

Forschungsmethoden in der Teilchenphysik I



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Philipp Lindenau, Dr. Claudia Behnkel
Hamburg | 14. – 15.05.2018



NETZWERK
TEILCHENWELT

Basierend auf Band 2:

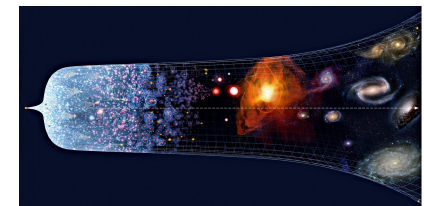
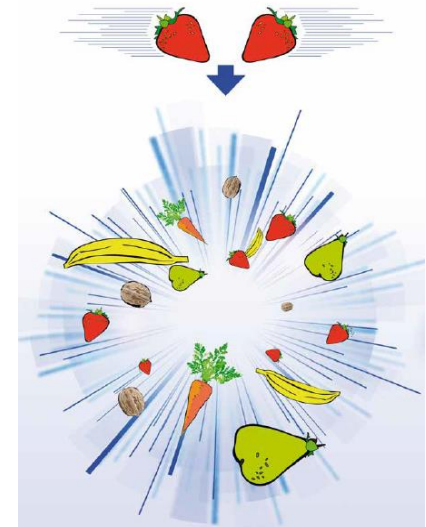
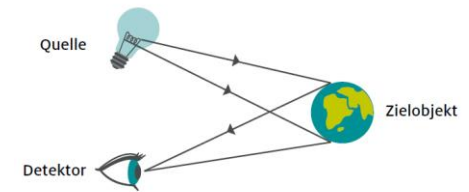
- ▶ Forschungsziele
- ▶ Beschleuniger
- ▶ Detektoren
- ▶ Zahlreiche Aufgaben & Lösungen



- Online www.teilchenwelt.de/tp
- Druckexemplar Bestellbar bei Netzwerk Teilchenwelt

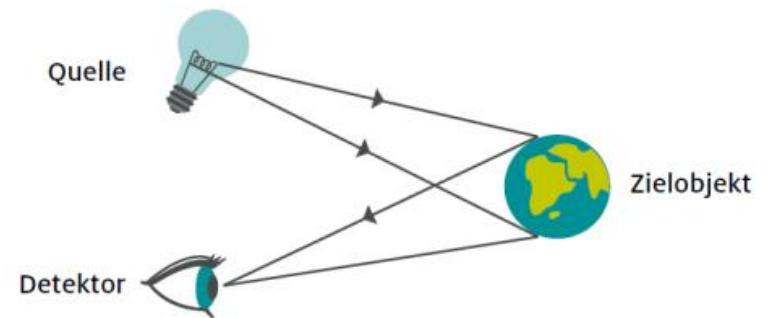
Forschungsziele

- ▶ 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)

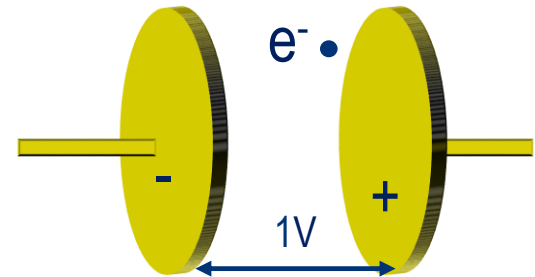


Strukturuntersuchungen

- ▶ 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?

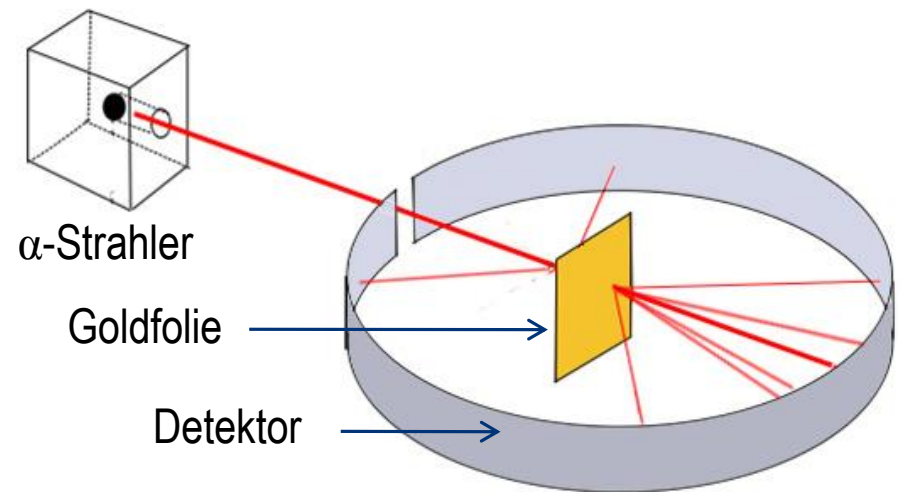
Einschub: Elektronenvolt

- ▶ 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 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 $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$

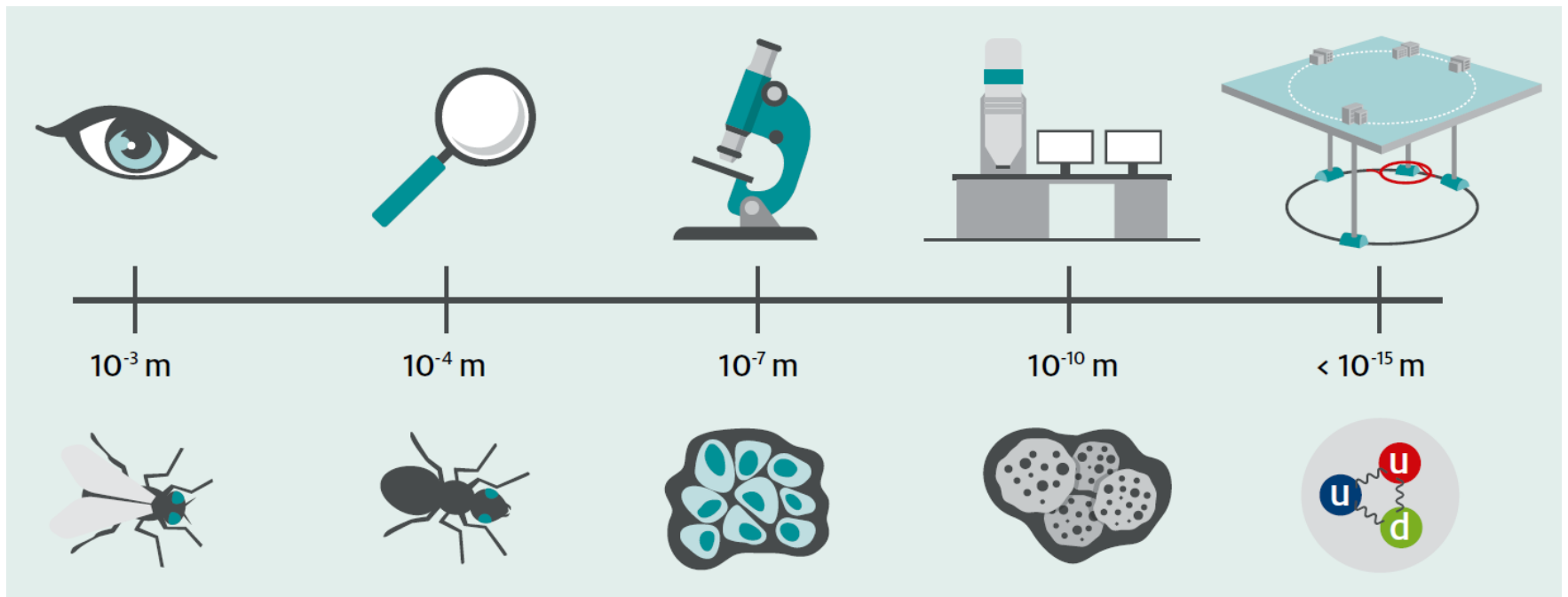


Strukturuntersuchungen

- ▶ Rutherford-Streuexperiment (1911)
 - Nachweis des Atomkerns
- ▶ Streuung von α -Teilchen an Goldatomen
- ▶ Energie des α -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

