

5. Teilchenphysik

Prof. David Hunger

Physikalisches Institut, KIT Fakultät für Physik

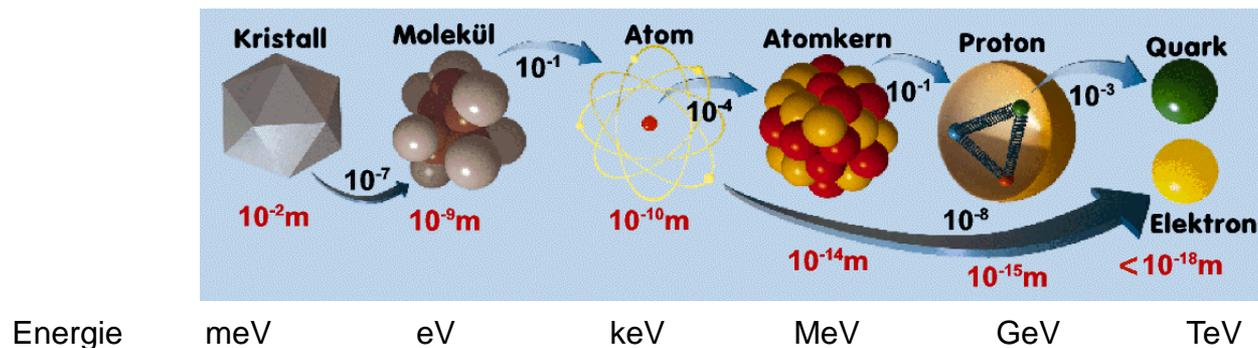
Teilchenphysik

Untersuchung der Eigenschaften von Elementarteilchen
 Größenskala \ll Nukleonengröße

Experimente: Brauche kleine deBroglie Wellenlängen
 d.h. hohe Impulse und Energien

„Hochenergiephysik“

Ursprünglich: Teilchen der kosmischen Strahlung
 Seit den 50er Jahren: Teilchenbeschleuniger



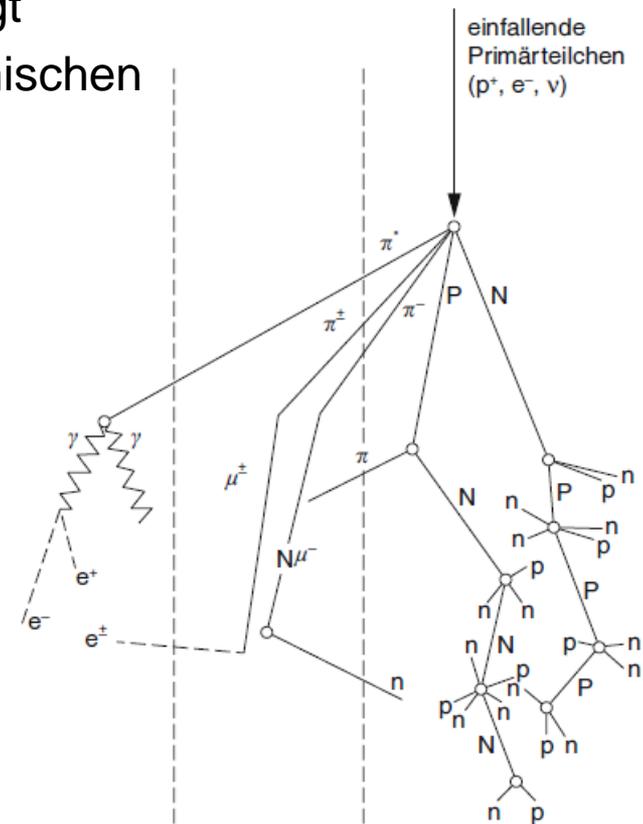
Neue Teilchen in der kosmischen Strahlung

Entdeckung der Antimaterie: das Positron

- Antimaterie wurde 1928 von Paul Dirac als Konsequenz der relativistischen Schrödingergleichung vorhergesagt
- Entdeckung 1932 von C. D. Anderson in der kosmischen Höhenstrahlung
- Teilchen mit Eigenschaften wie das Elektron nur mit positiver Ladung

→ **Positron e^+**

Jedes Teilchen hat ein zugehöriges Antiteilchen

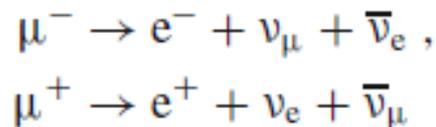


Entdeckung des Myons

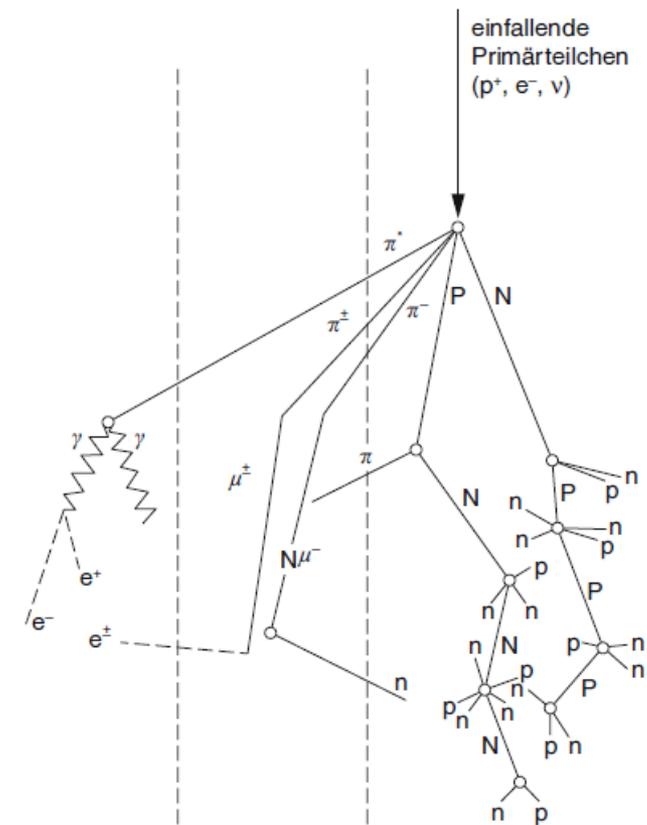
- Entdeckung eines weiteren Teilchens

Myon μ

- Masse 200x größer als Elektronenmasse
- Instabil, mittlere Lebensdauer $2.2\mu\text{s}$
- Zerfallsprozess



- Durchdringen Materie mit sehr geringem Energieverlust



Myonnachweis im Schulversuch

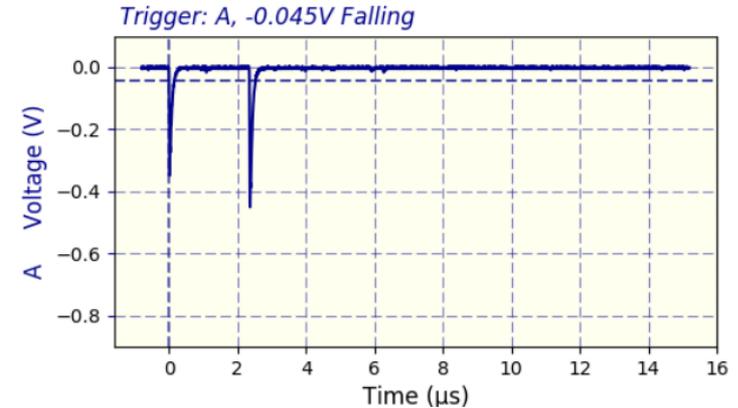
Kaffeekanne mit Wasser als

Wasser-Cherenkov-Zähler

Nachweis geladener Teilchen
aus der kosmischen Strahlung



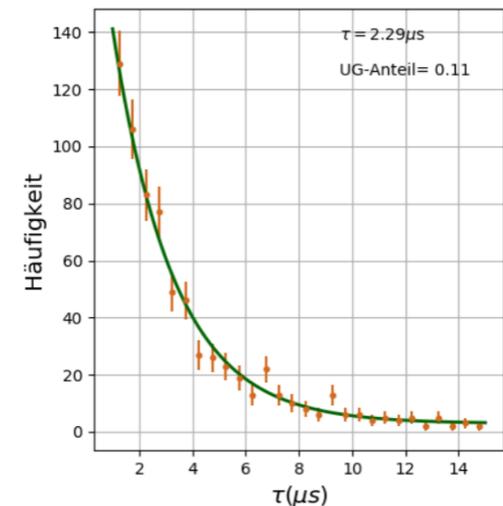
Aufzeichnung mit PicoScope,
Steuerung, Datenvisualisierung und
Datenauswertung mit Raspberry Pi



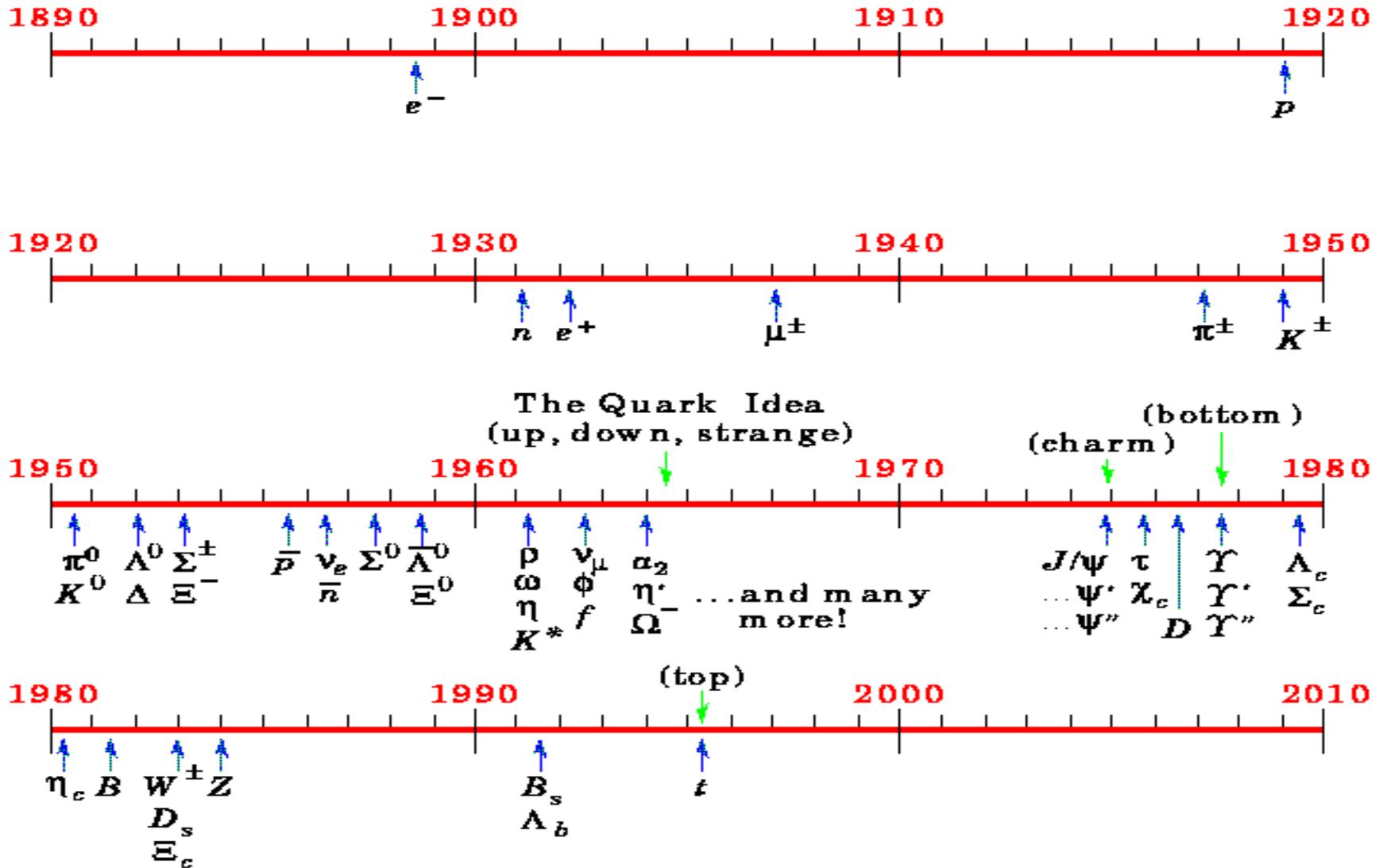
Mit PicoScope und SW picoCosmo
aufgezeichnete Pulse aus der „Kamiokanne“

Doppelpuls entsteht, wenn ein Myon
nach Durchgang gestoppt und das
Elektron aus dem Zerfall im Detektor
nachgewiesen wird

→ Messung der Myon-Lebensdauer



Der Teilchenzoo



Erzeugung von Teilchenstrahlung

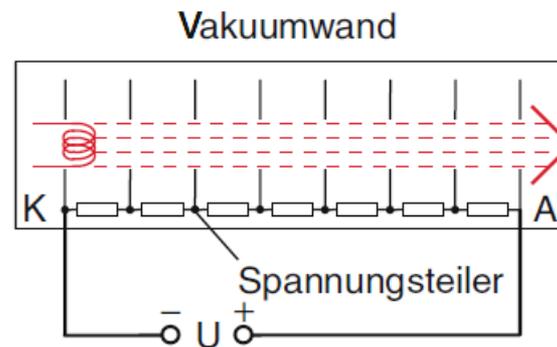
Lorentzkraft:
$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- **Beschleunigung** geladener Teilchen durch elektrische Felder
- **Ablenkung** geladener Teilchen durch Magnetfelder

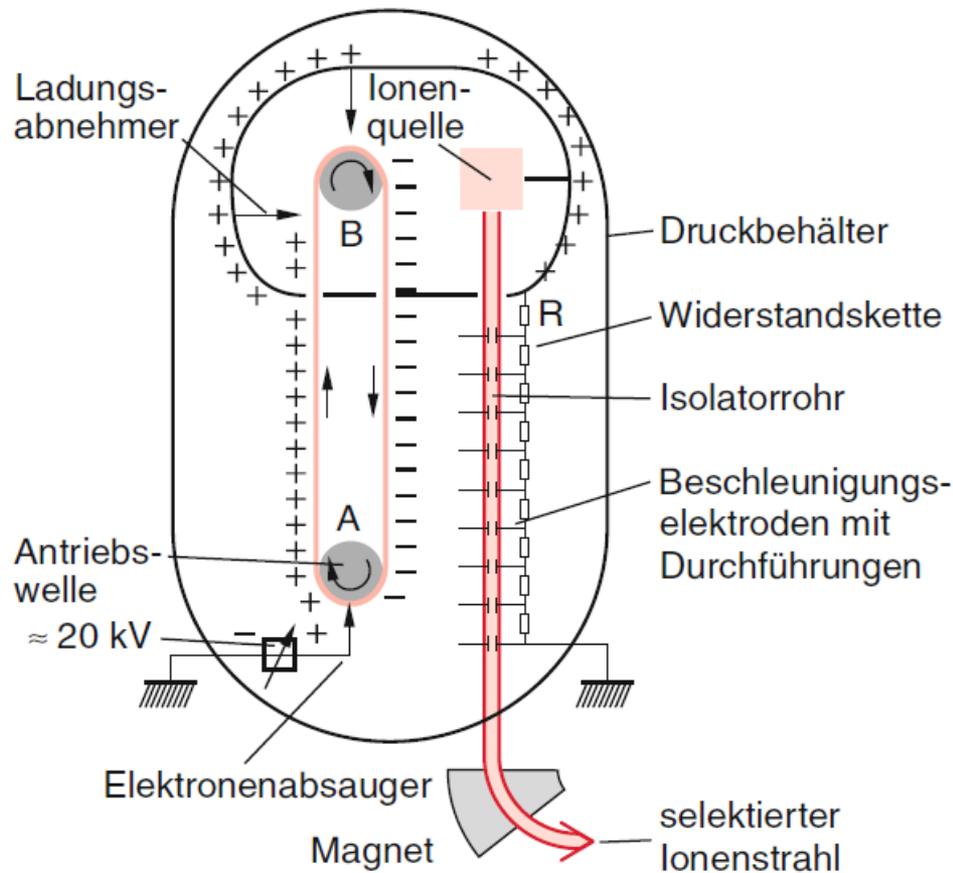
Energiegewinn nur durch elektrische Felder :

$$\Delta E = \int_{s_0}^{s_0+d} \vec{F}_L \cdot d\vec{s} = q \int_{s_0}^{s_0+d} \vec{E} \cdot d\vec{s} = qU$$

