

Forschungsmethoden in der Teilchenphysik I

Fachvortrag



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Philipp Lindenau, Niklas Herff
Ratingen | 02.-03.12.2021



NETZWERK
TEILCHENWELT

Basierend auf Band 2:

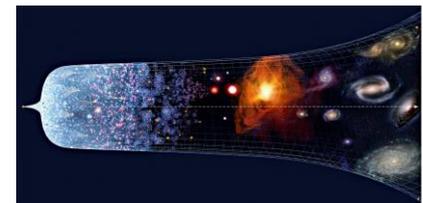
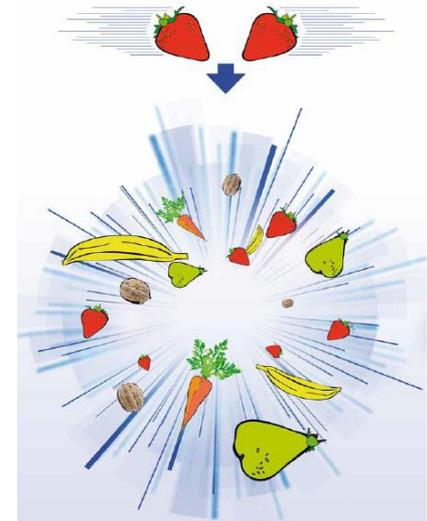
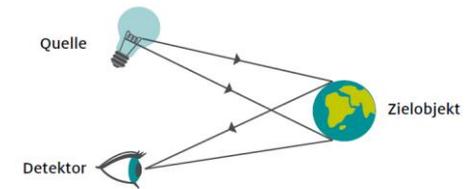
- ▶ Forschungsziele
- ▶ Beschleuniger
- ▶ Detektoren *(nach der Pause)*
- ▶ Zahlreiche Aufgaben & Lösungen



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

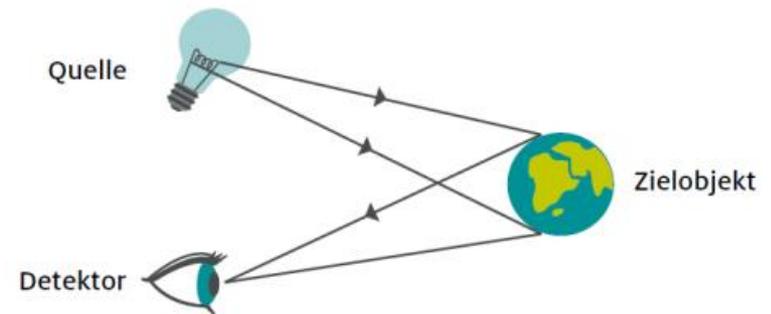
Forschungsziele

- ▶ 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)

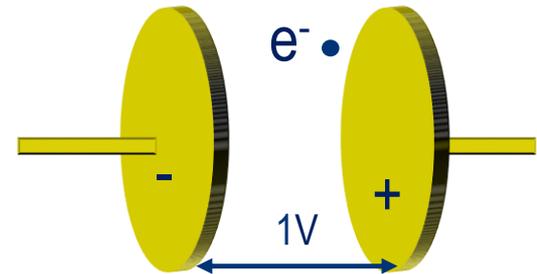


Strukturuntersuchungen

- ▶ 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 $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$



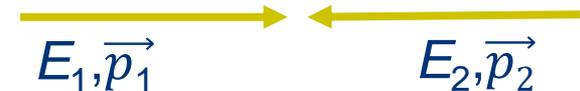
Erzeugung „neuer“ Teilchen

- ▶ 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

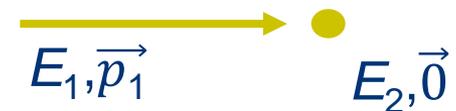
$$E_{cm} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2} = \sim 100\text{GeV}$$



- ▶ Proton mit $E_1 = 50\text{GeV}$ trifft auf ruhendes Antiproton

- Energie im Schwerpunktsystem

$$E_{cm} \sim \sqrt{2E_1 m_1} = \sim 7\text{GeV}$$



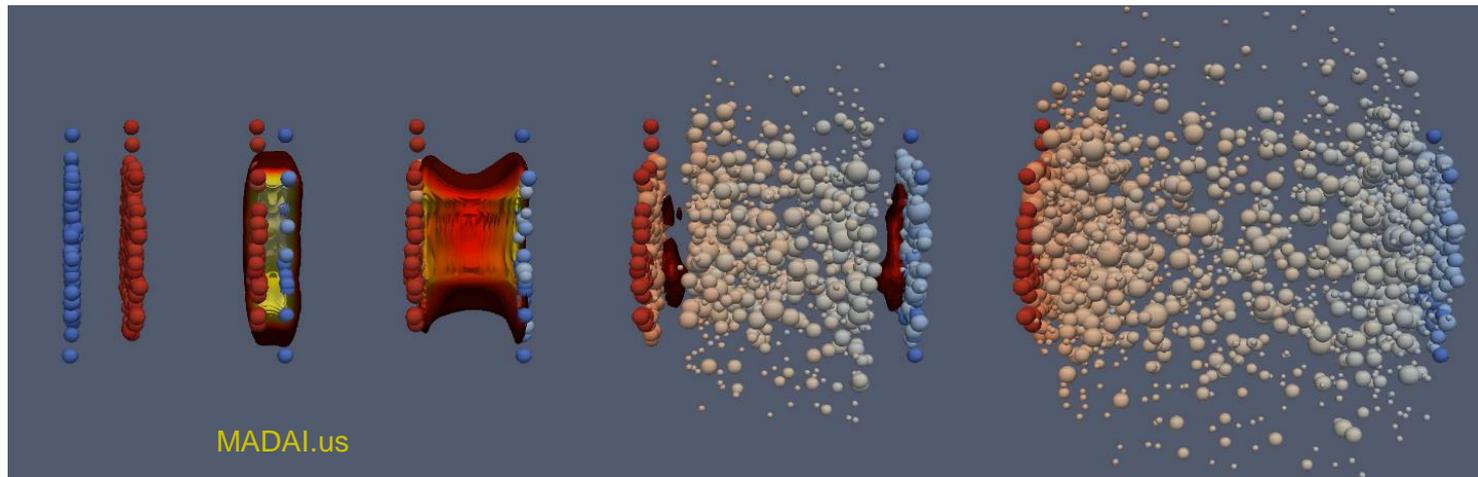
Erzeugung „neuer“ Teilchen



- ▶ Entdeckung der W^\pm und Z^0 Botenteilchen
- ▶ 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 Simon van der Meer (Stochastische Kühlung)

Erzeugung extremer Bedingung

- ▶ Momentaufnahmen einer solchen Kollision:

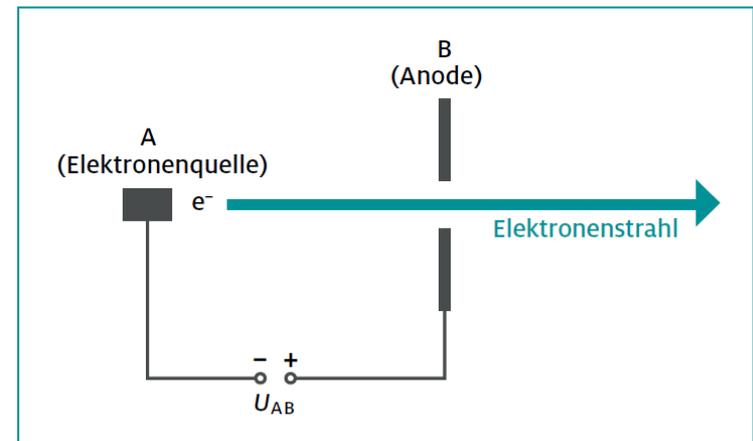
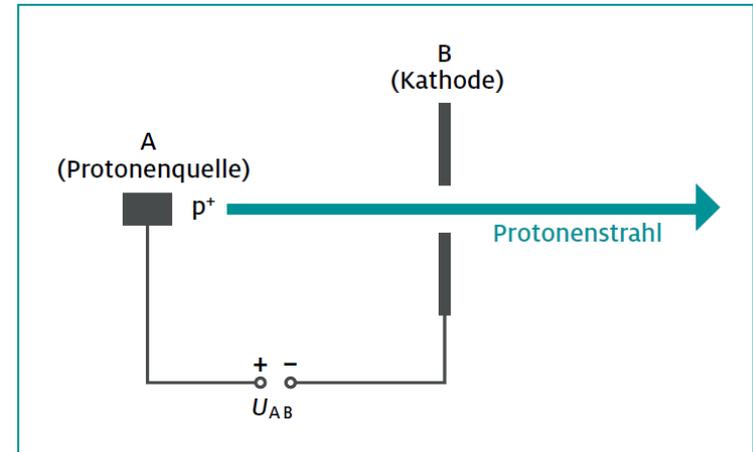


