

Forschungsmethoden in der Teilchenphysik - Teil 1 -

Philipp Lindenau, Tobias Patrick Treczoks

Darmstadt | 14.-16.02.2024



Basierend auf Band 2:

Forschungsziele

Beschleuniger

Detektoren

Zahlreiche Aufgaben & Lösungen



3 TEILCHENBESCHLEUNIGER UND -DETEKTOREN

In der teilchenphysikalischen Forschung unterscheidet man im Allgemeinen zwei Bereiche: die theoretische und die experimentelle Forschung. Die theoretische Forschung versucht aus Beobachtungen Generalisierungen und Ordnungsschemata abzuleiten oder vorherzusagen zu treffen, die auf Überlegungen, Modellen und Erhebungen beruhen. Die experimentelle Forschung hingegen untersucht die Vorgänge in der Natur durch Beobachtungen. Beide Forschungsgebiete beruhen dabei jeweils verschiedenen Forschungsmethoden. Während sich die theoretische Forschung mathematischer Methoden bedient, sind Teilchenbeschleuniger und -detektoren heute wichtige Instrumente der experimentellen Grundlagenforschung in der Teilchenphysik. Teilchenbeschleuniger haben die Aufgabe, Teilchen wie Elektronen oder Protonen auf hohe Energien zu beschleunigen. Diese hochenergetischen Teilchen werden anschließend zur Kollision gebracht. Am Kollisionspunkt befindet sich ein Detektor, um zu beobachten, was aus dem Zusammenstoß resultiert. Je nachdem, wie nah wir Teilchenbeschleuniger und -detektoren beschaffen, wird im folgenden zunächst die Frage nachgegangen, was genau mithilfe von Teilchenbeschleunigern und -detektoren erreicht wird.

3.1 FORSCHUNGSZIELE AN TEILCHENBESCHLEUNIGERN UND -DETEKTOREN

Teilchenbeschleuniger und -detektoren dienen dazu,

- zu untersuchen, woraus die uns umgebende Materie auf subatomarer Ebene besteht und welche die elementaren Bausteine des Universums sind,
- nach noch unbekannteren Teilchen großer Masse zu suchen,
- die Erforschung von Prozessen zu ermöglichen, die im frühen Universum abgelaufen sind – Bruchteile einer Sekunde nach dem Urknall.

Wir werden in den folgenden Kapiteln sehen, dass man dafür Teilchen mit einer sehr hohen Energie benötigt.

INFOBOX: EINHEIT DER ENERGIE

In der Teilchenphysik wird die Energie E nicht wie in der klassischen Physik (Werk, in der Einheit Joule (J)) sondern in der Einheit Elektronenvolt (eV) angegeben. Diese Einheit ergibt sich aus der Gleichung $E = U \cdot q$. Wenn ein elektrisch geladenes Teilchen mit der Ladung $Q = +e$ mit einer elektrischen Spannung von $U = 1\text{ V}$ beschleunigt wird, dann wird auf dieses eine kinetische Energie E_{kin} von $1\text{ eV} (= 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ J})$ übertragen.

3.1.1 Die Auflösung kleinster Strukturen

Wie können wir erkennen, was die Welt im Innersten zusammenbaut? Dies ist nur mit Instrumenten und Methoden möglich, die es erlauben, subatomare Strukturen kleiner als 1 fm , was das Innere eines Atomkerns, zu betrachten und zu untersuchen.

Mit dem menschlichen Auge kann man Objekte bis zu einer Größe von ca. 1 mm beobachten, was beispielsweise zur näheren Betrachtung kleinerer Objekte bis zu $r = 10^{-7}\text{ m}$ wie ein z. B. kleine Antenne oder die Markierung einer Linse benötigt man eine Linse und für noch kleinere Objekte muss Mikroskopie verwendet. Die Beobachtung von Objekten und Strukturen drei Komplexen (siehe Abb. 1):

- Projekte, die aus einer Quelle S treffen (z. B. Photonen aus einer Glühlampe), das die Projektion P (z. B. ein Bild) einen Detektor, der die g. nachweist (z. B. Auge).



Abb. 1: Schematische Darstellung der ...

Teilchen	Ursprung	Teilchenenergie	Teilchenfluss
e^- <td>Radioaktiv</td> <td>0,01 - 10 MeV</td> <td>$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$</td>	Radioaktiv	0,01 - 10 MeV	$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$
e^- <td>Elektronenröhre</td> <td>0,01 - 10 MeV</td> <td>$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$</td>	Elektronenröhre	0,01 - 10 MeV	$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$
e^- <td>Teilchenbeschleuniger</td> <td>0,01 - 10 MeV</td> <td>$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$</td>	Teilchenbeschleuniger	0,01 - 10 MeV	$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$
e^- <td>Teilchenbeschleuniger</td> <td>0,01 - 10 MeV</td> <td>$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$</td>	Teilchenbeschleuniger	0,01 - 10 MeV	$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$
e^- <td>Teilchenbeschleuniger</td> <td>0,01 - 10 MeV</td> <td>$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$</td>	Teilchenbeschleuniger	0,01 - 10 MeV	$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$
e^- <td>Teilchenbeschleuniger</td> <td>0,01 - 10 MeV</td> <td>$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$</td>	Teilchenbeschleuniger	0,01 - 10 MeV	$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$
e^- <td>Teilchenbeschleuniger</td> <td>0,01 - 10 MeV</td> <td>$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$</td>	Teilchenbeschleuniger	0,01 - 10 MeV	$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$
e^- <td>Teilchenbeschleuniger</td> <td>0,01 - 10 MeV</td> <td>$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$</td>	Teilchenbeschleuniger	0,01 - 10 MeV	$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$
e^- <td>Teilchenbeschleuniger</td> <td>0,01 - 10 MeV</td> <td>$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$</td>	Teilchenbeschleuniger	0,01 - 10 MeV	$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$
e^- <td>Teilchenbeschleuniger</td> <td>0,01 - 10 MeV</td> <td>$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$</td>	Teilchenbeschleuniger	0,01 - 10 MeV	$10^{10} - 10^{14}\text{ s}^{-1}$

4.1 LÖSUNGEN ZU DEN AUFGABEN AUS KAPITEL 11 „FORSCHUNGSZIELE“

Aufgabe 1: Erklären Sie die Bedeutung von ...

4.2 LÖSUNGEN ZU DEN AUFGABEN AUS KAPITEL 12 „TEILCHENBESCHLEUNIGER“

Aufgabe 1: Berechnen Sie die ...

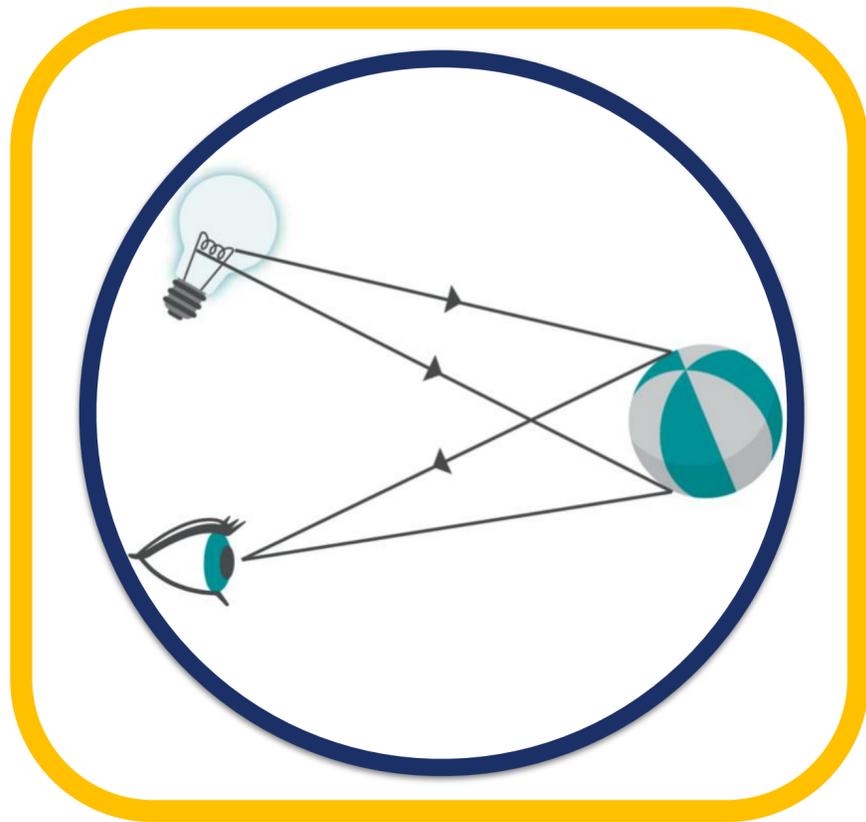
4.3 LÖSUNGEN ZU DEN AUFGABEN AUS KAPITEL 13 „TEILCHENBESCHLEUNIGER“

Aufgabe 1: Berechnen Sie die ...

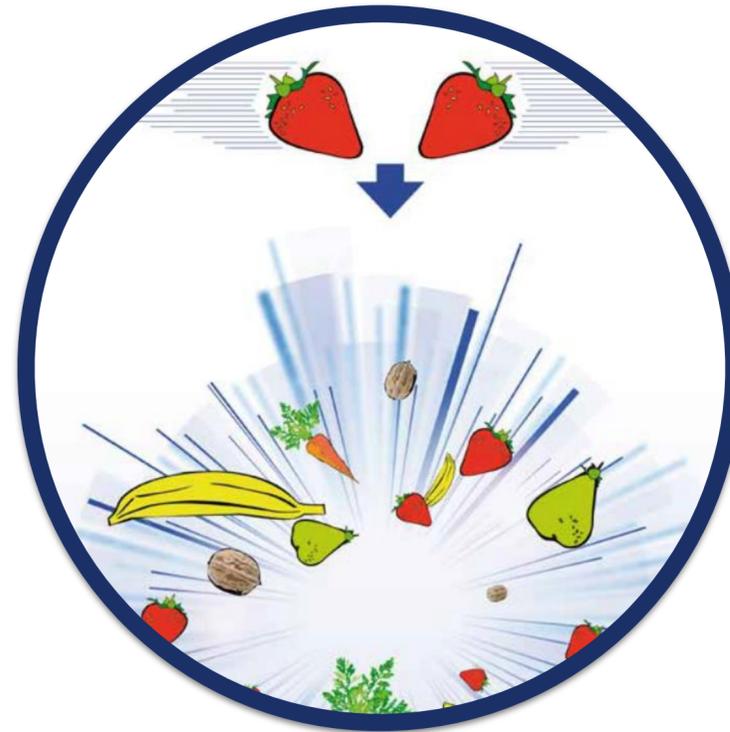


Forschungsziele

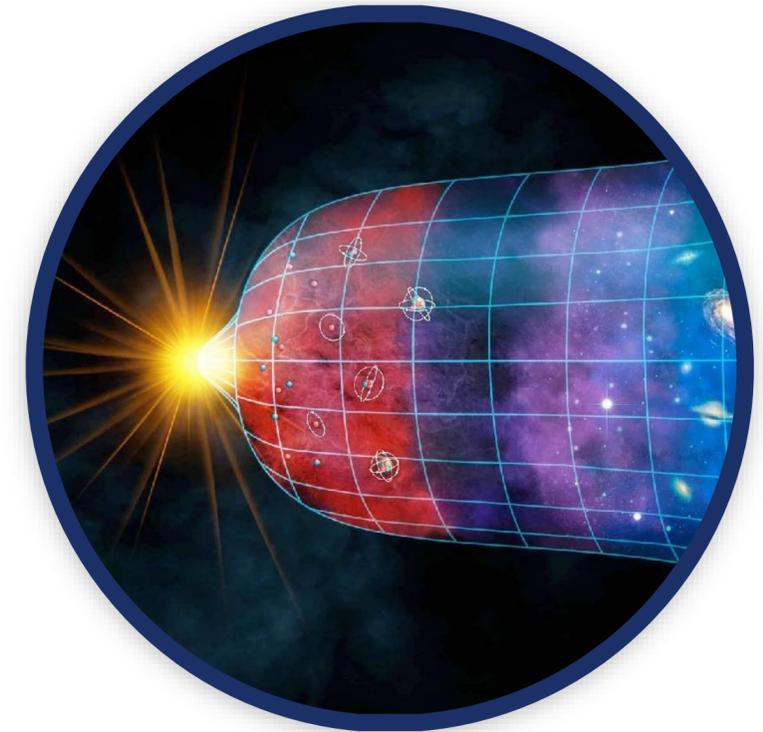
Wofür benötigen die Teilchenphysiker*innen Beschleuniger?



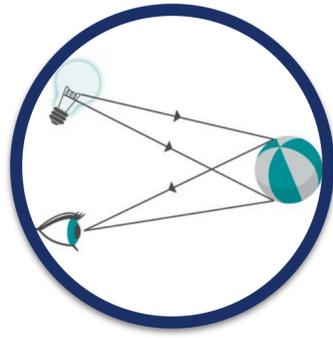
Strukturuntersuchungen



Erzeugung neuer Teilchen



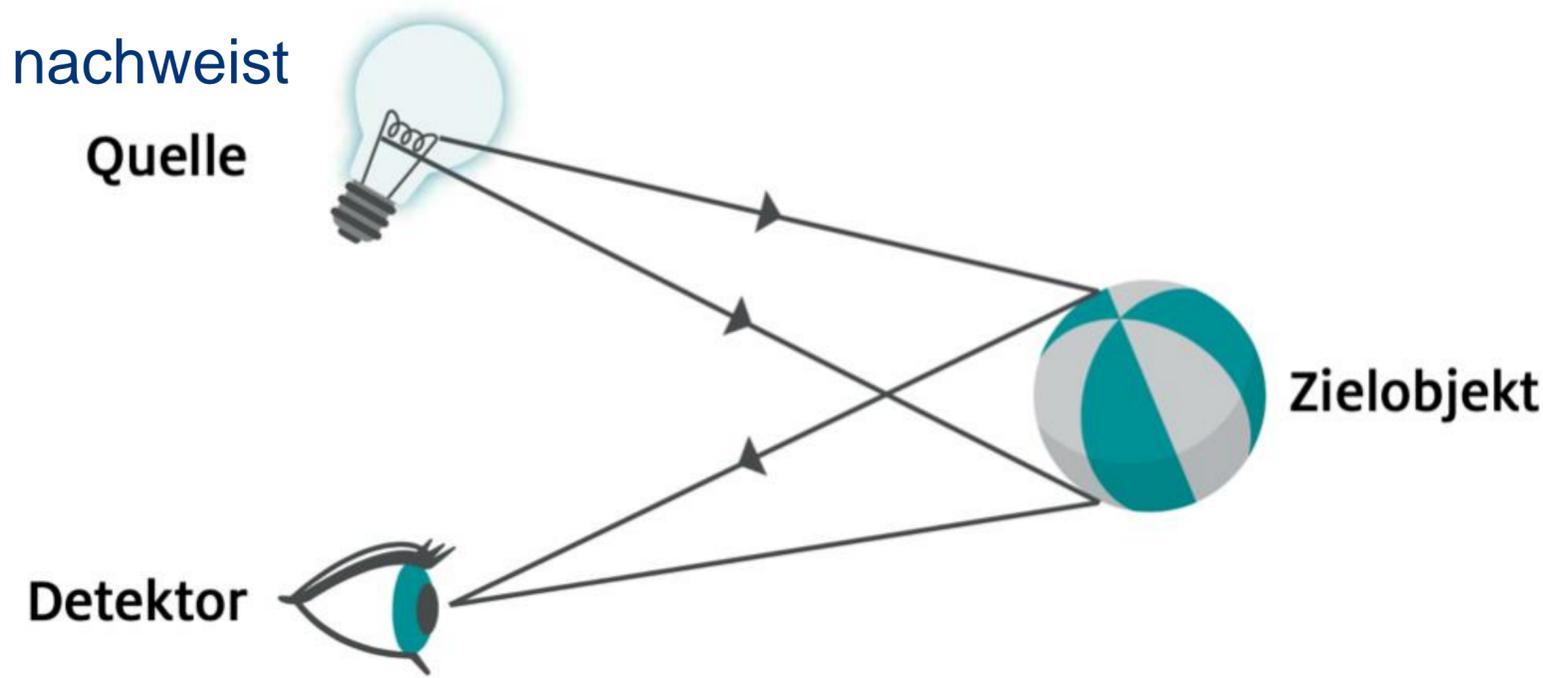
Erzeugung extremer Bedingungen

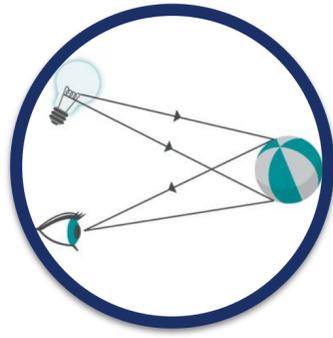


Strukturuntersuchungen

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)