Beschleunigungsspannung von 1 V entspricht einem Energiegewinn von 1 eV



Van de Graaff Beschleuniger

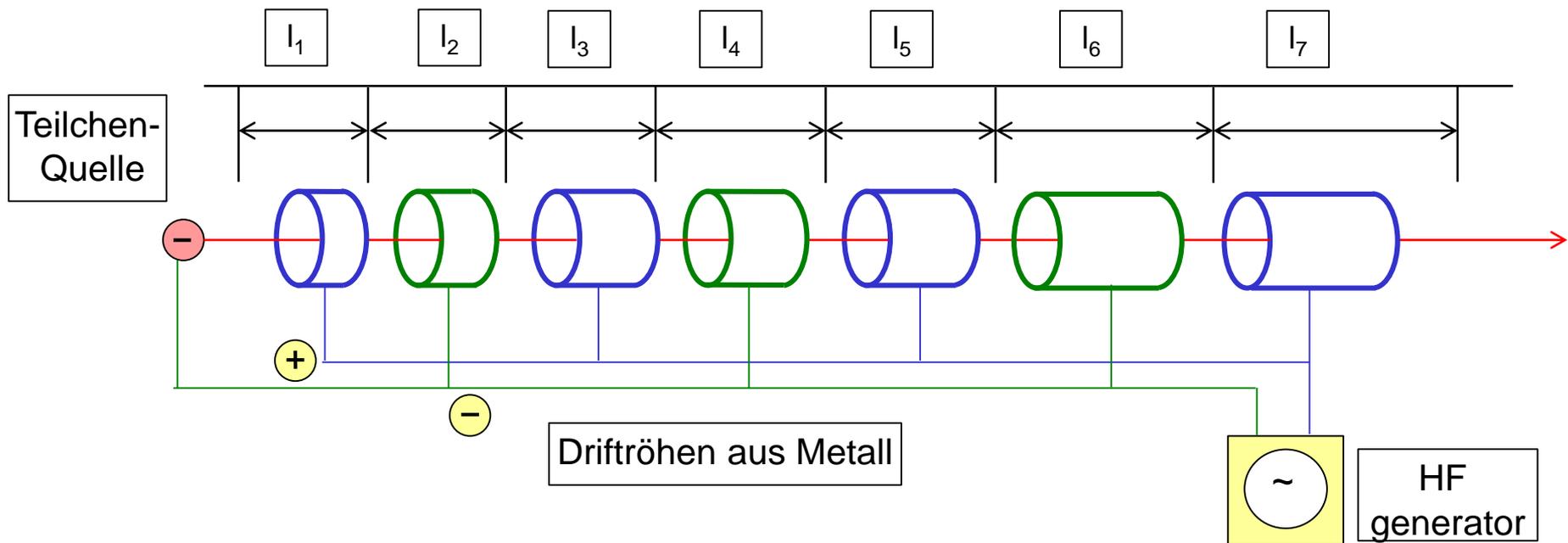


Spannungen bis ~ MV
darüber Funkenüberschläge

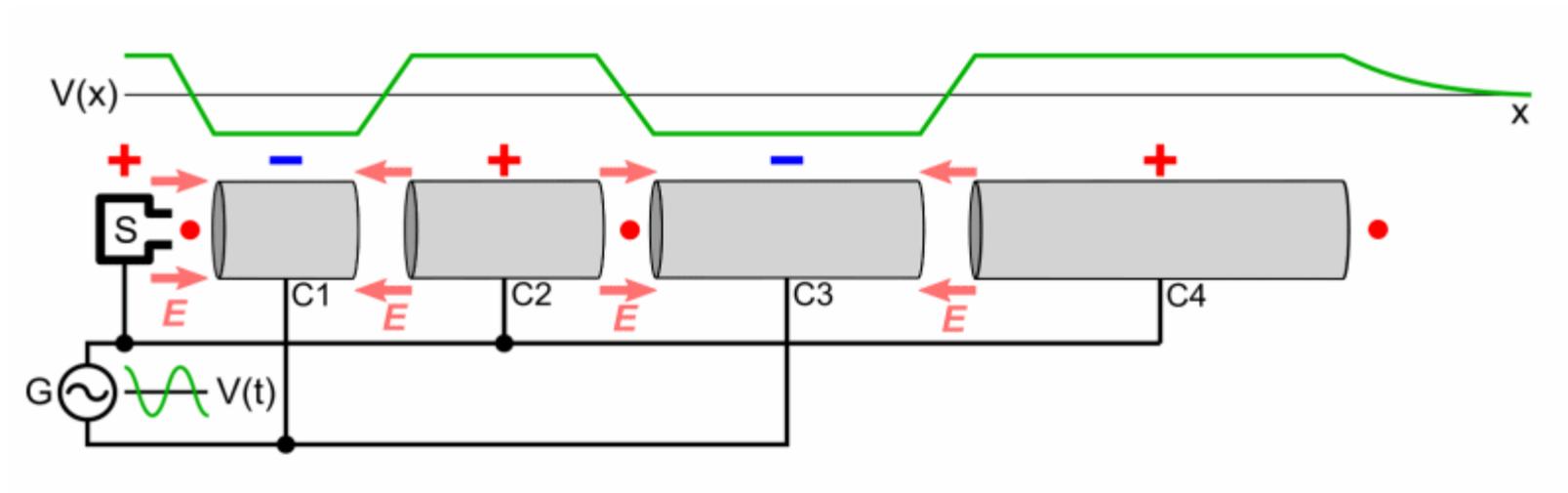
Linearbeschleuniger

- Nutze Wechselspannung: periodische Umpolung von Beschleunigungssegmenten
- Röhren werden mit steigender Geschwindigkeit länger

... die erste Stufe jedes modernen Beschleunigers

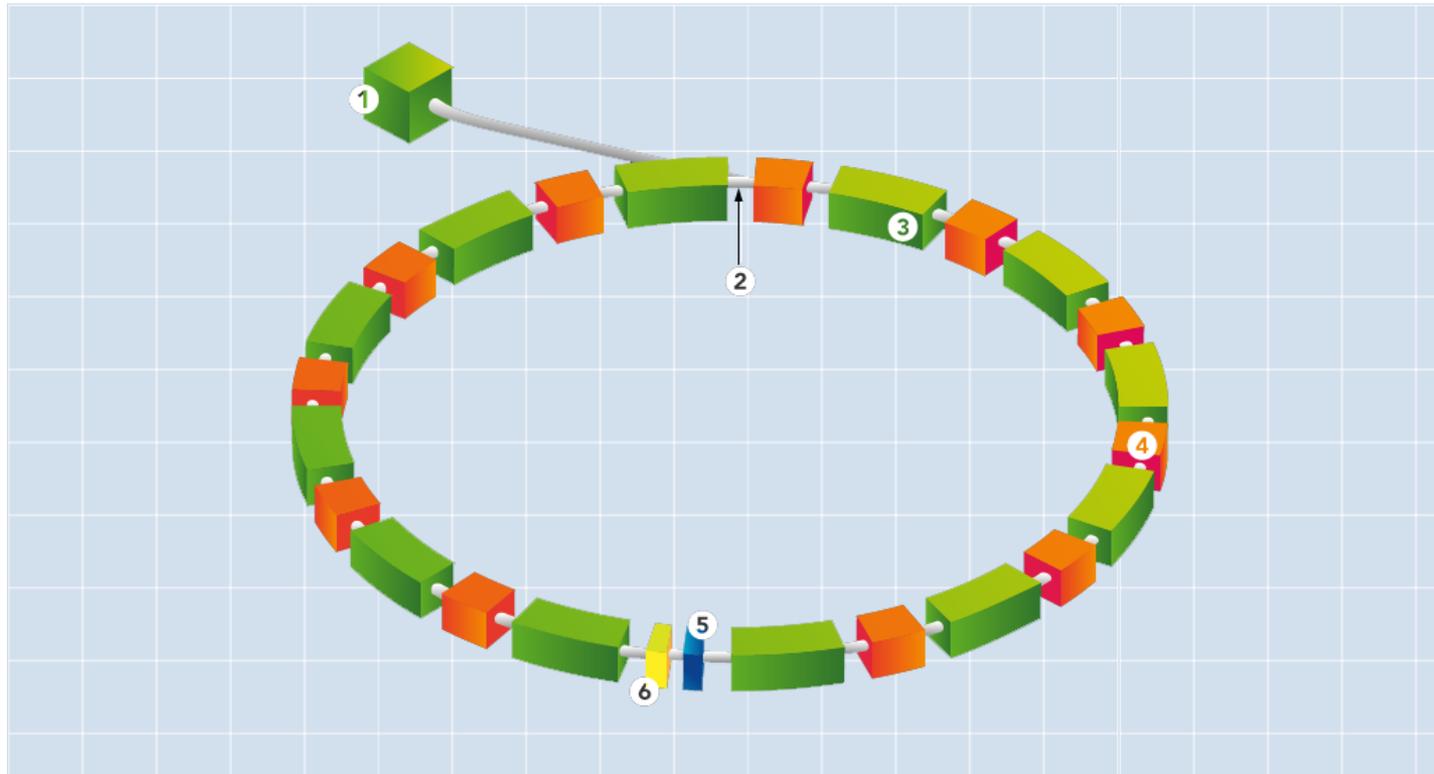


Linearbeschleuniger



Kreisbeschleuniger

In einem Ring können die Beschleunigungsstrecken bei jedem Umlauf genutzt werden:



1. Teilchenquelle
2. evakuiertes Strahlrohr
3. Magnete

4. elektrische (Wechsel-)Felder
5. Target(s)
6. Detektoren

Kreisbeschleuniger

Lorentzkraft auf Teilchen

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Für Bewegung senkrecht zum B-Feld:

→ **Kreisbewegung des Teilchens**

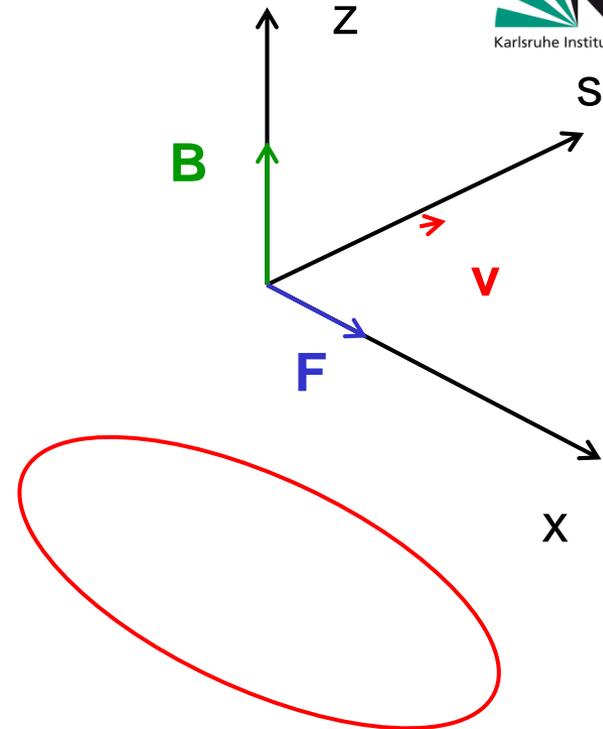
mit Lorentzkraft als Zentripetalkraft

$$qvB = mv^2/R \rightarrow qpB = p^2/R \rightarrow R = \frac{p}{qB}$$

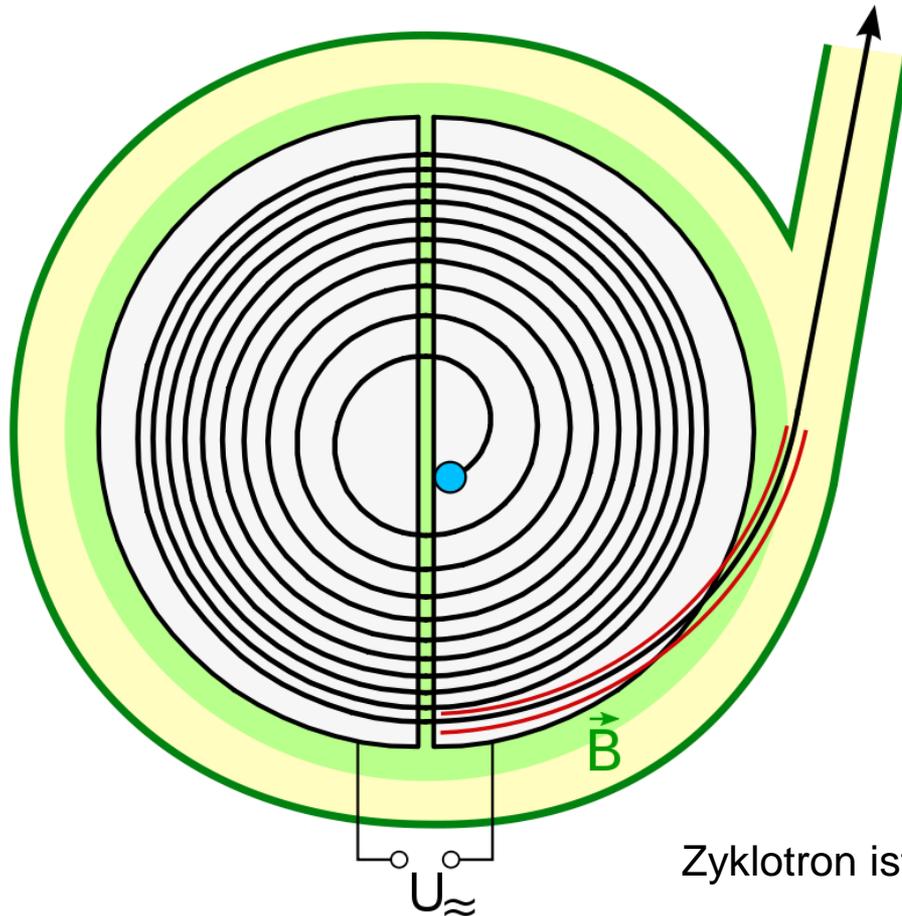
Die vom B-Feld abhängige **Umlauffrequenz** nennt man **Zyklotronfrequenz**:

$$\omega_Z = 2\pi f = 2\pi \frac{v}{2\pi R} = \frac{p}{m} \frac{|q|B}{p} = \frac{|q|B}{m}$$

s. Praktikum: e/m-Röhre



Zyklotron



<http://www.zyklotron-ag.de/> (Karlsruhe)

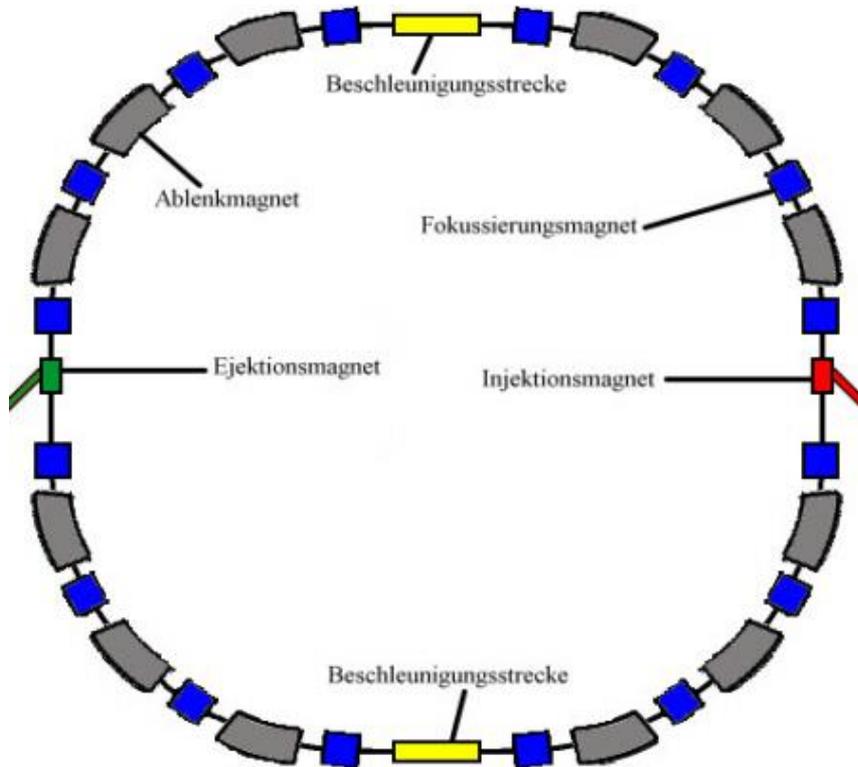
Zyklotron ist ein einfacher, robuster Beschleunigertyp

für Energien größer als einige 10MeV für Protonen
wird der notwendige Radius zu groß

Synchrotron

In modernen Kreisbeschleunigern wird das **Magnetfeld** proportional („**synchron**“) zum **Teilchenimpuls erhöht**.