$\tau = 10^{-23}\text{s}$

Beschleuniger – grundlegender Aufbau

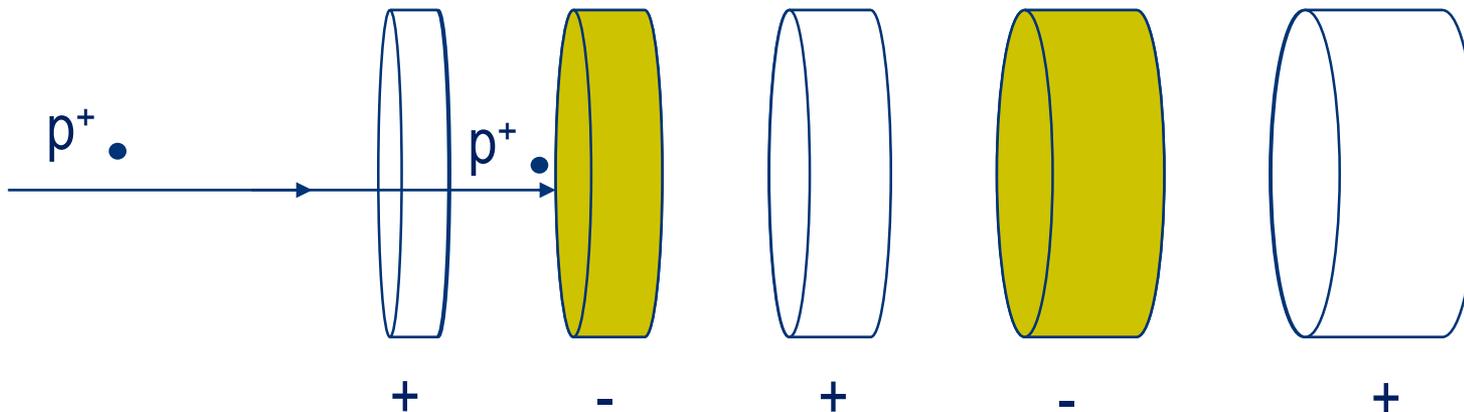
► Beschleunigung von Teilchen

- **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:

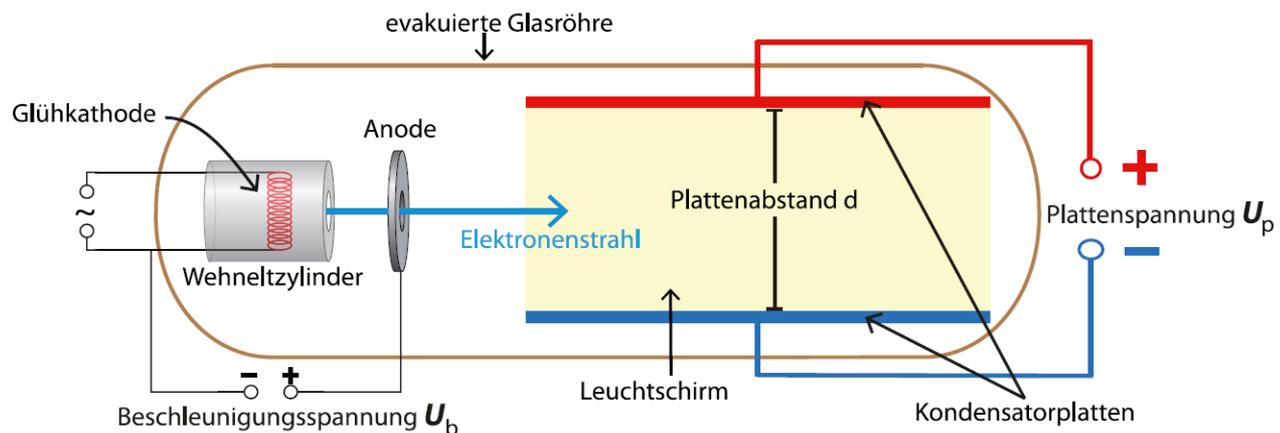


- ▶ Wird die Polung des elektrischen Feldes im richtigen Moment umgekehrt, wird das Teilchen beschleunigt.
- ▶ Teilchen werden schneller \rightarrow Driftröhren werden länger

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 CERN wurde 2017 eingeweiht...



Beschleunigerarten

▶ Linearbeschleuniger

- Elektrisch geladene Teilchen durchqueren elektrische Felder

▶ Vorteile:

- Beschleunigung kann bei „Null“ beginnen
- Man benötigt keine Magnetfelder

▶ Nachteil:

- Elektrische Felder werden nur einmal genutzt

▶ Kreisbeschleuniger

- Beschleunigungsstrecke wird mehrfach durchlaufen
- Magnetische Felder bringen Teilchen auf Kreisbahnen

▶ Vorteile:

- Mehrfaches Durchlaufen der elektrischen Felder
- Experimente zeitlich variabel

▶ Nachteile:

- Hohe Magnetfeldstärken nötig

- ▶ Große Beschleunigeranlagen wie z.B. am CERN sind meist Kombinationen aus beiden Arten

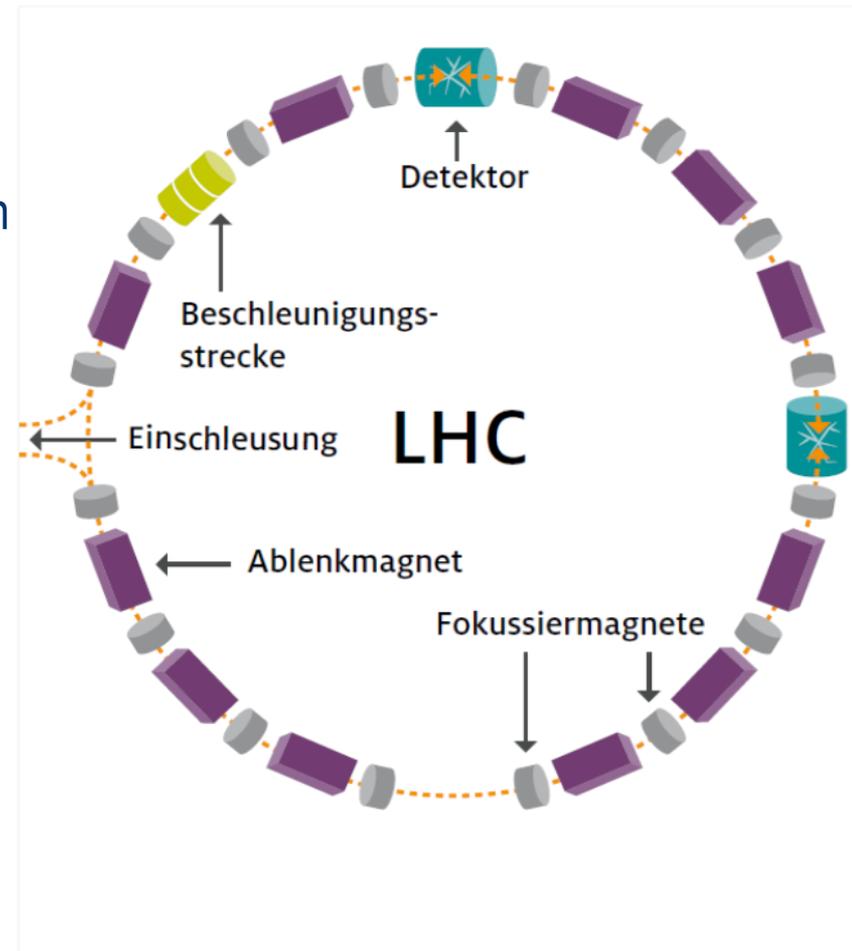
Das CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

- ▶ 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 2018 = 1.1 Milliarde CHF
 - Deutschland zahlt etwa 20%
 - Entspricht 1% des US Militärbudgets
 - Entspricht 1 Cappuccino pro EU Bürger