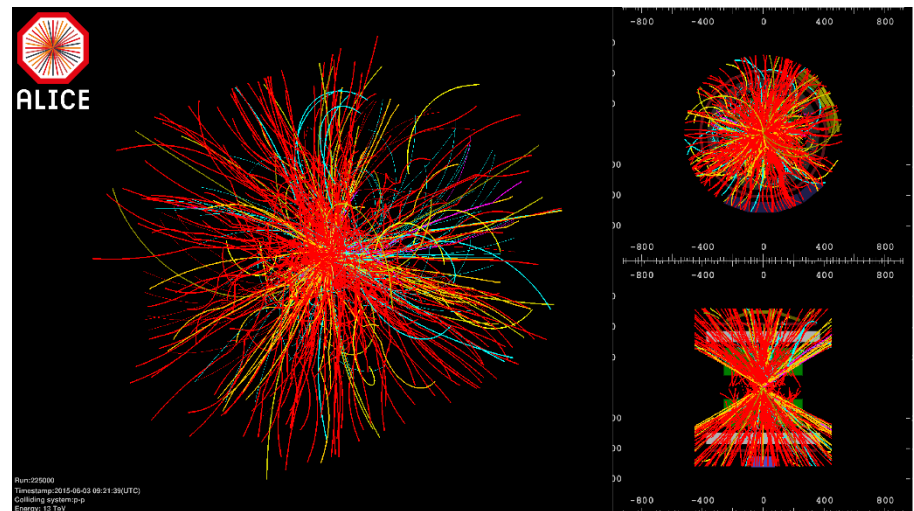


Strukturuntersuchungen



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
- ▶ Elektronen + Positron mit je $E_{\text{kin}} = 50\text{GeV}$
 - $\sim 100\text{GeV}$



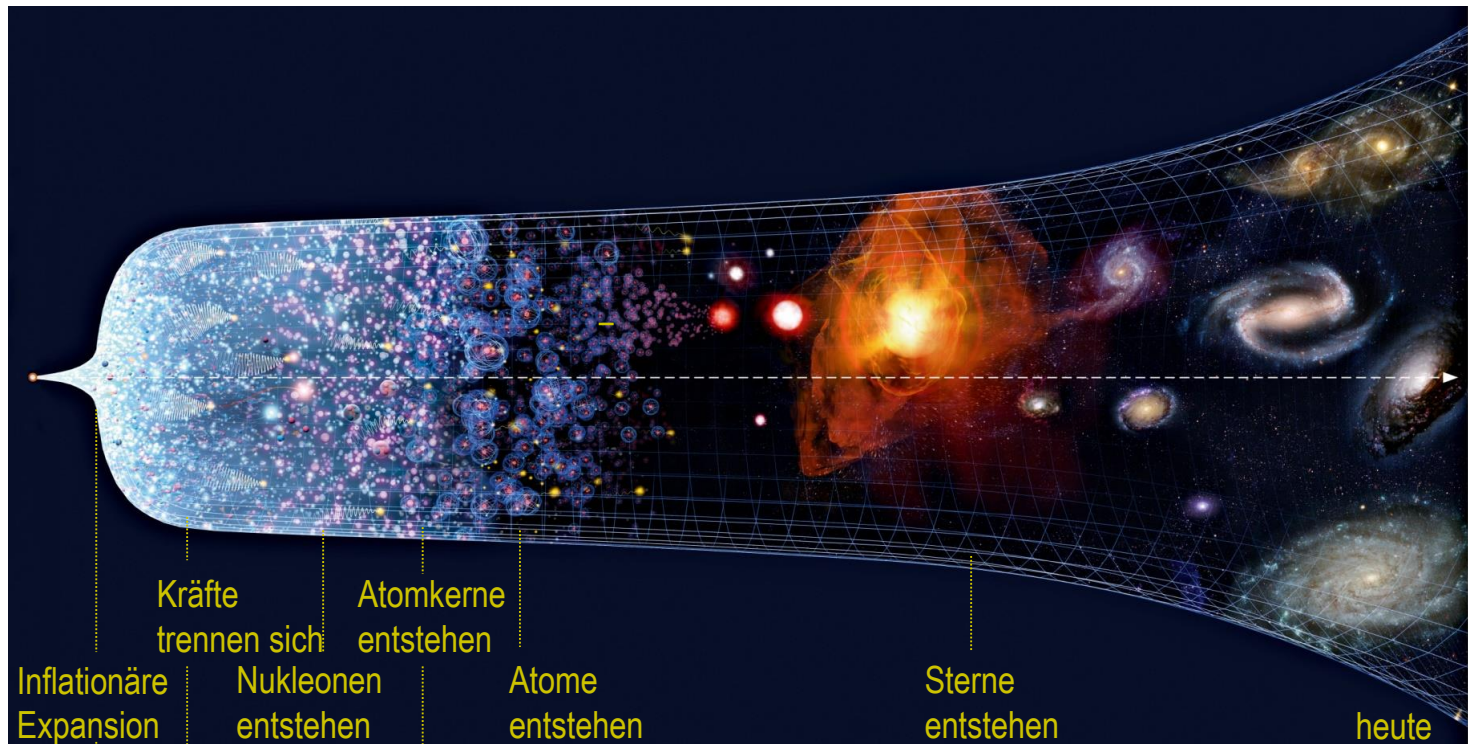
Erzeugung „neuer“ Teilchen

- ▶ Entdeckung der W^\pm und Z^0 Austauschpartikel
- ▶ Massen vorhergesagt 1946 (Higgs)
 - $m_W: 83 \pm 3 \text{ GeV}$ $m_Z: 94 \pm 3 \text{ GeV}$
- ▶ Existierender Beschleuniger: SPS (CERN)
 - Protonenstrahl mit $E_{\text{kin}} 400 \text{ GeV}$ 😊
 - Strahl kollidiert mit festem Target
 - Zur Verfügung stehende Energie $\sim \sqrt{E_{\text{kin}}}$ 😞
- ▶ Idee: Kollision von Proton von Antiproton!
 - Zur Verfügung stehende Energie $\sim 530 \text{ GeV}$
 - Teilchen nachgewiesen: 20 Januar 1983
 - Nobelpreise für Carlo Rubbia und Luigi Di Lella



