

# Teilchenphysik

Was wir heute wissen

Philipp Lindenau  
TU Dresden | 20.03.2019

Herzlich willkommen!



NETZWERK  
TEILCHENWELT



# Inhalte dieses Vortrags

1. Einführung: Warum Teilchenphysik?
2. Theoretisches: Wie Physiker sich die Welt vorstellen
3. Suche nach dem Higgs-Teilchen: Zutaten um selbst als Forscher aktiv zu werden



# Teil 1: Einführung

- ▶ Warum Teilchenphysik?

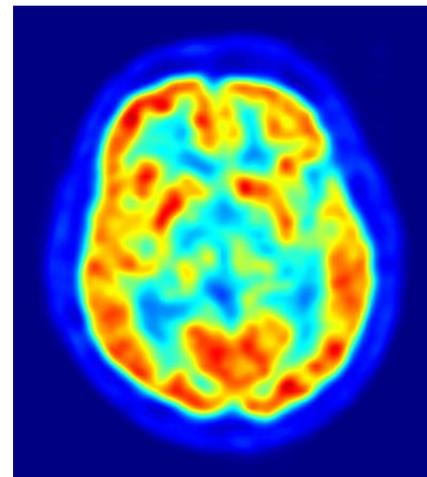
# Warum Teilchenphysik?

- ▶ Interesse und Neugier!
- ▶ Erkenntnisgewinn über Geschichte, Funktionsweise und Aufbau des Universums
- ▶ Anwendungen:

World Wide Web

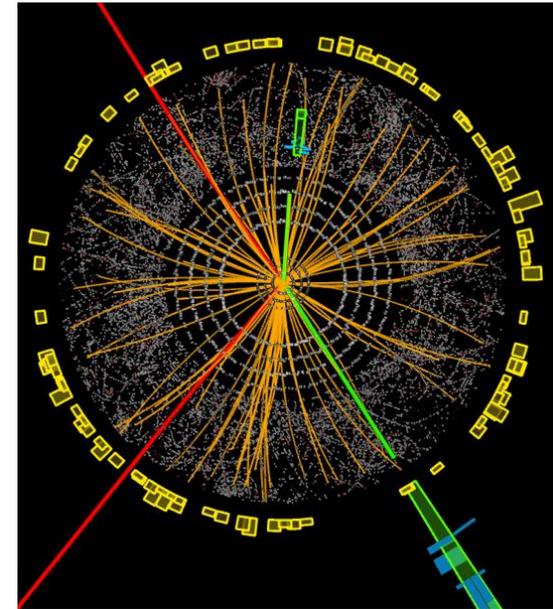
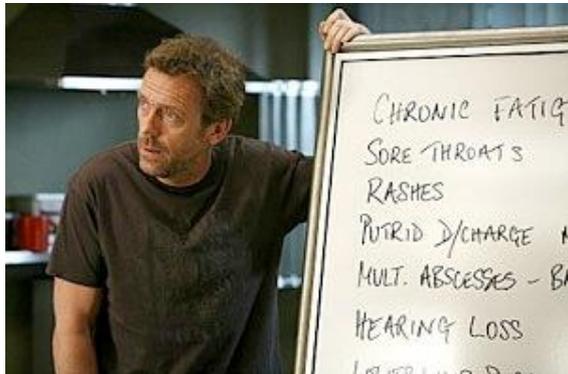


Medizin



# Wie forschen Teilchenphysiker?

- ▶ Medizin: Krankheitserreger verursachen beobachtbare Symptome
- ▶ Teilchenphysik: Interaktion von Teilchen nicht direkt beobachtbar, nur sog. Endzustände



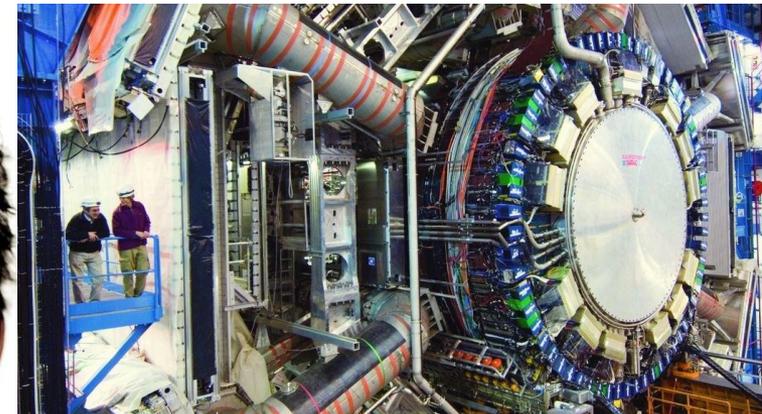
# Wie forschen Teilchenphysiker?

- ▶ Medizin: teure, hochkomplexe Maschinen
- ▶ Teilchenphysik: teure, hochkomplexe Maschinen

\$1.5 Millionen

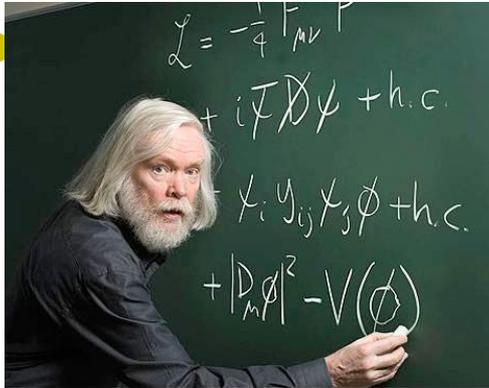


\$450 Millionen



# Konkret in der Teilchenphysik

## Theorie



der Teilchenphysik

über:

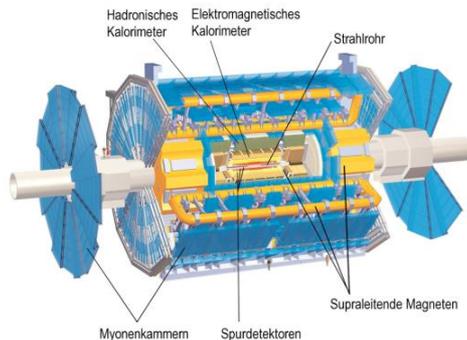
Wechselwirkungen

der Wechselwirkungen

▶ z.B. ATLAS u. CMS am LHC

## Experiment

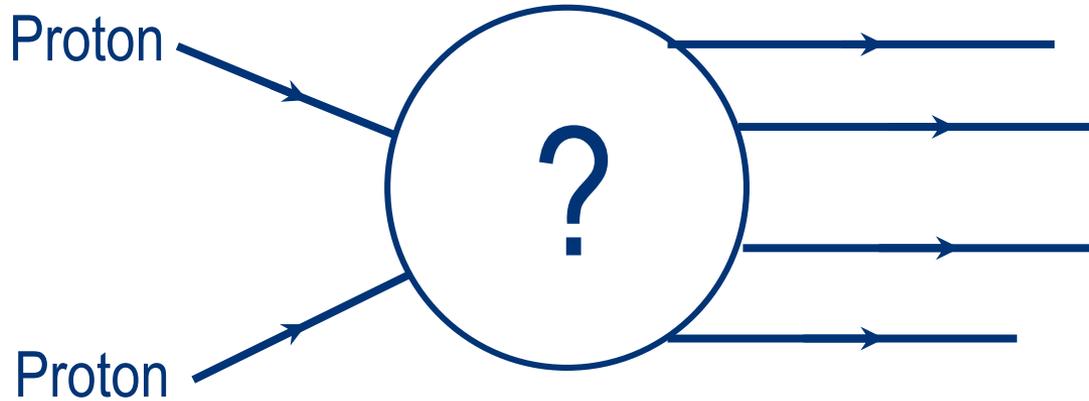
überprüfen, ob die Vorhersagen der Theorie stimmen



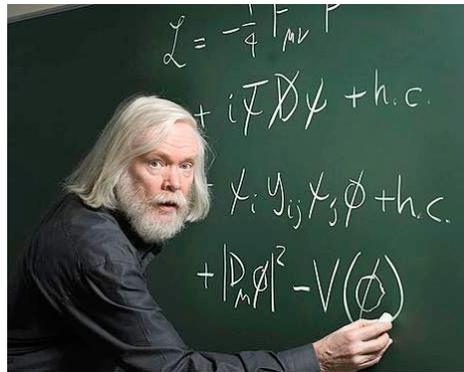
Teilchenkollisionen

erhaltenen Daten mit den Vorhersagen der Theorie

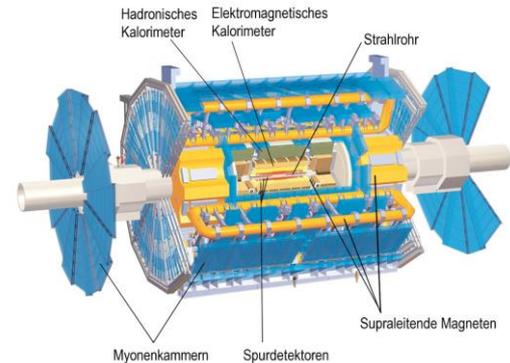
# Wie forschen Teilchenphysiker?



Beschleuniger



Theorie



Detektor

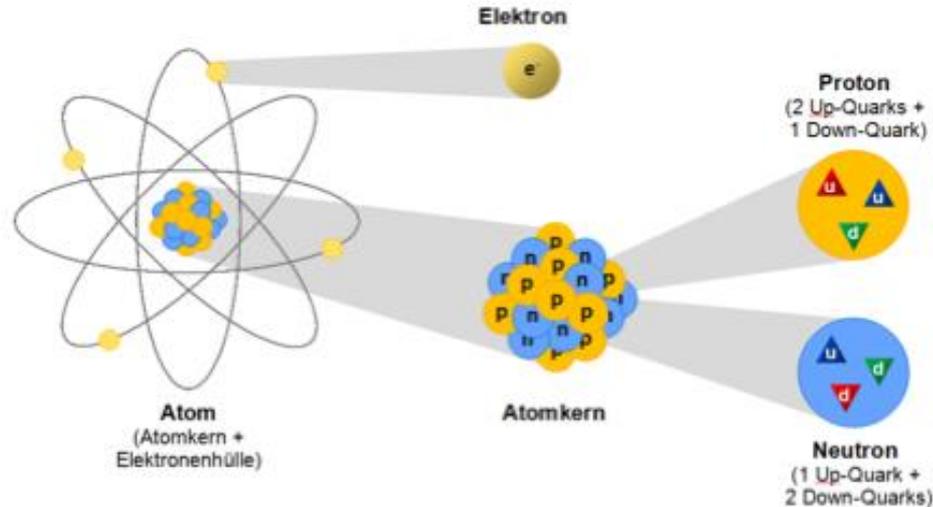


## Teil 2: Theoretisches

- ▶ Wie Physiker sich die Welt vorstellen –
- ▶ Das Standardmodell der Teilchenphysik