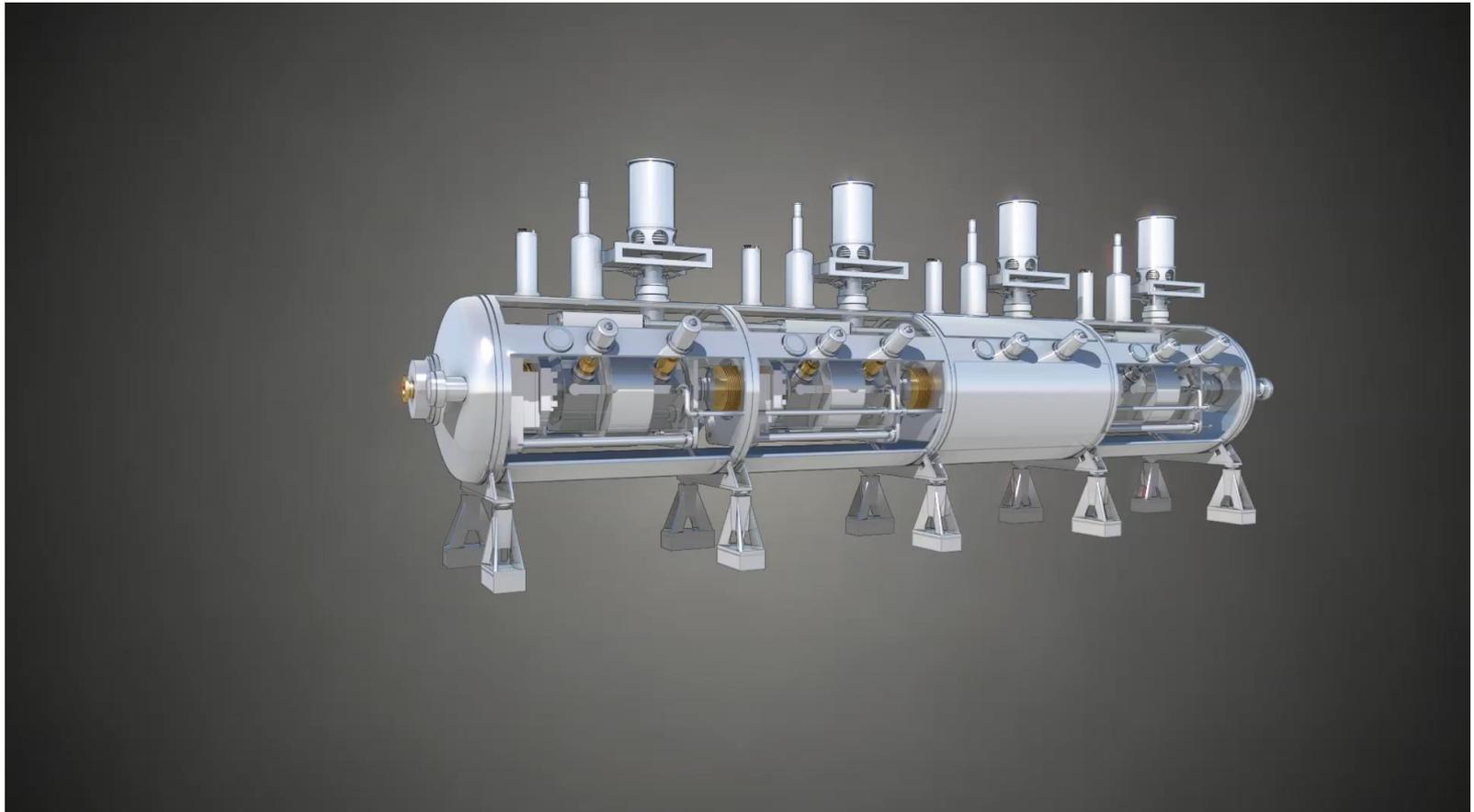


LHC – grundlegender Aufbau

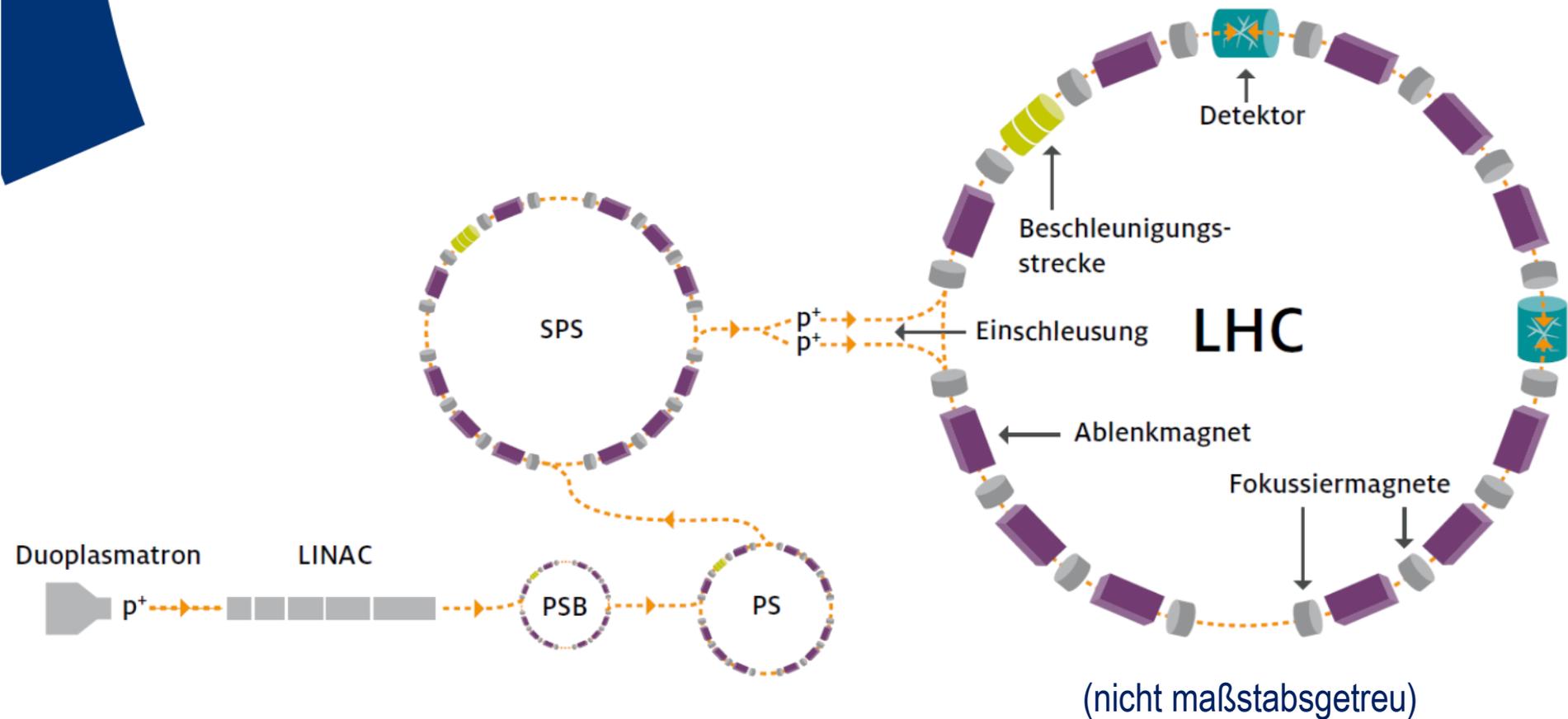
- ▶ Beschleunigung von Teilchen
 - **Teilchen erzeugen:** Elektrisch neutrale Teilchen werden zunächst ionisiert
 - **Teilchen beschleunigen:** Elektrisch geladenen Teilchen durchlaufen ein elektrisch „anziehendes“ Feld
 - **Teilchen ablenken und/oder fokussieren:** elektrisches oder magnetisches Feld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



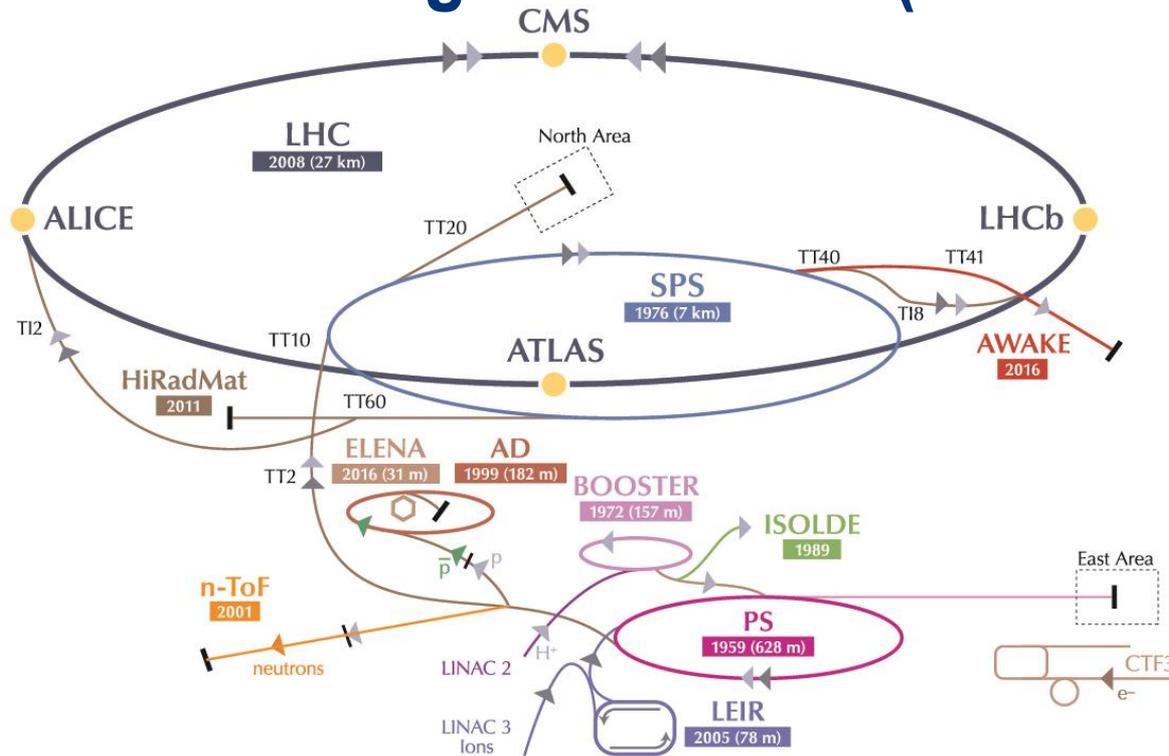
LHC Beschleunigungsstrecke



Die Beschleuniger am CERN



Die Beschleuniger am CERN (Realität)