Erzeugung extremer Bedingung

Urknall



Zeit

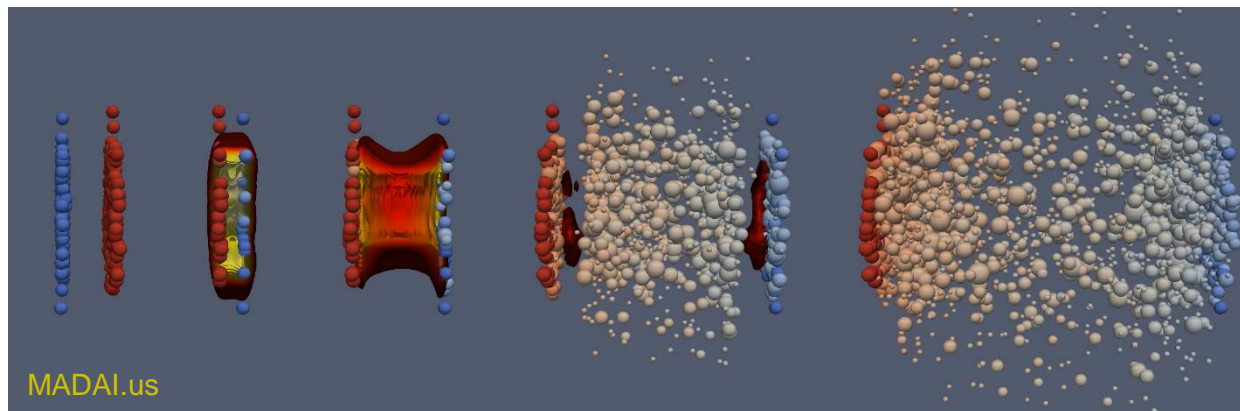


Energie



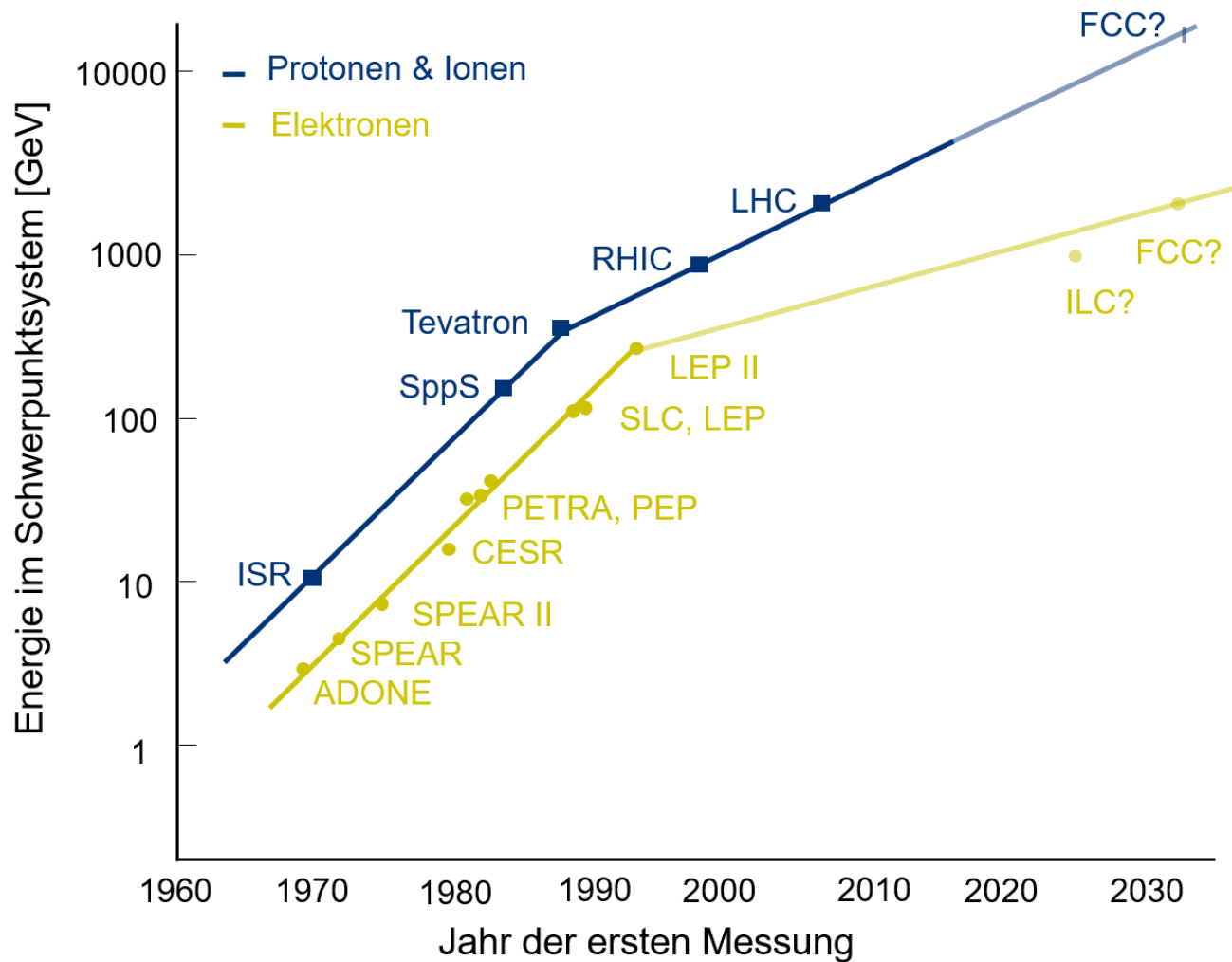
Erzeugung extremer Bedingung

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



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

Beschleunigeranlagen



Das CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

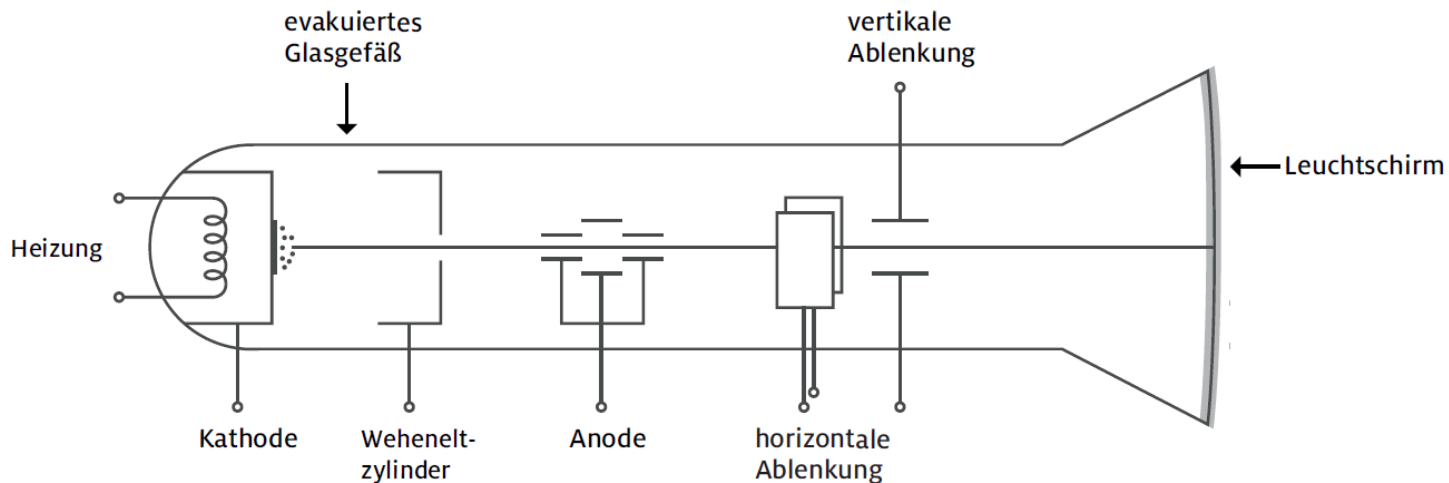
- ▶ Das größte Teilchenphysik-Forschungszentrum der Welt im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich
- ▶ Gegründet 1954
- ▶ Dort arbeiten
 - 12.500 Wissenschaftler
 - Aus 110 Ländern
- ▶ CERN's Jahresbudget 2016 = 1.1 Milliarde €
 - Entspricht 1 Cappuccino pro EU Bürger
 - Entspricht 1% des US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



