

# Die Physik der Beschleuniger



---

**Fachvortrag**

Moritz Springer

NETZWERK  
TEILCHENWELT



# Hallo & Willkommen

## Herzlich Willkommen zur Fortbildung

- **Idee & Ziele** dieses einführenden Vortrags
- Wenn vorab **Fragen** auftauchen, dann **notiere sie Dir**. Wir werden während der Fortbildung genug Zeit für Fragen haben.
- Wir freuen uns auf eine **lehrreiche** und **unterhaltsame** Fortbildung!

## Ablauf

### **Forschungsziele**

Wofür benötigen die Teilchenphysiker\*innen Beschleuniger?

### **Physik der Beschleuniger**

Wie werden Teilchen beschleunigt?

### **Beschleunigerarten**

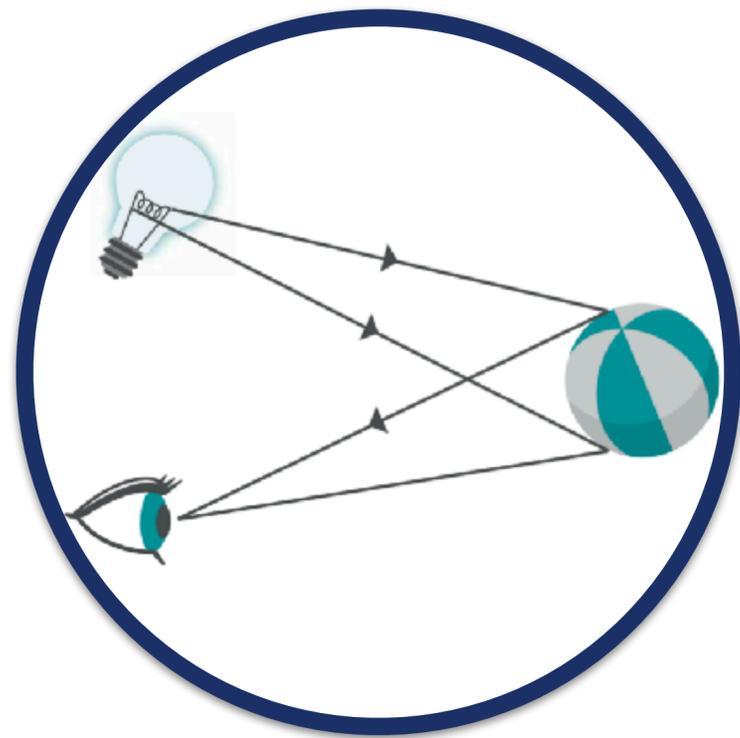
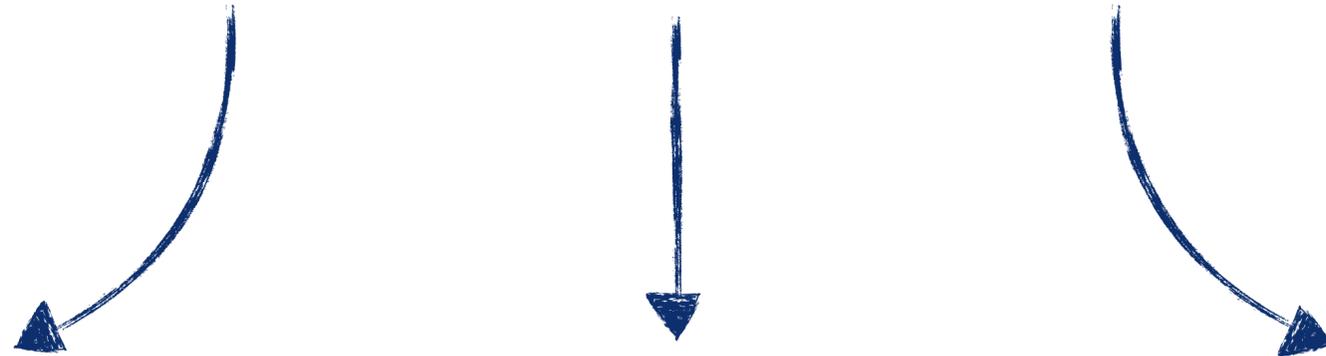
Linear- und Kreisbeschleuniger