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

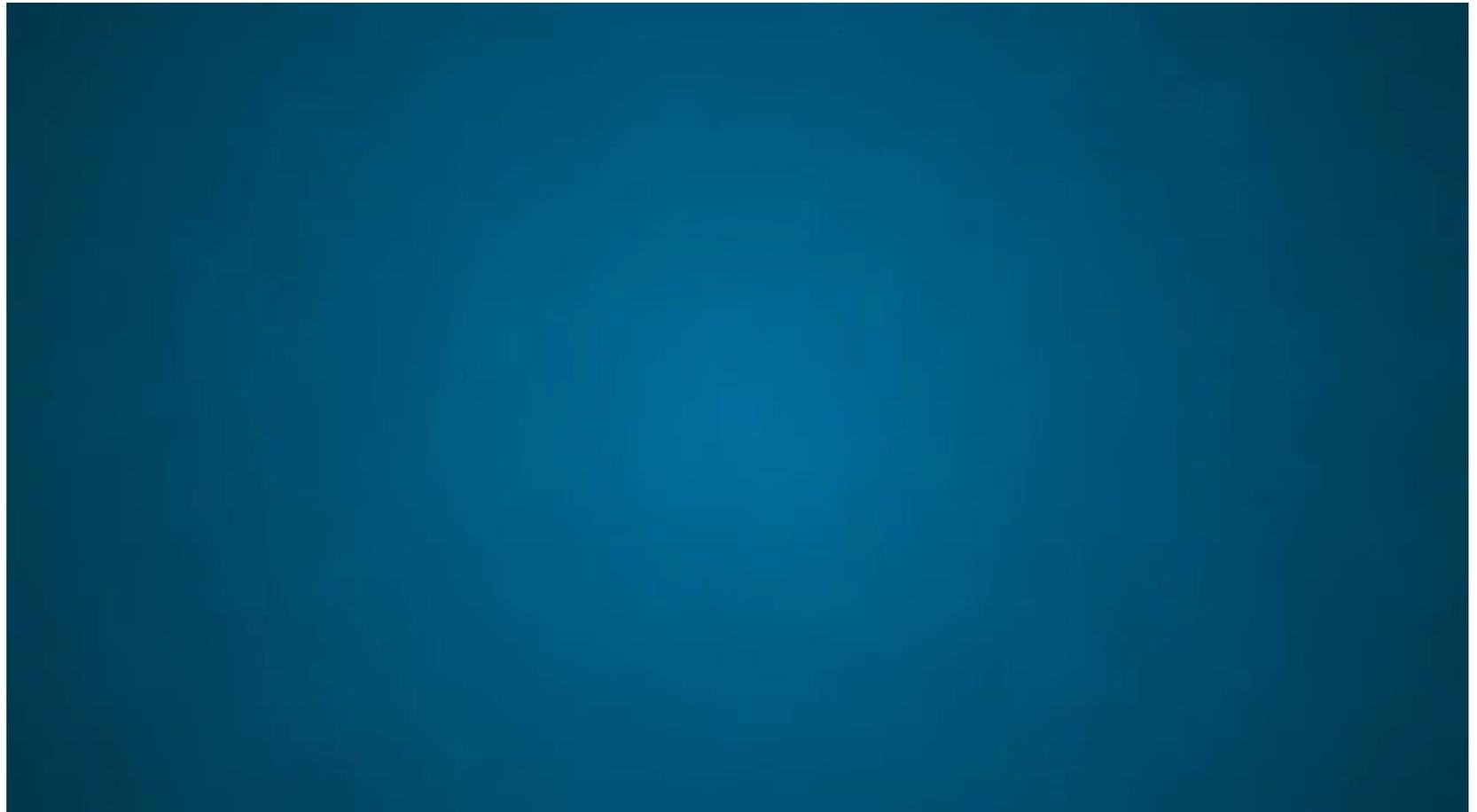
LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

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

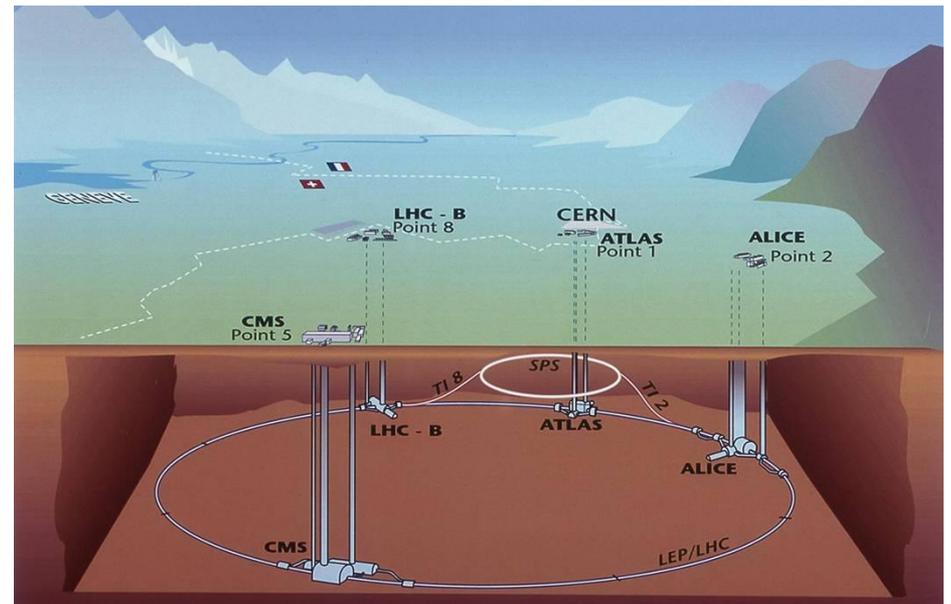


Die Beschleuniger am CERN

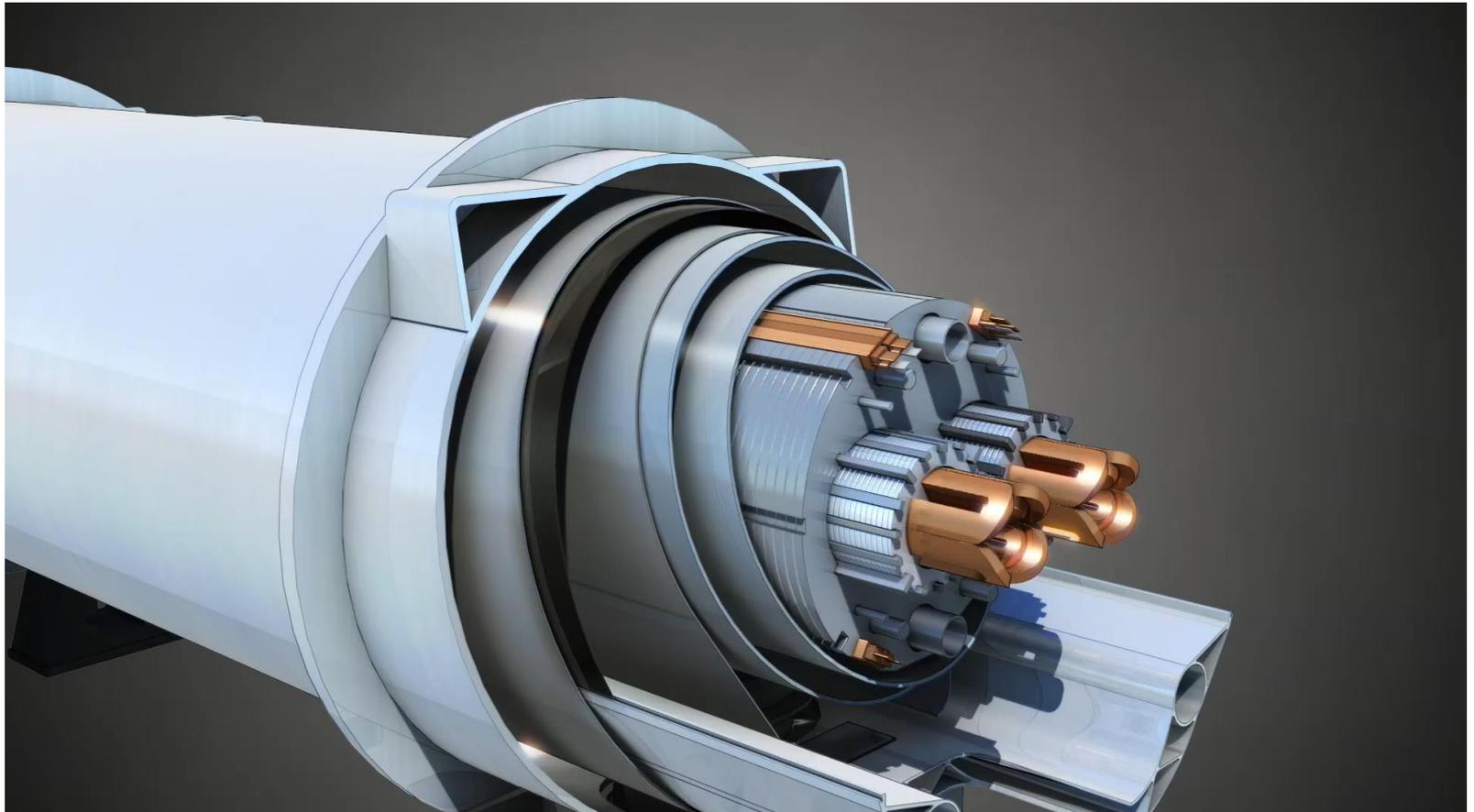


Der LHC (Large Hadron Collider)

- ▶ 27 km Umfang
- ▶ Bis zu 175m tief unter der Erdoberfläche
- ▶ 4 Große Experimente:
 - ATLAS
 - CMS
 - ALICE
 - LHCb

