

# Forschungsmethoden in der Teilchenphysik I

Fachvortrag



# Basierend auf Band 2:

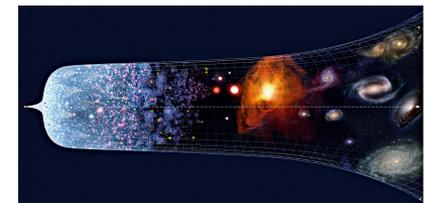
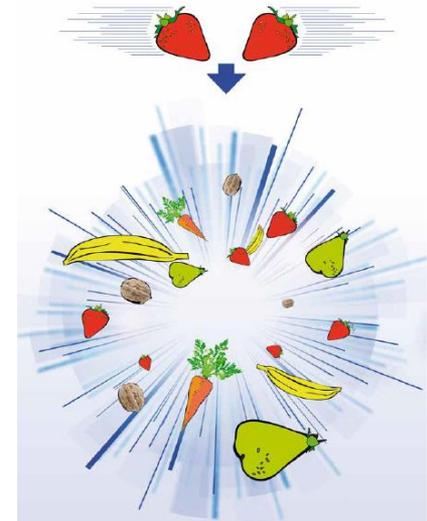
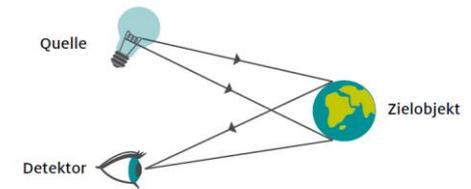
- ▶ Forschungsziele
- ▶ Beschleuniger
- ▶ Detektoren *(nach der Pause)*
- ▶ Zahlreiche Aufgaben & Lösungen



- Online [www.teilchenwelt.de/tp](http://www.teilchenwelt.de/tp)
- Druckexemplar Bestellbar bei Netzwerk Teilchenwelt

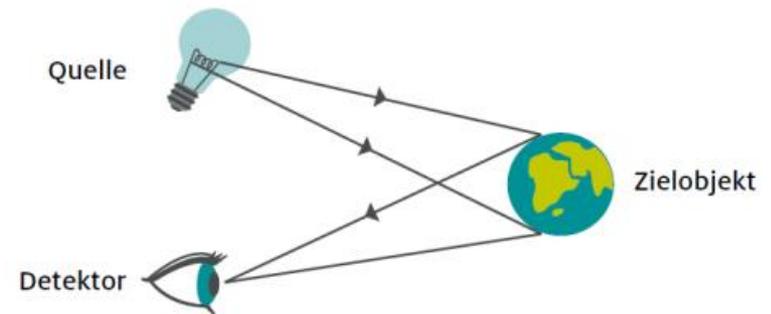
# Forschungsziele

- ▶ Strukturuntersuchungen
- ▶ Erzeugung bisher unbekannter Teilchen
- ▶ Erzeugung extremer Bedingung



# Strukturuntersuchungen

- ▶ Das Prinzip der Beobachtung von Objekten und Strukturen hat dabei immer drei Komponenten
  - Projektile, die aus einer Quelle auf das Zielobjekt treffen (z. B. Photonen aus einer Lichtquelle)
  - Das Zielobjekt, das die Projektile reflektiert oder streut (z. B. ein Ball)
  - Einen Detektor, der die gestreuten Projektile nachweist (z. B. Auge)

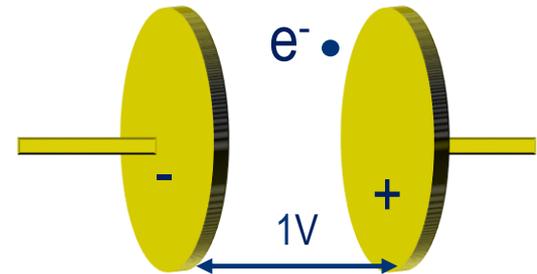


# Strukturuntersuchungen

- ▶ Auflösungsgrenze, hängt davon ab wie genau sich das Projektil lokalisieren lässt, mit dem das zu beobachtende Objekt abgetastet wird.
- ▶ Bei Licht entspricht diese der Wellenlänge
- ▶  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h \cdot c}{E}$ 
  - Grenze für optisches Licht ~400 nm
  - Wie also kleinere Objekte auflösen?

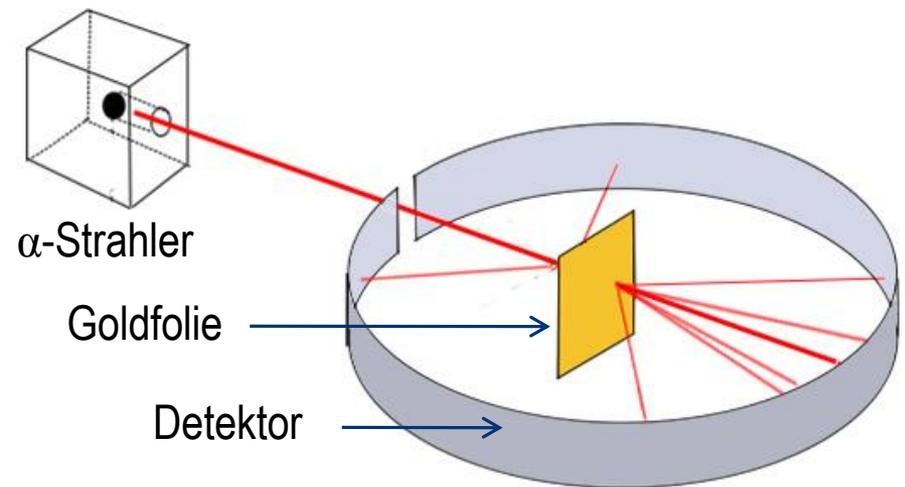
# Einschub: Elektronenvolt

- ▶ 1 eV ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Spannungsdifferenz 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  $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$

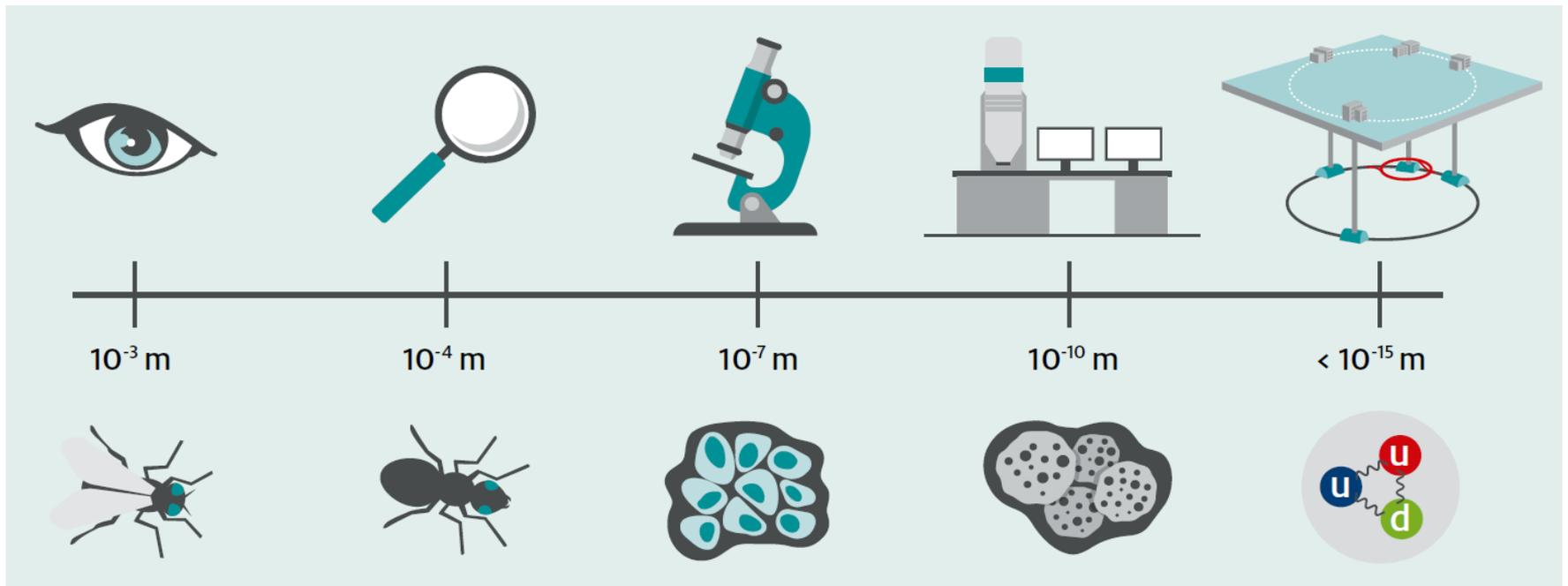


# Strukturuntersuchungen

- ▶ Rutherford-Streuexperiment (1911)
  - Nachweis des Atomkerns
- ▶ Streuung von  $\alpha$ -Teilchen an Goldatomen
- ▶ Energie des  $\alpha$ -Teilchen einige MeV
- ▶  $\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{200 \text{ MeV fm}}{\text{MeV}} = \sim 200 \text{ fm}$ 
  - Größe eines Protons  $\sim 1 \text{ fm}$
- ▶ Um kleine Strukturen aufzulösen benötigt man mehr Energie