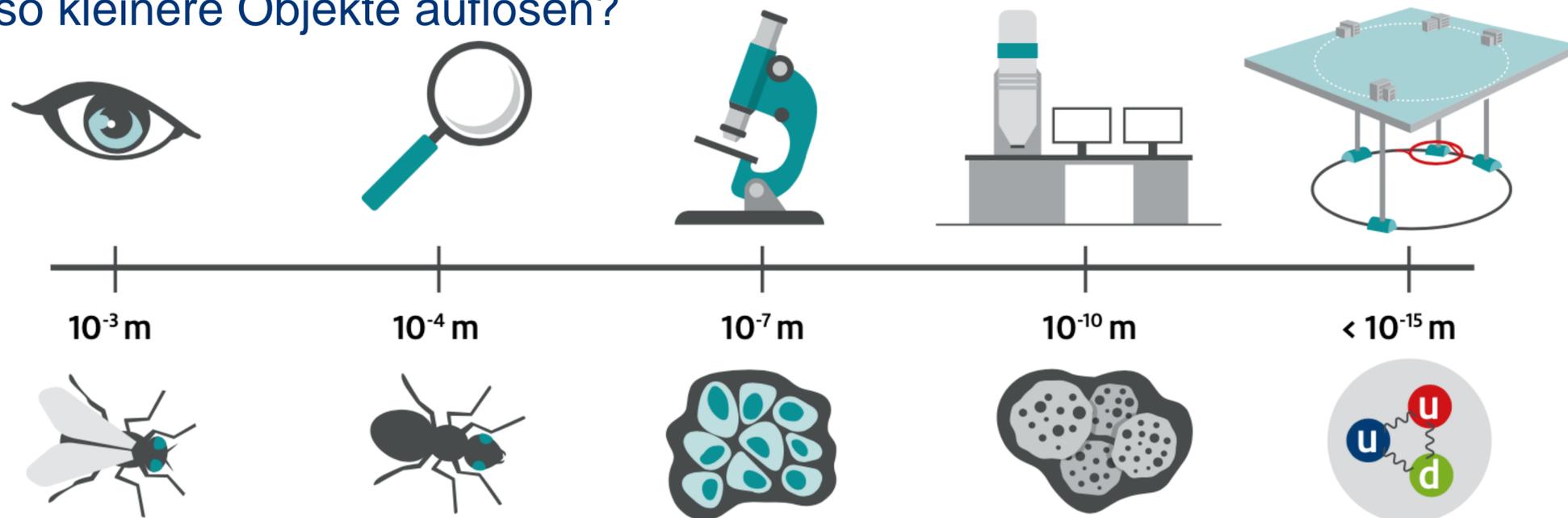


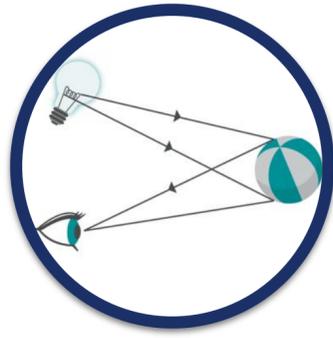
Strukturuntersuchungen

- ▶ Auflösungsgrenze, hängt davon ab wie genau sich das Projektil lokalisieren lässt, mit dem das zu beobachtende Objekt abgetastet wird.
 - ▶ Ernst Abbe & Baron Rayleigh: Linearer Zusammenhang mit λ
- ▶ Bei Licht entspricht das dieser Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h \cdot c}{E}$$

- ▶ Grenze für optisches Licht ca. 400 nm
- ▶ Wie also kleinere Objekte auflösen?





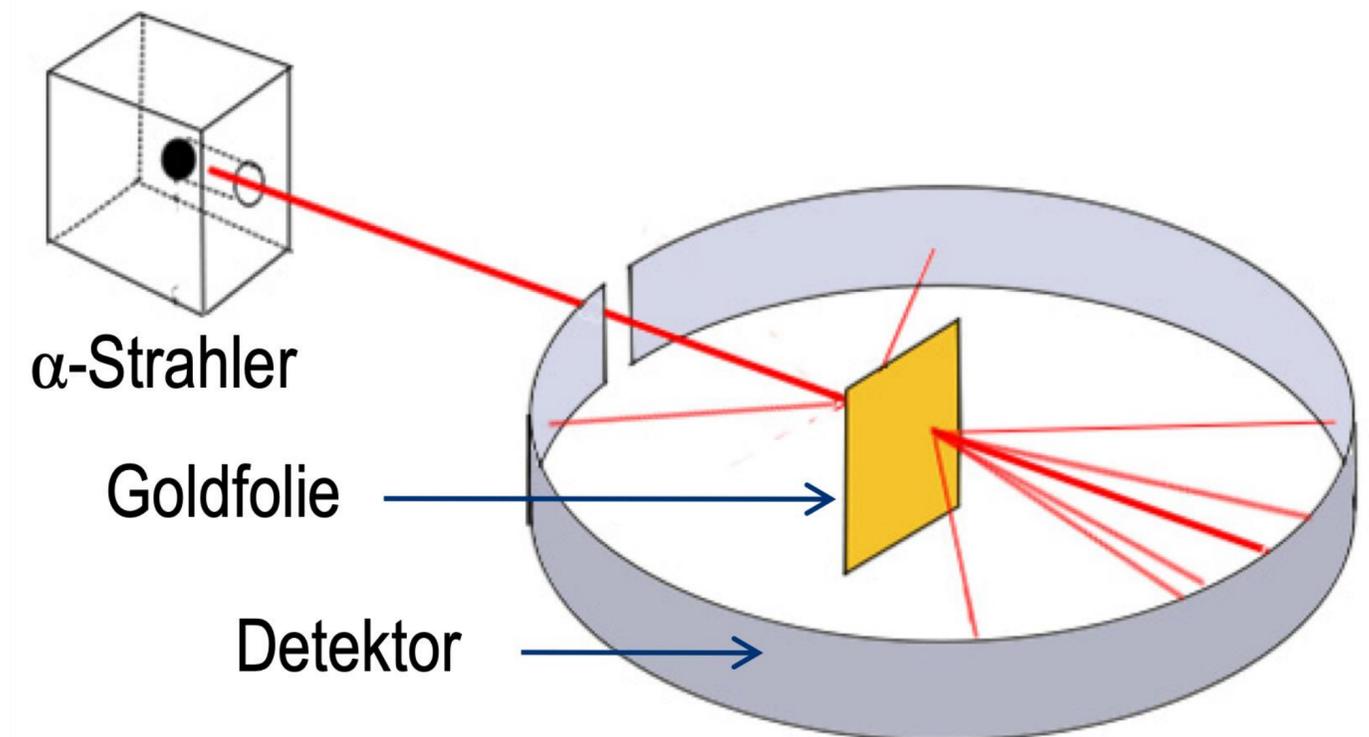
Strukturuntersuchungen

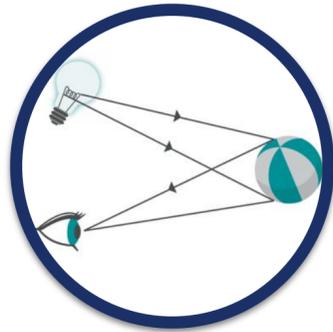
- ▶ Rutherford-Streuexperiment (1911)
- ▶ Streuung von α -Teilchen an Goldatomen
- ▶ Energie des α -Teilchen einige MeV

- ▶
$$\lambda = \frac{\hbar \cdot c}{E} = \frac{200 \text{ MeV fm}}{1 \text{ MeV}} \approx 200 \text{ fm}$$

- ▶ Größe eines Protons $\sim 1 \text{ fm}$

- ▶ Um kleine Strukturen aufzulösen benötigt man mehr Energie





Strukturuntersuchungen

▶ Experiment am SLAC (1969)

- ▶ Nachweis der Quarks
- ▶ Nobelpreis 1990: Friedman, Kendall und Taylor.

▶ Streuung von Elektronen an Protonen

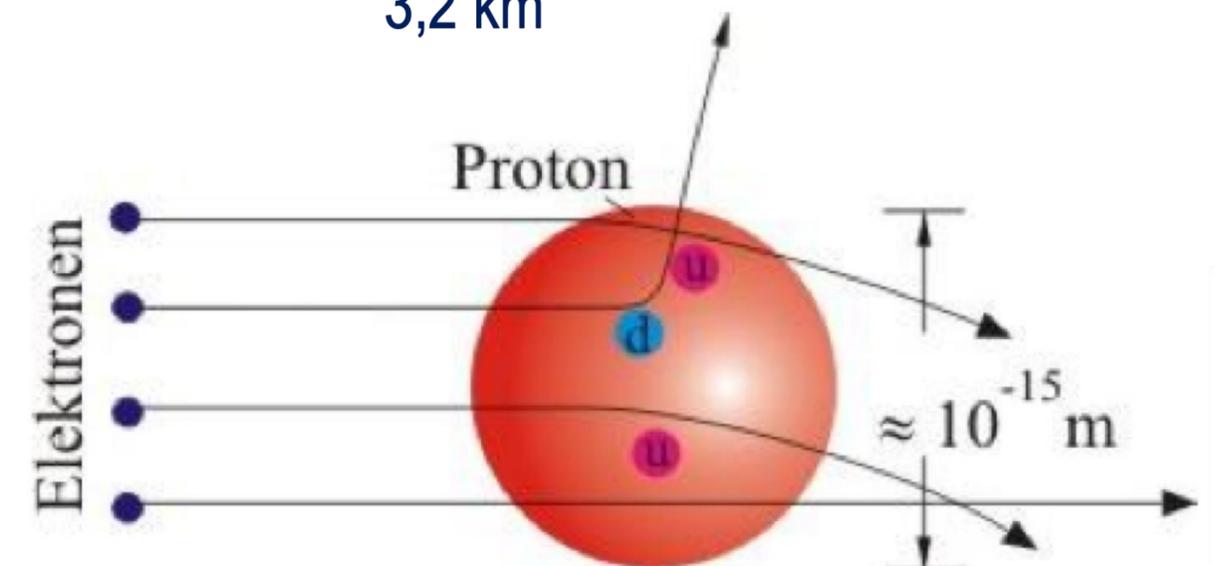
▶ Elektronen Energie bis zu 50 GeV

$$\lambda = \frac{\hbar \cdot c}{E} = \frac{200 \text{ MeV fm}}{50 \text{ GeV}} \approx 0,01 \text{ fm}$$

▶ Um (noch) kleinere Strukturen aufzulösen benötigt man (noch) mehr Energie

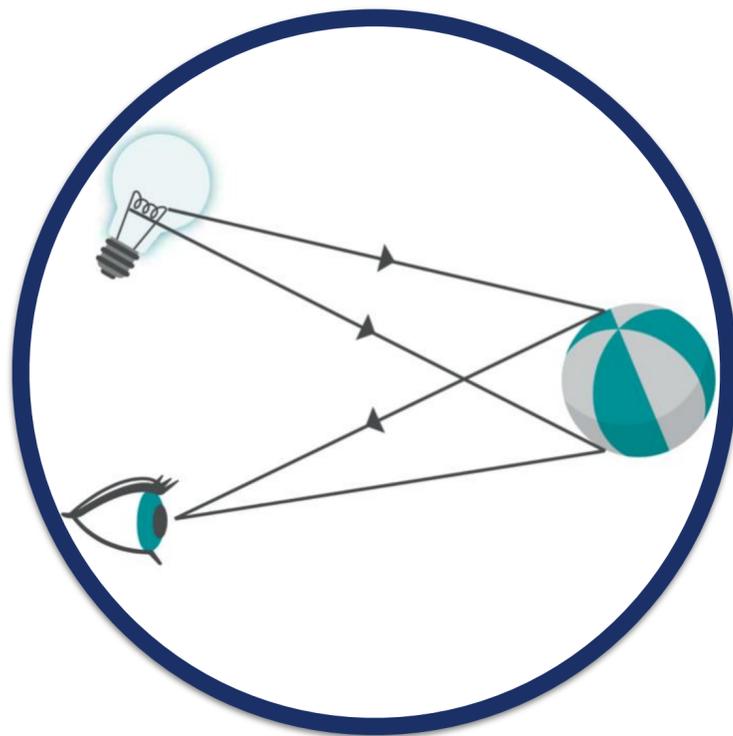


3,2 km

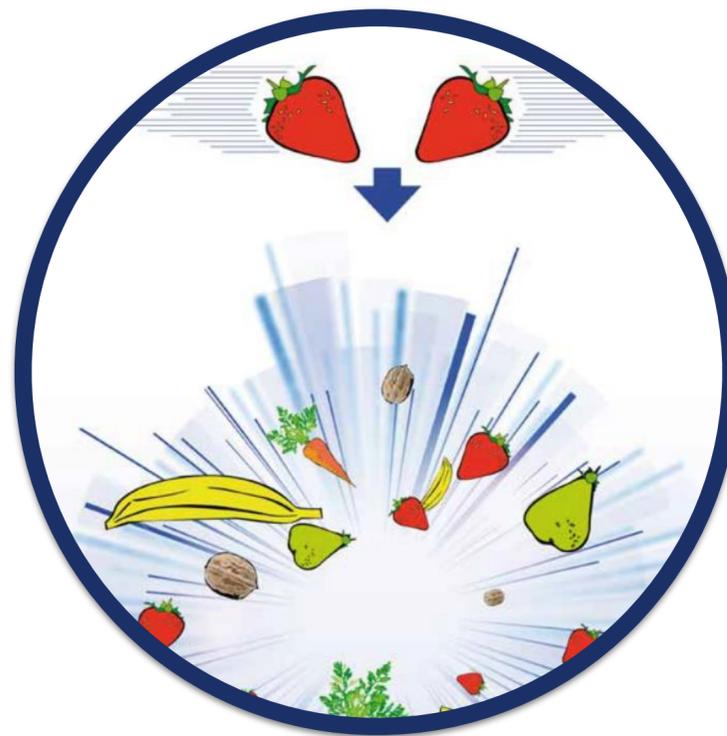


Forschungsziele

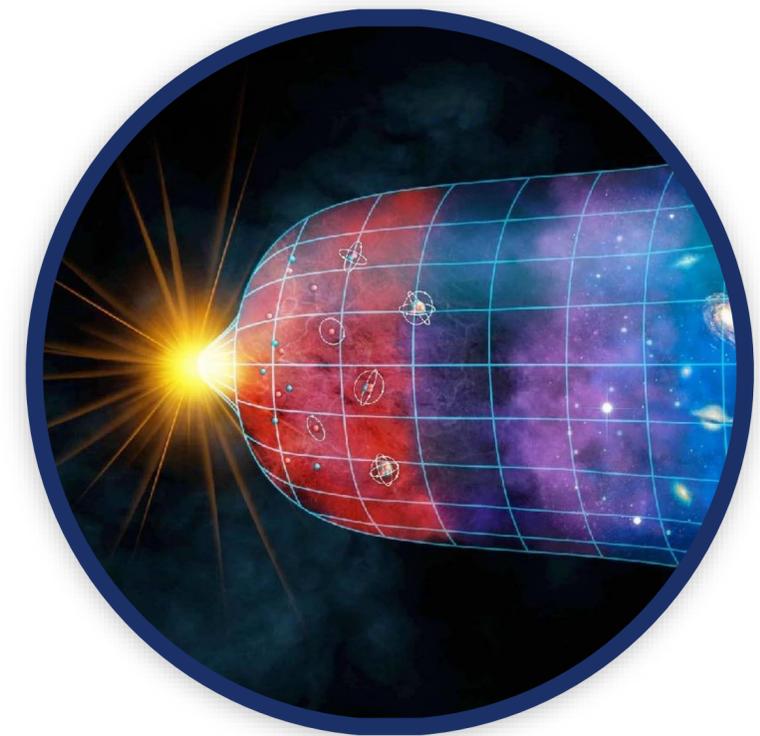
Wofür benötigen die Teilchenphysiker*innen Beschleuniger?