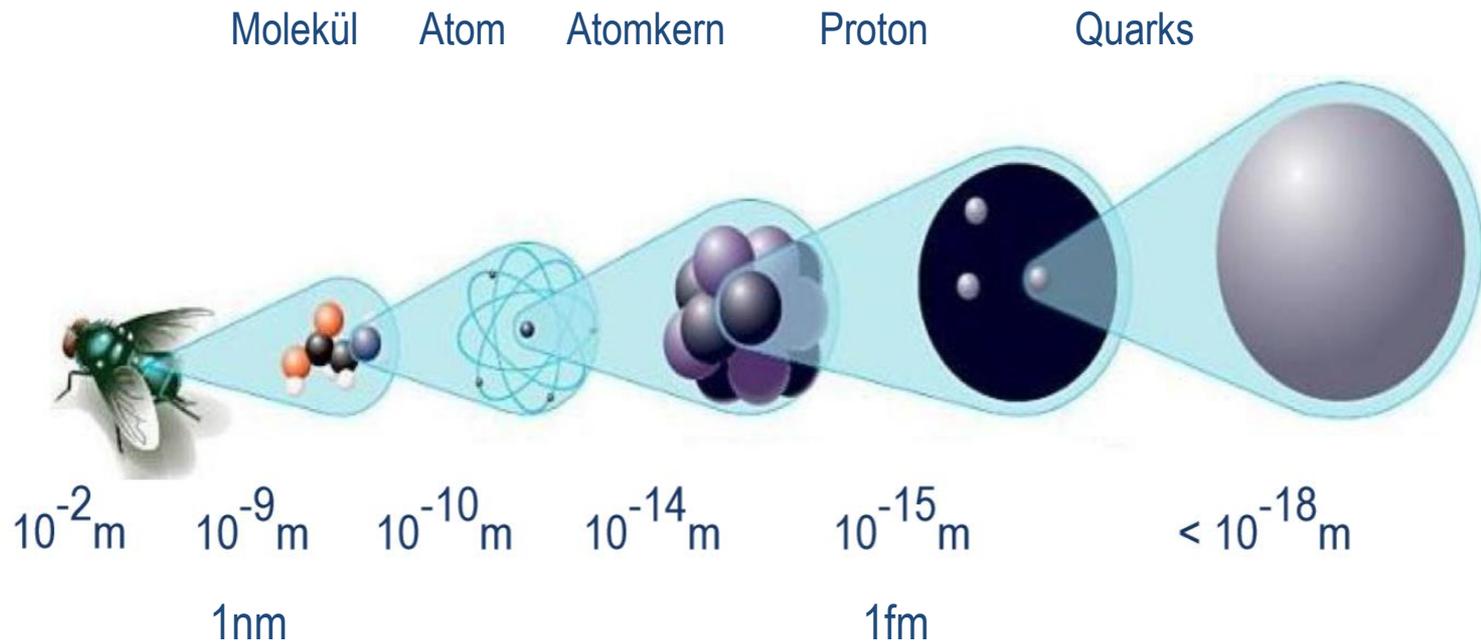
# Woraus besteht die Welt?

- ▶ Alle Materie besteht letztlich aus **Elementarteilchen** – das sind Teilchen, die nicht aus noch kleineren Teilchen bestehen



- ▶ Die stabile Materie in unserem Universum besteht aus Elektronen, Up- und Down-Quarks

# Größenordnungen in der Physik



# Elektronenvolt

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

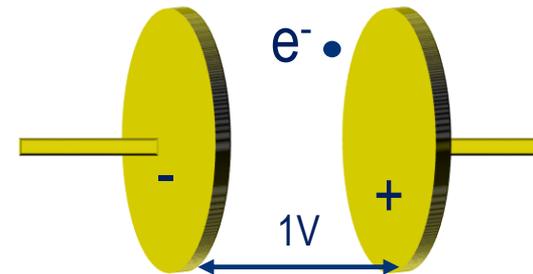
▶  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$

$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$

$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

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

- $c$ : Lichtgeschwindigkeit
- Proton: ca  $1 \text{ GeV}/c^2$



# Elektrische Ladung und Ladungszahl

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische Ladung      Elektrische Ladungszahl      Elementarladung

Bsp.: Elektron

$$Q_{\text{Elektron}} = (-1) \cdot e$$

Beschränkung auf elektrische Ladungszahl  $Z$   
als charakteristische Teilcheneigenschaft

# 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 Äquivalenz von Masse und Energie ( $E = mc^2$ ) durch A. Einstein

# Vereinheitlichungen

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

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

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



**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**

# Fundamentale Wechselwirkungen

Gravitation



Elektro-  
magnetische  
Wechselwirkung

Warum „halten“ die Protonen im Atomkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen?

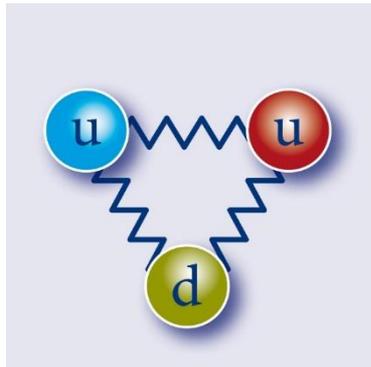
# Fundamentale Wechselwirkungen

Gravitation



Elektro-  
magnetische  
Wechselwirkung

Starke  
Wechselwirkung



Warum scheint die Sonne schon  
seit über vier Milliarden Jahren?  
Umwandlung:  $p \rightarrow n$

# Was ist Teilchenphysik?

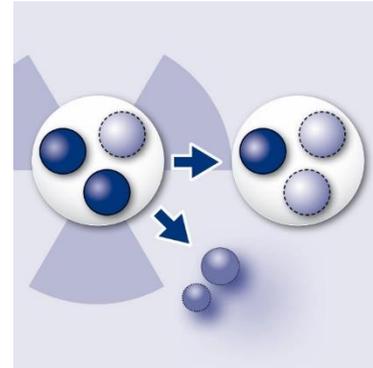
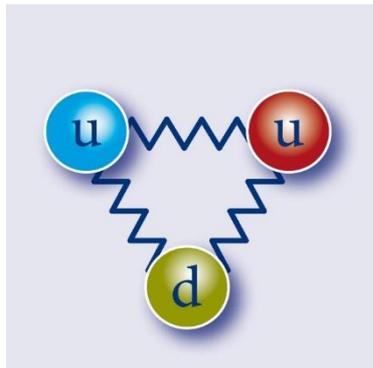
- ▶ Lehre von den **Wechselwirkungen** zwischen den fundamentalen Bausteinen der Natur.

Gravitation



Elektro-  
magnetische  
Wechselwirkung

Starke  
Wechselwirkung



Schwache WW

# Fundamentale Wechselwirkungen

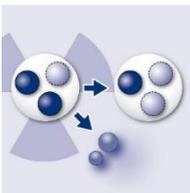
- ▶ diese vier fundamentalen Wechselwirkungen erklären alle physikalischen Phänomene



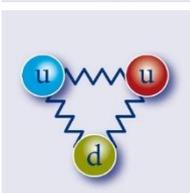
Planetenbewegung, Fallgesetze



Elektromagnetische Wellen, Zusammenhalt von Atomen, Chemie, Magnetismus



Teilchenumwandlungen (z.B.  $\beta$ -Umwandlung, Kernfusion), Wechselwirkung von Neutrinos mit Materie



Anziehung zwischen Quarks, Zusammenhalt von Atomkernen

# Ab jetzt: Vernachlässigung der Gravitation

- ▶ Teilchenphysik → sehr kleine Abstände
- ▶ dort Gravitation **sehr viel schwächer** als die anderen drei fundamentalen Wechselwirkungen



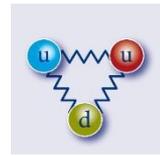
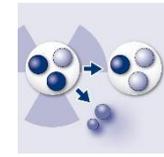
**Die Gravitation ist nicht Teil des Standardmodells der Teilchenphysik!**

# Fundamentale Wechselwirkungen

- ▶ lassen sich auf sehr ähnliche Prinzipien zurückführen und mathematisch beschreiben!
- ▶ Coulombsches Gesetz:

$$F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$$

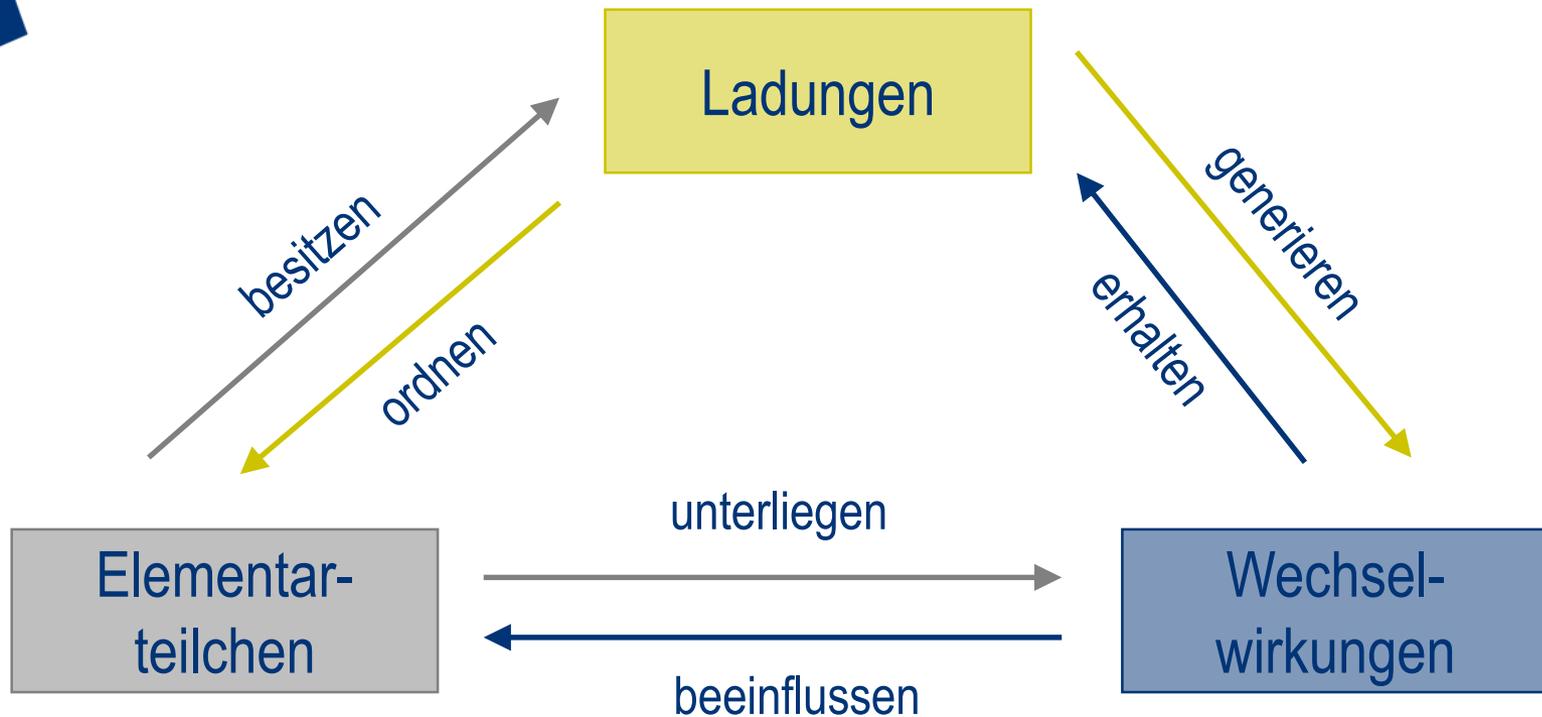
Elektrische Ladungszahl ist wesentliche Größe der elektromagnetischen Wechselwirkung



