

# Das Standardmodell der Teilchenphysik im Schulunterricht

Fachvortrag



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Philipp Lindenau, Moritz Springer  
Bonn | 21./22.09.2020



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Elementarteilchenphysik im neuen Rahmenlehrplan in NRW

**Inhaltsfeld 5 Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik** Das Inhaltsfeld *Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik* beinhaltet den Aufbau des Atoms, seiner Hülle und seines Kerns sowie den **Aufbau der Materie im Kleinsten nach dem sogenannten Standardmodell**. Inhalte sind außerdem ionisierende Strahlung und radioaktiver Zerfall von Atomkernen sowie Kernumwandlungen durch Kernspaltung und Kernfusion. Die Behandlung von Atom- und Kernphysik bietet einerseits einen Einblick in den Aufbau der Materie unter dem Aspekt des Wandels historischer Atommodelle und liefert andererseits Entscheidungsgrundlagen für die Einschätzung des Für und Wider im Umgang mit ionisierender Strahlung und der Nutzung von Kernenergie.

Quelle: [http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp\\_SII/ph/KLP\\_GOSt\\_Physik.pdf](http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GOSt_Physik.pdf), 15.02.2016

## Inhaltsfeld 5 Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik

### Inhaltliche Schwerpunkte

Atomaufbau  
Ionisierende Strahlung  
Radioaktiver Zerfall  
Kernspaltung und Kernfusion  
Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen

### Mögliche Kontexte

Geschichte der Atommodelle  
Lichtquellen und ihr Licht  
Physik in der Medizin (Bildgebende Verfahren, Radiologie)  
(Erdgeschichtliche) Altersbestimmungen  
Energiegewinnung durch nukleare Prozesse  
Forschung an Teilchenbeschleunigern

### Basiskonzept Wechselwirkung

Kernkräfte  
Kettenreaktion  
Austauschteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen  
Konzept der Austauschteilchen vs. Feldkonzept

### Basiskonzept Energie

Linienspektren  
Energiequantelung der Hüllelektronen  
Dosimetrie  
Bindungsenergie  
Äquivalenz von Masse und Energie

### Basiskonzept Struktur der Materie

Kern-Hülle-Modell  
Bohr'sche Postulate  
Strahlungsarten  
Zerfallsprozesse  
Massendefekt  
Kernbausteine und Elementarteilchen

Quelle: [http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp\\_SII/ph/KLP\\_GOST\\_Physik.pdf](http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GOST_Physik.pdf), 15.02.2016



**FOLGENDE BÄNDE  
SIND VERFÜGBAR:**

- Mikrokurse
- Kosmische Strahlung
- Forschungsmethoden
- Wechselwirkungen  
und Teilchen

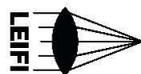


**KOSTENFREI  
ERHÄLTlich!**

## 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.



**PHYSIK**



**NETZWERK  
TEILCHENWELT**





# Band 1: Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen

- ▶ Ca. 100 Seiten Hintergrundinformationen für Lehrkräfte
- ▶ Einführung in das Standardmodell
- ▶ Spiralcurriculum, didaktische und fachliche Hinweise
- ▶ Aufgabenblätter bald online
  - Werden hier teilweise eingesetzt

# Was ist Physik?

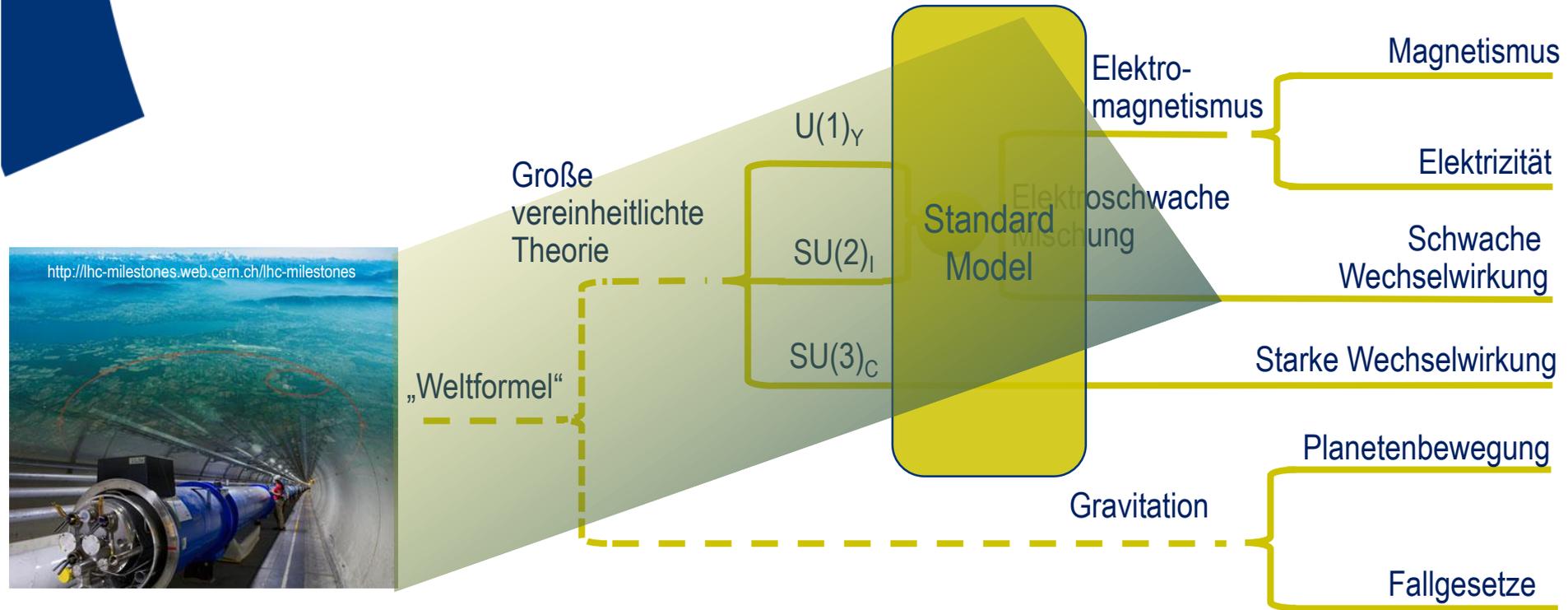
- ▶ Physik versucht die Wirklichkeit / Welt zu beschreiben
- ▶ Am Besten: Möglichst einfach



# Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

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

# Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“



# Vereinheitlichungen

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

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



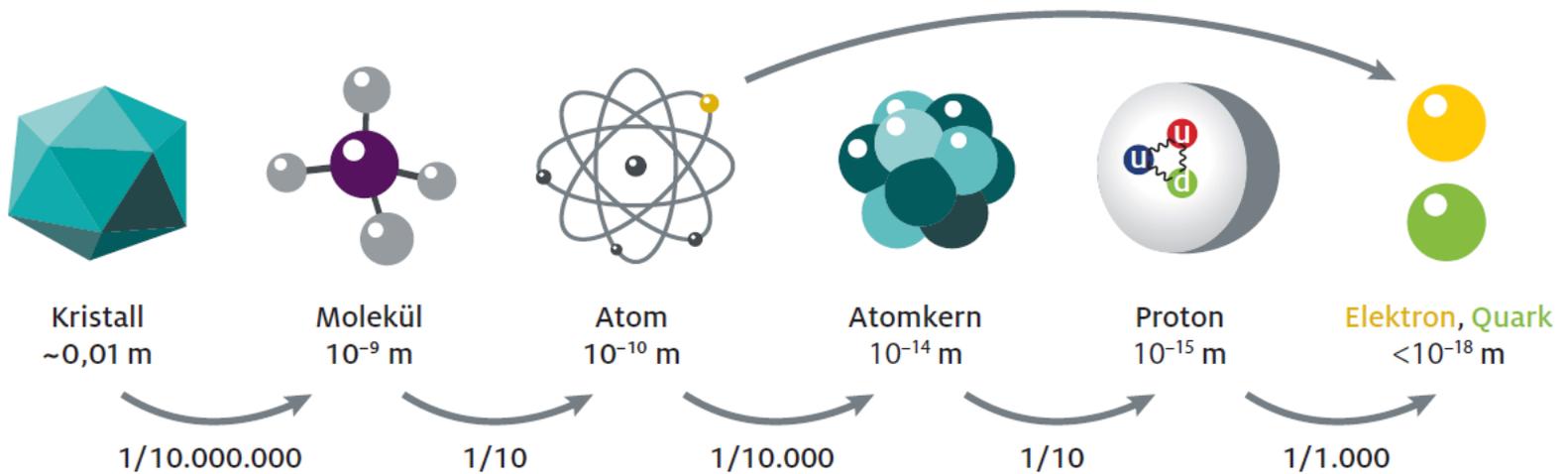
**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**

# Das Standardmodell der Teilchenphysik

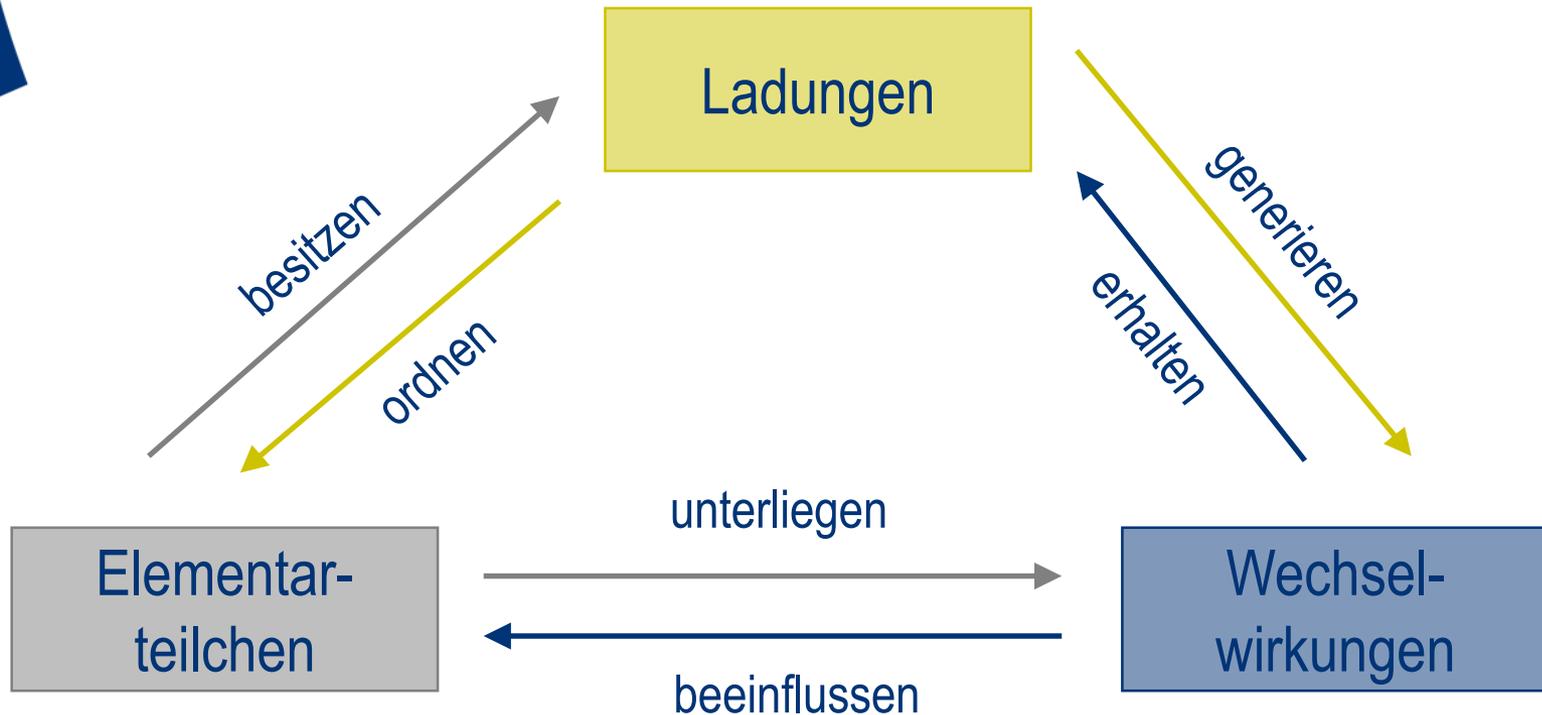
## ► Das Standardmodell

- Elegantes Theoriegebäude („Quantenfeldtheorie“) mit großer Vorhersagekraft  
angereichert mit experimentellen Erkenntnissen
- Grundlage: Fundamentale Symmetrien  
(lokale Eichsymmetrien)
- Beschreibt alle bekannten Wechselwirkungen auf Teilchenebene
- Wurde 1960er und 1970er Jahren entwickelt.  
Seitdem in zahlreichen Experimenten überprüft und bestätigt

# Einschub: Größenordnungen

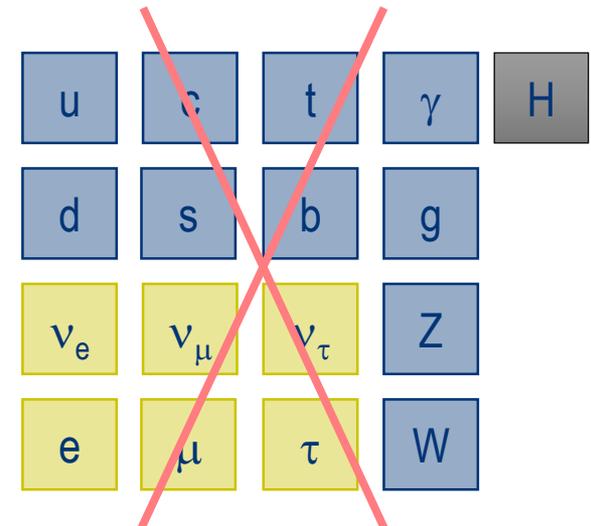


# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Fußball - Analogie

- ▶ Wie erklärt man jemandem etwas Unbekanntes? z.B. Fußball...
  - Man beginnt nicht mit der Anzahl der Spieler oder gar deren Positionen, sondern mit den Grundregeln
  - Spieler = Elementarteilchen
  - Regeln = Wechselwirkungen, Erhaltungssätze,...
  
- ▶ Wieso also bei der Behandlung des Standardmodells damit beginnen??
  - Nur u,d,e sind für Aufbau der Materie nötig
  - Warum es genau diese Teilchen gibt, kann nicht vorhergesagt werden (nicht verstanden!)

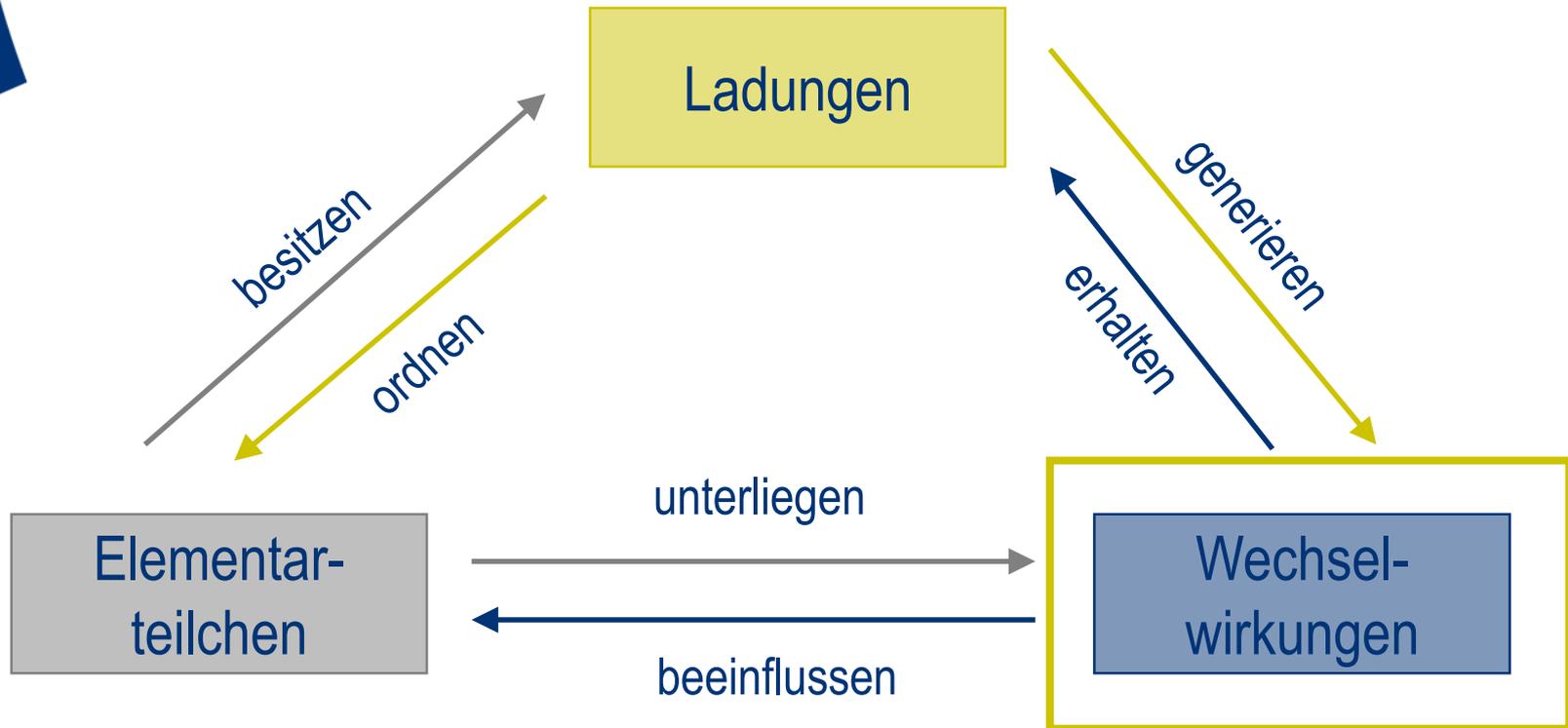


# Das Standardmodell der Teilchenphysik

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

u	c	t	$\gamma$	H
d	s	b	g	
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	Z	
e	$\mu$	$\tau$	W	

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Basiskonzept: Wechselwirkung

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

## ► Umfasst die Phänomene

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

► Begriffe Kraft und Wechselwirkung sind klar zu trennen

► Kraft ist nur ein Aspekt von Wechselwirkung

► Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

# Vereinheitlichungen

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

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



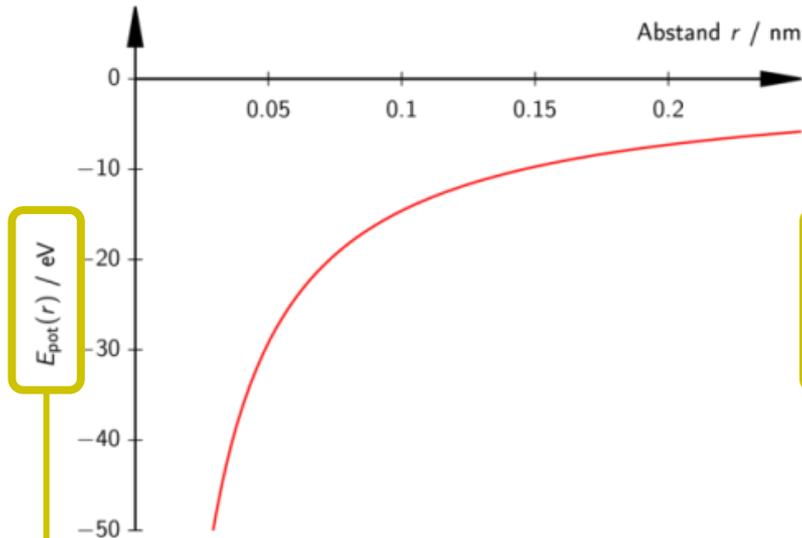
**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**



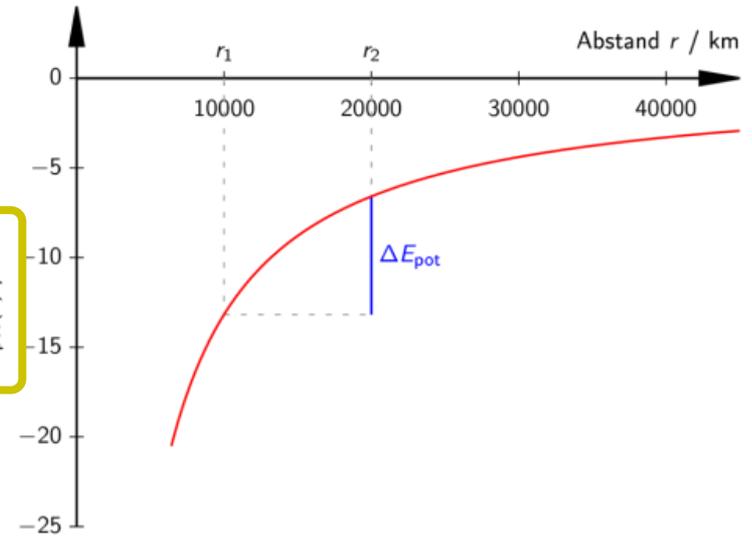
**Standardmodell  
(ohne Gravitation)**

# Ausgangspunkt: Zwei Bekannte Wechselwirkungen

► Elektromagnetische Wechselwirkung



► Gravitation ( $\text{O}_2$  und Erde)



eV als Einheit

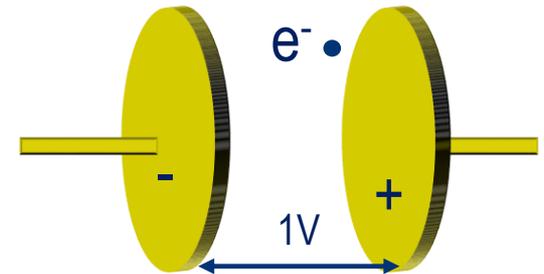
# Einschub: Elektronenvolt

▶ 1 eV ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Spannung von 1 Volt durchläuft.

- $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$
- $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$
- $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

▶ Wegen  $E=mc^2$  können Massen in  $\text{eV}/c^2$  angegeben werden! (c: Lichtgeschwindigkeit)

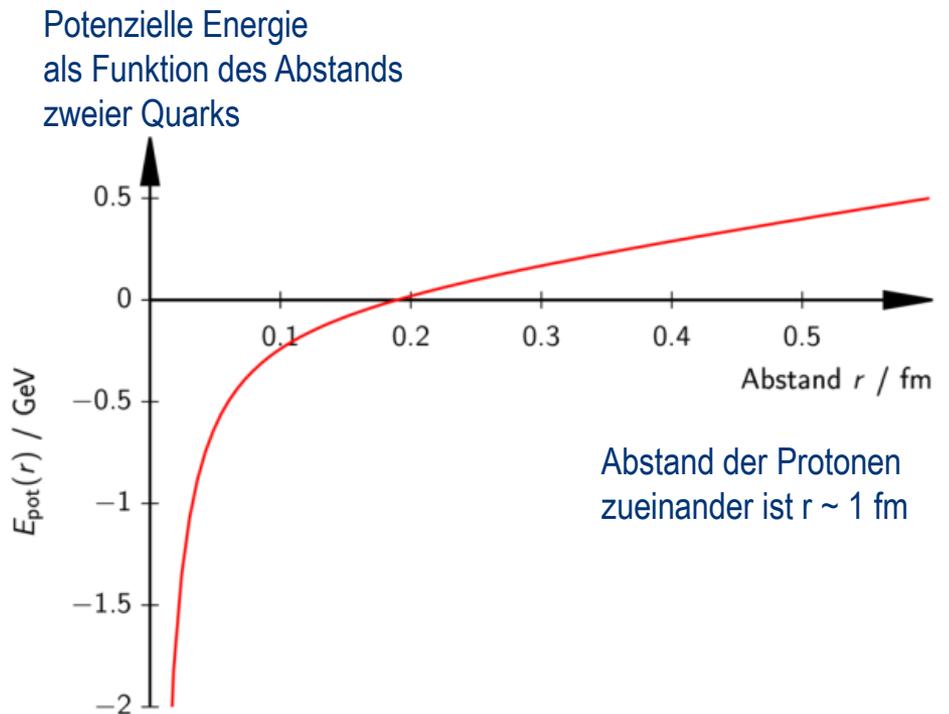
- Elektron  $0,5 \text{ MeV}/c^2$
- Proton  $938 \text{ MeV}/c^2 \sim 1 \text{ GeV}/c^2$
- Higgs-Teilchen  $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$



# Die Starke Wechselwirkung

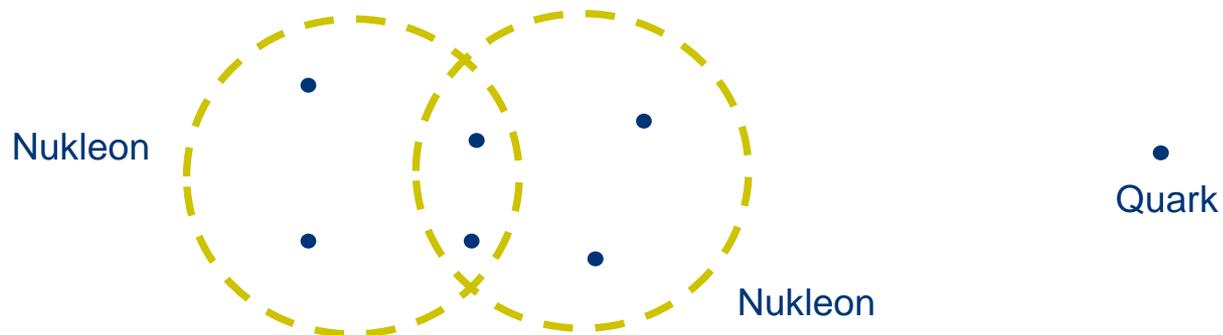
► Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen?

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



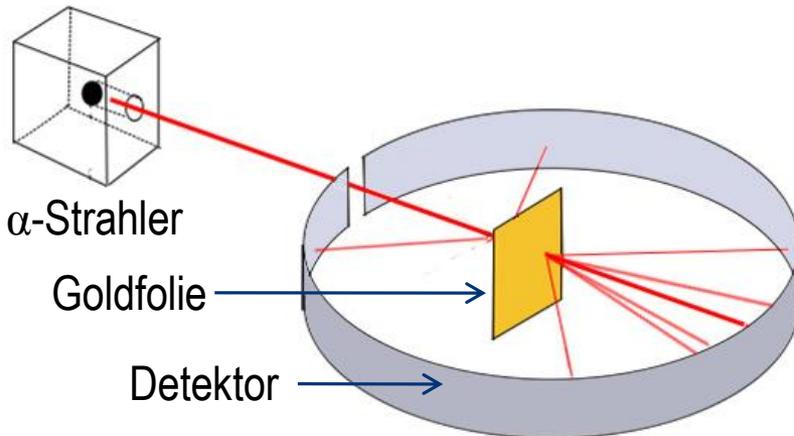
# Bindung von Nukleonen

- ▶ Zusammenhalt von Nukleonen analog zur Elektronenpaarbindung bei Atomen
  - Kurze Abstände: Nukleonen im Kern „teilen“ sich kurzzeitig ein Quark-Paar

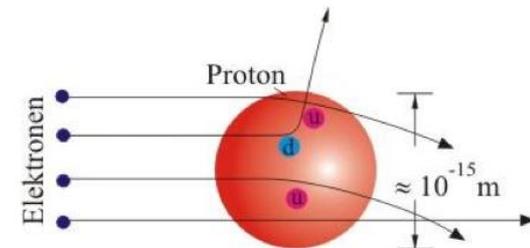


- Bessere Vorstellung: Nukleonengas
- Größere Abstände: Austausch von „Pionen“ (geb.  $q\bar{q}$  Zustände)

# Einschub: Experimenteller Nachweis von Quarks



**Rutherford-Streuexperiment (1911)**  
Streuung von  $\alpha$ -Teilchen an Goldatomen  
→ Entdeckung des Atomkern



**Experiment am SLAC (1969)**  
Streuung von Elektronen an Protonen  
→ Entdeckung der Quarks

Mehr zu Forschungsmethoden gibt es morgen!

# Die Schwache Wechselwirkung

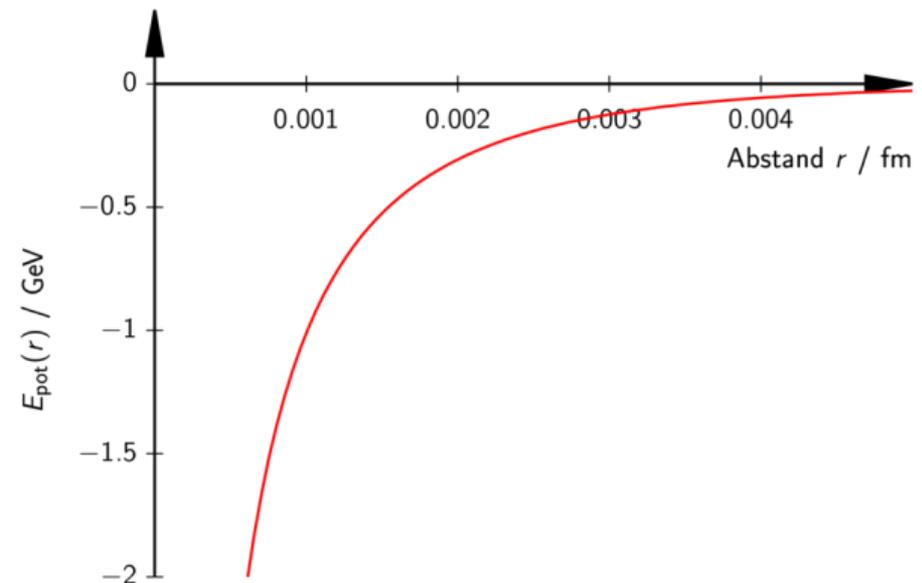
## ► Warum scheint die Sonne?