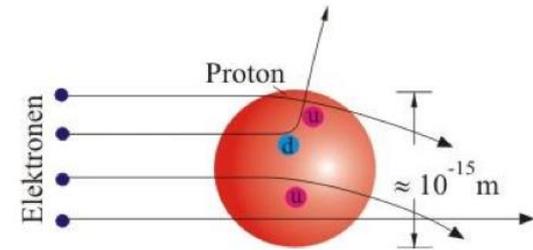


# Strukturuntersuchungen



# Strukturuntersuchungen

- ▶ Experiment am SLAC (1969)
  - Nachweis der Quarks
  - Nobelpreis 1990: Friedman, Kendall, und Taylor.
- ▶ Streuung von Elektronen an Protonen
- ▶ Elektronen Energie bis zu 50 GeV
- ▶  $\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{200 \text{ MeV fm}}{50 \text{ GeV}} = \sim 0.01 \text{ fm}$
- ▶ Um (noch) kleiner Strukturen aufzulösen benötigt man (noch) mehr Energie



3,2 km

# Erzeugung „neuer“ Teilchen

- ▶ Teilchenphysik versucht (bisher unbekannte, meist schwere) Teilchen zu erzeugen
- ▶ Annahme: 2 Teilchen kollidieren, annihilieren und ihre totale Energie  $E_{\text{tot}} = E_{\text{kin}} + E_0$  steht zur Verfügung

- ▶ Proton + Antiproton mit je  $E_{\text{kin}} = 50\text{GeV}$

- Energie im Schwerpunktsystem

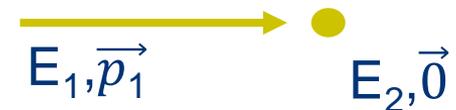
$$E_{cm} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2} = \sim 100\text{GeV}$$



- ▶ Proton mit  $E_{\text{kin}} = 50\text{GeV}$  trifft auf ruhendes Antiproton

- Energie im Schwerpunktsystem

$$E_{cm} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2E_{1lab}m_2} = \sim 7\text{GeV}$$



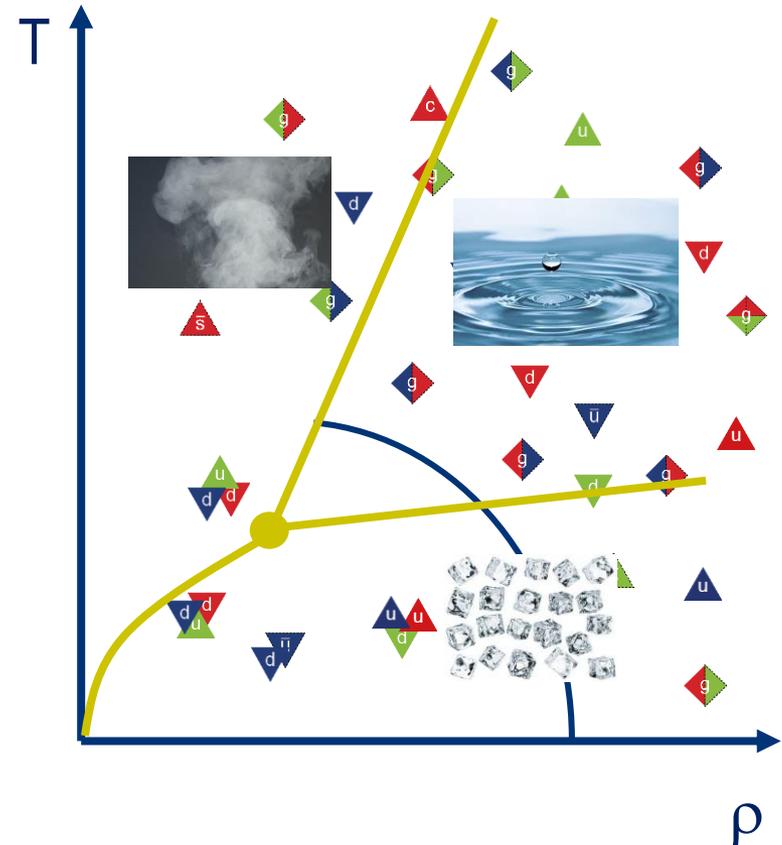
# Erzeugung „neuer“ Teilchen



- ▶ Entdeckung der  $W^\pm$  und  $Z^0$  Austauscheteilchen
- ▶ Massen vorhergesagt 1968
  - Sheldon Glashow, Steven Weinberg, und Abdus Salam
  - $m_W$ : 77 GeV;  $m_Z$ : 88 GeV
- ▶ Existierender Beschleuniger: SPS (CERN)
  - Protonenstrahl mit  $E_{\text{kin}}$  400 GeV ☺
  - Strahl kollidiert mit festem Target
  - Zur Verfügung stehende Energie im Schwerpunktsystem  $\sqrt{E_{\text{kin}}} = 20 \text{ GeV}$  ☹
- ▶ Idee: Kollision von Proton von Antiproton!
  - Zur Verfügung stehende Energie im Schwerpunktsystem  $\sim 530 \text{ GeV}$
  - Teilchen nachgewiesen: 20 Januar 1983
  - $m_W$ :  $83 \pm 3 \text{ GeV}$   $m_Z$ :  $94 \pm 3 \text{ GeV}$
  - Nobelpreise für Carlo Rubbia und Luigi Di Lella

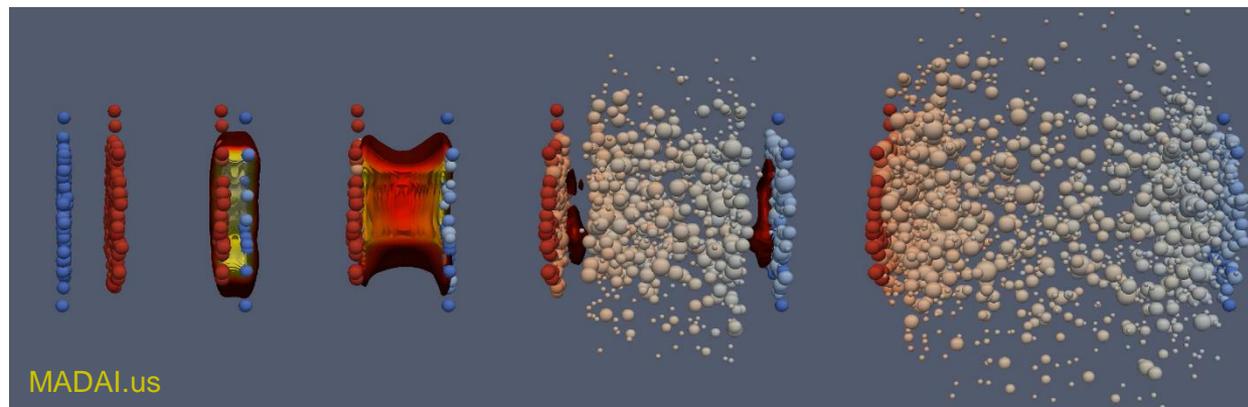
# Erzeugung extremer Bedingung

- ▶ In Schwerionenkollisionen werden Temperaturen und Dichten erzeugt die ähnlich extrem sind wie:
  - Kurz Nach dem Urknall
  - In Neutronensternen
- ▶ Neue Phase von Kernmaterie
  - Analogie: Phasen von Wasser
  - Quarks und Gluonen werden frei



# Erzeugung extremer Bedingung

- ▶ In Schwerionenkollisionen werden Temperaturen und Dichten erzeugt die ähnlich extrem sind wie:
  - Kurz Nach dem Urknall
  - In Neutronensternen
- ▶ Momentaufnahmen einer solchen Kollision:

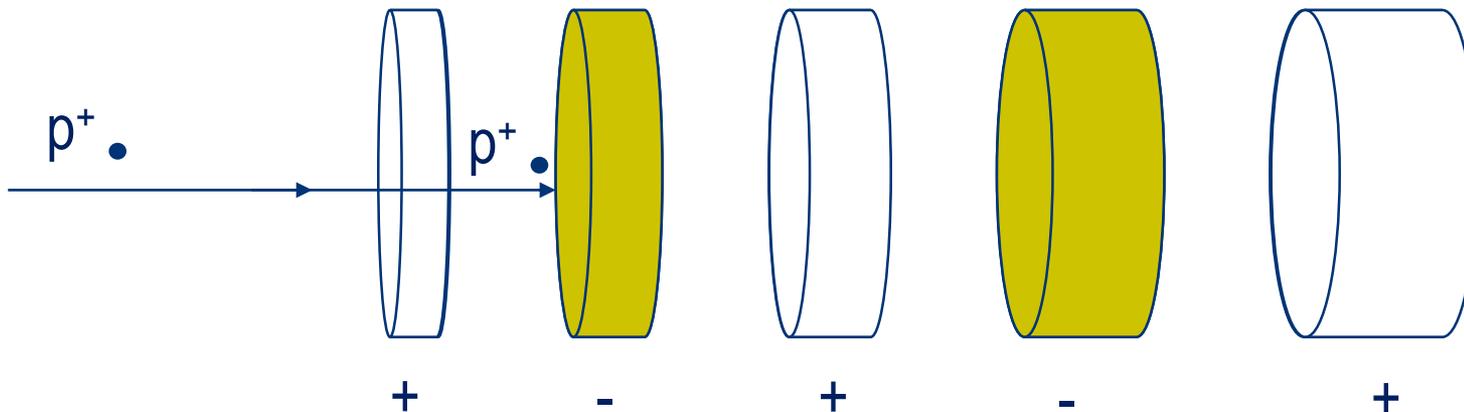


$\tau = 10^{-23}\text{s}$



# Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

- ▶ Um in Teilchenbeschleunigern höhere Energien zu erreichen, durchlaufen die elektrisch geladenen Teilchen ein elektrisches Wechselfeld:

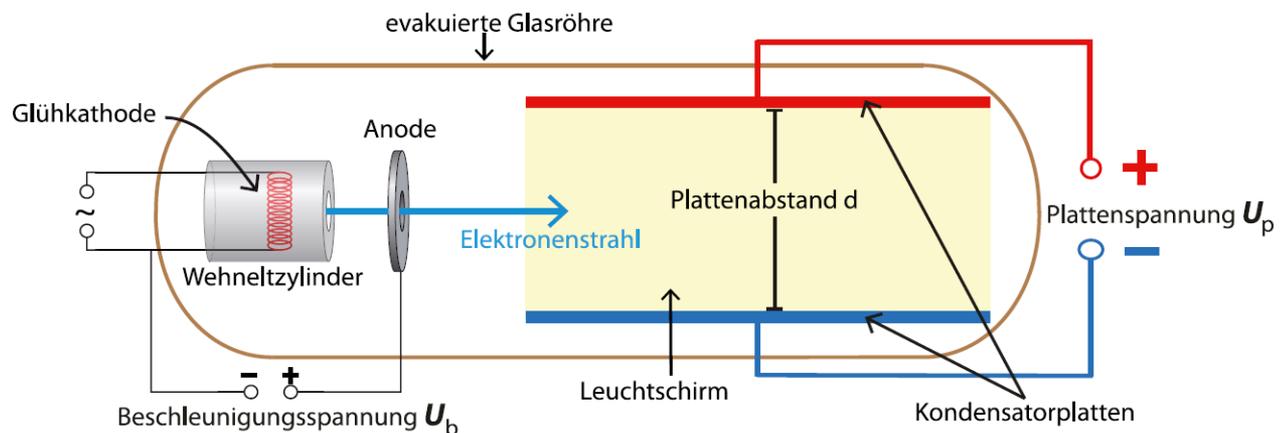


- ▶ Wird die Polung des elektrischen Feldes im richtigen Moment umgekehrt, wird das Teilchen beschleunigt.
- ▶ Teilchen werden schneller  $\rightarrow$  Driftröhren werden länger

# Beschleuniger – Elektronenkanone

## ► Beschleunigung von Elektronen

- Elektronen erzeugen:  
Elektrisch neutrale Teilchen werden zunächst ionisiert
- Elektronen beschleunigen:  
Elektrisch geladenen Teilchen durchlaufen ein elektrisch „anziehendes“ Feld
- Elektronen ablenken und/oder fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld



# Aktualität im Unterricht

- ▶ Die Produktion von Röhrengeräten wurde im Jahr 2008 eingestellt...
- ▶ Der neue Linearbeschleuniger LINAC4 des CERNs wurde 2017 eingeweiht...



# Beschleunigerarten

- ▶ Linearbeschleuniger
    - Elektrisch geladene Teilchen durchqueren Elektrische Felder
  - ▶ Vorteile:
    - Beschleunigung kann bei „Null“ beginnen
  - ▶ Nachteil:
    - Elektrische Felder werden nur einmal genutzt
  - ▶ Kreisbeschleuniger
    - Beschleunigungsstrecke wird mehrfach durchlaufen
    - Magnetische Felder bringen Teilchen auf Kreisbahnen
  - ▶ Vorteile:
    - Mehrfaches durchlaufen der elektrischen Felder
  - ▶ Nachteile:
    - Hohe Magnetfeldstärken nötig
- ▶ Große Beschleunigeranlagen wie z.B am CERN sind meist Kombinationen aus beiden Arten

# Das CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

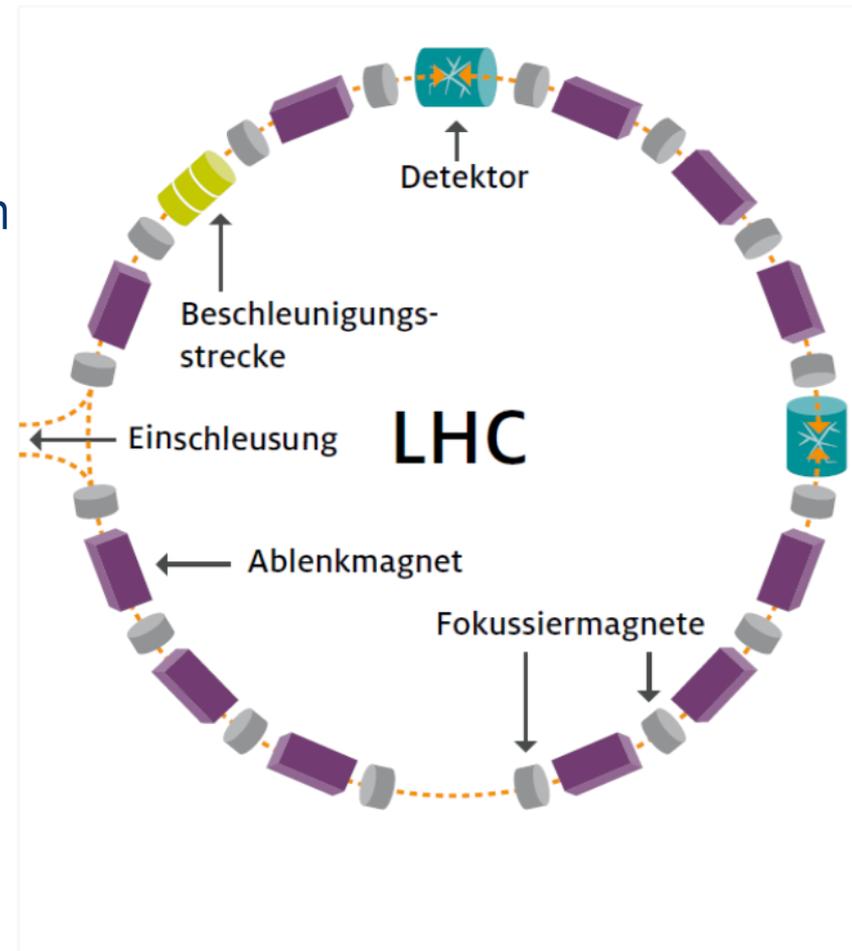
- ▶ Das größte Teilchenphysik-Forschungszentrum der Welt im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich
- ▶ Gegründet 1954
- ▶ Dort arbeiten
  - 12.500 Wissenschaftler
  - Aus 110 Ländern
- ▶ CERN's Jahresbudget 2016 = 1.1 Milliarde €
  - Entspricht 1 Cappuccino pro EU Bürger
  - Entspricht 1% des US Militärbudgets



