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



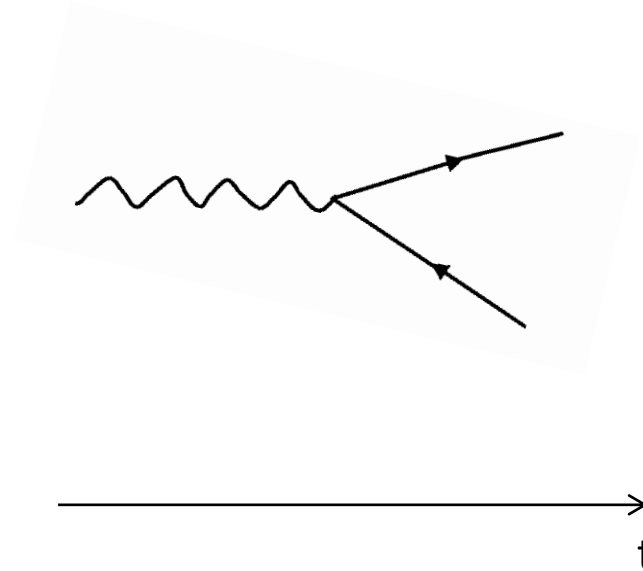
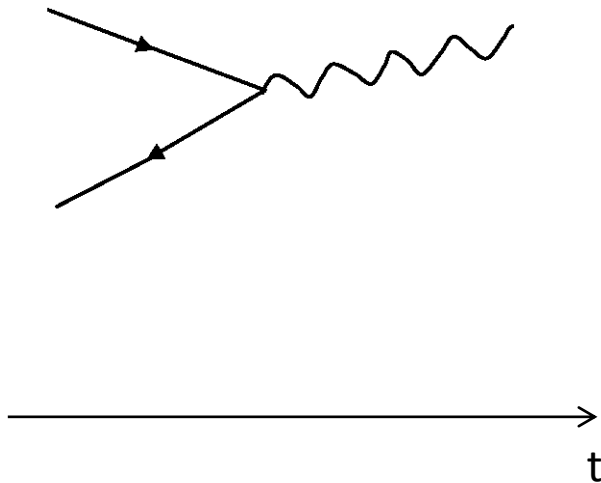
# Grundbausteine 1/2

## ► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



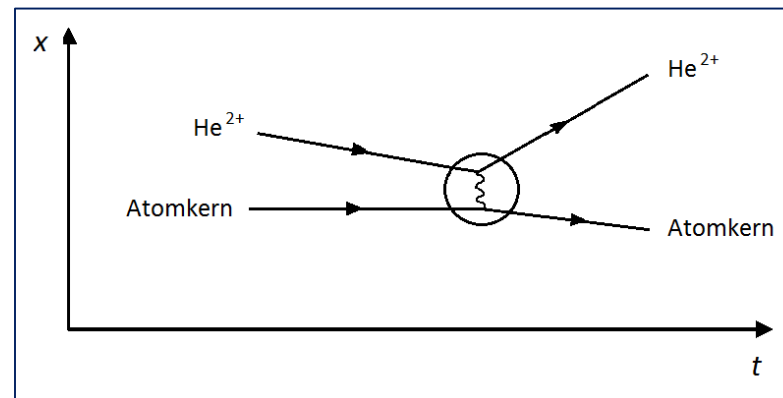
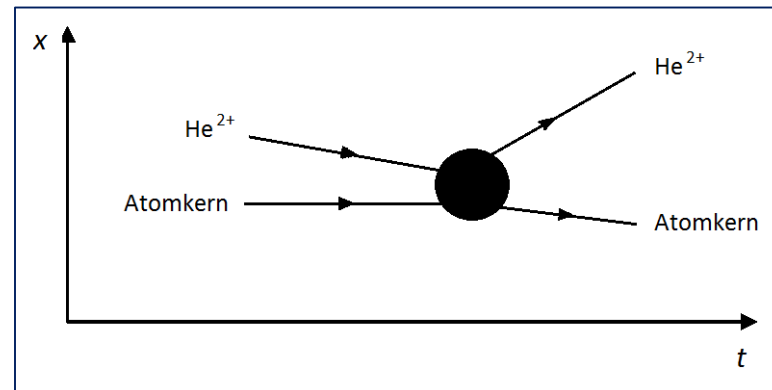
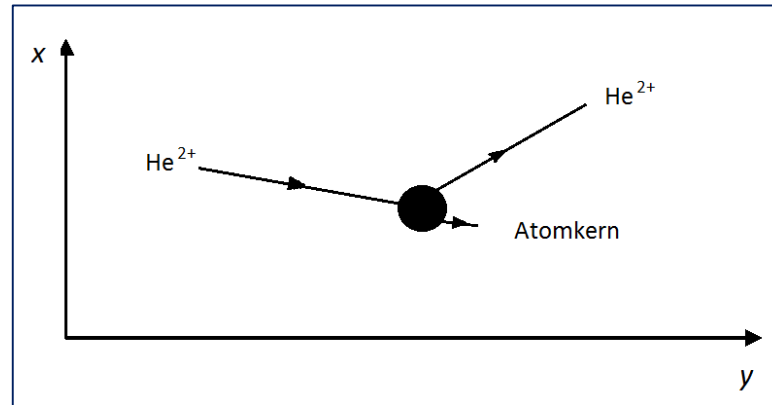
# Grundbausteine 2/2