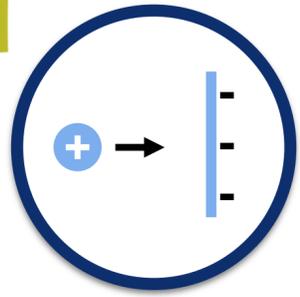
Strukturuntersuchungen



Erzeugung neuer Teilchen



Erzeugung extremer
Bedingungen

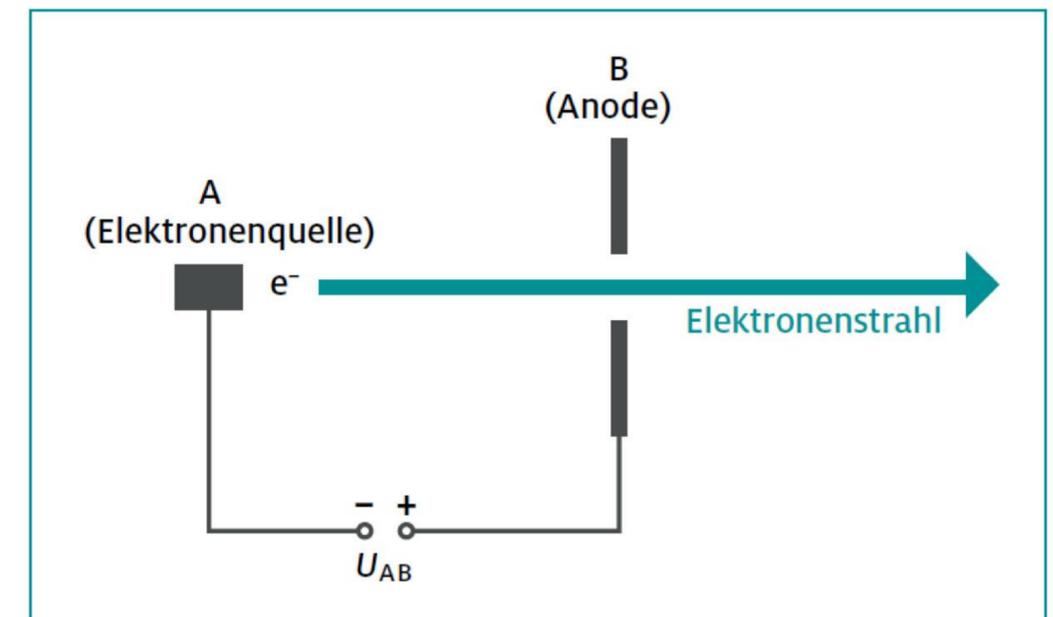
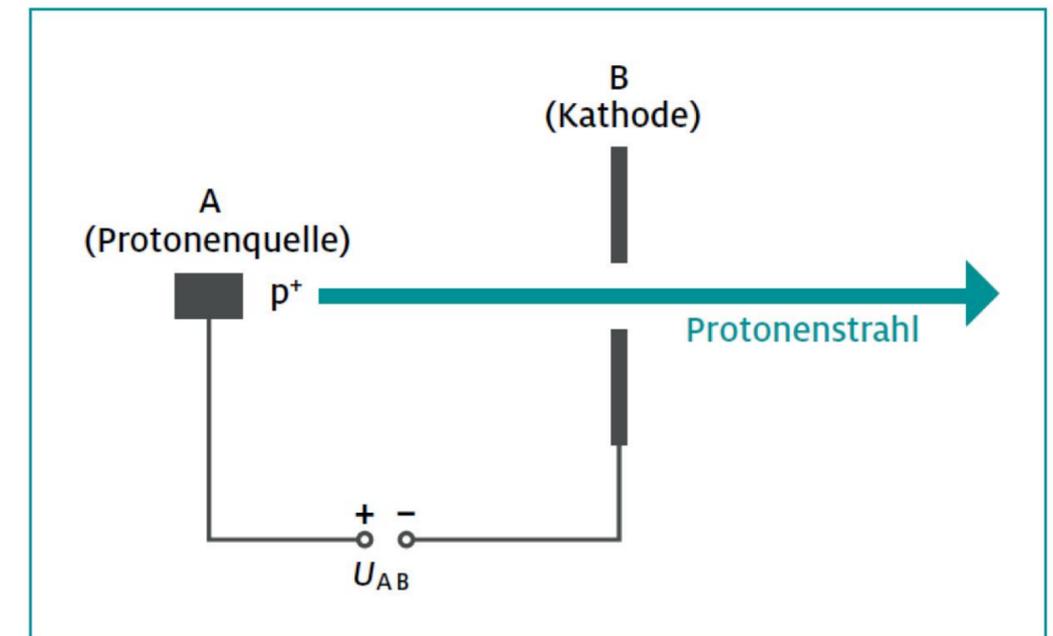


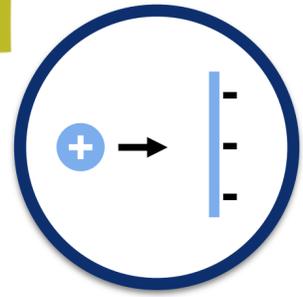
Physik der Beschleuniger

Wie werden die Teilchen beschleunigt?

► Beschleunigung von Teilchen

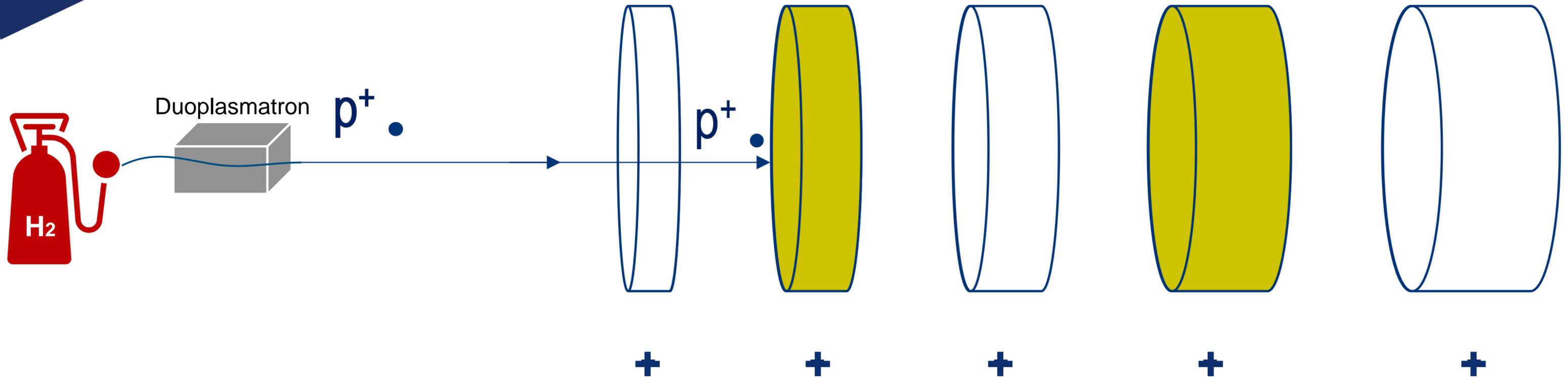
- **Teilchen erzeugen:**
Elektrisch neutrale Teilchen werden ionisiert
- **Teilchen beschleunigen:**
Elektrisch geladene Teilchen durchlaufen ein elektrisch „anziehendes“ Feld
- **Teilchen ablenken und/oder fokussieren:**
Elektrisches oder magnetisches Feld
- **Teilchen nachweisen:**
Leuchtschirm/Detektor



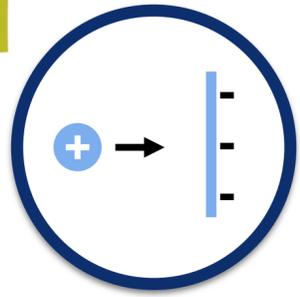


Physik der Beschleuniger

- Um in Teilchenbeschleuniger höhere Energien zu erreichen, durchlaufen sie ein **elektrisch Wechselfeld**:



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

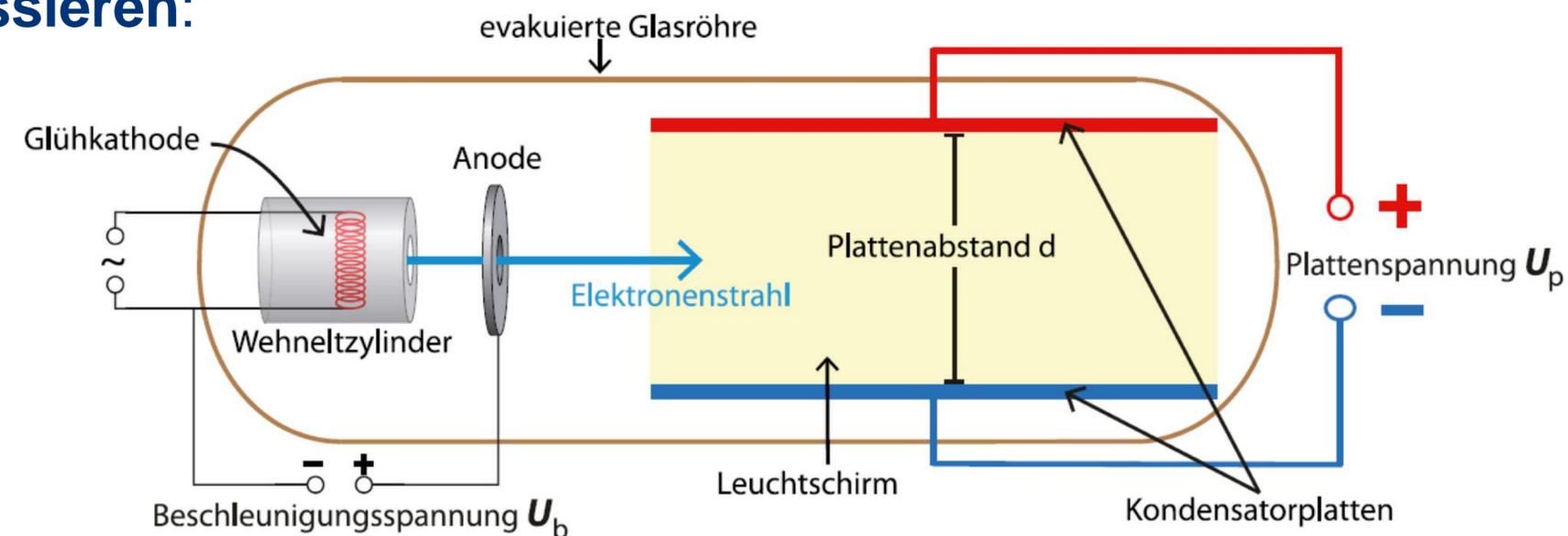


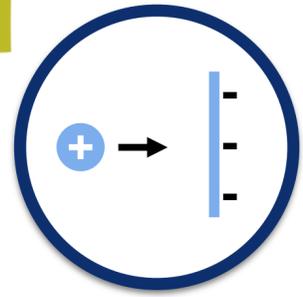
Physik der Beschleuniger

Beschleunigung von Elektronen

- ▶ **Elektronen erzeugen:**
Elektrisch neutrale Teilchen werden ionisiert
- ▶ **Elektronen beschleunigen:**
Elektronen durchlaufen ein elektrisch „anziehendes“ Feld
- ▶ **Elektronen ablenken und/oder fokussieren:**
Elektrisches oder magnetisches Feld
- ▶ **Teilchen nachweisen:**
Leuchtschirm/Detektor

Lehrplanthema!

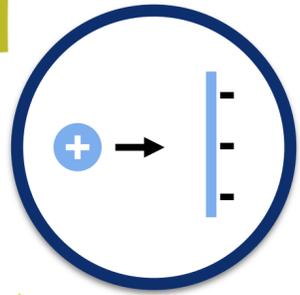




Physik der Beschleuniger

- ▶ Die Produktion von Röhrengeräten wurde im Jahr 2008 eingestellt...
- ▶ Der neue Linearbeschleuniger LINAC4 des CERN hat am 20. August 2020 den alten Linearbeschleuniger LINAC2 abgelöst...





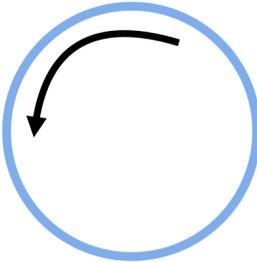
Physik der Beschleuniger

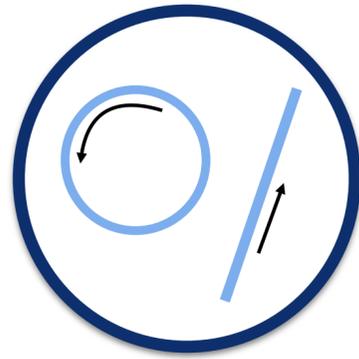
Linearbeschleuniger

- ▶ Elektrisch geladene Teilchen durchqueren elektrische Felder
- ▶ **Vorteile:**
Beschleunigung kann bei „Null“ beginnen
- ▶ **Nachteile:**
Elektrische Felder werden nur einmal genutzt

Kreisbeschleuniger

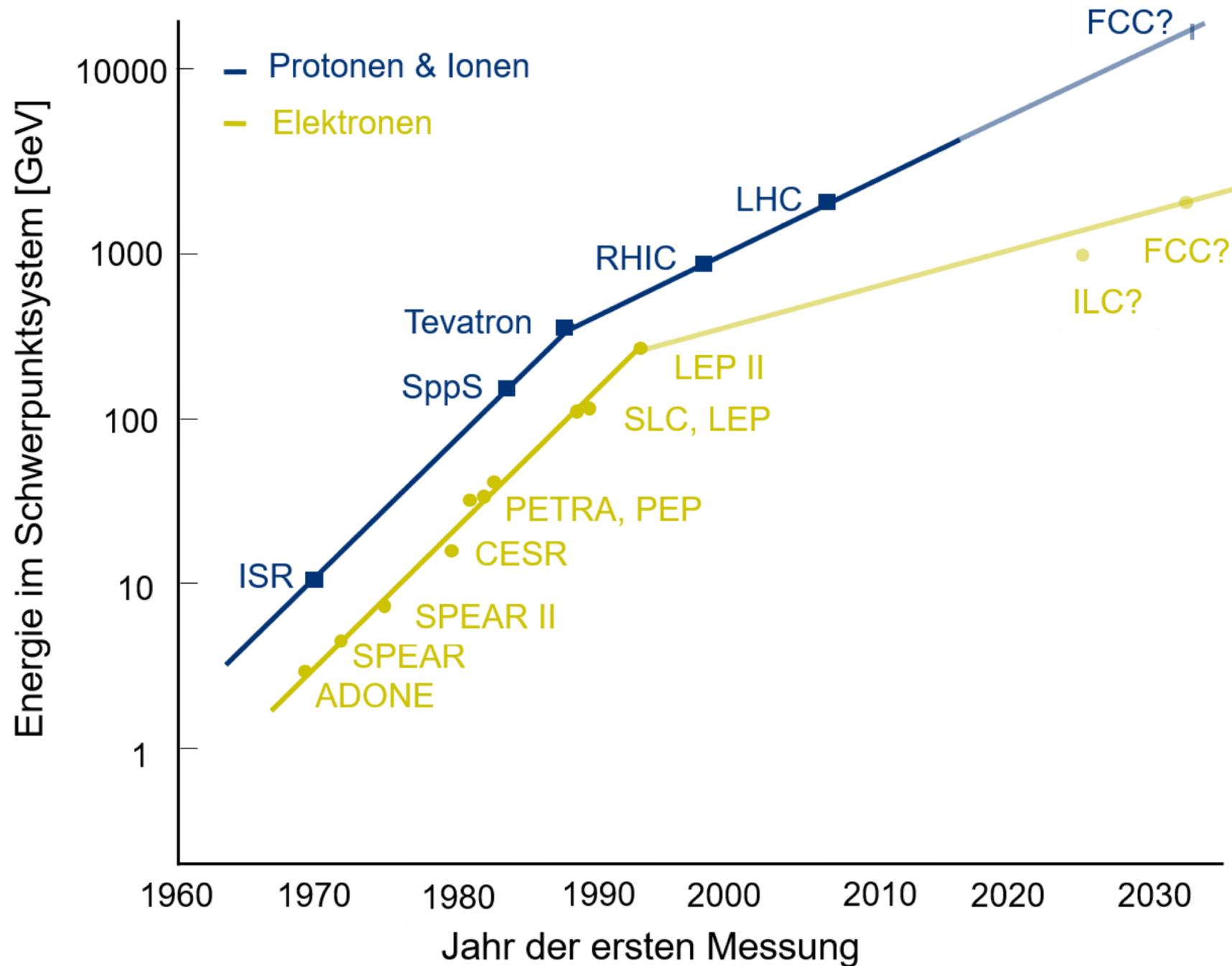
- ▶ Elektrisch geladene Teilchen durchqueren elektrische Felder
- ▶ Magnetische Felder zwingen Teilchen auf Kreisbahn
- ▶ **Vorteile:**
Mehrfaches Durchlaufen der elektrischen Felder
- ▶ **Nachteile:**
Hohe Magnetfeldstärken nötig





Beschleunigerarten

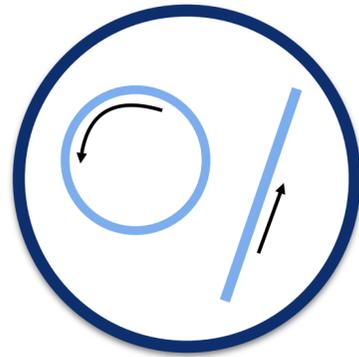
Linear- und Kreisbeschleuniger



Warum erreichen Leptonen-Beschleuniger geringere (Teilchen-)Energien?