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

## ► Einführung:

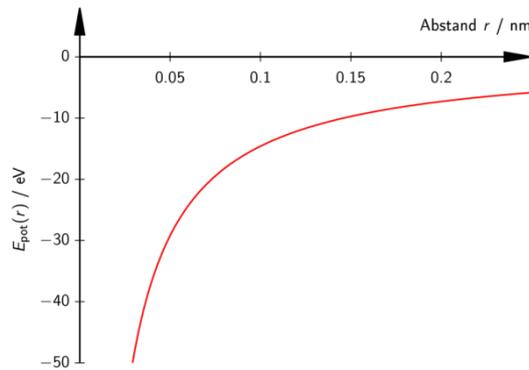
schwache Wechselwirkung  
(z.B. Quarks der Nukleonen bei  
 $r \sim 0.001 \text{ fm}$ )

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

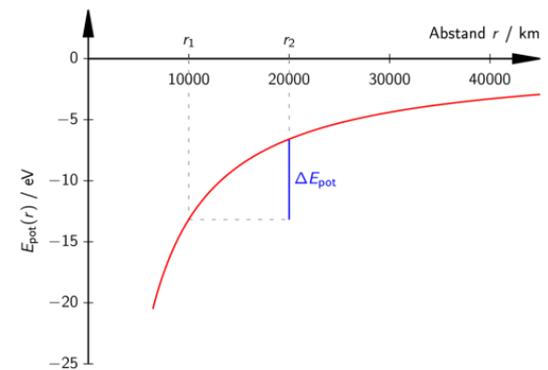


# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

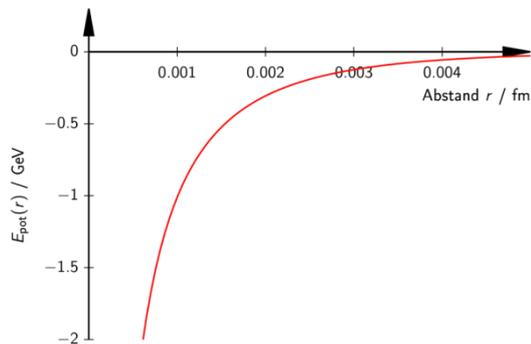
## ► Elektromagnetische WW



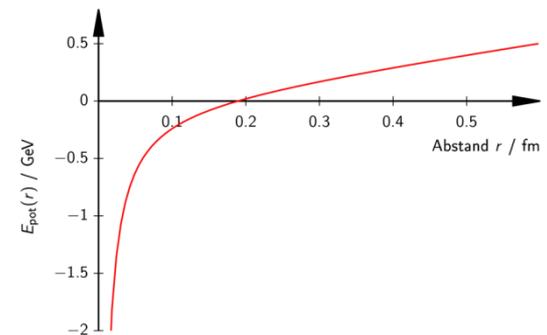
## ► Gravitation



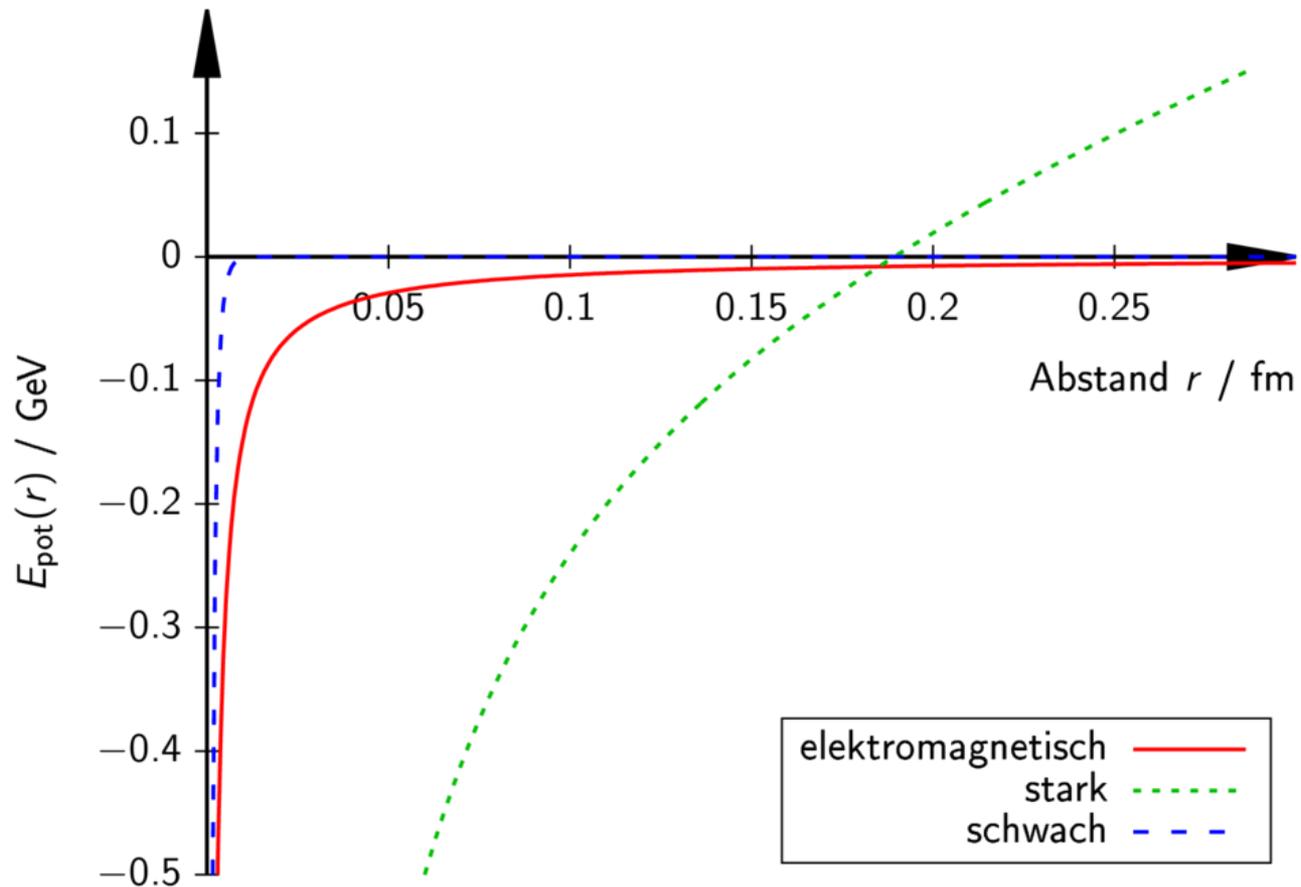
## ► Schwache WW



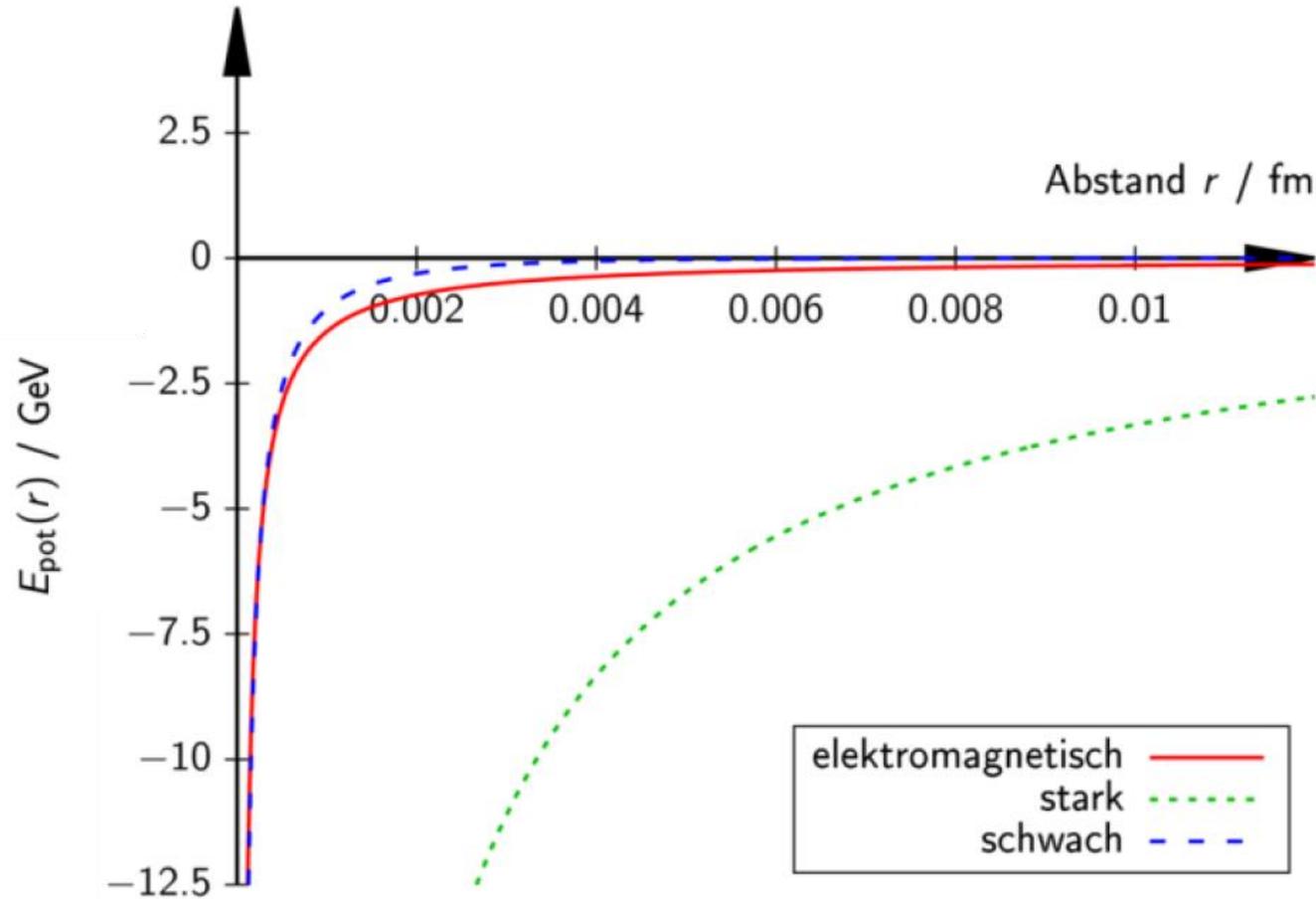
## ► Starke WW



# Vergleich der potenziellen Energien



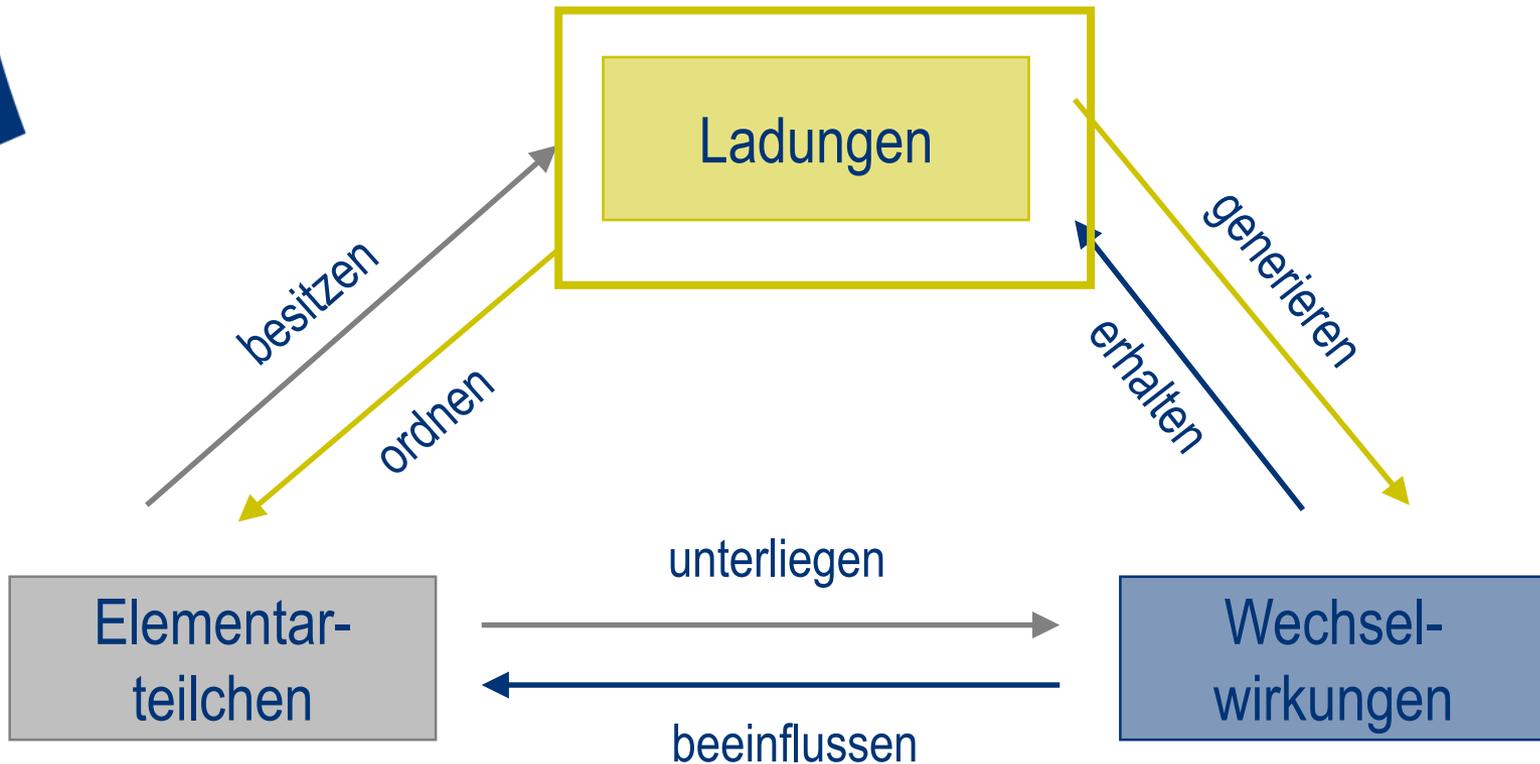
## Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen (Achsen jeweils mit Faktor 25 gedehnt bzw gestaucht)



# Potenzielle Energien bei sehr kleinen Abständen

Wechselwirkung	Potenzielle Energie
gravitativ	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{grav} \frac{-1}{r}$
elektromagnetisch	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r}$
stark	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r}$
schwach	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r}$

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Basiskonzept der Ladung

- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:
  - Elektrische Ladung

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische  
Ladungszahl

Elementarladung

# Erweiterung auf andere Wechselwirkungen

▶ Coulombsches Gesetz:  $F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2}{r^2} = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$

■  $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$

Kopplungsparameter (Feinstrukturkonstante)

▶ Einführung eines **Kopplungsparameters**  $\alpha$  auch für andere Wechselwirkungen

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

# Erweiterung: Konzept der Ladung

► Einführung: eines Kopplungsparameters  $\alpha$  auch für andere Wechselwirkungen

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

Wechselwirkung	Kopplungsparameter $\alpha$
elektromagnetisch	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

# Erweiterung auf andere Wechselwirkungen

- ▶ Coulombsches Gesetz:  $F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2}{r^2} = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$ 
  - $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$   
Kopplungsparameter (Feinstrukturkonstante)
- ▶ **Einführung** eines Kopplungsparameters  $\alpha$  auch für andere Wechselwirkungen
  - $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$
- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine **Ladung**
  - Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft

# Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
  - ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren als charakteristische Teilcheneigenschaften
  - ▶ Bekannt:
    - Elektrische Ladung
  - ▶ Neu:
    - Schwache Ladung
    - Starke (Farb-)Ladung
- |                           |           |
|---------------------------|-----------|
| elektrische Ladungszahl   | $Z$       |
| schwache Ladungszahl      | $I$       |
| starker Farbladungsvektor | $\vec{C}$ |
- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv oder negativ sein

# Und Gravitation?

- ▶ Ladung und Kopplungsparameter der Gravitation quantenfeldtheoretisch (noch) nicht definierbar
- ▶ Praktikabel: zwischen Teilchen 1 und Teilchen 2:

$$\alpha_{grav}^{1,2} = G \frac{m_1 m_2}{\hbar c}$$

- ▶ Beispiel:  $\alpha_{grav}$  zwischen Proton (p) und Elektron (e<sup>-</sup>)

- $\alpha_{grav}^{p,e} = G \frac{m_p m_e}{\hbar c} \approx \frac{1}{3 \cdot 10^{41}}$
- Erinnerung elektromagnetisch:  $\alpha_{em}^{p,e} \approx \frac{1}{137}$
- Vergleich:  $\frac{\alpha_{em}^{p,e}}{\alpha_{grav}^{p,e}} \approx 2 \cdot 10^{39}$



# Erweiterung: Konzept der Ladung

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

# Ladung der Gravitation?

Warum kann die Masse  $m$  eines Teilchens nicht die Ladung der Gravitation sein?

## ▶ Schulniveau:

- Masse ist keine Erhaltungsgröße
- Produkt zweier Massen kann nicht negativ sein

## ▶ Theorie:

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

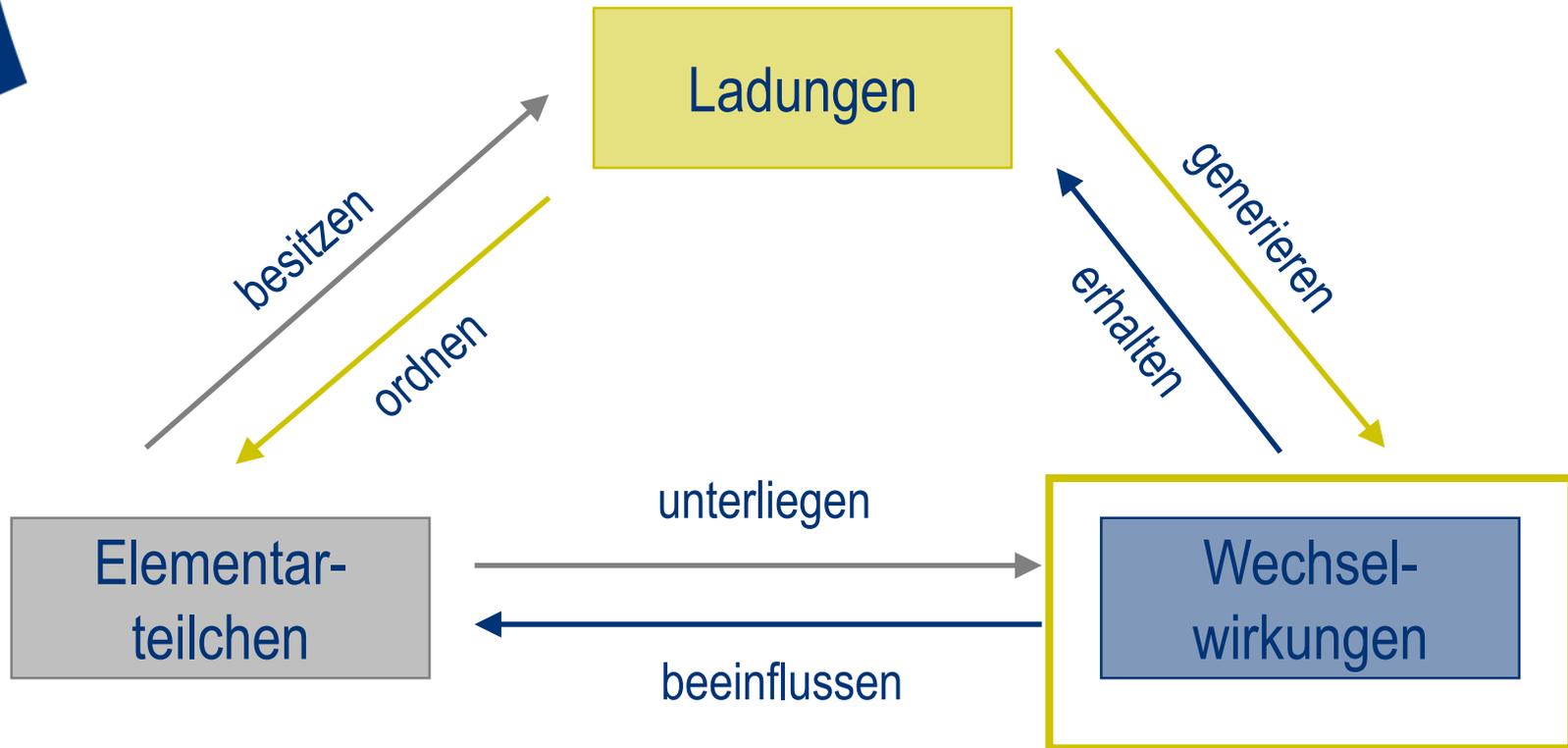
# Konzept der Ladung

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

Und:

- ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren dienen als **Ordnungsprinzip** für Teilchen
- ▶ Ladungszahlen bzw. vektoren sind fundamentale **Erhaltungsgrößen**
  - Grundlage der Symmetrien des Standardmodells

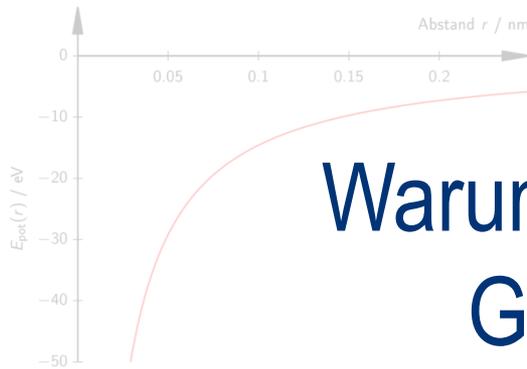
# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW

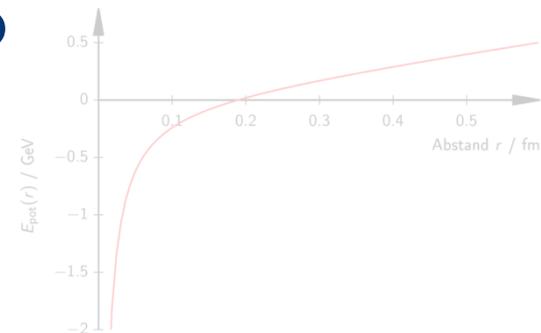
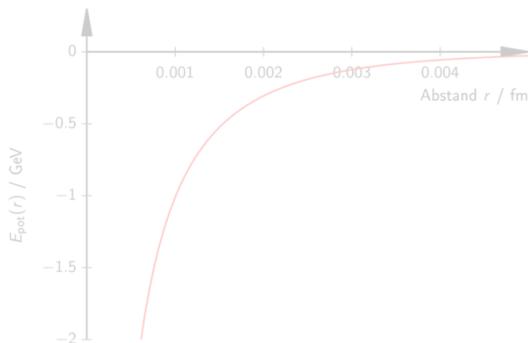
► Gravitation



Warum erfahren wir nur  
Gravitation und

► Schwache WW **Elektromagnetismus**

im Alltag?



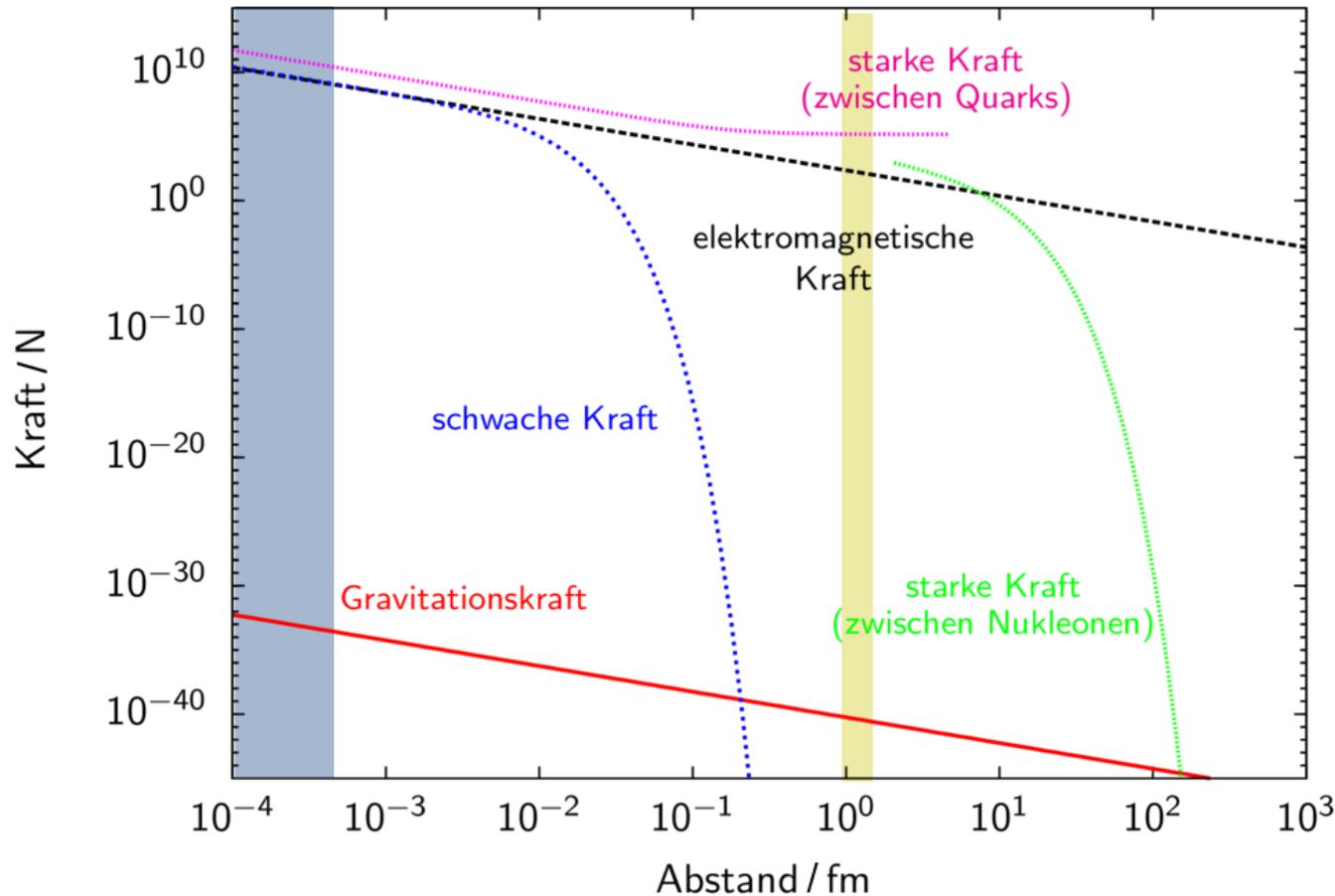
# Kräfte der Wechselwirkungen

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

Grenze exper. Auflösung  
(stark, schwach, em)

Protondurchmesser

\*Wir sind ~1m weiter dort →



# Kräfte der Wechselwirkungen

- ▶ Alle Kraftgesetze beinhalten den Abstand  $r$ 
  - Bei kleinen Abständen  $F \sim 1/r^2$
- ▶ Reichweiten sind Konsequenzen dieser Kraftgesetze
  - Unendlich: im Alltag spürbar
  - Endlich: nur subatomar
- ▶ Reihenfolge der Stärken
  - Kann für Kräfte nicht definiert werden wegen  $F(r)$
  - Kann nur für Wechselwirkungen definiert werden:  $\alpha$  !
- ▶ Stärken aller **Wechselwirkungen sehr** ähnlich (außer für Gravitation)

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

# Stärke der Wechselwirkungen

► Einführung: eines Kopplungsparameters  $\alpha$  auch für andere Wechselwirkungen

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



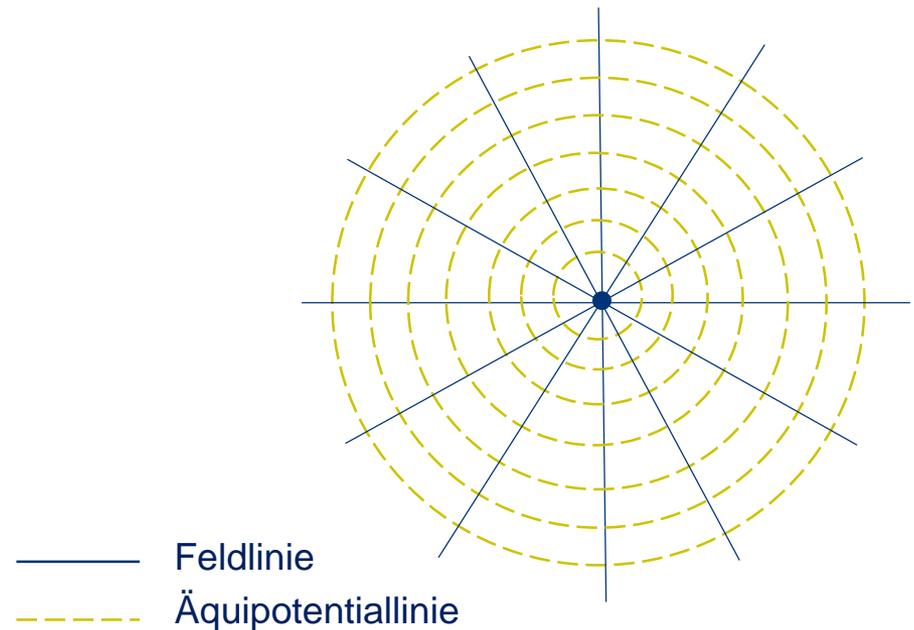
## Warum erfahren wir nur

Wechselwirkung	Kopplungsparameter $\alpha$
Gravitation	$\alpha_{grav} \approx 10^{-39}$
elektromagnetisch	$\alpha \approx \frac{1}{137}$
stark	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

Gravitation und Elektromagnetismus im Alltag?