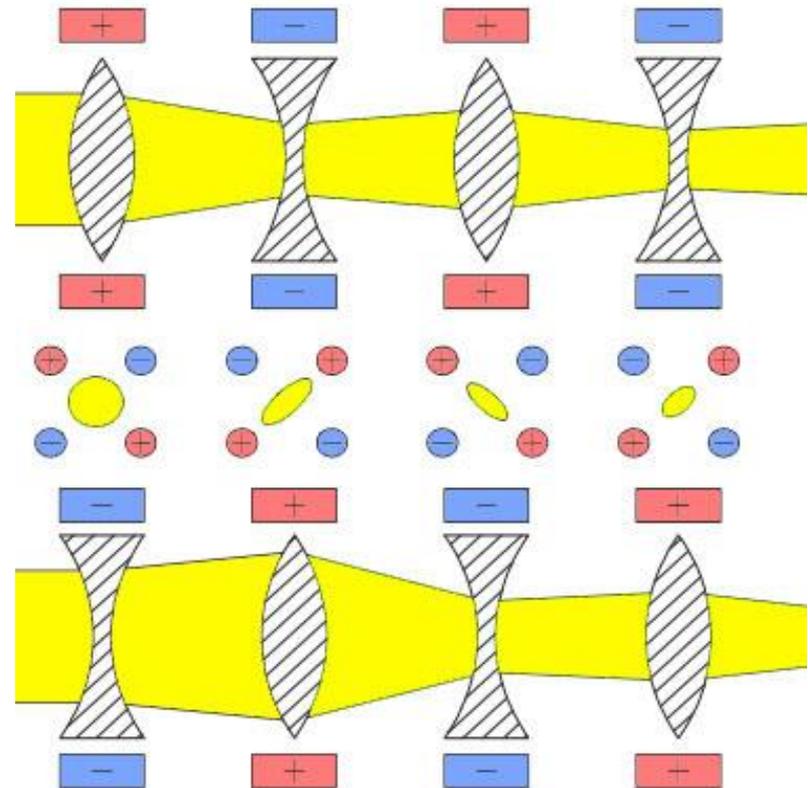


LHC Quadrupol Magnete

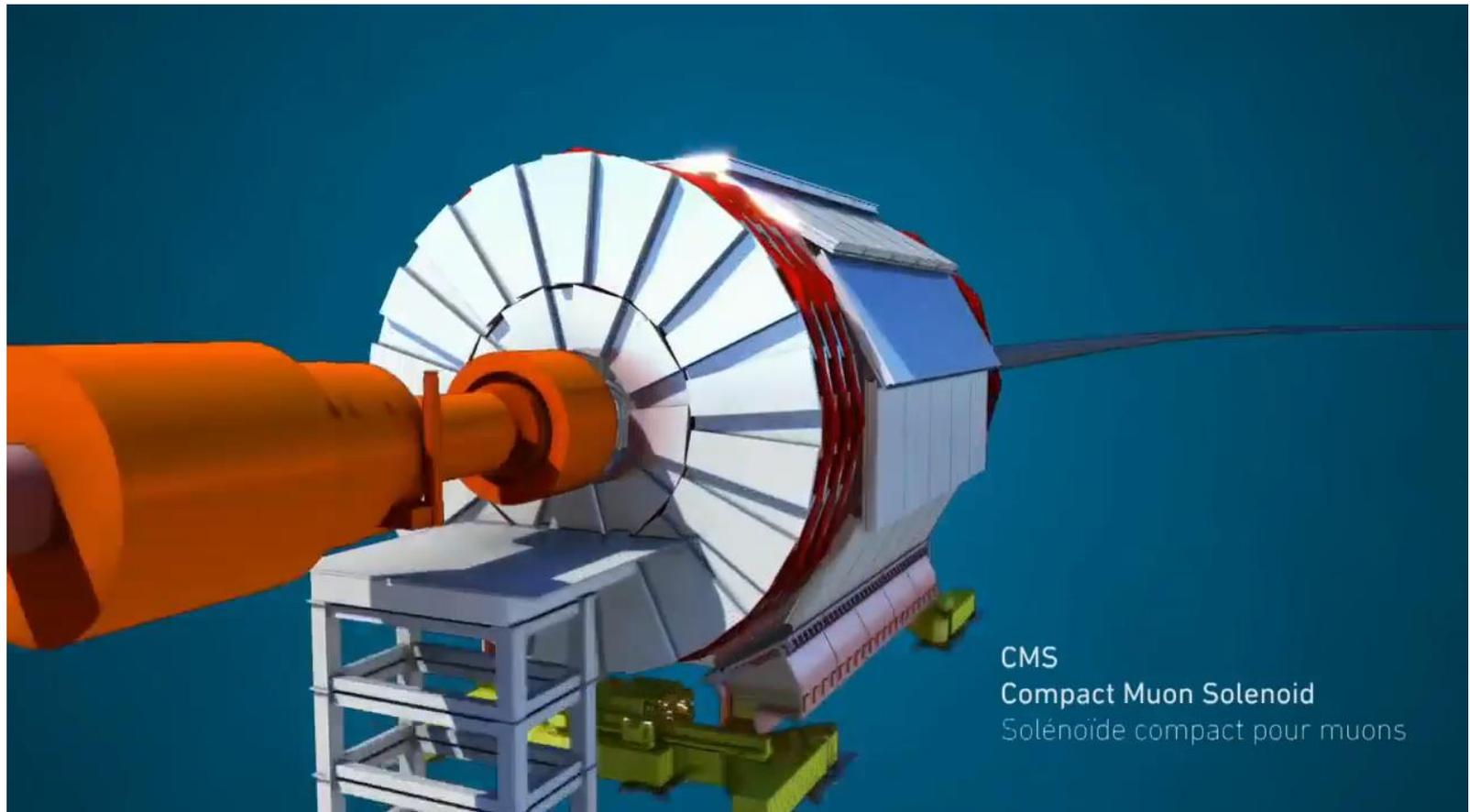


Ein Quadrupolmagnet

- ▶ Fokussierung notwendig, da die Teilchen sich gegenseitig elektrisch abstoßen
- ▶ Wirkt in Flugrichtung immer durch zwei gegenüberliegende Pole fokussierend, während die anderen zwei Pole defokussierend wirken.



Teilchenkollisionen im LHC



Teilchenkollisionen im LHC

- ▶ 2 gegenläufige Protonenstrahlen
 - mit je 1404 Teilchenpaketen und 1.2×10^{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!

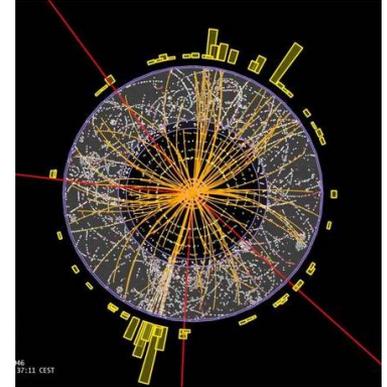
Teilchenkollisionen im LHC

▶ 600 Mio. Kollisionen pro Sekunde!

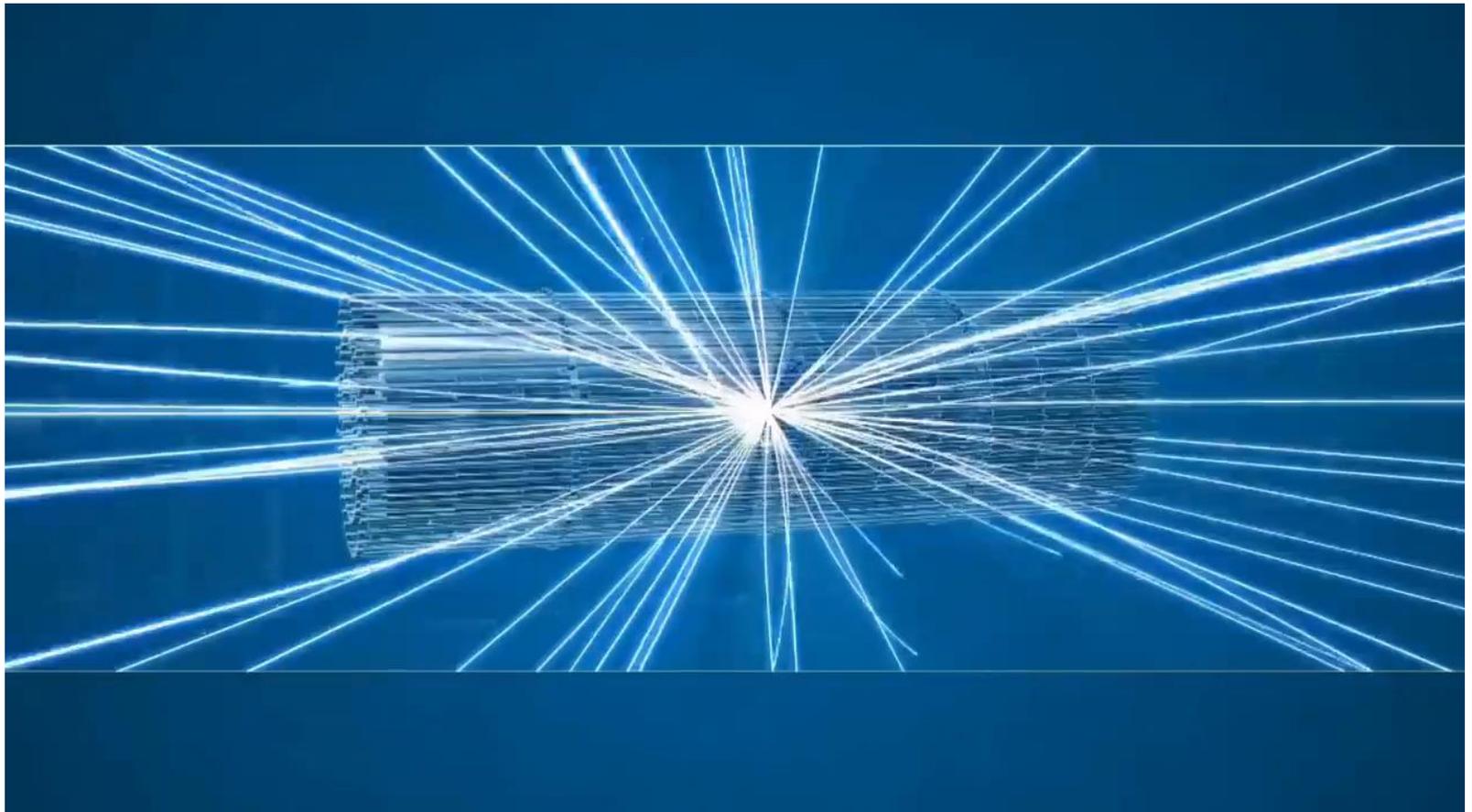
▶ Warum?