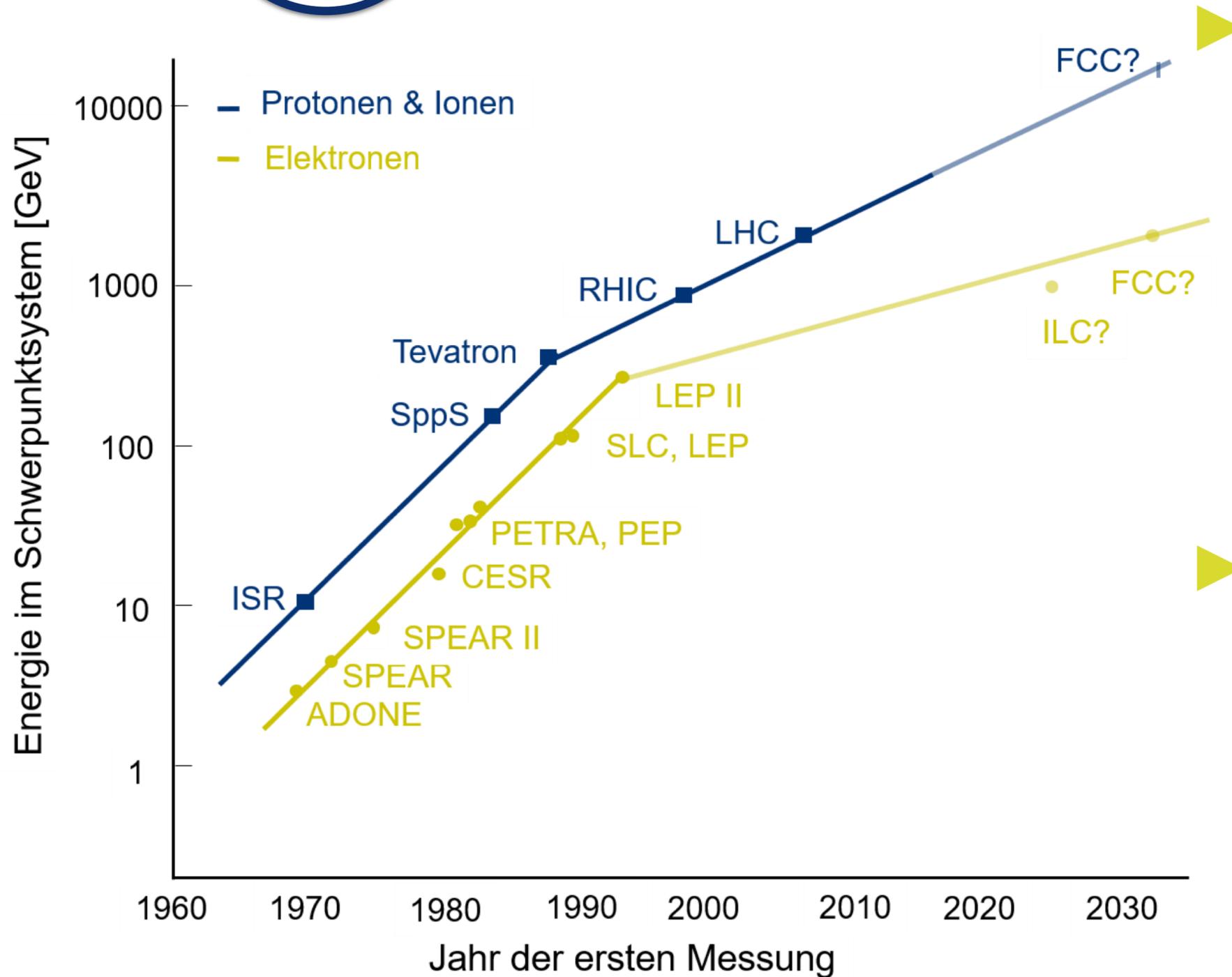
- ▶ Masse der beschleunigten Teilchen in der Regel kleiner
- ▶ **ABER: Synchrotronstrahlung**

$$I \sim \left(\frac{E}{m}\right)^4 \cdot \frac{\text{Current}}{R}$$



Beschleunigerarten

Linear- und Kreisbeschleuniger

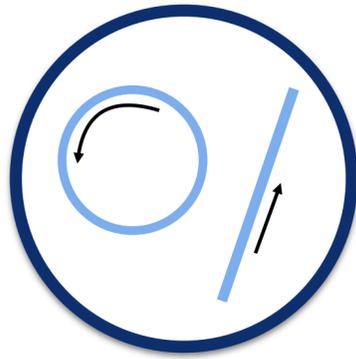


Wofür dann Leptonen-Beschleuniger / -Collider?

- ▶ Leptonen → Elementarteilchen
- ▶ Jedes Teilchen volle Energie
- ▶ Präzise Messungen der Interaktionen möglich

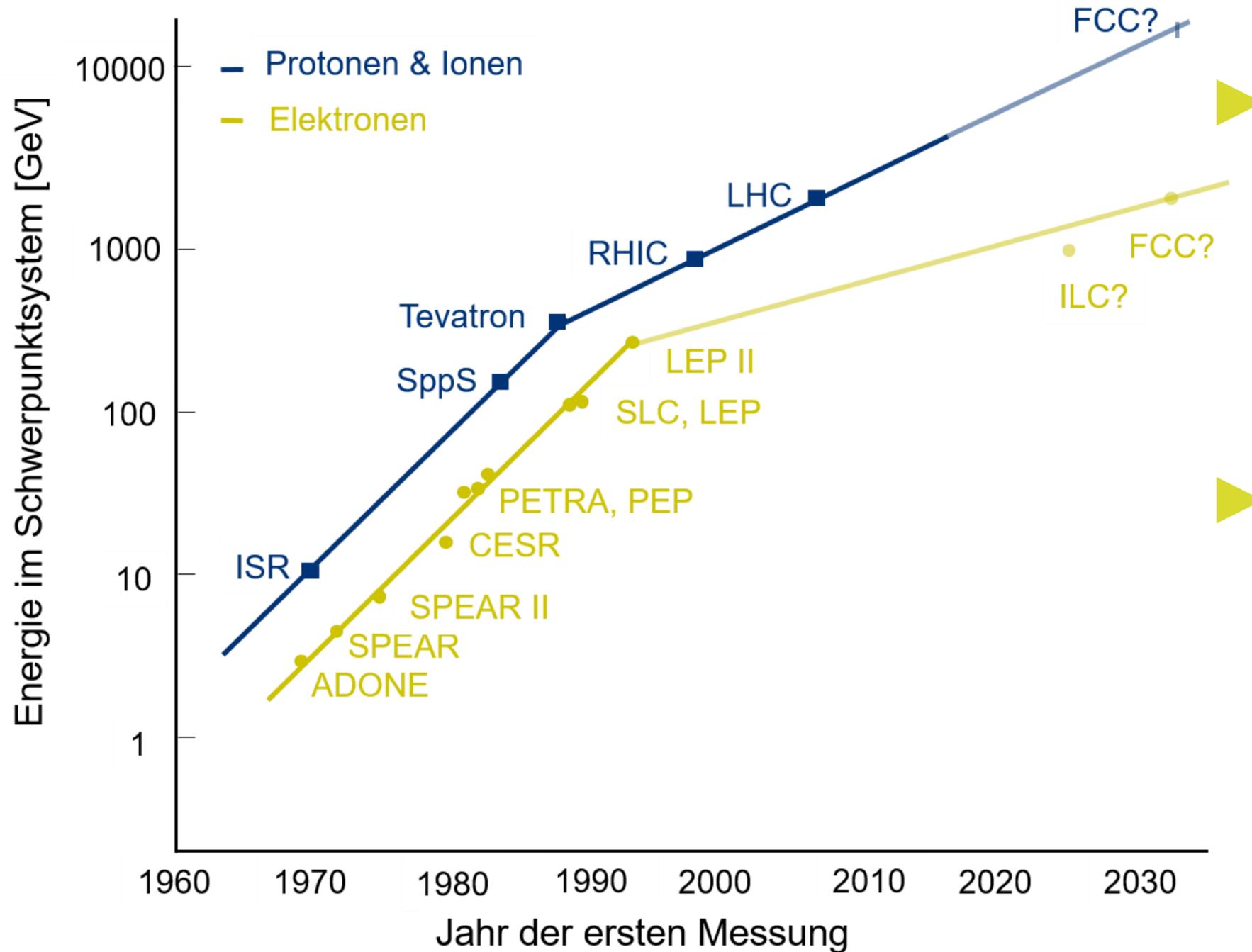
Und Hadronen-Beschleuniger / -Collider?

- ▶ Bestandteile teilen sich Energie
- ▶ Interaktion auf Quark- u. Gluonenebene
- ▶ Kollisionsenergie nicht exakt bestimmt



Beschleunigerarten

Linear- und Kreisbeschleuniger



Wofür dann Leptonen-Beschleuniger / -Collider?

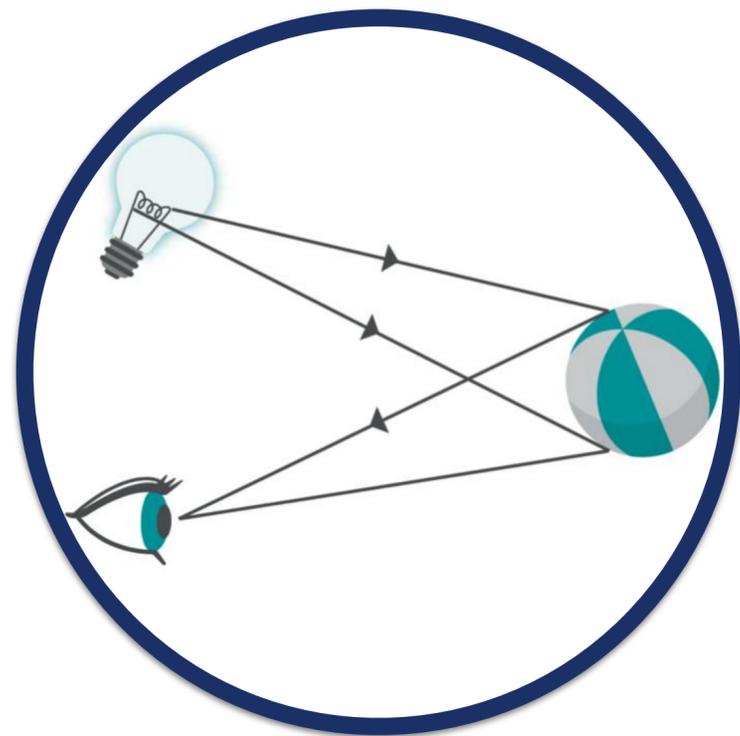
- ▶ Präzise Vermessung von Teilchen

Und Hadronen-Beschleuniger / -Collider?

- ▶ Entdeckung neuer Teilchen

Forschungsziele

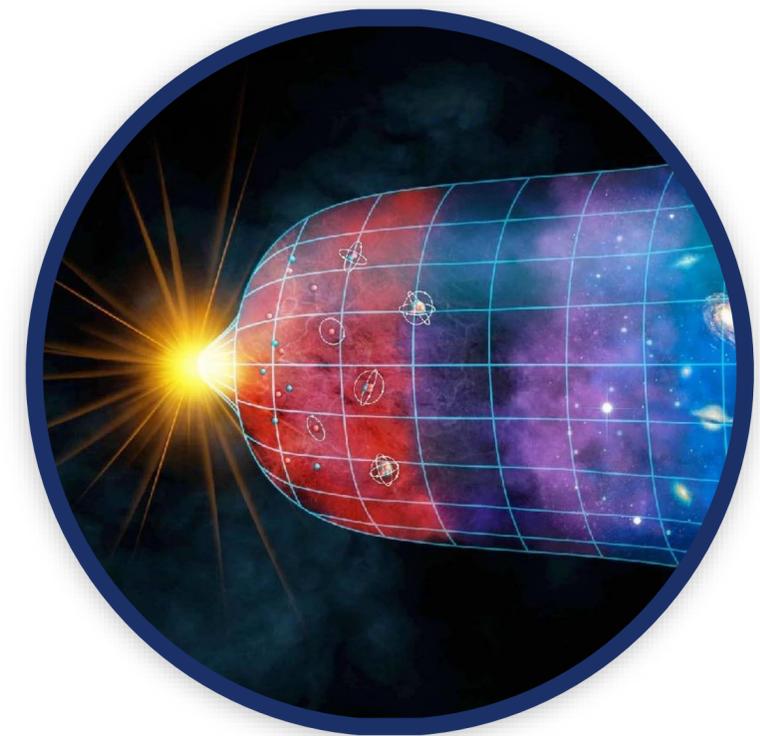
Wofür benötigen die Teilchenphysiker*innen Beschleuniger?