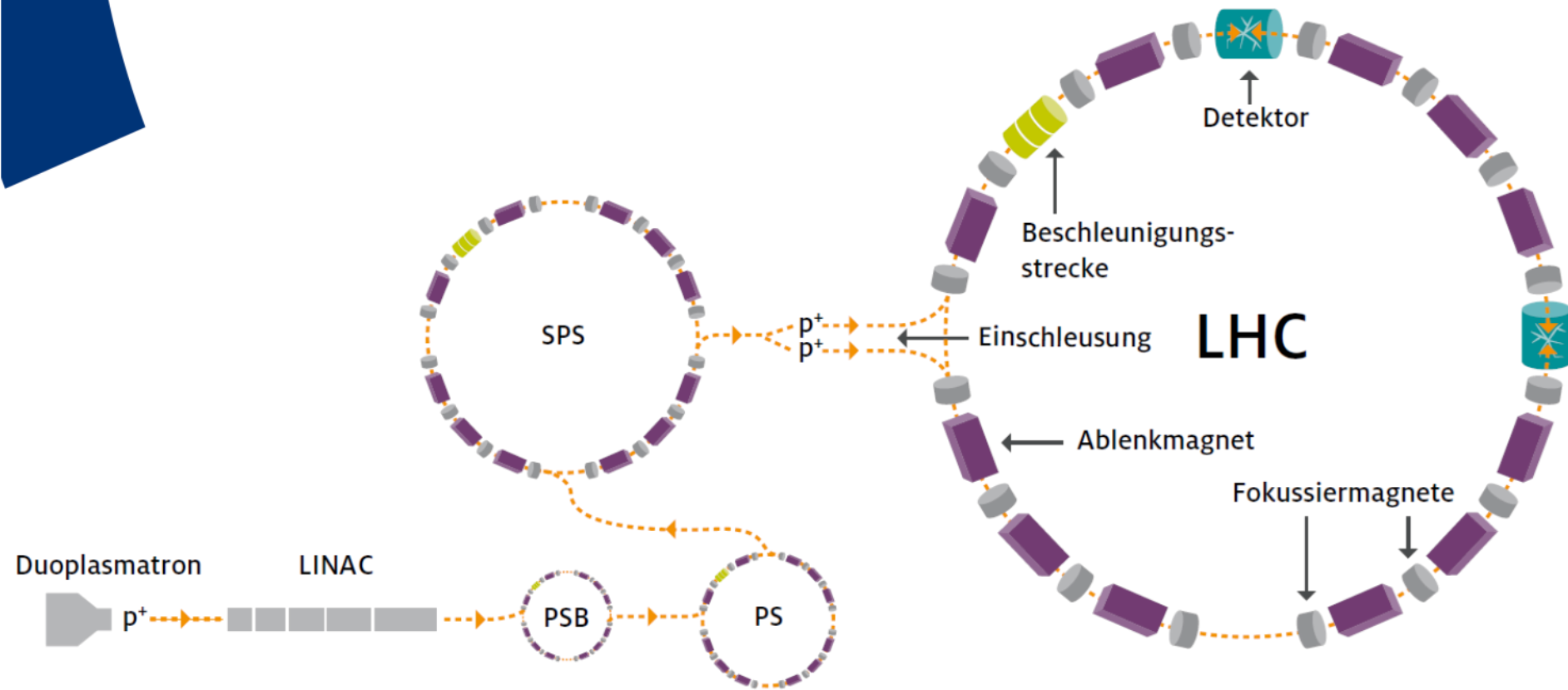
Elektronenstrahlröhre

► Der einfachste Beschleuniger

- Elektronen erzeugen: Glühkathode
- Elektronen beschleunigen: elektrisches Feld
- Elektronen ablenken und/oder fokussieren: elektrisches oder magnetisches Feld