## ▶ Paarvernichtung und Paarerzeugung



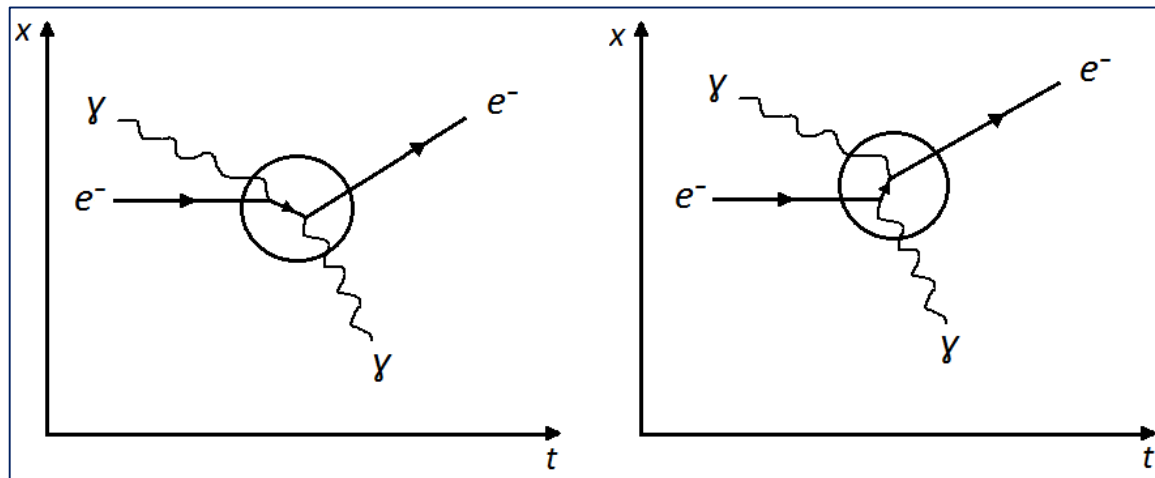
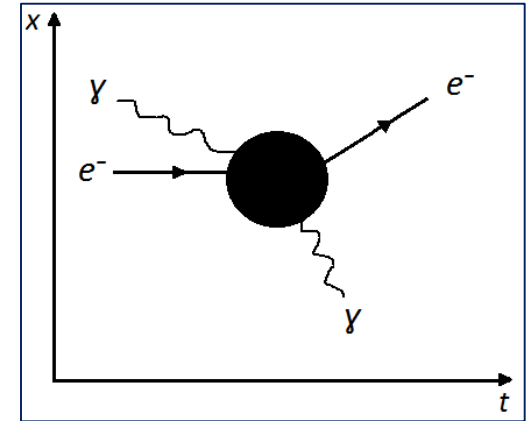
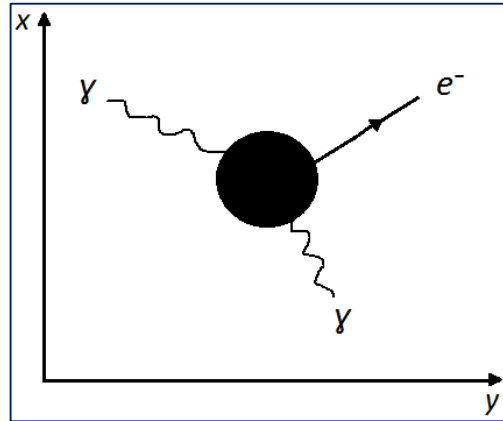
# Prozesse