# Ausgangspunkt: Geometrische Betrachtung

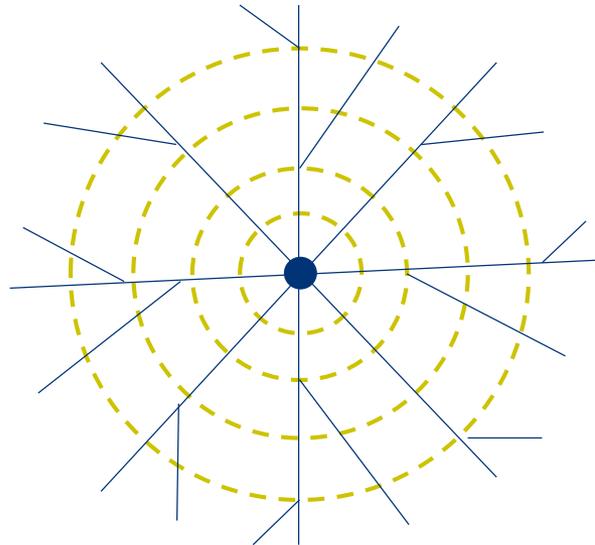
- ▶ Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW
- ▶ **Dichte** der Feldlinien ist **proportional** zur Kraft
  - Idee Ladung im Zentrum
  - Kugeloberfläche  $A = 4\pi r^2$
  - $F \sim \frac{1}{4\pi r^2}$
- ▶ Stimmt bei
  - $F_C = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$



# Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

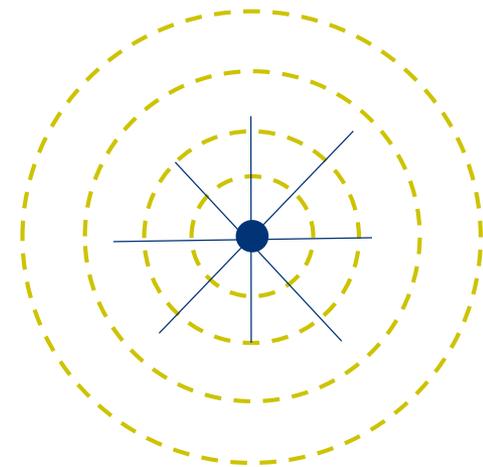
## ▶ Stark

- Kraft konstant →  
Feldliniendichte wird konstant
- Feldlinien entstehen spontan



## ▶ Schwach

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



# Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

▶ Modell in der ETP: Wechselwirkungen werden durch Botenteilchen übermittelt

▶ Bekannt ist:

- 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

$$e^{-} \rightarrow e^{-} + \gamma \text{ (Photon)}$$

$$e^{-} + \gamma \rightarrow e^{-}$$

# Ausgangspunkt: Elektromagnetische Wechselwirkung

▶ Botenteilchen (Photon) ist

- masselos
- elektrisch neutral

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

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

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

# Klassisches Analogon:

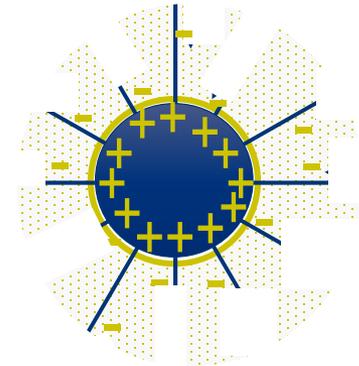
## ► Abschirmung von Feldlinien im Kugelkondensator

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

## ► Brout-Englert-Higgs Feld schirmt schwache Ladungen ab

- Polarisierbares Medium der Schwachen Wechselwirkung → „Dischwachladikum“
- Abgeschirmtes Feld  
→ Masse der Botenteilchen

$$m_W c^2 = \frac{\hbar c}{\lambda_W} = \frac{0,2 \text{ GeV fm}}{\lambda_W}$$



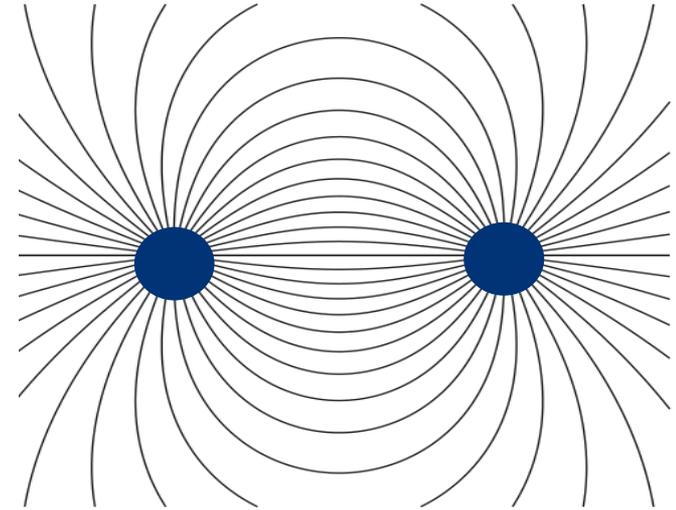
# Ausgangspunkt: Elektromagnetische Wechselwirkung

- ▶ Botenteilchen (Photon) ist
  - masselos
  - elektrisch ungeladen

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

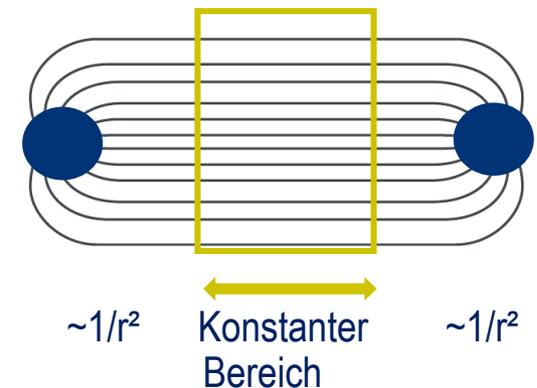
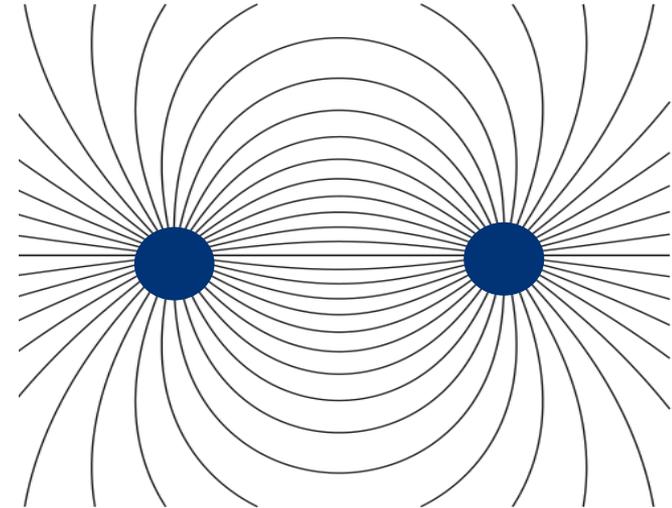
- ▶ Vergleich: Stark  $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$

- ▶ Grund: die Botenteilchen besitzen selbst starke Ladung



# Starke Wechselwirkung

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

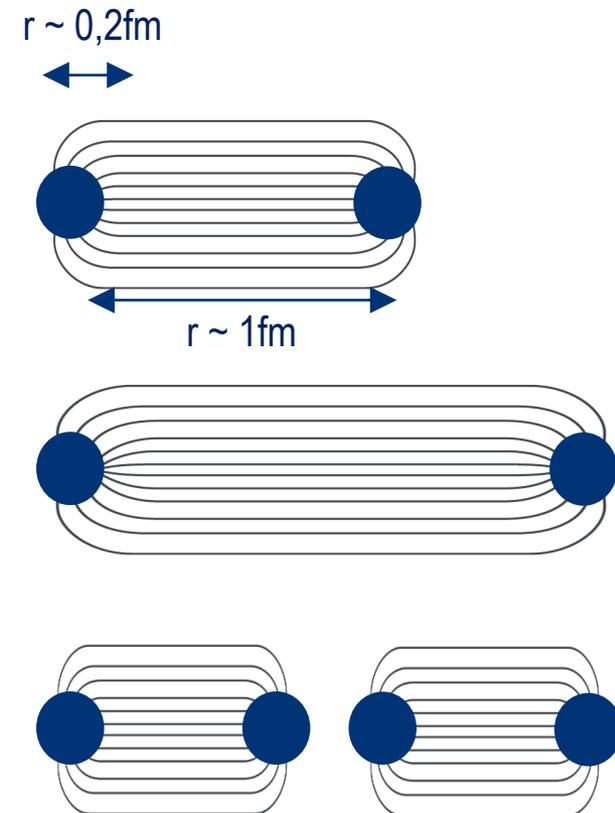


# Starke Wechselwirkung

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

- ▶ Linearer Term, dominiert ab  $r \approx 0,2 \text{ fm}$
- Die im Feld gespeicherte Energie steigt linear
  - Genügend Energie um neue Teilchen(-paare) zu erzeugen!

▶ Einführung: „Confinement“



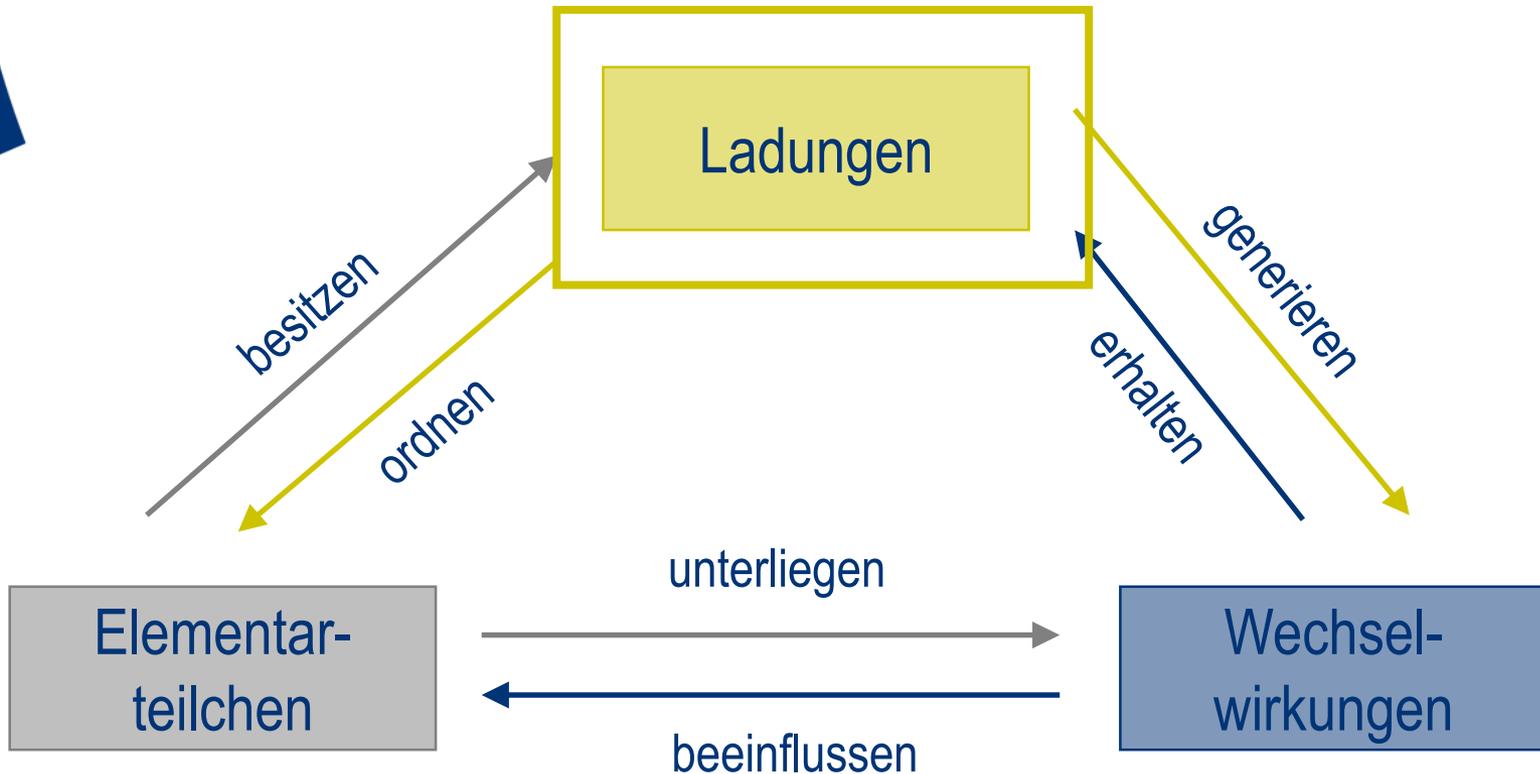
# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Potenzielle Energie	Reichweite
gravitativ	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{grav} \frac{-1}{r}$	unendlich
elektromagnetisch	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r}$	unendlich
stark	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2}{r} + kr$	$5 \cdot 10^{-15} \text{m}$
schwach	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_w}}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{m}$

# Diskussion / Fragen



# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Konzept der Ladung

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

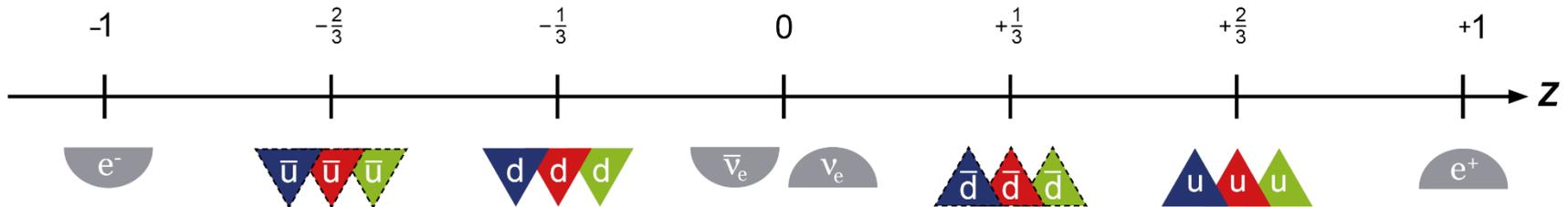
Und:

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

# Elektrische Ladung

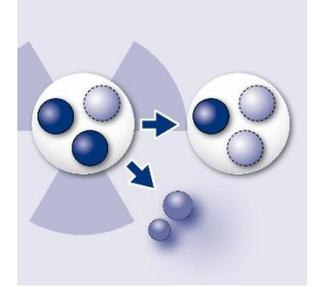


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen  $Z$  einiger Anti-/Materieteilchen

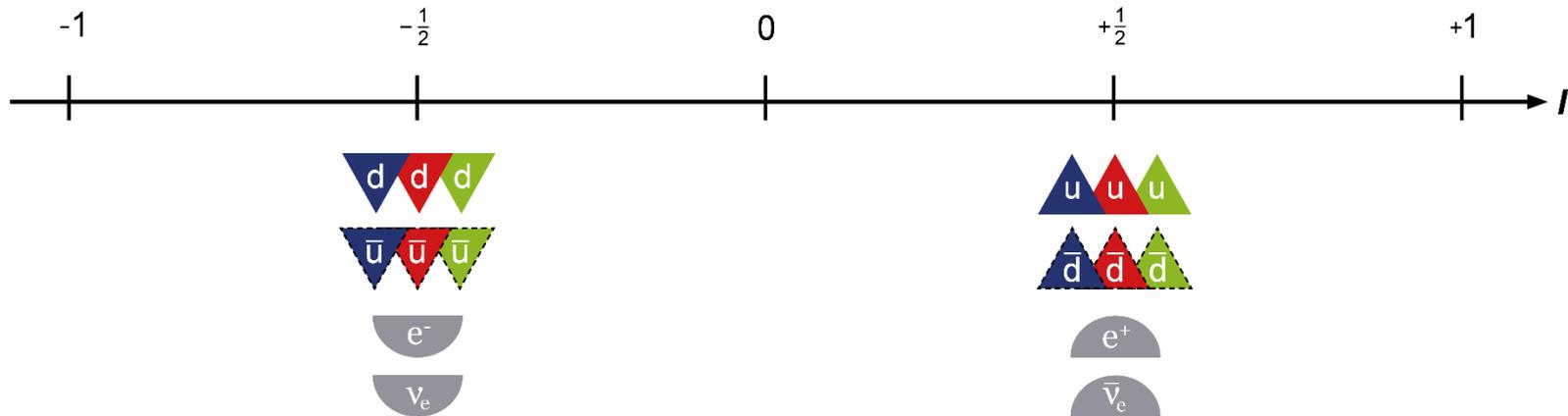


- Elektrische Ladung ist gequantelt

# Schwache Ladung



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



- ▶ Schwache Ladung ist gequantelt

# Schwache Ladungszahl

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

$$Q_w = g_w \cdot I$$

Kopplungsstärke  $g_w$

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

Ladungs-  
zahl

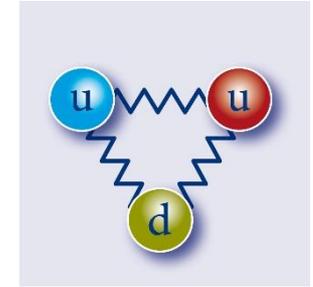
## ► Fachlicher Hinweis

- Die schwache Ladung hat eigentlich einen vektoriellen Charakter, daher die **vollständige** Bezeichnung „Schwache **Isospin-Ladung**“
- Wie beim Spin (z.B. in Atomorbitalen die magnetische Quantenzahl  $m$ ) ist nur eine Komponente (die schwache **Ladungszahl**) messbar. (Daher der „Isospin“ Begriff)
- Sie darf außerdem nicht verwechselt werden mit dem „starken Isospin“, der insbesondere zur Ordnung von gebundenen Quark-Zuständen dient. Er ist **keine Ladung** im Sinne einer Wechselwirkung.

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

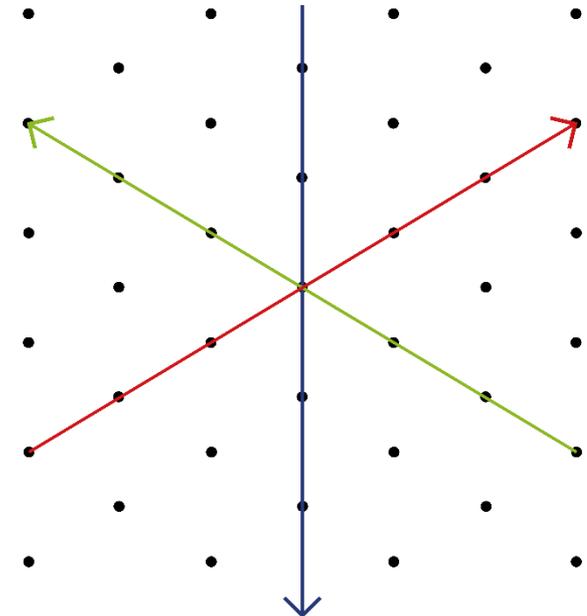
# Starke Ladung

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



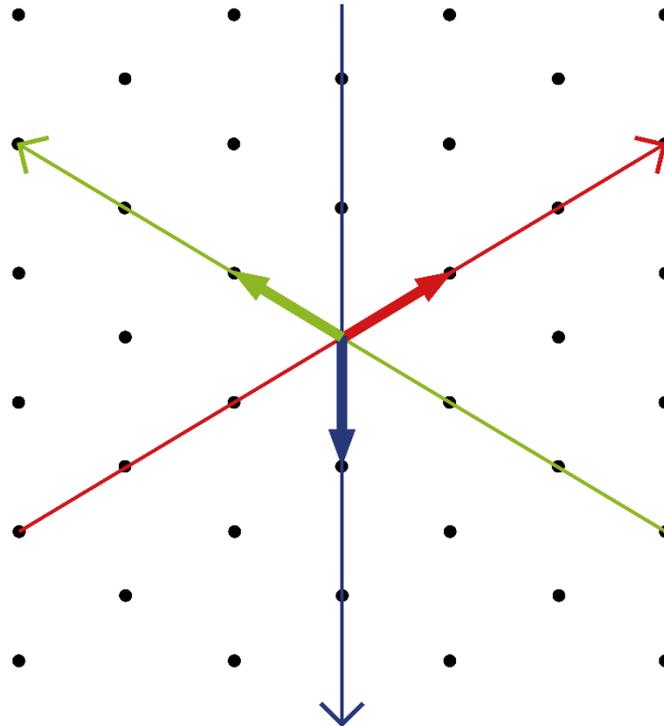
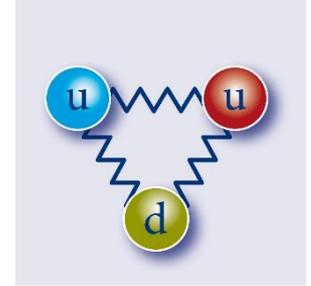
▶ Farbgitter:

- Experimentell nachgewiesen: Alle starken Ladungen haben gleichen Betrag
- 3 Ladungen addieren sich zu 0 (Protonen und Neutronen bspw. bestehen aus 3 Quarks)  
→ geht nur mit Vektoren
- Theorie: 2 Komponenten messbar  
→ 2-dim Farbgitter



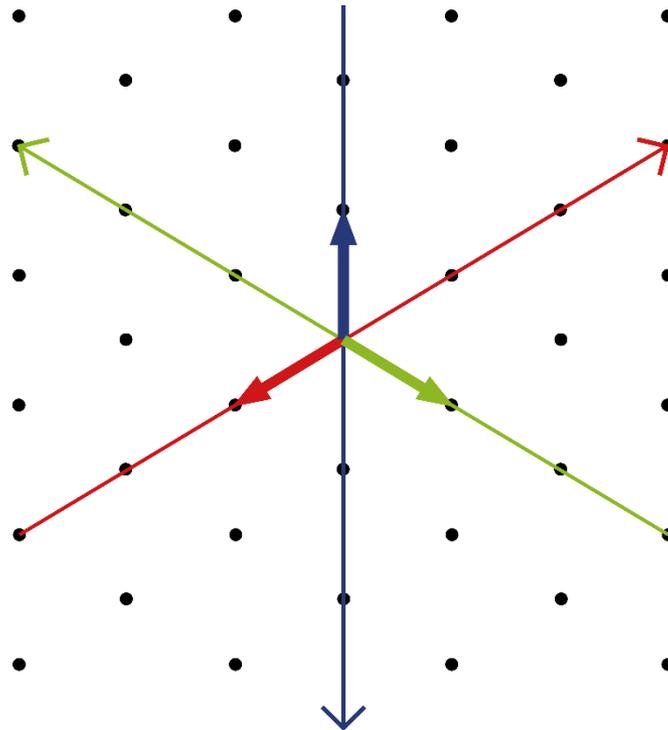
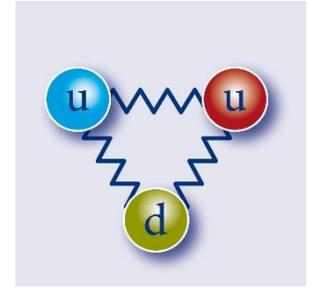
# Starke Ladung

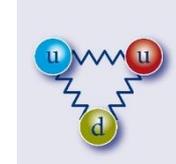
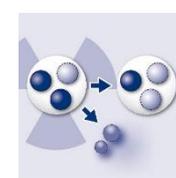
► Farbladungsvektoren von Quarks



# Starke Ladung

► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





# Alle Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

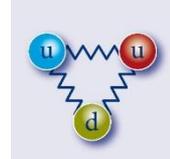
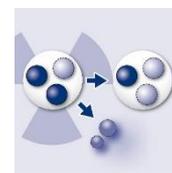
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

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



# Alle Ladungen sind jeweils 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:

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

# Eindeutige Vorhersage möglich

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

# Zusammenfassung: Ladungen

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



# Übung: Botenteilchen

▶ Ziel: Lösen der Aufgaben 1-3

# Lösungen

## Botenteilchen

1. In der folgenden Übersicht sind die Lösungen zu den möglichen Teilchen dargestellt:

	$e^-$	$\nu_e$	$e^+$	$d^{\uparrow}$
el. Ladungszahl $Z$	$-1$	$0$	$+1$	$-\frac{1}{3}$
starker Farbladungsvektor $\vec{C}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$	$\vec{0}$	
schwache Ladungszahl $I$	$-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$
elektromagnetische WW	ja	nein	ja	ja
starke WW	nein	nein	nein	ja
schwache WW	ja	Ja	ja	ja
Mögliche Botenteilchen	$\gamma, W^+, W^-, Z$	$W^+, W^-, Z$	$\gamma, W^+, W^-, Z$	$\gamma, g, W^+, W^-, Z$

# Lösungen

2.

- a) Durch Emission bzw. Absorption eines Botenteilchens können sich Energie, Impuls und Ladungen des Materieteilchens ändern.
- b) Es findet eine Teilchenumwandlung statt, falls sich mindestens eine Ladung des Materieteilchens ändert.

3. Für die vorgegebenen Teilchen können folgende Reaktionsgleichungen formuliert werden:

- Elektron:  $e^- \rightarrow W^- + ?$

Berechnung der Ladung des gesuchten Teilchens:

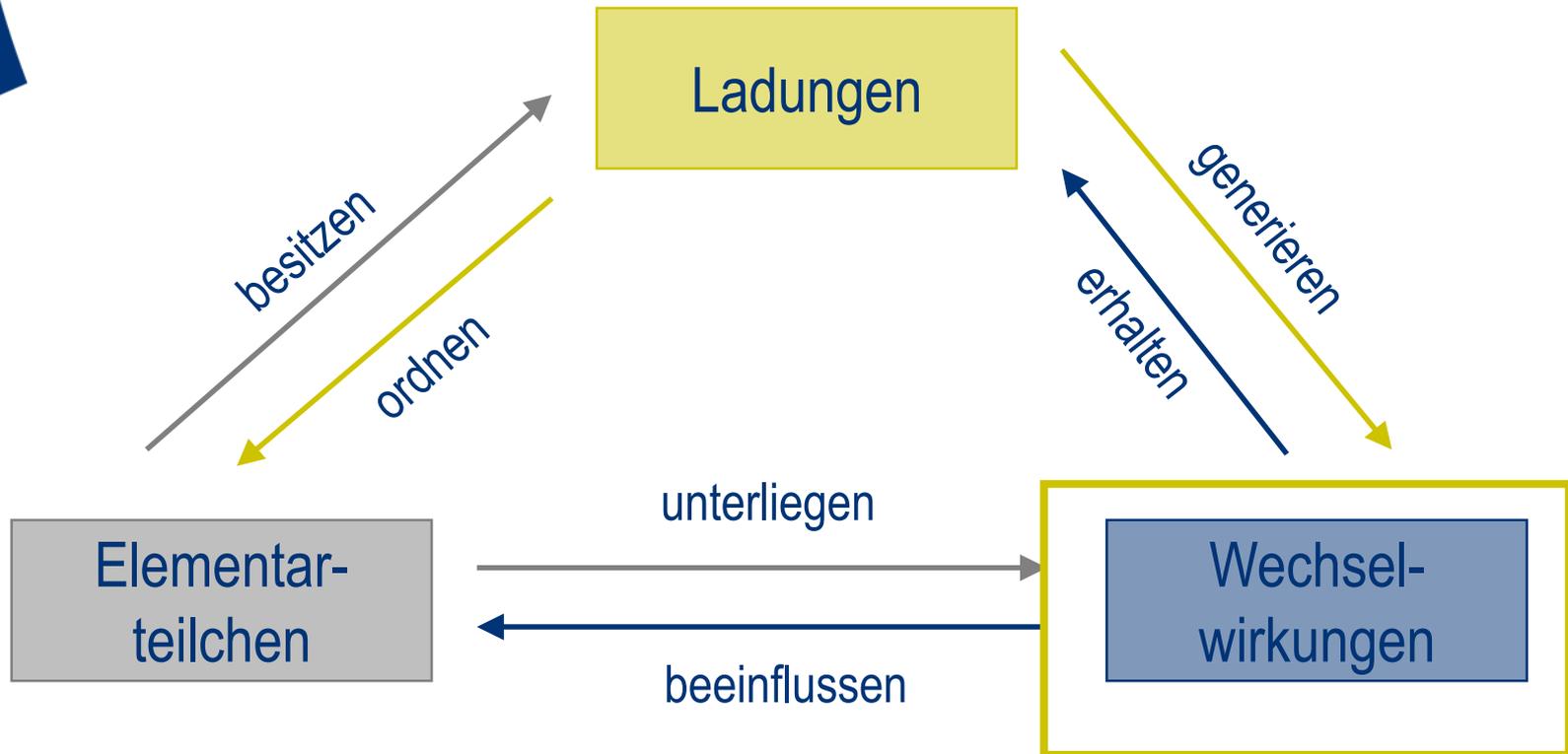
$$\text{Elektrische Ladung: } -1 = -1 + Z_? = \quad Z_? = 0$$

$$\text{Starke Ladung: } \vec{0} = \vec{0} + \vec{C}_? \quad \vec{C}_? = \vec{0}$$

$$\text{Schwache Ladung: } -\frac{1}{2} = -1 + I_? \quad I_? = +\frac{1}{2}$$

Das gesuchte Teilchen ist ein Elektron-Neutrino:  $e^- \rightarrow W^- + \nu_e$ .