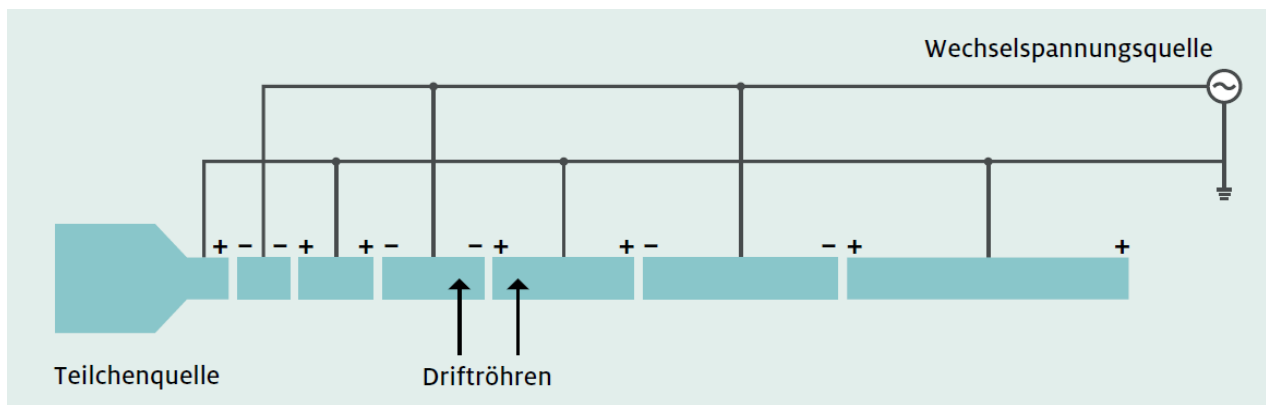


Die Beschleuniger am CERN

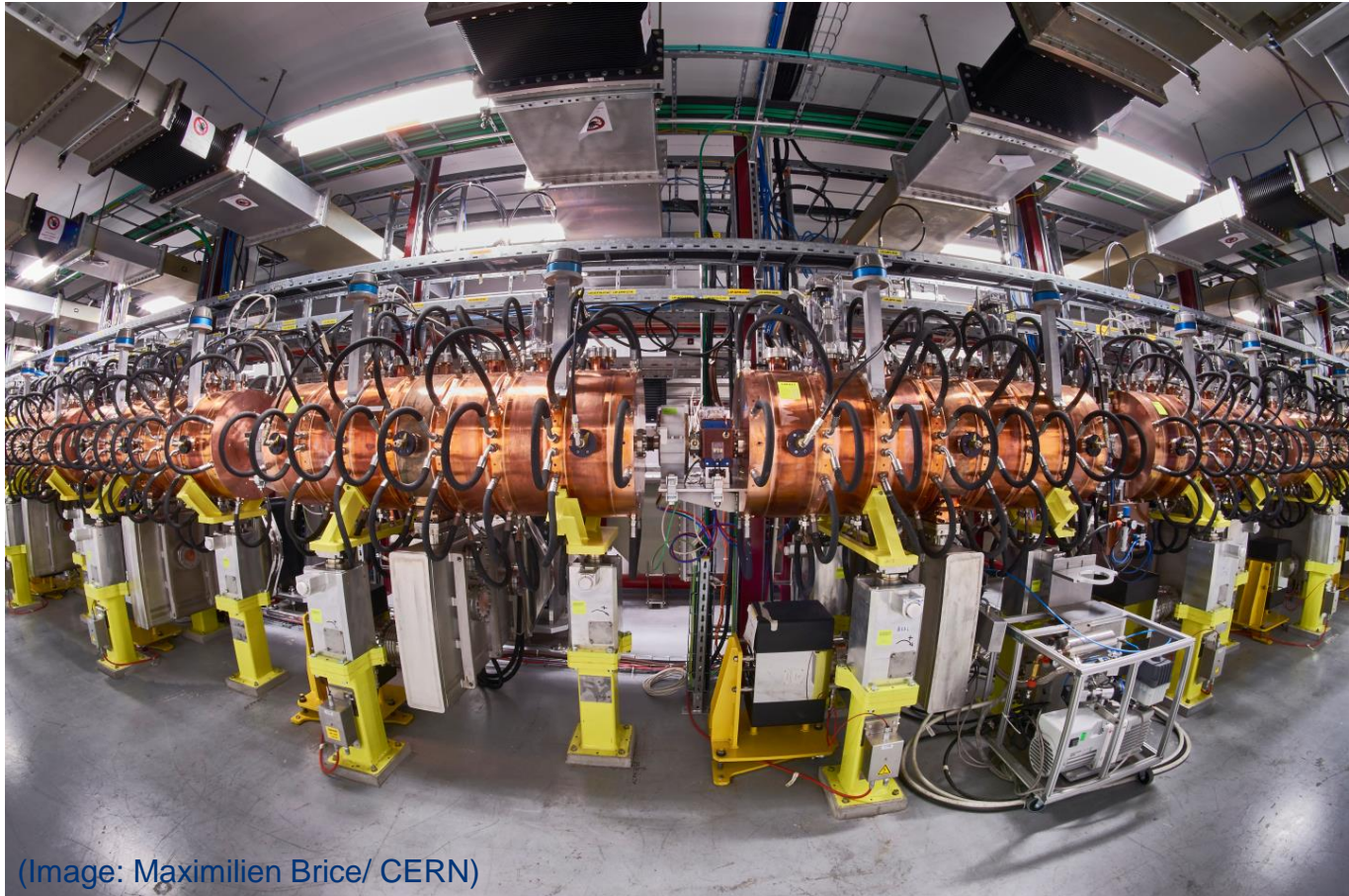


Linearbeschleuniger

- ▶ Elektrisch geladenen Teilchen durchlaufen ein elektrisch „anziehendes“ Feld
- ▶ In Driftröhren sind diese Felder abgeschirmt
- ▶ Die Polung des elektrischen Feldes während des Durchfliegens umgekehrt
- ▶ Das Teilchen sieht erneut ein anziehendes Feld
- ▶ Teilchen werden schneller → Driftröhren werden länger



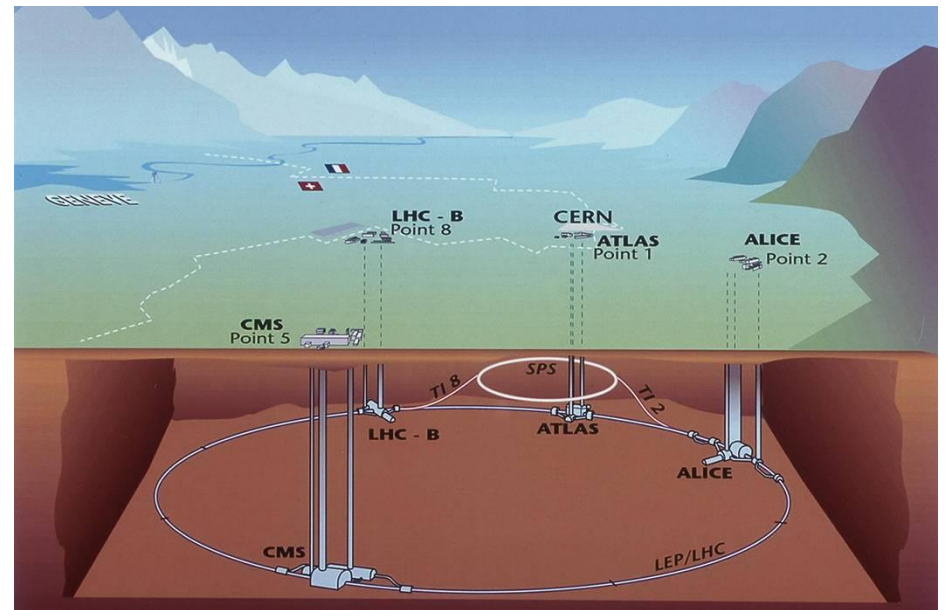
Der LINAC 4 am CERN



(Image: Maximilien Brice/ 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

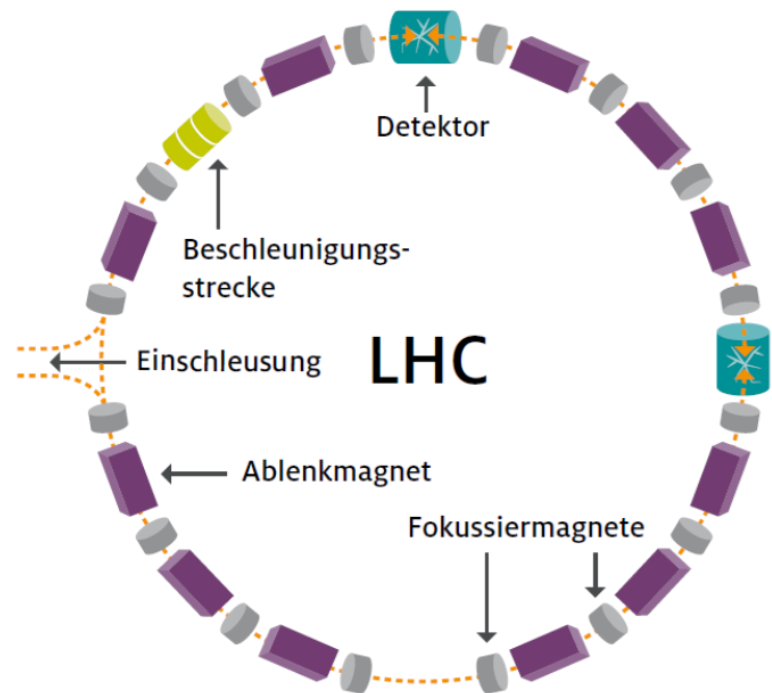
LHC Fun Facts

- ▶ 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: 1.013×10^{-10} mbar
 - Benötigte Pump Zeit: 2 Wochen
- ▶ Temperaturen höher als in der Sonne
 - Temperatur in einer Schwerionenkollision: 5.5×10^{12} K
 - Temperatur Sonne: 15×10^6 K

Wie funktioniert der LHC

► Im LHC durlaufen Teilchenpakete (Bunches) von Protonen eine kreisförmige Bahn, auf der sie:

- Beschleunigt werden (elektrisches Wechselfeld)
- Abgelenkt werden (Dipol Magnete)
- Fokussiert werden (Quadrupol Magnete)



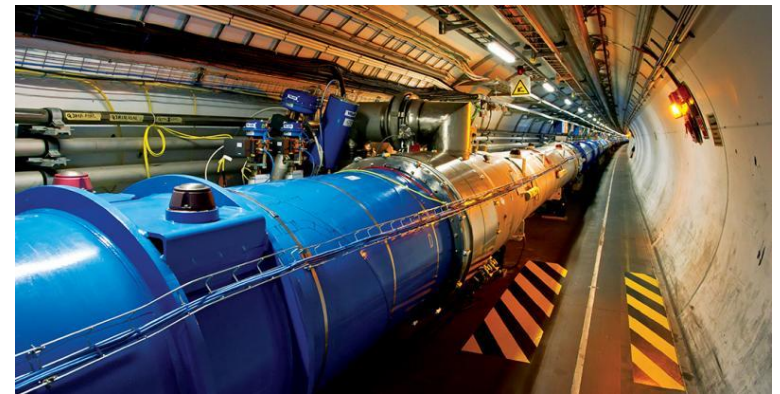
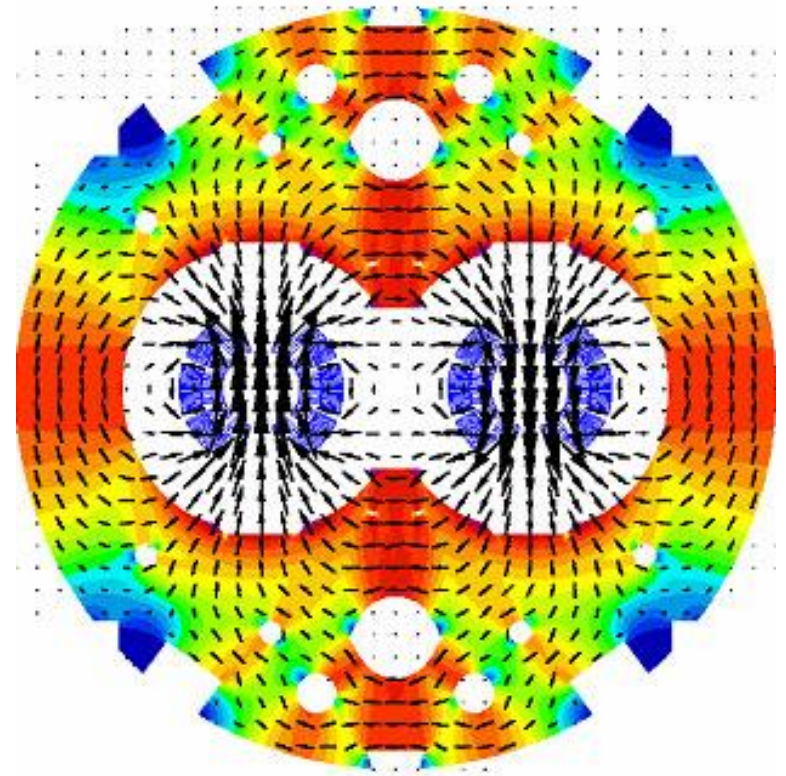
LHC Beschleunigungsstrecke