## ► Rutherford-Streuung



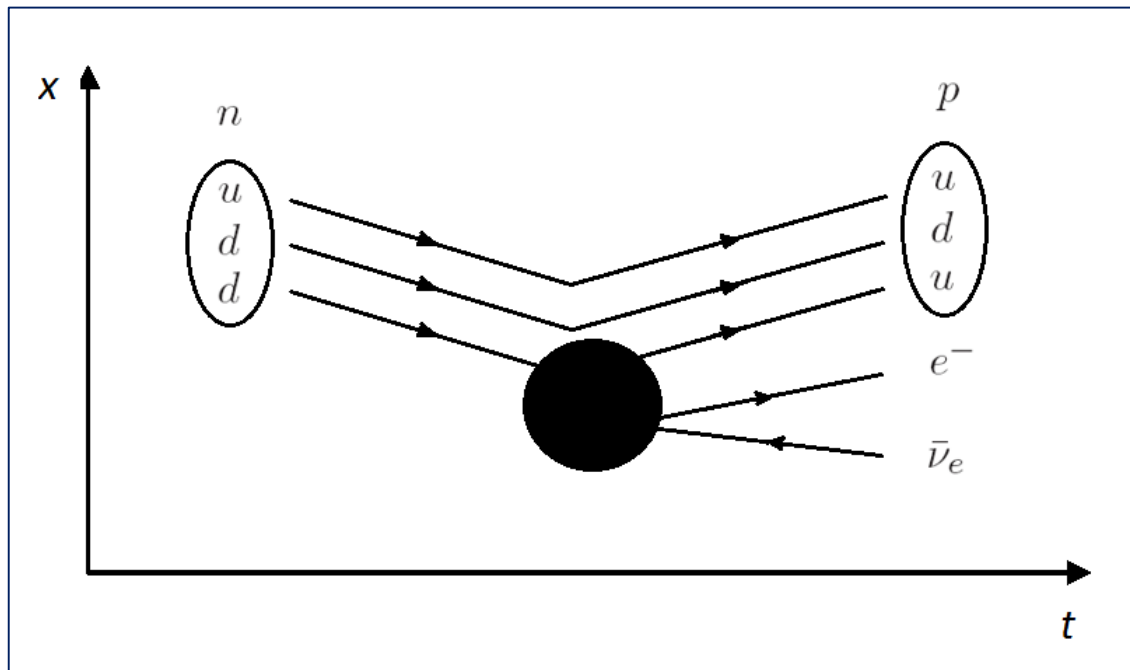
# Prozesse

## ► Compton-Streuung



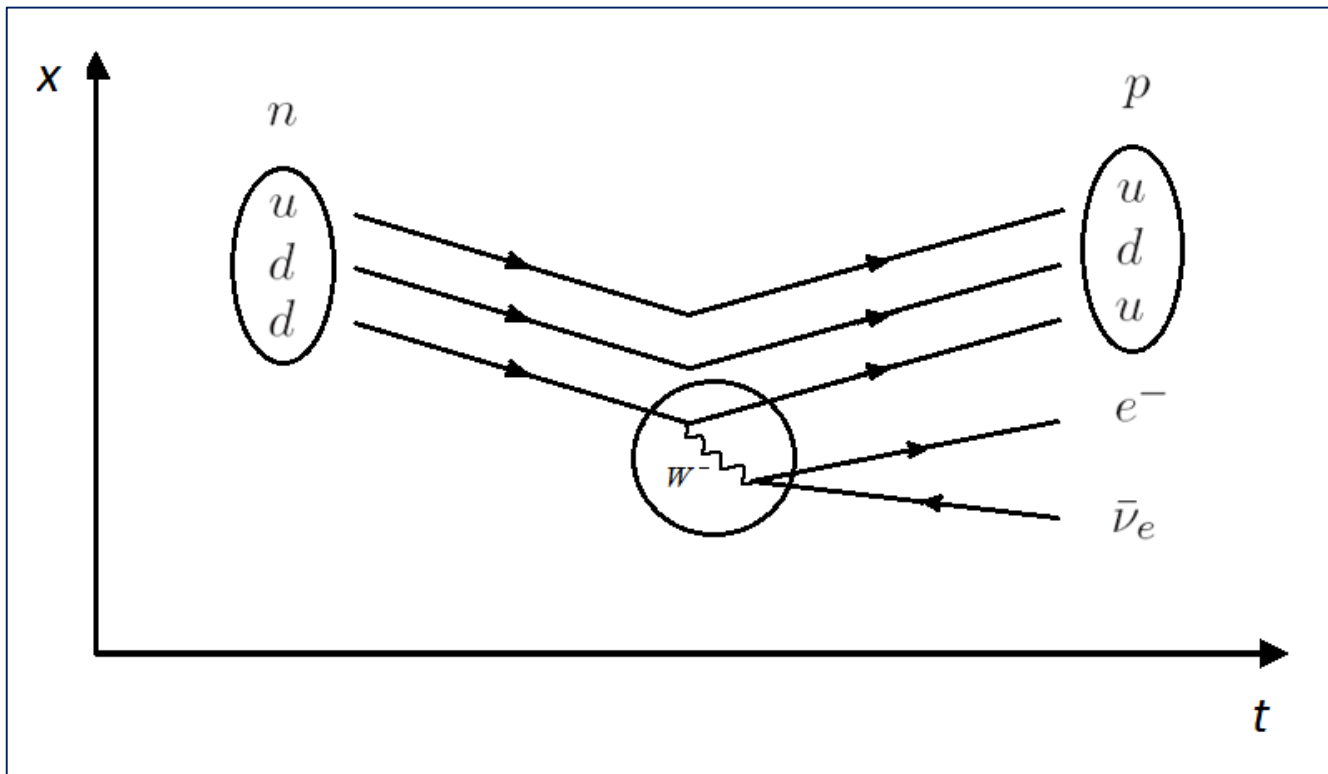
# Prozesse

## ► $\beta^-$ - Umwandlung



# Prozesse

## ► $\beta^-$ - Umwandlung



# 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



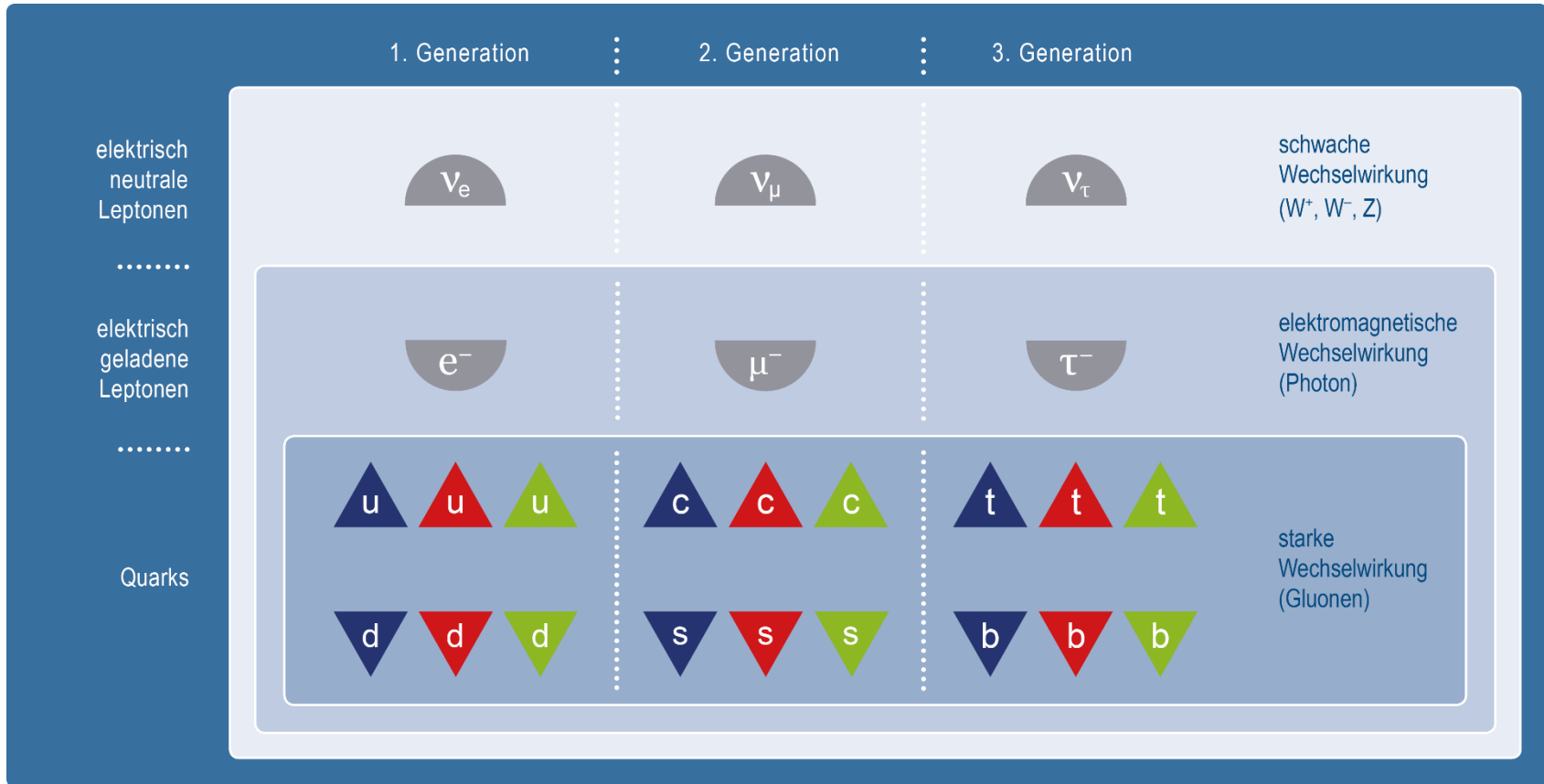
# „Teilchenzoo“ oder Ordnung?

- ▶ 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 aufsteigen 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

# Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

The image shows a standard periodic table of elements. The groups are color-coded: IA (red), IIA (orange), IIIA (yellow), IVA (green), VA (light green), VIA (light blue), VIIA (blue), and VIIIA (cyan). The elements are arranged in rows and columns, with atomic numbers and chemical symbols provided for each.

- ▶ Gleiche Ladungen  $\leftrightarrow$  Gleiche Eigenschaften (“Lepton-Universalität”)
- ▶ Welche Plätze gefüllt sind, ist nicht vorhergesagt (Experiment !)
- ▶ Muster wiederholt sich 2x für größere Massen (Grund unbekannt!)