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Beschreibung beliebiger WW mit Botenteilchen

- ▶ Wie beliebige WW im Botenteilchenmodell beschreiben?
- ▶ Welche Möglichkeiten erlaubt die WW in der Teilchenphysik zu visualisieren?

## Allgemeine Situation:



# Feynman-Diagramme (FD)

# Feynman-Diagramme

## ► Bausteine:

- Materie Teilchen

$u, d, e, \nu$



- Materie Antiteilchen

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



- Botenteilchen

$\gamma, W, Z$



$g$



# Übung: Intuitive Interpretation

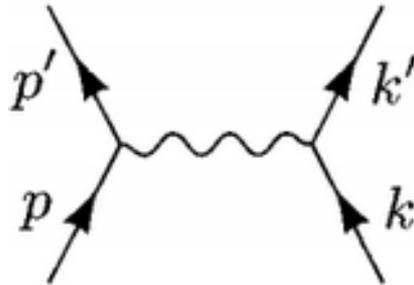


# Weiteres Feedback im Verlauf gewünscht

- ▶ Feedbackblatt zur Verständlichkeit/offenen Fragen an zwei Punkten in den Erklärungen
- ▶ Fragen, im Verlauf der nächsten Folien auftreten, bitte unter dem Punkt „aufgetretene Fragen“ notieren inkl. Foliennummer
- ▶ Fragen können zu an geeigneten Stellen natürlich gestellt werden

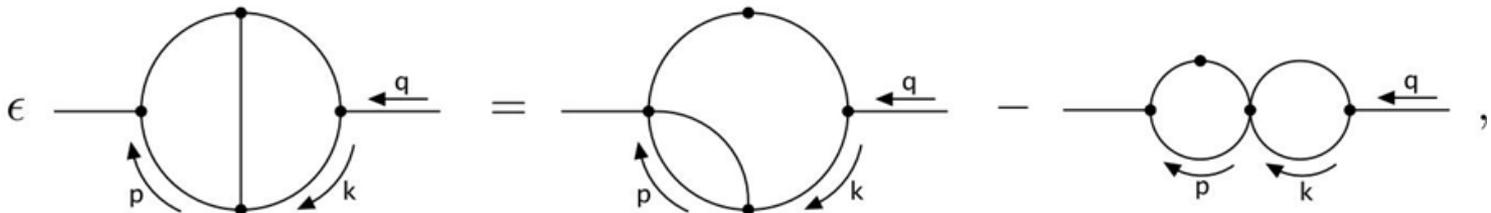
# Rolle von FD in der Physik

- ▶ FD sind gezeichnete Rechenregel



$$= (-ie)^2 \bar{u}(p') \gamma^\mu u(p) \frac{-ig_{\mu\nu}}{(p' - p)^2} \bar{u}(k') \gamma^\nu u(k)$$

Peskin, Schroeder: An Introduction To Quantum Field Theory

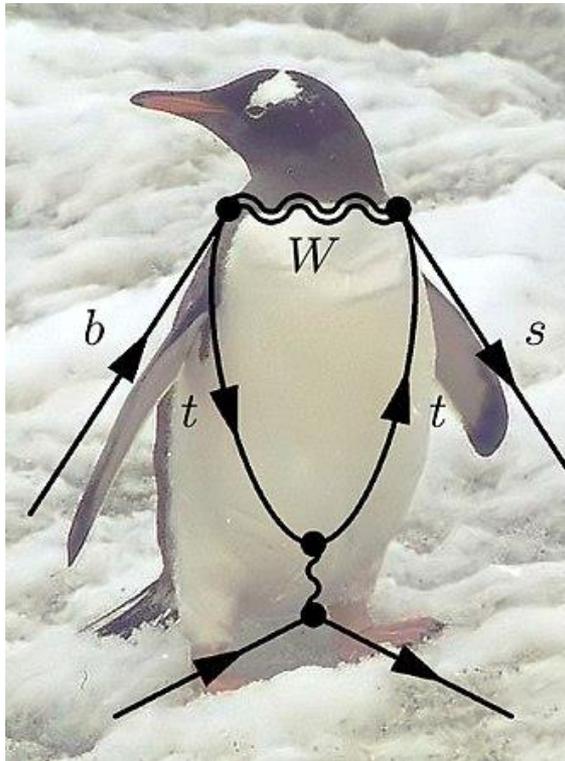


$$\epsilon \text{ --- } \text{circle with vertical line} \text{ --- } q = \text{circle with self-energy loop} \text{ --- } q - \text{two adjacent circles} \text{ --- } q ,$$

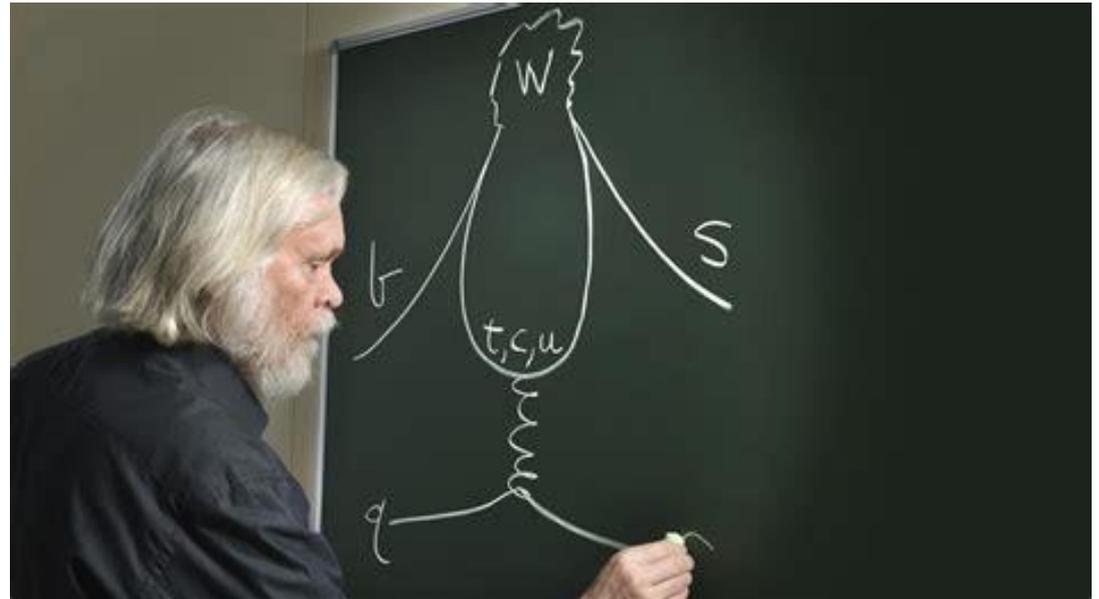
Harlander:

# Rolle von FD in der Physik

- FD dienen zur Kommunikation in der Fachcommunity



[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/Penguin\\_diagram.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/Penguin_diagram.JPG)



<https://www.symmetrymagazine.org/article/june-2013/the-march-of-the-penguin-diagrams>

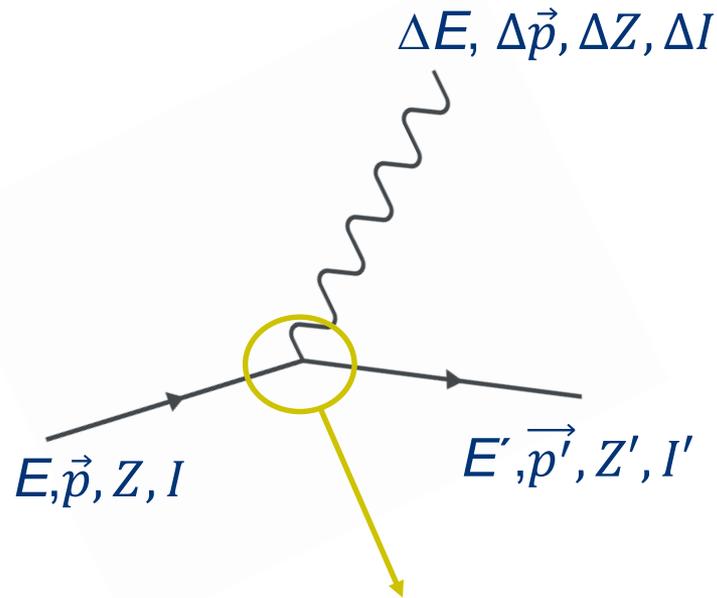
# Feynman - Diagramme

## ► Begriffsklärung:

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

## Anfangszustand (AZ)

- Links
- Hier 1 Teilchen

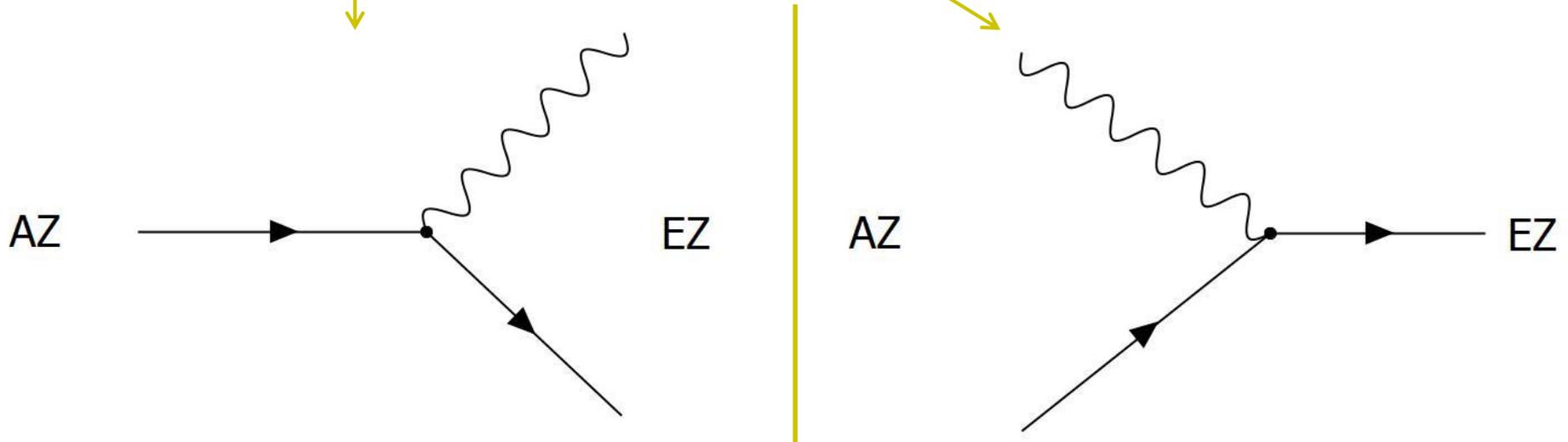


## Endzustand (EZ)

- Rechts
- Hier 2 Teilchen

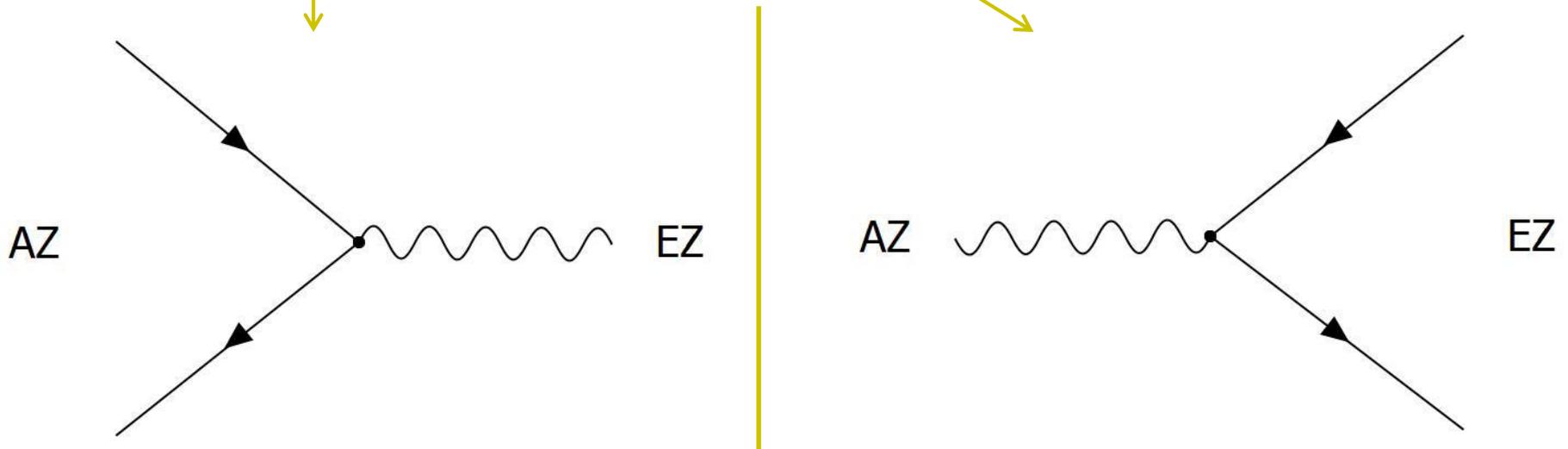
# Grundbausteine 1/2

## ▶ Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



# Grundbausteine 2/2

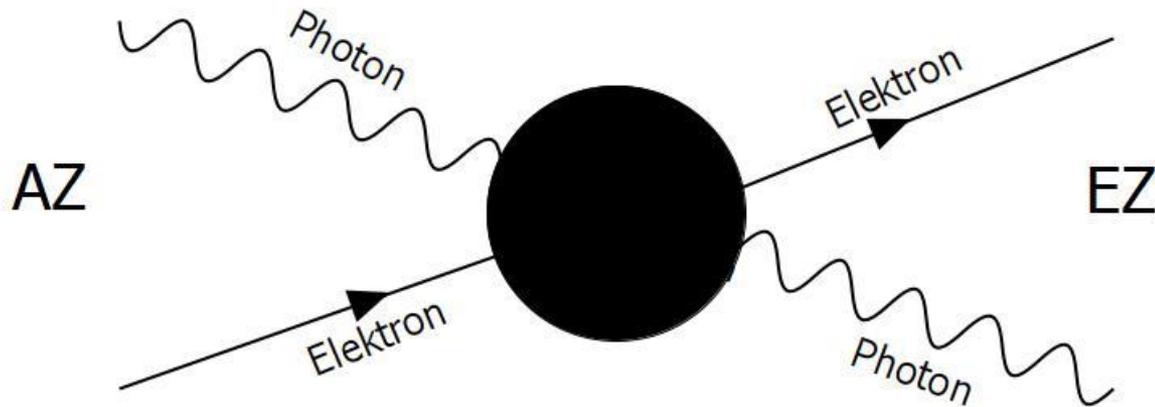
## ▶ Paarvernichtung und Paarerzeugung



# Blackbox Vertex

## ► Compton-Streuung

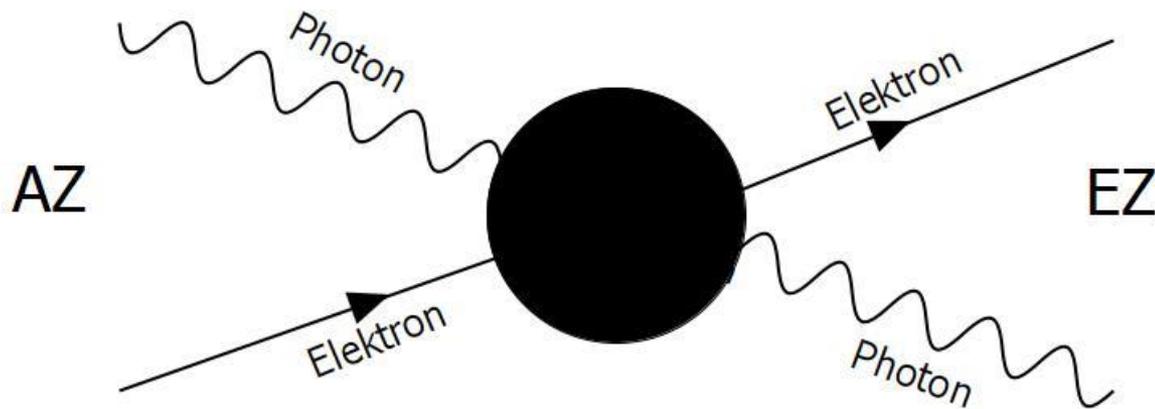
- Blackbox versteckt Information, wie WW beschrieben wird



# Blackbox Vertex

## ► Compton-Streuung

- Blackbox versteckt Information, wie WW beschrieben wird



QM: Präparierter Zustand

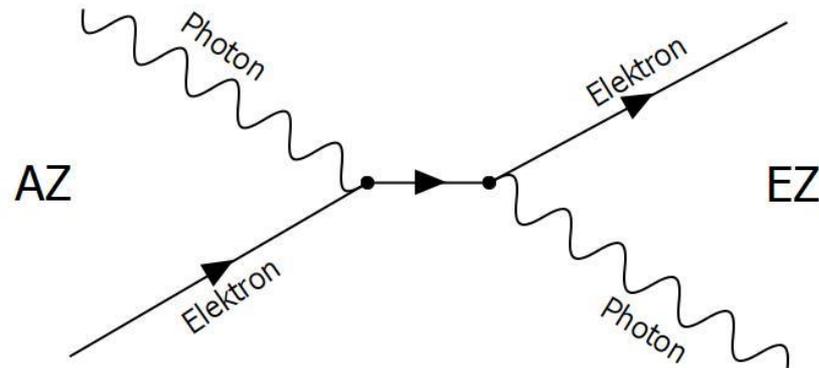
QM: Gemessener Zustand

# Blackbox Vertex

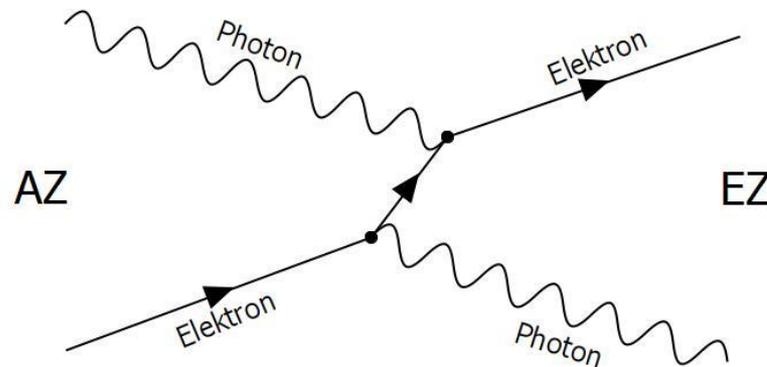
## ► Compton-Streuung

- In diesem Fall 2 gleichberechtigte Prozesse, die berücksichtigt werden müssen

1.



2.



# FD und das Doppelspaltexperiment -konzeptionelle Gemeinsamkeiten

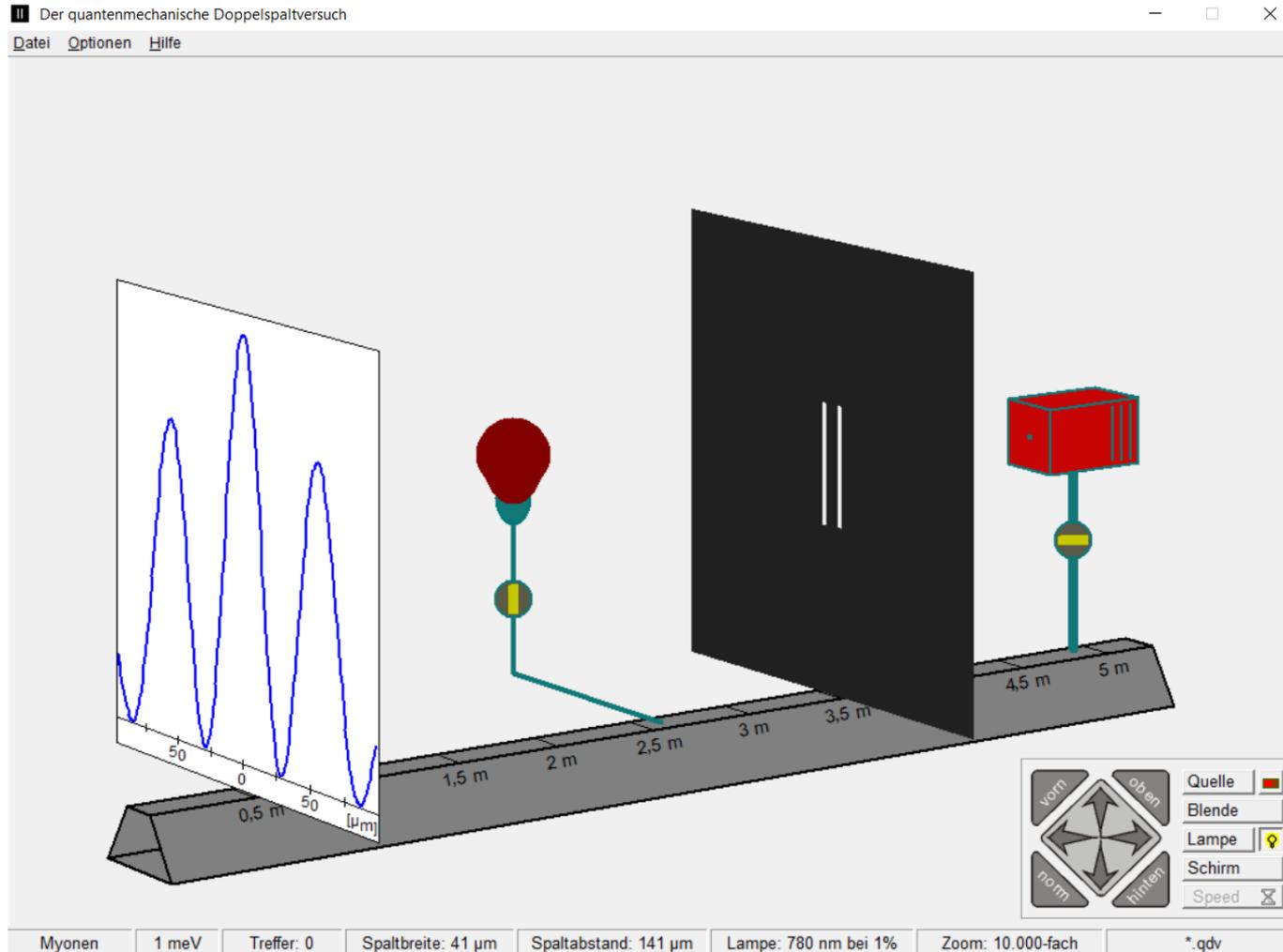
- ▶ Doppelspaltexperiment mit Elektronen und Photonen ist Schlüsselexperiment der Quantenphysik
- ▶ Auch zentrale Rolle im Physikunterricht
- ▶ Gilt als „didaktische Alleskönner“ (Josef Leisen 2000: *Quantenphysik – Mikroobjekte. Handreichung zum neuen Lehrplan Physik in der Sekundarstufe II. Rheinland Pfalz*)

"Das zentrale Geheimnis der Quantentheorie steckt im Doppelspaltexperiment."

- *R. Feynman*

- ▶ Elementarteilchenphysik ist **Quantenfeldtheorie!**

# Animation Doppelspaltexperiment



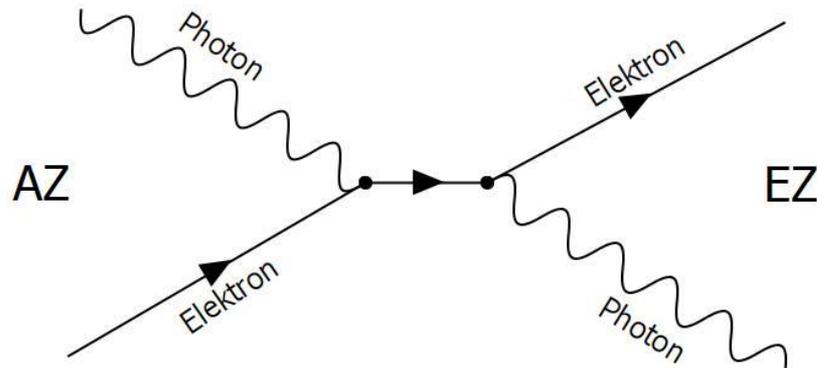
<http://milq.tu-bs.de/materialien/simulationsprogramme/>

# Blackbox Vertex

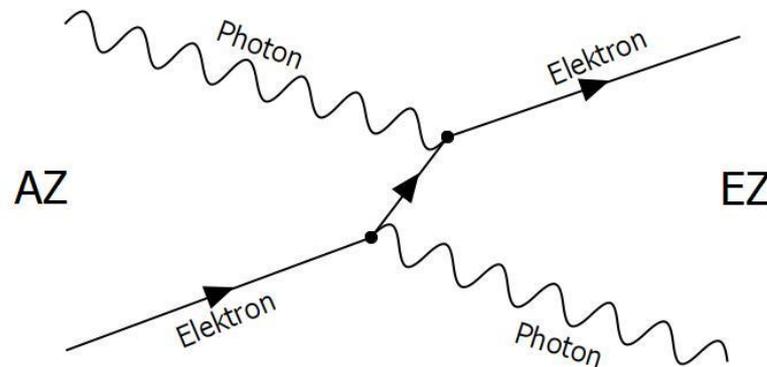
## ► Compton-Streuung

- In diesem Fall 2 gleichberechtigte Prozesse, die berücksichtigt werden müssen

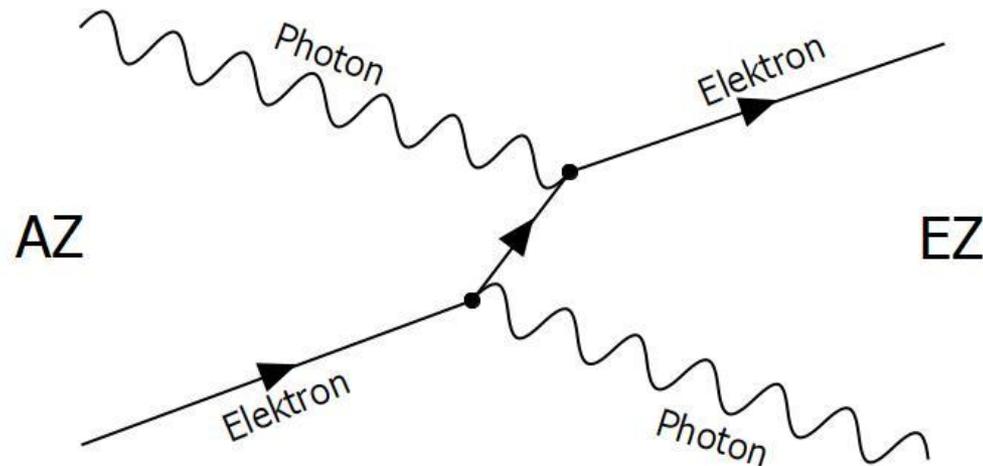
1.



2.