Außerdem nutzt man **Magnetoptik** (Quadrupole und Sextupole) zur Fokussierung des Teilchenstrahls.



Komponenten eines Synchrotrons:

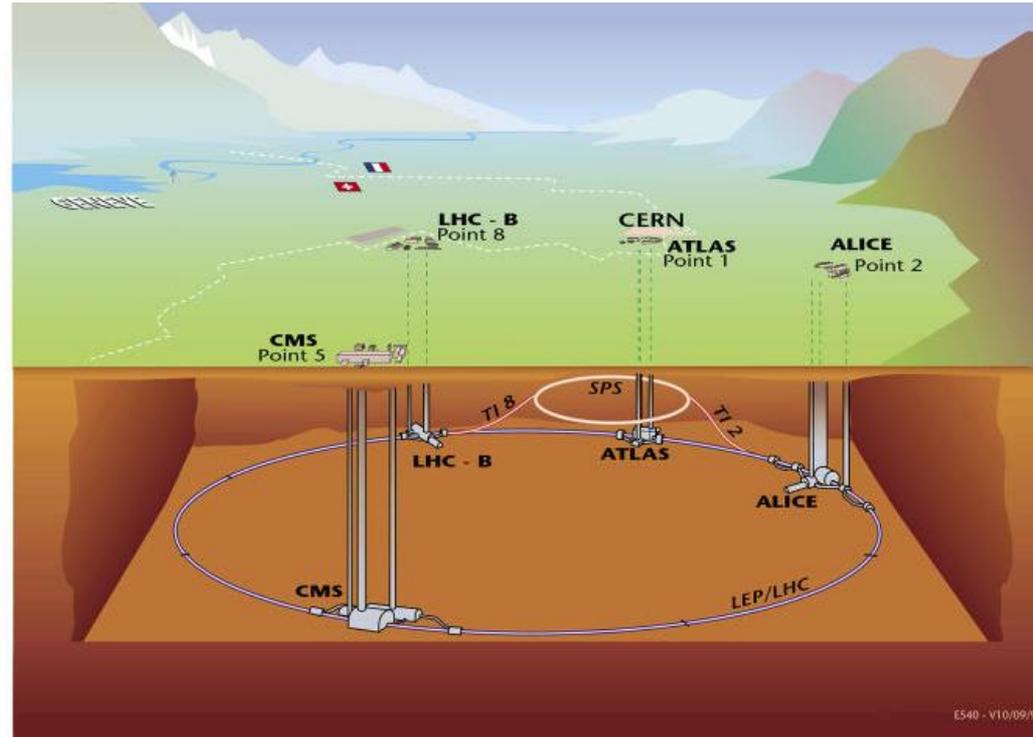
- Ablenkmagnete
- Magnete zur Fokussierung
- Injektionsmagnete (gepulst)
- Extraktionsmagnete (gepulst)
- Beschleunigungsstrecke
- Vakuumsystem
- Diagnostik
- Kontrollsystem
- Netzgeräte

Beispiele



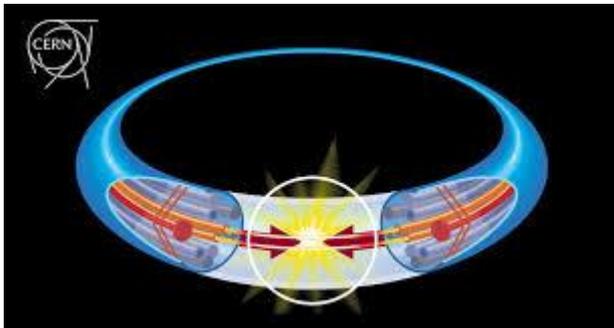
Stanford Linear Accelerator

Large Hadron Collider, CERN in Genf



In der Teilchenphysik (=Hochenergiephysik) nutzt man Beschleuniger, in denen **zwei Teilchenstrahlen kollidieren** (sog. „**Collider**“)

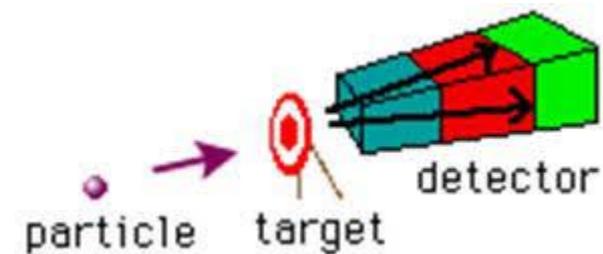
Collider-Prinzip



$$E_{cm} = \sqrt{(E_1 + E_2, \vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2} = 2 \cdot E_{\text{beam}}$$

höhere Energie im Schwerpunktsystem

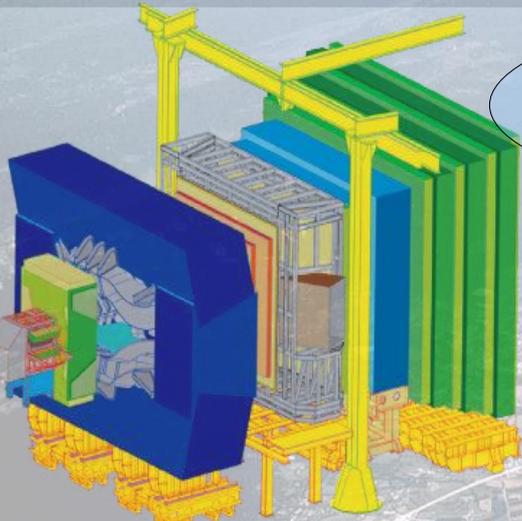
Fixed-Target



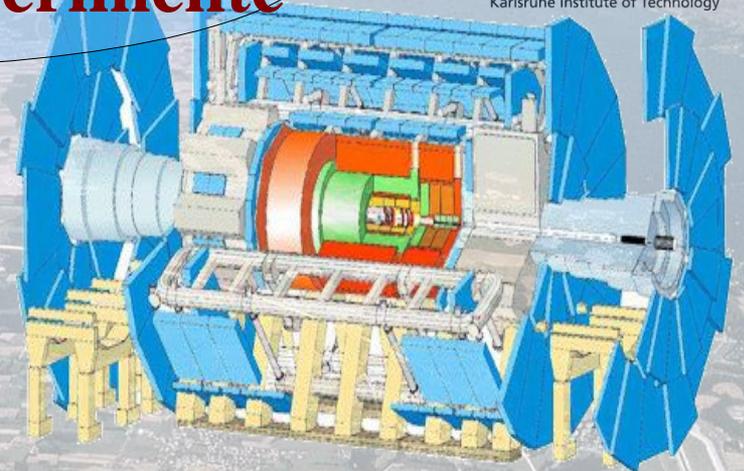
$$= \sqrt{2E_{\text{beam}}m_Tc^2 + m_T^2c^4 + m_p^2c^4}$$

höhere Kollisionsrate

Entdeckungsmaschine LHC & Experimente



LHCb

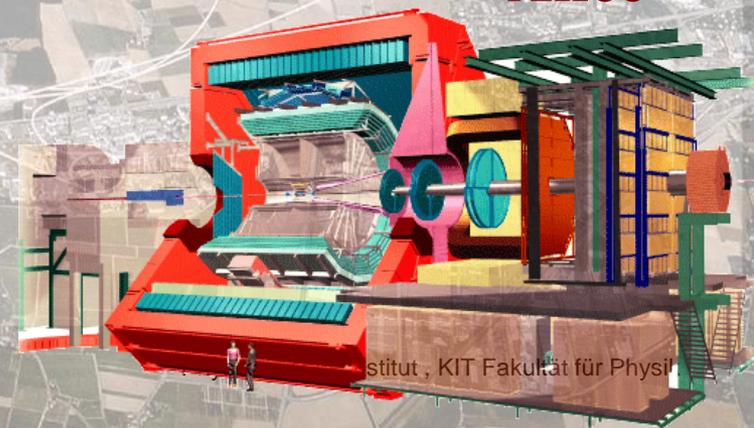


ATLAS

CERN



CMS 2023



Alice

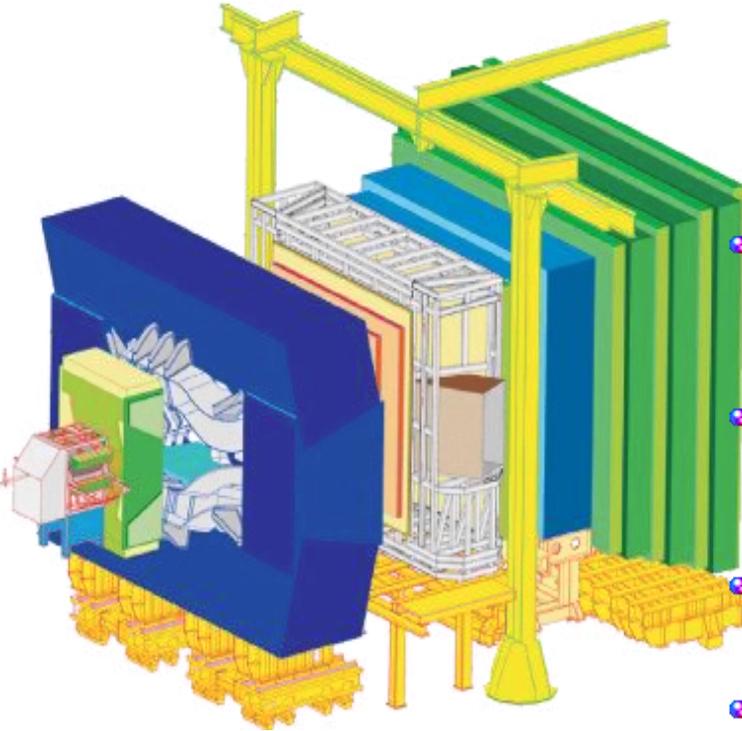


LHC-Magnete sind kalt: -271°C

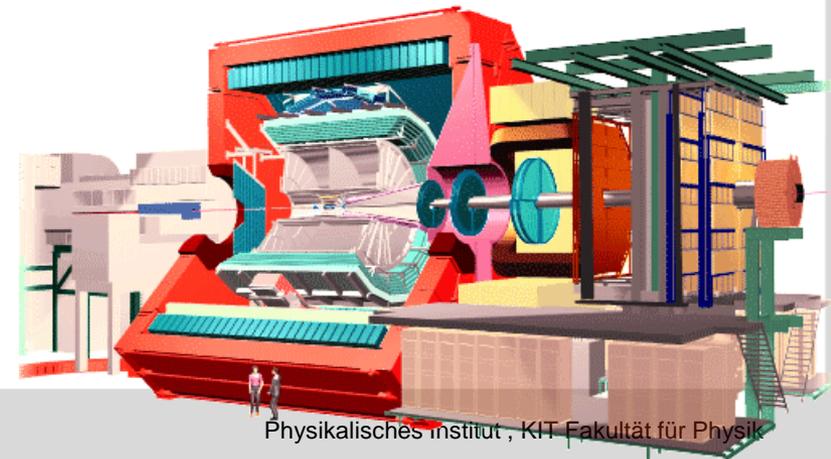
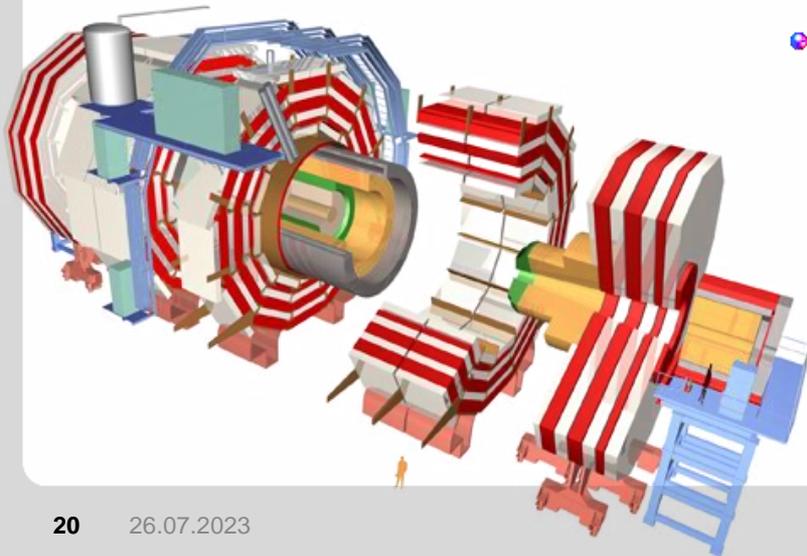
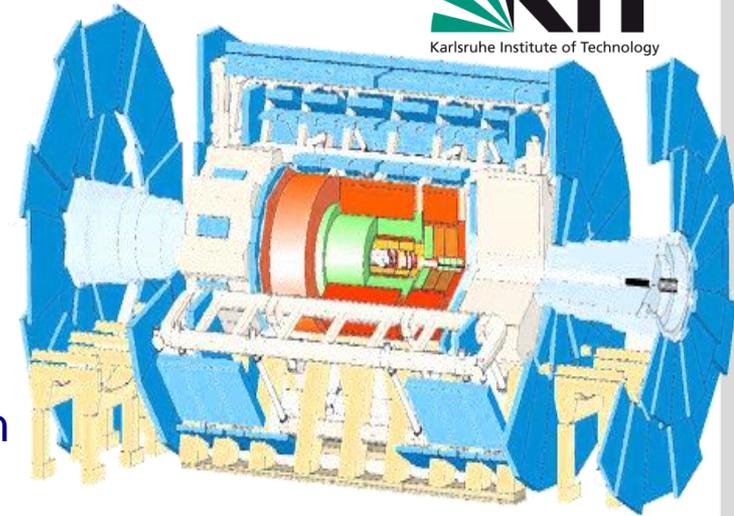


- Magnetfeld von 8,3 Tesla
 - insgesamt 1232 Stück, 15 m lang
 - 270'000 km Kabelstränge mit 6400 $7\mu\text{m}$ dicken supraleitenden Filamenten
 - Strom von 11'700 A
 - Betriebstemperatur von 1.9 K
- Der coolste Ring im Weltall !**