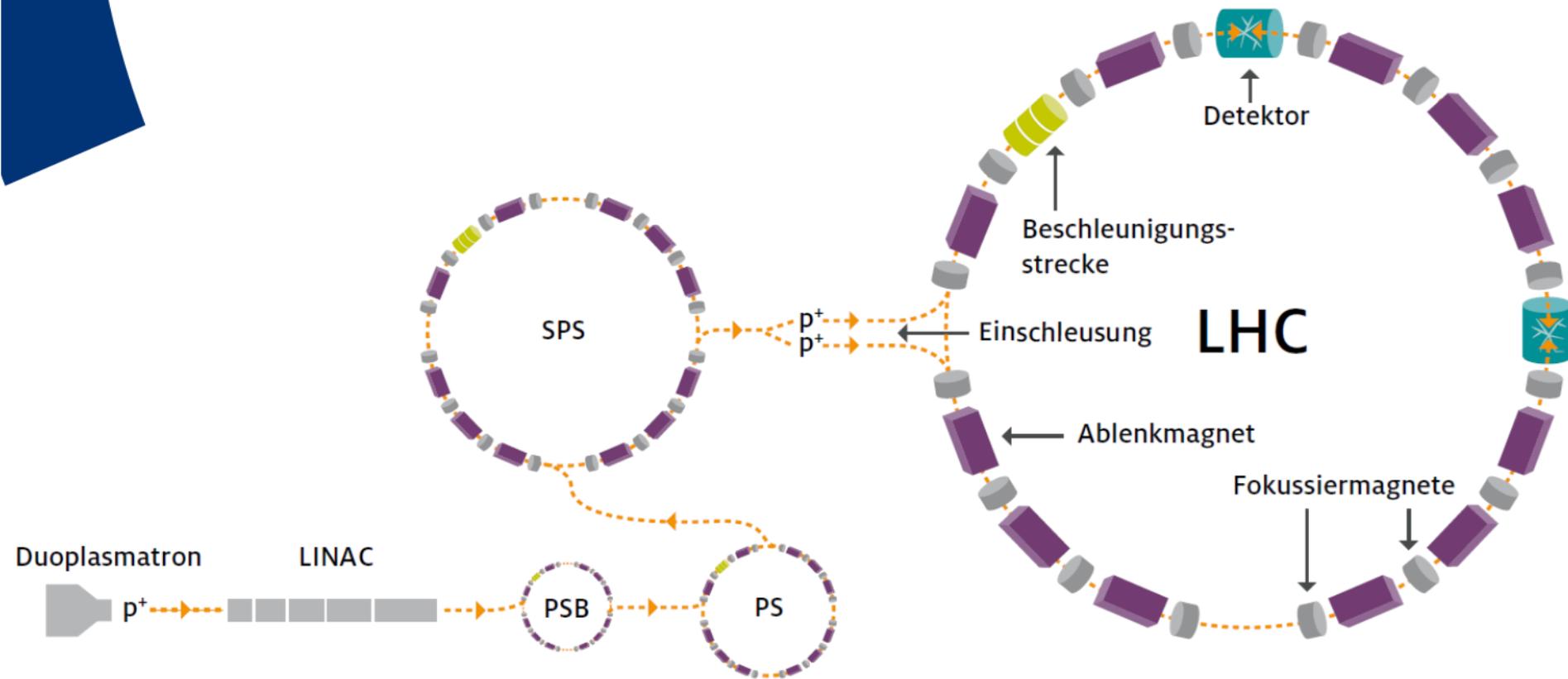
# LHC – grundlegender Aufbau

## ► Beschleunigung von Teilchen

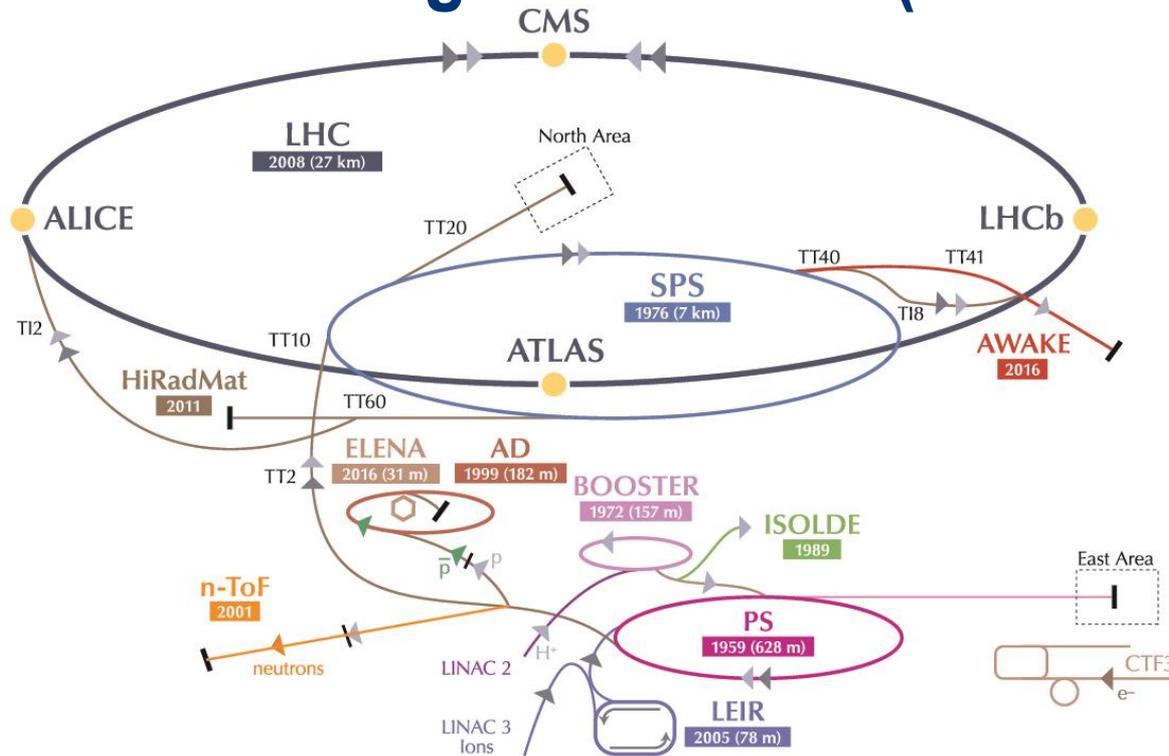
- Teilchen erzeugen:  
Elektrisch neutrale Teilchen werden zunächst ionisiert
- **Teilchen beschleunigen:**  
Elektrisch geladenen Teilchen durchlaufen ein elektrisch „anziehendes“ Feld
- **Teilchen ablenken und/oder fokussieren:** elektrisches oder magnetisches Feld
- **Teilchen nachweisen:**  
Detektoren



# Die Beschleuniger am CERN



# Die Beschleuniger am CERN (Realität)



▶ p (proton)   ▶ ion   ▶ neutrons   ▶  $\bar{p}$  (antiproton)   ▶ electron   ▶  $\leftrightarrow$  proton/antiproton conversion

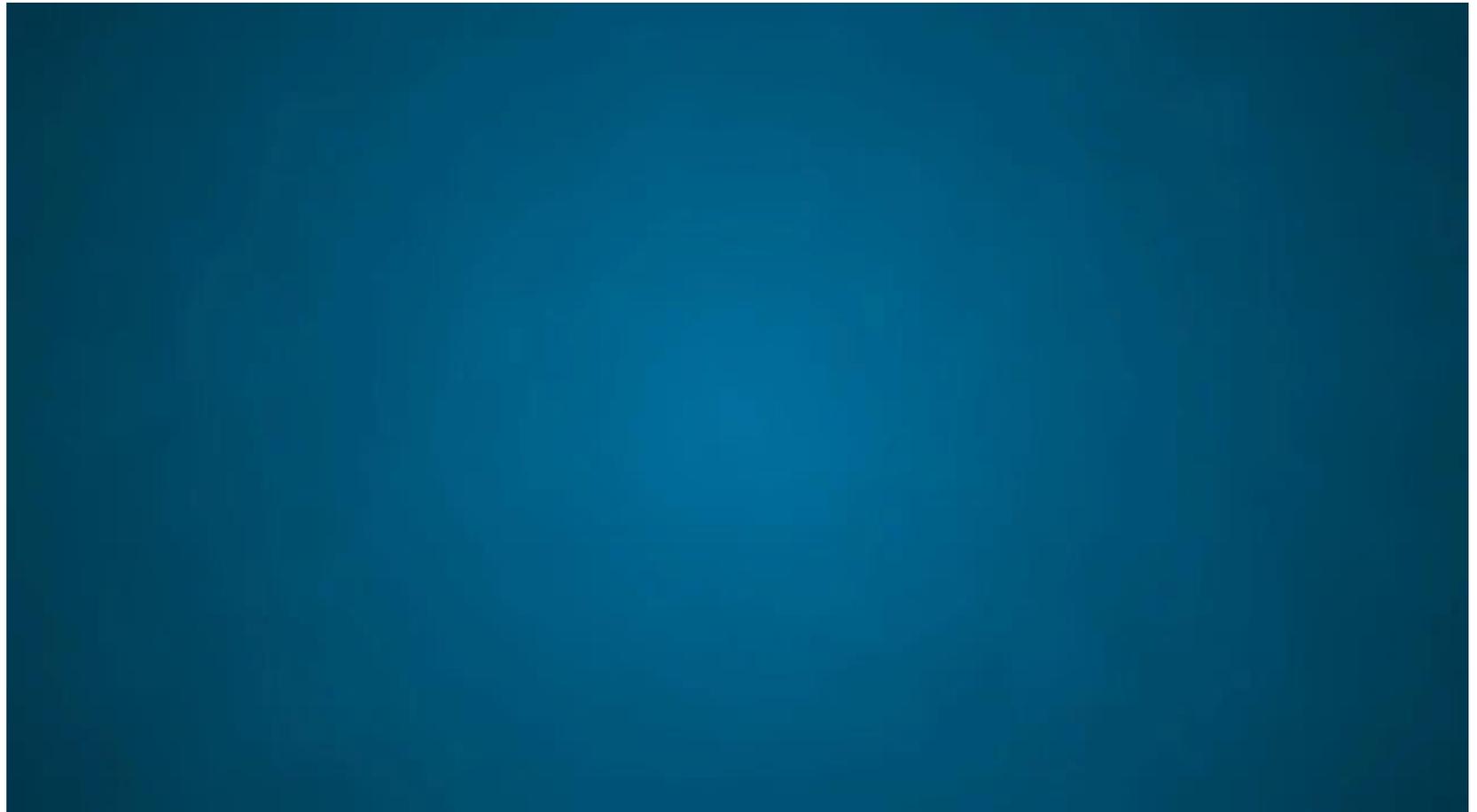
**LHC** Large Hadron Collider   **SPS** Super Proton Synchrotron   **PS** Proton Synchrotron

**AD** Antiproton Decelerator   **CTF3** Clic Test Facility   **AWAKE** Advanced WAKEfield Experiment   **ISOLDE** Isotope Separator OnLine DEvice

**LEIR** Low Energy Ion Ring   **LINAC** LInear ACcelerator   **n-ToF** Neutrons Time Of Flight   **HiRadMat** High-Radiation to Materials  
 14.02.2019   Forschung trifft Schule - Lehrerfortbildung Teilchenphysik - Bielefeld