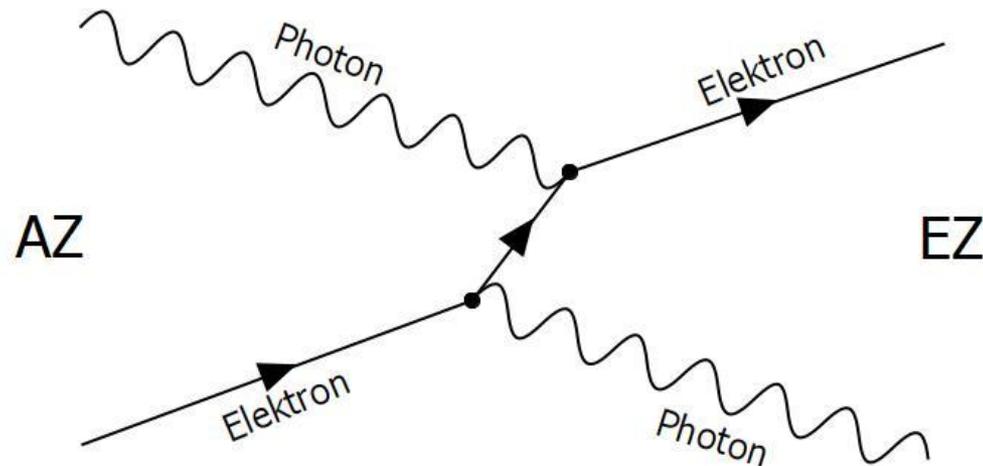


# Topologisch äquivalente Diagramme



- ▶ Topologie ist dadurch definiert, welche Linien sich an einem Vertex treffen
- ▶ Topologisch äquivalente Diagramme werden **nur ein mal** berücksichtigt
- ▶ In der Analogie **beschreiben sie den selben Spalt**

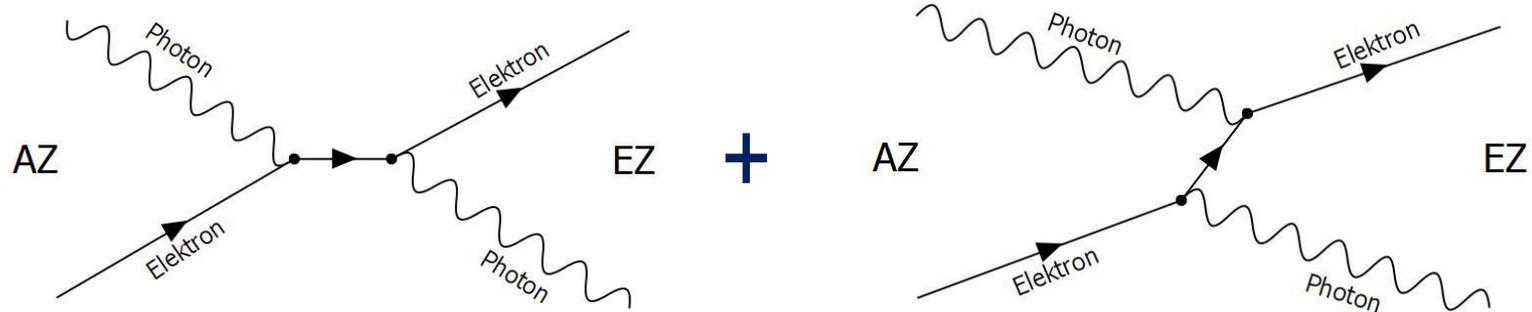
# Topologisch äquivalente Diagramme



- ▶ Schauen wir uns das in FeynGame, einem Editor für Feynman-Diagramme genauer an
- ▶ <https://web.physik.rwth-aachen.de/~harlander/software/feyngame/>

# Berechnung der Wsk.-Verteilung $e+\gamma \rightarrow e+\gamma$

$$P(e+\gamma \rightarrow e+\gamma) \approx$$



**Interferenz**

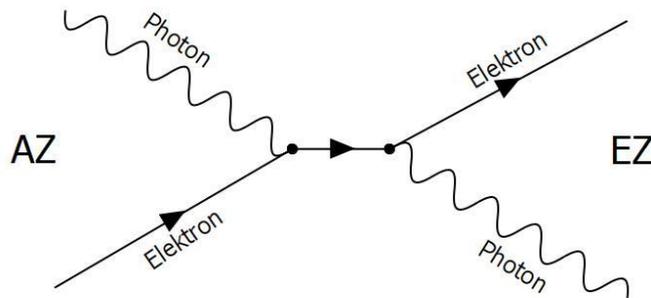
**=**

**Ununterscheidbarkeit der Möglichkeiten**

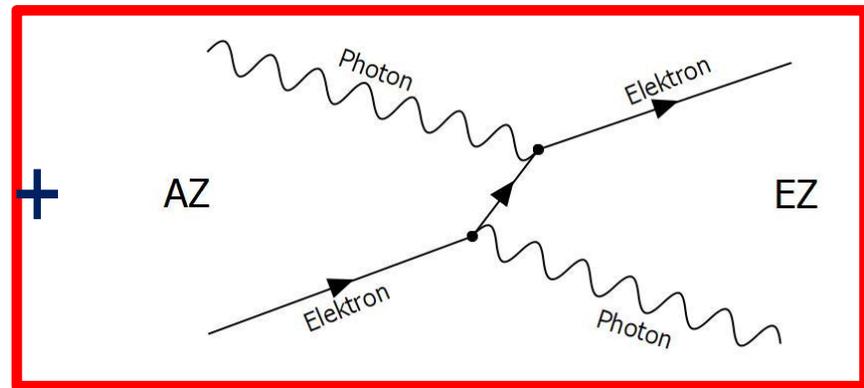
(Komplementaritätsprinzip der QM)

# Berechnung der Wsk.-Verteilung $e+\gamma \rightarrow e+\gamma$

$$P(e+\gamma \rightarrow e+\gamma) \approx$$



+



2

**Interferenz**

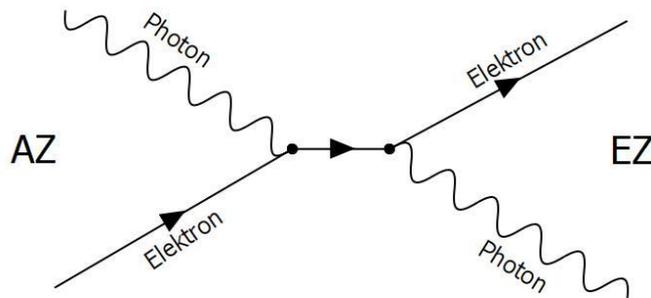
=

**Ununterscheidbarkeit der Möglichkeiten**

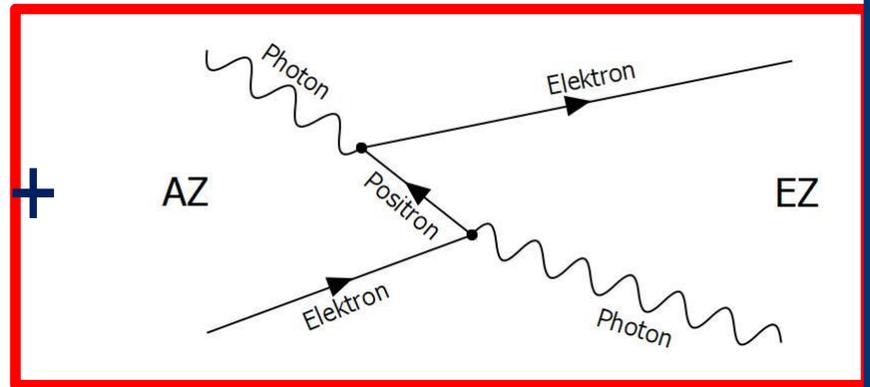
(Komplementaritätsprinzip der QM)

# Berechnung der Wsk.-Verteilung $e+\gamma \rightarrow e+\gamma$

$$P(e+\gamma \rightarrow e+\gamma) \approx$$



+



2

Interferenz

=

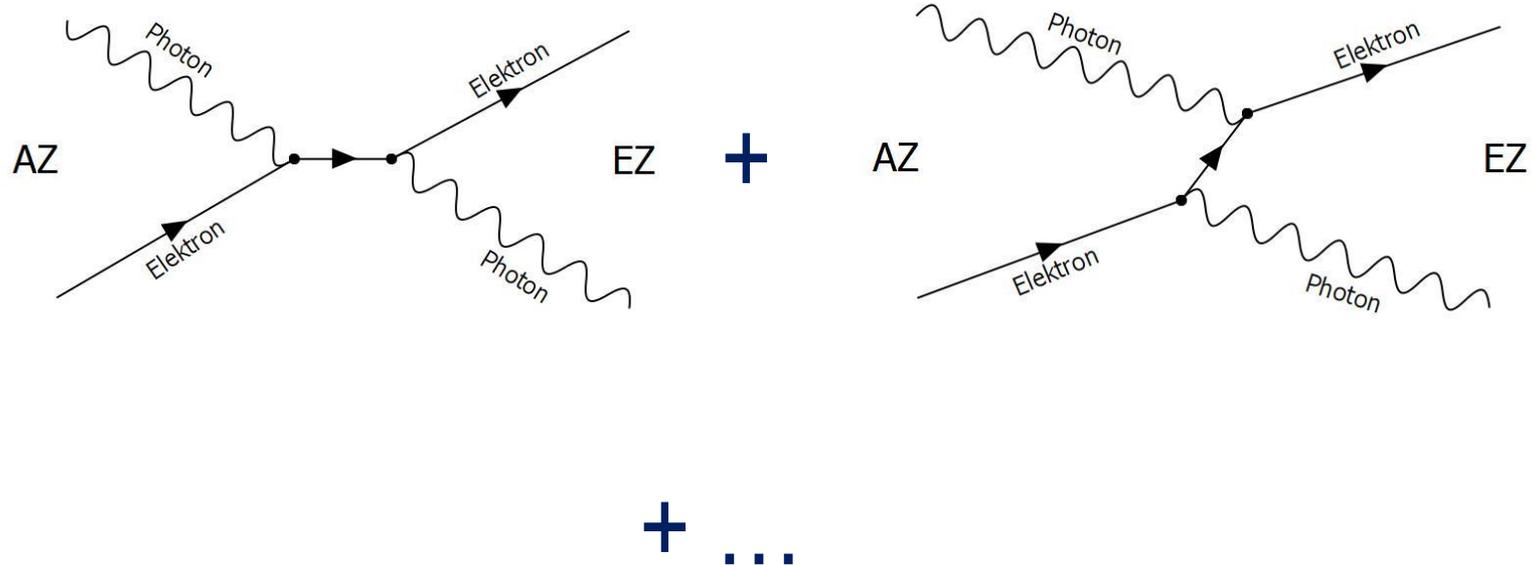
**Ununterscheidbarkeit der Möglichkeiten**

(Komplementaritätsprinzip der QM)

Topologisch Äquivalent

# Berechnung der Wsk.-Verteilung $e+\gamma \rightarrow e+\gamma$

$$P(e+\gamma \rightarrow e+\gamma) \approx$$



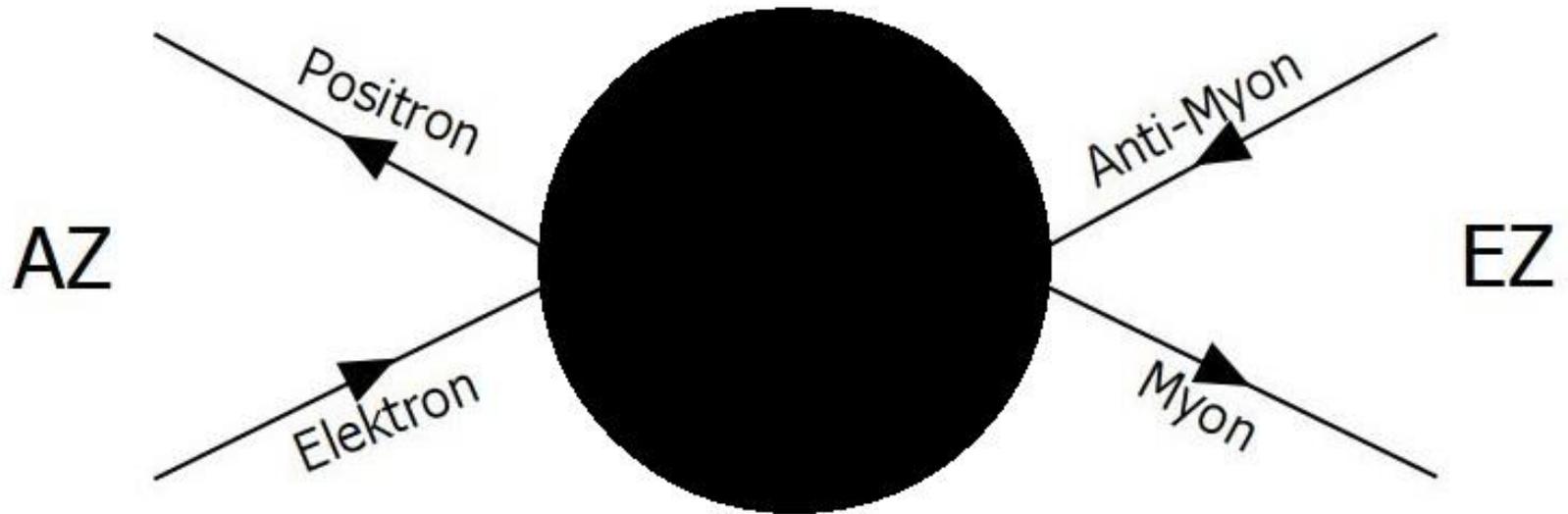
# Komplementaritätsprinzip

- ▶ Frage, welcher Prozess (1. oder 2.) stattfindet ist nicht sinnvoll!  
→ Genauso wenig wie die Frage, durch welchen Spalt das Elektron/Photon beim QM-Doppelspaltexperiment gegangen ist und welchen „Weg“ es dabei genommen hat

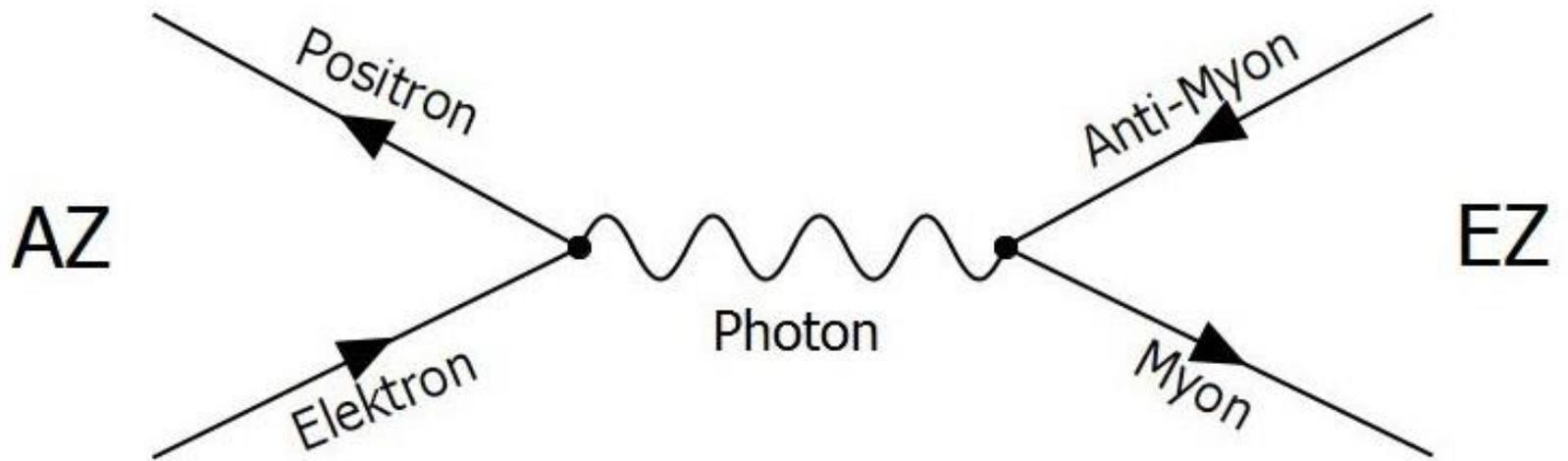
## **Aber:**

Informationen über möglichen Diagramme und Eigenschaften der beteiligten Teilchen im Inneren sind im Messergebnis (Wahrscheinlichkeiten bzw. Häufigkeiten) enthalten!

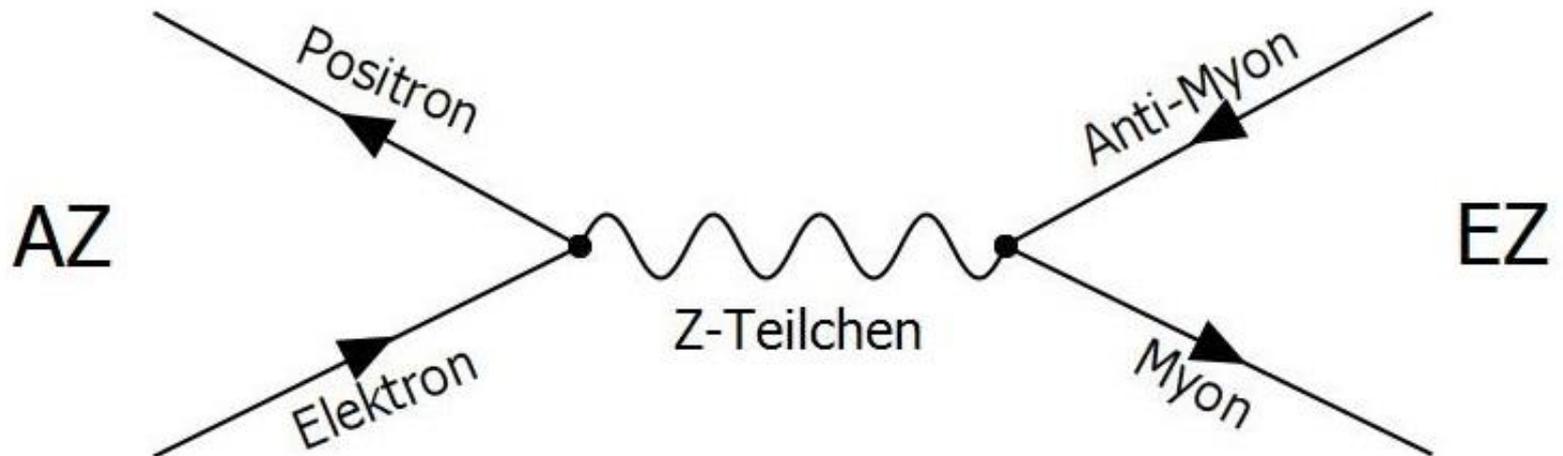
Beispiel 2:



Möglichkeit 1:  $e^- + e^+ \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^- + \mu^+$

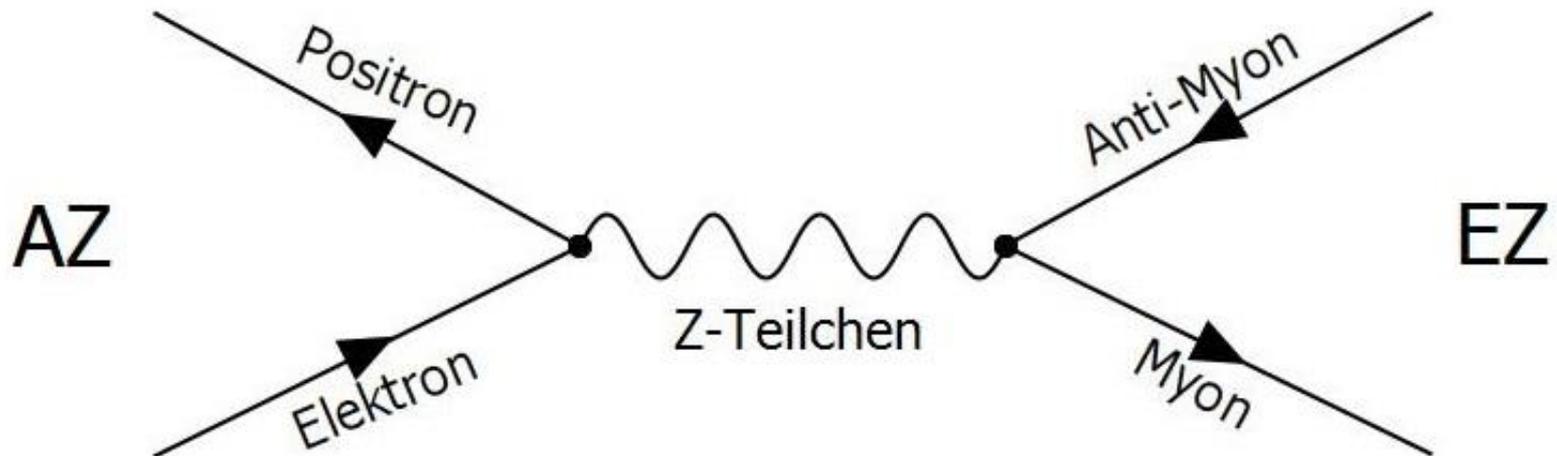


Möglichkeit 2:  $e^- + e^+ \rightarrow Z \rightarrow \mu^- + \mu^+$

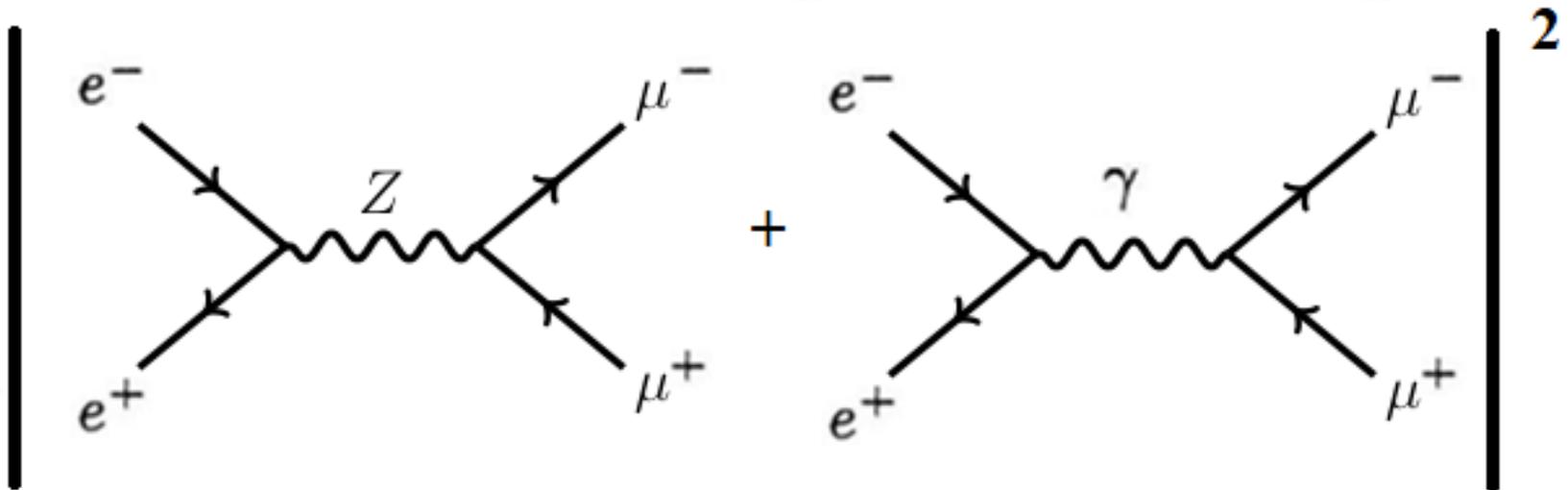


## Möglichkeit 2: $e^- + e^+ \rightarrow Z \rightarrow \mu^- + \mu^+$

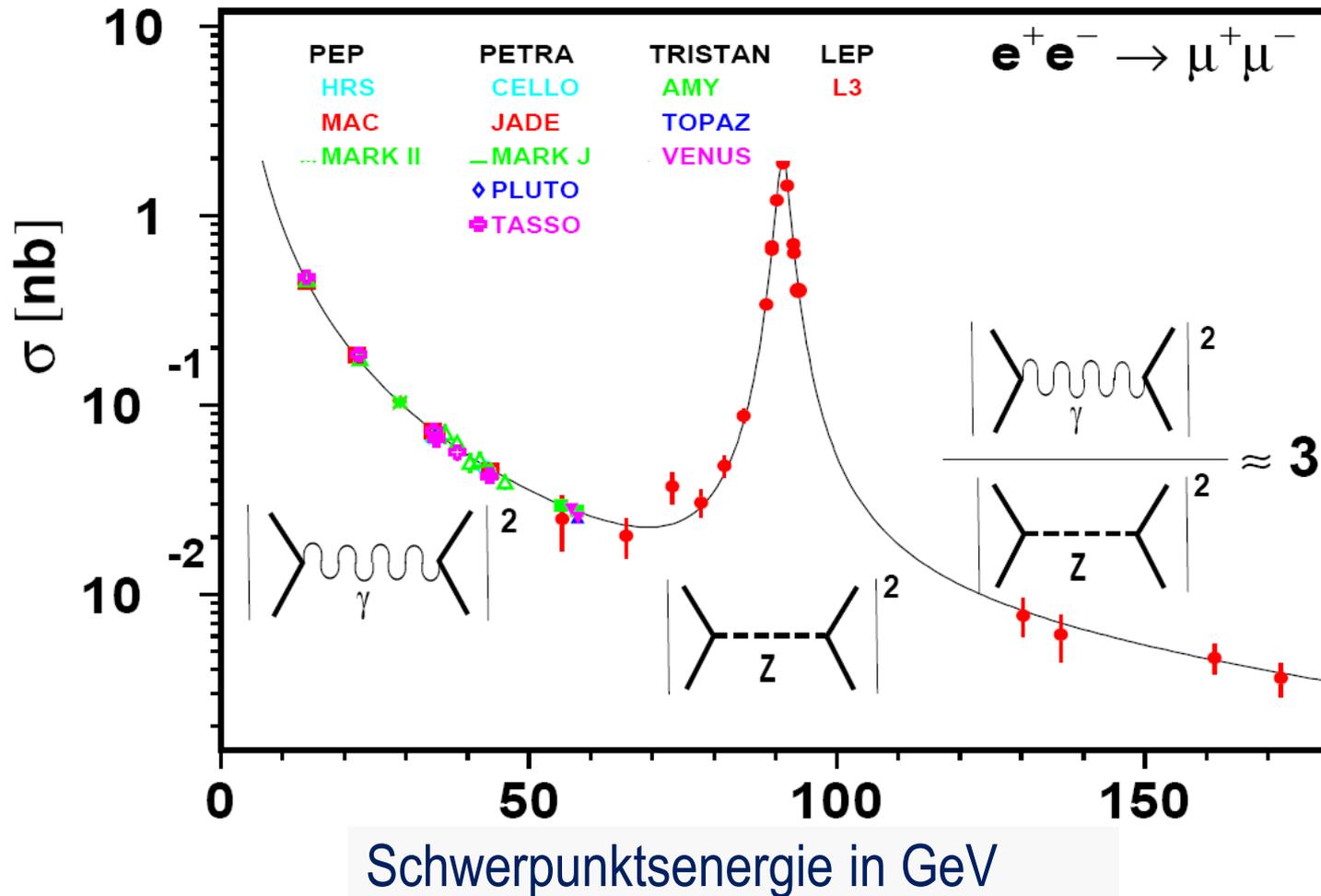
- ▶ Wird morgen noch besonders interessant!



# Gute Näherung für $e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+$



# Gute Näherung für $e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+$



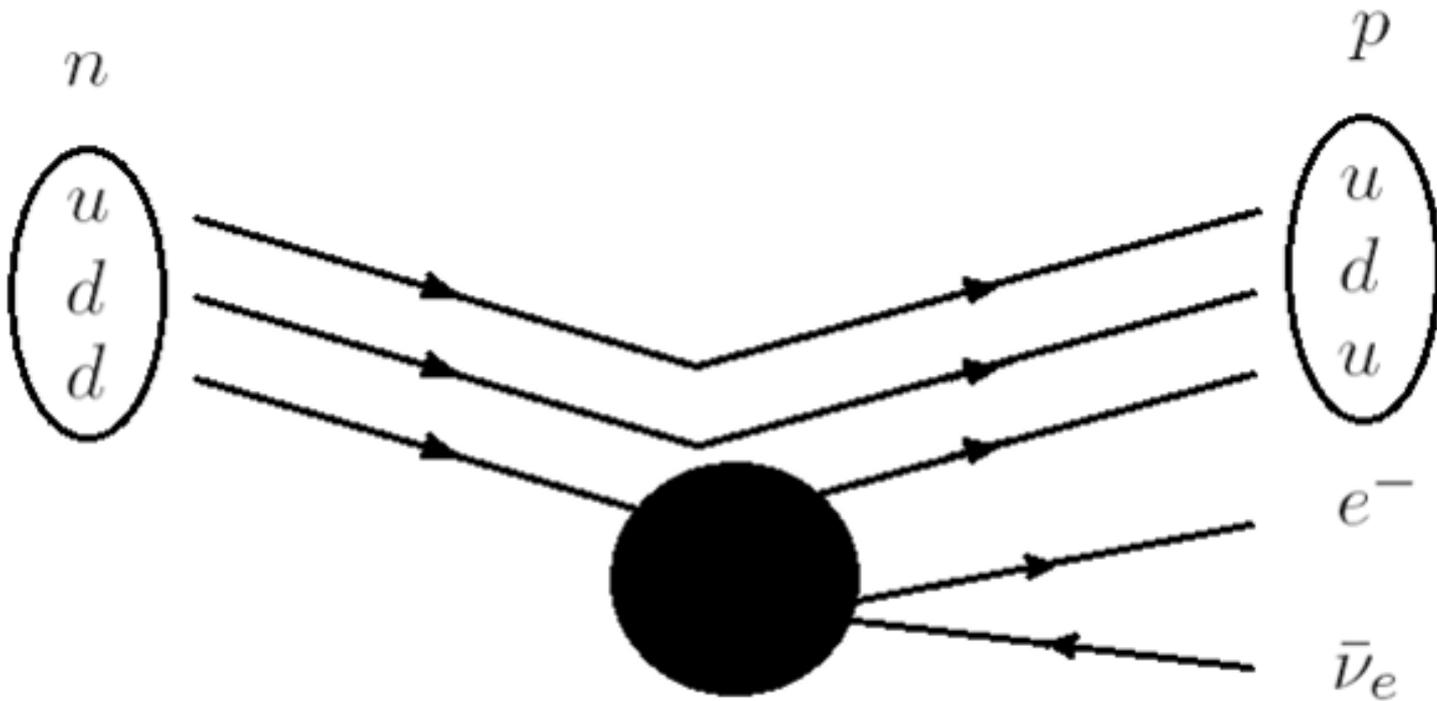


# Abfrage Verständlichkeit

- ▶ Bitte beurteilt die Verständlichkeit der Analogie unter Punkt **1.** des Feedbackblattes
- ▶ Begründet wenn nötig und möglich, warum die Analogie bzw. was genau nicht verständlich ist
- ▶ Notiert bitte offene Fragen, die ihr zur Analogie habt.