- „Interessante“ Teilchen entstehen sehr selten: ca. 1×10^{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?



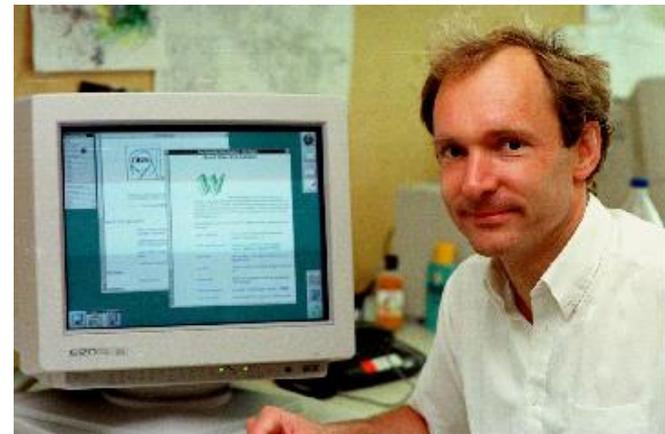
Wohin mit so vielen Daten?

- ▶ 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!



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/

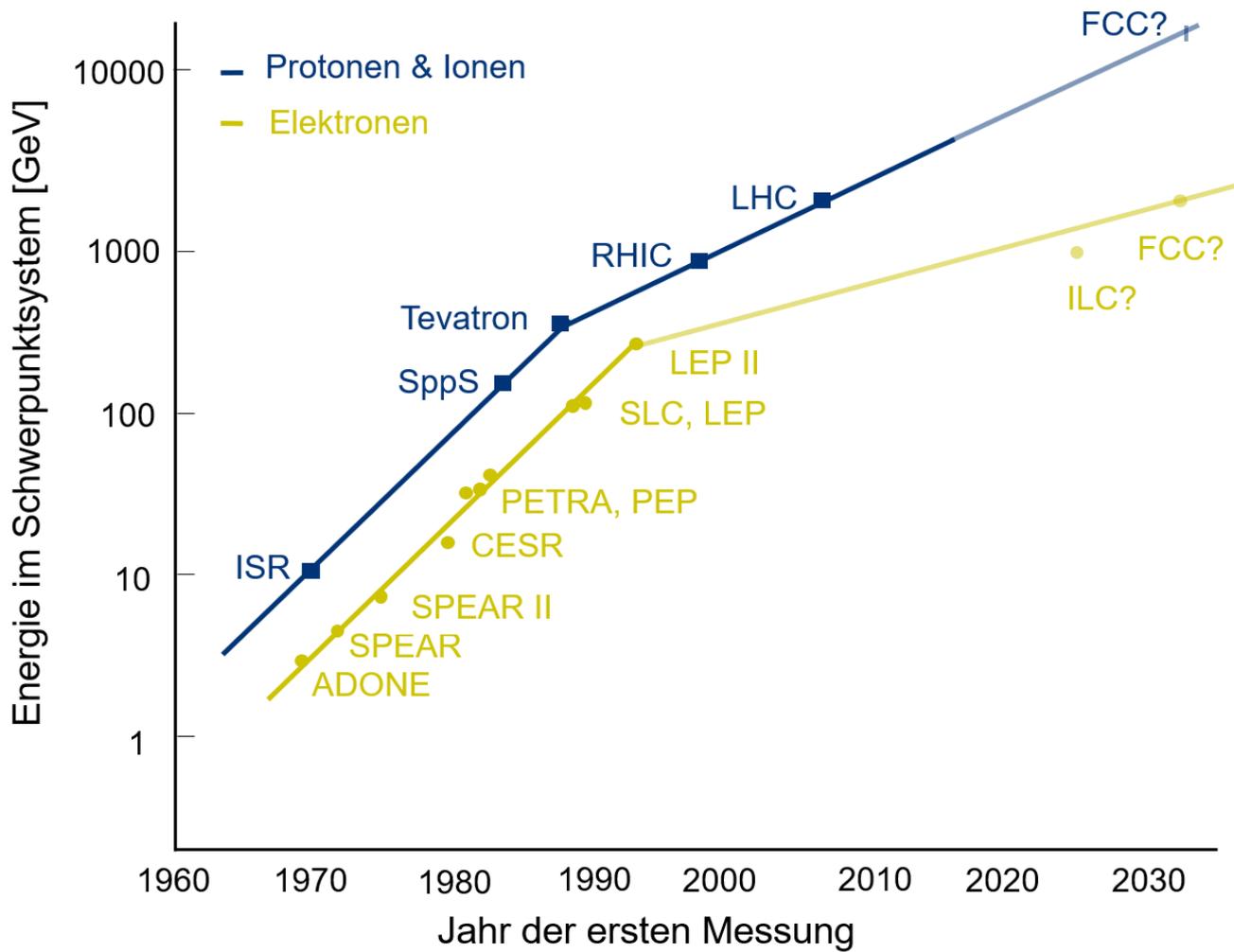


NETZWERK
TEILCHENWELT

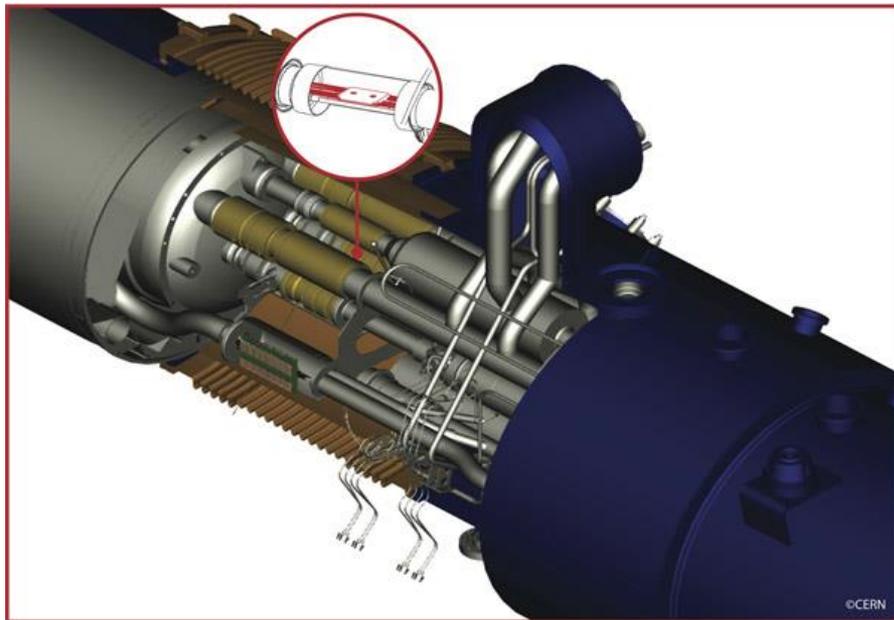
Diskussion / Fragen



Beschleunigeranlagen



Zwischenfall 19. September 2008



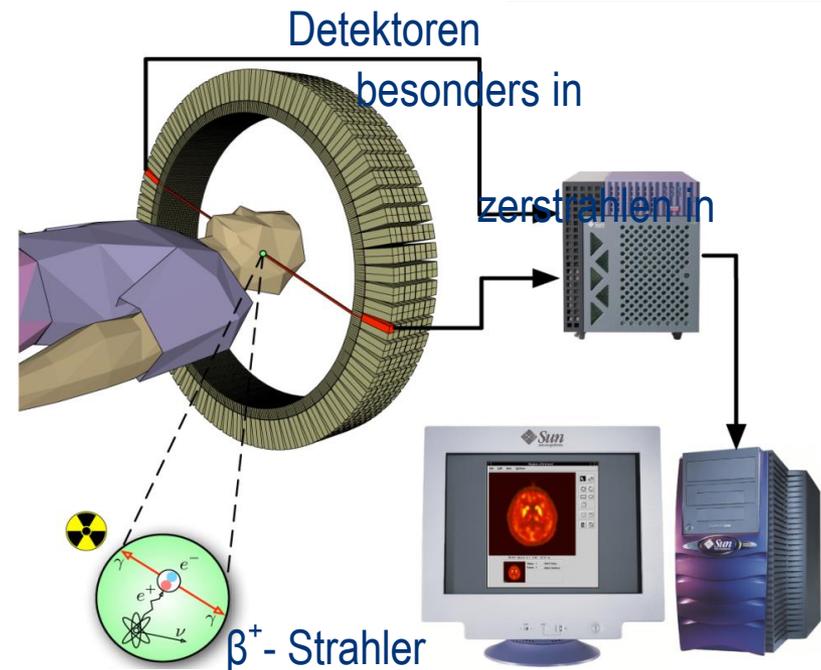
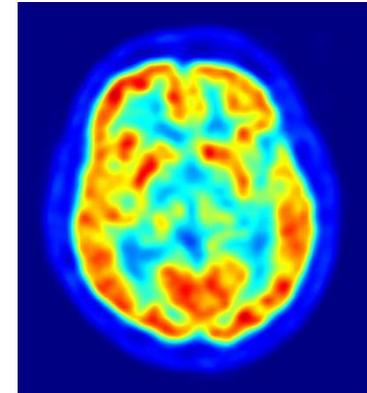
Zwischenfall 19. September 2008

- ▶ 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.