Die vier großen LHC Detektoren



- Gebaut von Instituten in der ganzen Welt
- Jeder hat mehr als 100 Millionen Sensoren
- 40 Millionen Aufnahmen von Kollisionen pro Sekunde
- Insgesamt etwa 10'000 Physiker aus ~70 Ländern
- Spezialisiert auf unterschiedliche Fragestellungen

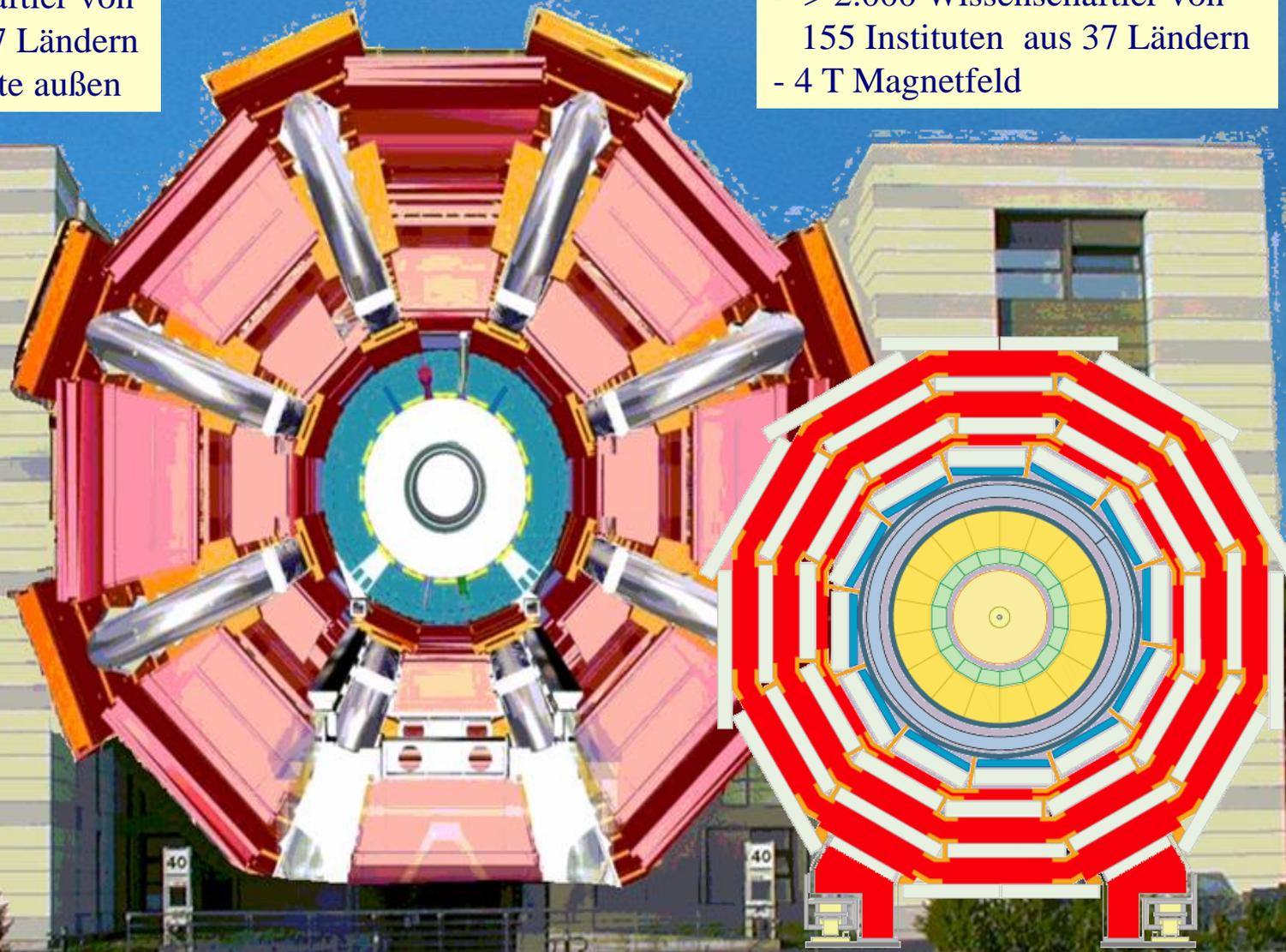


- 25 m hoch, 46 m lang
- 7.000 t schwer
- ca. 2.200 Wissenschaftler von 170 Instituten aus 37 Ländern
- große Toroid-Magnete außen

ATLAS & CMS

- die Universalisten

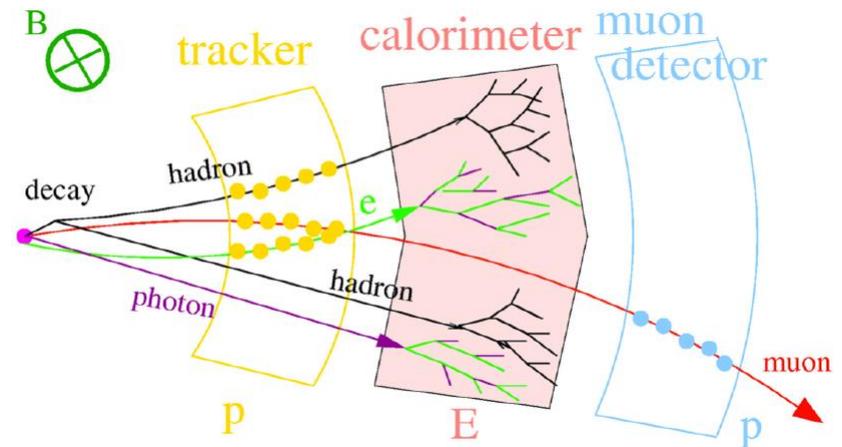
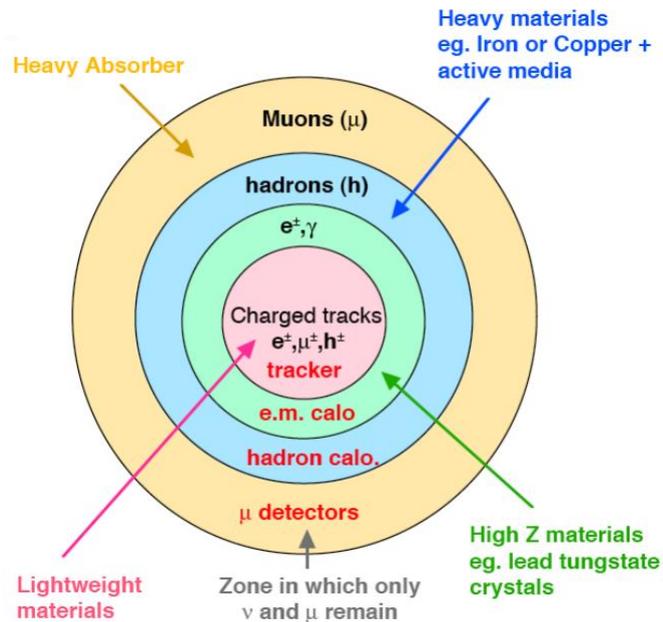
- 15 m hoch, 21 m lang
- 12.500 t schwer
- > 2.000 Wissenschaftler von 155 Instituten aus 37 Ländern
- 4 T Magnetfeld



Allgemeines Funktionsprinzip

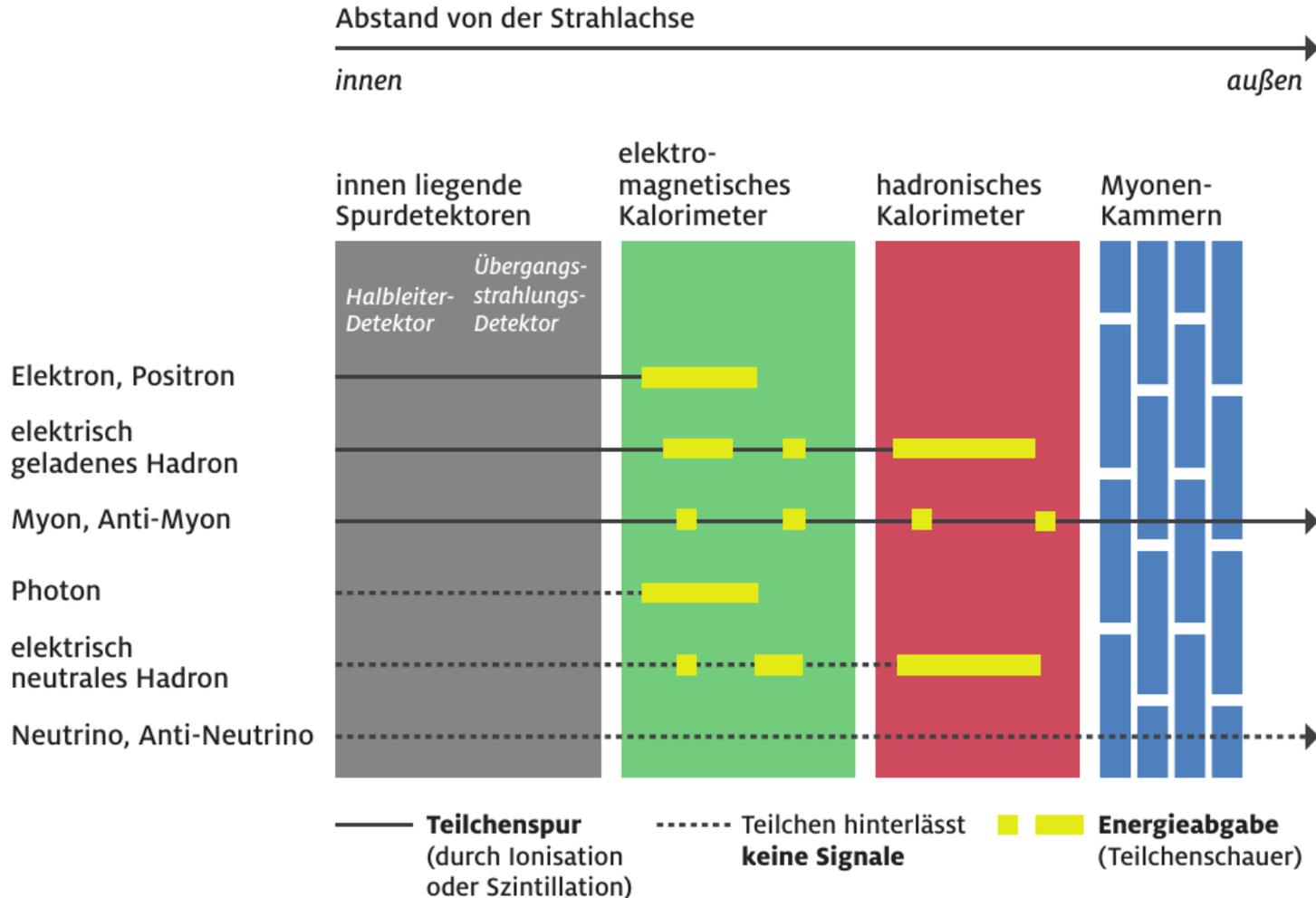
Kombination von Detektor-Komponenten

- Vertex- und Spurdetektoren
- elektromagnetisches Kalorimeter
- Hadronkalorimeter
- starkes Magnetfeld zur Impulsmessung
- Myon-System



Teilchennachweis und -identifikation

In Detektoren (direkt) nachgewiesen werden können nur Teilchen, die langlebig genug sind, um eine größere Strecke im Detektormaterial zurückzulegen



Der CMS Detektor

Multipurpose experiment

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
Pixel ($100 \times 150 \mu\text{m}$) $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
Microstrips ($80 \times 180 \mu\text{m}$) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

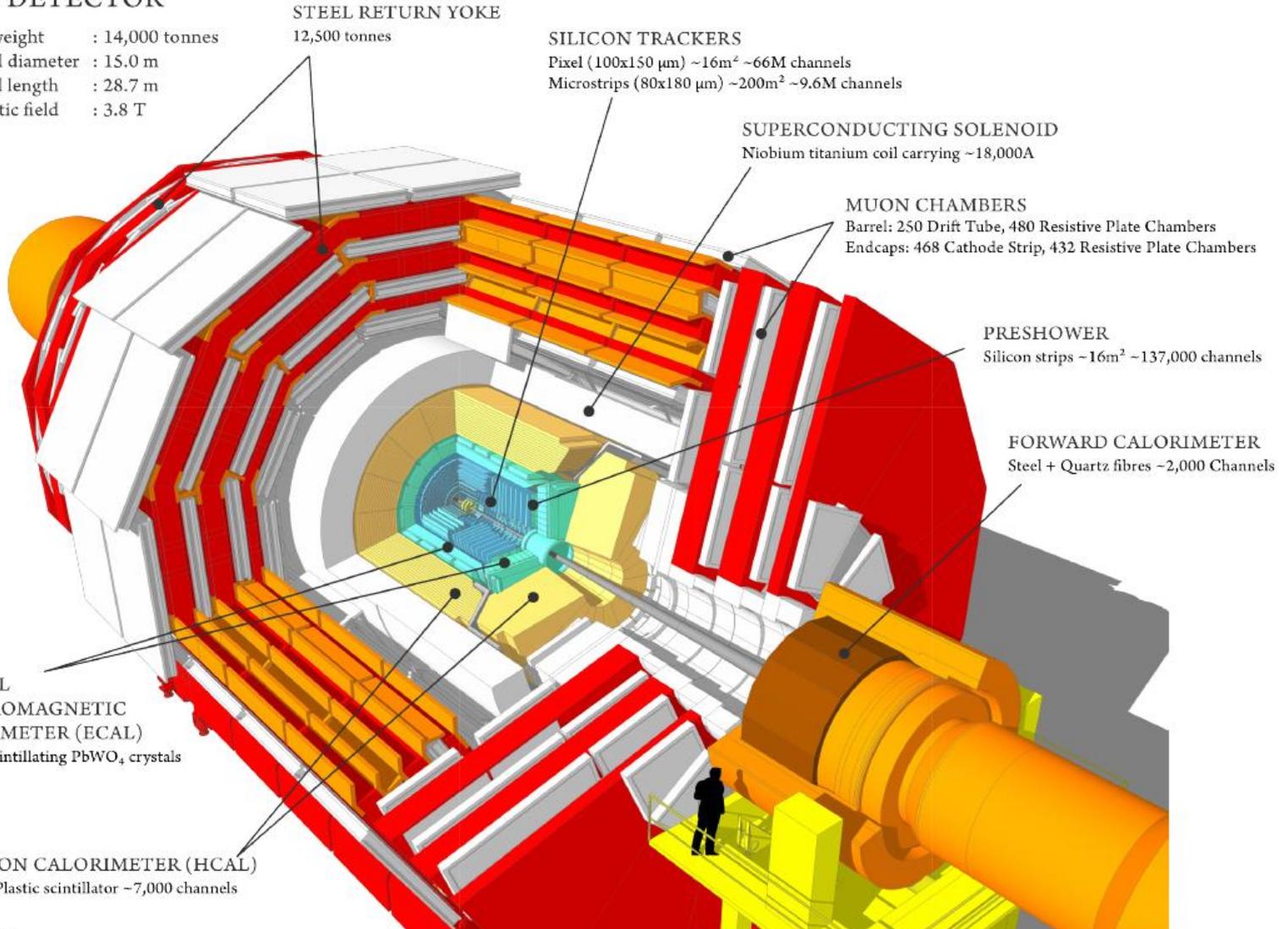
MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER
Silicon strips $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$ channels