- ▶ Zur Beschleunigung dienen 16 supraleitende Hochfrequenz-Hohlraumresonatoren (je 8 pro Strahlrohr).
- ▶ Die LHC Kavitäten erreichen einen Beschleunigungsgradient von bis zu 5.5 MV pro Meter.



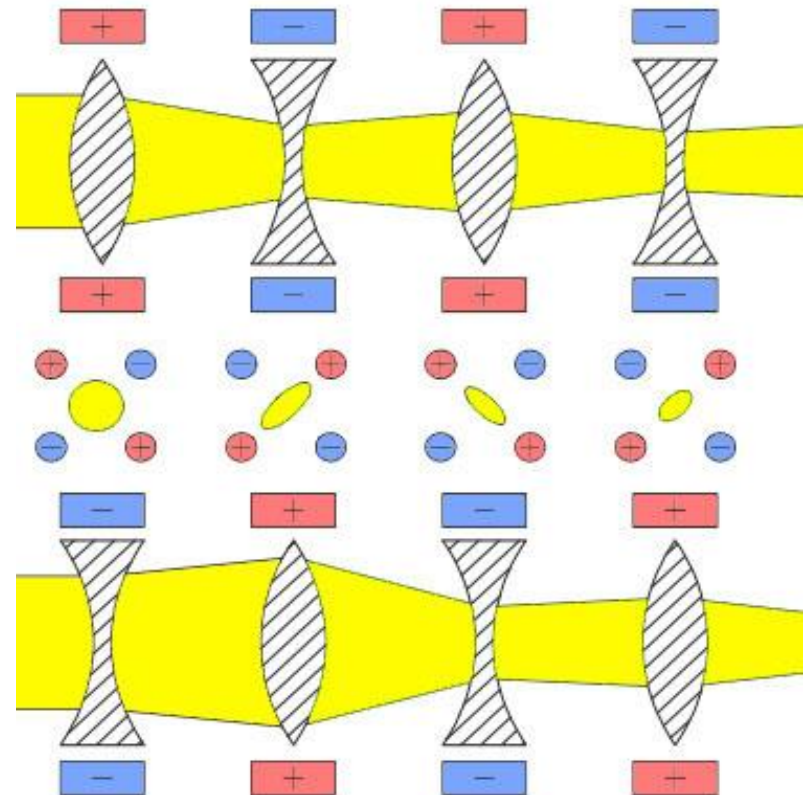
LHC Dipol Magnete

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



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 progress bar from 0 to 100, 'PUNKTE 200' (Points 200), and 'LEBEN' (Life) with three helmet icons. A 'ENDE' (End) button is also present. Below this is a circular diagram of the LHC with detectors labeled: CMS, BEAM DUMP, ALICE, ATLAS, and LHCb.

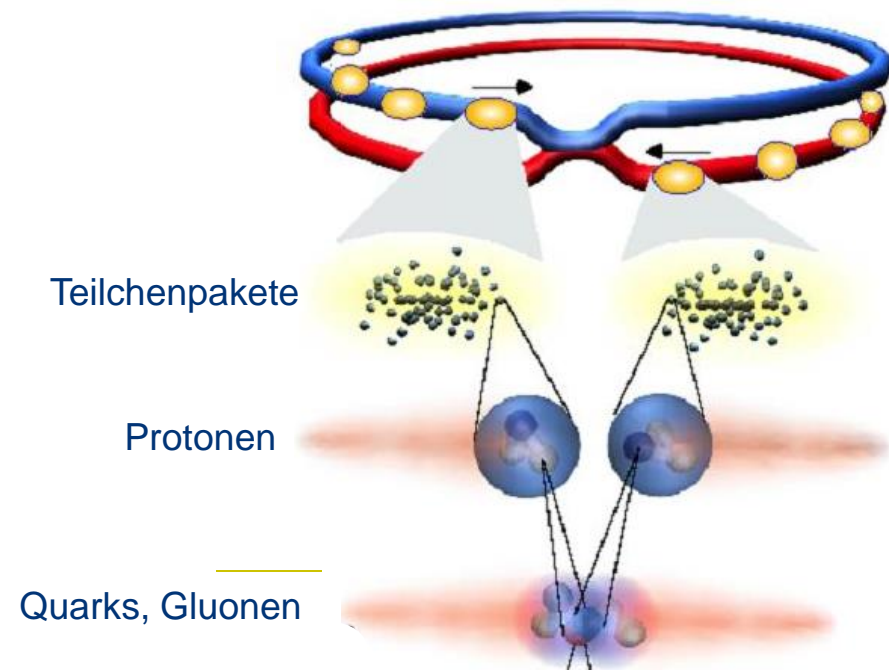
The game area shows a character in a hard hat and safety vest walking through a tunnel. There are floating items like a chocolate bar and a tablet. A red worm-like creature is visible on the right. A button labeled 'Anweisungen' (Instructions) is at the bottom left of the game area.

On the left side, there are three game thumbnails: 'Super BOB Die Herausforderung', 'TOTEM', and 'Worms in the LHC'. On the right side, there are three more sections: 'Learn about CERN', 'ALL THE GAMES', and 'NEWS'.

At the bottom, there is a footer with 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'.

Teilchenkollisionen im LHC

- ▶ 2 gegenläufige Protonenstrahlen
 - ▶ ...mit je 1400 Teilchenpaketen
 - ▶ 100 Milliarden Protonen pro Paket
 - ▶ 20 Millionen Paket-Kreuzungen
 - ▶ ...mit je etwa 30 Kollisionen
- ca. 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde!



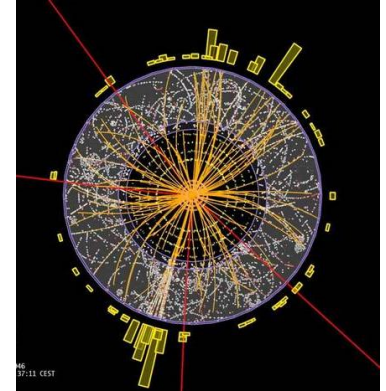
Teilchenkollisionen im LHC

▶ 600 Mio. Kollisionen pro Sekunde!

▶ Warum?