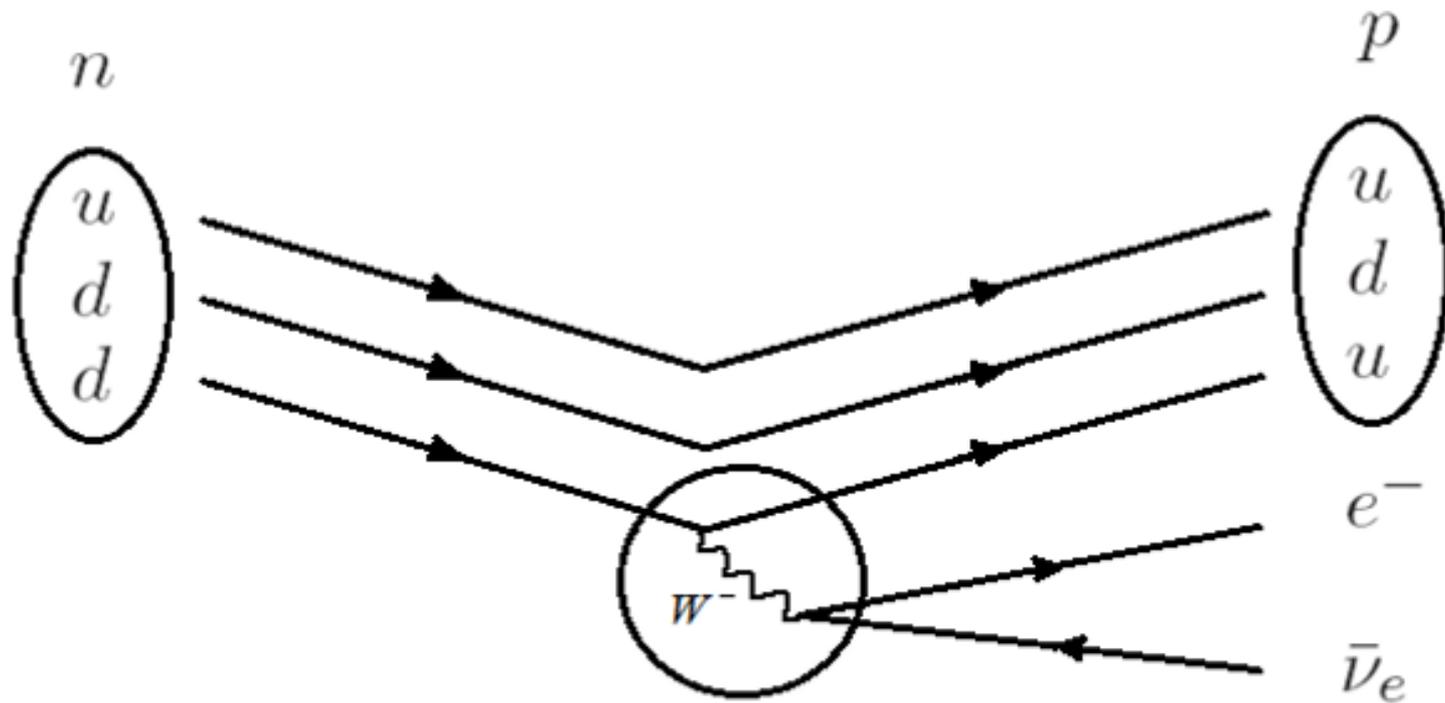
# Beispiel für Spiralansatz: Feynman-Diagramme

- ▶ Beta-Umwandlung mit Blackbox

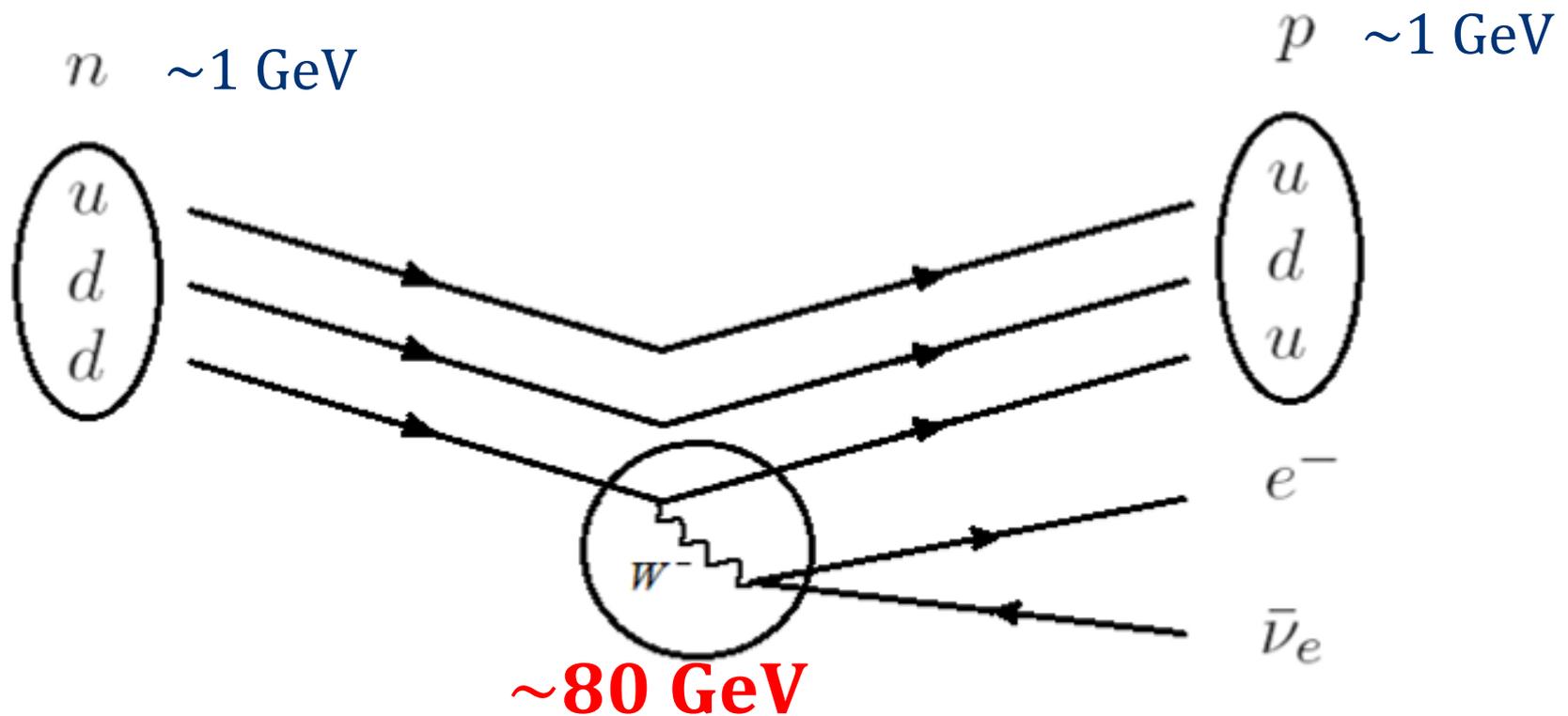


# Beispiel für Spiralansatz: Feynman-Diagramme

- ▶ Beta-Umwandlung mit expliziter Beschreibung der WW



# Energieproblem bei Beta-Umwandlung?

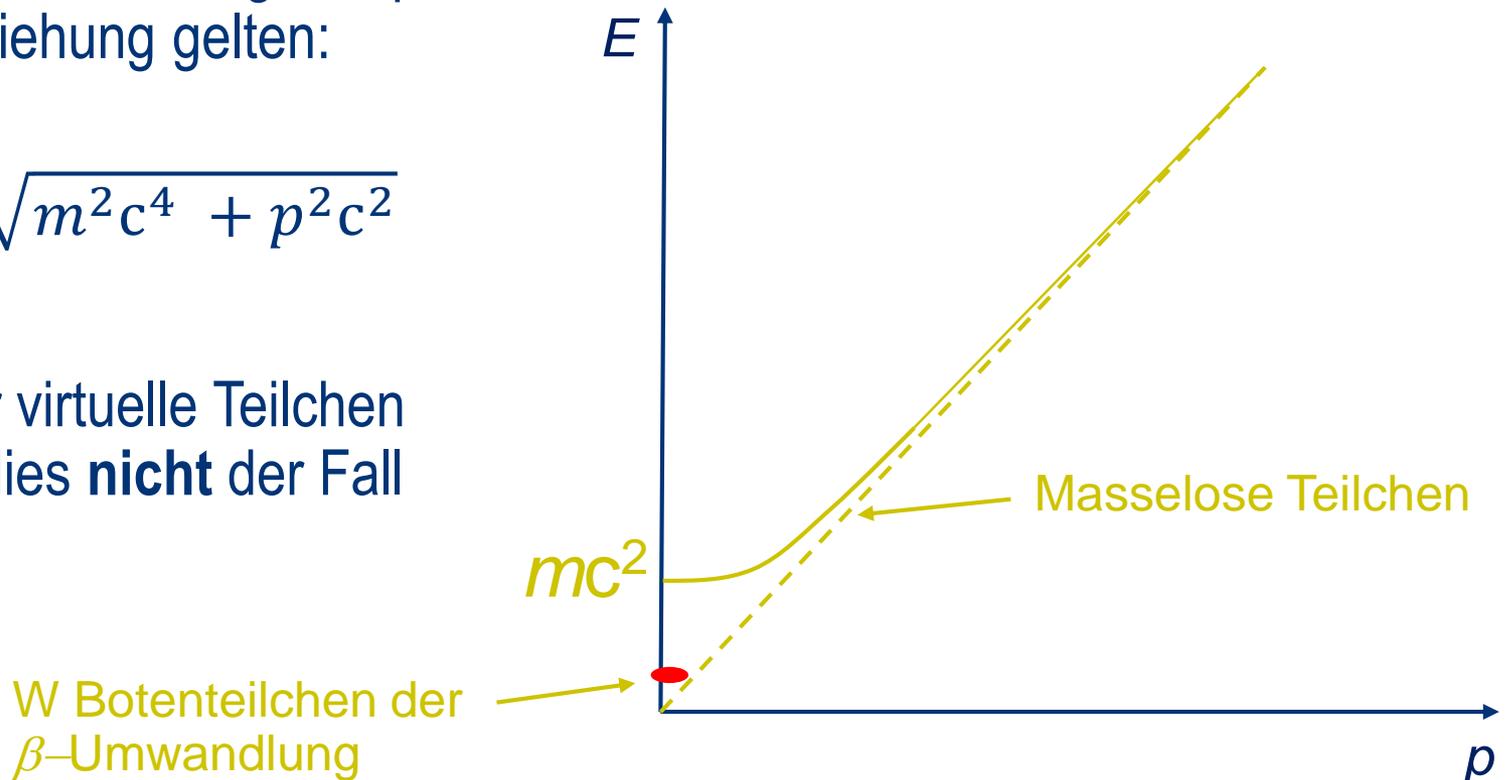


# Virtuelle Teilchen = innere Linien von FD

- ▶ Für reelle Teilchen (AZ oder EZ) muss die Energie-Impuls Beziehung gelten:

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$$

- ▶ Für virtuelle Teilchen ist dies **nicht** der Fall



# Virtuelle Teilchen

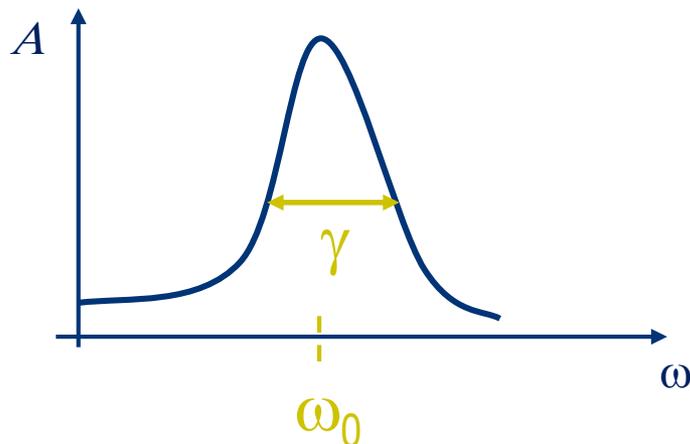
## ► Analogie: Erzwungene Schwingung

Amplit.  $\sim \frac{1}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega_0^2 \gamma^2}$

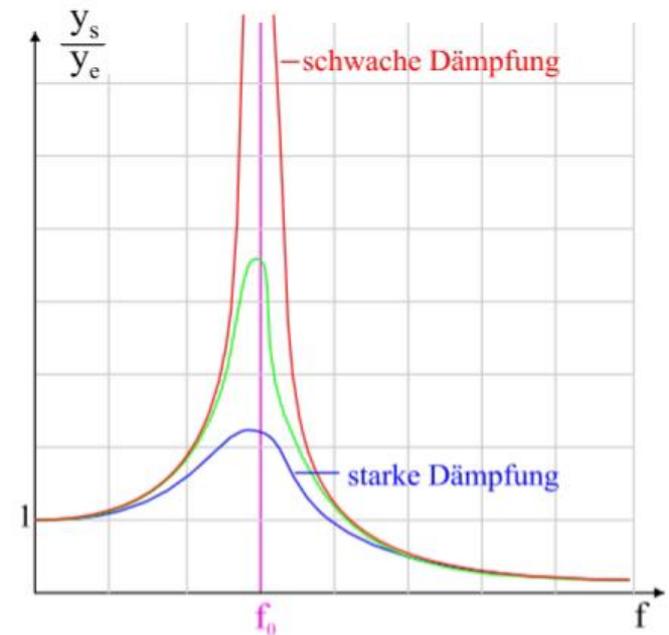
von außen  
Vorgegeben:  
Erregerfrequenz

Eigenfrequenz

Dämpfung

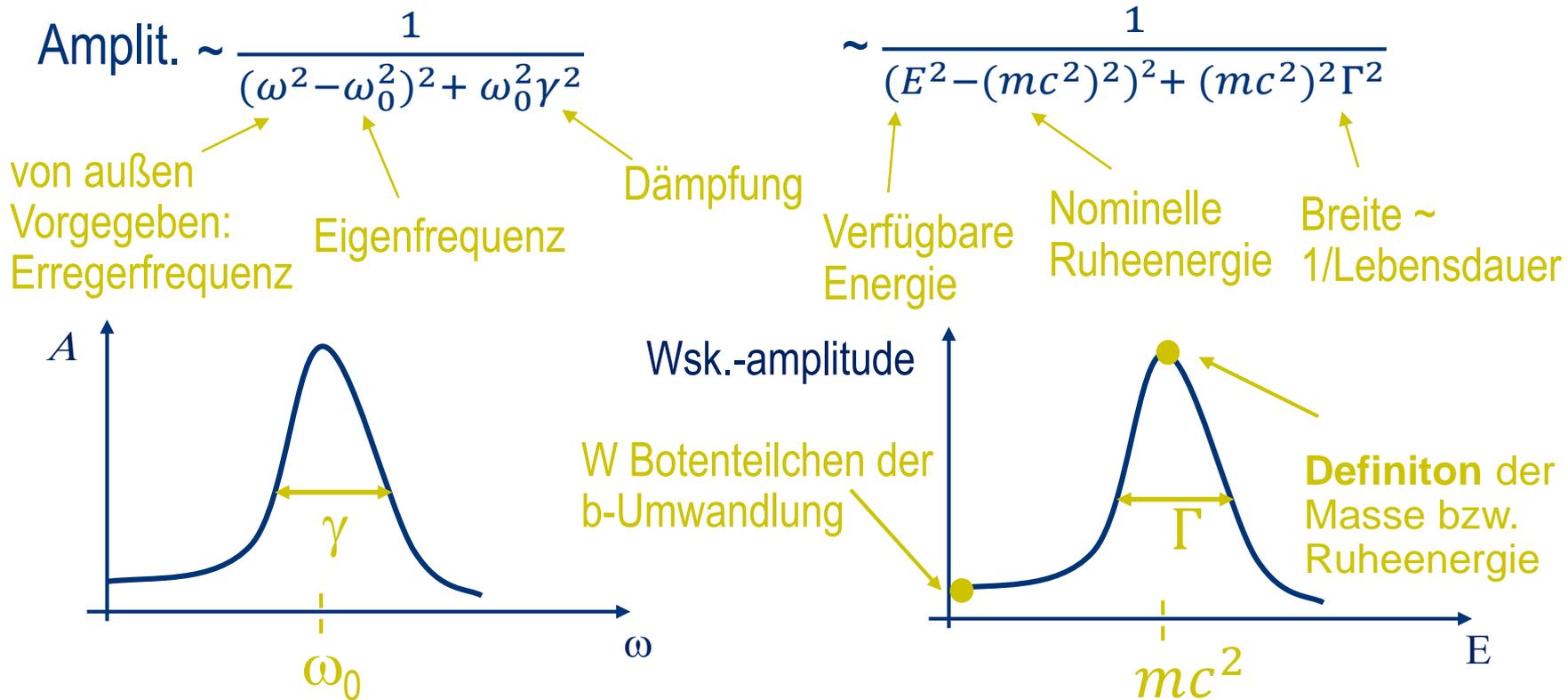


<https://www.leifiphysik.de/mechanik/kopplung-von-schwingungen/downloads/erzwungene-schwingung-animation>



# Virtuelle Teilchen

► Analogie: Erzwungene Schwingung vs. Teilchenphysik

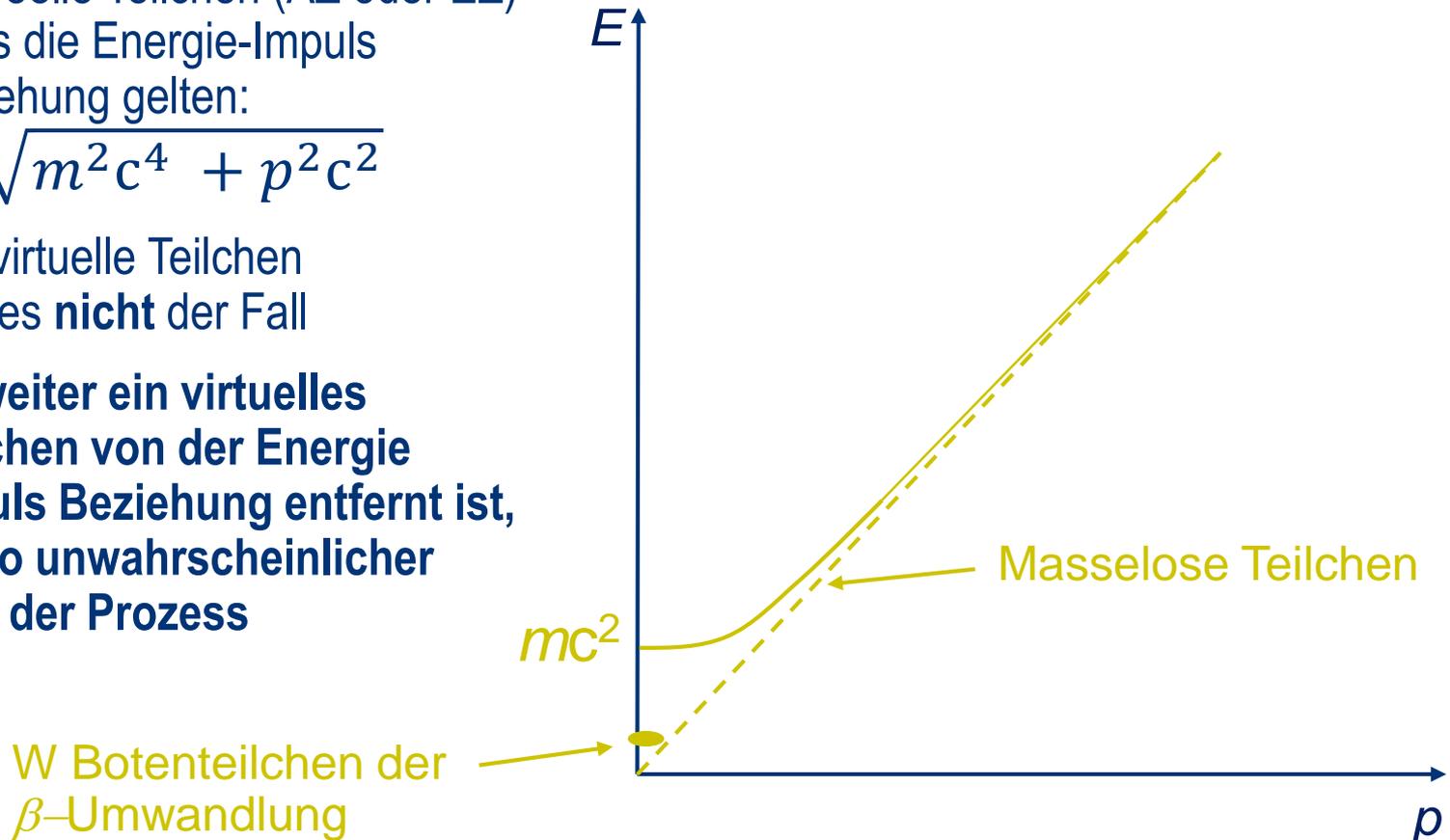


# Virtuelle Teilchen = innere Linien von FD

- ▶ Für reelle Teilchen (AZ oder EZ) muss die Energie-Impuls Beziehung gelten:

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$$

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

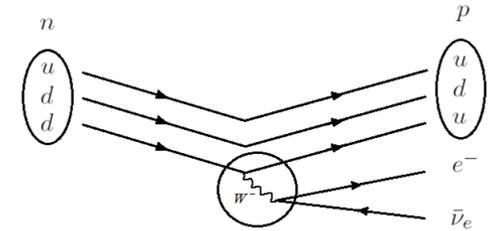




# Abfrage Verständlichkeit

- ▶ Bitte beurteilt die Verständlichkeit der Analogie unter Punkt **2.** des Feedbackblattes
- ▶ Begründet wenn nötig und möglich, warum die Analogie bzw. was genau nicht verständlich ist
- ▶ Notiert bitte offene Fragen, die ihr zur Analogie habt.

# Ladungsbilanz: $\beta^-$ -Umwandlung



► Prozess:  $d \rightarrow u + W^- \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$

- Elektrische Ladungszahl:  $Z$

$$-\frac{1}{3} = +\frac{2}{3} - 1 = +\frac{2}{3} - 1 + 0$$

- Schwache Ladungszahl:  $I$

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

- Starker Farbladungsvektor:  $\vec{C}$

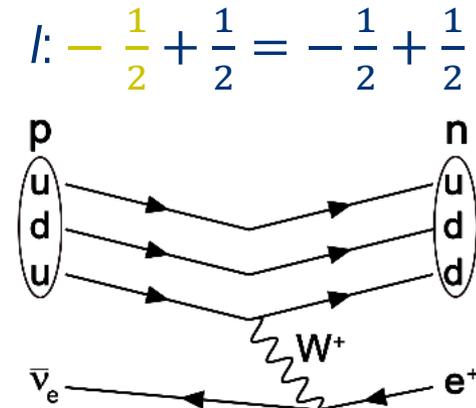
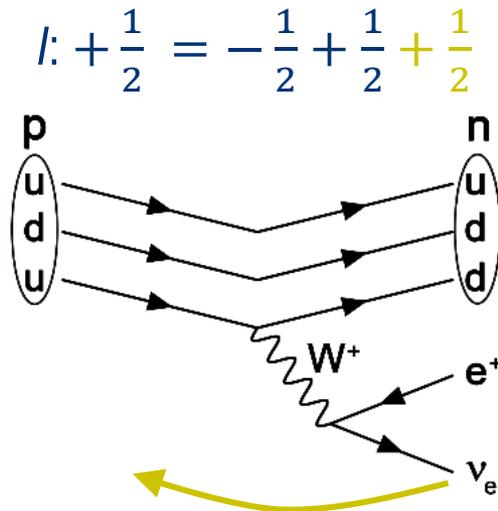
$$\vec{C} = \vec{C} + \vec{0} = \vec{C} + \vec{0} + \vec{0}$$

► Alle Ladungen sind erhalten

# „Umklappen“ von Linien

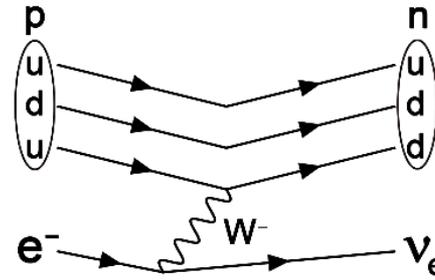
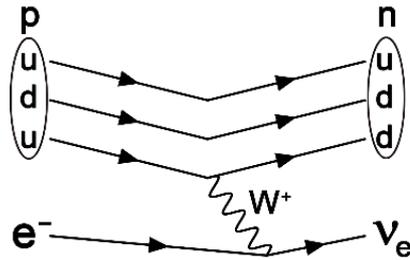
- ▶ Durch „umklappen“ von Linien können mögliche Prozesse vorhergesagt werden
- ▶ Ladungserhaltung bleibt durch Umkehr der Pfeilrichtung gegeben
- ▶ Beispiel:

- Von der  $\beta^+$  Umwandlung zum Nachweis der Elektron Anti-Neutrinos

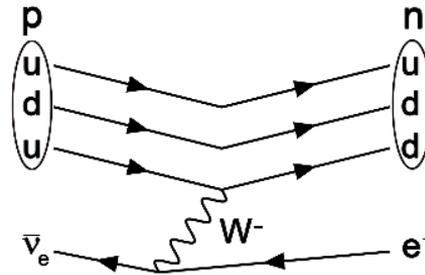
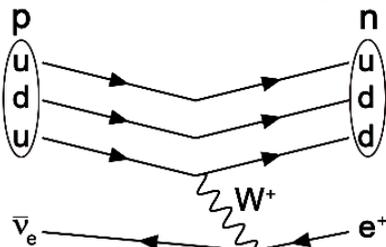


# „Umklappen“ von Linien

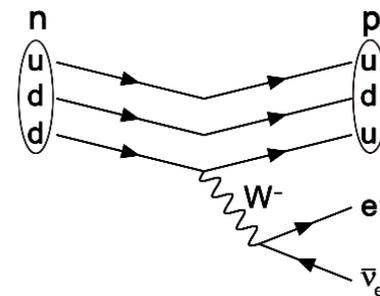
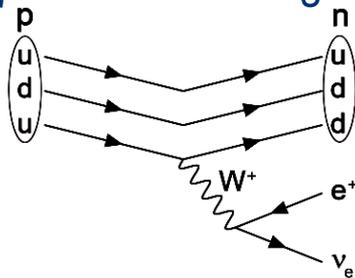
- ▶ Atomphysik: K-Einfang eines Elektrons der K-Schale



- ▶ Erster Nachweis von (Anti-)neutrinos 1953



- ▶  $\beta^+$  und  $\beta^-$  - Umwandlungen von Kernen

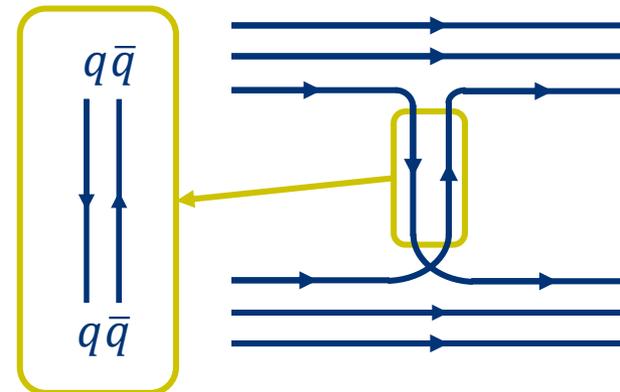


# Erinnerung: Bindung von Nukleonen – Starke Wechselwirkung vs. Kernkraft

- ▶ Zusammenhalt von Nukleonen analog zur Elektronenpaarbindung bei Atomen
  - Kurze Abstände: Nukleonen im Kern „teilen“ sich kurzzeitig ein Quark-Paar



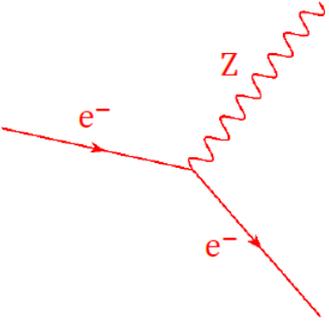
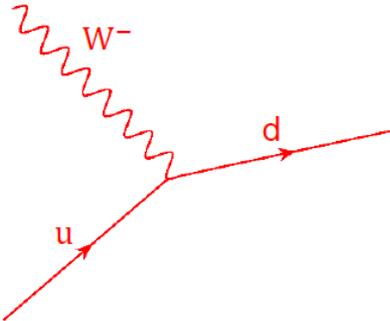
- Größere Abstände: Austausch von „Pionen“ (geb.  $q\bar{q}$  Zustände)





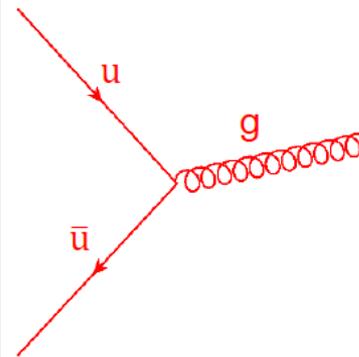
# Übung: Feynman-Diagramme

- ▶ Arbeitsblatt mit Aufgaben zu Feynman-Diagrammen
- ▶ Weiter mögliche Übungen in „Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen“
  - Aufgaben 9-12 (ab Seite 103)

Name des Prozesses	Beschreibung	Vertex
Abstrahlung eines Botenteilchens	Ein Elektron strahlt ein Z-Teilchen ab. Dadurch ändert sich die Energie und der Impuls des Elektrons	 <p>A Feynman diagram illustrating the emission of a Z boson by an electron. An incoming electron line (solid red line with an arrow pointing right) enters from the left. At a vertex, a wavy red line representing a Z boson is emitted upwards and to the right. The electron line continues downwards and to the right, exiting as an outgoing electron (e<sup>-</sup>).</p>
Absorption eines Botenteilchens	Ein Up-Quark fängt ein W <sup>-</sup> -Teilchen ein. Durch die Änderung der elektrischen und der schwachen Ladung wandelt sich das Up-Quark in ein Down-Quark um. Außerdem ändert sich die Energie und der Impuls des Quarks	 <p>A Feynman diagram illustrating the absorption of a W<sup>-</sup> boson by an up quark. An incoming up quark line (solid red line with an arrow pointing right) enters from the bottom left. At a vertex, a wavy red line representing a W<sup>-</sup> boson is absorbed from the top left. The quark line continues upwards and to the right, exiting as a down quark (d).</p>

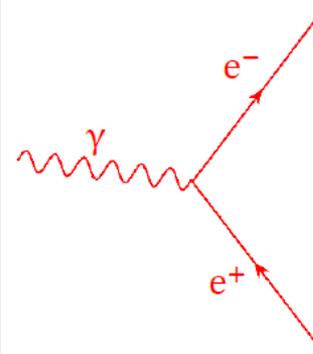
Paarvernichtung

Ein Up-Quark und ein Anti-Up-Quark treffen aufeinander und vernichten sich unter Entstehung eines Gluons.