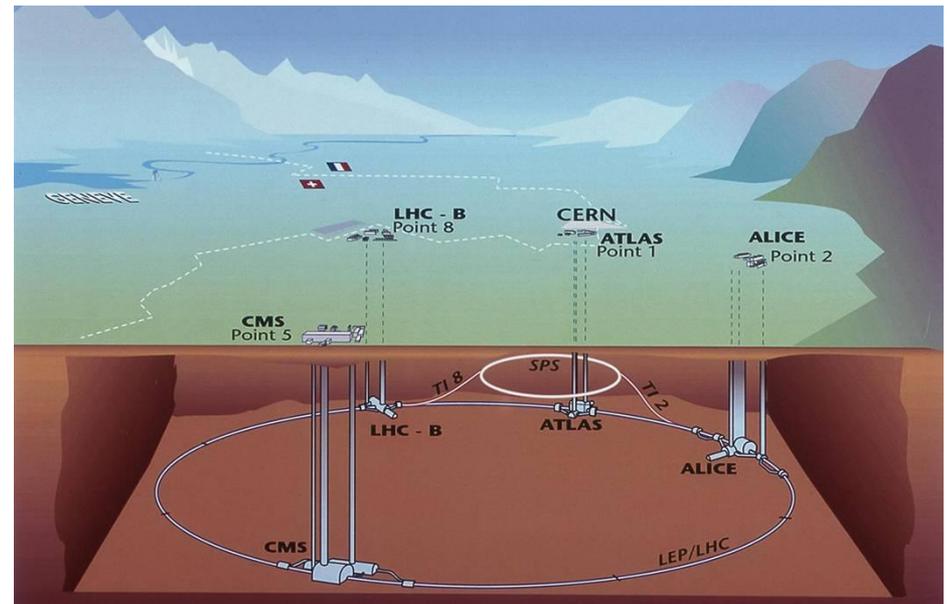


# Die Beschleuniger am CERN



# Der LHC (Large Hadron Collider)

- ▶ 27 km Umfang
- ▶ Bis zu 175m tief in der Erde
- ▶ Große Experimente:
  - ATLAS
  - CMS
  - ALICE
  - LHCb



Man kann CERN  
in google street view besuchen

# Warum ist der LHC so groß?

## ▶ Magnetische Steifigkeit

- $\vec{B}r = \frac{\gamma m \vec{v}}{q}$  mit

- $B$  die Stärke des Magnetfeldes
- $r$  der Krümmungsradius der Teilchenbahn
- $\gamma$  der Lorentzfaktor
- $\vec{v}$  die Geschwindigkeit,  $m$  Masse und  $q$  die Ladung des Teilchens

▶ beschreibt die Eigenschaft eines schnellen elektrisch geladenen Teilchens, seine Bahn mehr oder weniger gut durch Magnetfelder 'biegen' zu lassen.

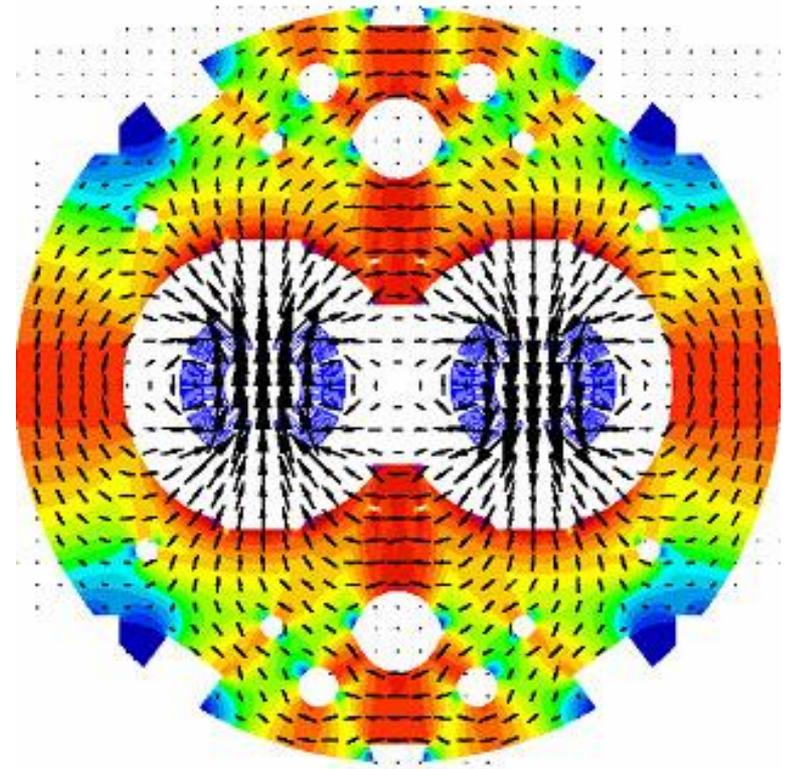
▶ Man erhält sie durch Gleichsetzen von Lorentzkraft und Zentripetalkraft

# LHC Fun Facts

- ▶ Der LHC ist kälter als das Universum
  - Temperatur Dipolmagnete: 1.9 K
  - Kosmische Hintergrundstrahlung: 2.7 K
- ▶ Das Vakuum im LHC ist ähnlich dem im Weltall
  - Vakuum LHC:  $10^{-10}$  bis zu  $10^{-11}$  mbar
  - Gepumptes Volumen  $9000 \text{ m}^3$
  - Benötige Pump Zeit: 2 Wochen
- ▶ Temperaturen höher als in der Sonne
  - Temperatur in einer Schwerionenkollision:  $5.5 \times 10^{12} \text{ K}$
  - Temperatur Sonne:  $15 \times 10^6 \text{ K}$

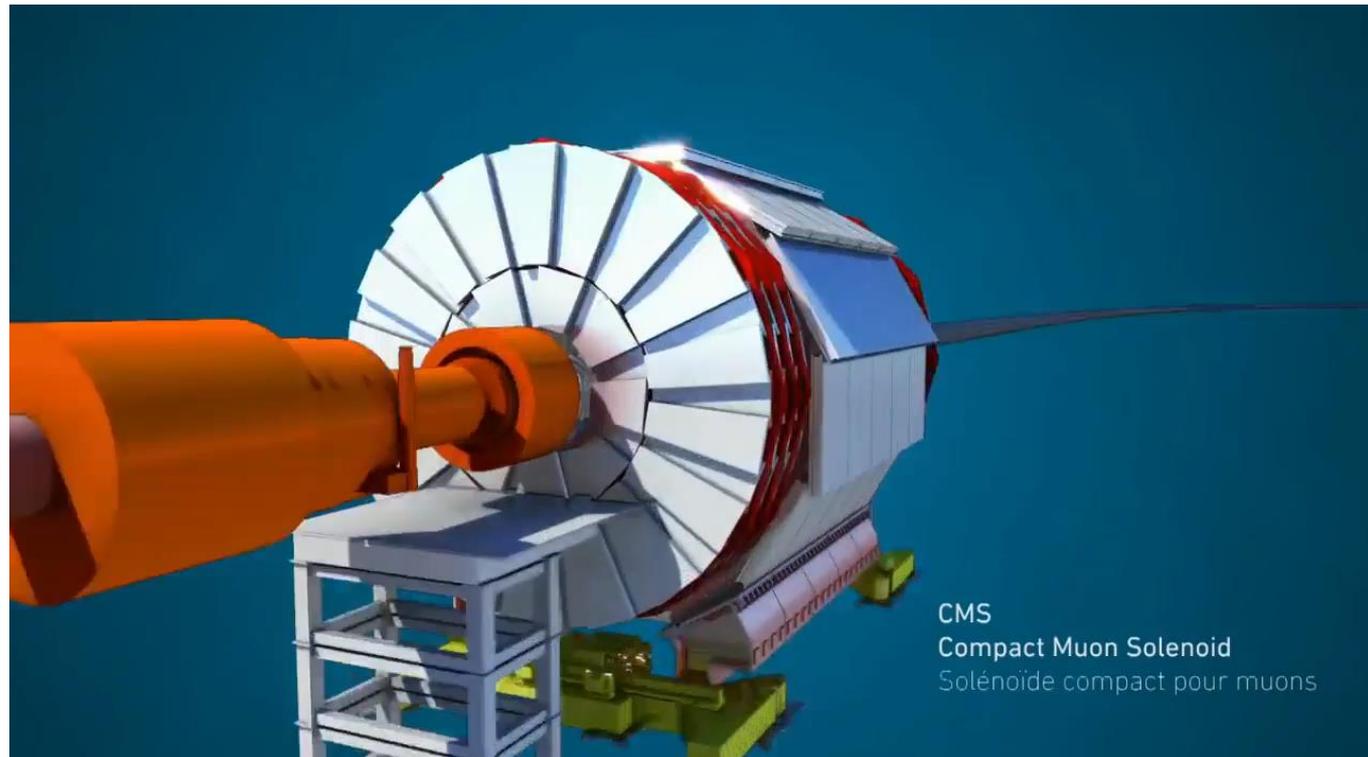
# LHC Dipol Magnete

- ▶ 1232 Dipolmagnete mit kupferverkleideten supraleitende Niob-Titan Leitern
- ▶ Jeder Magnet ist 15 Meter lang und wiegt 30 Tonnen
- ▶ Die Betriebstemperatur wird durch das Kühlsystem auf 1.9 K gehalten.
- ▶ Die max. magnetische Flussdichte beträgt 8.36 Tesla.



# Teilchenkollisionen im LHC

- ▶ 2 gegenläufige Protonenstrahlen
  - mit je 1404 Teilchenpaketen und  $1.2 \times 10^{11}$  Protonen pro Paket
- ▶ 1 Paket-Kreuzung alle 25 ns
  - Im Inneren der 4 Experimente kollidieren zwischen 1 (LHCb) – 60 (ATLAS, CMS) Protonenpaare
- ▶ 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde!