Strukturuntersuchungen



Erzeugung neuer Teilchen



Erzeugung extremer Bedingungen

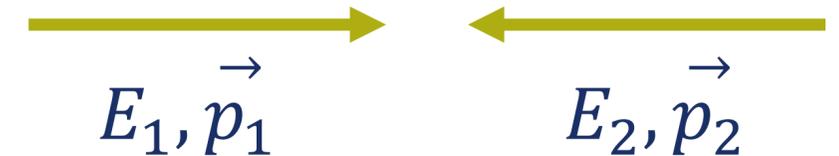


Erzeugung „neuer“ Teilchen

- ▶ Teilchenphysik versucht (bisher unbekannte, meist schwere) Teilchen zu erzeugen
- ▶ Annahme: Zwei Teilchen kollidieren, ihre kinetische Energie E_{kin} steht zur Verfügung
- ▶ Bei Teilchen + Antiteilchen sogar gesamte Energie: $E_{tot} = E_{kin} + E_0$ (Annihilation)

Collider:

- ▶ z. B. Proton + Antiproton mit je $E_{kin} = 50 \text{ GeV}$
- ▶ Energie im Schwerpunktsystem $E_{cm} \approx 100 \text{ GeV}$



Fixed Target:

- ▶ z.B. Proton mit $E_1 = 50 \text{ GeV}$ trifft auf ruhendes Antiproton
- ▶ Energie im Schwerpunktsystem $E_{cm} \approx 7 \text{ GeV} \sqrt{E}$



Wieso
Masse
Ruheenergie-
Äquivalenz
das?

$$E = mc^2$$

Collider vs. Fixed Target

- ▶ Wieso im Fixed Target Experiment nur \sqrt{E} zur Erzeugung neuer Teilchen zur Verfügung?
- ▶ Anschauliche Motivation: Collider \rightarrow kein „Netto“-Impuls, Fixed Target \rightarrow „Netto“-Impuls in Beamrichtung
 \rightarrow Dieser Anteil muss auch nach Kollision vorhanden sein (Impulserhaltung)
- ▶ Mathematische Begründung über Schwerpunktsenergie \sqrt{s} der N teilnehmenden Teilchen:

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \vec{p}_i\right)^2} \text{ mit Viererimpuls } \vec{p} = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

Collider vs. Fixed Target

- ▶ Wieso im Fixed Target Experiment nur \sqrt{E} zur Erzeugung neuer Teilchen zur Verfügung?
- ▶ Anschauliche Motivation: Collider \rightarrow kein „Netto“-Impuls, Fixed Target \rightarrow „Netto“-Impuls in Beamrichtung
 \rightarrow Dieser Anteil muss auch nach Kollision vorhanden sein (Impulserhaltung)
- ▶ Mathematische Begründung über Schwerpunktsenergie \sqrt{s} der N teilnehmenden Teilchen:

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \vec{p}_i\right)^2} \text{ mit Viererimpuls } \vec{p} = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \text{ und Minkowskimetrik } \vec{a}^2 = a_1^2 - a_2^2 - a_3^2 - a_4^2$$

Collider:

$$\vec{p}_1 = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \text{ trifft auf } \vec{p}_2 = \begin{pmatrix} E \\ -p_x \\ -p_y \\ -p_z \end{pmatrix} \rightarrow \sqrt{s} = \sqrt{\left(\begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E \\ -p_x \\ -p_y \\ -p_z \end{pmatrix}\right)^2} = \sqrt{\begin{pmatrix} 2E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^2}$$
$$= \sqrt{4E^2} = 2E$$

Collider vs. Fixed Target

► Mathematische Begründung über Schwerpunktsenergie \sqrt{s} der N teilnehmenden Teilchen:

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \vec{p}_i\right)^2} \text{ mit Viererimpuls } \vec{p} = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \text{ und Minkowskimetrik } \vec{a}^2 = a_1^2 - a_2^2 - a_3^2 - a_4^2$$

Fixed Target:

$$\begin{aligned} \vec{p}_1 &= \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \text{ trifft auf } \vec{p}_2 = \begin{pmatrix} m \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \sqrt{s} = \sqrt{\left(\begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right)^2} = \sqrt{\begin{pmatrix} E+m \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}^2} \\ &= \sqrt{(E+m)^2 - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2} \\ &= \sqrt{(E+m)^2 - \vec{p}^2} = \sqrt{E^2 + 2 \cdot E \cdot m + m^2 - \vec{p}^2} \stackrel{\vec{p}^2 = E^2 - m^2}{=} \sqrt{2 \cdot E \cdot m + 2m^2} \sim \sqrt{E} \end{aligned}$$

Experimenteller Nachweis W^\pm, Z^0

▶ Beispiel Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung: W^\pm, Z^0

▶ **Massen vorhergesagt 1968**

Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam

$$m_W = 77 \text{ GeV} \mid m_Z = 88 \text{ GeV}$$

Experimenteller Nachweis W^\pm, Z^0

▶ Beispiel Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung: W^\pm, Z^0

▶ **Massen vorhergesagt 1968**

Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam

$$m_W = 77 \text{ GeV} \mid m_Z = 88 \text{ GeV}$$

▶ Existierender Beschleuniger: SPS (CERN)

Protonenstrahl mit $E_{kin} = 400 \text{ GeV}$ (-:

Strahl kollidiert mit **festem Target**

Zur Verfügung stehende Energie im Schwerpunktsystem $\sqrt{E_{kin}} \approx 20 \text{ GeV}$)-:

Experimenteller Nachweis W^\pm, Z^0

▶ Beispiel Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung: W^\pm, Z^0

▶ **Massen vorhergesagt 1968**

Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam

$$m_W = 77 \text{ GeV} \mid m_Z = 88 \text{ GeV}$$

▶ Existierender Beschleuniger: SPS (CERN)

Protonenstrahl mit $E_{kin} = 400 \text{ GeV}$ (-:

Strahl kollidiert mit **festem Target**

Zur Verfügung stehende Energie im Schwerpunktsystem $\sqrt{E_{kin}} \approx 20 \text{ GeV}$)-:

▶ **Idee:** Kollision von Proton und Antiproton

Zur Verfügung stehende Energie im Schwerpunktsystem $\sqrt{E_{kin}} \approx 540 \text{ GeV}$ ($\approx 270 \text{ GeV}$ pro Strahl)

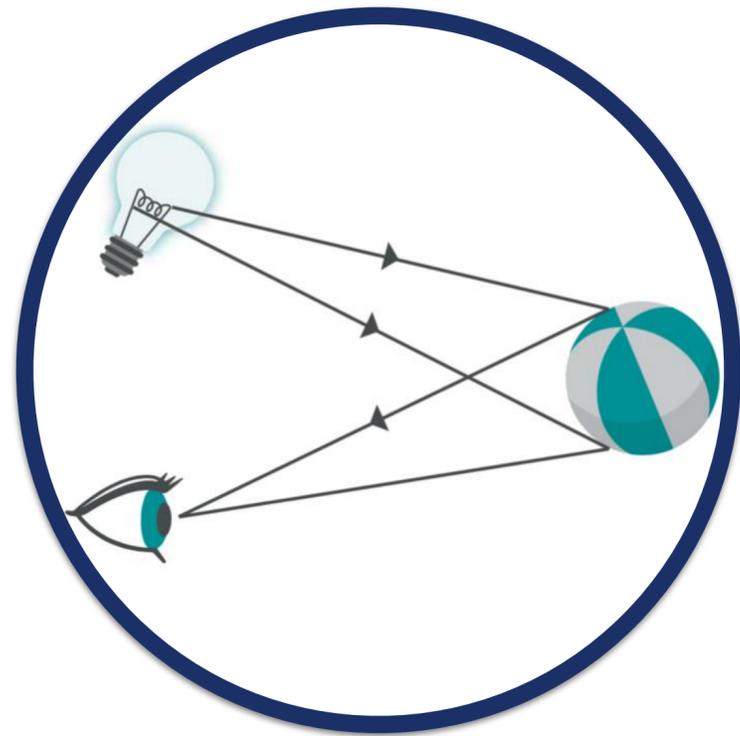
Teilchen nachgewiesen: 20. Januar 1983: $m_W = 83 \pm 3 \text{ GeV} \mid m_Z = 94 \pm 3 \text{ GeV}$

Nobelpreise für Carlo Rubbia und Simon van der Meer (Stochastische Kühlung)

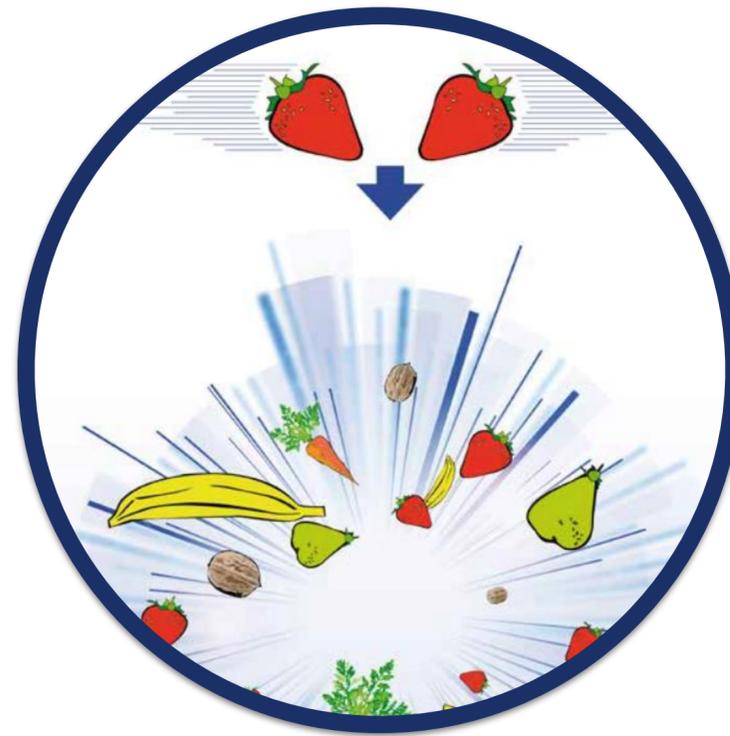


Forschungsziele

Wofür benötigen die Teilchenphysiker*innen Beschleuniger?



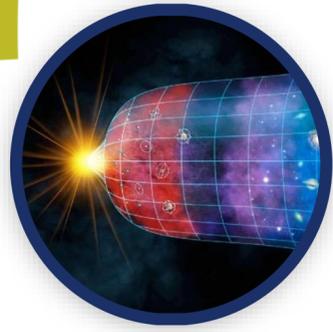
Strukturuntersuchungen



Erzeugung neuer Teilchen



**Erzeugung extremer
Bedingungen**



Erzeugung extremer Bedingungen

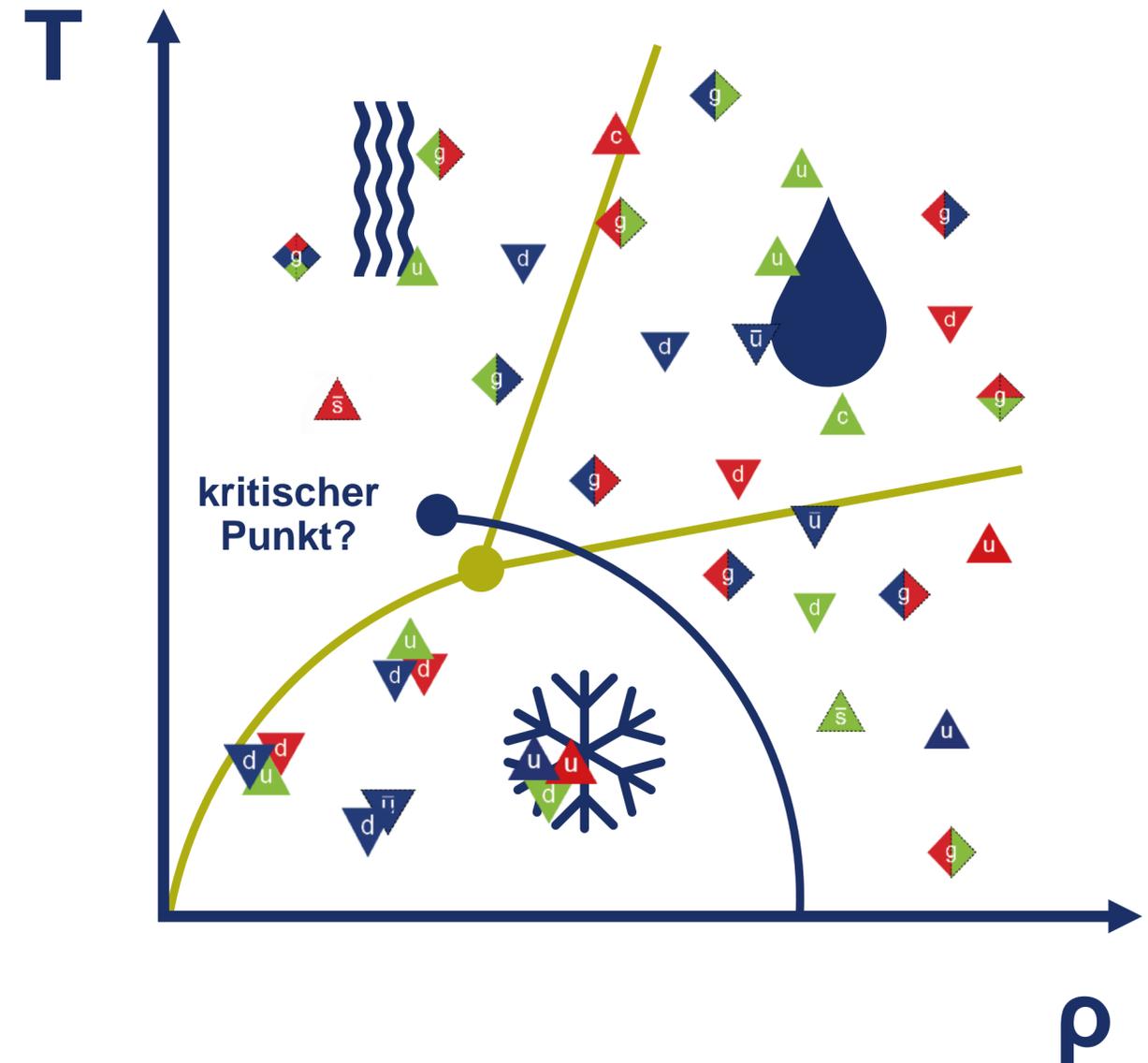
In **Schwerionenkollisionen** werden Temperaturen und Dichten erzeugt die ähnlich extrem sind wie:

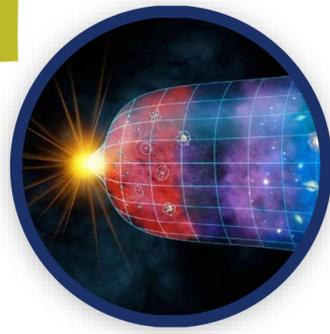
- ▶ Kurz nach dem Urknall
- ▶ In Neutronensternen

Forschungsgegenstand

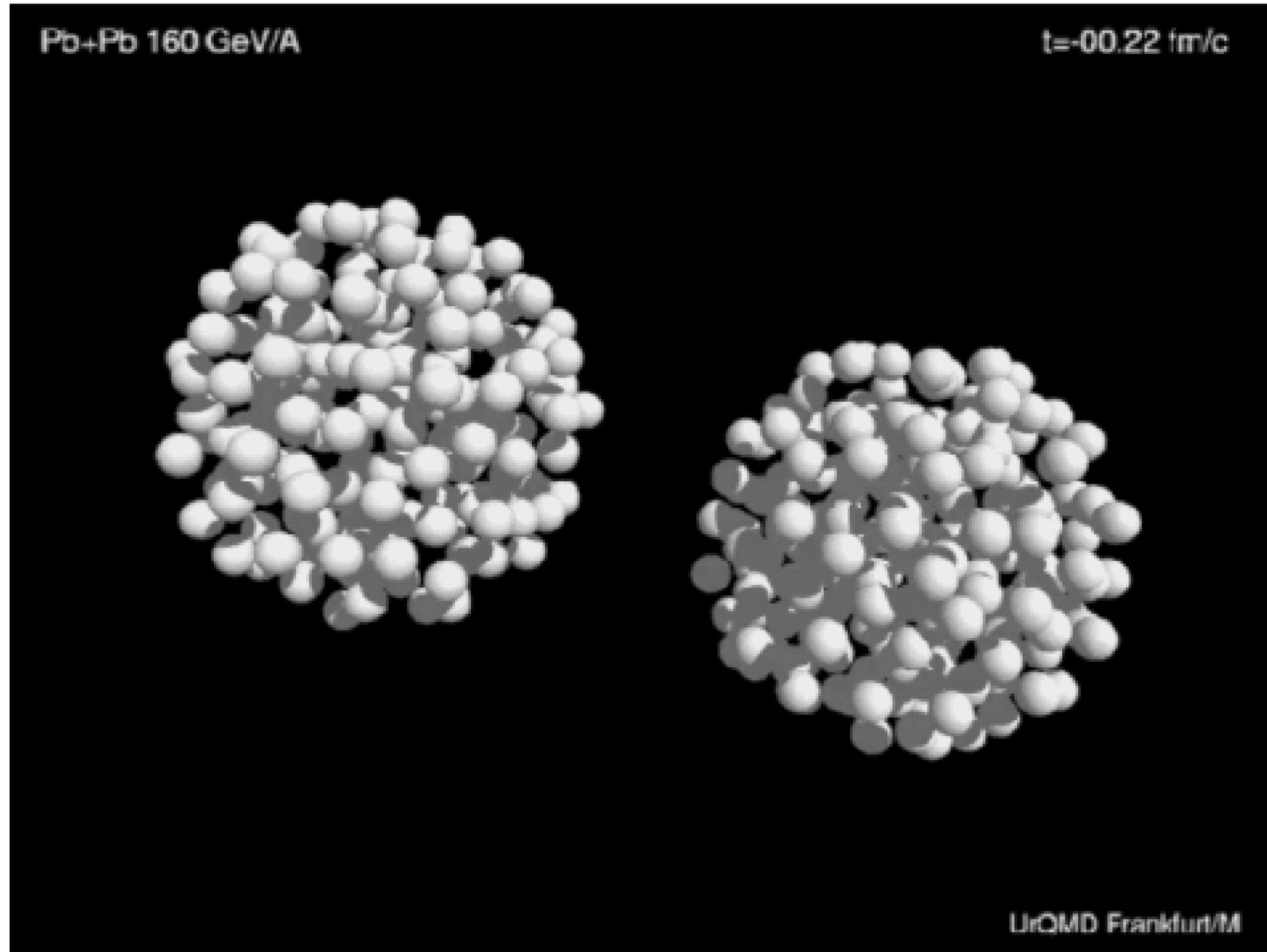
- ▶ Phasenübergang: Quarks-Gluonen-Plasma zu Hadronen
- ▶ Kritischer Punkt
- ▶ Expansionsverhalten nach Kollision

