

# Forschungsmethoden in der Teilchenphysik I

Fachvortrag



# Basierend auf Band 2:

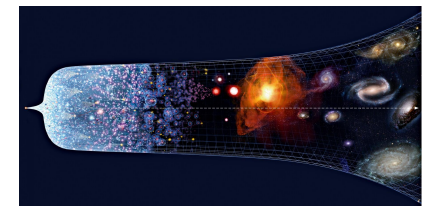
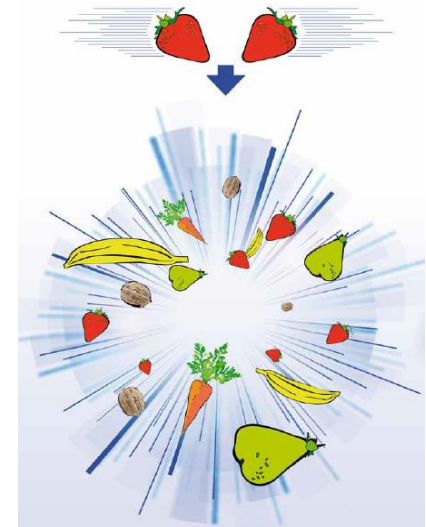
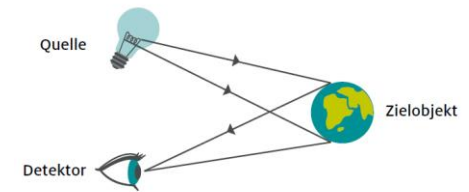
- ▶ Forschungsziele
- ▶ Beschleuniger
- ▶ Detektoren *(nach der Pause)*
- ▶ Zahlreiche Aufgaben & Lösungen



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

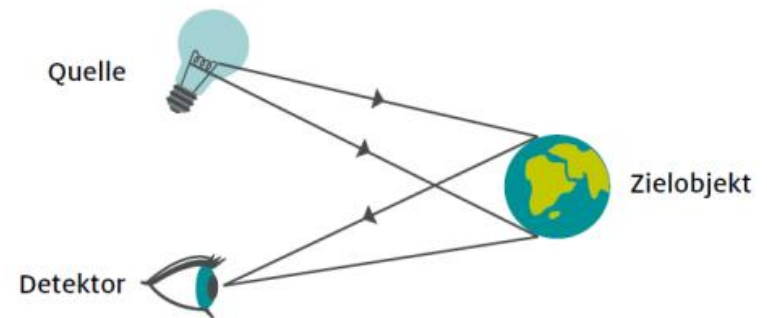
# Forschungsziele

- ▶ 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)

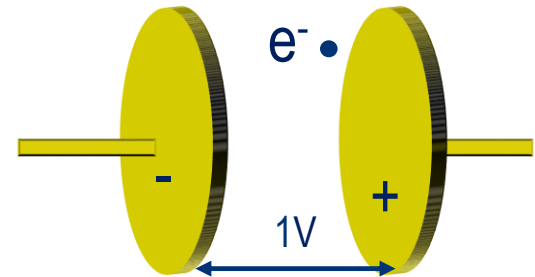


# Strukturuntersuchungen

- ▶ 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?

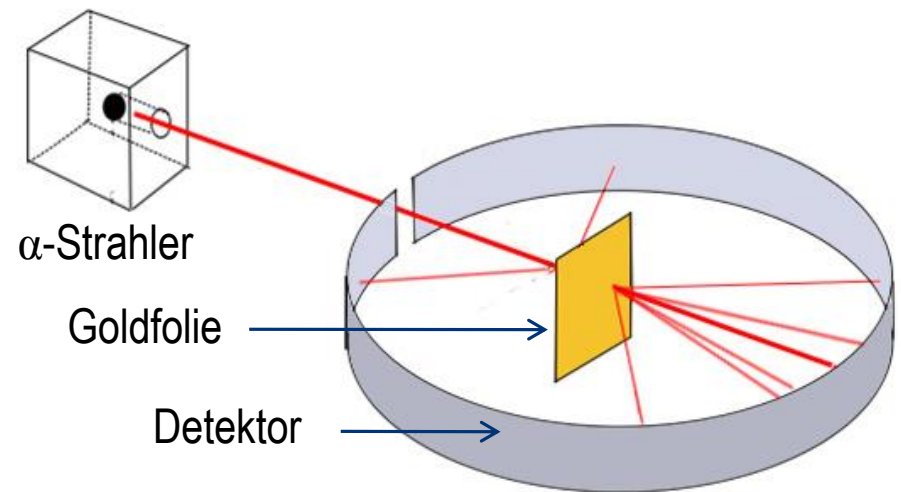
# Einschub: Elektronenvolt

- ▶ 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  $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$

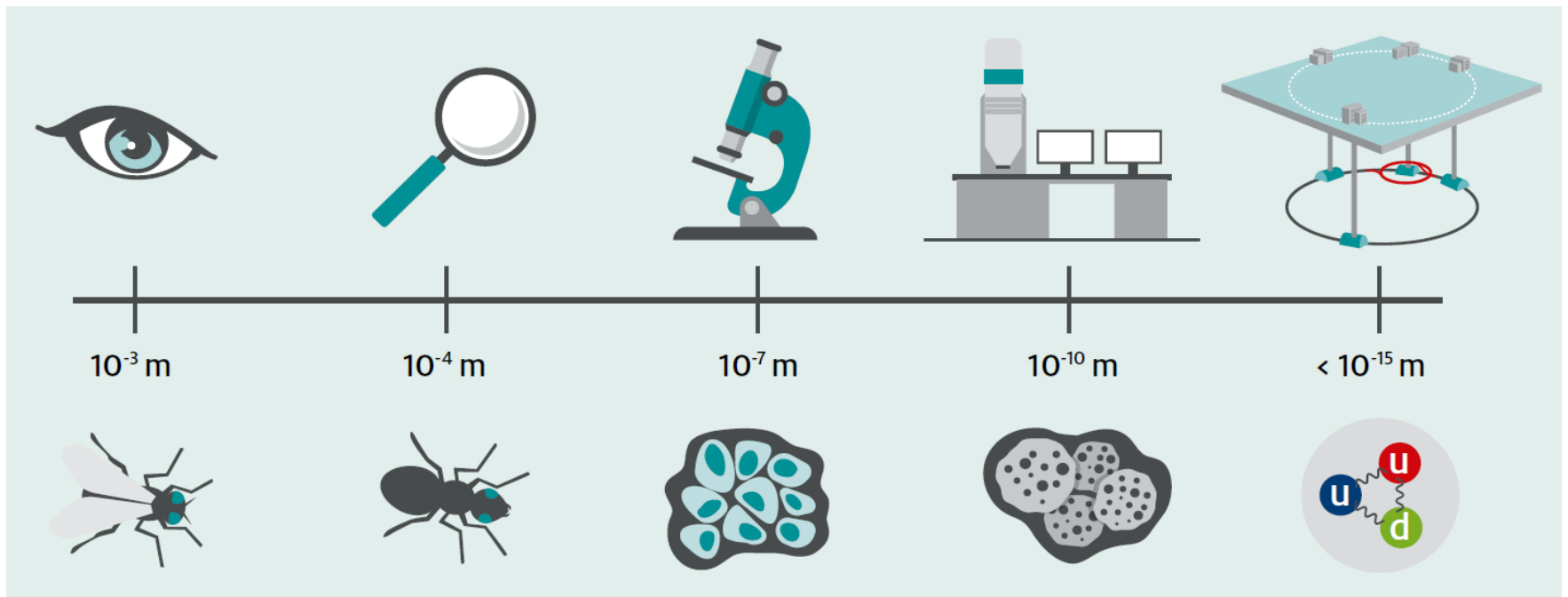


# Strukturuntersuchungen

- ▶ 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



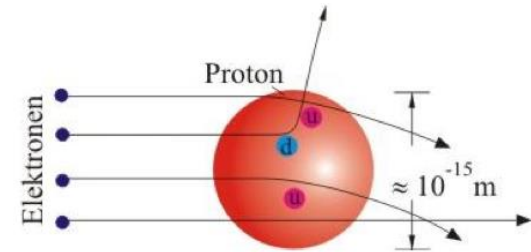
# Strukturuntersuchungen





# 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

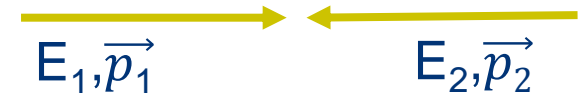
# Erzeugung „neuer“ Teilchen

- ▶ 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

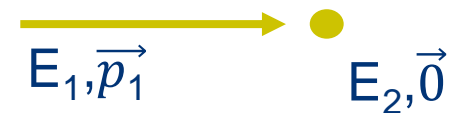
$$E_{cm} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2} = \sim 100\text{GeV}$$