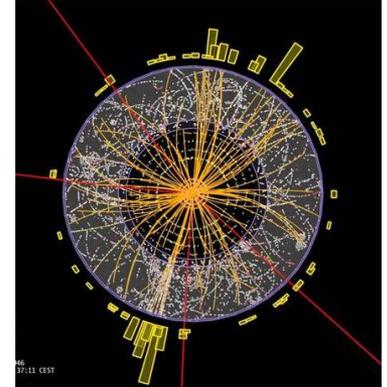
# Teilchenkollisionen im LHC

▶ 600 Mio. Kollisionen pro Sekunde!

▶ Warum?

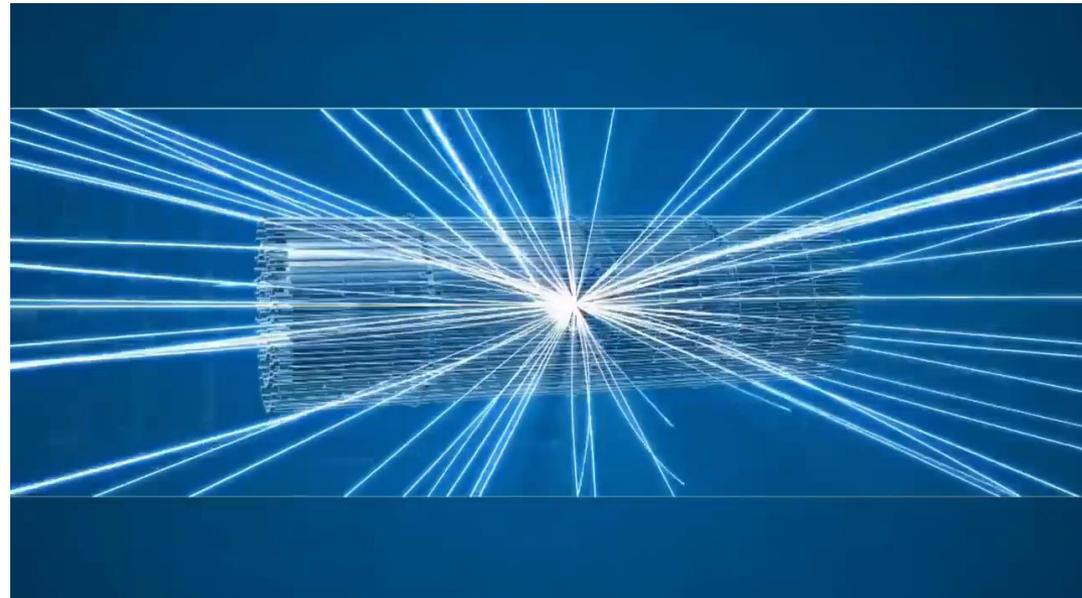
- „Interessante“ Teilchen entstehen sehr selten: ca. 1x pro  $10^{10}$  Kollisionen!
- Welche Teilchen bei einer bestimmten Kollision entstehen, ist nicht eindeutig vorhersagbar
- Man kann nur vorhersagen, wie häufig welche Teilchenkombinationen vorkommen werden

▶ Vergleich der Messergebnisse mit Vorhersagen aus dem Standardmodell der Teilchenphysik und anderen Theorien



# Wohin mit so vielen Daten?

- ▶ 600 Mio. Kollisionen pro Sekunde
  - Detektoren weisen die entstandenen Teilchen nach
  - einige Mb pro Ereignis
- ▶ ...das wären mehrere Terabyte pro Sekunde!
  - Datenreduktion notwendig
  - "Trigger": automatische Auswahl interessanter Messdaten
  - etwa 1000 Ereignisse pro Sekunde bleiben übrig (25 GB/s)
- ▶ Verteilung der Daten auf ca. 800 000 CPUs in 43 Ländern (LHC-Grid)
- ▶ ...etwa 10 Petabyte/Monat!





# Besuche am CERN

## ► Was ist besuchbar

- Globe Ausstellung (ohne Anmeldung)
- Microcosm Ausstellung (ohne Anmeldung)
- Visiting points auf dem CERN Gelände (Buchbar vorab)
- Kostenfrei
- Deutschsprachige Guides
- Kombinierbar mit Besuch beim S'Cool Lab:
  - Nebelkammer Workshops
  - S'Cool Lab Day



Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!

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

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



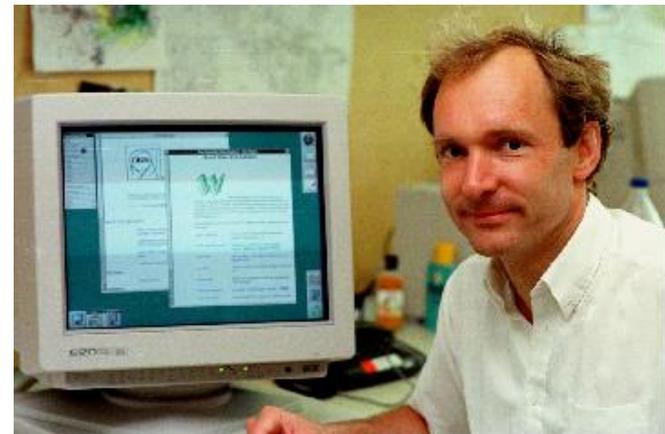
[www.facebook.de/teilchenwelt/](http://www.facebook.de/teilchenwelt/)



NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Das World Wide Web

- ▶ Erfunden 1989 am CERN von Tim Berners-Lee
- ▶ Methode, um schnell und einfach wissenschaftliche Daten auszutauschen
- ▶ Erster Webserver lief am CERN



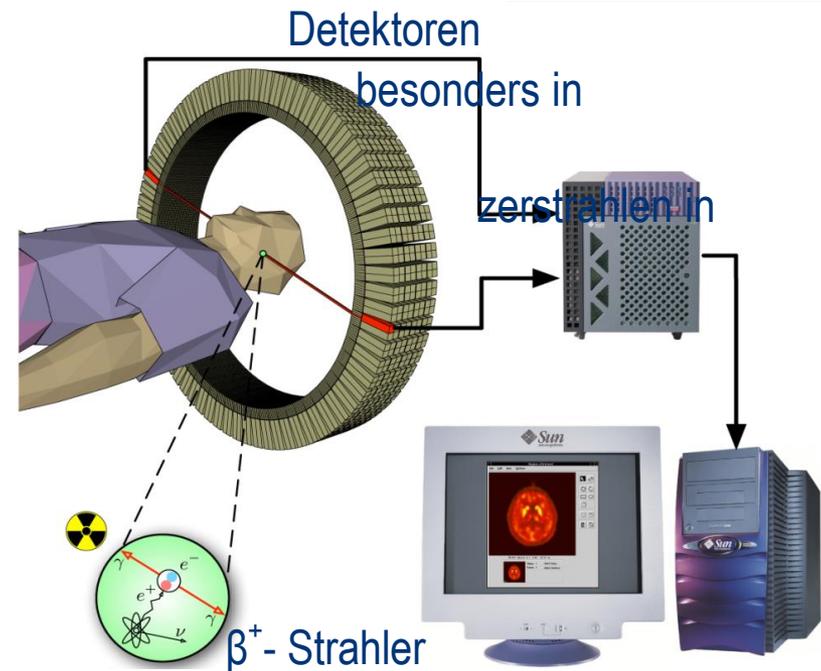
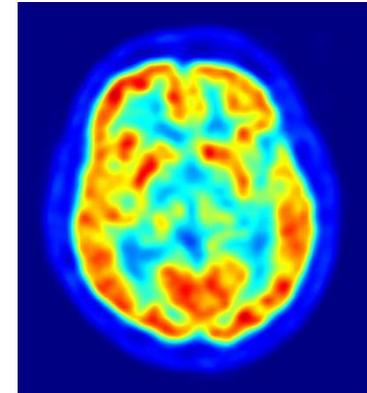
# Diskussion / Fragen



# Positronen-Emissions-Tomografie

## ► Ein bildgebendes Verfahren für die Medizin

- Patienten wird eine spezielle Zuckerlösung gespritzt
- Diese enthält ein Fluor-Isotop, das Positronen abstrahlt ( $\beta^+$ - Strahler)
- Zucker sammelt sich in Gewebe, das viel Energie benötigt, Tumorgewebe
- Positronen und Elektronen zerstrahlen in zwei Photonen
- Detektoren registrieren die Photonen
- Eine Software berechnet den Ursprungsort der Photonen und setzt daraus ein Bild zusammen