Analogie: Phasen von Wasser





Erzeugung extremer Bedingungen



Beschleunigerphysik und das CERN





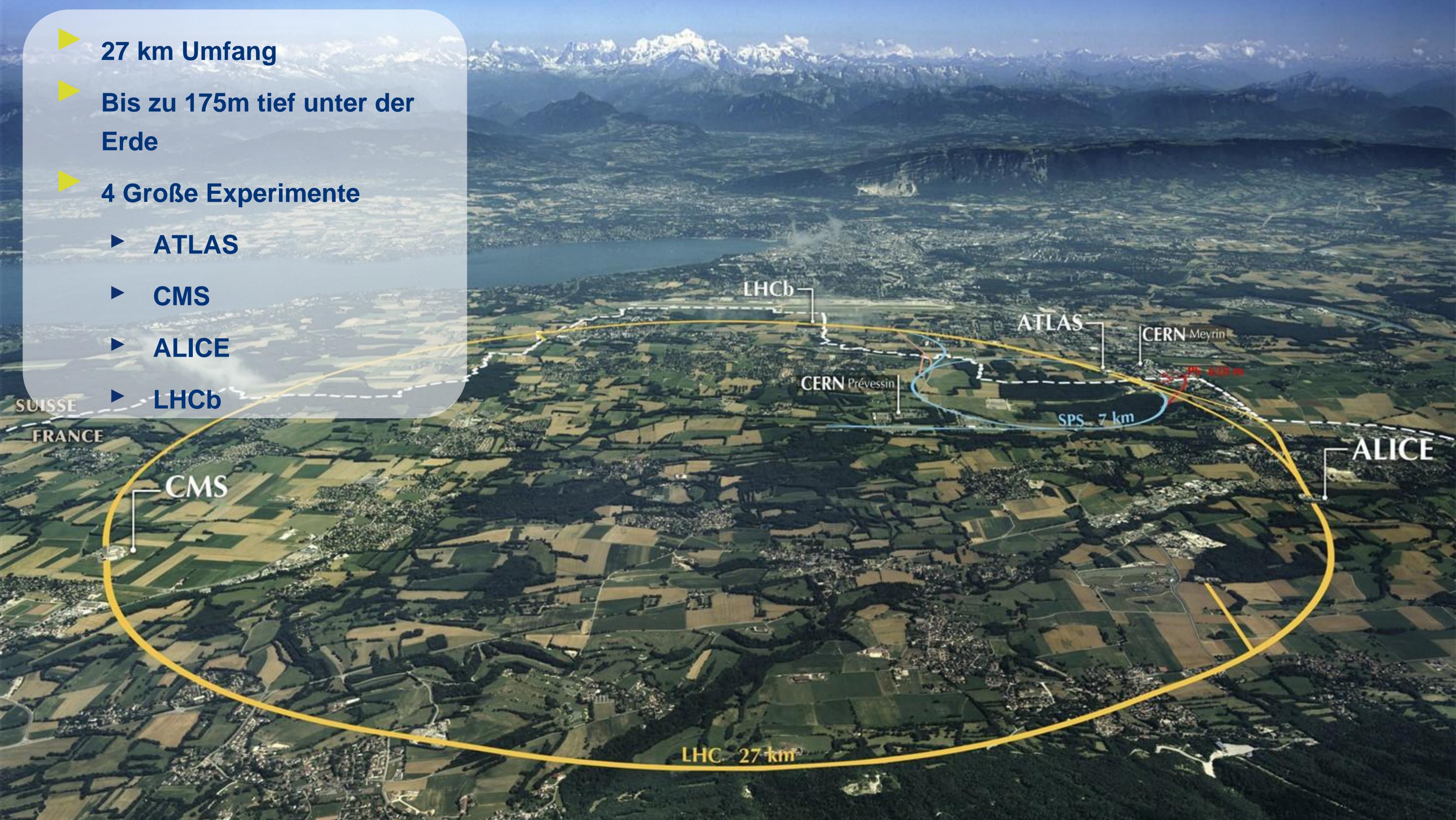
Das CERN

Conseil Européen pour
la Recherche Nucléaire

- ▶ Das **größte Teilchenphysik-Forschungszentrum der Welt** im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich
- ▶ **Gegründet 1954** von 12 europäischen Mitgliedsstaaten
- ▶ Dort arbeiten
 - ▶ **12.500 Wissenschaftler*innen**
 - ▶ Aus 110 Ländern
- ▶ CERN's Jahresbudget 2019 = 1,1 Milliarde CHF
 - ▶ Deutschland zahl etwa 20%
 - ▶ Entspricht 1% des US Militärbudget
 - ▶ Entspricht 1 Cappuccino pro EU Bürger pro Jahr
- ▶ Das CERN selbst macht keine Experimente, sondern stellt nur die (Beschleuniger)Infrastruktur



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



SUISSE
FRANCE

LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

CERN Prévessin

SPS 7 km

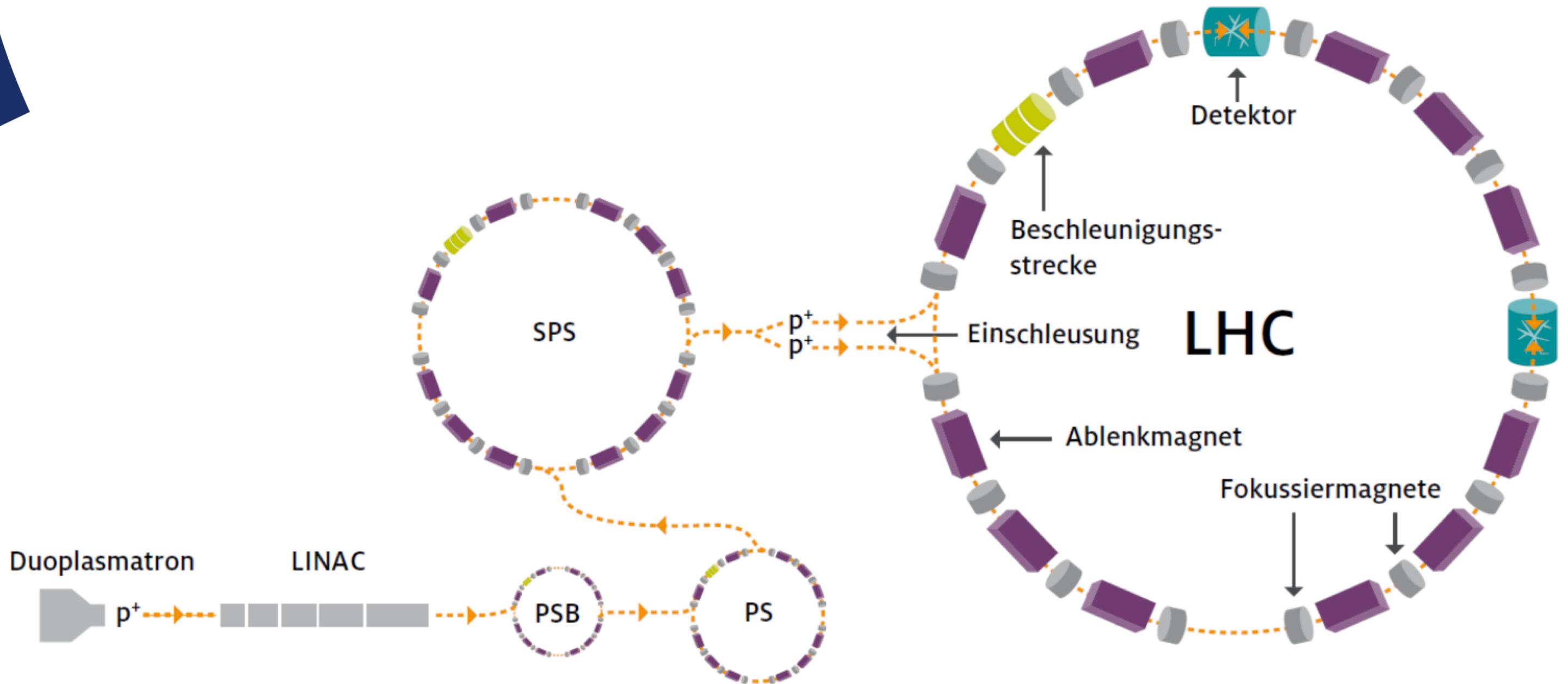
ALICE

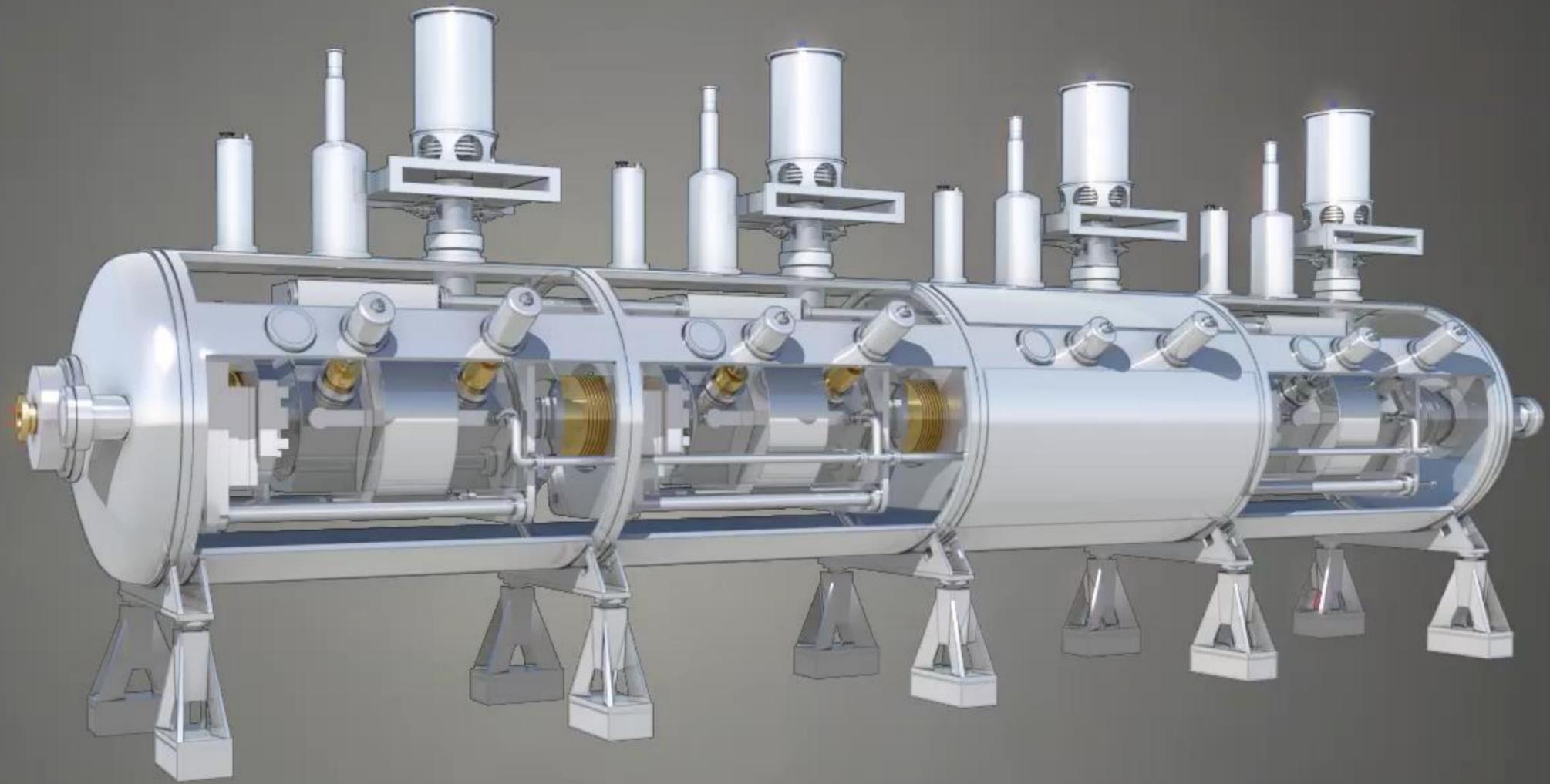
CMS

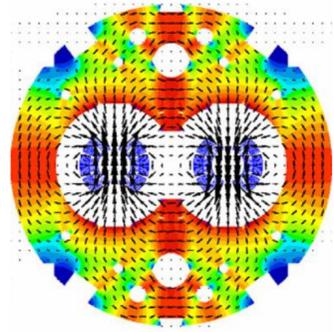
LHC 27 km



Large Hadron Collider (LHC)