# Erweiterung des Ladungsbegriffs

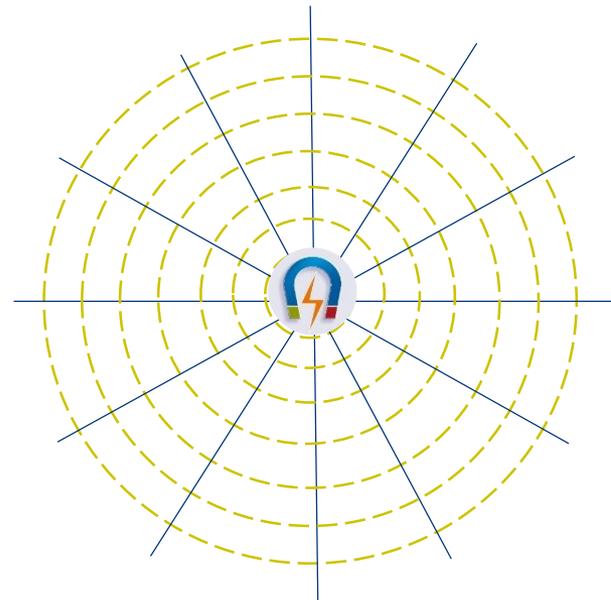
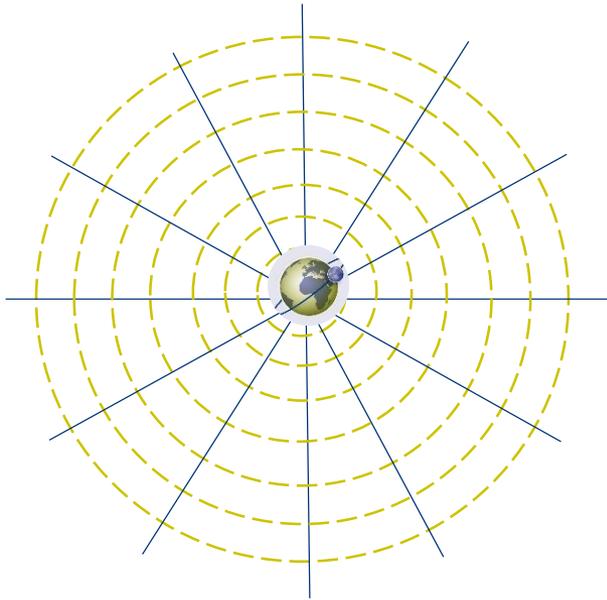
- ▶ Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Bekannt:
  - Elektrische Ladung (Ladungszahl  $Z$ )
- ▶ Neu:
  - Schwache Ladung (Ladungszahl  $I$ )
  - Starke (Farb-)Ladung --> Rot, Grün, Blau
- ▶ Ladungszahlen und Farbladung sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ An den fundamentalen WW nehmen nur Teilchen teil, die die Ladung der entsprechenden WW besitzen
- ▶ Ladungen sind **Erhaltungsgrößen**

# Die drei Grundpfeiler des Standardmodells



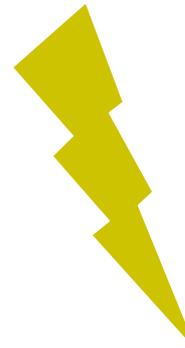
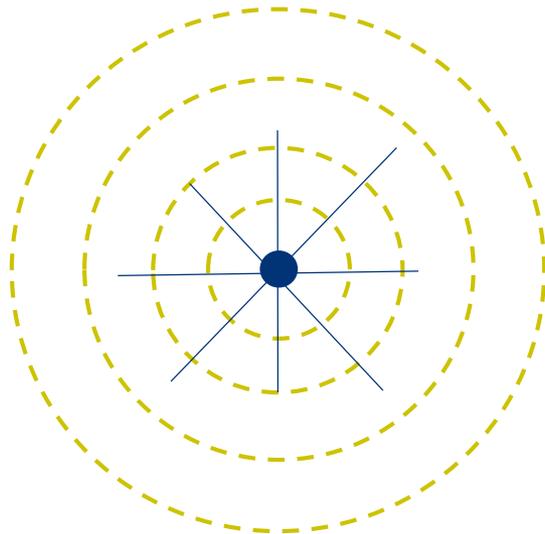
# Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ Nur 2 der 4 fundamentalen Wechselwirkungen besitzen eine unendliche Reichweite:
  - Gravitation und elektromagnetische Wechselwirkungen



# Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen

- ▶ Reichweiten der starken und der schwachen Wechselwirkung sind auf subnukleare Abstände beschränkt
- ▶ Wie müsste ein zugehöriges Feldlinienbild aussehen?

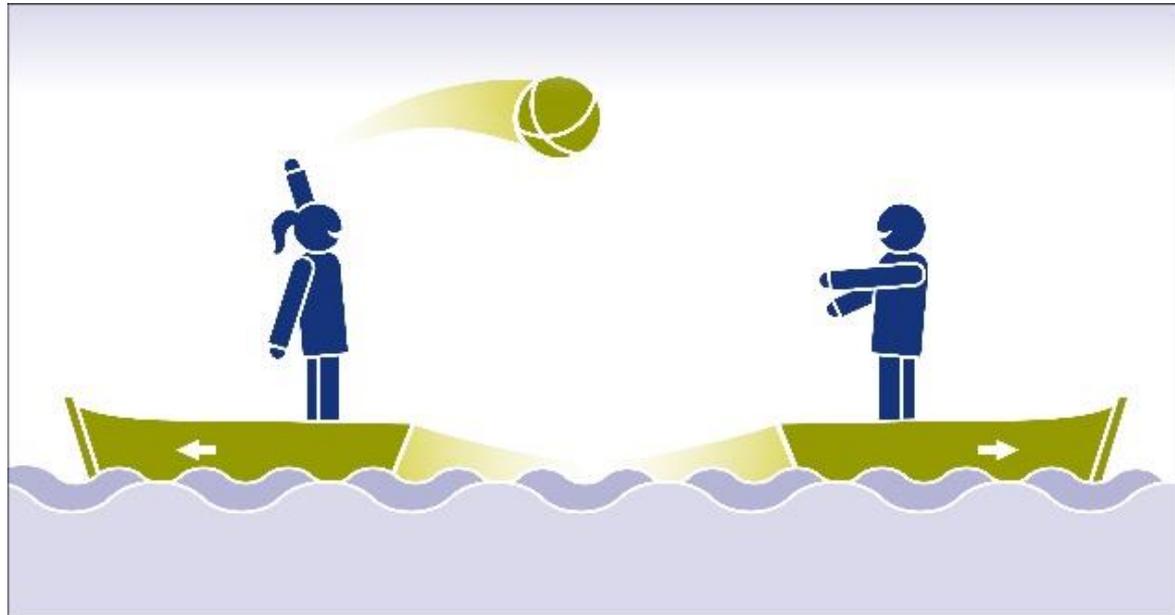


Widerspruch zum  
Feldlinienmodell



Neues Modell notwendig!

# Botenteilchen als Vermittler der Wechselwirkungen



- ▶ Die elementaren Materieteilchen “kommunizieren” miteinander, indem sie **Botenteilchen** aussenden bzw. einfangen.

# Die Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung

▶ Photonen („Lichtteilchen“)



- besitzen keine Masse ( $m_\gamma = 0$ )
- besitzen unendliche Reichweite

# Die Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung

► W- und Z-Teilchen



- besitzen sehr große Massen ( $m_W \approx 85 \cdot m_{\text{Proton}}$ )
- aus Quantenmechanik folgt → haben geringe Reichweite

# Die Botenteilchen der starken Wechselwirkung

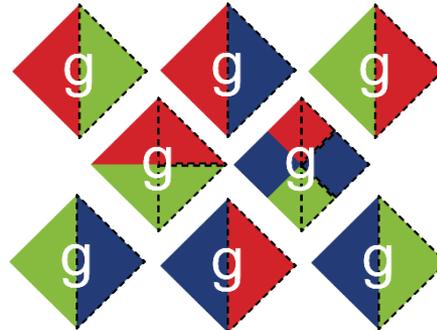
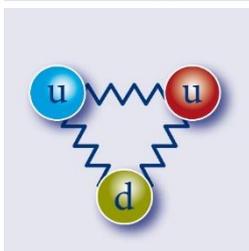
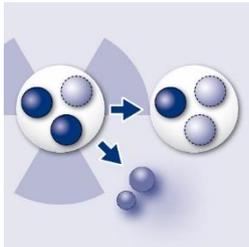
▶ Gluonen (engl.: glue=Kleber)



- besitzen keine Masse ( $m_{\text{gluon}} = 0$ )
- **Aber:** besitzen selbst starke Ladung(en)
  - Sie wechselwirken miteinander
  - Starke Wechselwirkung hat begrenzte Reichweite