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

- Energie im Schwerpunktsystem

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



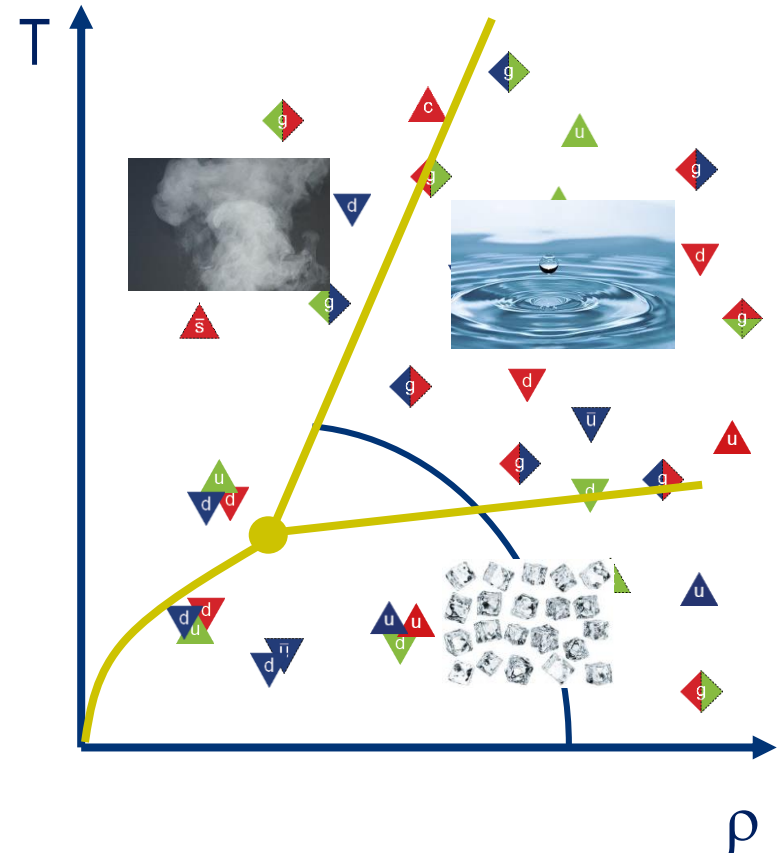
# Erzeugung „neuer“ Teilchen



- ▶ Entdeckung der  $W^\pm$  und  $Z^0$  Austauscheteilchen
- ▶ Massen vorhergesagt 1968
  - Sheldon Glashow, Steven Weinberg, und Abdus Salam
  - $m_W: 77 \text{ GeV}$ ;  $m_Z: 88 \text{ GeV}$
- ▶ Existierender Beschleuniger: SPS (CERN)
  - Protonenstrahl mit  $E_{\text{kin}} 400 \text{ GeV}$  ☺
  - 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

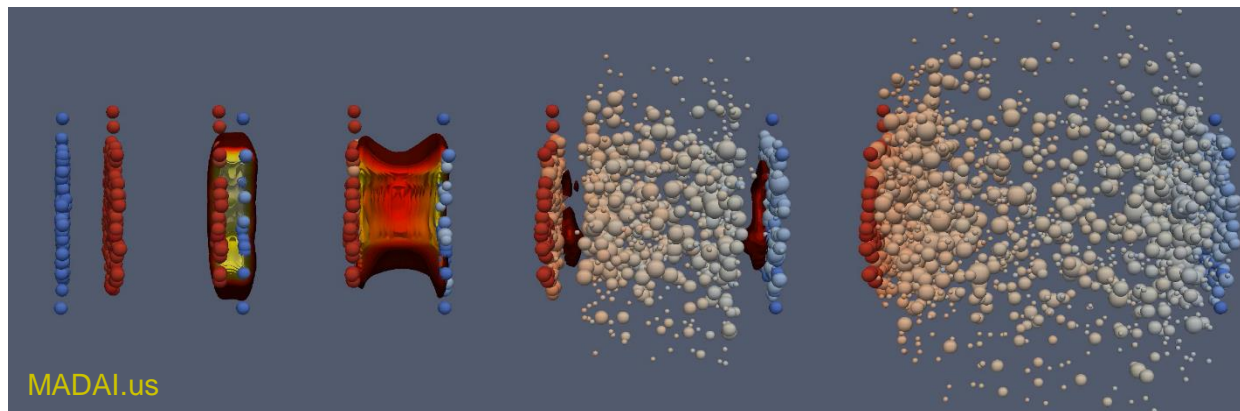
# Erzeugung extremer Bedingung

- ▶ 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:

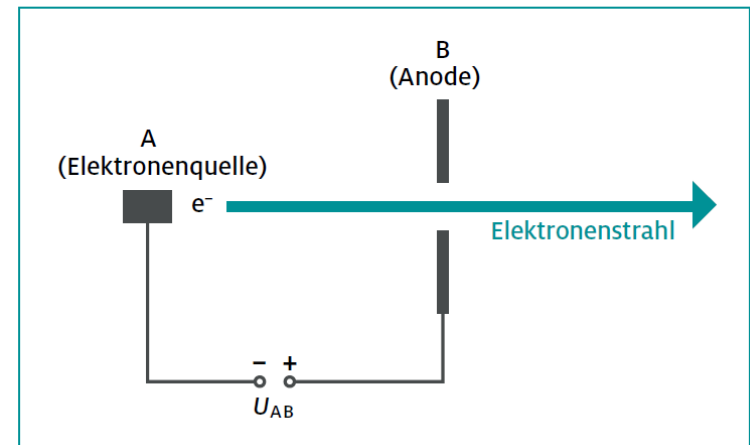
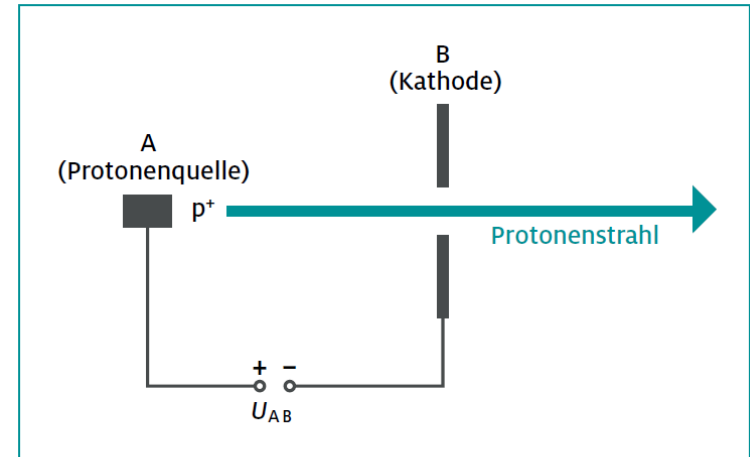