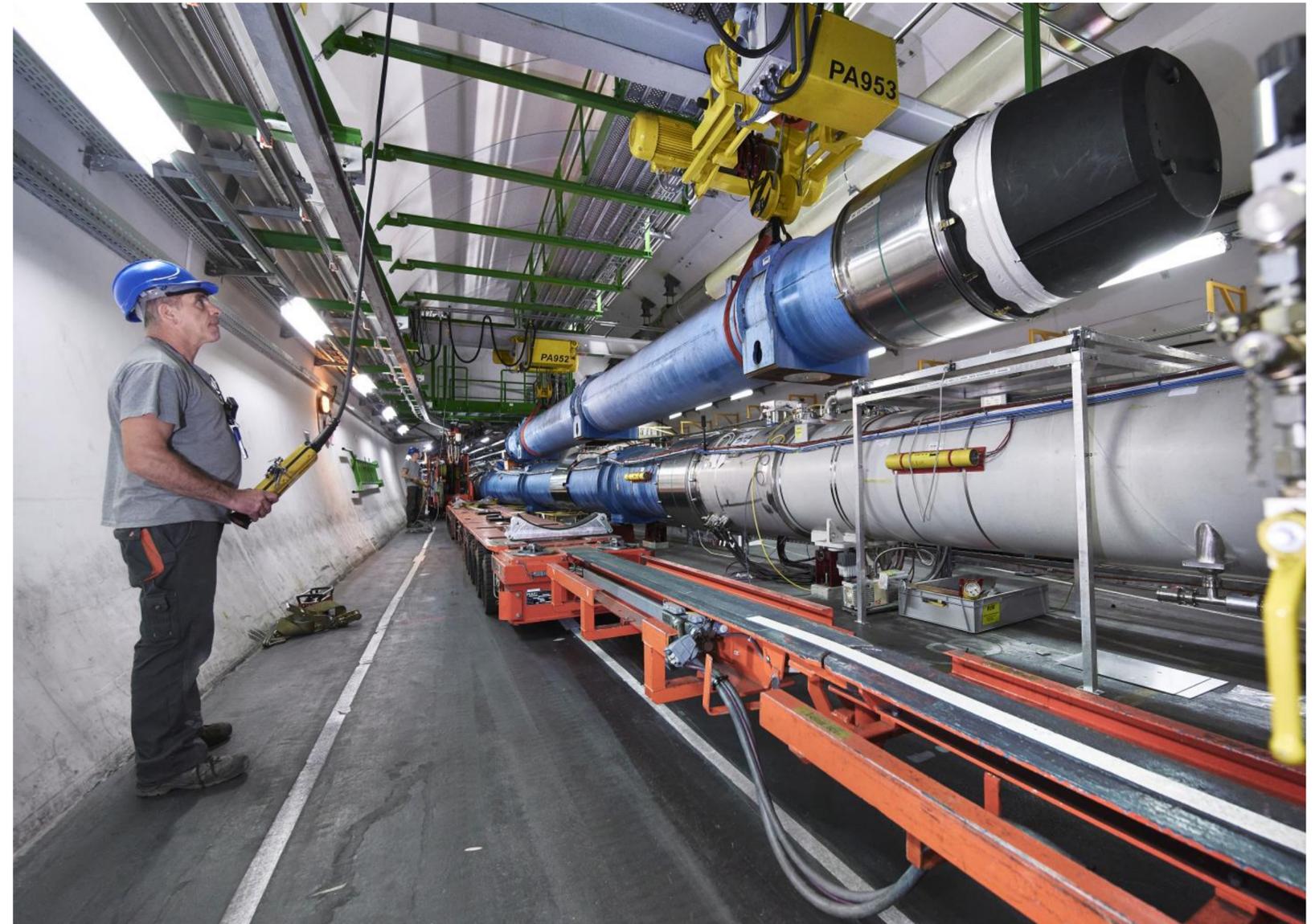




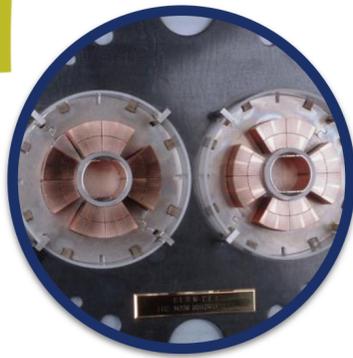
LHC Dipol Magnete

- ▶ **1232 Dipolmagnete** mit kupferverkleideten supraleitenden Niob-Titan Leitern
- ▶ Jeder Magnet ist 15 Meter lang und wiegt 30 Tonnen
- ▶ Betriebstemperatur wird durch das Kühlsystem auf **1,9 K** gehalten
- ▶ Die max. magnetische Flussdichte beträgt **8,36 Tesla**
- ▶ Ohne Supraleiter: 120km Umfang und 30 mal mehr Energie!

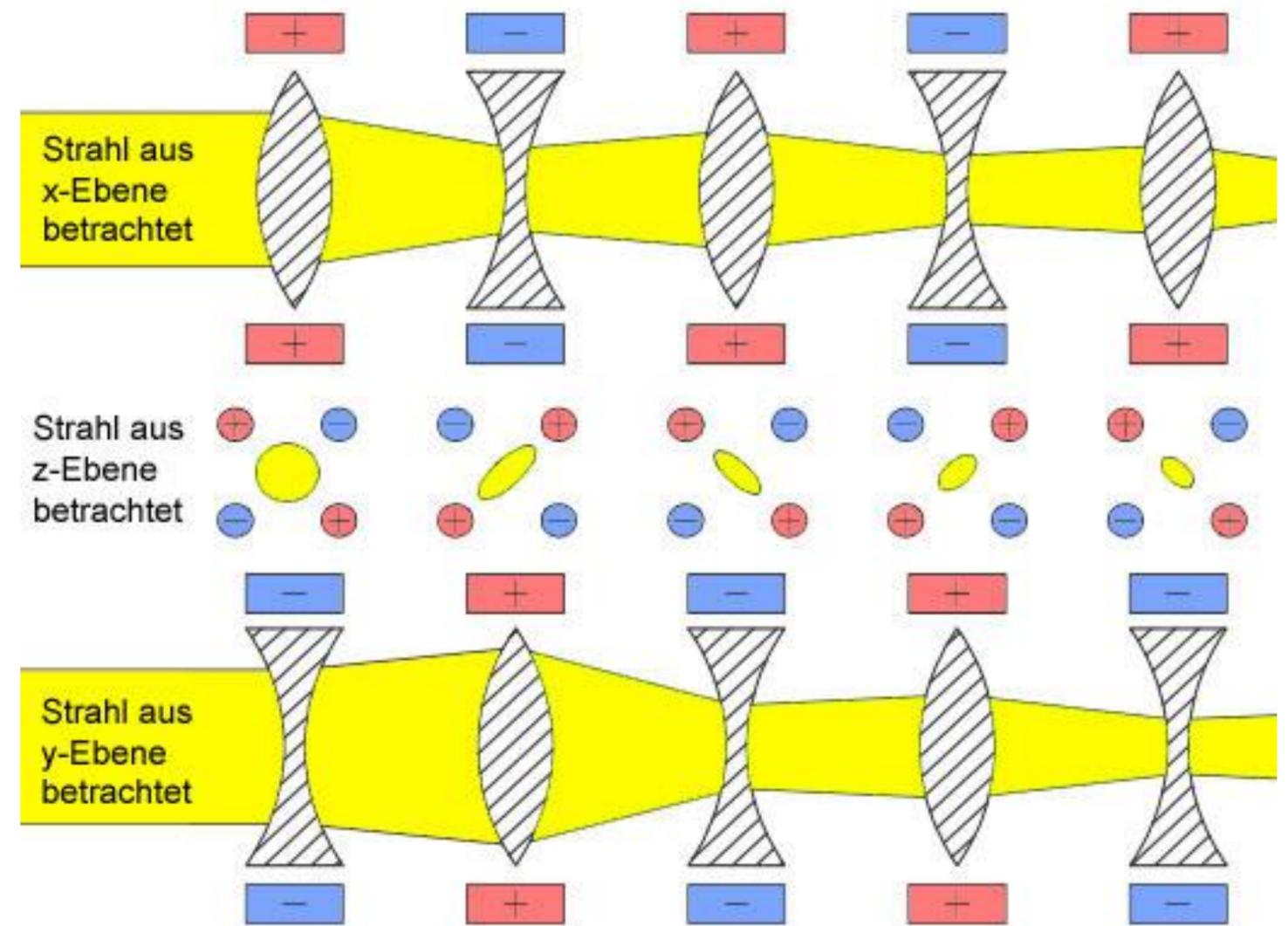
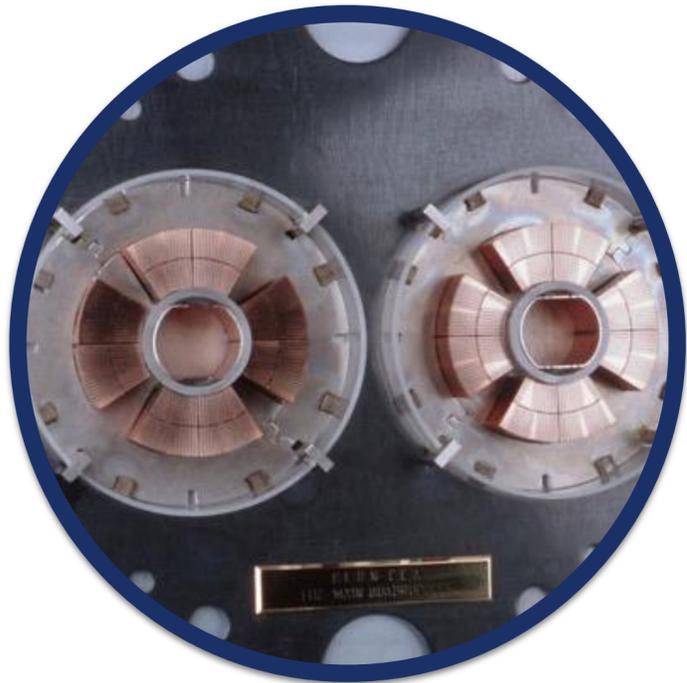
0,1 Tesla



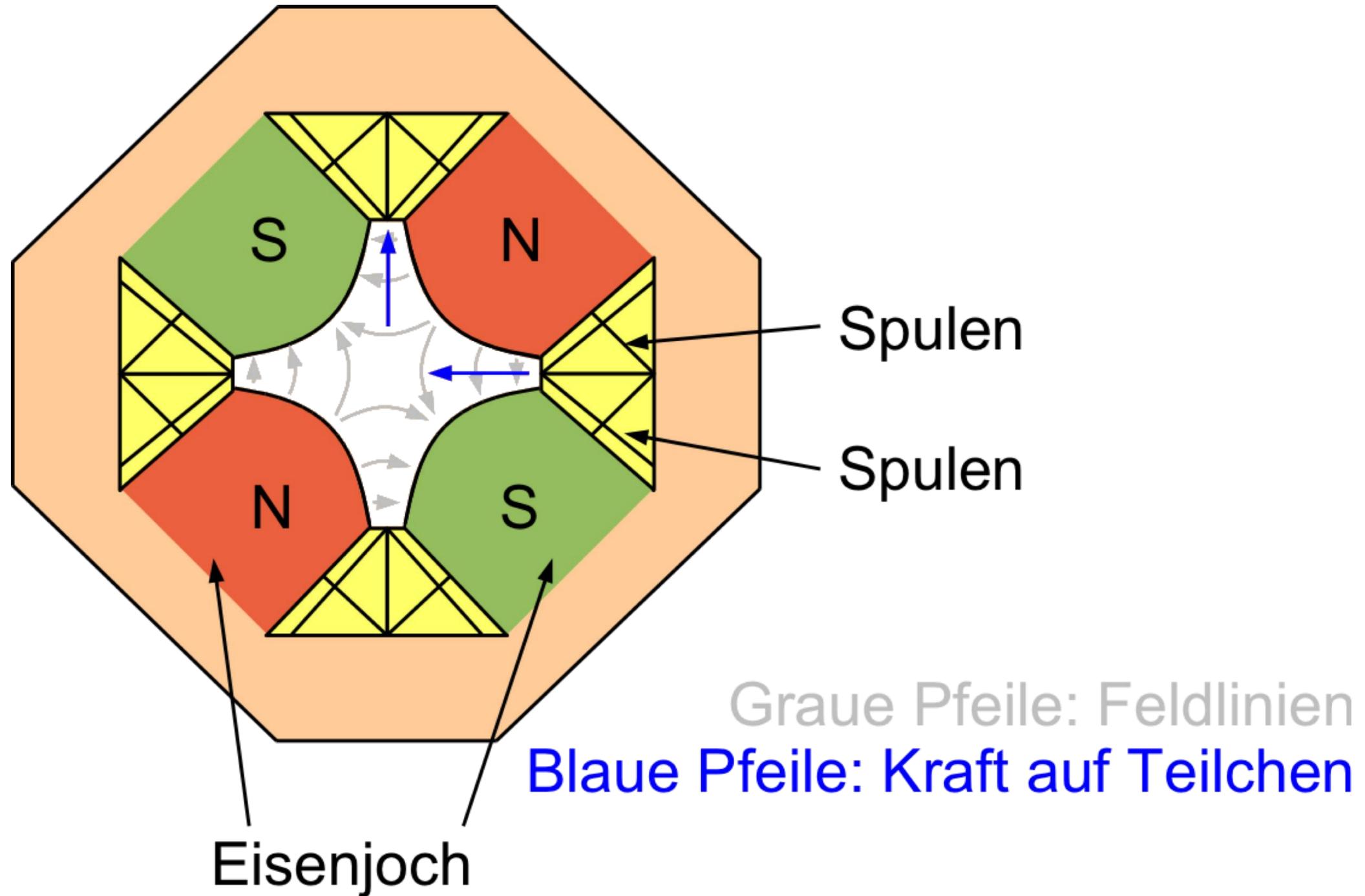
LHC Quadrupol Magnete



- ▶ **Coulombkraft** führt zur gegenseitigen Abstoßung der Protonen
- ▶ Wirkt in Flugrichtung immer durch zwei gegenüberliegende Pole **fokussierend**, während die anderen zwei Pole **defokussierend** wirken



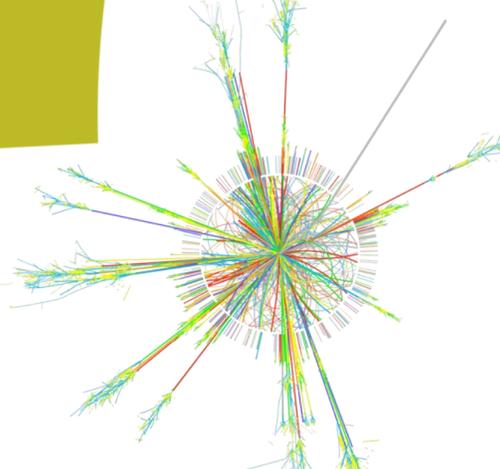
LHC Quadrupol Magnete

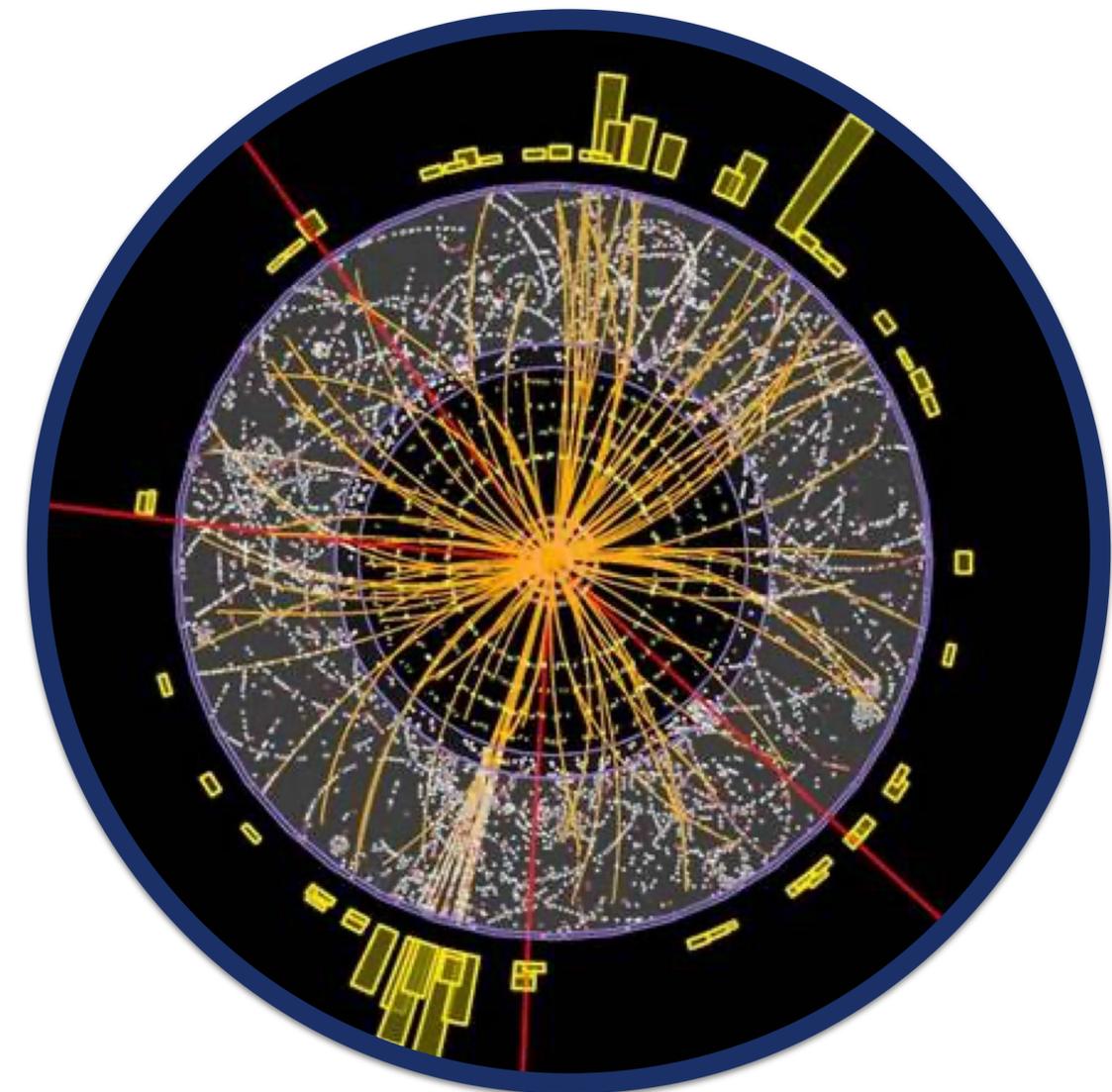




CMS
Compact Muon Solenoid
Solénoïde compact pour

Teilchenkollisionen im LHC

- 
- ▶ **2 gegenläufige Protonenstrahlen**
 - ▶ mit je **1404** Teilchenpaketen und $1,15 \cdot 10^{11}$ 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!**
 - ▶ „Interessante“ Teilchen entstehen sehr selten: ca. 1x pro 10 Mrd. Kollisionen!
 - ▶ Welche Teilchen bei einer bestimmten Kollision entstehen ist nicht eindeutig vorhersagbar