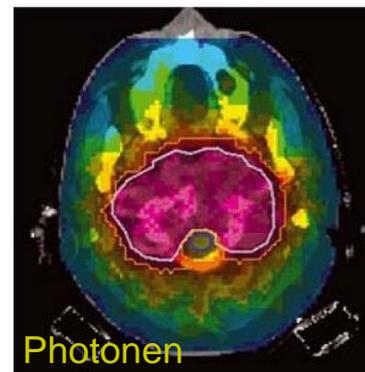
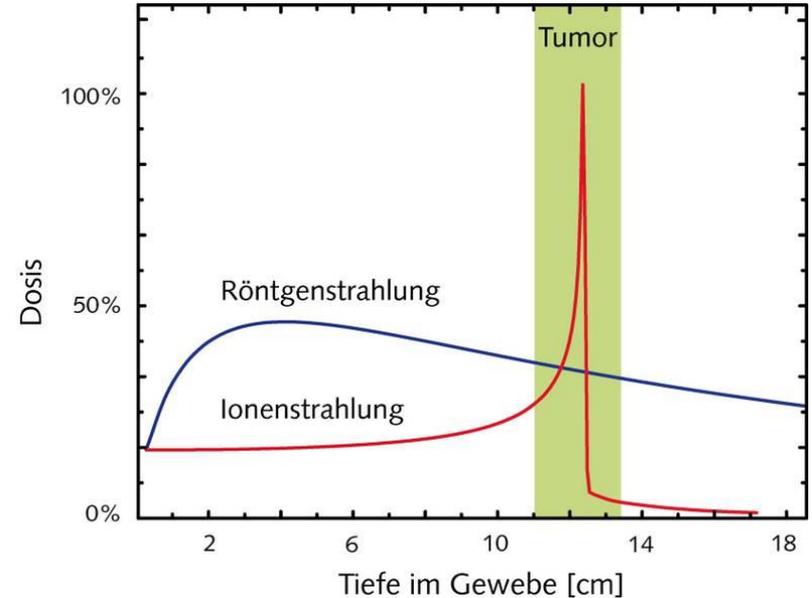
# Tumorthherapie mit Hadronen (meist C)

## ► Vorteil gegenüber Bestrahlung mit Elektronen oder Photonen:

- Eindringtiefe einstellbar, genaue Fokussierung auf den Tumor möglich
- es werden mehr Tumorzellen als gesunde Zellen zerstört
- gut für tiefliegende Tumore geeignet
- geringere Dosis nötig

## ► Nachteile:

- hohe Kosten
- großer Beschleuniger nötig



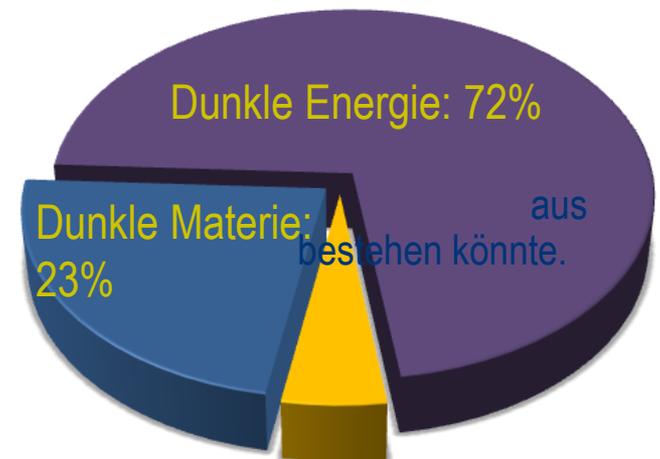
# The SppS

- ▶  $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$
- ▶ 3 bunches protons, 3 bunches antiprotons,
- ▶  $10^{11}$  particles per bunch
- ▶ Luminosity =  $5 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
- ▶ first collisions in December 1981



# Was ist Dunkle Materie?

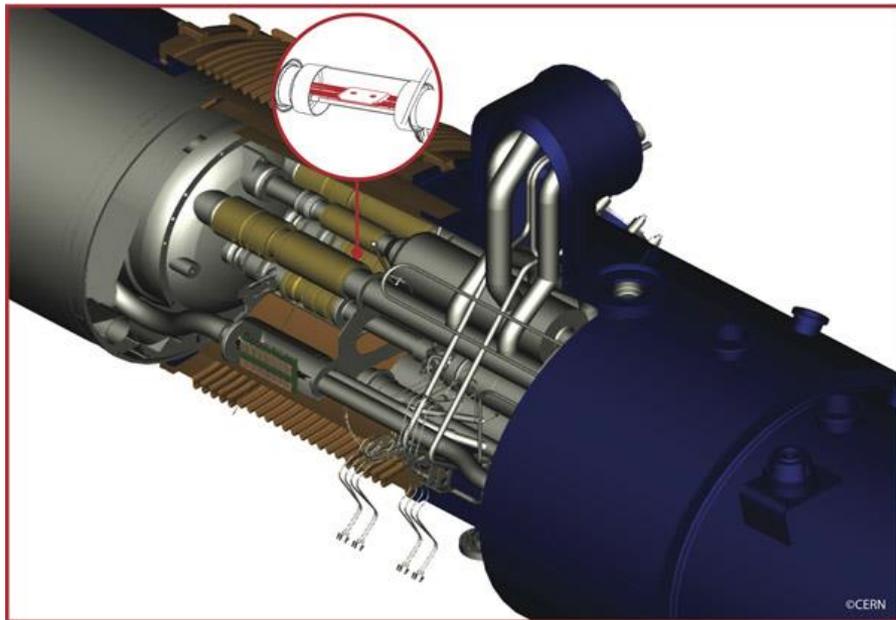
- ▶ Beobachtungen zeigen, dass es nicht nur atomare Materie geben kann:
  - Galaxien rotieren zu schnell: Viel mehr Materie wäre nötig!
  - Die Strukturen von Galaxienhaufen sind nur mit viel mehr Materie zu erklären.
  - Es muss eine bisher unbekannte Materieform geben: Dunkle Materie.
- ▶ Das Universum dehnt sich heute schneller aus als früher.
  - Etwas beschleunigt die Ausdehnung des Universums: Dunkle Energie.
- ▶ Der größte Teil des Universums besteht aus Dunkler Materie und Dunkler Energie!
  - Am CERN sucht man nach Teilchen, denen Dunkle Materie



# Zwischenfall 19. September 2008

- ▶ Während eines Systemtests der Stromversorgung, kam es aufgrund einer fehlerhaften Verbindungsstelle zu einem Anstieg der Stromstärke auf 8700 Ampere.
- ▶ Dies führte innerhalb einer Sekunde zu einem Lichtbogen, der ein Loch in den Heliummantel und in die Vakuumisolierung schmolz.
- ▶ Durch die darauffolgende Erwärmung des flüssigen Heliums, kam es zu einer explosionsartigen Ausdehnung des Edelgases.
- ▶ Diese Druckwelle war so stark, dass sie von den Entlastungsventilen nicht mehr aufgefangen werden konnte. Die Druckwelle riss mehrere der tonnenschweren Magnete aus ihrer Verankerung.
- ▶ Insgesamt traten einige tausend Liter flüssiges Helium aus. Während des Vorfalles befanden sich keine Teilchenpakete im LHC Speicherring.
- ▶ Durch die am CERN getroffenen Sicherheitsmaßnahmen bestand zu keinem Zeitpunkt Gefahr für den Menschen. Insgesamt mussten 53 supraleitende Magnete ausgetauscht oder repariert werden.

# Zwischenfall 19. September 2008



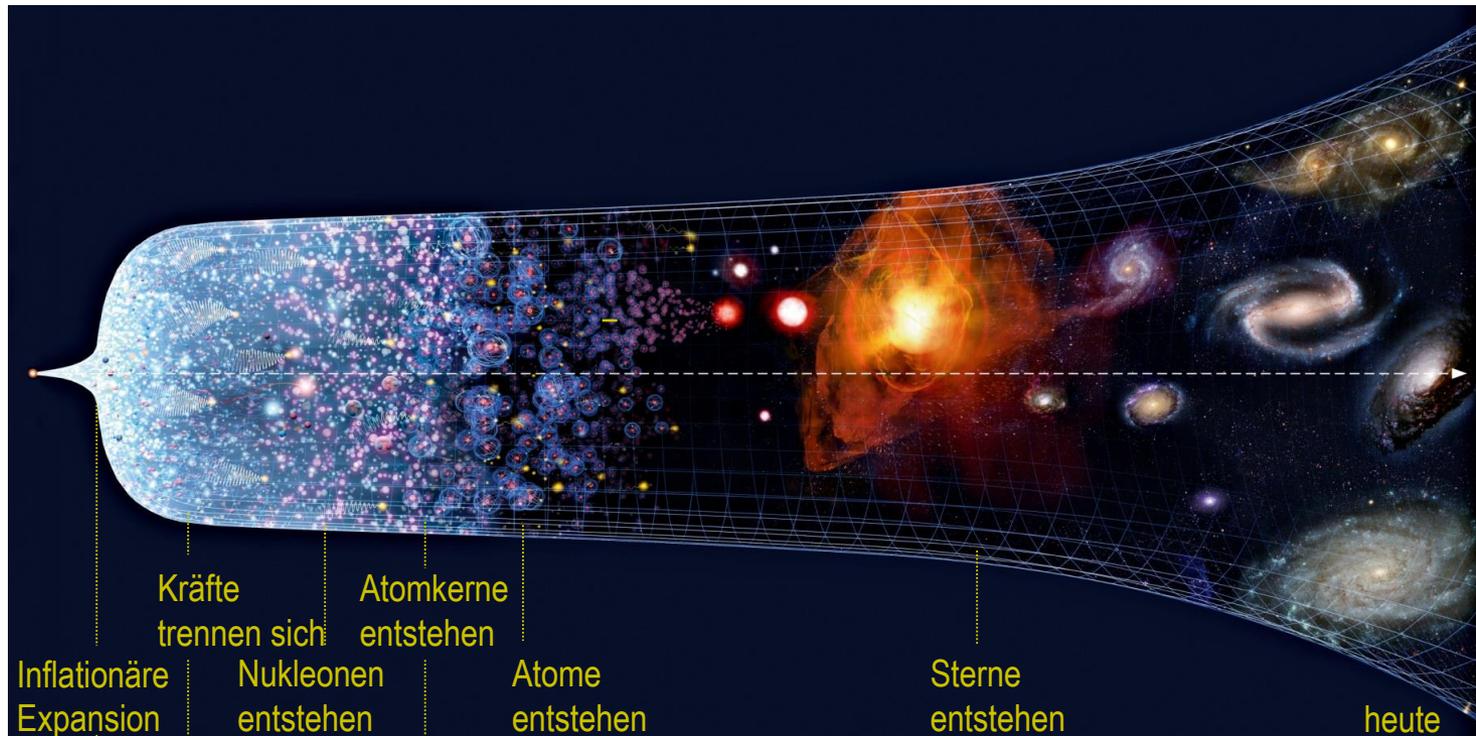
# „The CERN Weasel“

- ▶ Das Wiesel schaffte es im November 2016 den gesamten LHC auszuschalten, indem es in eine 18,000 Volt Leitung biss.
- ▶ Jetzt Ausstellungstück im Rotterdam Natural History Museum
- ▶ Das war der 2. Vorfall dieser Art