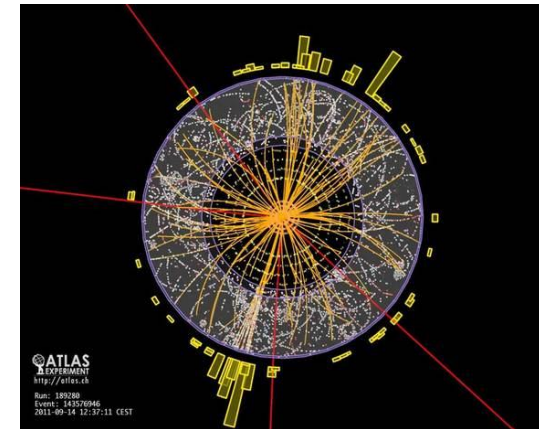
- „Interessante“ Teilchen entstehen sehr selten: ca. 1x pro 10^{10} Kollisionen!
- Welche Teilchen bei einer bestimmten Kollision entstehen, ist nicht eindeutig vorhersagbar
- Man kann nur vorhersagen, wie häufig welche Teilchenkombinationen vorkommen werden

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



Wohin mit so vielen Daten?

- ▶ 20 Mio. Protonenpaket-Kreuzungen 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
- ▶ Verteilung der Daten auf ca. 200 000 Rechner in 34 Ländern (LHC-Grid)
- ▶ ...etwa 15 Petabyte/Jahr!



Wohin mit so vielen Daten?



Server Farm im 1450 m² großen Hauptraum des Data Centers

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



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

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



www.facebook.de/teilchenwelt/



NETZWERK
TEILCHENWELT

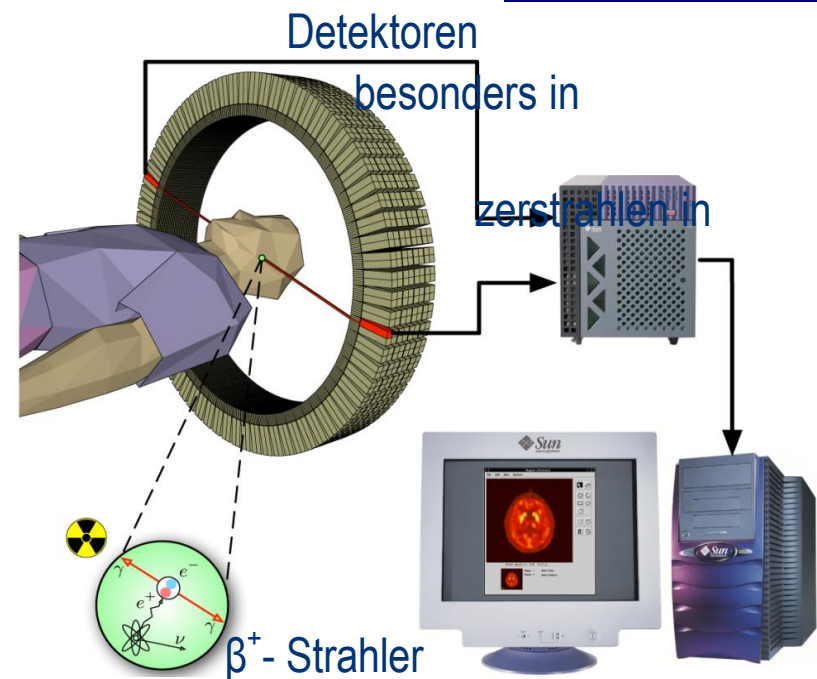
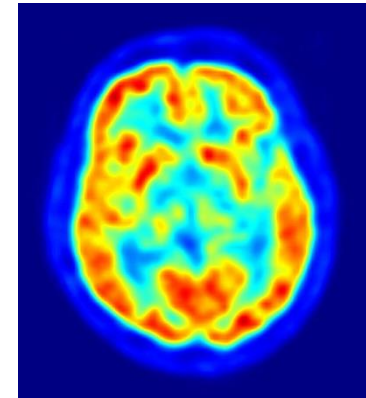
Diskussion / Fragen



Positronen-Emissions-Tomografie

► Ein bildgebendes Verfahren für die Medizin

- Patienten wird eine spezielle Zuckerlösung gespritzt
- Diese enthält ein Fluor-Isotop, das Positronen abstrahlt (β^+ -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



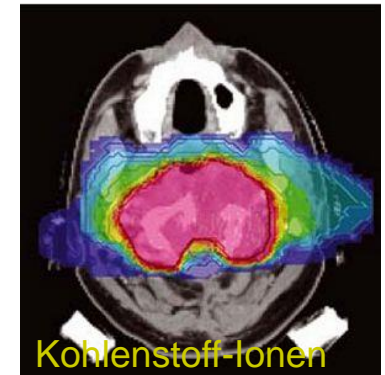
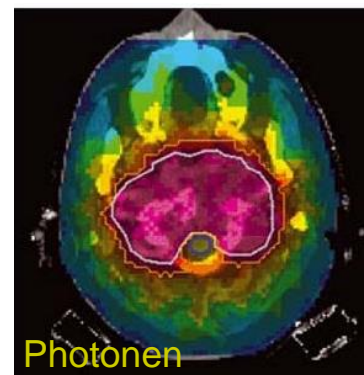
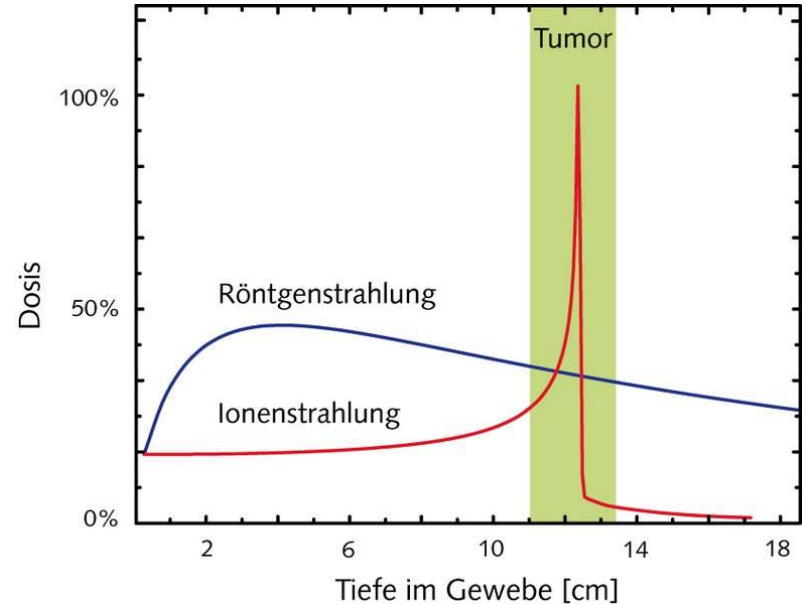
Tumorthherapie mit Hadronen (meist C)

► 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



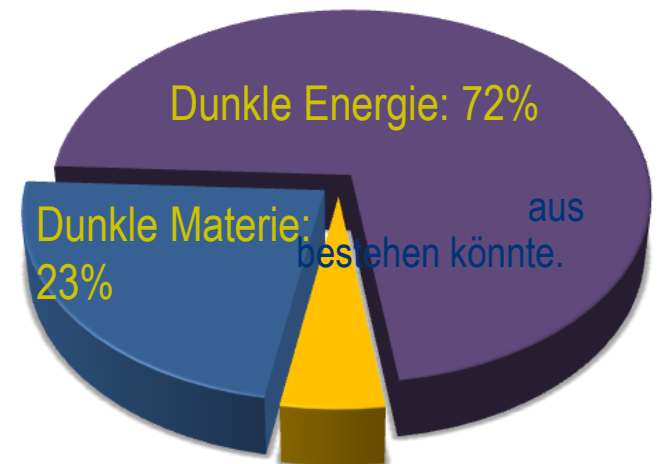
The SppS

- ▶ $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$
- ▶ 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