$\tau = 10^{-23}\text{s}$

# Beschleuniger – grundlegender Aufbau

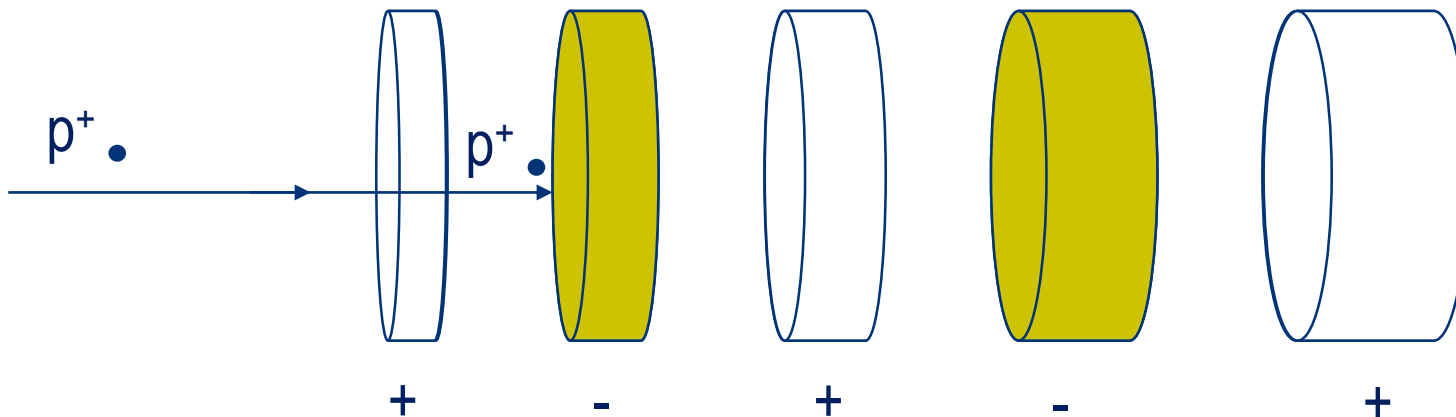
## ► Beschleunigung von Teilchen

- 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:  
Leuchtschirm



# Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

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

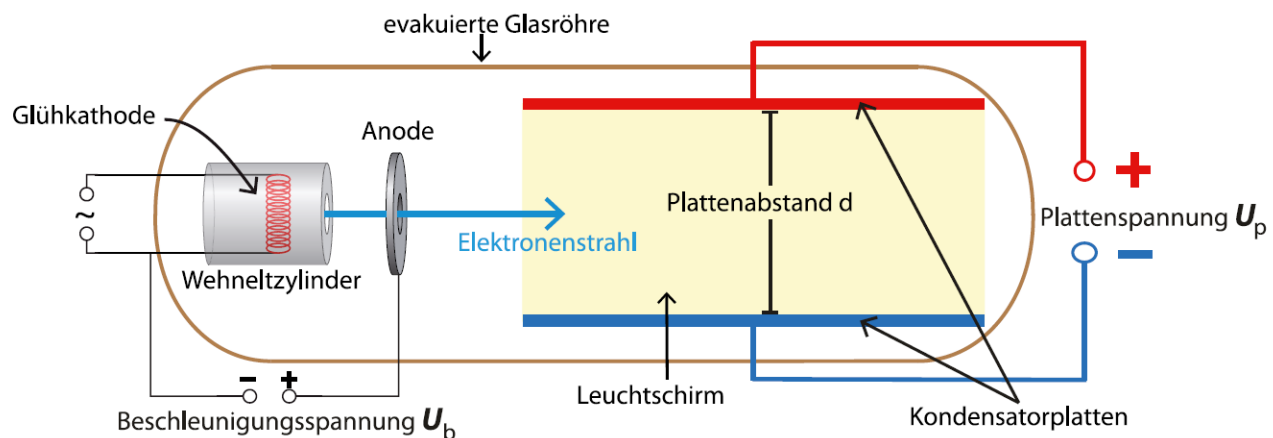


- ▶ Wird die Polung des elektrischen Feldes im richtigen Moment umgekehrt, wird das Teilchen beschleunigt.
- ▶ Teilchen werden schneller  $\rightarrow$  Driftröhren werden länger

# Beschleuniger – Elektronenkanone

## ► Beschleunigung von Elektronen

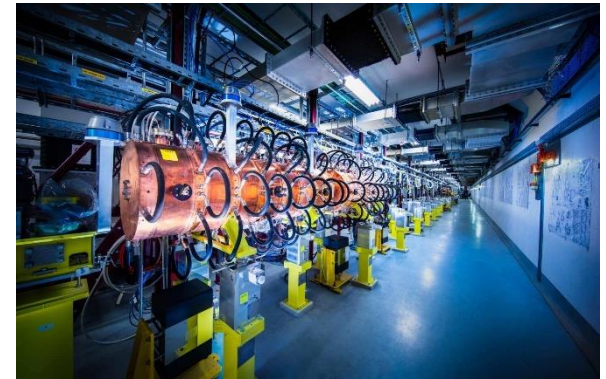
- Elektronen erzeugen:  
Elektrisch neutrale Teilchen werden zunächst ionisiert
- Elektronen beschleunigen:  
Elektrisch geladenen Teilchen durchlaufen ein elektrisch „anziehendes“ Feld
- Elektronen ablenken und/oder fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld





# 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)

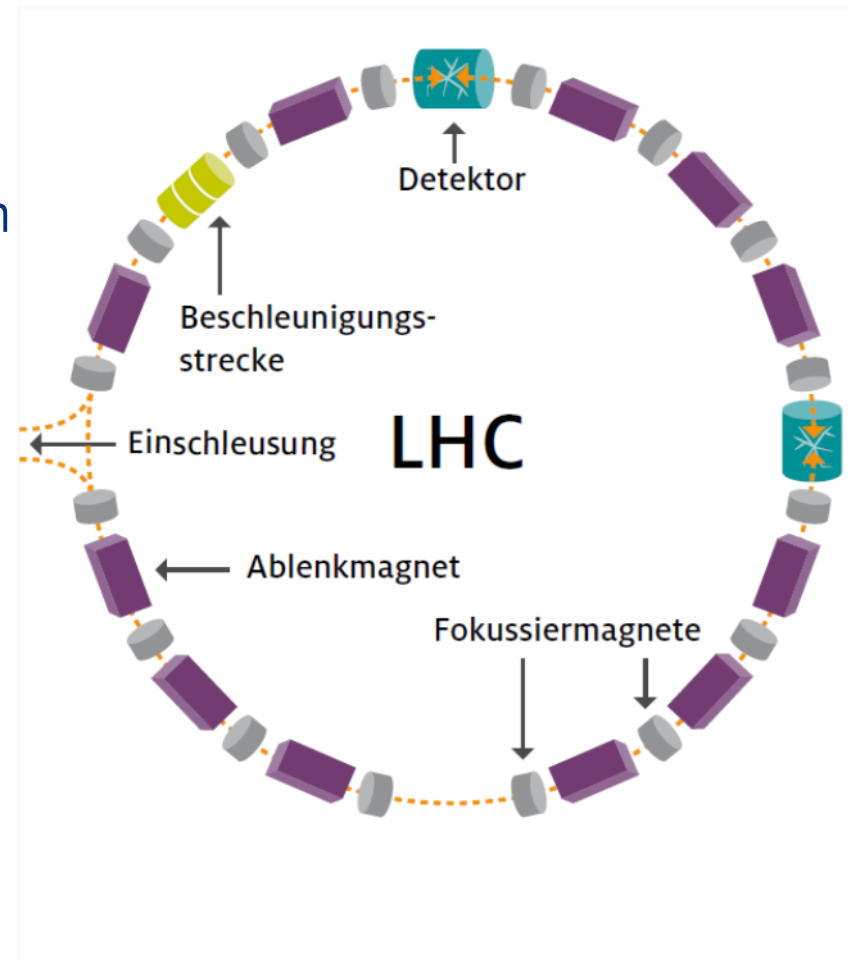
- ▶ Das größte Teilchenphysik-Forschungszentrum der Welt im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich
- ▶ Gegründet 1954
- ▶ Dort arbeiten
  - 12.500 Wissenschaftler
  - Aus 110 Ländern
- ▶ CERN's Jahresbudget 2016 = 1.1 Milliarde €
  - Entspricht 1 Cappuccino pro EU Bürger
  - Entspricht 1% des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