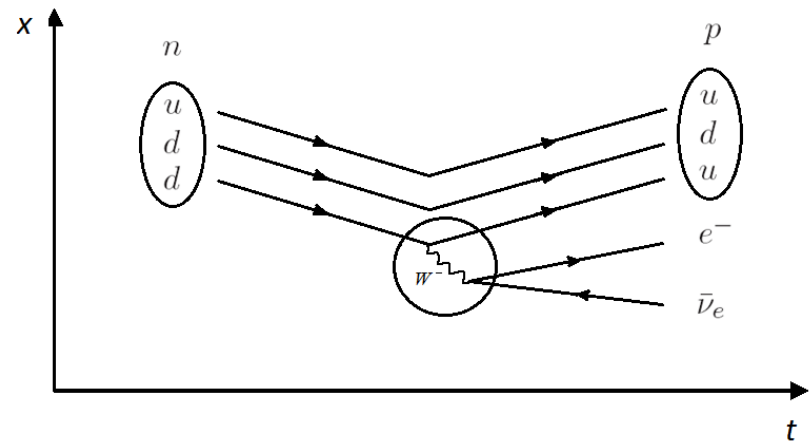


# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung




- Nur bestimmte Paare von Teilchen beteiligt
- Unterscheiden sich in schwacher Ladungszahl  $I$  und in elektrischer Ladungszahl  $q$  immer genau um Betrag 1
- **Dupletts** bezüglich der schwachen Ladung

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



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung

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

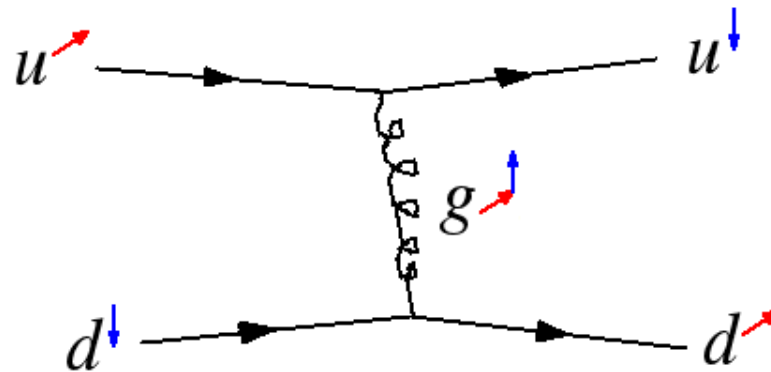
- $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$