# Zusammenfassung: Botenteilchen

- ▶ Im Standardmodell werden Wechselwirkungen durch Botenteilchen vermittelt



# Zusammenfassung: Wechselwirkungen

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

# Diskussion / Fragen

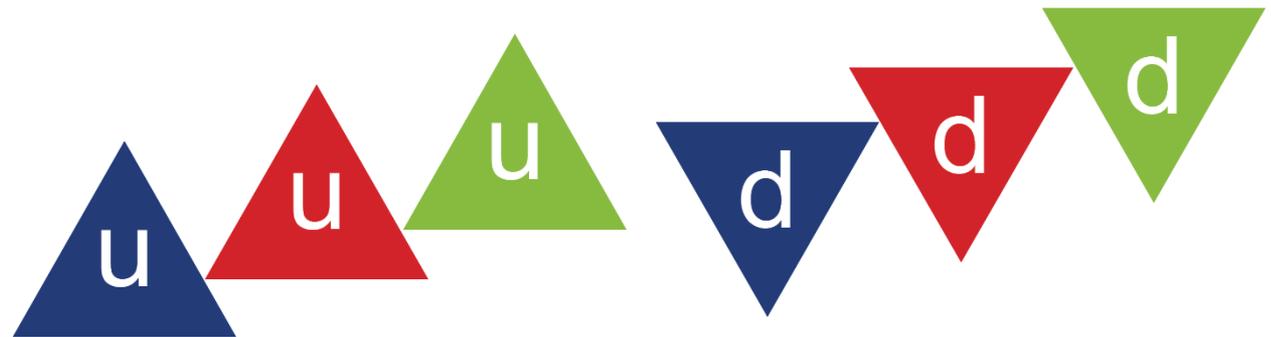


# Die Materieteilchen des Standardmodells

▶ Elektron

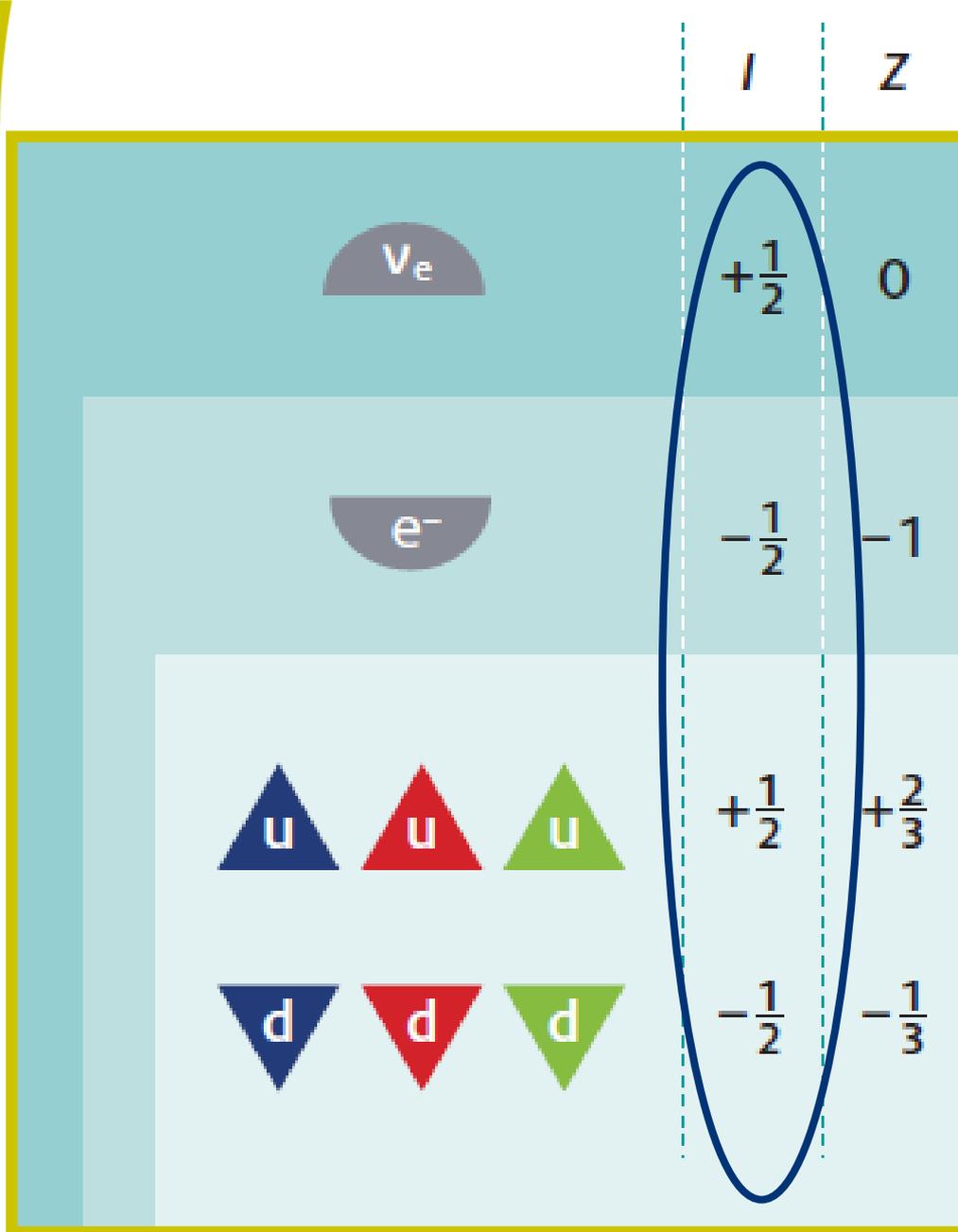


▶ Quarks



▶ Elektron-Neutrino

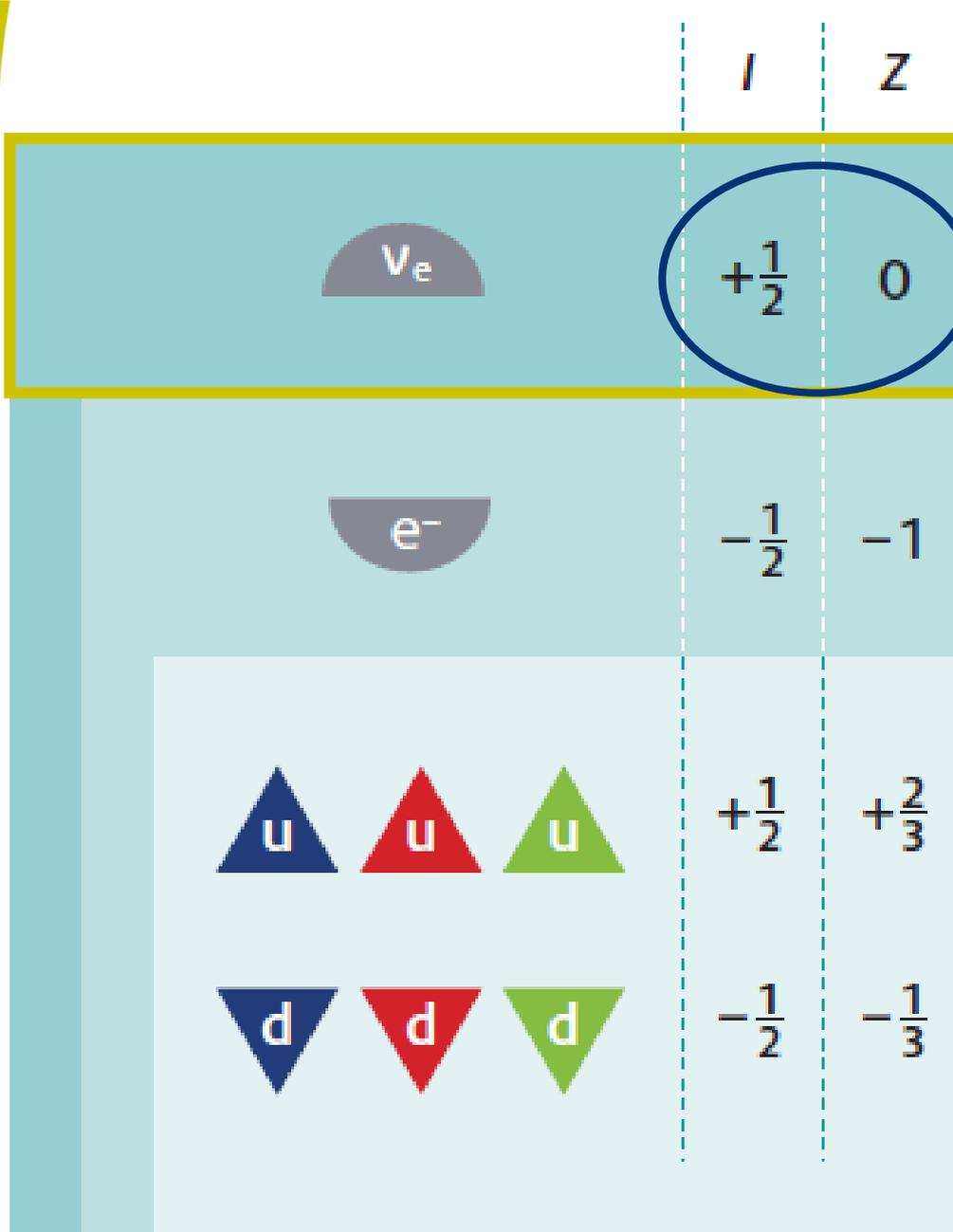




- ▶ Alle Materieteilchen besitzen schwache Ladung
- ▶ unterliegen daher der schwachen WW

|         | I              | Z              |
|---------|----------------|----------------|
| $\nu_e$ | $+\frac{1}{2}$ | 0              |
| $e^-$   | $-\frac{1}{2}$ | -1             |
| u u u   | $+\frac{1}{2}$ | $+\frac{2}{3}$ |
| d d d   | $-\frac{1}{2}$ | $-\frac{1}{3}$ |

- ▶ Neutrinos besitzen nur schwache ladung
- ▶ Sie unterliegen daher nur der schwachen WW
- ▶ Wechselwirken **sehr** selten mit Materie



► Nur etwa eins von 1 000 000 000 Neutrinos aus der Sonne wechselwirkt mit einem Teilchen der Erde

|             | $I$            | $Z$            |
|-------------|----------------|----------------|
| $\nu_e$     | $+\frac{1}{2}$ | $0$            |
| $e^-$       | $-\frac{1}{2}$ | $-1$           |
| $u$ $u$ $u$ | $+\frac{1}{2}$ | $+\frac{2}{3}$ |
| $d$ $d$ $d$ | $-\frac{1}{2}$ | $-\frac{1}{3}$ |

- ▶ Elektronen und Quarks besitzen elektrische Ladung
- ▶ unterliegen der elektromagnetischen WW

|  | $I$            | $Z$            |     |     |     |     |                |                |
|--|----------------|----------------|-----|-----|-----|-----|----------------|----------------|
| $\nu_e$  | $+\frac{1}{2}$ | $0$            |     |     |     |     |                |                |
| $e^-$  | $-\frac{1}{2}$ | $-1$           |     |     |     |     |                |                |
| <table border="1"> <tbody> <tr> <td><math>u</math></td> <td><math>u</math></td> <td><math>u</math></td> </tr> <tr> <td><math>d</math></td> <td><math>d</math></td> <td><math>d</math></td> </tr> </tbody> </table> | $u$            | $u$            | $u$ | $d$ | $d$ | $d$ | $+\frac{1}{2}$ | $+\frac{2}{3}$ |
| $u$  | $u$            | $u$            |     |     |     |     |                |                |
| $d$  | $d$            | $d$            |     |     |     |     |                |                |
|  | $-\frac{1}{2}$ | $-\frac{1}{3}$ |     |     |     |     |                |                |