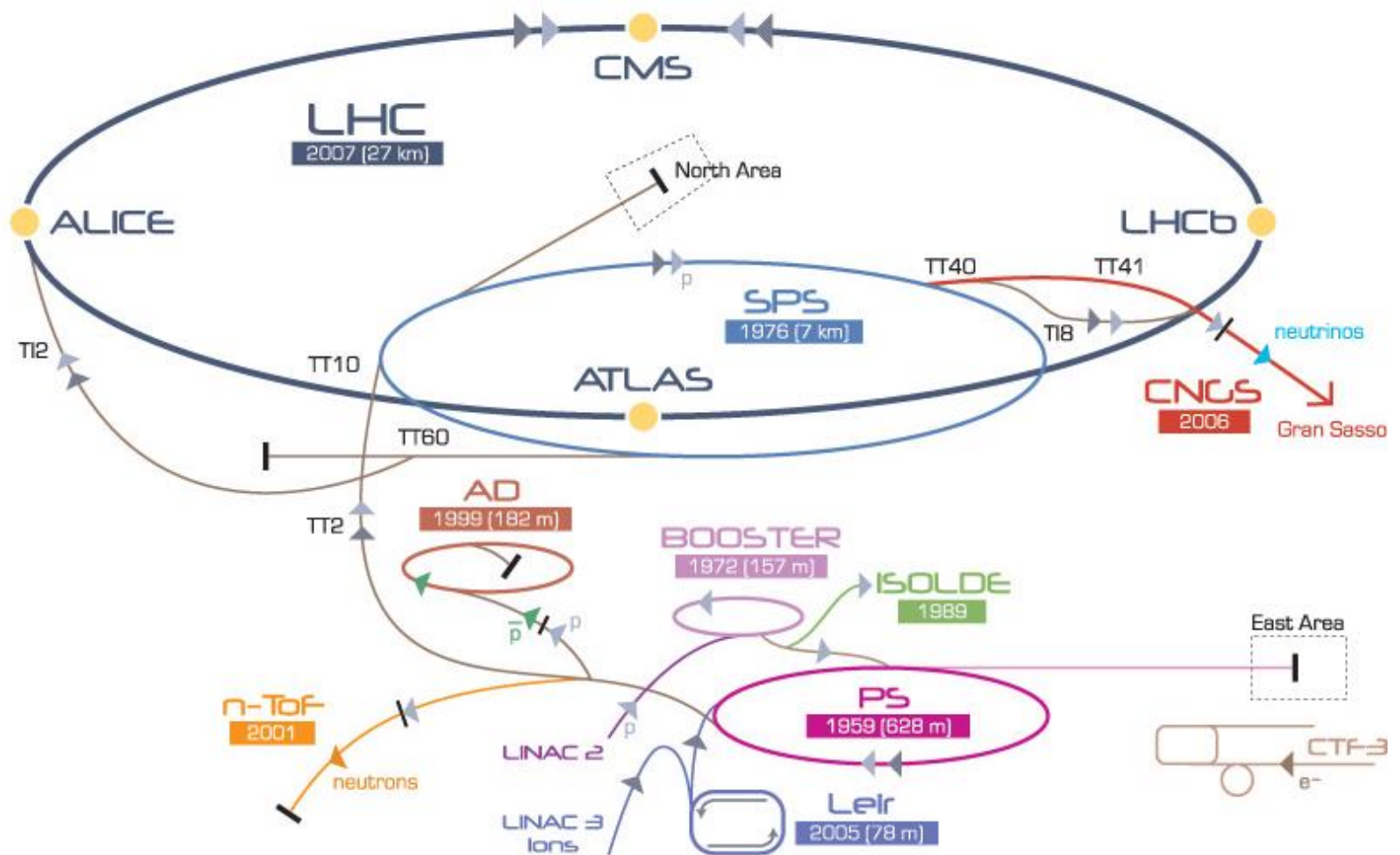


Was ist Dunkle Materie?

- ▶ 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



Die Beschleuniger am CERN (Realität)



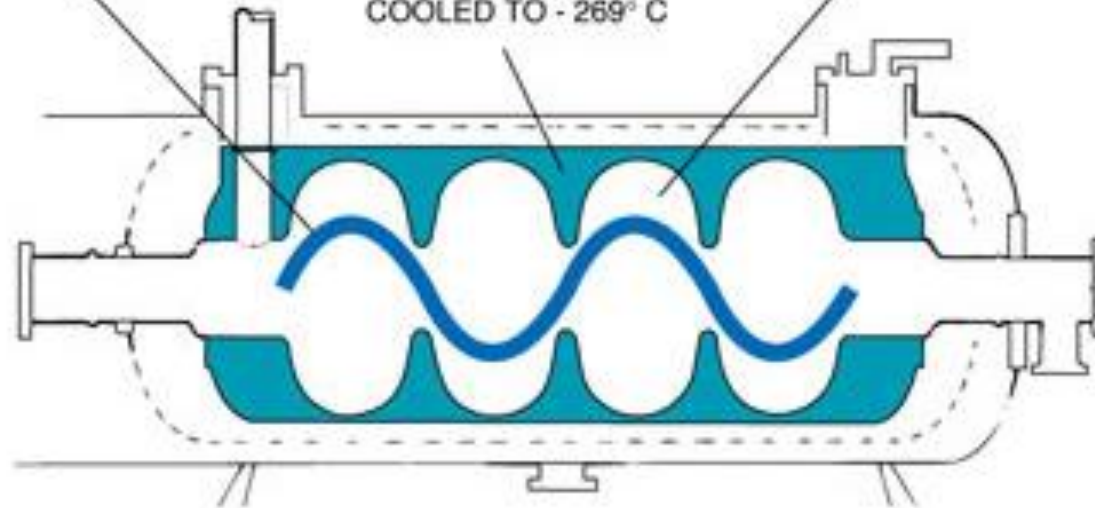
LHC Kavitäten

THE USE OF SUPRACONDUCTIVITY TO INCREASE PERFORMANCES AND CONSIDERABLY REDUCE ELECTRICITY CONSUMPTION

ACCELERATING ELECTROMAGNETIC WAVE

SUPERCONDUCTING ACCELERATING CAVITY MADE OF NIOBIUM

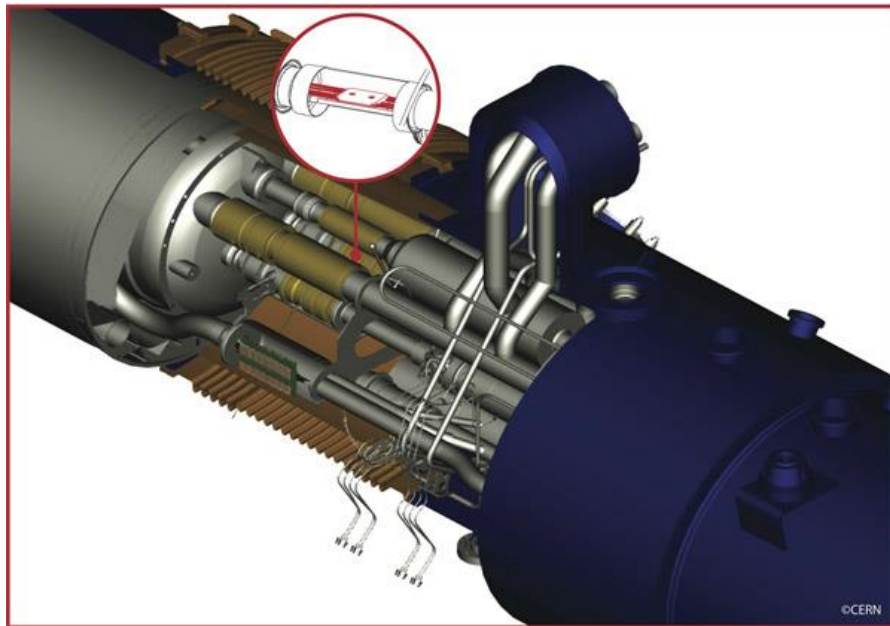
LIQUID HELIUM COOLED TO -269°C



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 Vorfalls 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