# 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

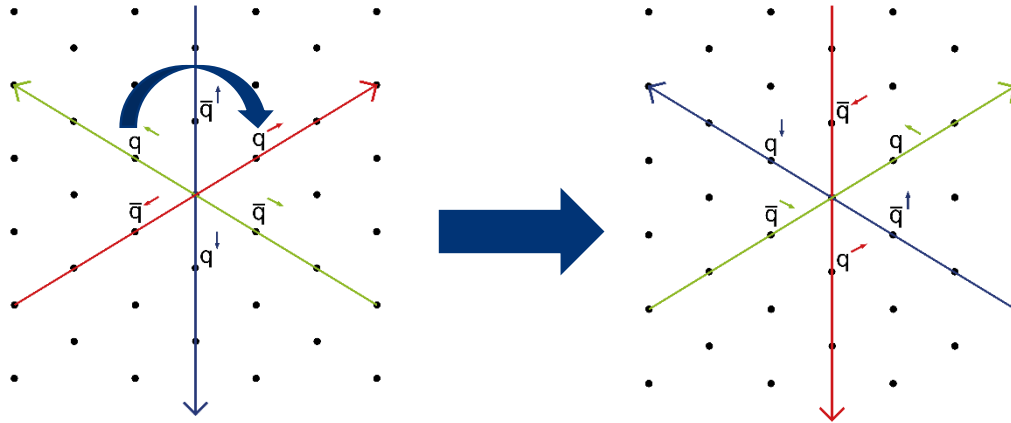
►  $(u \rightarrow u \rightarrow u)$



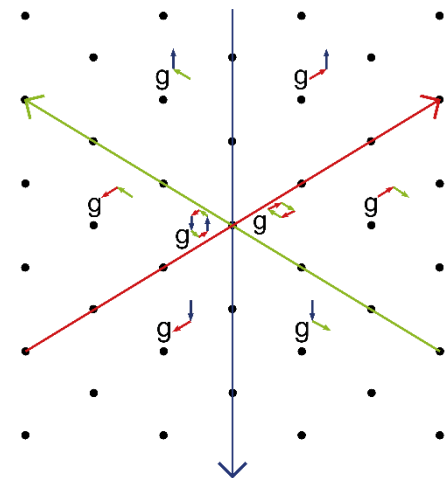
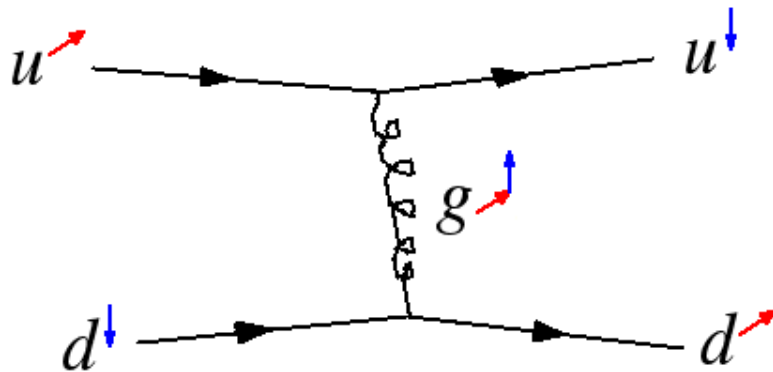


# Botenteilchen: Umwandlung innerhalb Multipletts

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



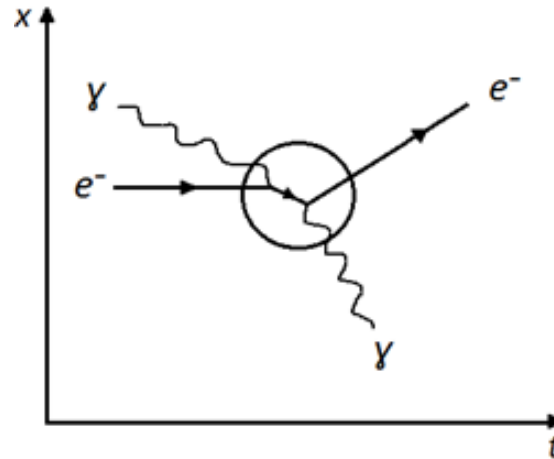
- ▶ hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