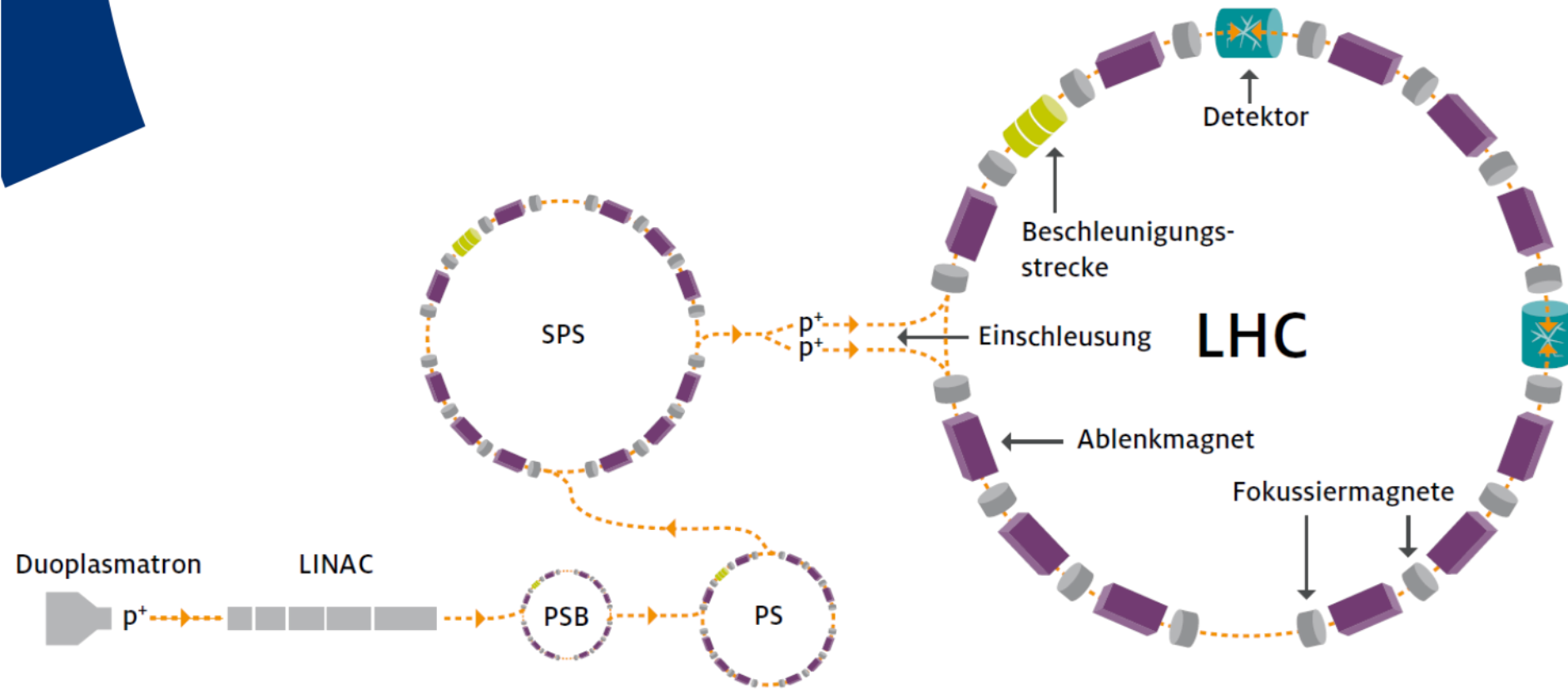
# LHC – grundlegender Aufbau

## ► Beschleunigung von Teilchen

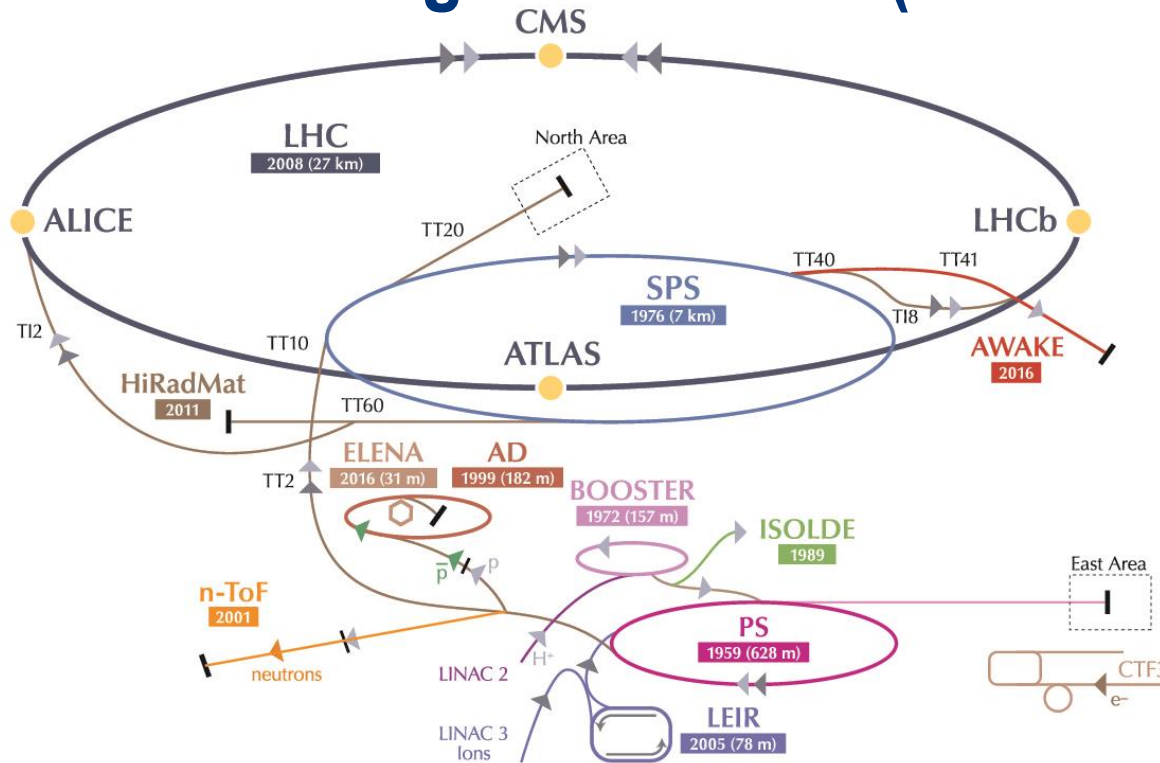
- Teilchen erzeugen:  
Elektrisch neutrale Teilchen werden zunächst ionisiert
- **Teilchen beschleunigen:**  
Elektrisch geladenen Teilchen durchlaufen ein elektrisch „anziehendes“ Feld
- **Teilchen ablenken und/oder fokussieren:** elektrisches oder magnetisches Feld
- **Teilchen nachweisen:**  
Detektoren



# Die Beschleuniger am CERN



# Die Beschleuniger am CERN (Realität)



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

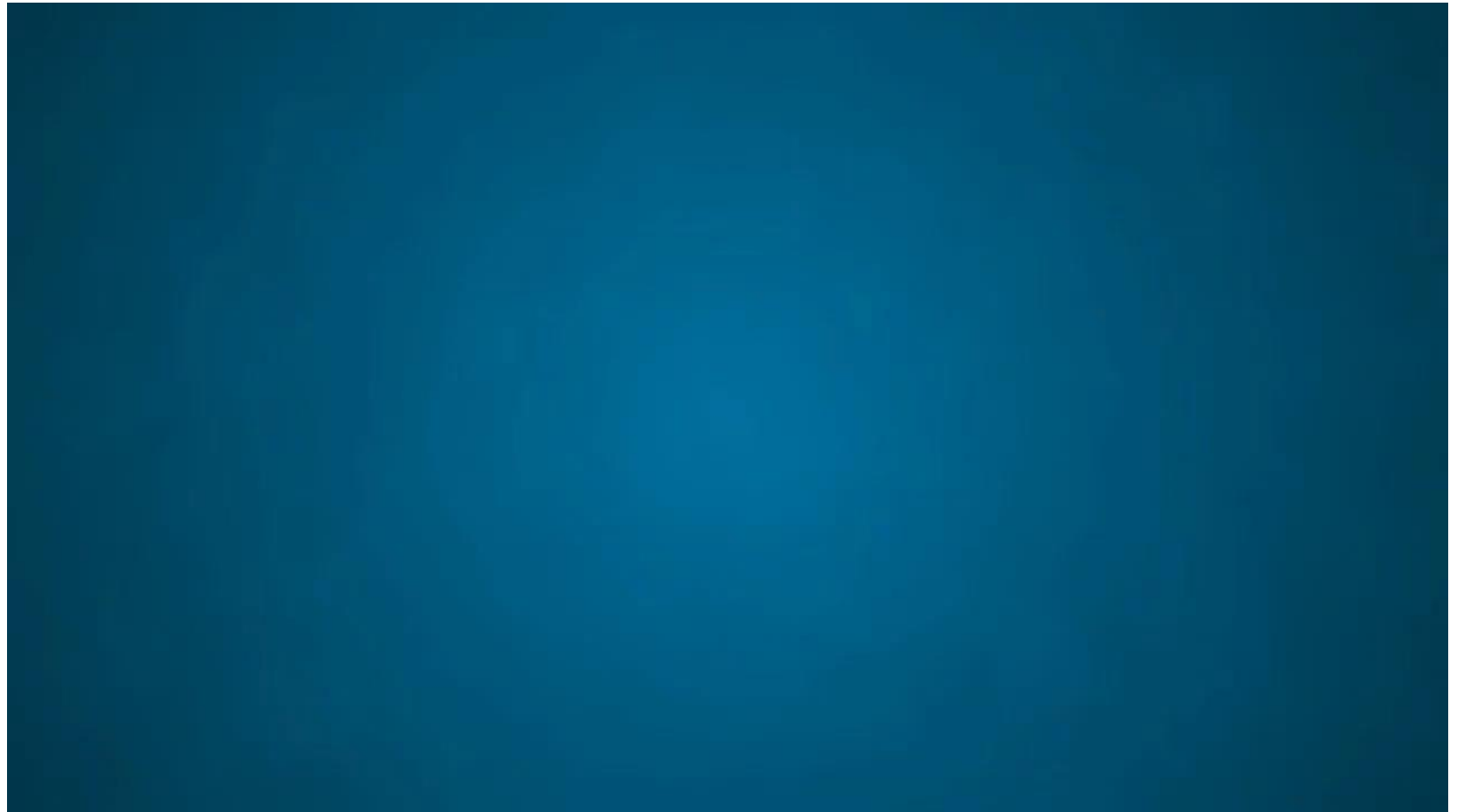
**LHC** Large Hadron Collider   **SPS** Super Proton Synchrotron   **PS** Proton Synchrotron