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



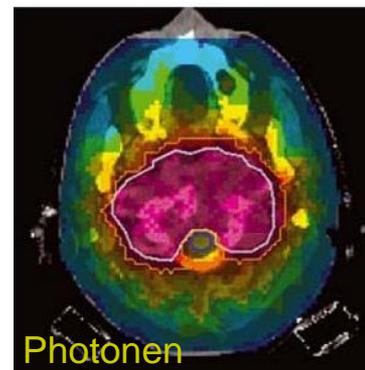
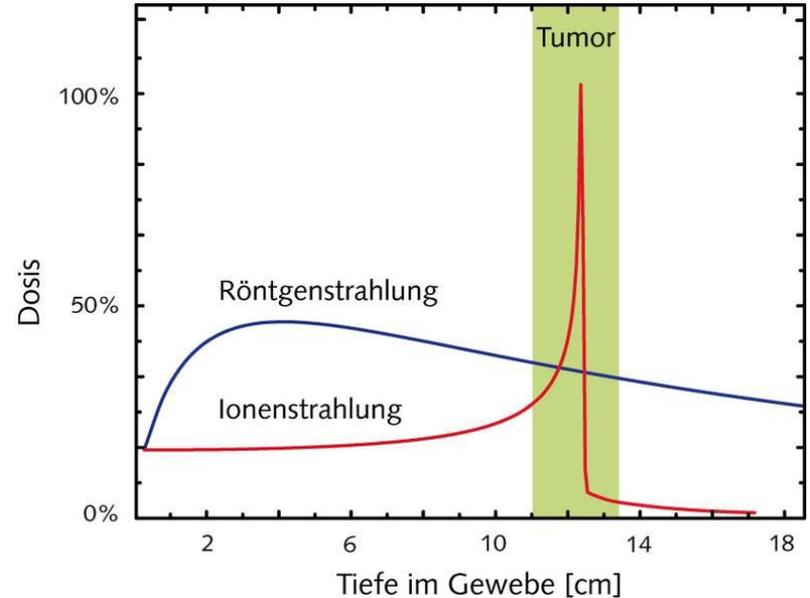
Tumorthherapie mit Hadronen (meist C)

► 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



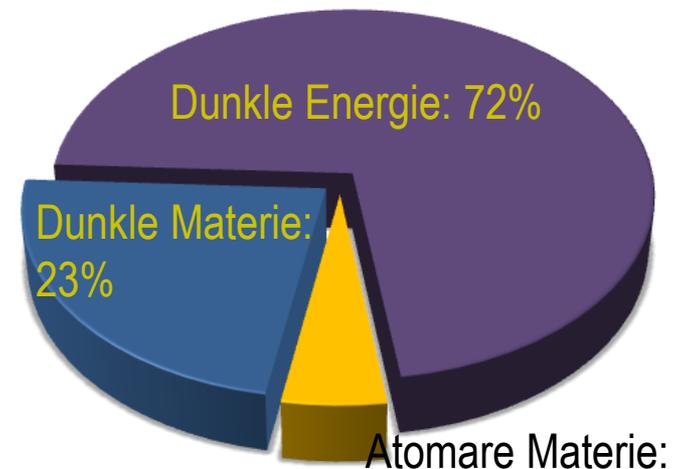
The SppS

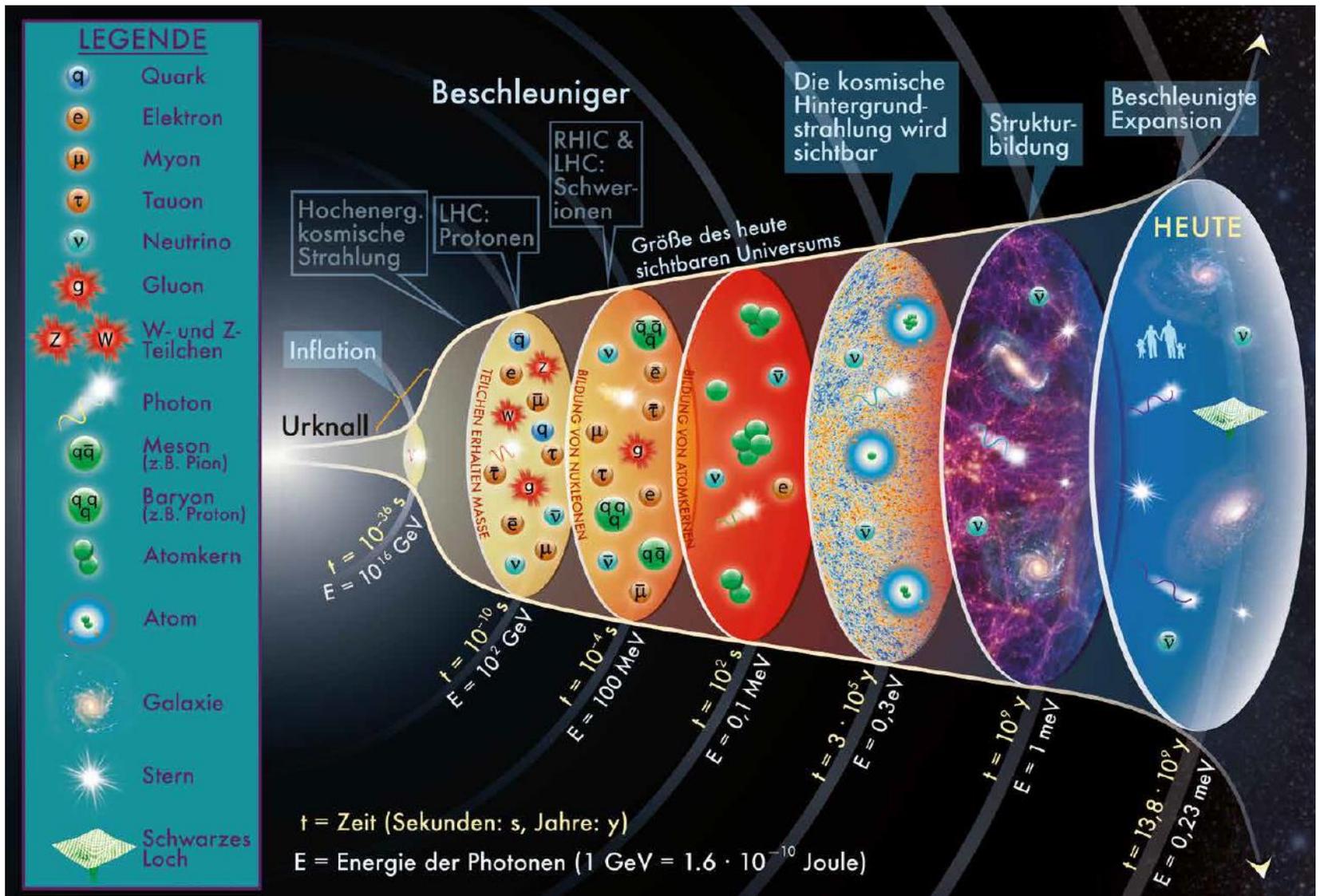
- ▶ $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$
- ▶ 3 bunches protons, 3 bunches antiprotons,
- ▶ 10^{11} particles per bunch
- ▶ Luminosity = $5 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
- ▶ first collisions in December 1981



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, aus denen Dunkle Materie bestehen könnte.