- ▶ Nur Quarks besitzen eine starke Farbladung
- ▶ unterliegen der starken WW

|  | I              | Z              |   |   |   |   |                |                |
|--|----------------|----------------|---|---|---|---|----------------|----------------|
| $\nu_e$  | $+\frac{1}{2}$ | 0              |   |   |   |   |                |                |
| $e^-$  | $-\frac{1}{2}$ | -1             |   |   |   |   |                |                |
| <table border="1"> <tbody> <tr> <td>u</td> <td>u</td> <td>u</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>d</td> <td>d</td> </tr> </tbody> </table> | u              | u              | u | d | d | d | $+\frac{1}{2}$ | $+\frac{2}{3}$ |
| u  | u              | u              |   |   |   |   |                |                |
| d  | d              | d              |   |   |   |   |                |                |
|  | $-\frac{1}{2}$ | $-\frac{1}{3}$ |   |   |   |   |                |                |

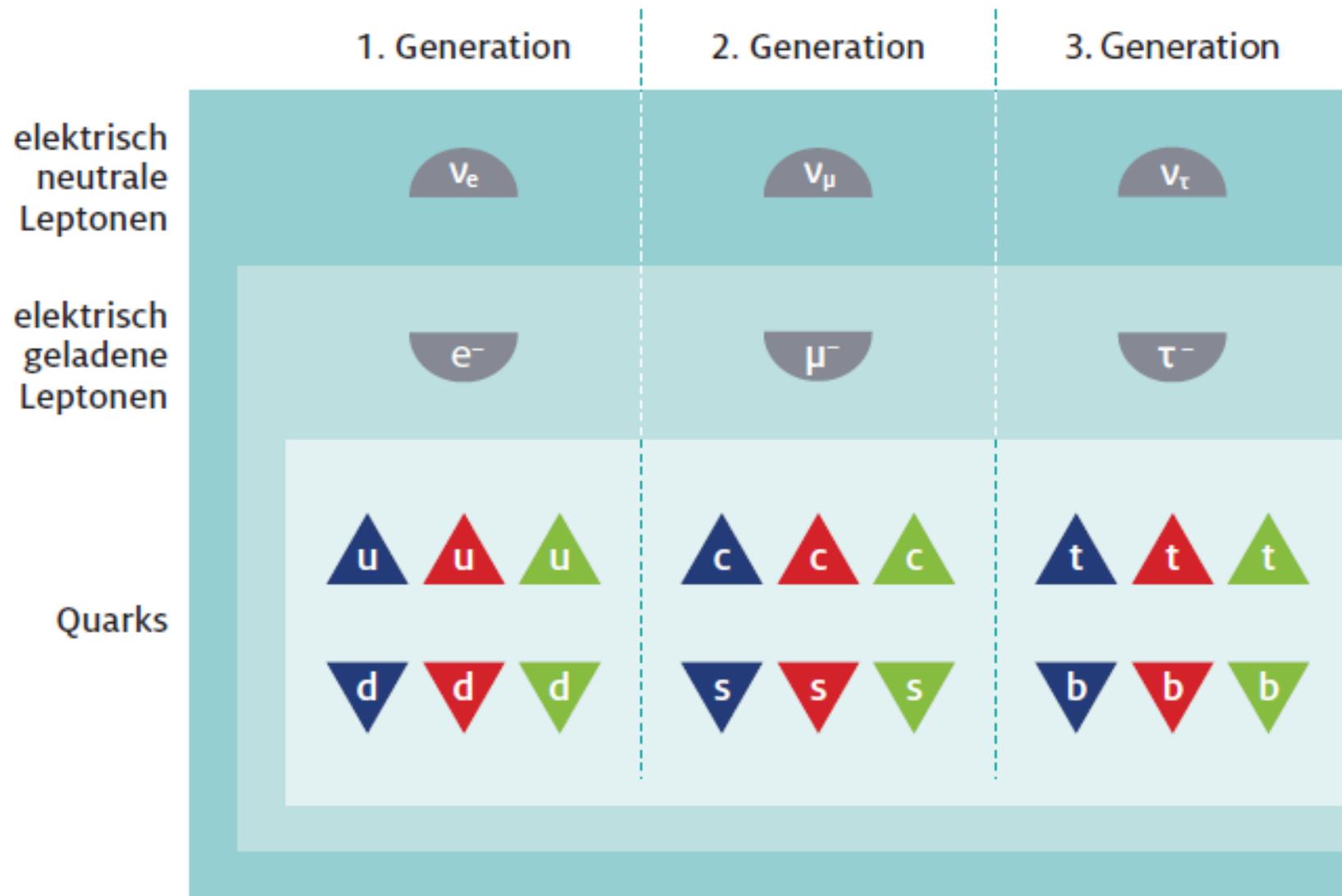
- ▶ Quarks treten niemals einzeln auf
- ▶ Nur als **Hadronen** (z.B. Protonen und Neutronen)
- ▶ **Confinement** (Eingesperrtheit)

# Ordnung der Materieteilchen

- ▶ Uns umgebende Materie besteht aus Up- und Down-Quarks, Elektronen
- ▶ 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

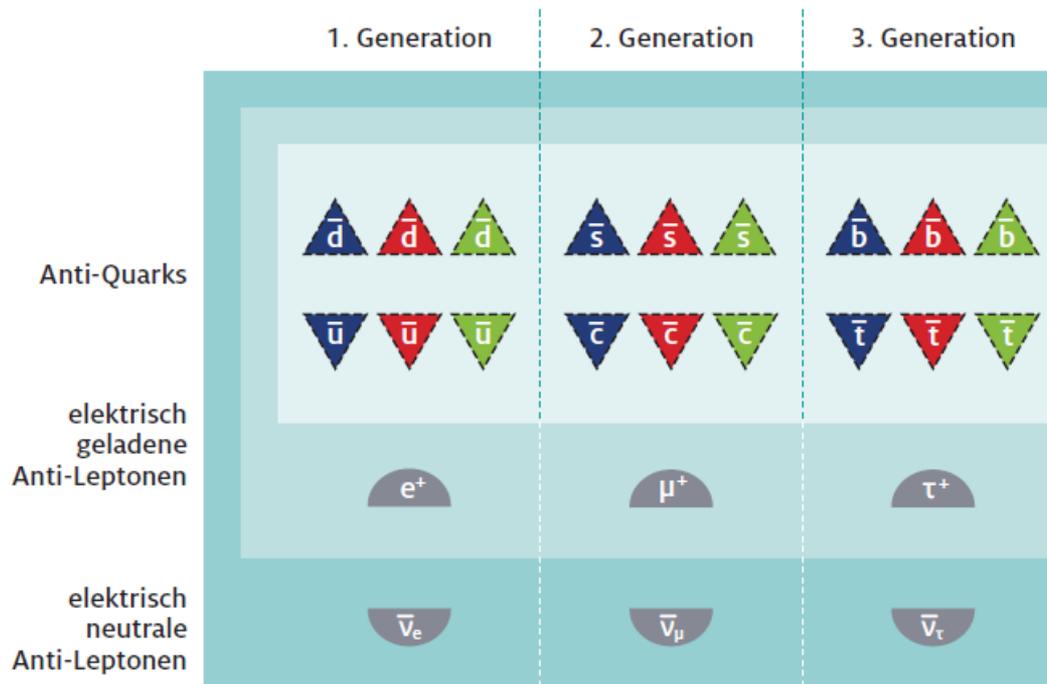
# „Teilchenzoo“ oder Ordnung?

- ▶ 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?
- ▶ Gleiche Ladungen  $\leftrightarrow$  Gleiche Eigenschaften

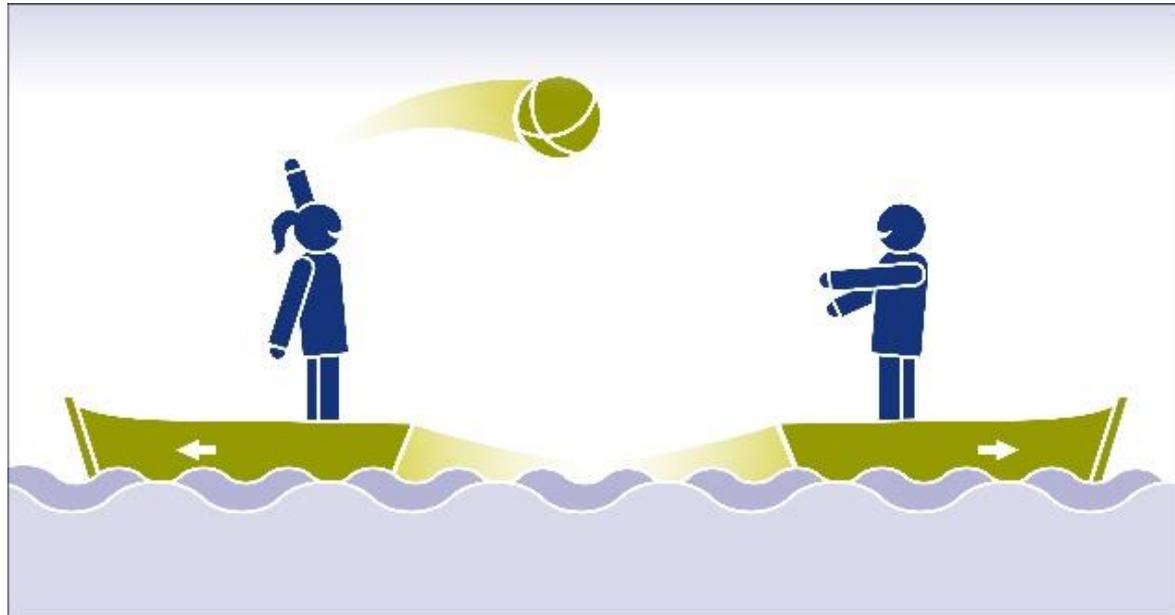


# Anti-Materieteilchen

- ▶ Zu jedem Materieteilchen existiert ein zugeordnetes Anti-Materieteilchen mit gleicher Masse
- ▶ Das Anti-Teilchen besitzt genau die entgegengesetzten (mit -1 multiplizierten) Ladungen