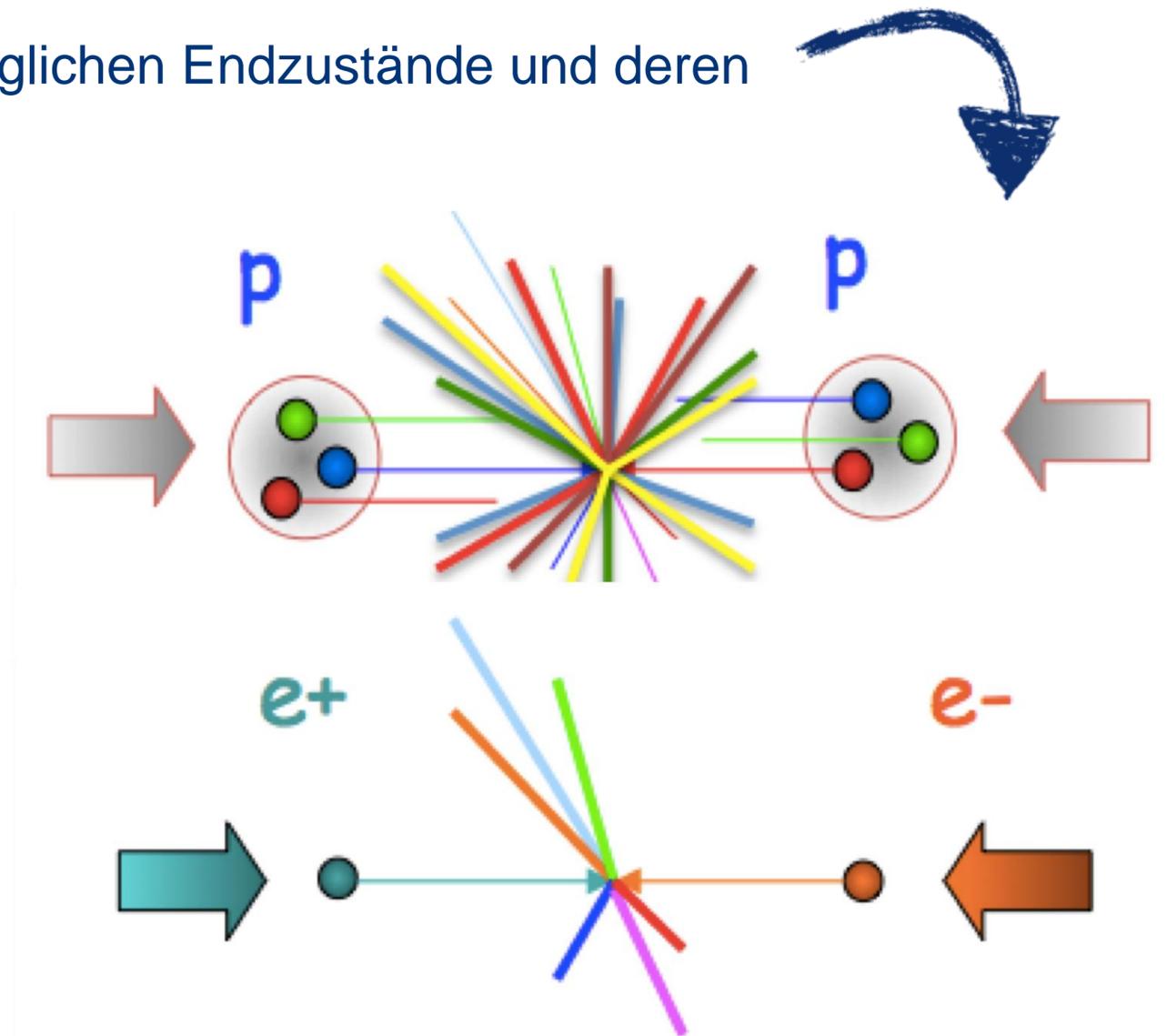
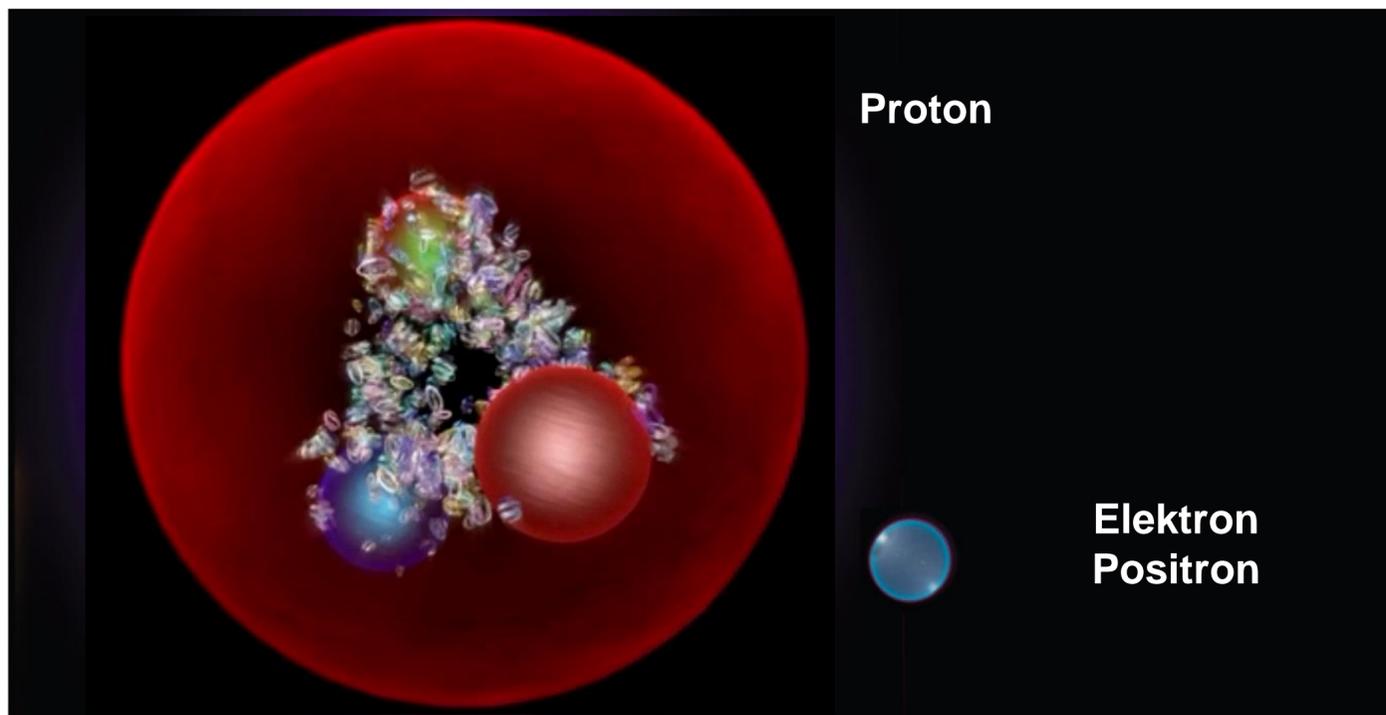
Large Electron-Positron Collider (LEP)

- ▶ Teilchenbeschleuniger, der bis 2000 **im selben Tunnel** wie jetzt der LHC betrieben wurde
- ▶ Kollision von **Elektronen und Positronen** bei Energien von bis zu **104 GeV** pro Teilchen
- ▶ **Präzisionsmessungen:**
 - ▶ Erzeugung sehr vieler Z-Teilchen (LEP1)
 - ▶ Erzeugung W-Paaren (LEP2)



LHC oder LEP in der Schule?

- ▶ LHC zwar aktueller, aber interessante Ereignisse bei LEP einfacher analysierbar
- ▶ **Einfachere Anfangszustände** vereinfachen die möglichen Endzustände und deren Beschreibung



Besuche am CERN

<https://visit.cern/>

Was ist besuchbar?

- ▶ Science Gateway (Di.-So.) (Gruppen 9 Monate vorher buchen)
 - verschiedene Exhibitions mit interaktiven Dingen
 - Education Labs (können für Schulgruppen gebucht werden)
 - Science Shows in Englisch & Französisch (ohne Anmeldung)
- ▶ Visit Points auf dem CERN Gelände (9 Monate vorab buchbar)
- ▶ Kostenfrei
- ▶ Deutschsprachige Guides möglich





CERN Science Gateway

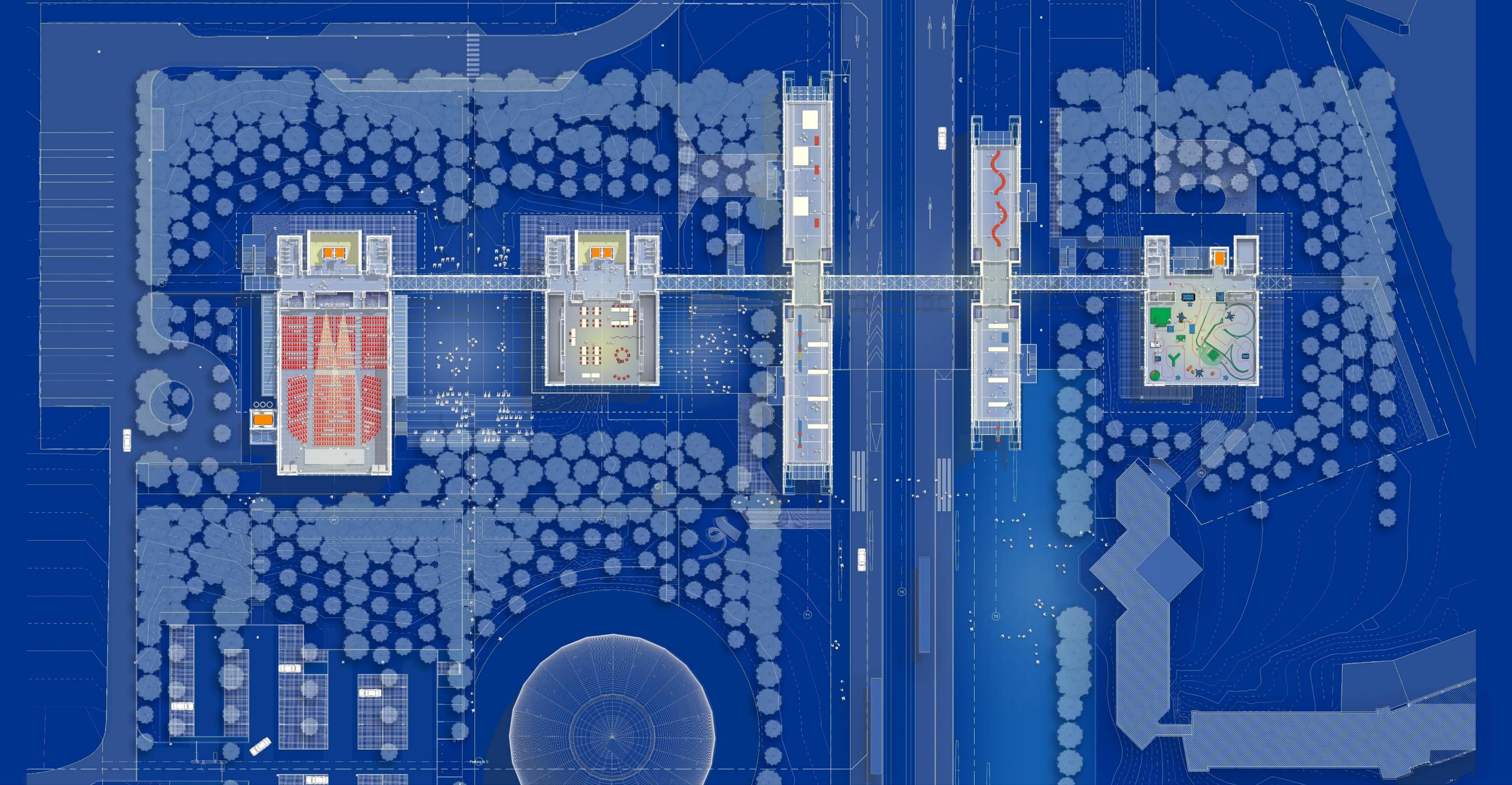




CERN Science Gateway

The making of a dream: CERN Science Gateway

Education • CERN





Jetzt:

Detektoren & Eventdisplays

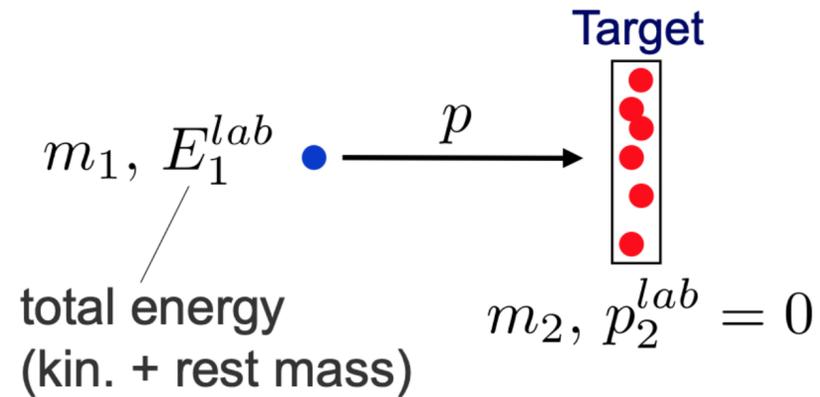


Backup



Fixed-Target vs. Collider

Fixed-target experiment:



$$\begin{aligned}
 s &= \left[\begin{pmatrix} E_1^{lab} \\ \vec{p}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_2 \\ \vec{0} \end{pmatrix} \right]^2 \\
 &= E_1^{lab\ 2} + 2E_1^{lab}m_2 + m_2^2 - p_1^2 \\
 &= m_1^2 + m_2^2 + 2E_1^{lab}m_2
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \sqrt{s}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2E_1^{lab}m_2} \\
 &\stackrel{E_1^{lab} \gg m_1, m_2}{\approx} \sqrt{2E_1^{lab}m_2}
 \end{aligned}$$

Example: Anti proton production

(fixed-target experiment): $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$

Minimum energy required to produce an anti-proton:

In CMS, all particles at rest after the reaction, i.e., $\sqrt{s} = 4 m_p$, hence:

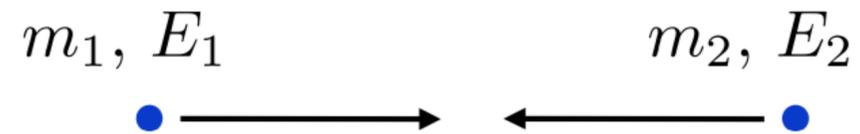
$$4m_p \stackrel{!}{=} \sqrt{2m_p^2 + 2E_1^{lab, \min} m_p} \Rightarrow E_1^{lab, \min} = \frac{(4m_p)^2 - 2m_p^2}{2m_p} = 7m_p$$



Fixed-Target vs . Collider

\sqrt{s} for Fixed-Target und Collider Experiments (II)

Collider:



$$\begin{aligned} s &= (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \\ &= m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2\vec{p}_1\vec{p}_2 \end{aligned}$$

for $\vec{p}_1 = -\vec{p}_2$ and $m_1 = m_2$: $\sqrt{s} = 2E$ where $E \equiv E_1 = E_2$