► Aufgabe 1: Energien in der Teilchenphysik und im Alltag

4.1 LÖSUNGEN ZU DEN AUFGABEN AUS KAPITEL 3.1 „FORSCHUNGSZIELE“

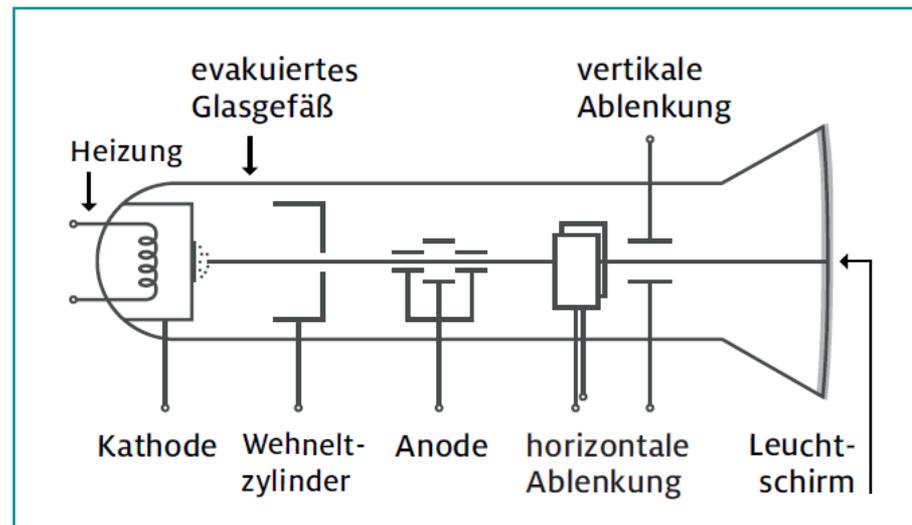
Aufgabe 1: Energien in der Teilchenphysik und im Alltag

	BEISPIELE FÜR ENERGIEN IN DER TEILCHENPHYSIK, IM ALLTAG, IN DER NATUR UND IN DER ASTRONOMIE	ENERGIE IN ELEKTRONEN-VOLT (eV)
F5	Energie eines Photons des violetten Lichts mit einer Wellenlänge von 400 nm	3,1
E2	Energie eines ruhenden Elektrons	$5,1 \cdot 10^5$
H12	Energie eines ruhenden Protons	$9,4 \cdot 10^8$
A3	Energie eines beschleunigten Protons am LHC	$7,0 \cdot 10^{12}$
L8	kinetische Energie einer Stubenfliege bei einer Geschwindigkeit von $2 \frac{m}{s}$	$1,0 \cdot 10^{15}$
G4	Energie zur Erwärmung von 1 kg Wasser um 1 °C	$2,6 \cdot 10^{22}$
C6	kinetische Energie eines PKW (Masse 1000 kg) bei einer Geschwindigkeit von $100 \frac{km}{h}$	$2,4 \cdot 10^{24}$
D1	physiologischer Brennwert von 100 g Schokolade	$1,4 \cdot 10^{25}$
J13	täglicher Energiebedarf eines erwachsenen Menschen mit einer Masse von 70 kg	$5,6 \cdot 10^{25}$
K7	Energie des gesamten Protonstrahls am LHC	$2,0 \cdot 10^{27}$
M10	kinetische Energie eines ICE bei einer Geschwindigkeit von $100 \frac{km}{h}$	$4,1 \cdot 10^{27}$
B9	Energie, die die Sonne in einer Sekunde abgibt	$2,4 \cdot 10^{45}$
I11	Energie, die eine Supernova freisetzt	$6,2 \cdot 10^{62}$

Die Energien in der Teilchenphysik sind im Vergleich zu denen im Alltag, in der Natur und in der Astronomie sehr klein. Jedoch sind die Energien auf ein einziges Teilchen konzentriert, so dass man von hohen Energien der Protonen sprechen kann.

Aufgabe 1. Die Elektronenstrahlröhre als Beispiel für einen kleinen Linearbeschleuniger

In der folgenden Abbildung ist der Aufbau einer Elektronenstrahlröhre dargestellt. Beschreibe die Funktionsweise einer Elektronenstrahlröhre und gehe dabei auf Parallelen zu einem Linearbeschleuniger ein.



Aufgabe 3. Aufrüstung der Magneten des LHC

Angenommen, es wäre möglich, die Ablenkmagneten des LHC aufzurüsten, so dass zur Ablenkung der Protonen ($m_p = 0,94 \frac{\text{MeV}}{c^2}$) eine magnetische Feldstärke von $B = 20 \text{ T}$ zur Verfügung stünde.

- a) Berechne den Impuls der Protonen, die sich auf einer Kreisbahn mit dem Radius $r = 4,2 \text{ km}$ in einem Magnetfeld mit der magnetischen Feldstärke $B = 20 \text{ T}$ bewegen.
- b) Lassen sich diese Protonen klassisch oder hochrelativistisch beschreiben oder müssen sie relativistisch betrachtet werden? Gib die zugehörige Relation zwischen der Gesamtenergie, dem Impuls und der Masse des Teilchens an.
- c) Auf welche Energie könnte man die Protonen am LHC beschleunigen, wenn man sie mit solch starken Magneten auf einer Kreisbahn ($r = 4,2 \text{ km}$) halten kann?

Lösung Aufgabe 3

a) Es gilt: $p = Q_p \cdot r \cdot B = Z_p \cdot e \cdot r \cdot B$

Einsetzen der Werte ergibt:

$$p = +1 \cdot e \cdot 4,2 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot 20 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 25,2 \frac{\text{TeV}}{\text{c}}$$

b) Da die Ruheenergie der Protonen $E_0(p) = 0,94 \text{ GeV}$ sehr klein im Vergleich zur kinetischen Energie bei einem Impuls $p = 25,2 \frac{\text{TeV}}{\text{c}}$ der Protonen ist, lassen sie sich hochrelativistisch beschreiben. In diesem Grenzfall gilt:

$$E = \sqrt{m^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2} \approx p \cdot c$$

c) Unter Benutzung der Relation aus b) ergibt sich:

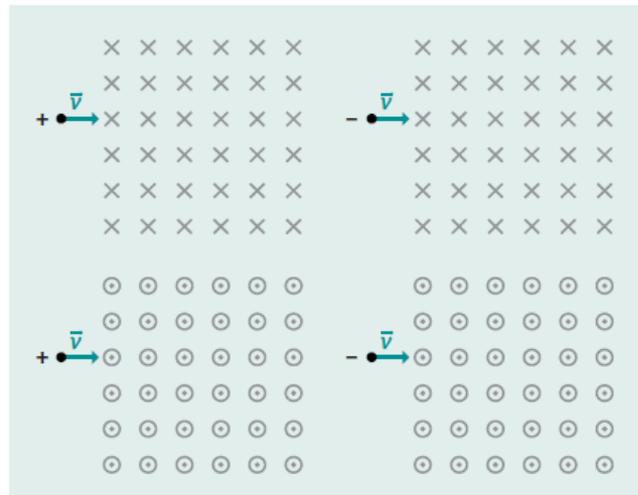
$$E = \sqrt{m_p^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2} \approx p \cdot c$$

$$= 25,2 \frac{\text{TeV}}{\text{c}} \cdot c$$

$$\approx 25,2 \text{ TeV}$$

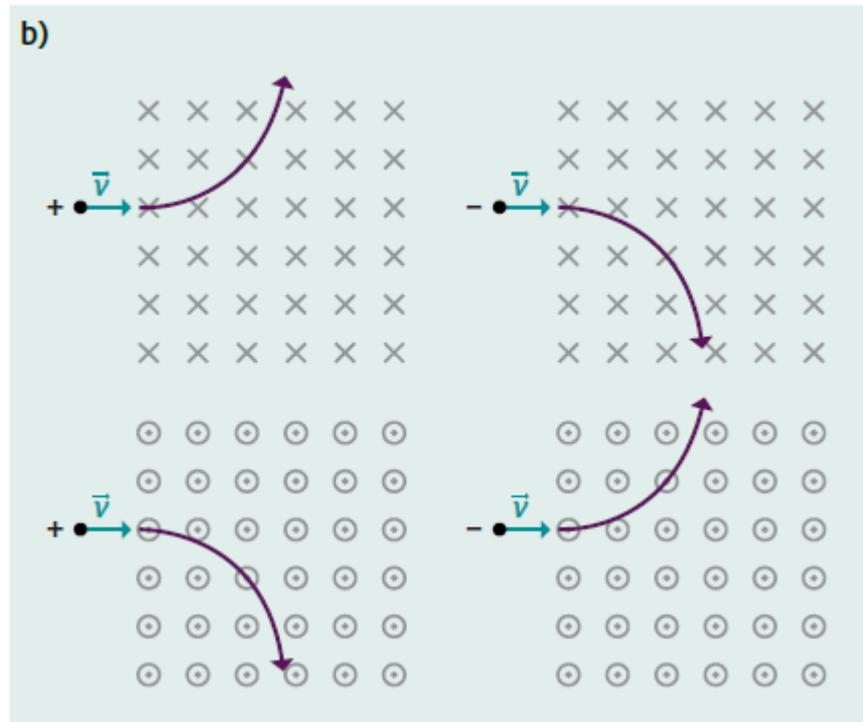
Aufgabe 6. Bewegung elektrisch geladener Teilchen in einem homogenen Magnetfeld

- a) Beschreibe, warum sich ein elektrisch geladenes Teilchen, das sich in einem homogenen Magnetfeld senkrecht zu den Magnetfeldlinien bewegt, entlang einer Kreisbahn bewegt.
- b) Zeichne in die folgenden Abbildungen die Kreisbahn ein, auf der sich die Teilchen bewegen.



- c) Beschreibe die Form der Bahn eines sich bewegenden, elektrisch geladenen Teilchens in einem homogenen Magnetfeld, wenn gleichzeitig ein homogenes elektrisches Feld vorhanden ist, dessen Feldlinien parallel zu den Magnetfeldlinien verlaufen.

Lösung Aufgabe 6



„The CERN Weasel“

- ▶ Der Marder 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