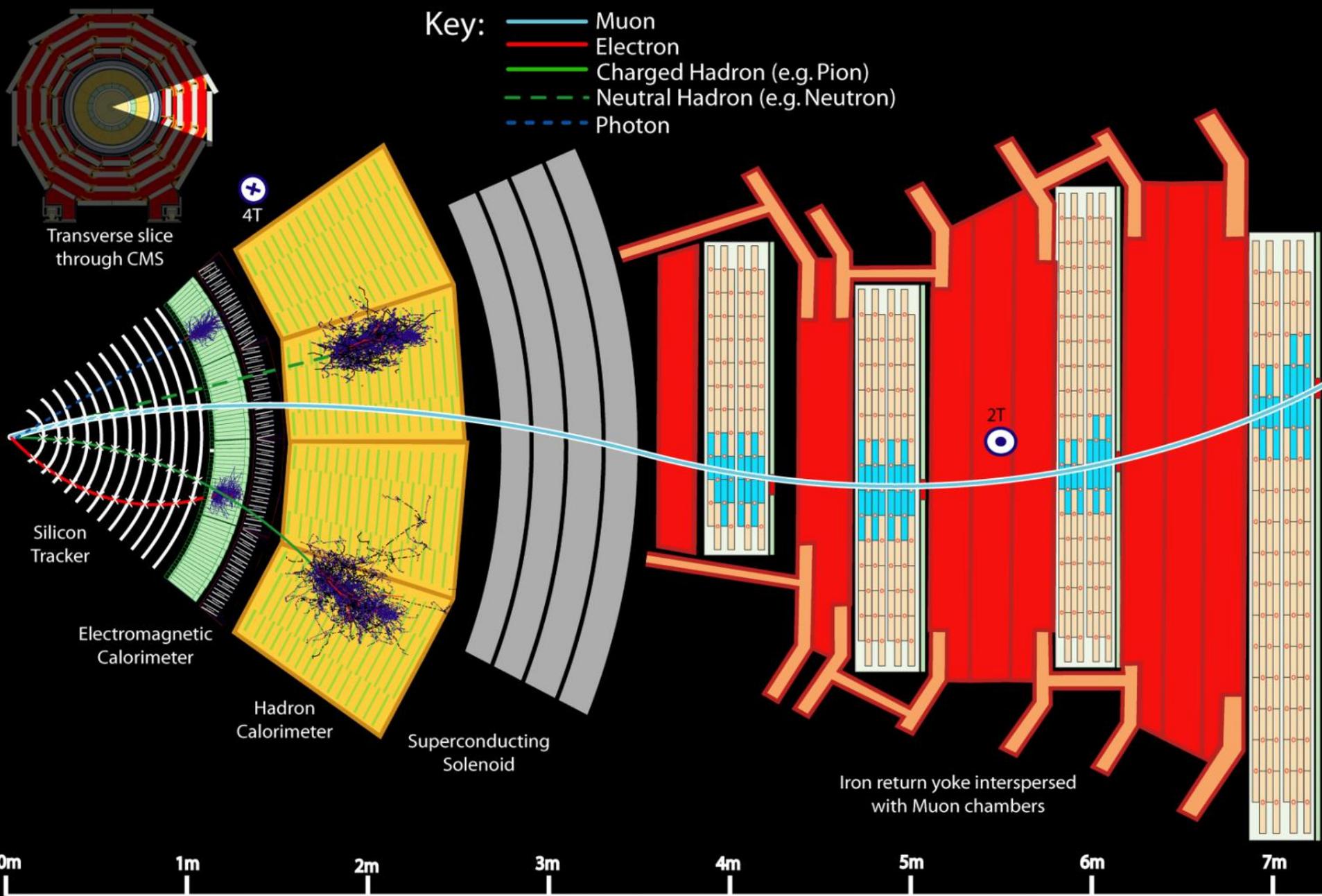
FORWARD CALORIMETER
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels

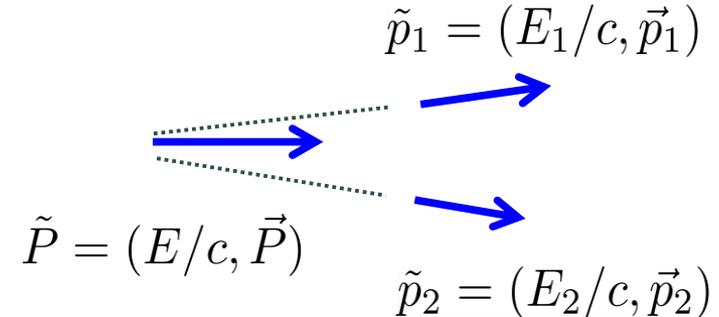


Funktionsprinzip eines Detektors: Ausschnitt aus CMS



Nachweis kurzlebiger Teilchen

instabile Teilchen werden über die relativistische invariante Masse ihrer Zerfallsprodukte identifiziert

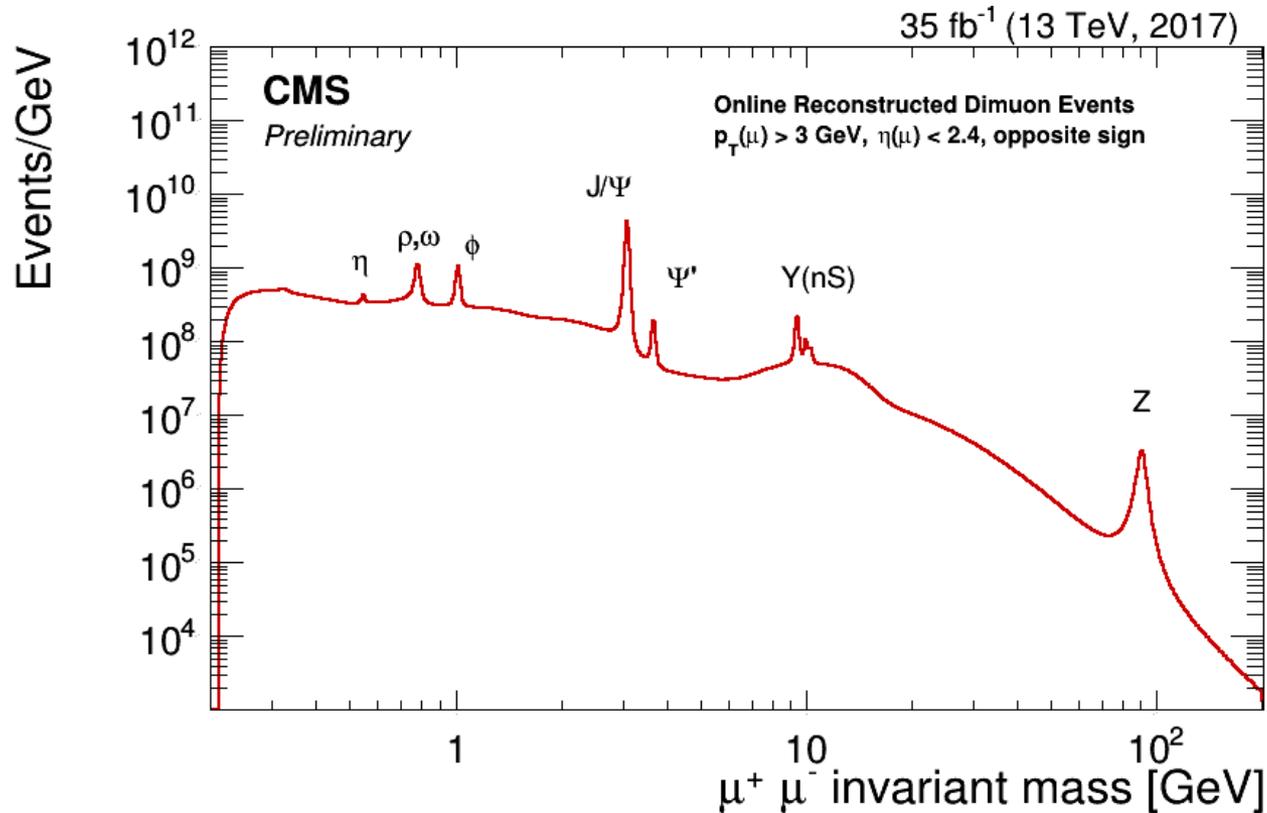


Viererimpulsquadrat der Tochterteilchen = Viererimpulsquadrat d. Mutterteilchens

→ Den Betrag der Summe der Impulse der Tochterteilchen nennt man „**invariante Masse**“

$$\tilde{p} = \begin{pmatrix} E/c \\ \vec{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m\gamma c \\ m\gamma \vec{v} \end{pmatrix}, \quad \tilde{p}^2 = M^2 c^2 = (\tilde{p}_1 + \tilde{p}_2)^2$$

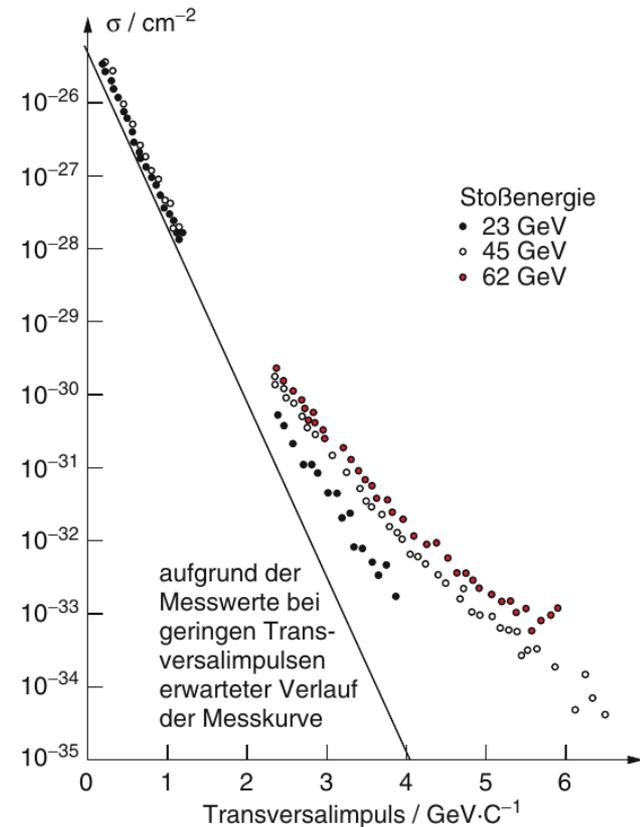
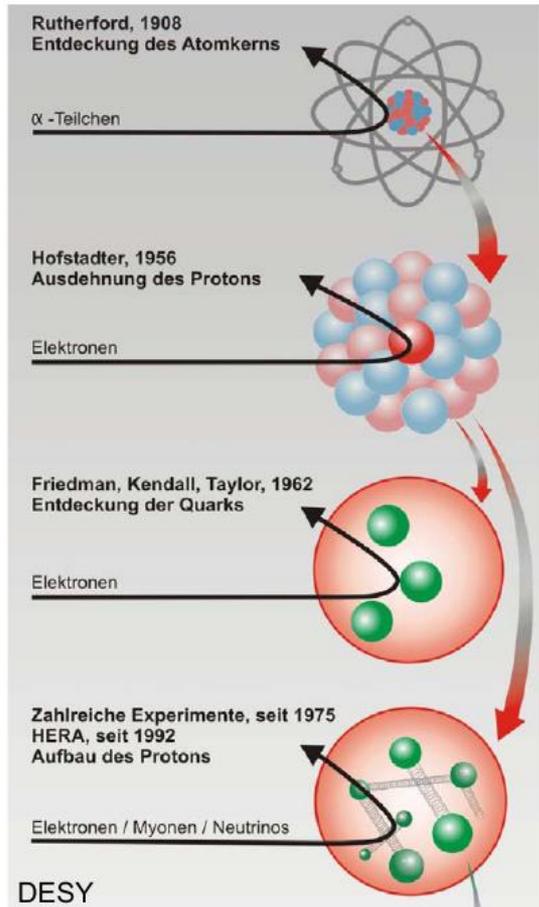
Nachweis kurzlebiger Teilchen: Massenverteilung



Verteilung der Invarianten Masse von Myon-Paaren

Das Innere des Protons

Streuexperimente bei hohen Energien zeigen, dass Protonen aus kleinen (punktförmigen) Bestandteilen aufgebaut sind.



Abweichung vom Punktteilchen
in der Proton-Proton-Streuung

Quarks

Beobachtung: Streuung an punktförmigen Streuzentren im Proton
zunächst als „Partonen“ bezeichnet, heute „**Quarks**“ genannt

Ergebnisse: Quarks tragen drittelzahlige Ladungen

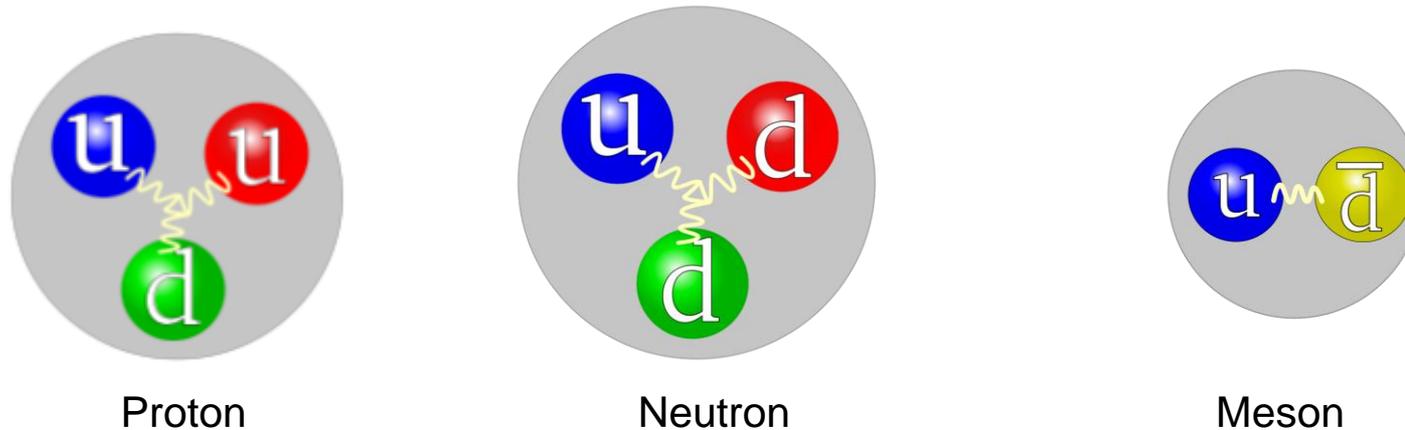
- „up-Quark“ $q = 2/3 e$
- „down-Quark“ $q = -1/3 e$

- Alle Quarks haben Spin = $1/2$ → Fermionen
- es wurden nie freie Teilchen mit drittelzahligen Ladungen beobachtet
→ Quarks sind auf das Innere von Hadronen beschränkt
(Quark Confinement)