**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

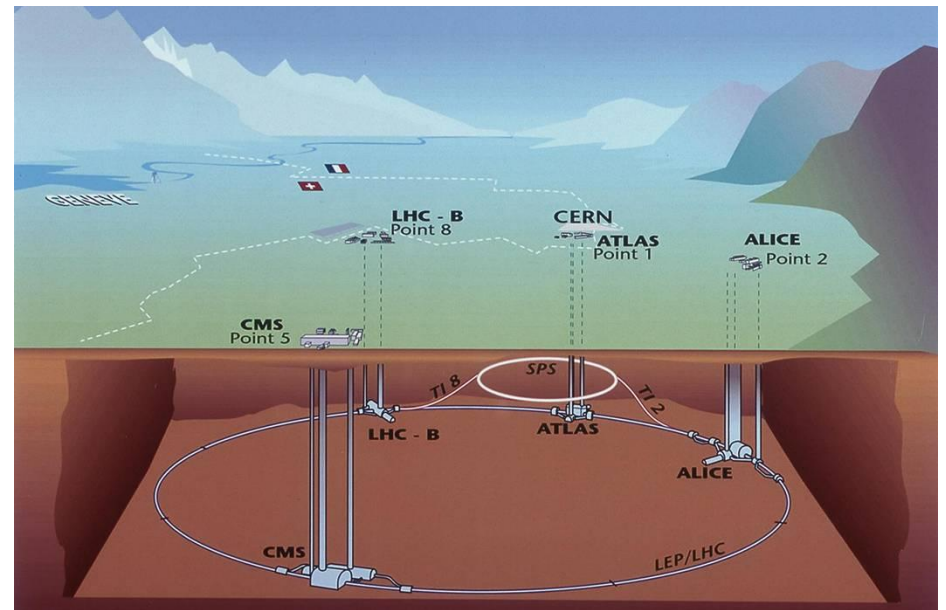


# Die Beschleuniger am CERN



# 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.

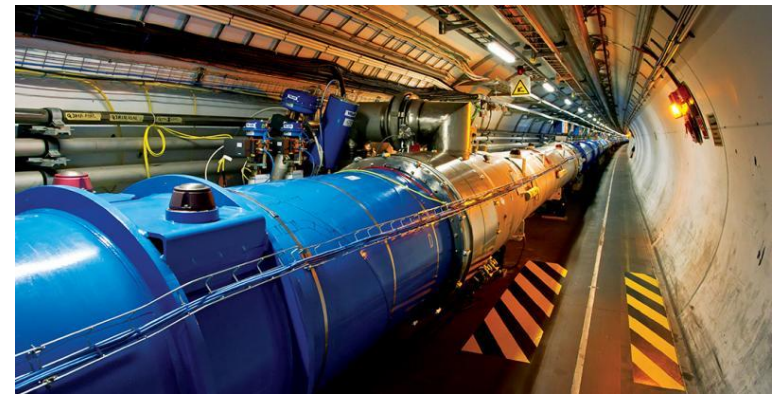
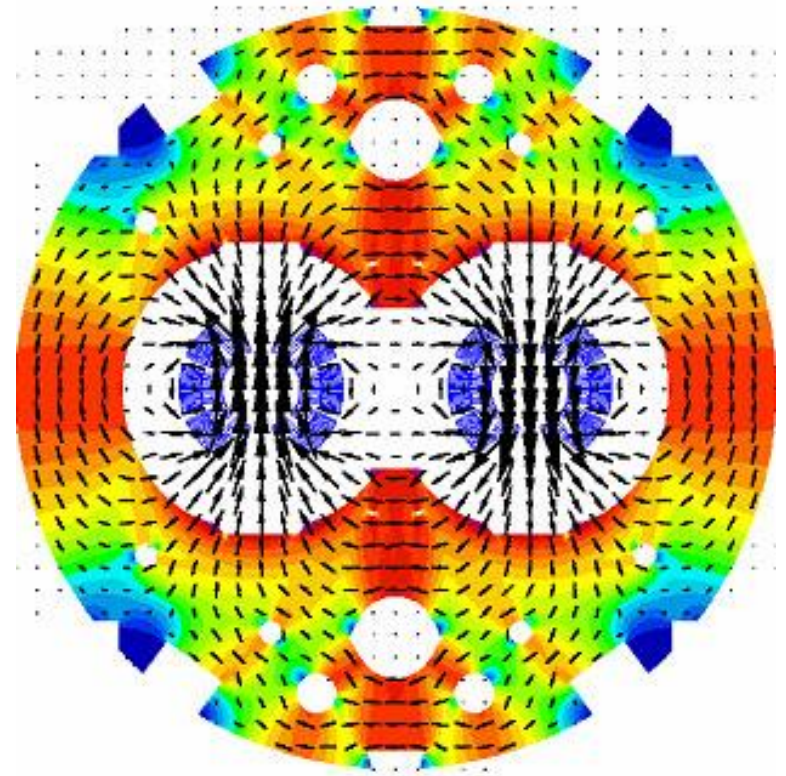
▶ Man erhält sie durch Gleichsetzen von Lorentzkraft und Zentripetalkraft

# 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 m<sup>3</sup>
  - Benötige Pump Zeit: 2 Wochen
- ▶ Temperaturen höher als in der Sonne
  - Temperatur in einer Schwerionenkollision:  $5.5 \times 10^{12}$  K
  - Temperatur Sonne:  $15 \times 10^6$  K

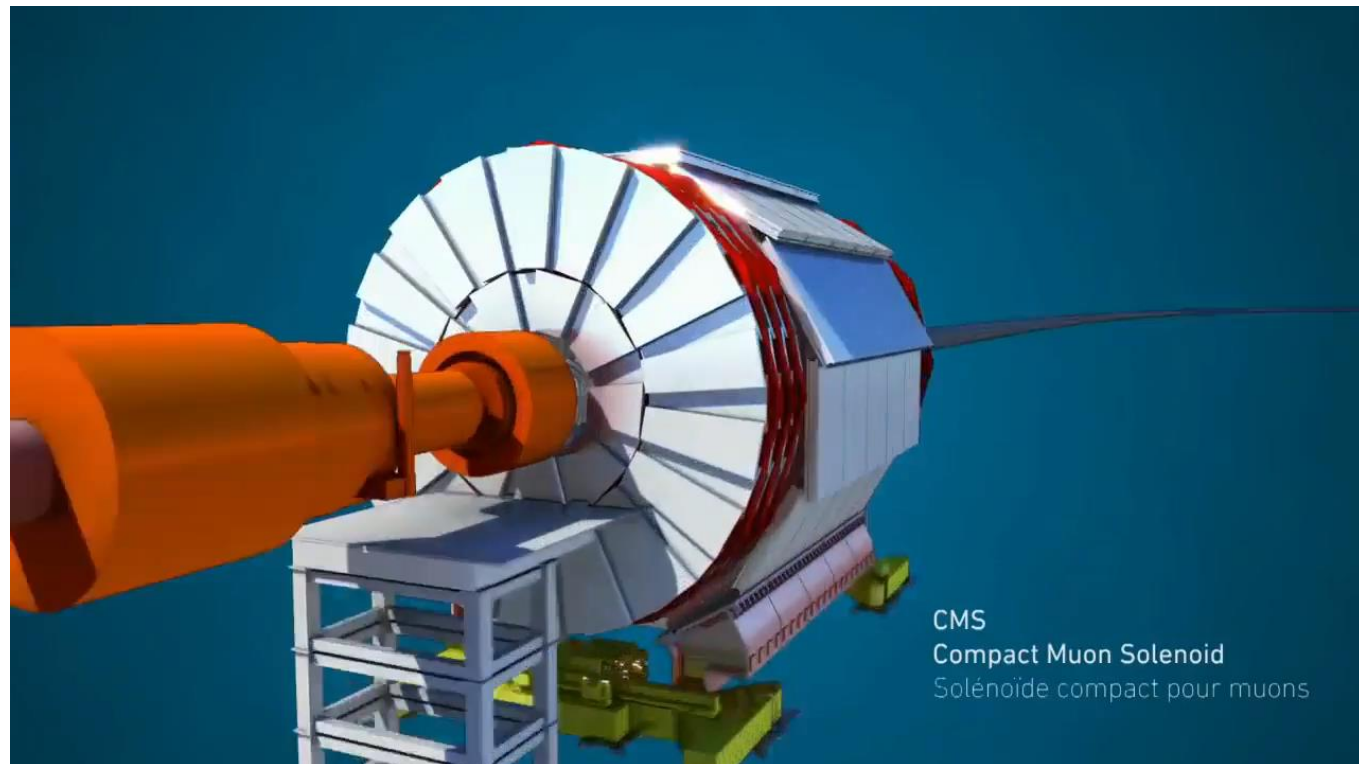
# LHC Dipol Magnete

- ▶ 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!