# Darstellung von Wechselwirkungen





# Feynman-Diagramme

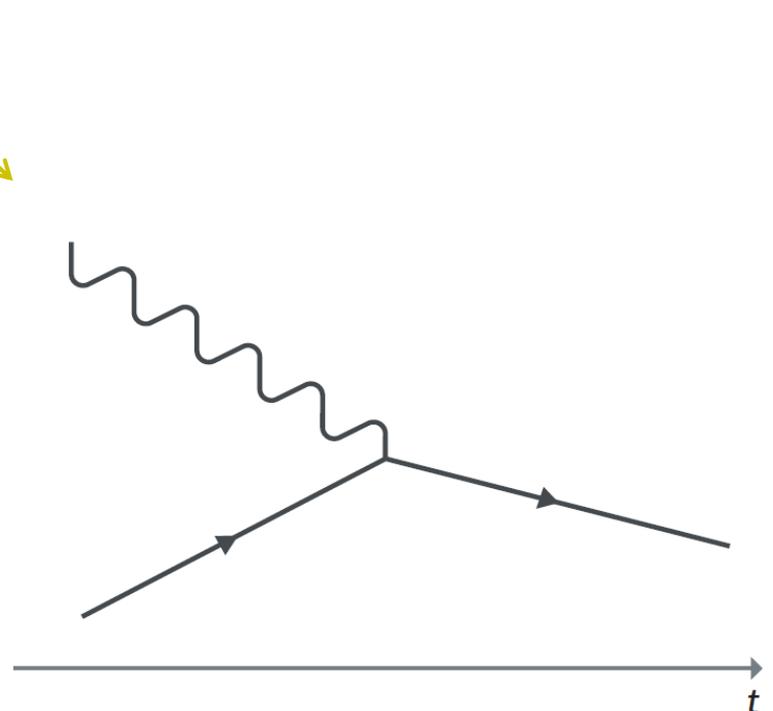
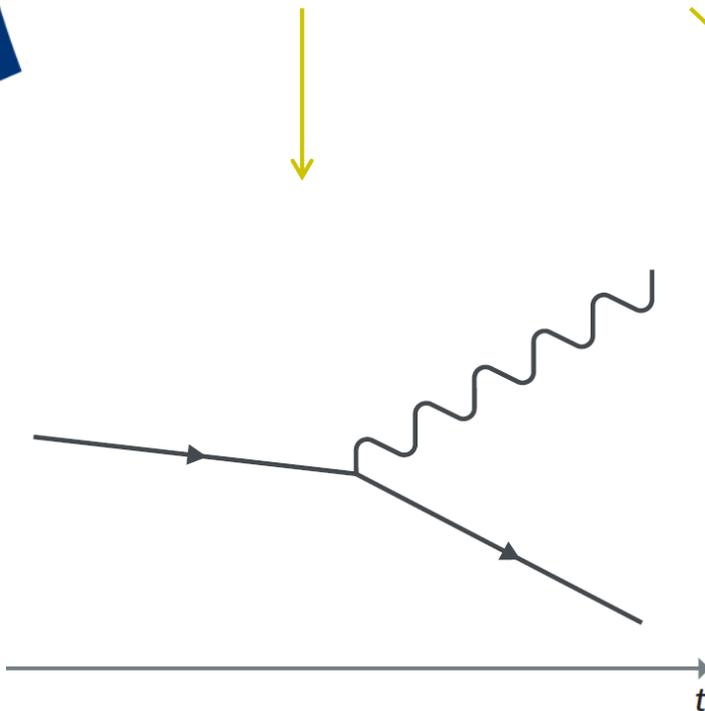
► ...veranschaulichen Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen. Jedes Teilchen wird durch eine Linienart dargestellt:

- Materieteilchen
- Anti-Materieteilchen
- W- oder Z-Teilchen, Photon
- Gluon



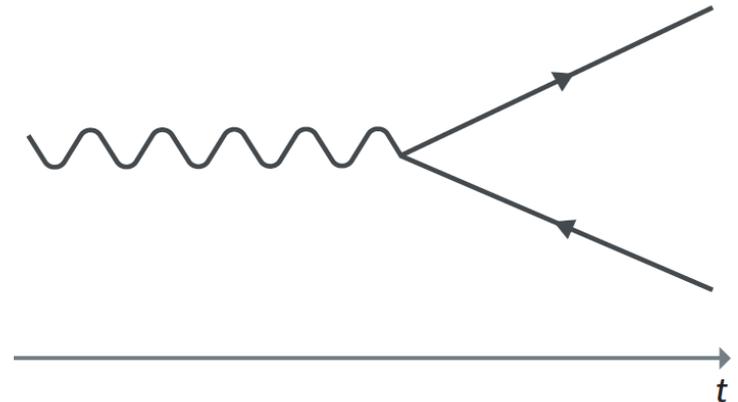
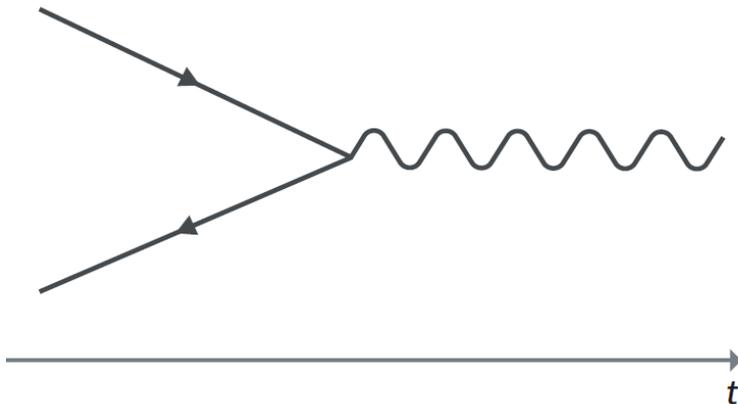
# Grundbausteine 1/2

## ► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



# Grundbausteine 2/2

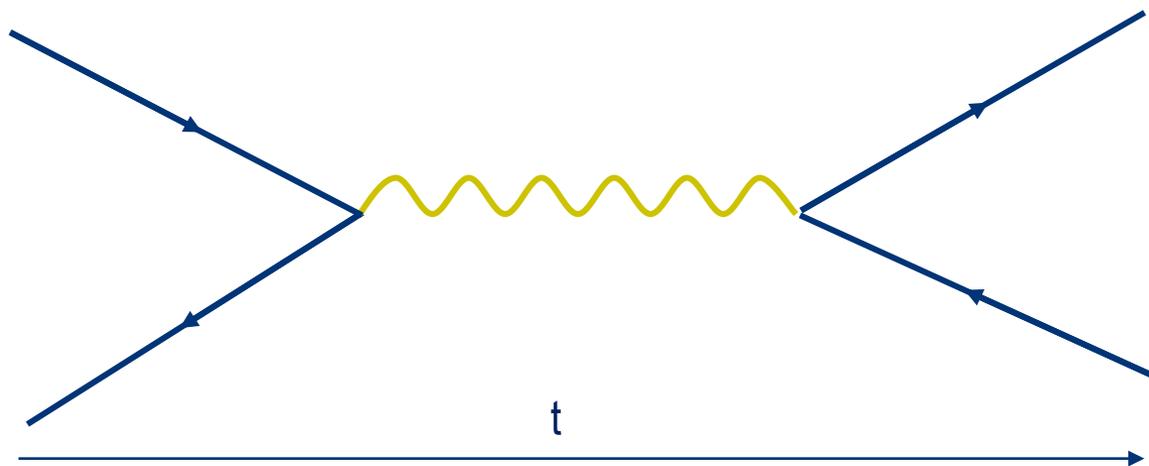
## ▶ Paarvernichtung und Paarerzeugung



# Feynman - Diagramme

... zeigen:

- ▶ welche Materieteilchen vor der Wechselwirkung vorhanden sind
- ▶ wie sie wechselwirken (Botenteilchen)
- ▶ welche Materieteilchen danach vorhanden sind