# Erzeugung extremer Bedingung

Urknall



Zeit

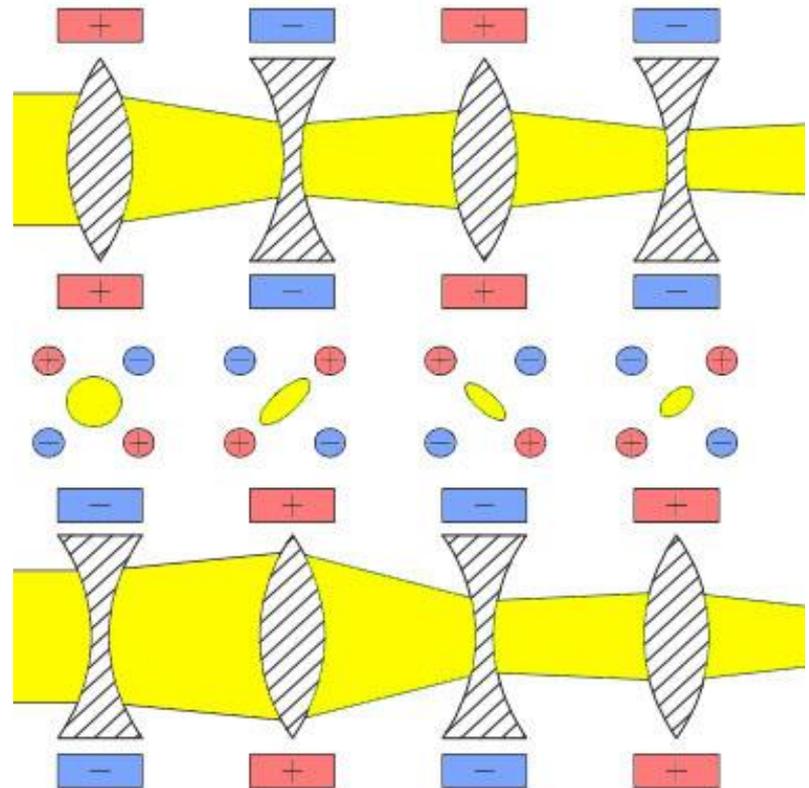


Energie



# Ein Quadrupolmagnet

- ▶ Besteht aus vier Polen, von denen jeweils zwei gegenüberliegende, gleichpolig ausgerichtet sind
- ▶ Fokussierung ist notwendig, da die Teilchen sich gegenseitig durch die abstoßen
- ▶ Wirkt in Flugrichtung immer durch zwei gegenüberliegende Pole fokussierend, während die anderen zwei Pole defokussierend wirken.
- ▶ Um eine radiale Fokussierung zu erreichen, werden mehrere Quadrupolmagnete, hintereinander angeordnet.



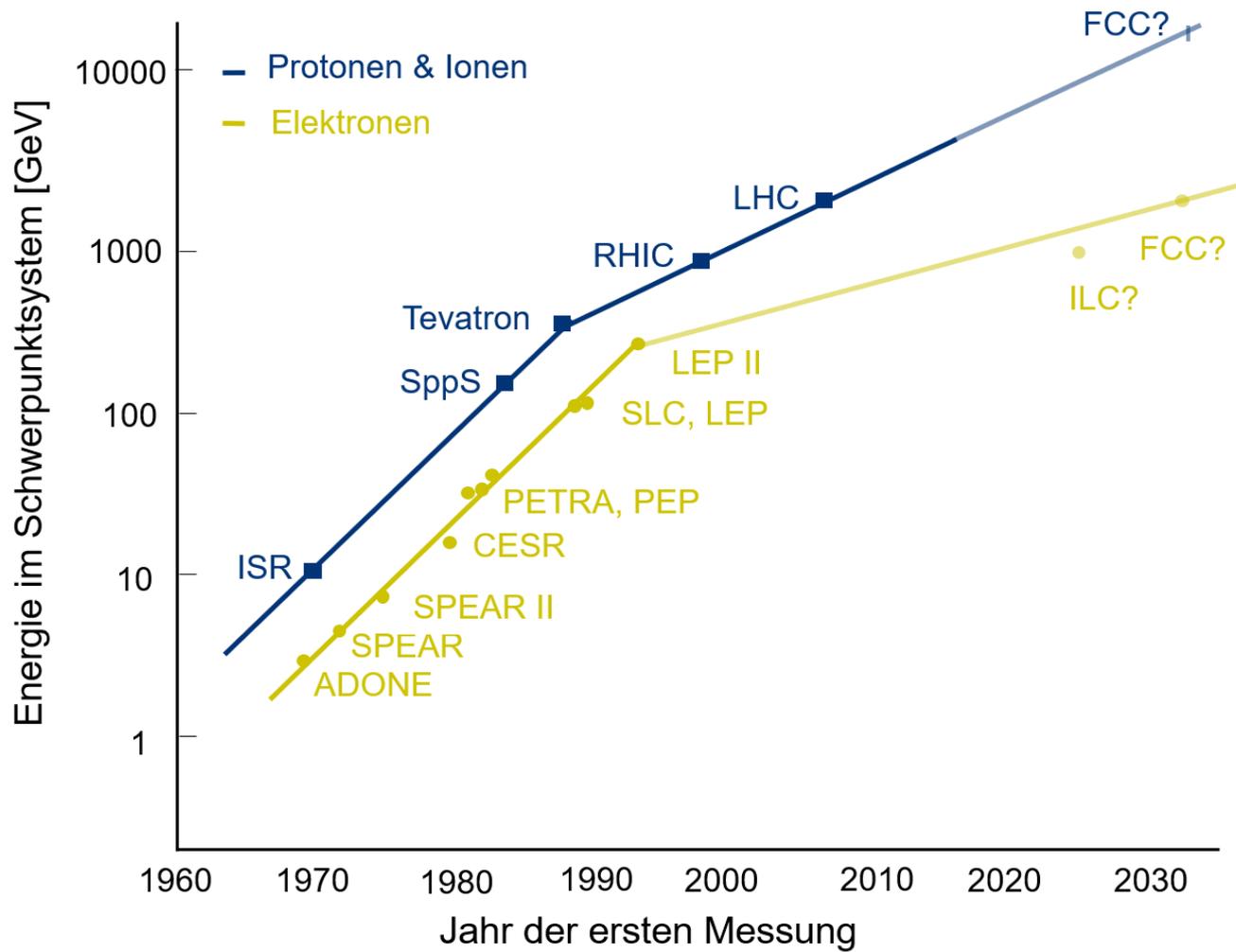
The screenshot displays the CERNland website interface. At the top left is the CERN logo and the 'CERNland' title. A navigation bar contains links for 'CERNland', 'Explore the Lab', 'Explore the Universe', and 'Multimedia'. On the right side of the navigation bar are icons for home, volume, email, eye, and a German flag.

The main content area features a game interface. At the top, there are three meters: 'ENERGIE' (Energy) with a scale from 0 to 100, 'PUNKTE' (Points) at 200, and 'LEBEN' (Life) with three helmet icons. A blue 'ENDE' (End) button is on the right. Below the meters is a circular diagram of the LHC with detectors labeled: CMS, BEAM DUMP, LHCb, ATLAS, and ALICE. The game area shows a character in a white hard hat and red overalls walking through a tunnel. There are floating items like a gold coin and a tablet. A red worm-like creature is on the right. A 'Anweisungen' (Instructions) button is at the bottom left of the game area.

On the left side, there are three game thumbnails: 'Super BOB' (Pie Herausforderung), 'TOTEM', and 'Worms in the LHC'. On the right side, there are three vertical panels: 'Learn about CERN', 'ALL THE GAMES', and 'NEWS'.

At the bottom, there are navigation links: 'über CERNland', 'CERNland in der Presse', and 'kontakt'. Below these is the copyright notice: '© CERN COPYRIGHT 2008-2017 designed by OVNI developed by TechCare'.

# Beschleunigeranlagen



# LHC Beschleunigungsstrecke

- ▶ Zur Beschleunigung dienen 8 supraleitende Hochfrequenz-Hohlraumresonatoren (je 4 pro Strahlrohr).
- ▶ Die LHC Kavitäten erreichen einen Beschleunigungsgradient von bis zu 5.5 MV pro Meter.