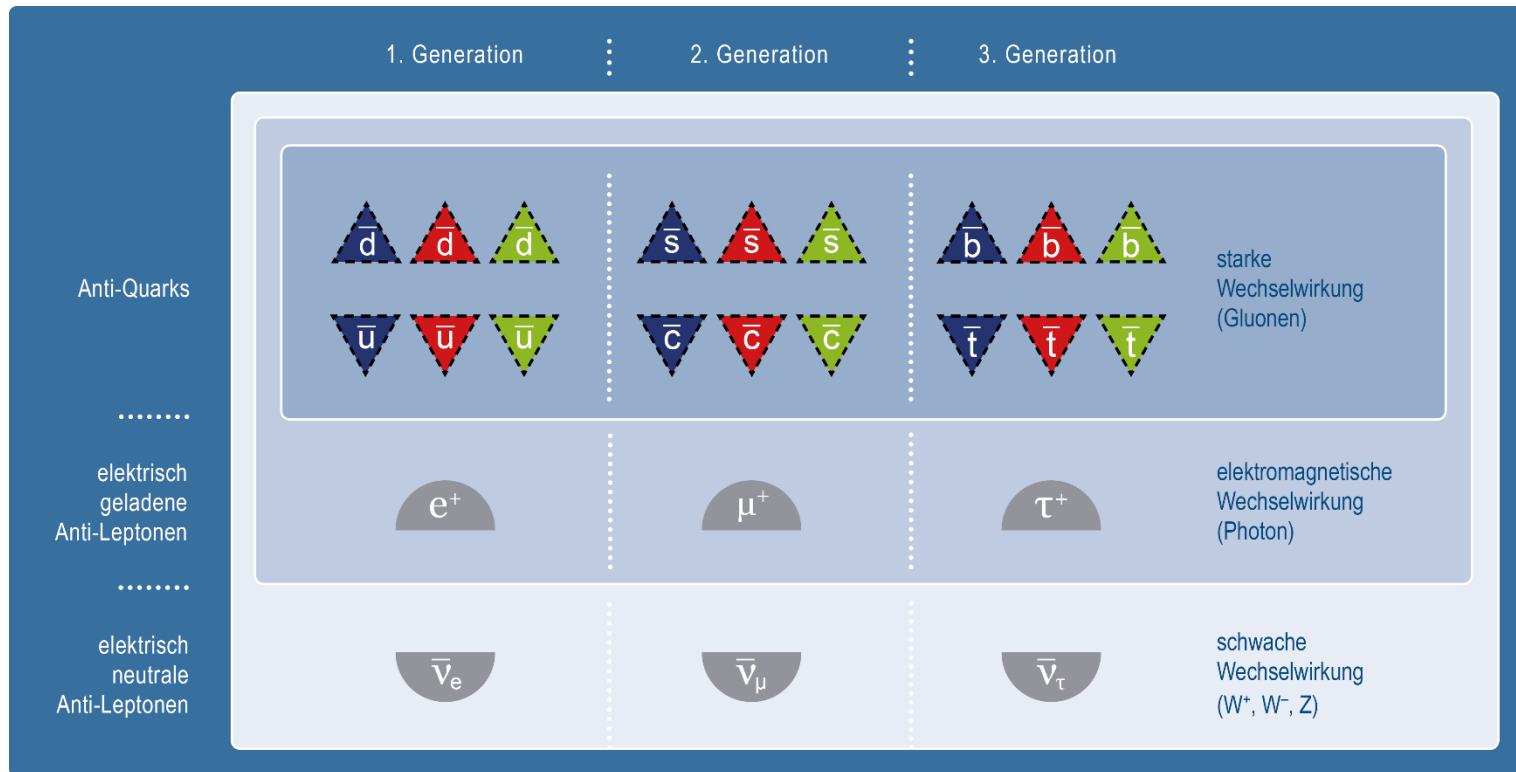
## ▶ Elektromagnetische Wechselwirkung

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



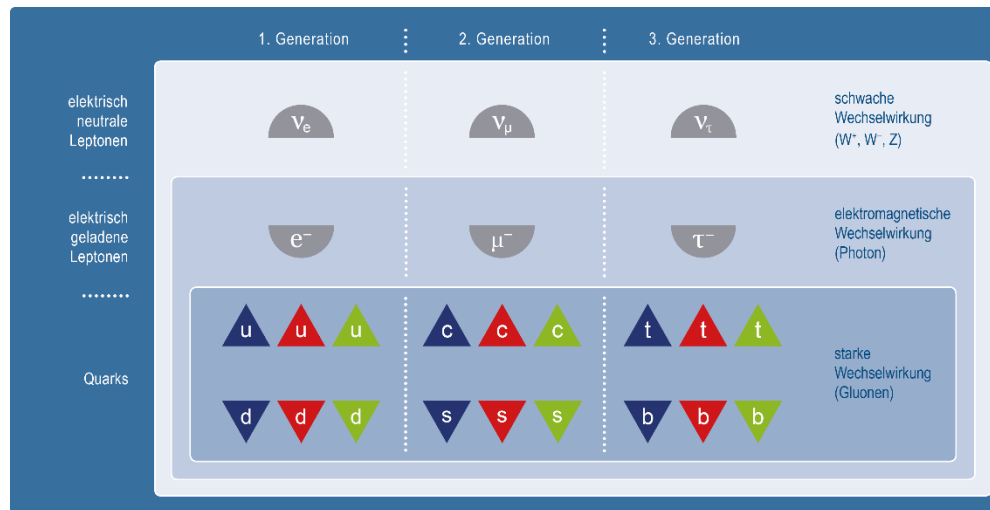
# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

- ▶ 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
  - Singulett der elektromagnetischen Wechselwirkung



- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich

# 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



12.10.2016



# Diskussion / Fragen