# Beispiel: $\beta^-$ -Umwandlung



Neutron

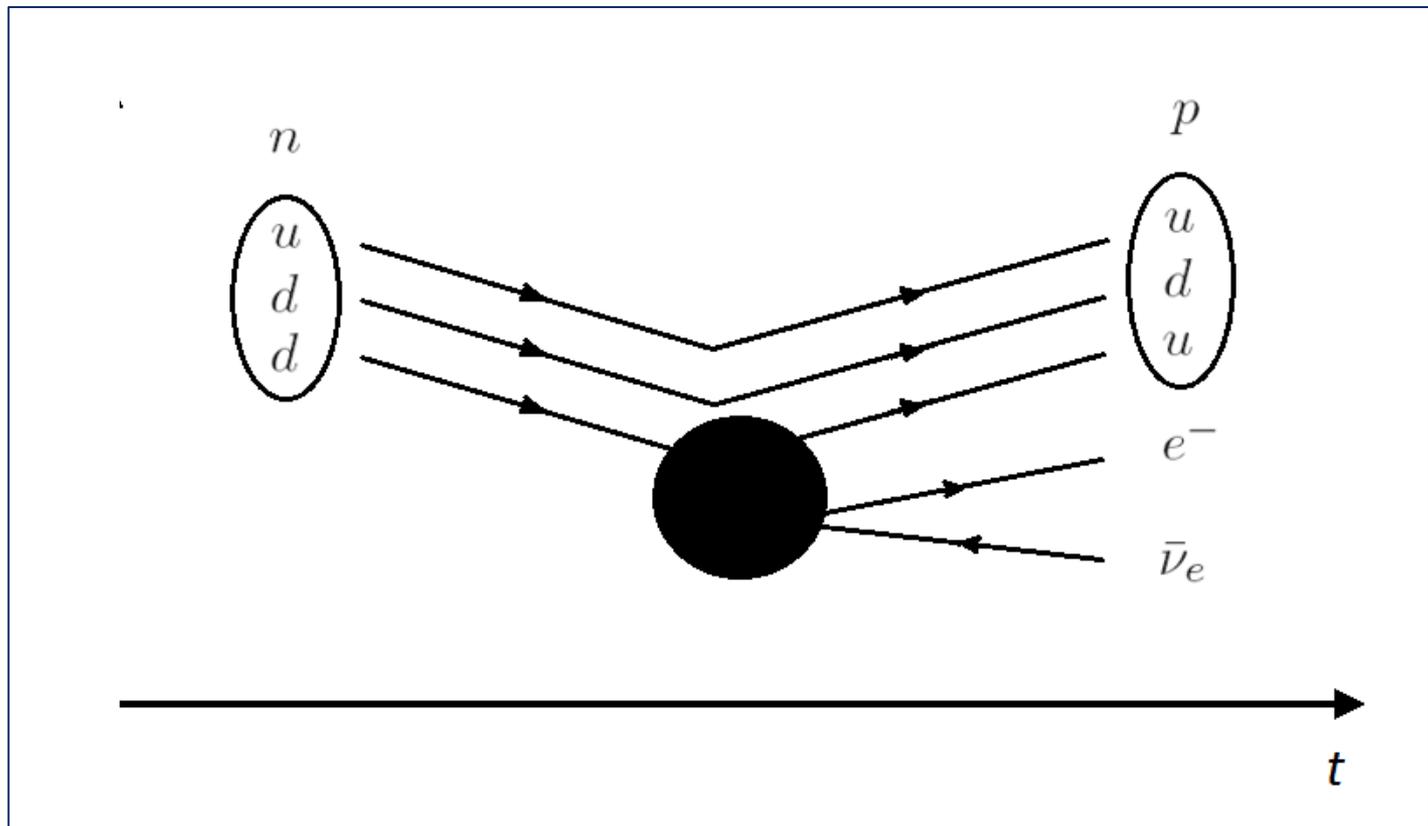
Proton

Elektron

Anti-Elektron-  
Neutrino

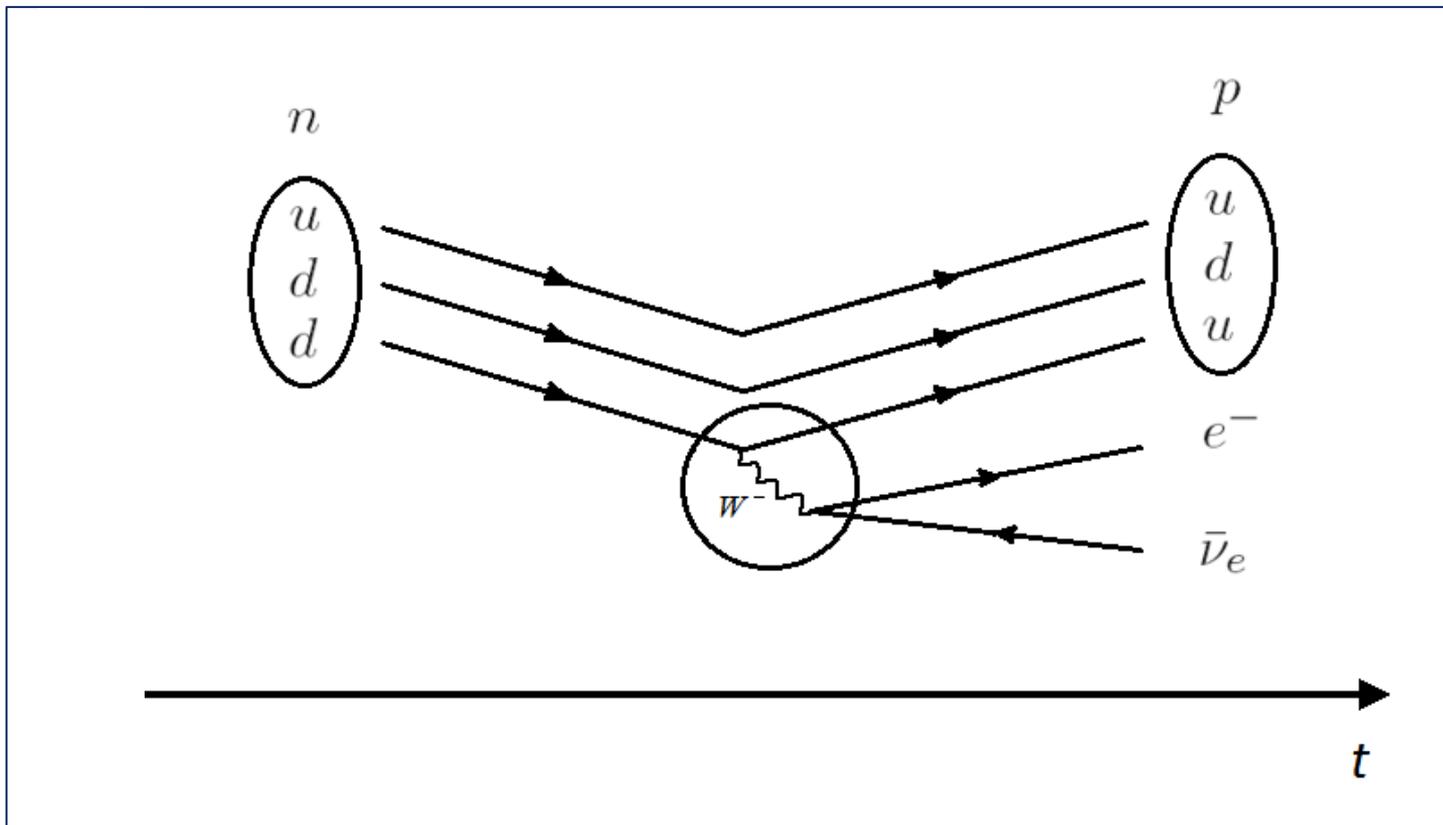
# Die $\beta^-$ -Umwandlung aus Physikersicht

- Im Neutron wandelt sich ein Down-Quark in ein Up-Quark um!



# Die $\beta^-$ -Umwandlung aus Physikersicht

- Im Neutron wandelt sich ein Down-Quark in ein Up-Quark um!





## Teil 3: Suche nach dem Higgs-Teilchen

- ▶ Alle Zutaten, um selbst zu forschen

# Was ist das Higgs Teilchen

- ▶ Standardmodell: beste Erklärung der Natur die wir haben
- ▶ Massen der Elementarteilchen im Standardmodell nicht “einfach so” einführbar
- ▶ Higgs-Mechanismus ermöglicht dies und bedingt die Existenz des Higgs-Teilchens
- ▶ fehlendes Puzzle-Teil → Higgs-Teilchen



$$m_{\text{Higgs}} \approx 125 \text{ GeV}/c^2 \approx 134 \cdot m_{\text{Proton}}$$

# Wie erzeugt man das Higgs-Teilchen?

- ▶ Teilchenbeschleuniger → Erzeugung massereicher Teilchen
- ▶  $E = mc^2$  → Masse ist eine Form von Energie!
- ▶ Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.
  
- ▶ Beispiel:
  - Teilchenkollisionen!  
(Bewegungsenergie → Masse)

# Die Hauptdarsteller heute: W-Teilchen

- ▶ Mit ihrer Hilfe werdet ihr den Aufbau von Protonen erforschen...
- ▶ ...und erfahren, wie Physiker nach dem Higgs-Teilchen suchen.



# W-Teilchen...

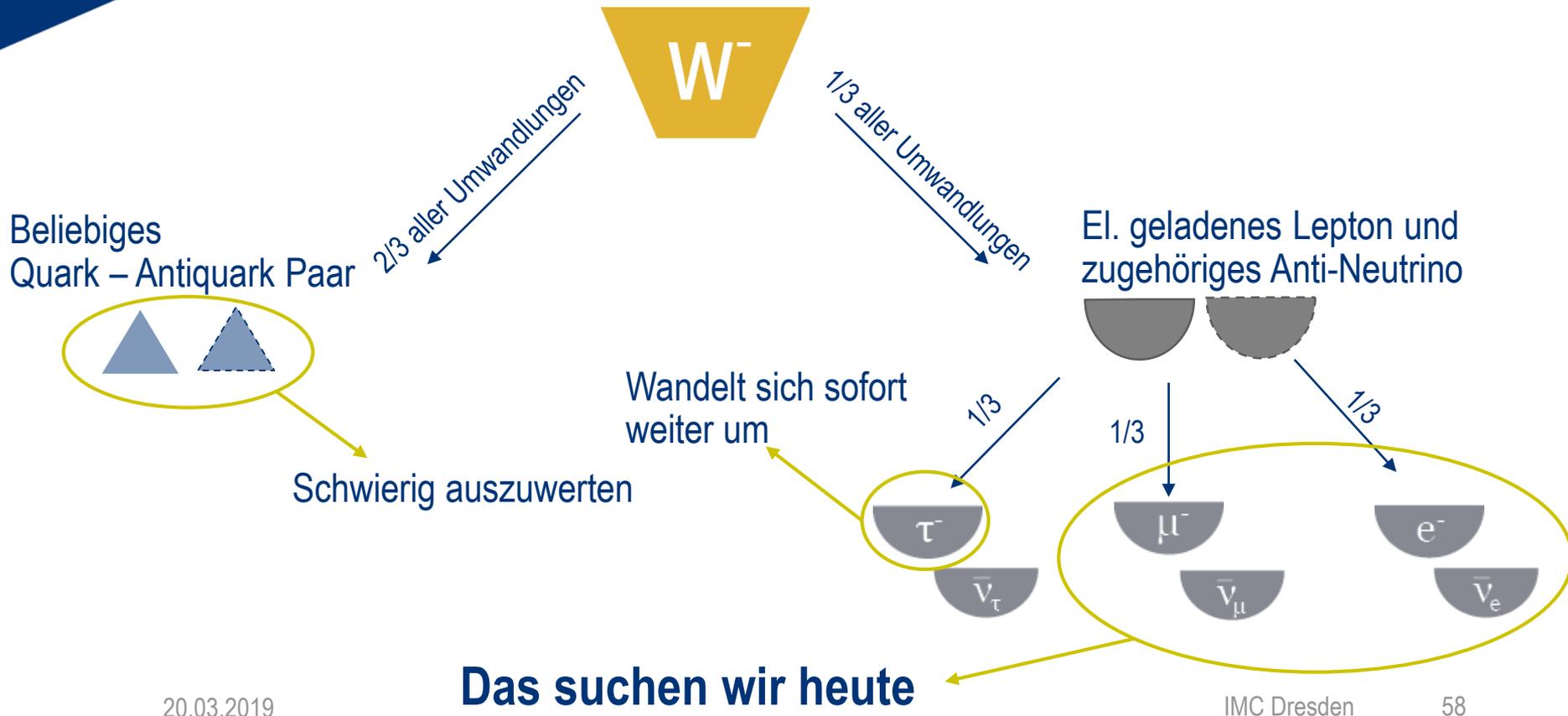


- ▶ sind Botenteilchen der schwachen WW
- ▶ sind elektrisch geladen:  $W^+$ ,  $W^-$
- ▶ gehören zu den massereichsten Teilchen die wir kennen ( $80,4 \text{ GeV}/c^2$  ! )
- ▶ wandeln sich nach ca.  $10^{-25}$  s in leichtere Teilchen um (kurze Reichweite)

Daher können wir sie nicht direkt im Detektor beobachten, sondern erkennen sie anhand ihrer Umwandlungsprodukte!

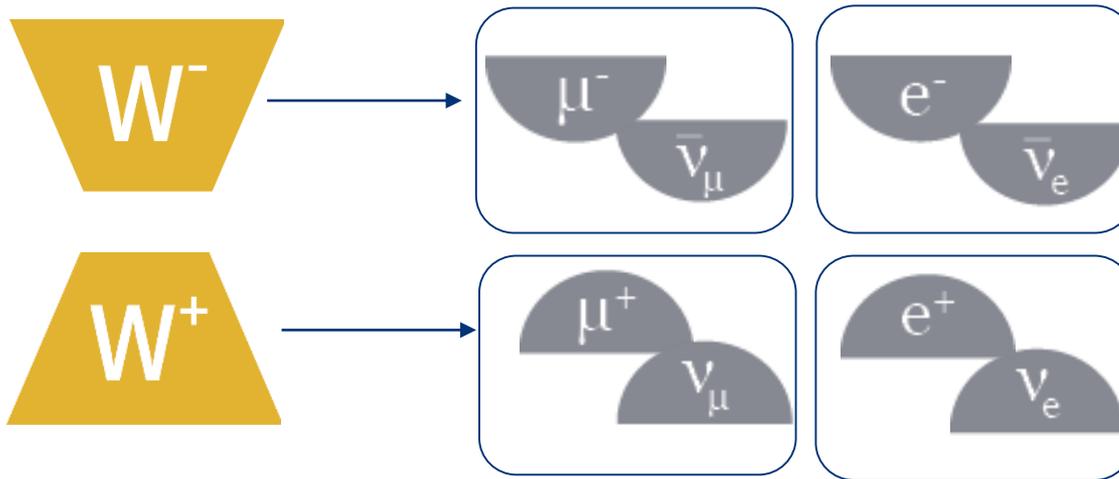
# Wie findet man W-Teilchen?