Teilchen Baukasten

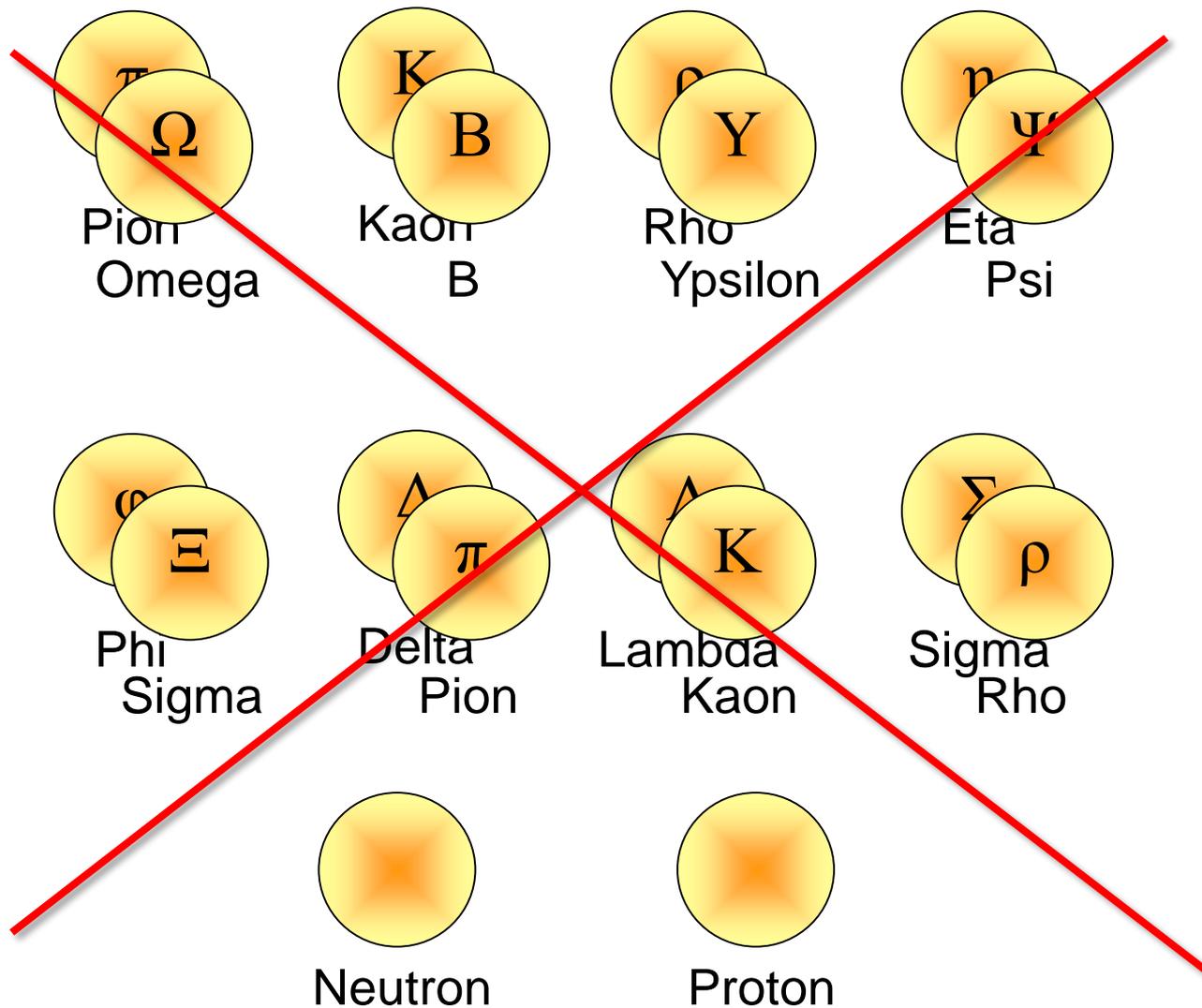
Hadronen: Stark wechselwirkende Teilchen

- Baryonen: Drei Quarks
- Mesonen: Ein Quark, ein Antiquark
- Neuerdings Pentaquarks: Gebundene Zustände mit 5 Quarks
- Alle Hadronen außer dem Proton und dem Antiproton sind instabil



damit kommt Struktur in den Teilchenzoo

Teilchenzoo



Elektron



Neutrino



Myon

Teilchenfamilien

1. Familie

2. Familie

3. Familie

Leptonen



Elektron

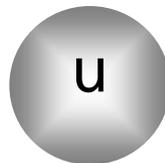


Myon

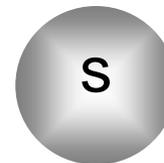


Tau

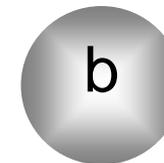
Quarks



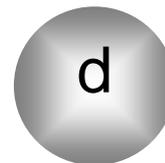
up



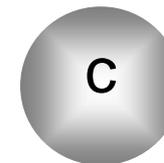
strange



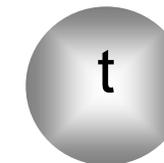
bottom



down



charm



top

- zu jedem Teilchen existiert ein Antiteilchen
- Quarks & Leptonen der 2. und 3. Familie sind instabil
- es gibt nur 3 Familien (z.B. aus Lebensdauer des Z^0)

Quantenzahlen und Erhaltungssätze

- **Baryonenzahl** $B = +1$ (Baryonen), -1 (Antibaryonen), 0 (Mesonen)
begründet Stabilität des Protons

- **Drehimpuls und Spin I**

- **Isospin T und Isospin Komponente T_3**
mit Ladungsquantenzahl $Q = q/e$ verknüpft

$$T_3 = Q - \frac{1}{2}B \quad (\text{Bsp. Proton: } Q = 1, B = 1, T_3 = \frac{1}{2})$$

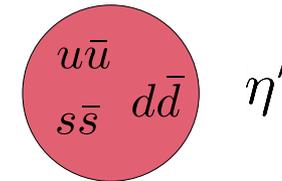
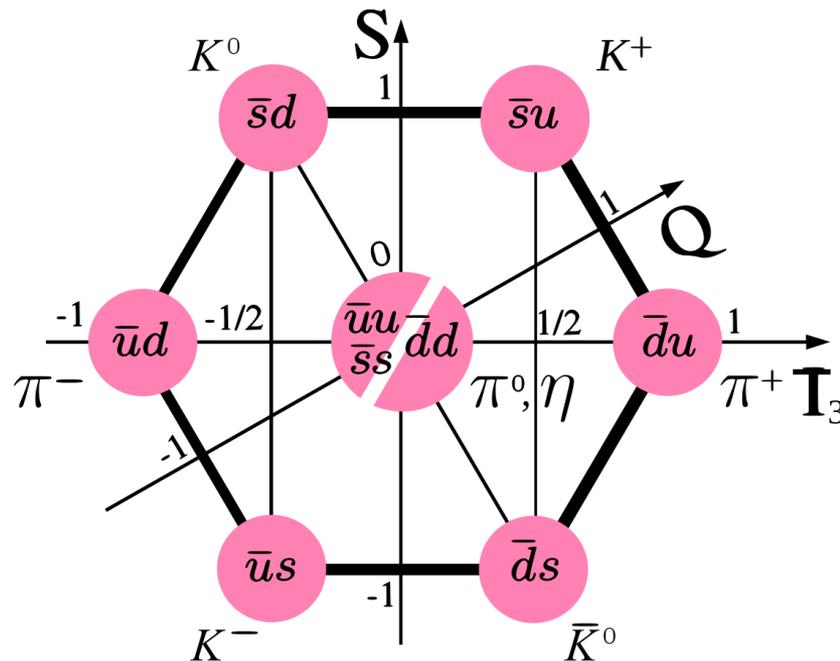
- **Seltsamkeit** $S = -1$ (strange Quark), $+1$ (anti-strange Quark)

$$Q = \frac{1}{2}(B + S) + T_3$$

- **Leptonenzahl** L_e, L_μ, L_τ innerhalb einer Familie erhalten

Teilchenbaukasten

- Aus Quarks lassen sich alle Hadronen aufbauen
- Beispiel: Mesonen aus den drei leichtesten Quarks u, d, s (fast gleiche Masse)
- Isospin $T_3 = +1/2$ für up & anti-down Quark, $-1/2$ für down & anti-up Quark
- Seltsamkeit $S = -1$ für strange-Quark, $+1$ für anti-strange Quark



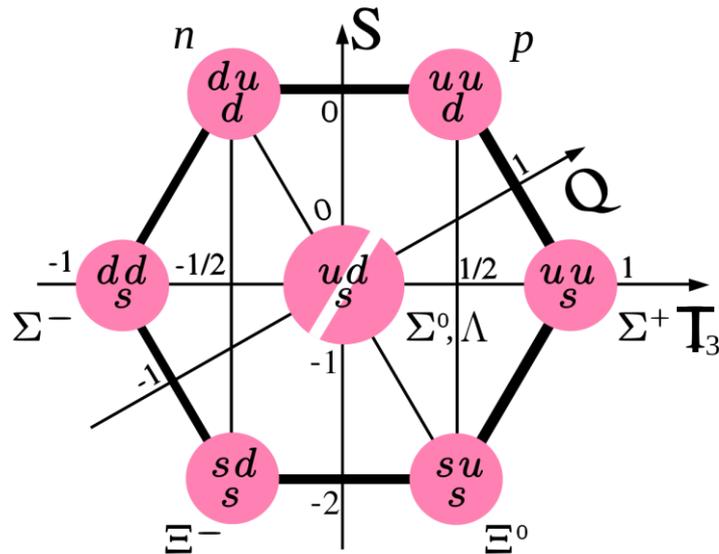
Singlett-Zustand

$$|\pi^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle)$$

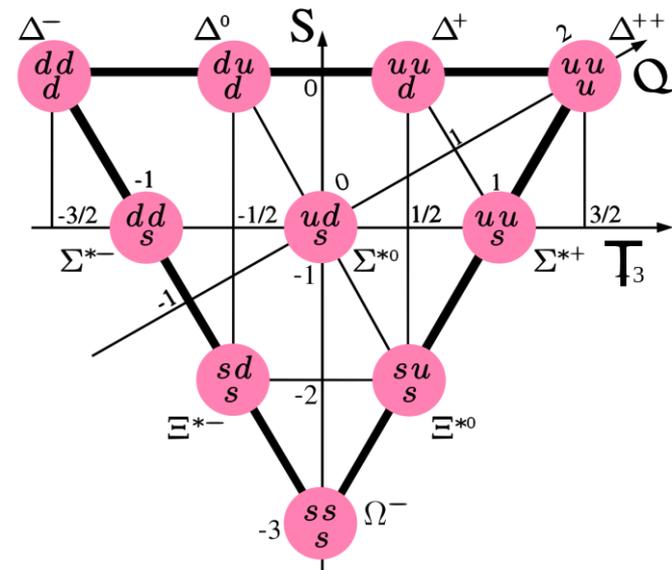
Teilchen ist sein eigenes Antiteilchen

Oktett-Anordnung der Spin-0-Mesonen

Teilchenbaukasten



Oktett-Anordnung der spin- $\frac{1}{2}$ -Baryonen



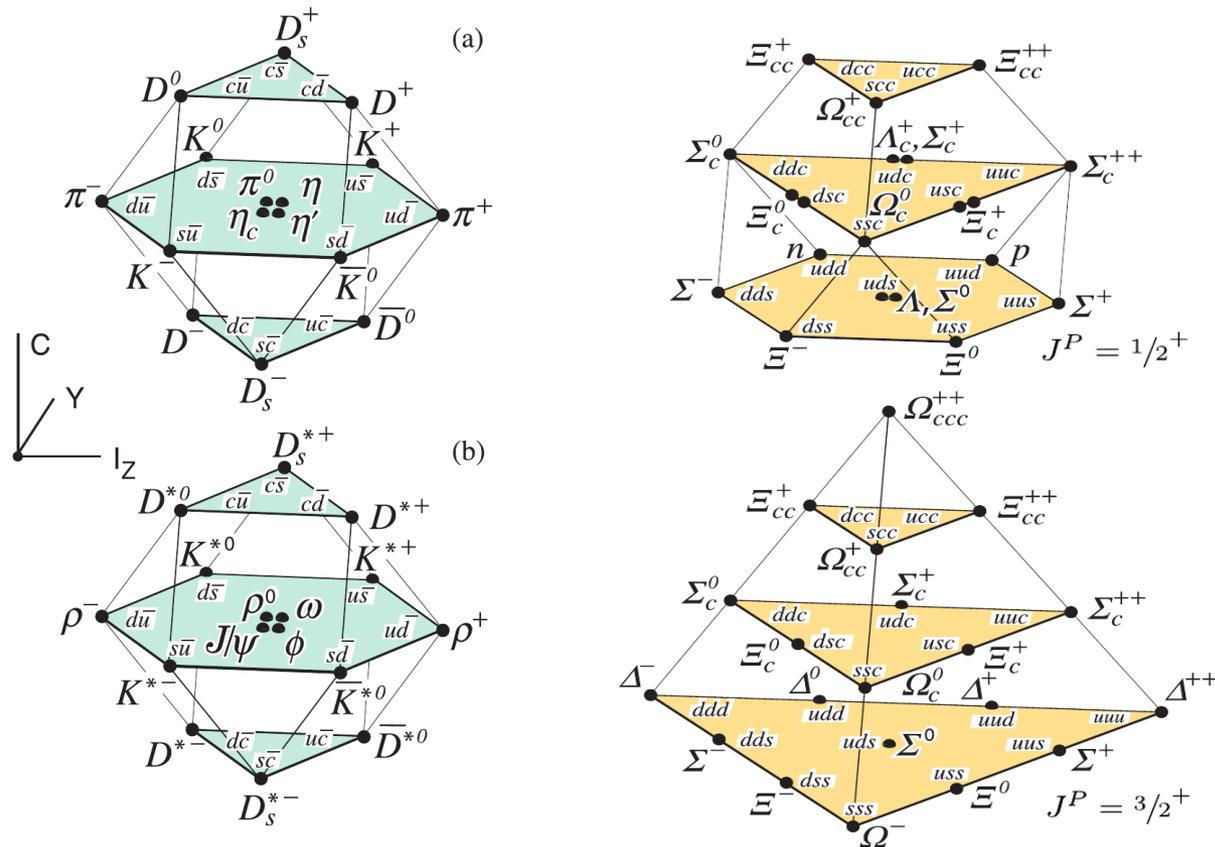
Dekuplett-Anordnung der spin- $\frac{3}{2}$ -Baryonen

Andere Zustände sind mit 3 Quarks nicht möglich, weil die Antisymmetrie der Gesamtwellenfunktion unter Austausch zweier Quarks nicht möglich wäre.

Zustände mit drei identischen Quarks mit parallelen Spins: nur möglich, wenn es eine weitere Quantenzahl gibt, die die Quarks unterscheidet !

→ **Hinweis auf Farb-Quantenzahl**

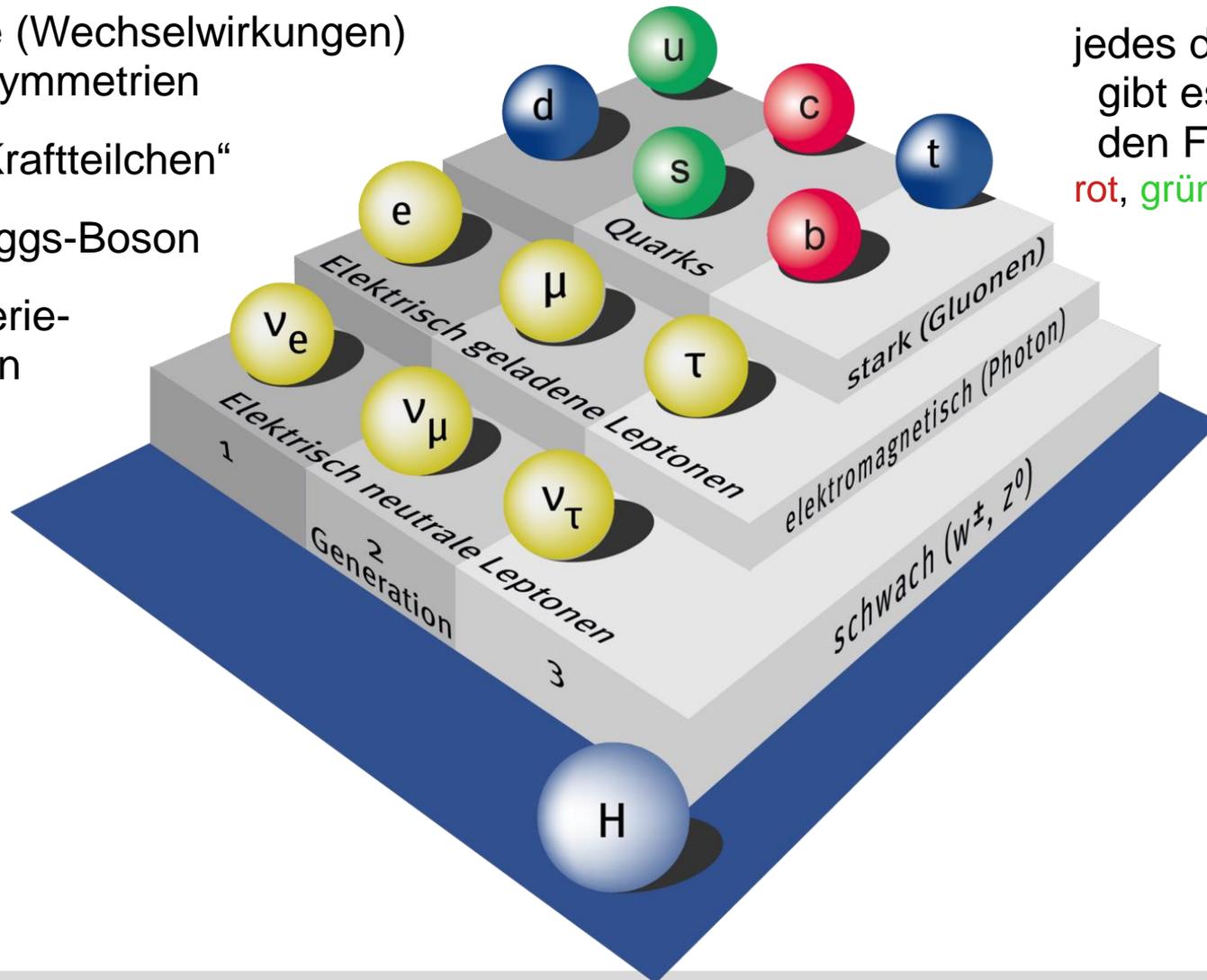
Teilchenbaukasten mit Charm Quarks



- Weitere Hadronen mit b-Quarks
- Lebensdauer des Top Quarks zu kurz um gebundene Zustände zu bilden