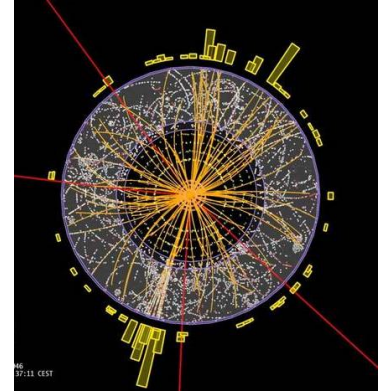
# Teilchenkollisionen im LHC

▶ 600 Mio. Kollisionen pro Sekunde!

▶ Warum?

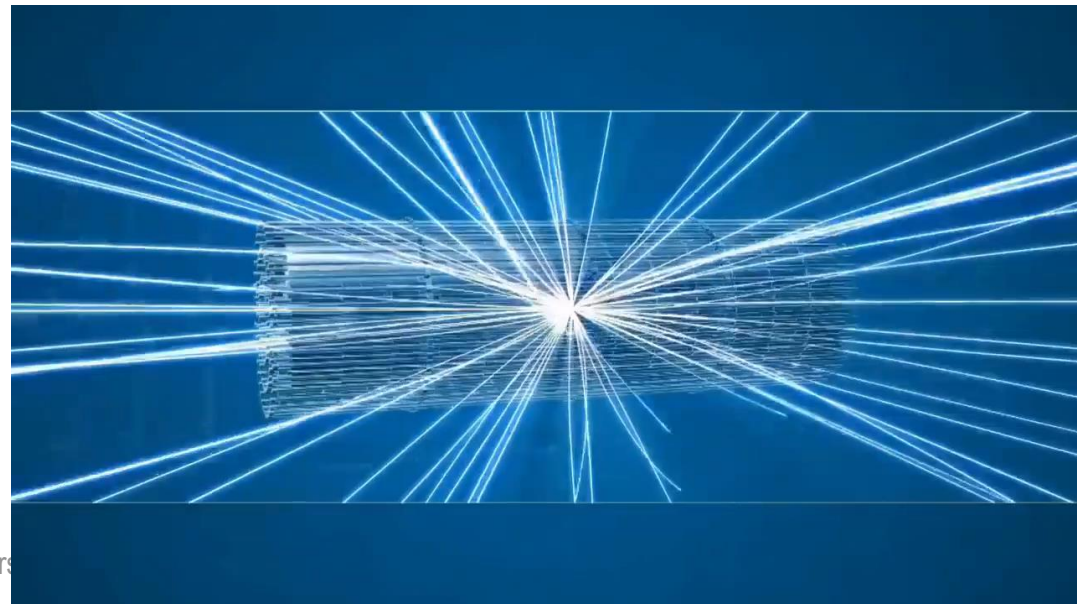
- „Interessante“ Teilchen entstehen sehr selten: ca. 1x pro  $10^{10}$  Kollisionen!
- Welche Teilchen bei einer bestimmten Kollision entstehen, ist nicht eindeutig vorhersagbar
- Man kann nur vorhersagen, wie häufig welche Teilchenkombinationen vorkommen werden

▶ 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!



# ALIAS Open data



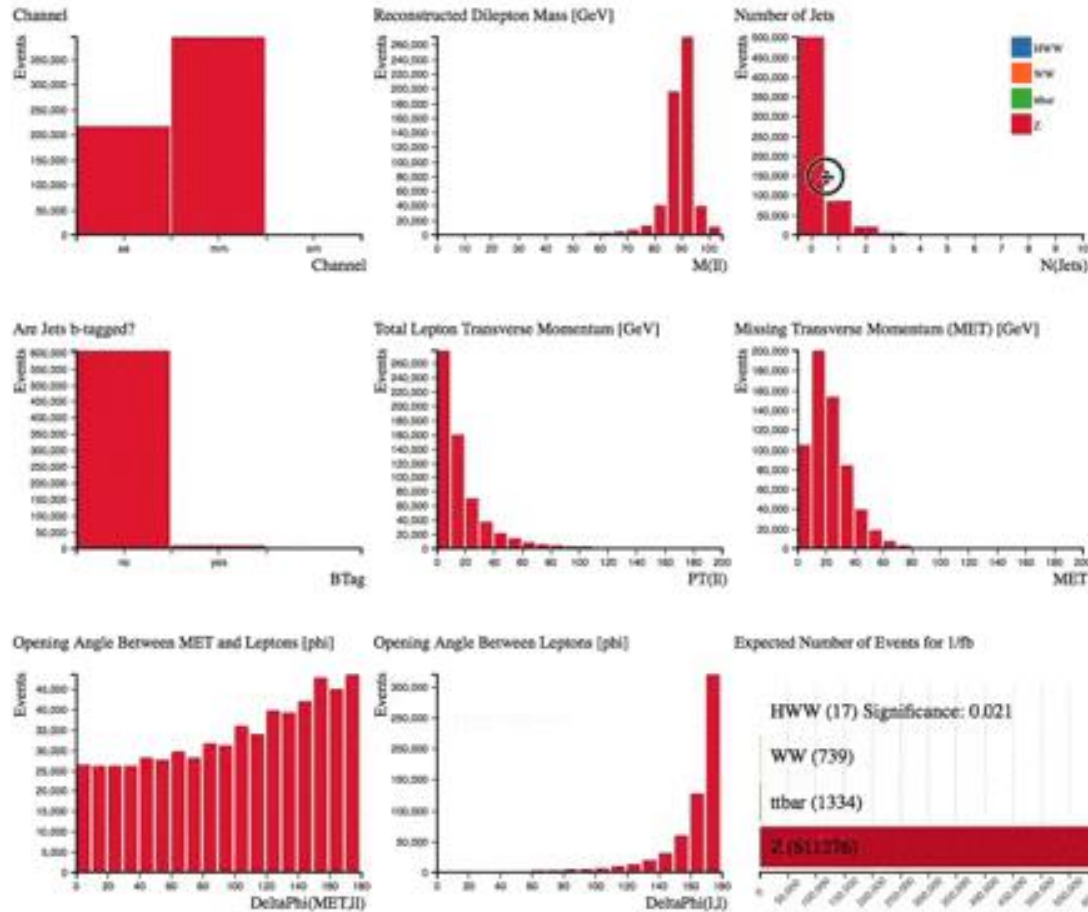
**open data**  
**ATLAS**

**WHAT?**  
The ATLAS Experiment at CERN has released the data from 100 trillion proton collisions. To help users analyse this data, ATLAS has also launched a comprehensive educational platform.

**WHO?**  
ATLAS Open Data is ideal for university-level students and educators, as well as science enthusiasts.

**WHY?**  
The ATLAS Open Data platform brings real high-energy physics to universities around the world - helping to develop the next generation of scientists.