- ▶ Man sucht nach Umwandlungsprodukten, die man in Detektoren beobachten kann



# Wie findet man W-Teilchen?

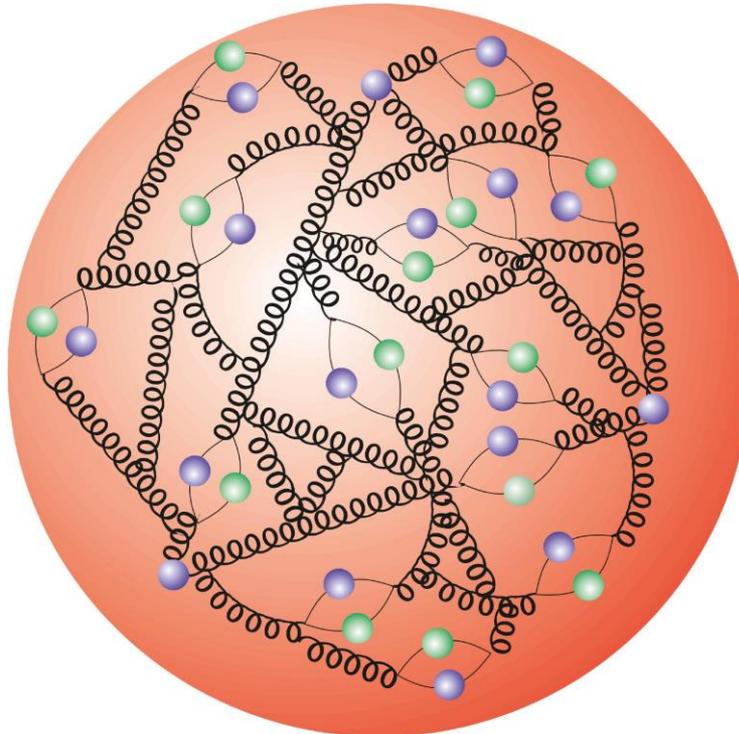
- ▶ Ihr sucht heute nach folgenden Umwandlungsprodukten:



- ▶ Das sind Signalereignisse

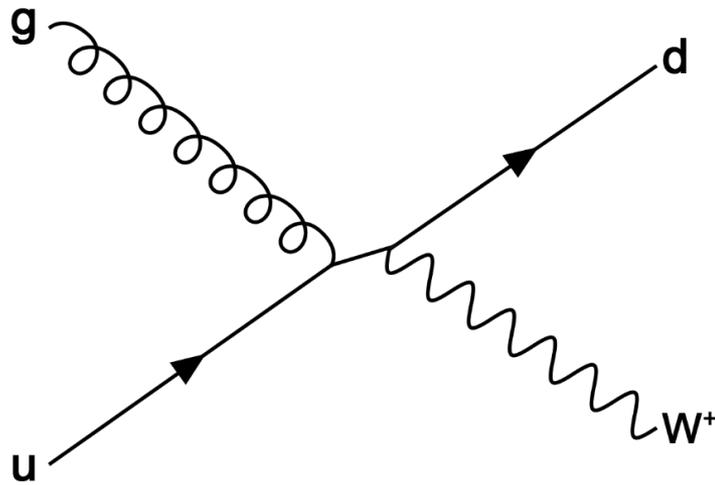
# Wie entstehen W-Teilchen?

- ▶ Proton besteht aus:
  - 3 Valenz-Quarks (up-up-down)
  - Gluonen und Quark-Antiquark-Paaren

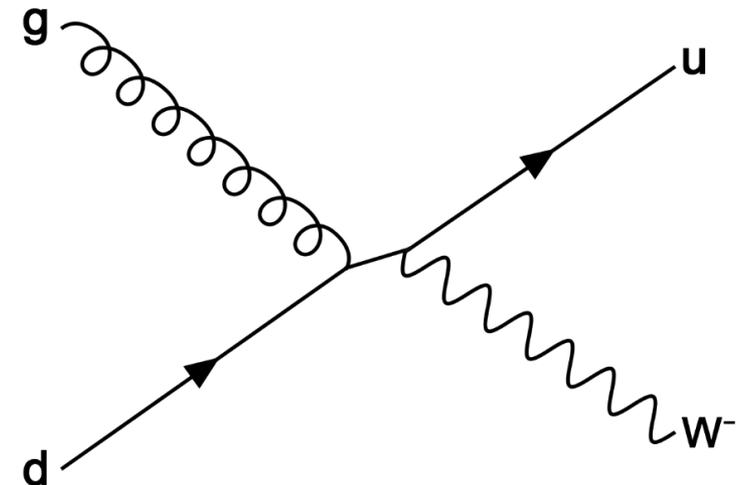


# Wie entstehen W-Teilchen?

► Kollision von Protonen im LHC:



$$u + g \rightarrow W^+ + d$$

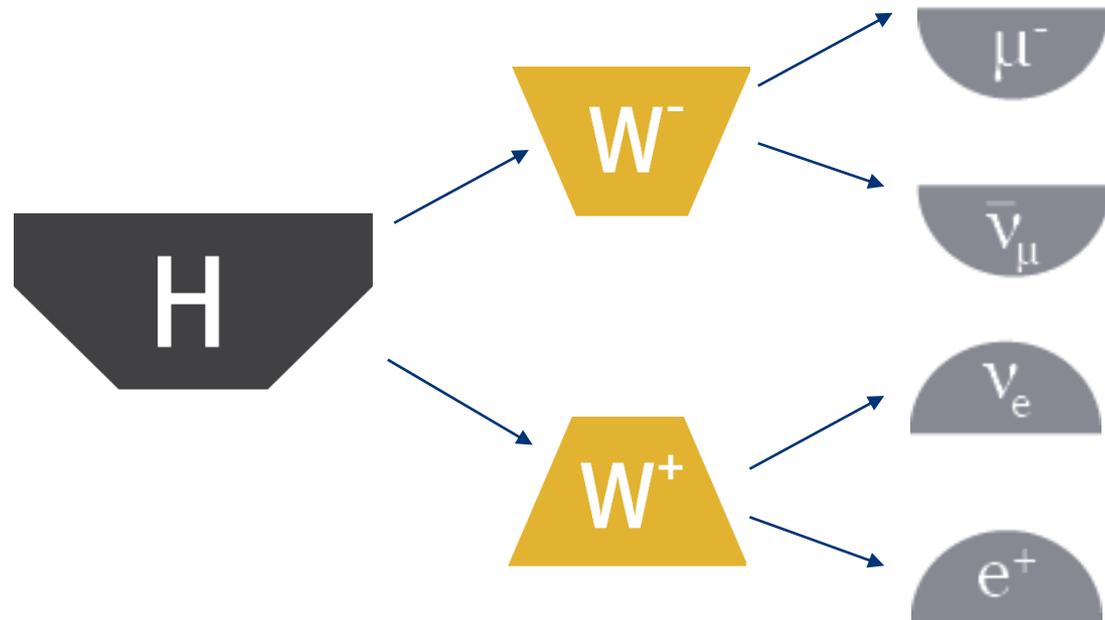


$$d + g \rightarrow W^- + u$$

1. Messaufgabe:  
In welchem Verhältnis entstehen  $W^+$ - und  $W^-$ -Teilchen im LHC?

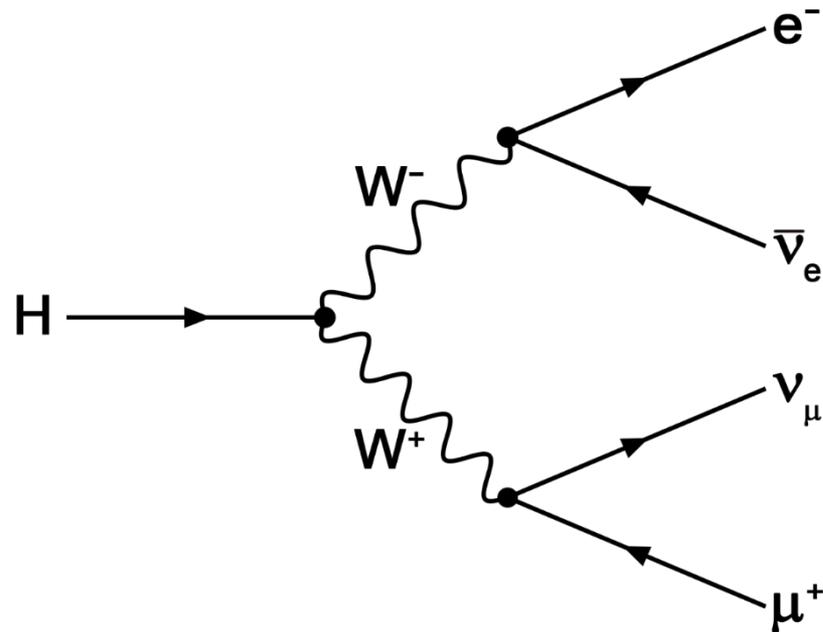
# Die Suche nach dem Higgs-Teilchen

- ▶ Umwandlung des Higgs-Teilchens in 2 W-Teilchen
- ▶ W-Teilchen wandeln sich in Leptonen um



# Die Suche nach dem Higgs-Teilchen

- ▶ Umwandlung des Higgs-Teilchens in 2 W-Teilchen
- ▶ W-Teilchen wandeln sich in Leptonen um





# Problem: Untergrund

- ▶ Umwandlungsprodukte können auch aus anderen Prozessen stammen!
- Untergrund

# Higgs-Teilchen oder Untergrund?

- ▶ Bei der Umwandlung eines Higgs-Teilchens in zwei W-Teilchen entstehen schließlich zwei elektrisch geladene Leptonen
- ▶ Diese bewegen unter einem bestimmten Winkel zueinander durch den Detektor
- ▶ Dieser Winkel liegt in einem charakteristischen Bereich
  - Messung des Winkels hilft Untergrundereignisse auszuschließen

## 2. Messaufgabe:

Suche nach W-Teilchen und Bestimmung des Winkels zwischen den detektierten Leptonen



## "Wir haben es!" CERN feiert Durchbruch bei Higgs-Suche

04.07.2012 | 11:02 | von Daniel Breuss (DiePresse.com)

Das Higgs-Boson verleiht den Bausteinen des Universums ihre Masse. Seit Jahrzehnten suchen Forscher das Elementarteilchen. Nun wurde am Teilchenbeschleuniger LHC ein neues Teilchen gefunden, das ihm entspricht.

30.11.2009

LHC

Teilchenbeschleuniger knackt Energie-Weltrekord

# Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Diskussion / Fragen