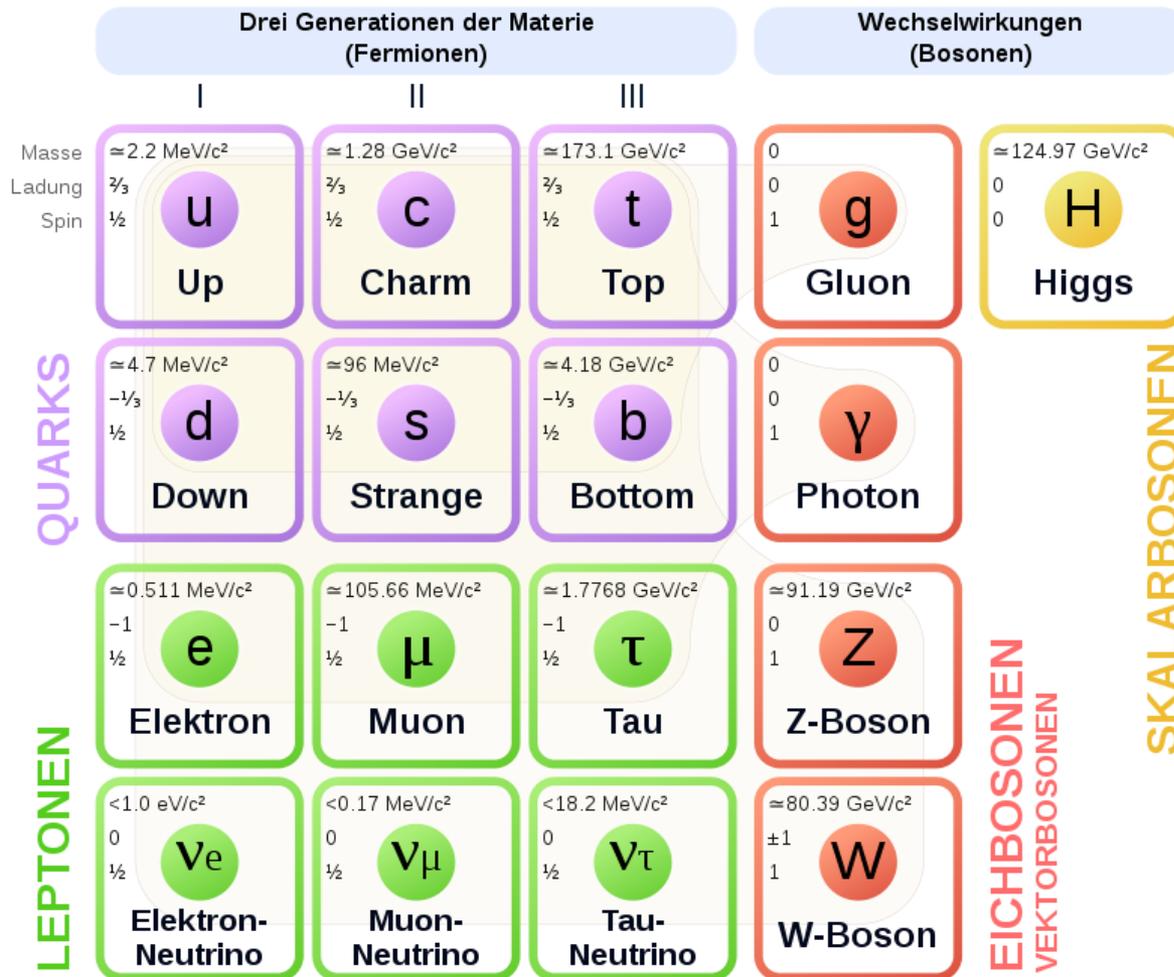
Teilchen und ihre Wechselwirkung

- 3 Kräfte (Wechselwirkungen) mit Symmetrien
- ⇒ 12 „Kraftteilchen“ & 1 Higgs-Boson
- 12 Materie-Teilchen



jedes der Quarks gibt es in den Farben rot, grün und blau

Teilchen und ihre Wechselwirkung



Die 4 fundamentalen Kräfte

Gravitation

- Wirkt auf alle Teilchen
- Wird nicht abgeschirmt, unendliche Reichweite

Elektromagnetische Wechselwirkung

- Bestimmt alle mechanischen Kräfte, Atombau, Moleküle, Festkörper

Starke Wechselwirkung

- Reichweite auf nuklearer Skala
- sorgt für Stabilität der Atomkerne
- führt zu gebundenen Zuständen von Quarks

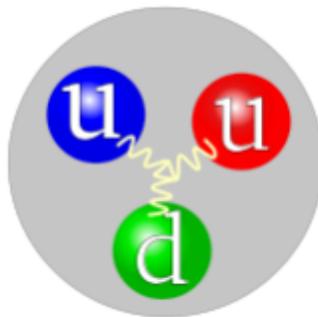
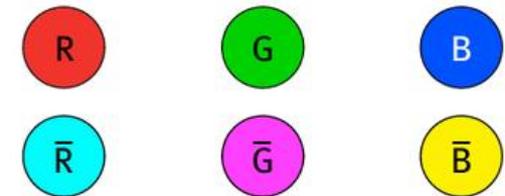
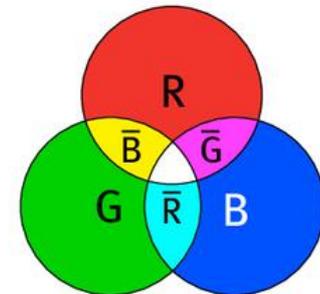
Schwache Wechselwirkung

- Kurze Reichweite, sub-nukleare Skala

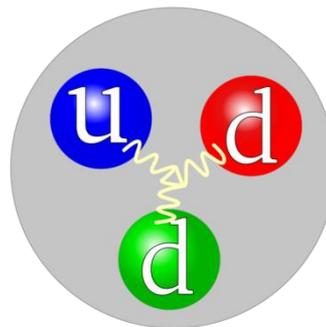
Starke Wechselwirkung

Quantenchromodynamik (QCD)

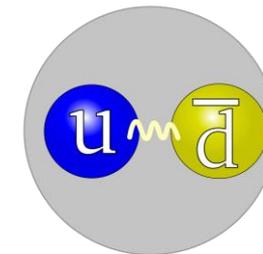
- Quarks können drei Farbladungen tragen:
rot, grün, blau (r,g,b)
- Alle Farbladungen zusammen ergeben einen farb-ungeladenen Zustand ($r + g + b = \text{weiß}$)
- Farb- und Anti-Farbladungen neutralisieren sich
- Man beobachtet keine freien Farbladungen
→ Hadronen sind farbneutral



Proton



Neutron



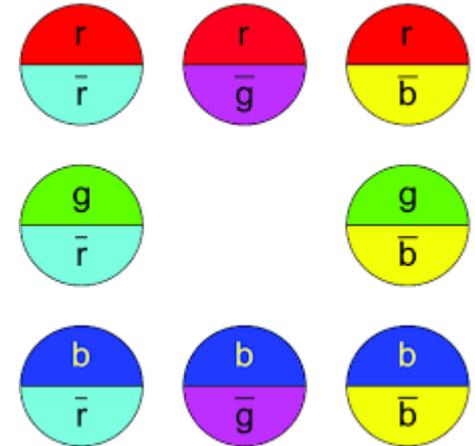
Meson

Gluonen

Quarks tauschen Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung aus

Gluonen („Klebeteilchen“)

- Masselose Vektorbosonen
- tragen eine Farb- und eine Antifarbladung
 - ein Gluon wandelt die Farbladung eines Quarks um.
- Drei Farben → $3 \times 3 = 9$ Paarungen – eine davon ist farbneutral, die andern acht entsprechen den 8 Gluonen der starken Wechselwirkung
- Gluonen wechselwirken mit anderen Gluonen (Gluon-Selbstwechselwirkung) – anders als das Licht!

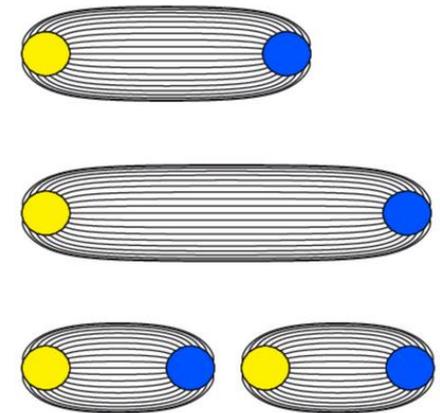
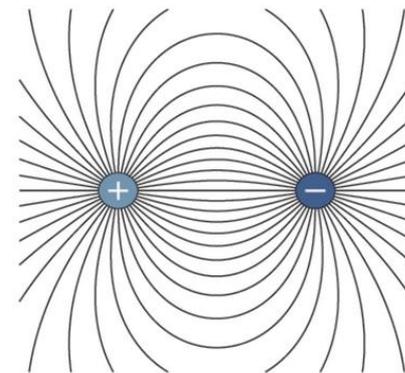
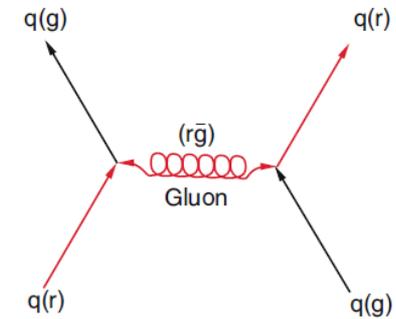


Gluonen

Farb-Wechselwirkung zwischen Quarks

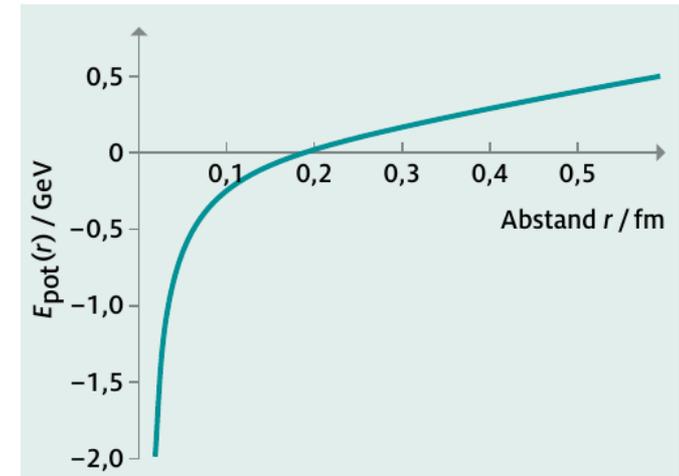
- Quark sendet Gluon aus und ändert seine Farbe
- Partner Quark absorbiert Gluon, ändert Farbe so dass die Änderung sich kompensiert
- Führt zu Bindungskraft zwischen Quarks

- Entfernt man Quarks voneinander, bleibt das Gluonfeld auf einen Schlauch begrenzt wg. Selbstwechselwirkung
- hohe potentielle Energie führt zu neuen Quark-Antiquark Paaren
- Bildung von Mesonen & Baryonen

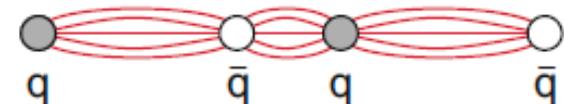


Starke Wechselwirkung

- Die potentielle Energie zwischen zwei Quarks erreicht keinen maximalen Wert, sondern steigt für große Abstände immer weiter an.
→ Gummiband, „Quark Confinement“
- Wenn die potentielle Energie größer wird als die Masse eines Quark- Antiquark-Paares, entstehen neue Paare, die den Abstand verkürzen und die potentielle Energie verringern.



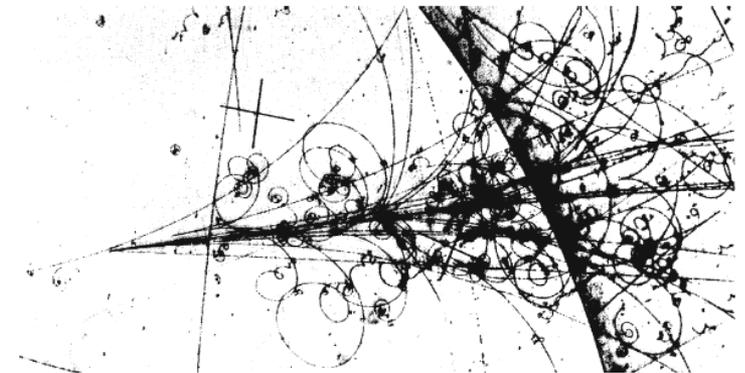
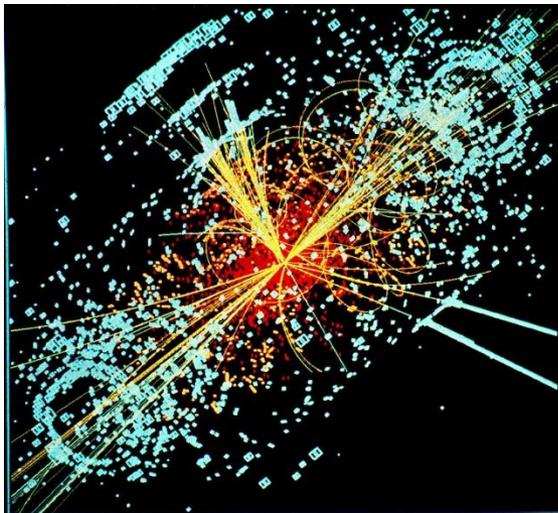
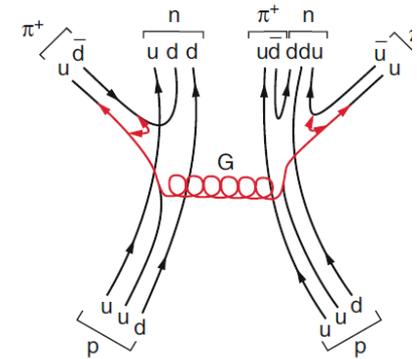
Potenzielle Energie zwischen zwei Quarks als Funktion des Abstands