**WHERE?**  
Visit the ATLAS Open Data Platform: [opendata.atlas.cern](http://opendata.atlas.cern)  
Or the CERN Open Data Portal: [opendata.cern.ch](http://opendata.cern.ch)



# 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



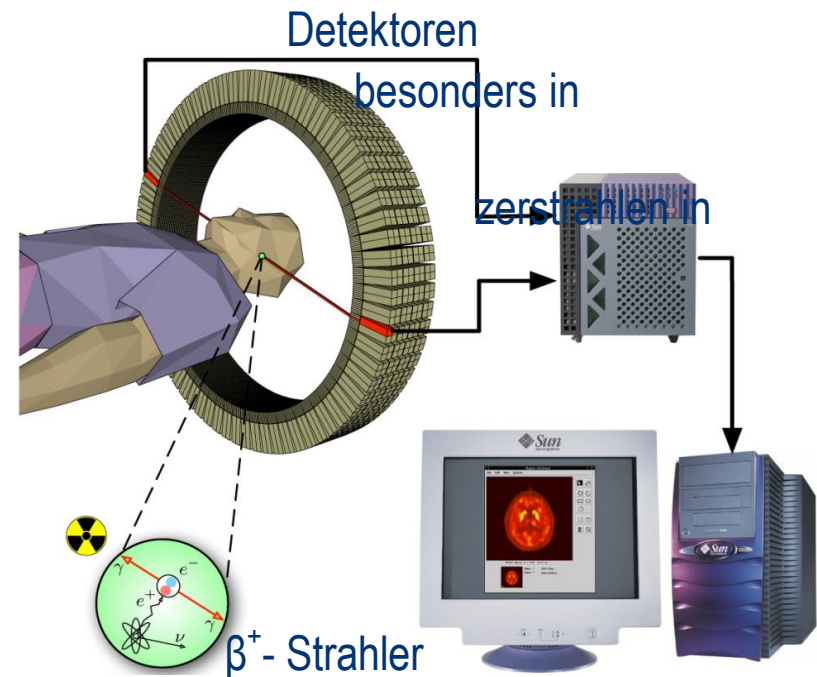
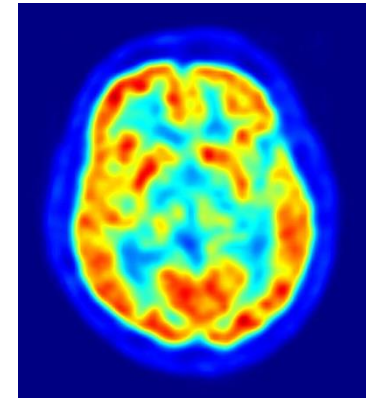
# Diskussion / Fragen



# 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



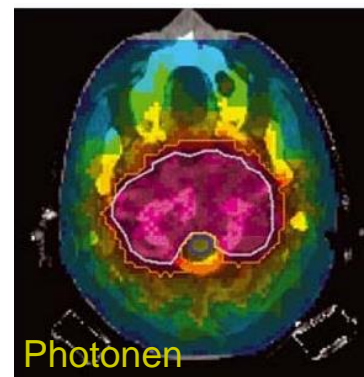
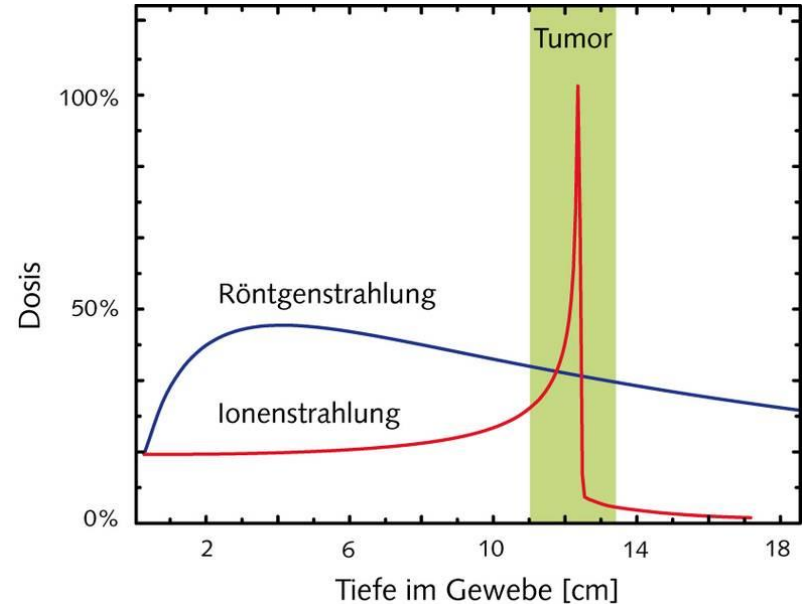
# Tumorthherapie mit Hadronen (meist C)

## ► 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



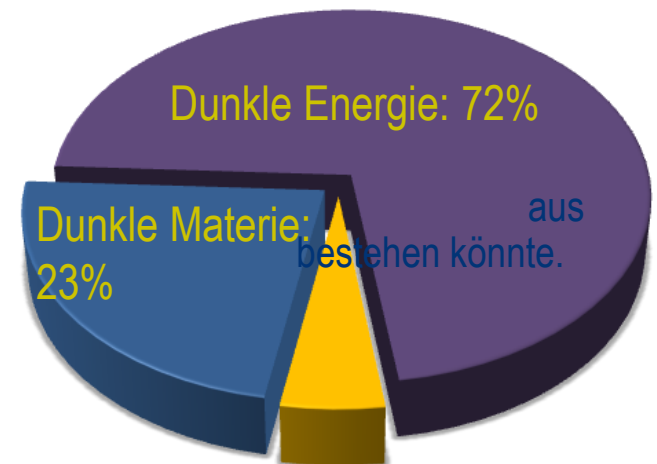
# The SppS

- ▶  $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$
- ▶ 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