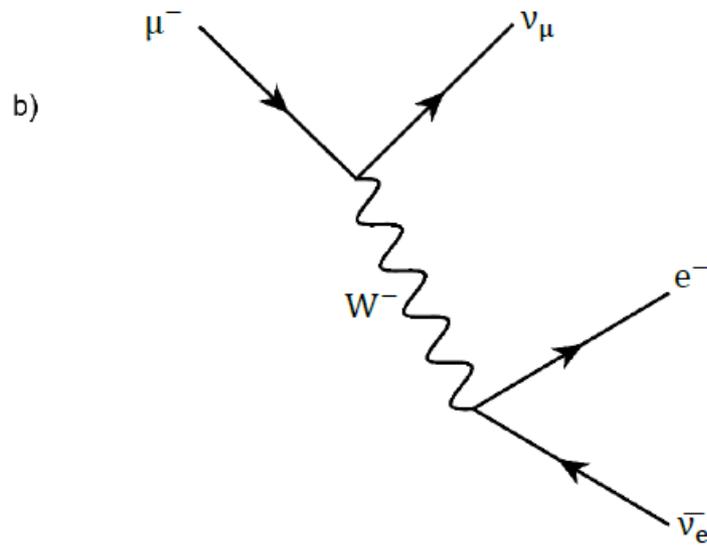
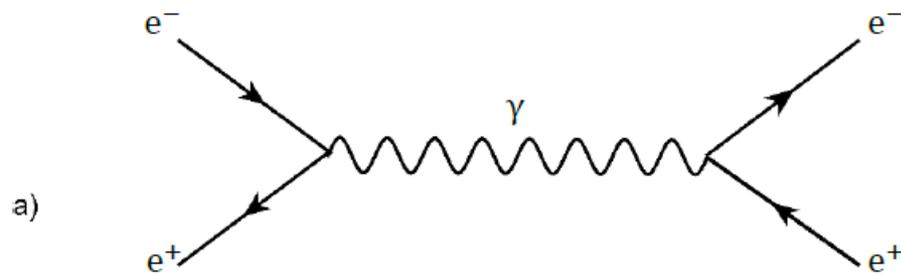


Paarerzeugung

Ein Photon wandelt sich in ein Elektron und ein Positron um.

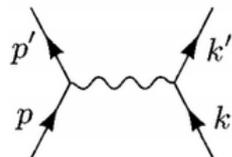


2. Es entstehen folgende Feynman-Diagramme:

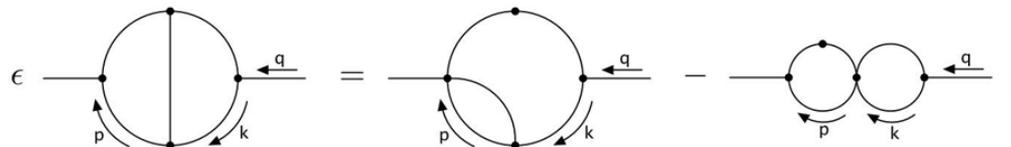


# Erinnert euch zurück...

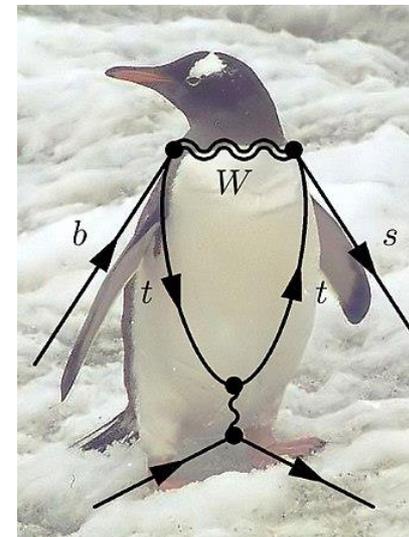
- ▶ Hat euch das Zeigen der komplizierten Diagramme und der Bezug zur Mathematisierung zu Beginn eher motiviert/interessiert oder eher abgeschreckt?
- Einschätzung bitte unter Punk 3. auf dem Feedback-Blatt, gern mit Kommentar



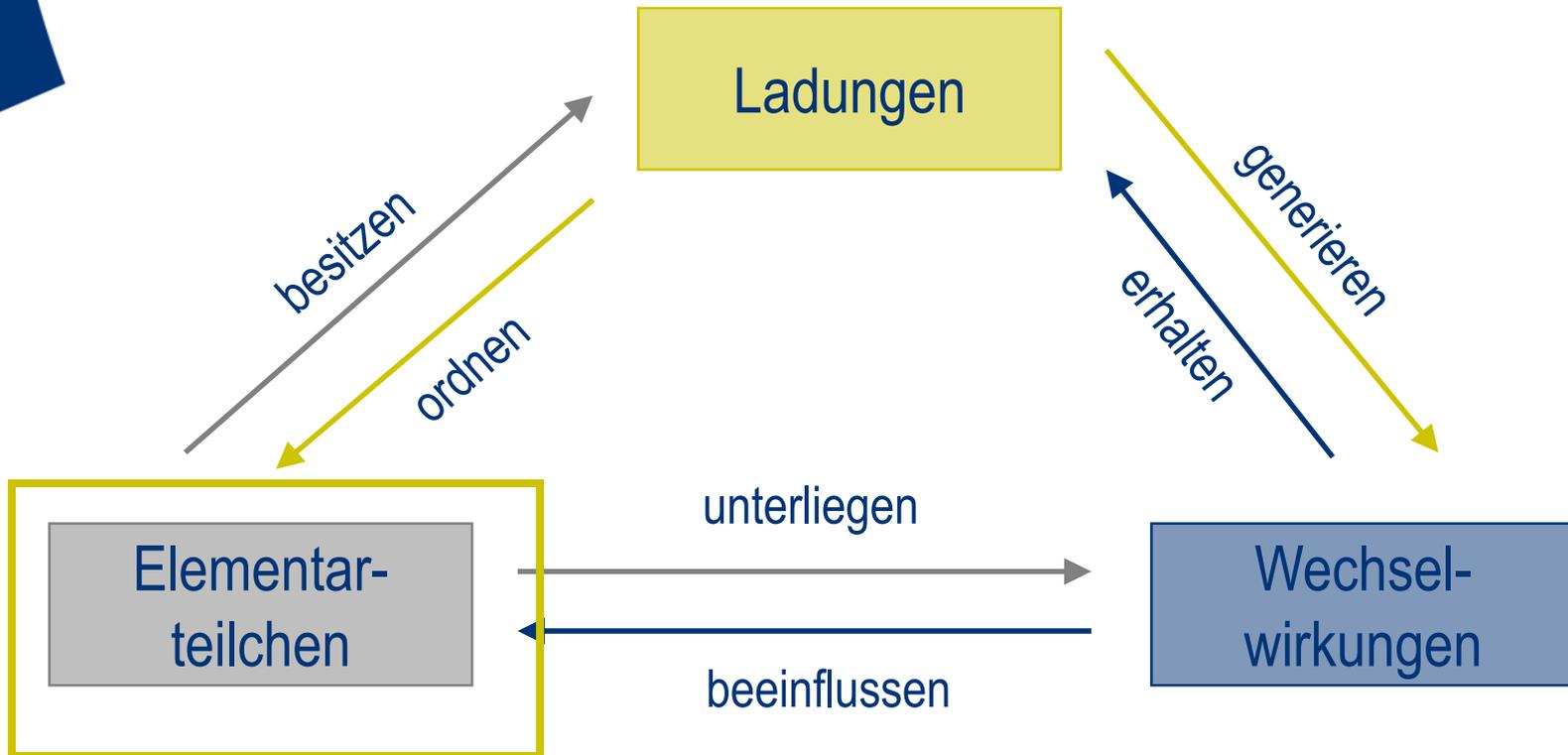
$$= (-ie)^2 \bar{u}(p') \gamma^\mu u(p) \frac{-ig_{\mu\nu}}{(p' - p)^2} \bar{u}(k') \gamma^\nu u(k)$$



$$\epsilon = \text{[Diagram 1]} = \text{[Diagram 2]} - \text{[Diagram 3]},$$



# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Ordnung der Elementarteilchen

- ▶ **Materieteilchen** der uns umgebenden Materie:  $u, d, e^-, \nu_e$
- ▶ 1936: Entdeckung des Myons  $\mu^-$  (Rabi: „who ordered that?“)
  - Gleiche Ladungszahlen wie das Elektron, aber  $\sim 200$  Mal schwerer
    - Schwere „Kopie“ des Elektrons
- ▶ 1961: Nachweis des Myon-Neutrinos  $\nu_\mu$
- ▶ 1961: Postulierung von Up-, Down- und Strange-Quarks
- ▶ 1964: Entdeckung des  $\Omega^-$  (sss)
- ▶ 1975: Entdeckung des Tauons: schwere „Kopie“ des Myons
- ▶ 1974-1994: weitere „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks
  - 1974: Charm
  - 1977: Bottom
  - 1994: Top
- ▶ 2000: Nachweis des Tauon-Neutrinos  $\nu_\tau$

# „Teilchenzoo“ oder Ordnung?

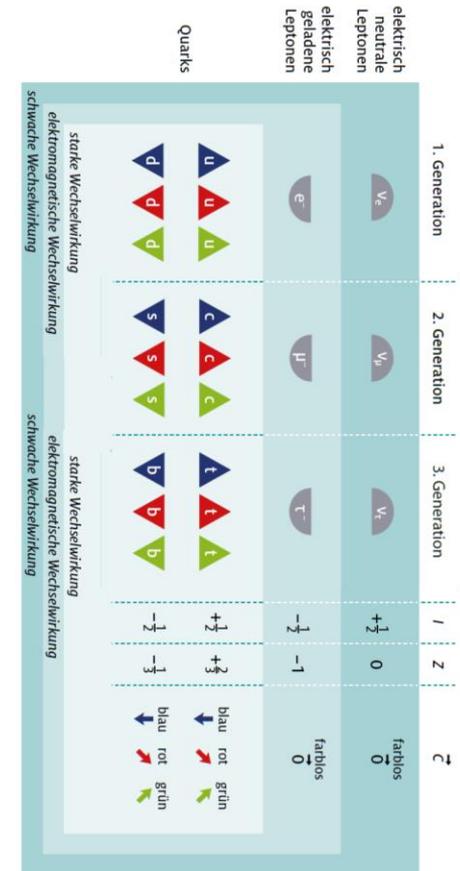
- ▶ Entdeckung weiterer Teilchen
- ▶ ausschließlich „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks sowie des Elektrons und des Elektron-Neutrinos
  - Von jedem der leichten Materieteilchen ( $u, d, e^-, \nu_e$ ) gibt es je zwei Kopien, die größere Massen besitzen.
- ▶ Wie lassen sich Teilchen ordnen?
- ▶ Gleiche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

# Anordnung von Teilchen in Generationen

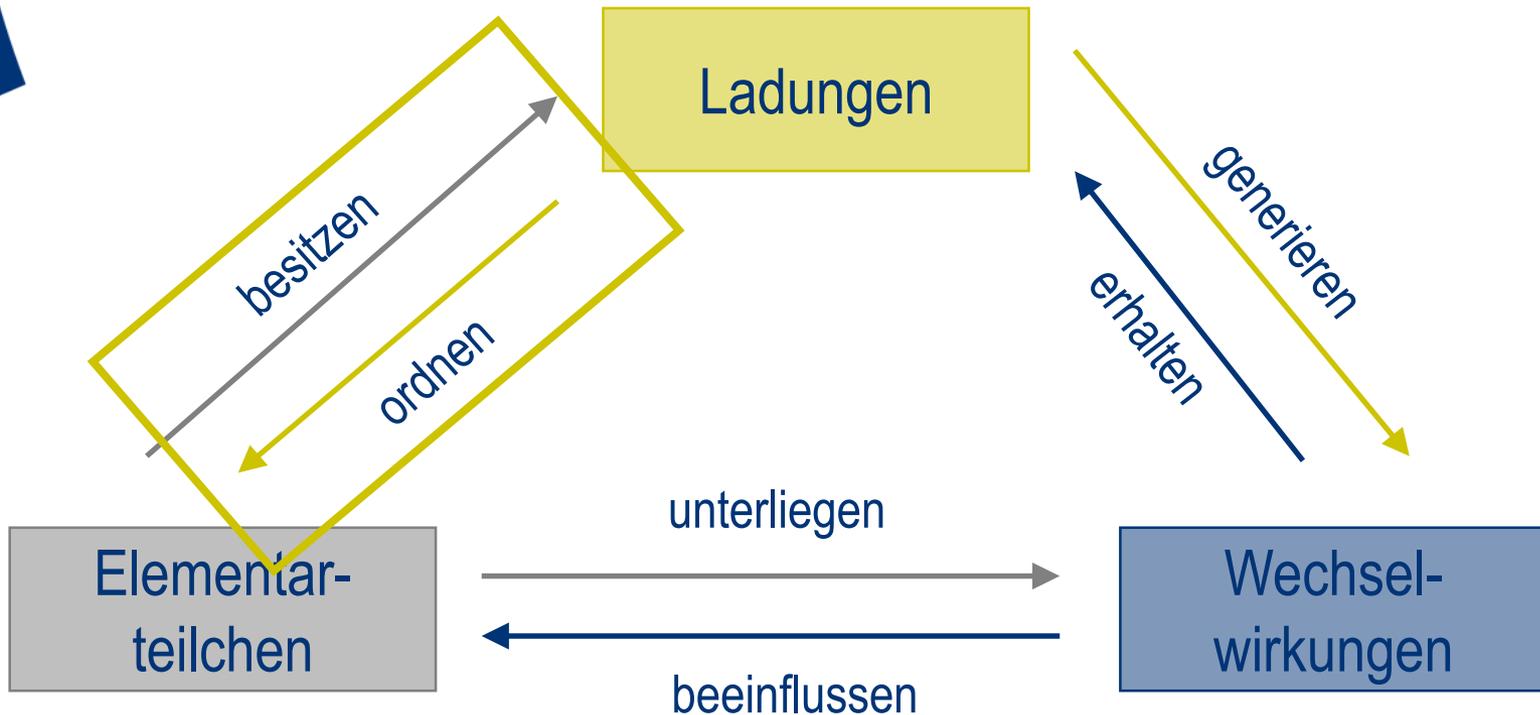
	1. Generation	2. Generation	3. Generation	I	Z	$\vec{C}$
elektrisch neutrale Leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$+\frac{1}{2}$	0	farblos $\vec{0}$
elektrisch geladene Leptonen	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	$-\frac{1}{2}$	-1	farblos $\vec{0}$
Quarks	$u$ $u$ $u$ $d$ $d$ $d$	$c$ $c$ $c$ $s$ $s$ $s$	$t$ $t$ $t$ $b$ $b$ $b$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	blau $\downarrow$ rot $\nearrow$ grün $\swarrow$
				$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	blau $\downarrow$ rot $\nearrow$ grün $\swarrow$
	starke Wechselwirkung		starke Wechselwirkung			
	elektromagnetische Wechselwirkung		elektromagnetische Wechselwirkung			
	schwache Wechselwirkung		schwache Wechselwirkung			

# Analogie zum Periodensystem

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



# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells

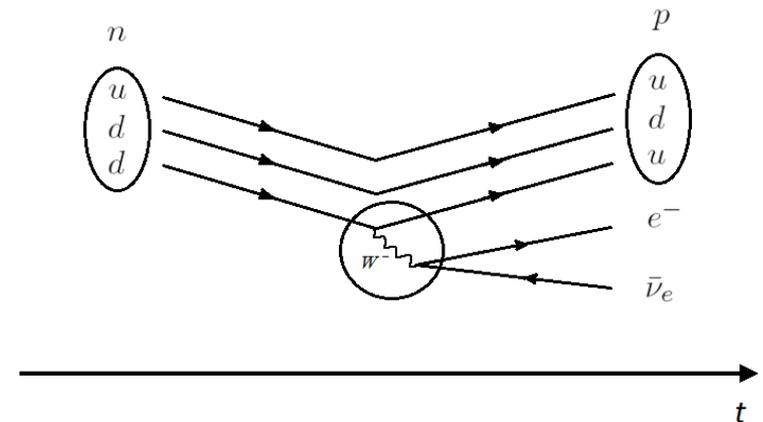


# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung

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

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



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung

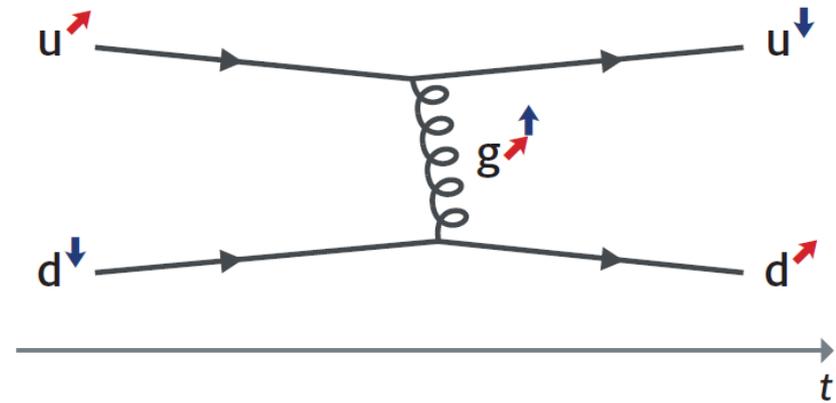
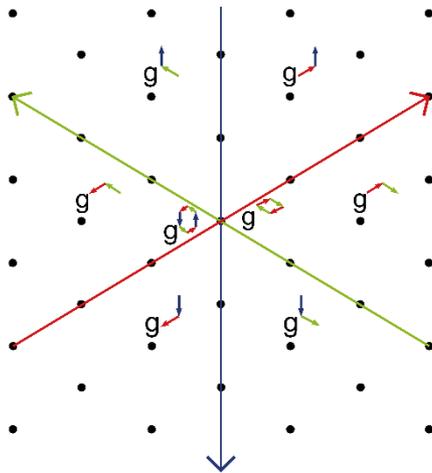
- Drei Up-Quarks mit Farbladungsvektoren  ,  , oder  haben alle schwache Ladungszahl  $I = +\frac{1}{2}$ , Down-Quarks hingegen  $I = -\frac{1}{2}$

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

# Erinnerung: Starke Wechselwirkung

▶  $F_S = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r^2} + k$

▶ Botenteilchen (Gluonen) besitzen selbst Ladung



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

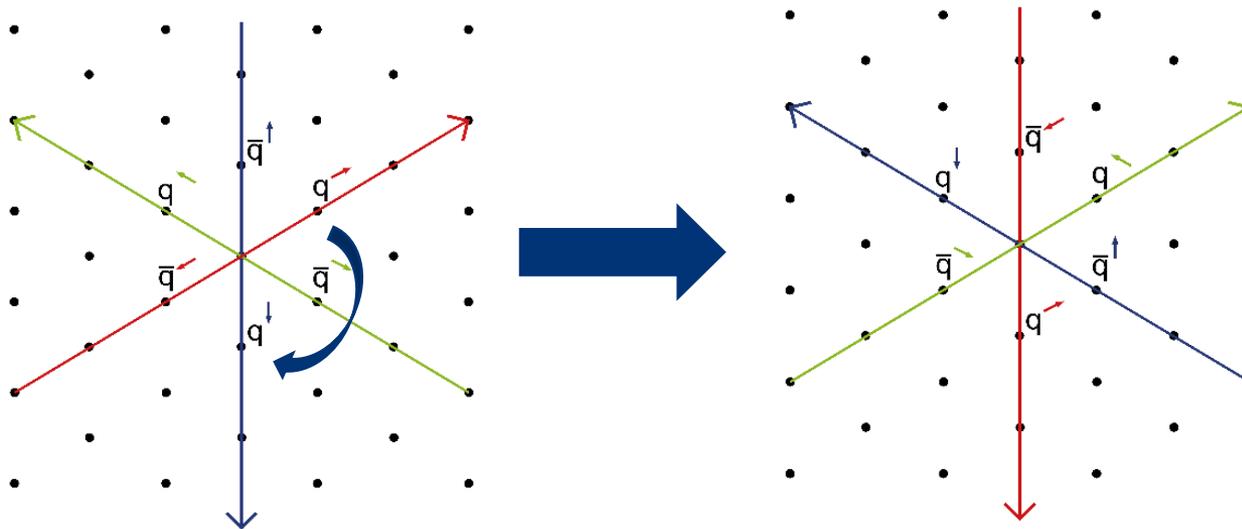
## ▶ Starke Wechselwirkung

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

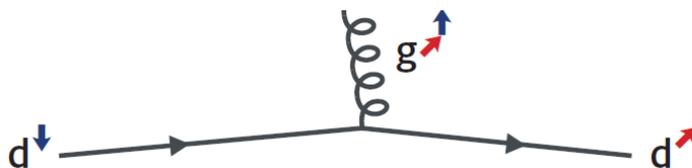
▶  $(u \rightarrow u \downarrow)$

# Umwandlung innerhalb Multipletts

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



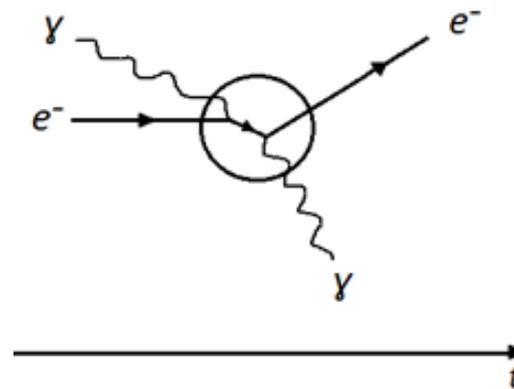
- ▶ hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Elektromagnetische Wechselwirkung

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





# Übung: Ordnungsschema des Standardmodells

- ▶ Multipletts der schwachen und der starken Wechselwirkung

1. Es ergibt sich folgende Lösung:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}: \quad & Z_{\nu_e} = 0 & |\Delta Z| = 1 \\ & Z_e = -1 & \\ & I_{\nu_e} = +\frac{1}{2} & |\Delta I| = 1 \\ & I_e = -\frac{1}{2} & \end{aligned}$$

a) Die Umwandlung ist durch Abstrahlung eines  $W^-$ -Teilchens mit  $Z_{W^-} = -1$  und  $I_{W^-} = -1$  möglich:  $e^- \rightarrow W^- + \nu_e$ .

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}: \quad & Z_u = +\frac{2}{3} & |\Delta Z| = 1 \\ & Z_d = -\frac{1}{3} & \\ & I_u = +\frac{1}{2} & |\Delta I| = 1 \\ & I_d = -\frac{1}{2} & \end{aligned}$$

Die Umwandlung ist durch Abstrahlung eines  $W^-$ -Teilchens mit  $Z_{W^-} = -1$  und  $I_{W^-} = -1$  möglich:  $d \rightarrow W^- + u$ .

2. Die Umwandlung von dem unteren Teilchen zum oberen Teilchen in der Gruppierung geschieht durch Abstrahlung eines  $W^-$ -Teilchens, einem Botenteilchen der **schwachen Wechselwirkung**.

Die umgekehrte Umwandlung geschieht, wenn das obere Teilchen ein  $W^+$ -Teilchen abstrahlt oder ein  $W^-$ -Teilchen absorbiert.

Man nennt diese Gruppierungen aus zwei Materieteilchen Dupletts (lat. duplex = doppelt) bezüglich der **schwachen** Ladung.

Die Teilchen innerhalb der Dupletts unterscheiden sich in ihrer schwachen und ihrer elektrischen Ladungszahl betragsmäßig jeweils um 1.

Dabei steht das Teilchen mit **positiver** schwacher Ladung oben.

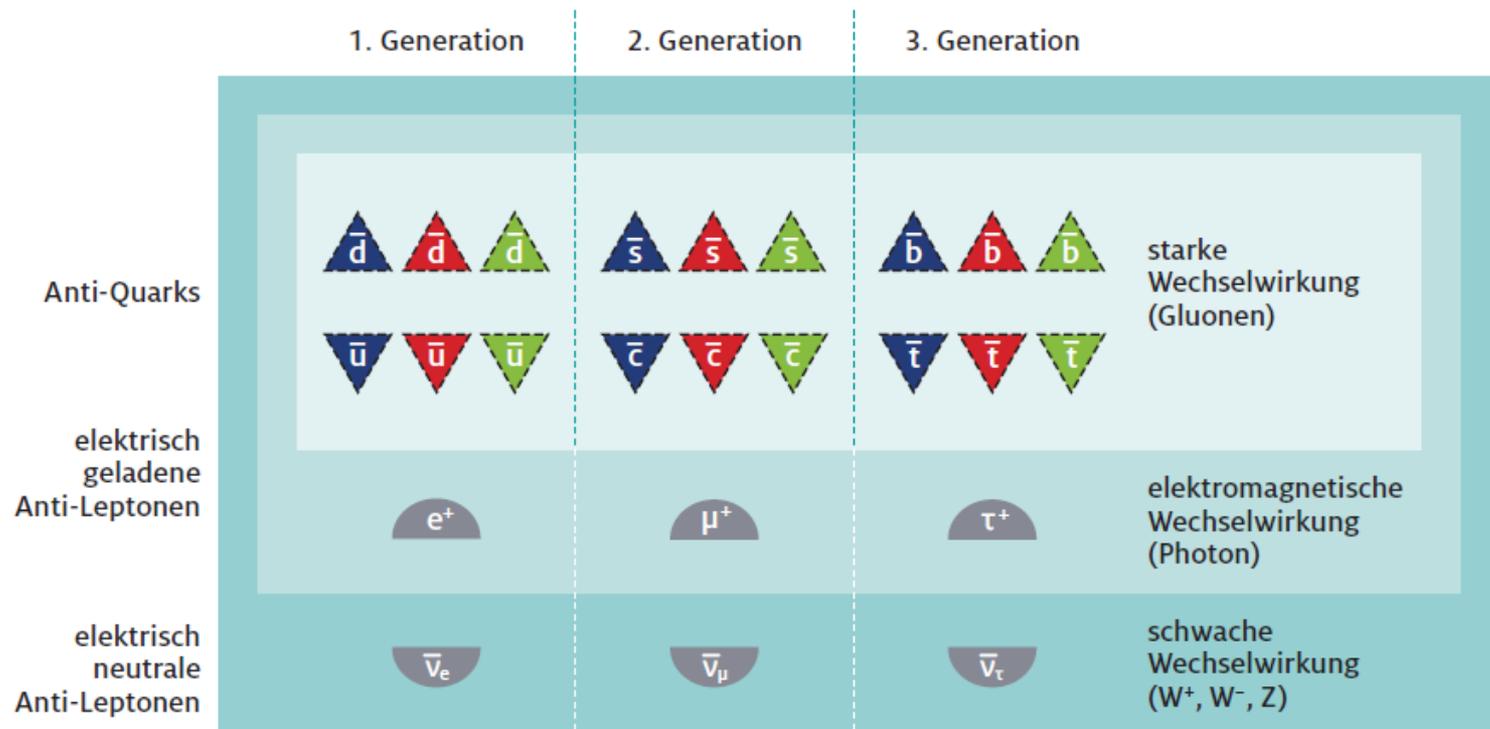
Nur über die **schwache** Wechselwirkung können Teilchen im selben Duplett ineinander umgewandelt werden.

# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

	1. Generation	2. Generation	3. Generation	I	Z	$\vec{C}$
elektrisch neutrale Leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$+\frac{1}{2}$	0	farblos $\vec{0}$
elektrisch geladene Leptonen	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	$-\frac{1}{2}$	-1	farblos $\vec{0}$
Quarks	$\begin{matrix} \triangleup u & \triangleup u & \triangleup u \\ \blacktriangledown d & \blacktriangledown d & \blacktriangledown d \end{matrix}$	$\begin{matrix} \triangleup c & \triangleup c & \triangleup c \\ \blacktriangledown s & \blacktriangledown s & \blacktriangledown s \end{matrix}$	$\begin{matrix} \triangleup t & \triangleup t & \triangleup t \\ \blacktriangledown b & \blacktriangledown b & \blacktriangledown b \end{matrix}$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	blau $\downarrow$ rot $\nearrow$ grün $\swarrow$
	$\begin{matrix} \triangleup u & \triangleup u & \triangleup u \\ \blacktriangledown d & \blacktriangledown d & \blacktriangledown d \end{matrix}$	$\begin{matrix} \triangleup c & \triangleup c & \triangleup c \\ \blacktriangledown s & \blacktriangledown s & \blacktriangledown s \end{matrix}$	$\begin{matrix} \triangleup t & \triangleup t & \triangleup t \\ \blacktriangledown b & \blacktriangledown b & \blacktriangledown b \end{matrix}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	blau $\downarrow$ rot $\nearrow$ grün $\swarrow$
	starke Wechselwirkung			starke Wechselwirkung		
	elektromagnetische Wechselwirkung			elektromagnetische Wechselwirkung		
	schwache Wechselwirkung			schwache Wechselwirkung		

# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

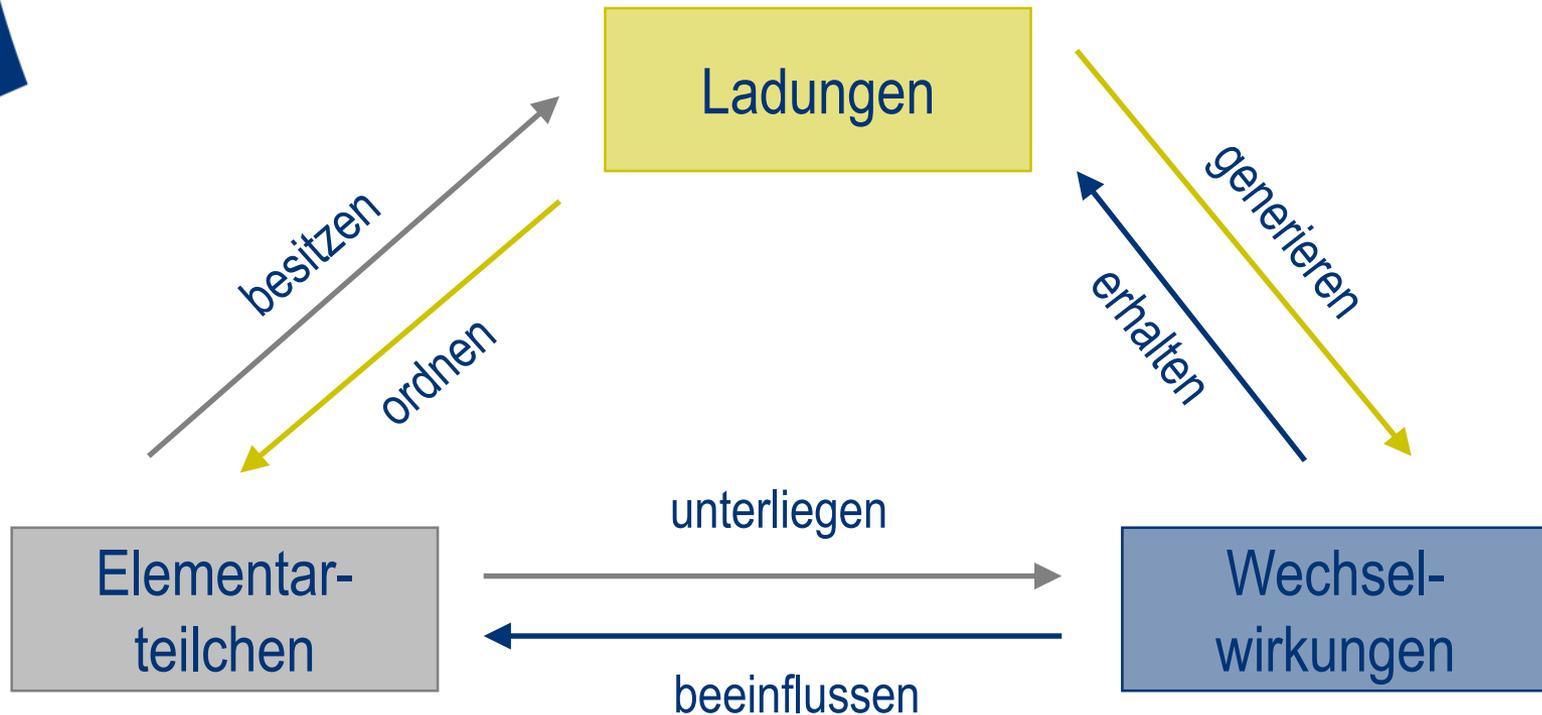
- ▶ Zu jedem Teilchen gibt es ein zugehöriges Anti-Teilchen, mit gleicher Masse jedoch entgegengesetzten Ladungen
- ▶ Anti-Materieteilchen ebenfalls in drei Generationen



# Zusammenfassung: Multipletts

- ▶ Teilchen lassen sich anhand ihrer Ladungen ordnen
- ▶ Die Zahl der Bosenteilchen werden aus den Symmetrien des Standardmodells vorhergesagt
- ▶ Für die Materieteilchen findet man experimentell
  - Dupletts der schwachen Wechselwirkung (nicht vorhersagbar!)
  - Tripletts der starken Wechselwirkung (nicht vorhersagbar!)
  - Singulett der elektromagnetischen Wechselwirkung (vorhersagbar)
- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich
  - (zuzüglich: hier nicht diskutierte Effekte der Zustandsmischung)

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Vielen Dank für Eure Aufmerksamkeit!

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

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



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



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Higgs Feld

## ► Symmetriebrechung

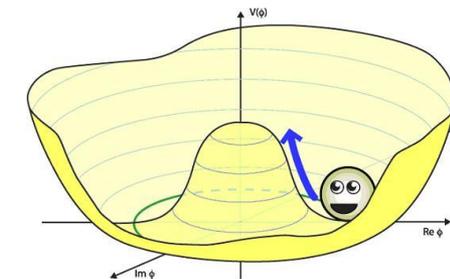
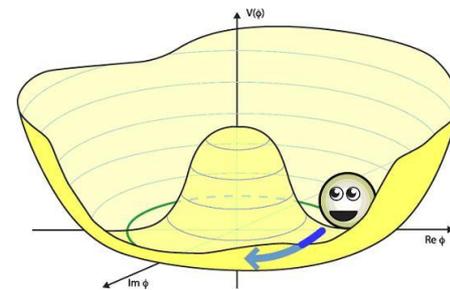
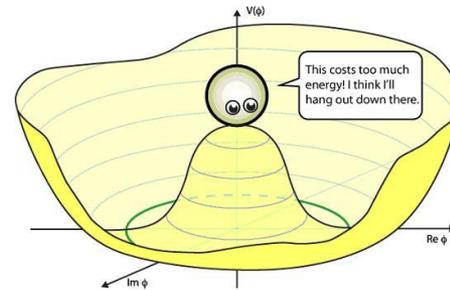
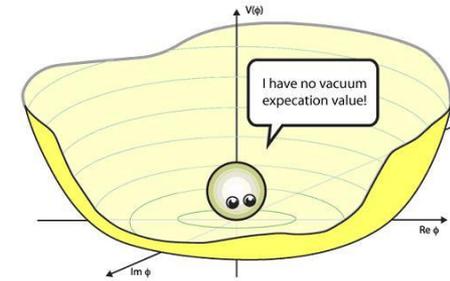
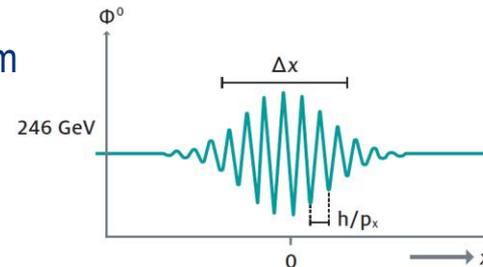
- Symmetrisches Potential  
Grundzustand symmetrisch
- Symmetrisches Potential  
Grundzustand nichtsymmetrisch

## ► Klassisch analog Dielektrikum : Abschirmung der Feldlinien

- Abschirmung „schwacher Felder“  
durch BEHiggs-Hintergrundfeld  
= unendlicher See schwacher Ladung
- Abschirmendes Feld  
Duplett in schw. Ladung  
Komponente  $v = 246$  GeV im Vakuum
- Anregung = Higgs-Teilchen

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

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

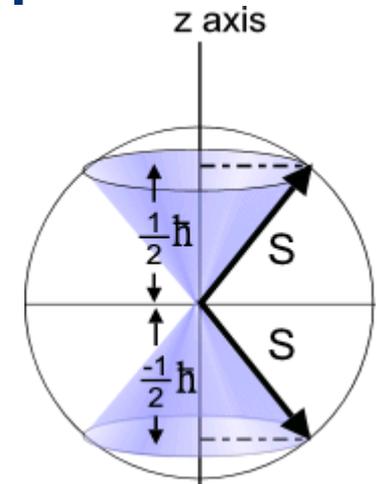


# Diskussion / Fragen



# Exkurs: warum schwache „Isospin“-Ladung?

- ▶ Zugrundeliegende Symmetrie genau dieselbe wie bei Spin
- ▶ Jeweils Vektor mit 3 Komponenten
  - Spin  $\mathcal{S} = (S_x, S_y, S_z)$  im Ortsraum
  - Schwacher Isospin  $\mathbf{I}^W = (I_1^W, I_2^W, I_3^W)$  im abstrakten schwachen Isospinraum
- ▶ Messbar bei beiden nur:
  - Gesamter Betrag und eine Komponente (meist gewählt: die 3.)
  - die beiden anderen Komponenten sind „unscharf“ (Heisenberg)
- ▶ Wir sprechen daher nur von schwacher Ladungszahl  $I := I_3^W$
- ▶ Ordnung in Multipletts von  $I := I_3^W$



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

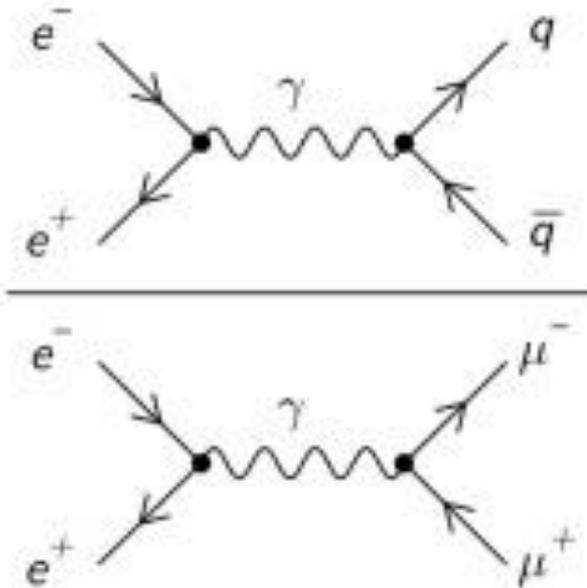
$$\begin{pmatrix} I_3^W \\ +\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} : \left( \begin{matrix} \nu_e \\ e^- \end{matrix} \right), \left( \begin{matrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{matrix} \right), \dots, \left( \begin{matrix} u \\ d \end{matrix} \right), \dots, \left( \begin{matrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{matrix}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

# Anzahl der Farben

- ▶ Idee: Messung des Verhältnisses von  $qq$  zu  $\mu^+ \mu^-$

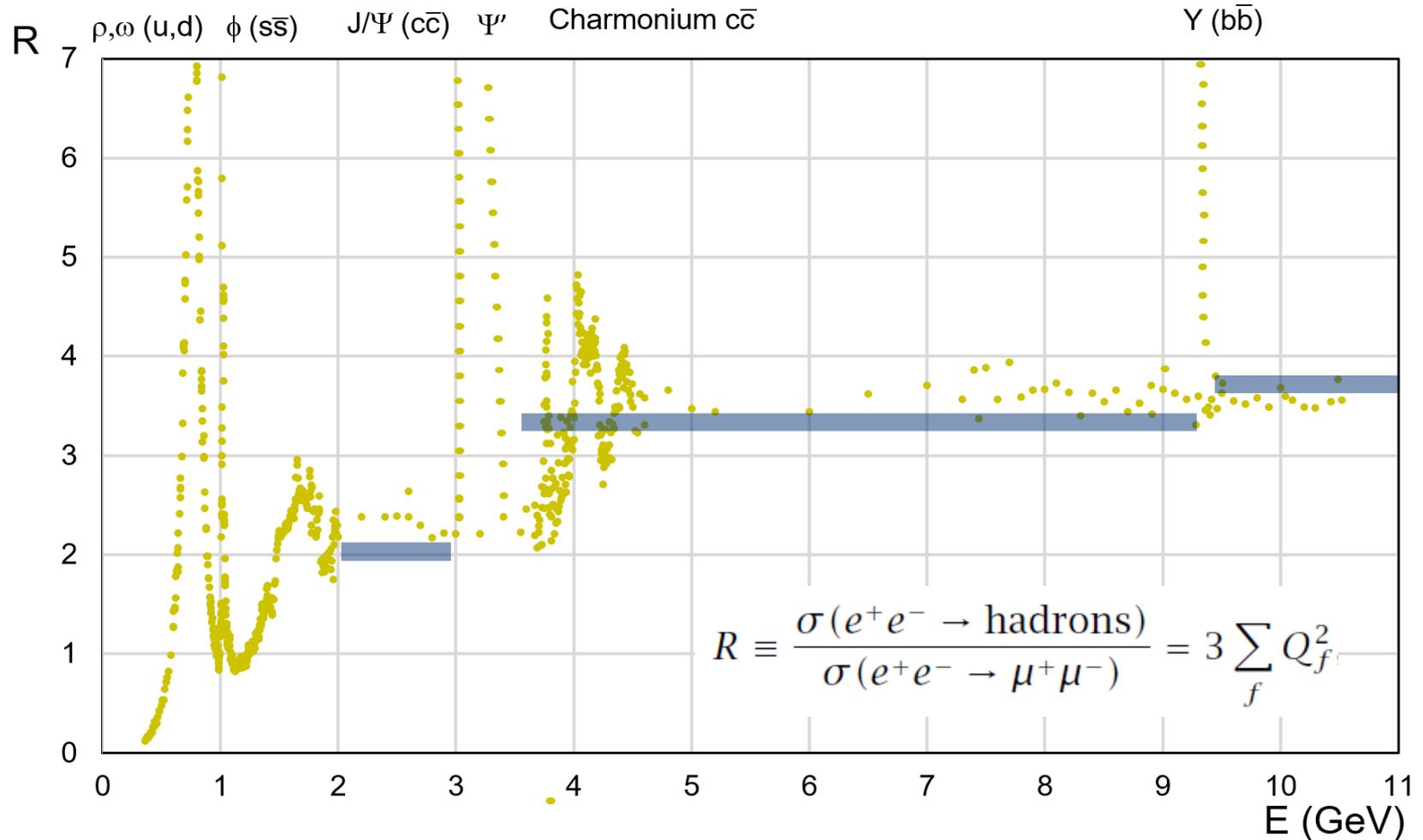
$$R = \frac{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+)}$$

$\approx$



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

# Anzahl der Farben



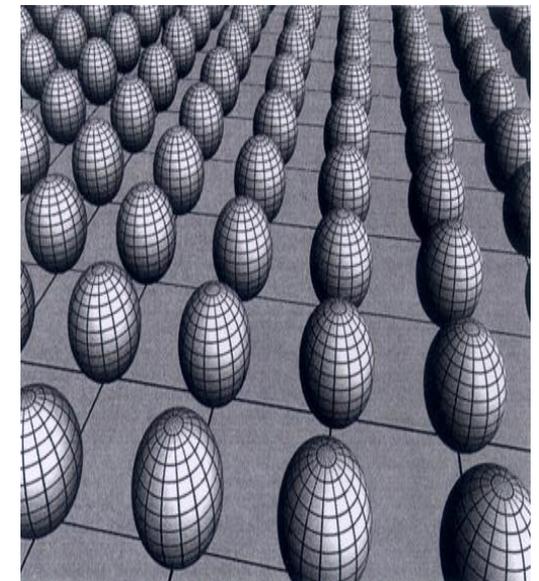
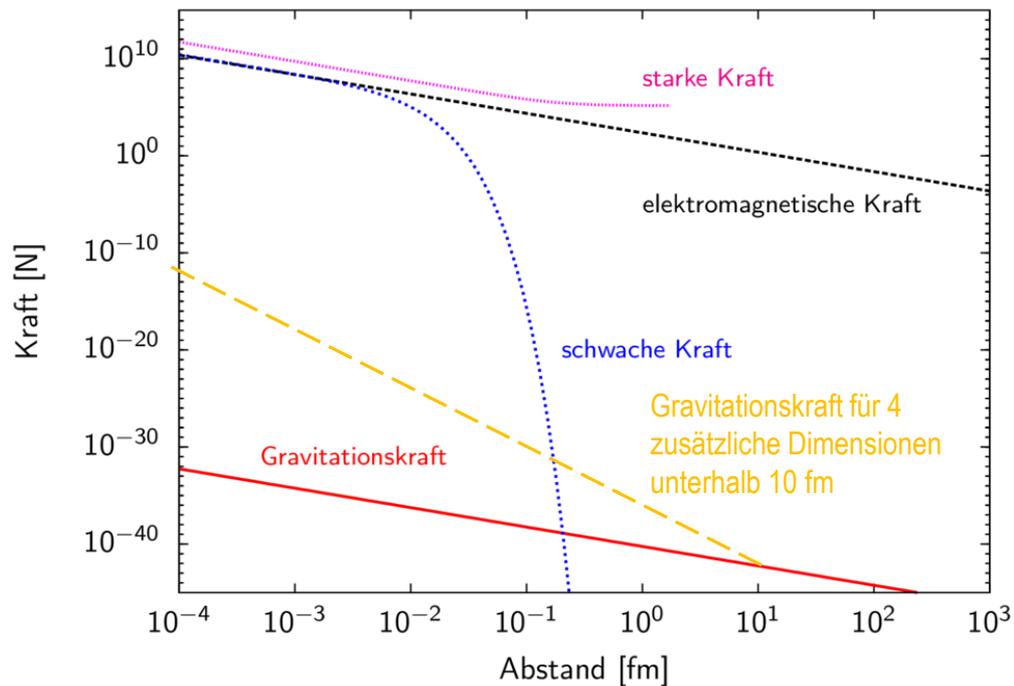
# Einschub:

- ▶ Alle Kraftgesetze beinhalten den Abstand  $r$ 
  - Bei kleinen Abständen  $F \sim 1/r^2$
- ▶ Reichweiten sind Konsequenzen dieser Kraftgesetze
  - Unendlich: im Alltag spürbar
  - Endlich: nur subatomar
- ▶ Reihenfolge der Stärken
  - Kann für Kräfte nicht definiert werden wegen  $F(r)$
  - Kann nur für Wechselwirkungen definiert werden:  $\alpha$  !
- ▶ Stärken aller **Wechselwirkungen sehr** ähnlich (außer für Gravitation)

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

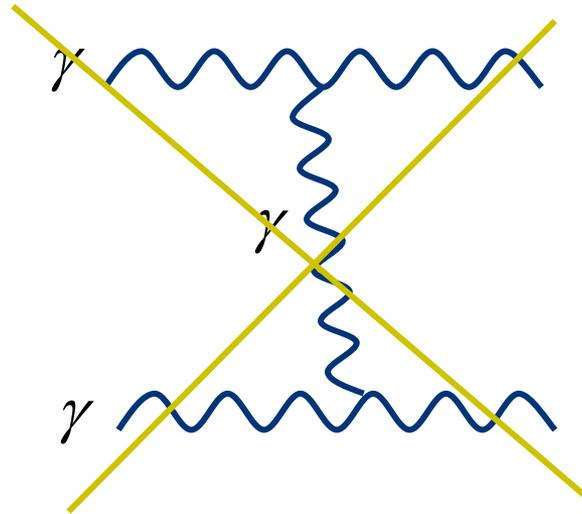
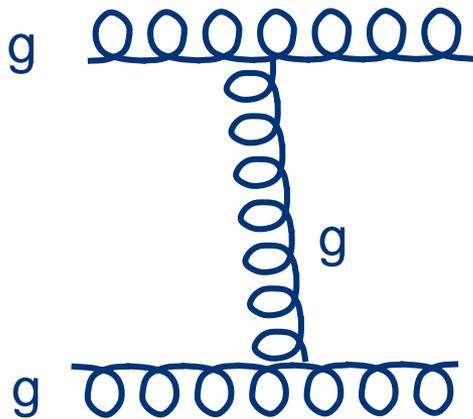
# Spekulationen

- ▶ Zusätzliche Dimensionen für Gravitation könnten die Kräfte „vereinigen“



# Glukon Selbstwechselwirkung

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



# Bisher ignoriert: Zustandsmischung

- ▶ Makroskopisch messbare Teilchen: immer **Massen-Eigenzustände**
- ▶ Wechselwirkungen: immer **Ladungs-Eigenzustände**
- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Ladungs-Dupletts möglich
  - Die Multipletts sind daher \*nur\* für **Ladungs-Eigenzustände** definiert
- ▶ Konsequenz des BEHiggs Feldes:
  - die Masseneigenzustände von Quarks sind nicht identisch mit den schwachen Ladungs-Eigenzuständen, sondern eine Mischung aus diesen!
  - → Masseneigenzustände haben i.a. keine definierte schwache Ladung
  - → Schwache Ladungs-Eigenzustände haben i.a. keine definierte Masse

$$\begin{array}{c} \text{Schwache Ladungs-} \\ \text{Eigenzustände} \end{array} \begin{array}{c} \nearrow \\ \left( \begin{array}{c} d' \\ s' \\ b' \end{array} \right) \end{array} = \begin{array}{c} \text{Cabibbo-} \\ \text{Kobayashi-} \\ \text{Maskawa Matrix} \\ \text{(CKM Matrix)} \end{array} \begin{array}{c} \left( \begin{array}{c} d \\ s \\ b \end{array} \right) \\ \nwarrow \\ \text{Massen} \\ \text{Eigenzustände} \end{array}$$

Also: Ladungs-Multipletts eigentlich  $\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$

# Zustandsmischung

- ▶ Die Quadrate der Elemente  $V_{qq'}$  der unitären CKM Matrix bestimmen die Wahrscheinlichkeit der Umwandlungen.

z.B.  $s \rightarrow u + W^-$  wird möglich wegen des  $|d'\rangle$ -Anteils in  $|s\rangle$

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

$$\begin{aligned} \text{also } |s'\rangle &= V_{cd}|d\rangle + V_{cs}|s\rangle + V_{cb}|b\rangle \\ |s\rangle &= V_{us}^*|d'\rangle + V_{cs}^*|s'\rangle + V_{ts}^*|b'\rangle \end{aligned}$$

- ▶ Die Mischungen der Quarks in der schwachen Wechselwirkung sind eher klein, d.h. die Mischungsmatrix ist „fast“ die Einheitsmatrix)

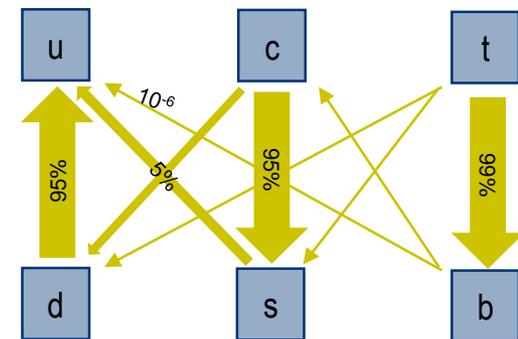
$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0,975} & 0,225 & 0,003 \\ 0,225 & \mathbf{0,974} & 0,041 \\ 0,009 & 0,040 & \mathbf{0,999} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}$$

Schwache Ladungs-Eigenzustände

Massen Eigenzustände

# Quark-Umwandlungen

- ▶ Beispiel: Wandelt sich ein c-Quark in einem schwachen Prozess um, entsteht daraus **immer** ein s' Ladungs-Eigenzustand, den man mit Wahrscheinlichkeit  $|V_{cd}|^2=0,05$  aber als ein d-Quark Masse-EZ beobachtet
- ▶ Die Mischungsmatrix ist fast diagonal
  - Jeweils schwerere Massen-EZ (d,c,t) wandeln sich >95% innerhalb derselben Teilchen-Generation um
  - Für s- und b-Quarks sind nur Umwandlungen in die leichteren Generationen möglich, unterdrückt um Faktoren 40 ( $s \rightarrow u$ ), 600 ( $b \rightarrow c$ ) und 100.000 ( $b \rightarrow u$ ), ihre Lebensdauern sind entsprechend verlängert
  - Der Term  $|V_{ud}|^2=0,95$  verlängert z.B. die Lebensdauern von freien Neutronen und elektr. geladenen Pionen um 5%



# Zustandsmischung

- ▶ **Die Mischungen der Quarks** in der schwachen Wechselwirkung **sind eher klein**
  - Größte Wahrscheinlichkeit für Umwandlung „innerhalb“ des jeweiligen Multipletts
- ▶ **Die Mischungen der Neutrinos** in der schwachen Wechselwirkung **sind dagegen fast maximal**
  - Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-(PMNS)-Matrix
  - → Möglichkeit der „Neutrino Flavor-Oszillation“  $\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$

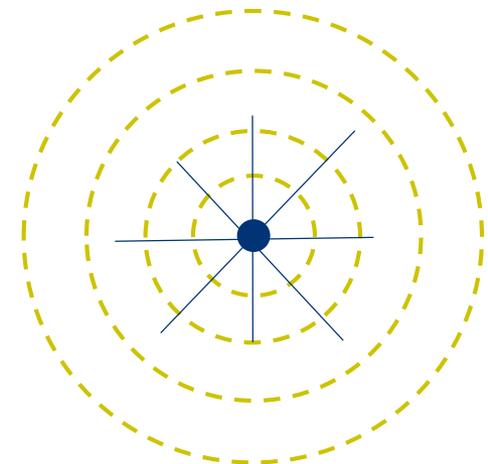
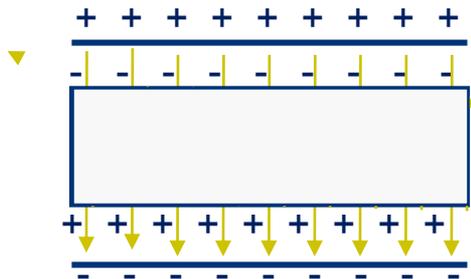
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,82 & 0,55 & -0,15 \\ -0,33 & 0,60 & 0,73 \\ 0,46 & -0,58 & 0,67 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Schwache Ladungs-Eigenzustände

Massen Eigenzustände

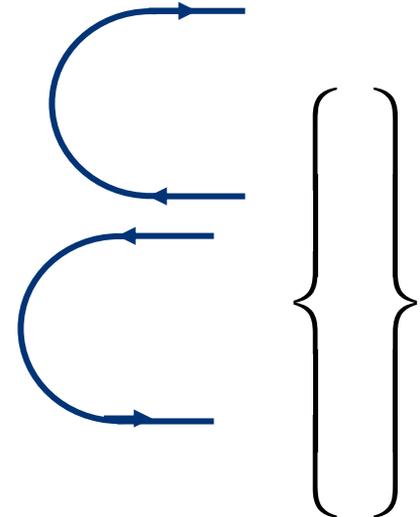
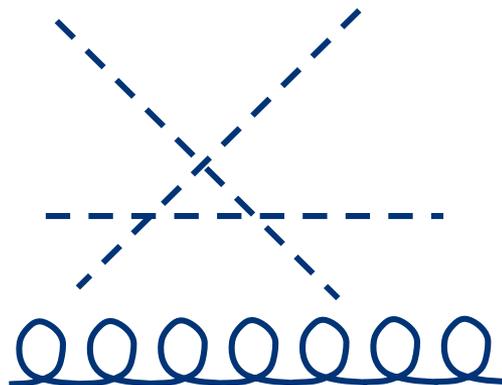
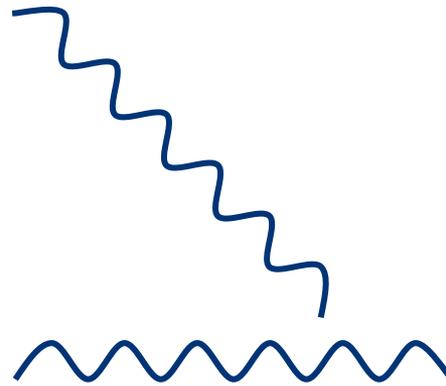
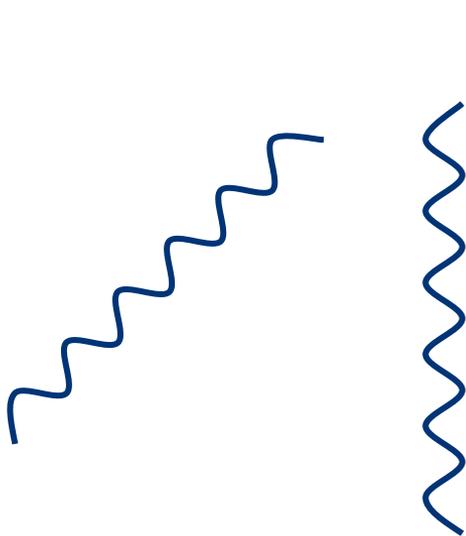
# Schwache Wechselwirkung

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



# Feynman Diagramm Tool kit

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



# Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“