Erzeugung von Quark-Antiquark Paaren

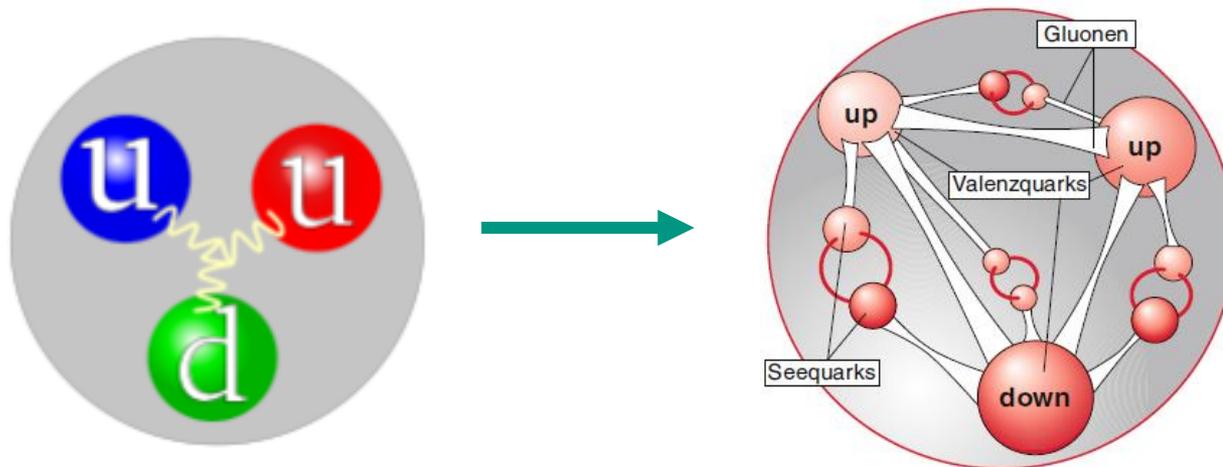
Stöße von Teilchen bei hohen Energien erzeugen
ggf sehr viele farblose Hadronen

→ Teilchen-Jets



Struktur des Protons

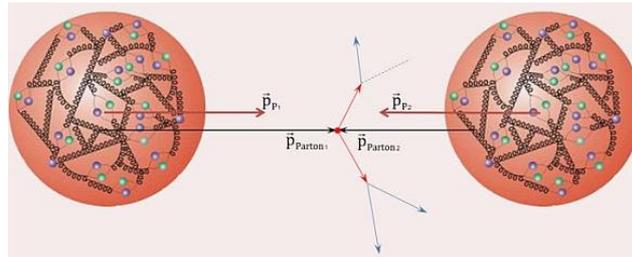
- Die Quarks die die Quantenzahlen der Nukleonen bestimmen nennt man **Valenzquarks**
- Wechselwirkung der Quarks mit den Gluonen führt zu virtuellen Quark-Antiquark-Paaren, den Seequarks
- diese werden ständig erzeugt & vernichtet



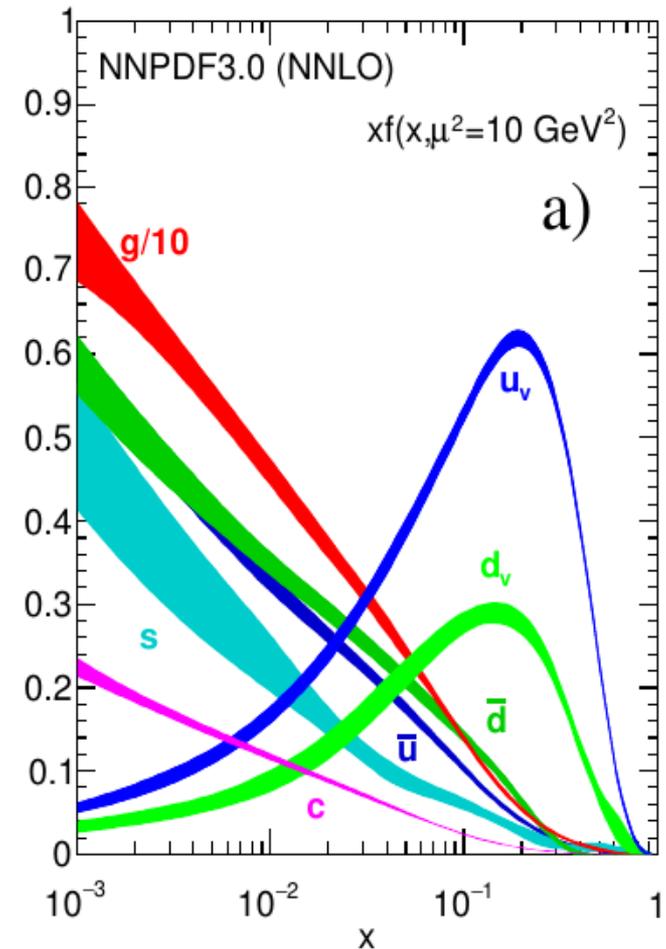
Struktur des Protons

Bei Streuexperimenten mit Protonen wird mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit an einem

- Valenzquark
- Gluon
- Seequark gestreut



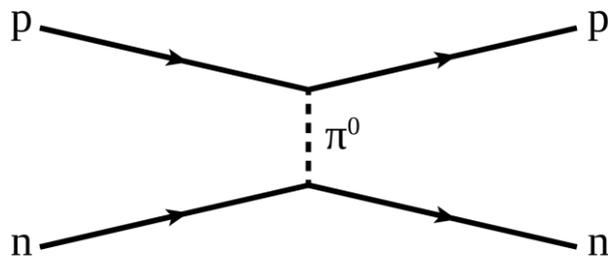
- Verteilung hängt von der Energie ab
- Verteilung der Partonen im Proton kann nicht theoretisch vorhergesagt werden, muss experimentell bestimmt werden
- Häufigste Reaktion bei Proton-Proton Kollisionen am LHC: Gluon – Gluon Streuung
- → LHC ist ein Gluon Kollider



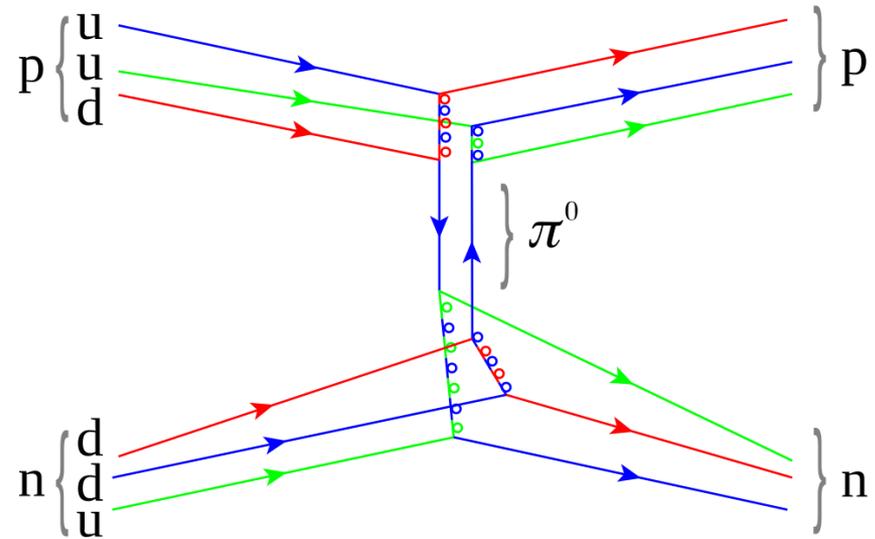
Verteilung der Impulsanteile x der Partonen im Proton

Gluonen und die Kernkraft

Starke Wechselwirkung zwischen Nukleonen über Farb-neutrale π -Mesonen
 → die Kernkraft ist eine Restwechselwirkung der nicht vollständig kompensierten Farbkraft



\cong



- viele weitere mögliche Diagramme, u.a. mit mehr Gluonen
- Vollständige Beschreibung der Kernkraft mit der QCD bisher nicht gelungen

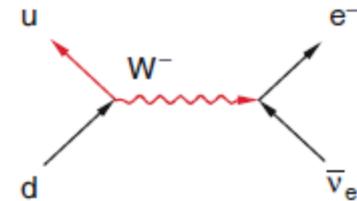
Schwache Wechselwirkung

β Zerfall durch schwache Wechselwirkung

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$(udd) \rightarrow (uud) + e^- + \bar{\nu}_e$$

- Umwandlung eines d -Quarks in ein u -Quark
- „geladener Strom“ \rightarrow geladenes Austauschteilchen: **W - Boson**



Weiterer, „neutraler Strom“: z.B.

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

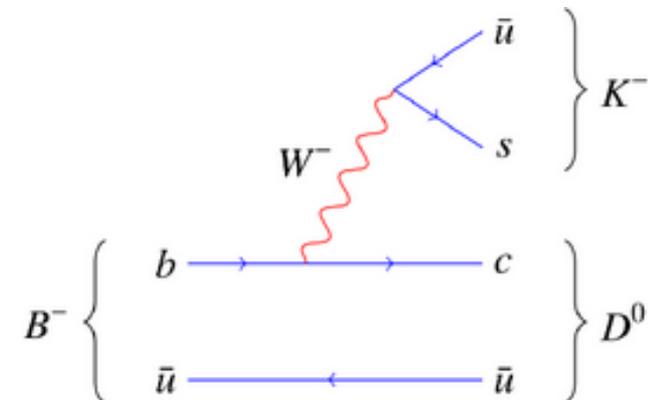
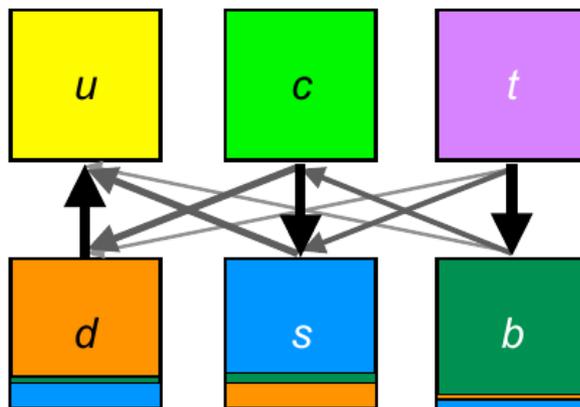
- neutrales Austauschteilchen: **Z⁰ Boson**
- Kurze Reichweite \rightarrow große Masse ($\sim 90\text{GeV}$)

Schwache Ladung

- Teilchen mit schwacher Ladung (Quantenzahl schwacher Isospin I , $I_3 = \pm \frac{1}{2}$) tauschen W und Z Bosonen aus

Schwache Wechselwirkung

- Bei Austausch von W-Bosonen wird der Fermion-Typ geändert (sogenannter „flavour“)
- Man beobachtet auch schwächere Übergänge zwischen Quarks verschiedener Generationen
 - Ursache von schwachen Zerfällen von Hadronen mit schweren Quarks
 - die schwache WW mischt die Quark Generationen

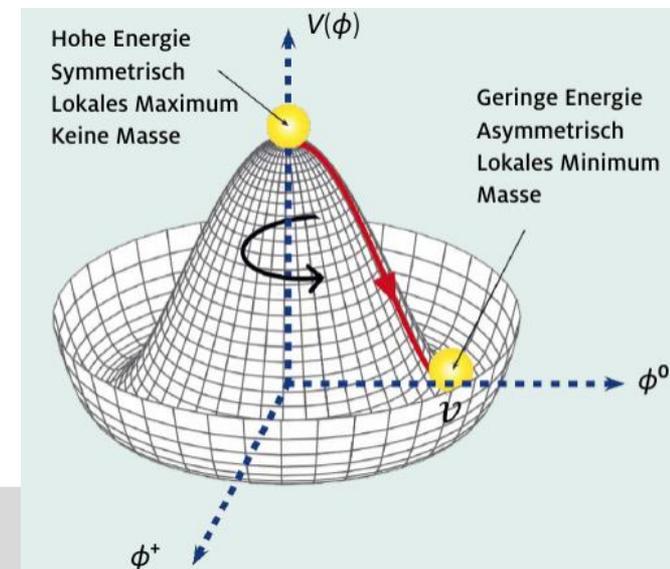


Schwache Wechselwirkung

- Grundlegendes Problem mit der Quantenfeldtheorie: Austauscheteilchen müssen masselos sein
- Widerspruch zur kurzen Reichweite der schwachen WW, große Masse der W und Z-Bosonen
- gelöst durch den Brout-Englert-Higgs Mechanismus
 - Postulierung des **Higgs Bosons H**
- 2012 am CERN entdeckt, Nobelpreis 2013
- Neues Quantenfeld mit speziellem Potential
- erzeugt Masse für W und Z Boson sowie alle anderen Teilchenmassen
- H hat selbst hohe Masse $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$



François Englert Peter W. Higgs



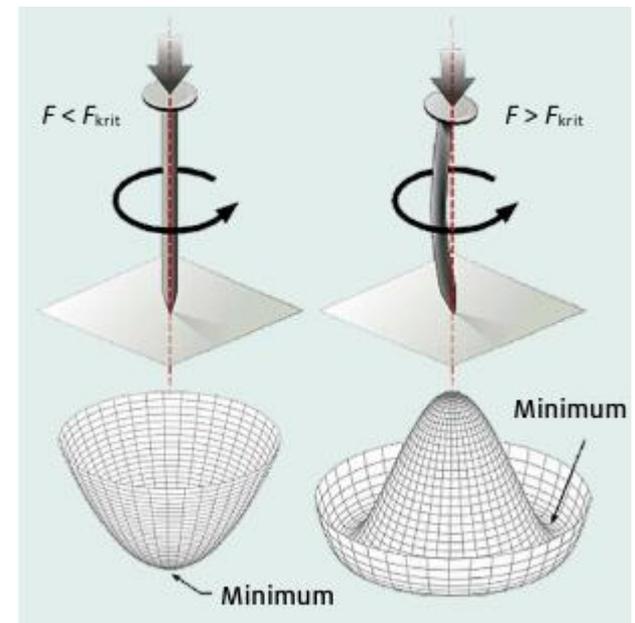
Schwache Wechselwirkung

Spontane Symmetriebrechung

- Zustand niedrigster Energie hat nicht die Symmetrie des Potentials

Analogie: elastischer Nagel

- Links: rotationssymmetrisch
- Rechts: eine zufällige Richtung ausgezeichnet
- die potentielle Energie bleibt in beiden Fällen rotationssymmetrisch

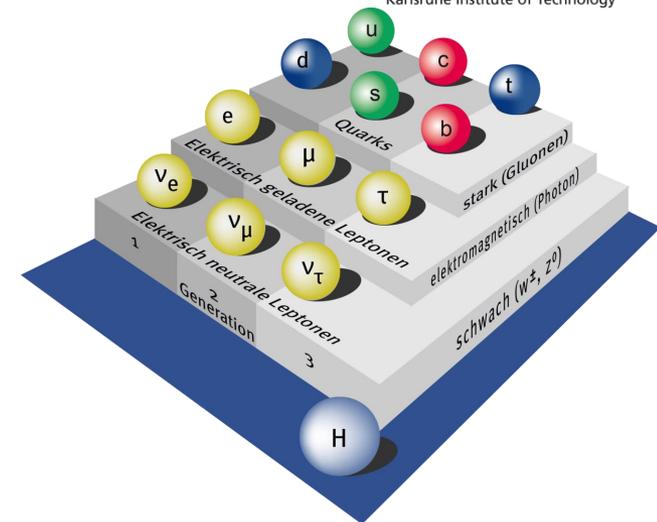


Das Standardmodell

- Konsistente theoretische Beschreibung der fundamentalen Teilchen und Kräfte
- **Ausnahme: Gravitation!**
- Vereinheitlichung der elektromagnetischen und schwachen Kraft in der elektroschwachen Theorie
- Beruht auf grundlegenden Symmetrien – elegant und schön
- Bis heute alle Präzisionstests bestanden
- Teilchenmassen durch Higgs Mechanismus

- Viele weitere offene Fragen (Gravitation, dunkle Materie & Energie, ...)

- erfordern neue Physik jenseits des Standardmodells



Teilchenphysik: Literatur für Lehrkräfte

<https://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/>