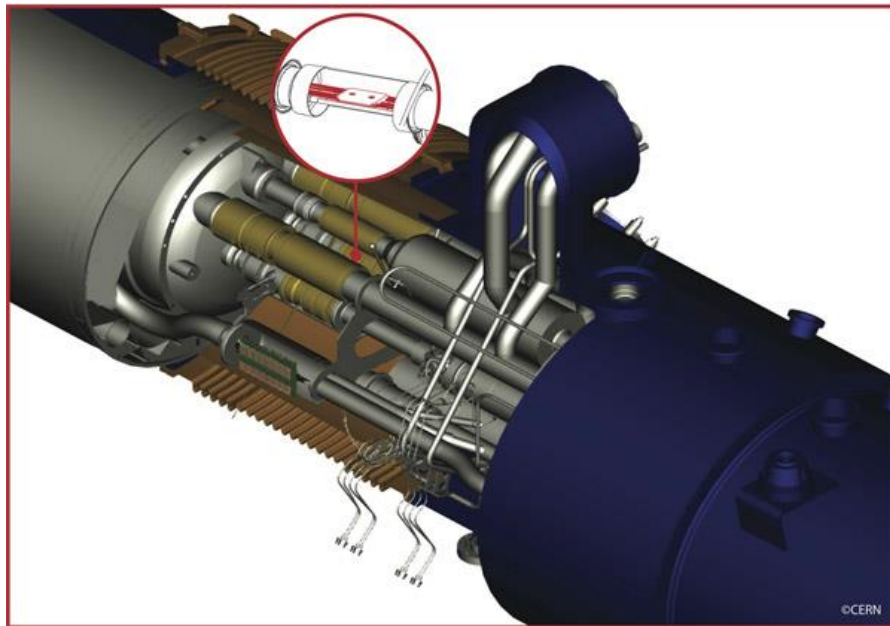


# Zwischenfall 19. September 2008

- ▶ 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



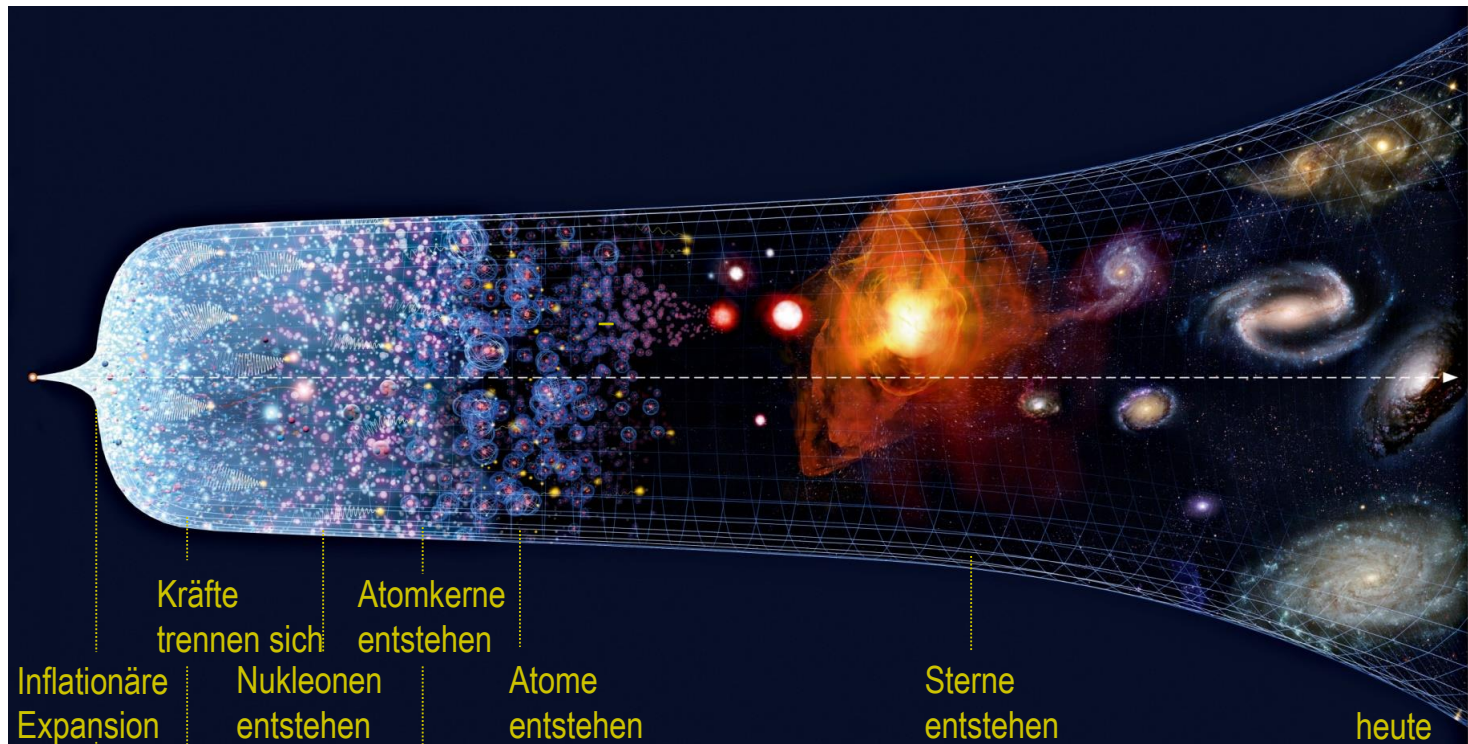
# „The CERN Weasel“

- ▶ 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



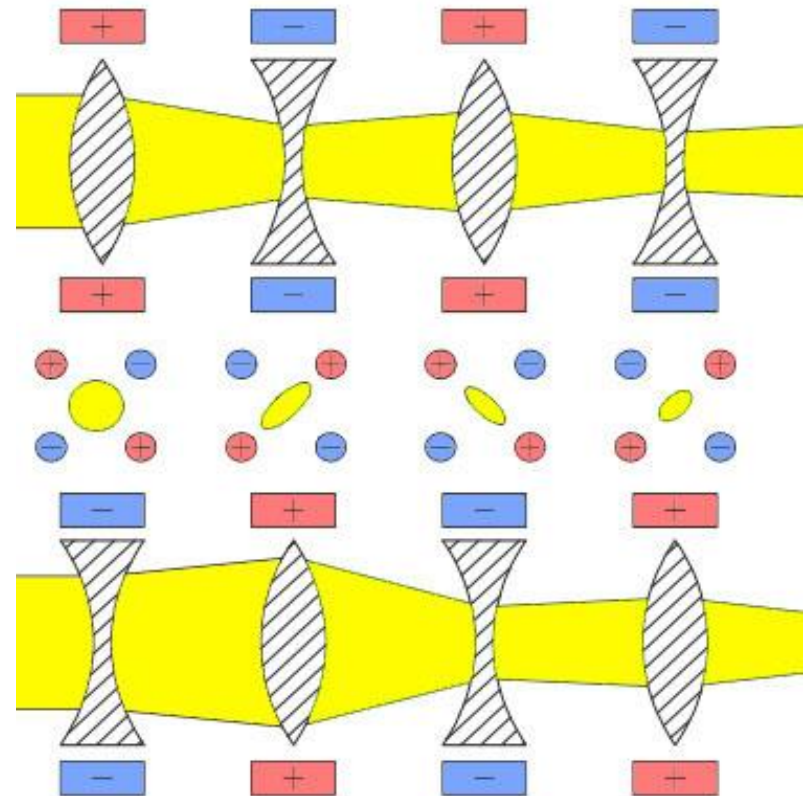
Energie



26.06.2018 LHC-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.

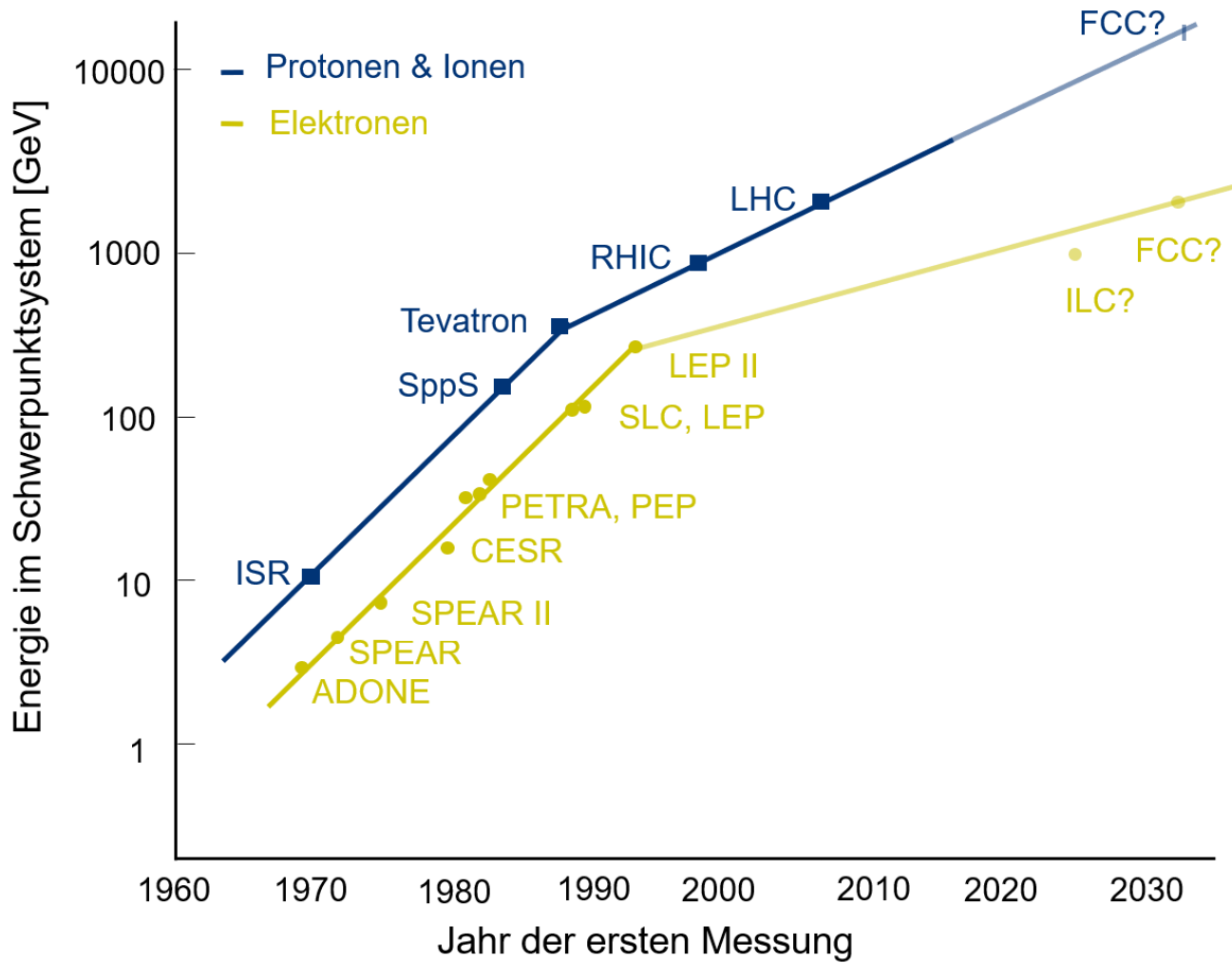
The main content area features a game interface with a top status bar showing 'ENERGIE' (Energy) with a red progress bar from 0 to 100, 'PUNKTE 200' (Points 200), and 'LEBEN' (Life) with three white hard hat icons. A blue 'ENDE' (End) button is on the right. Below this is a circular diagram of the LHC with detectors labeled: CMS, BEAM DUMP, ALICE, ATLAS, and LHCb.

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 sidebar, there are buttons for 'Super BOB' (Pie Herausforderung), 'TOTEM', and 'Worms in the LHC'. On the right sidebar, there are buttons for '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.