### **LHC Game**

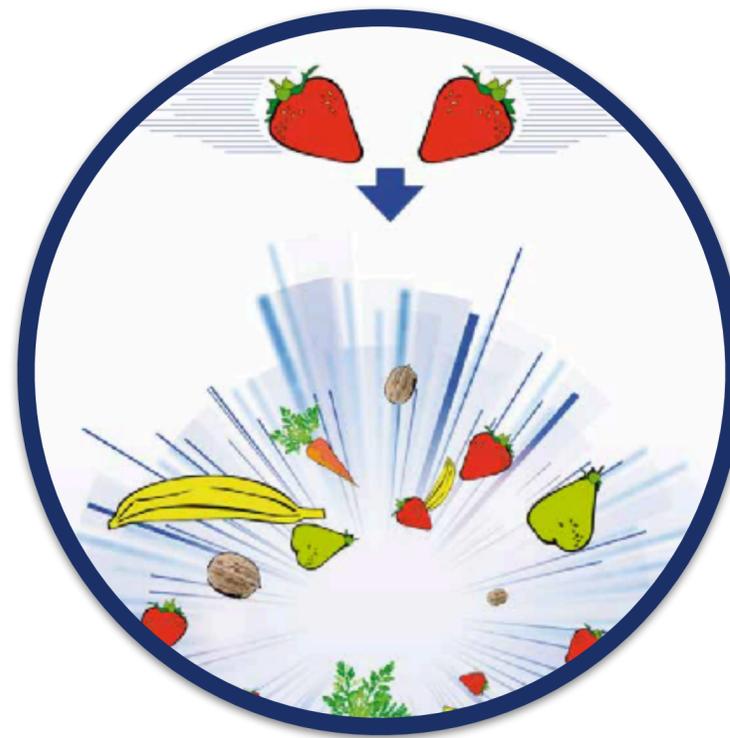
Interaktives Browser-Spiel

# Forschungsziele

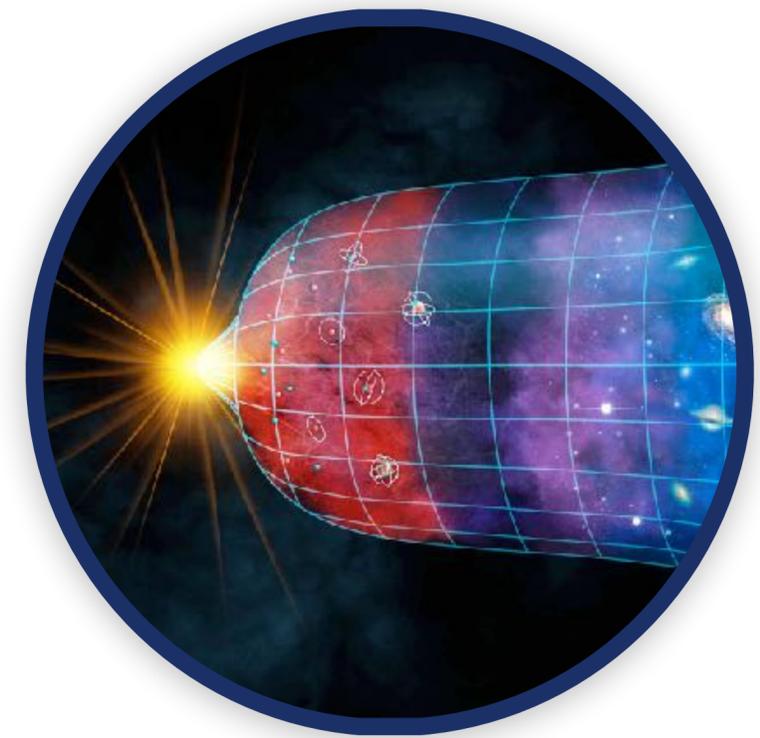
Wofür benötigen die Teilchenphysiker\*innen Beschleuniger?



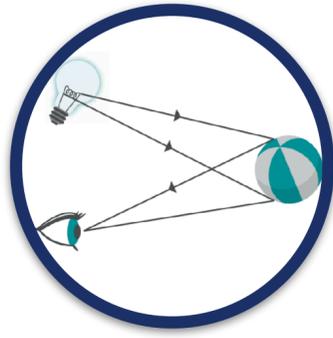
Strukturuntersuchungen



Erzeugung neuer Teilchen



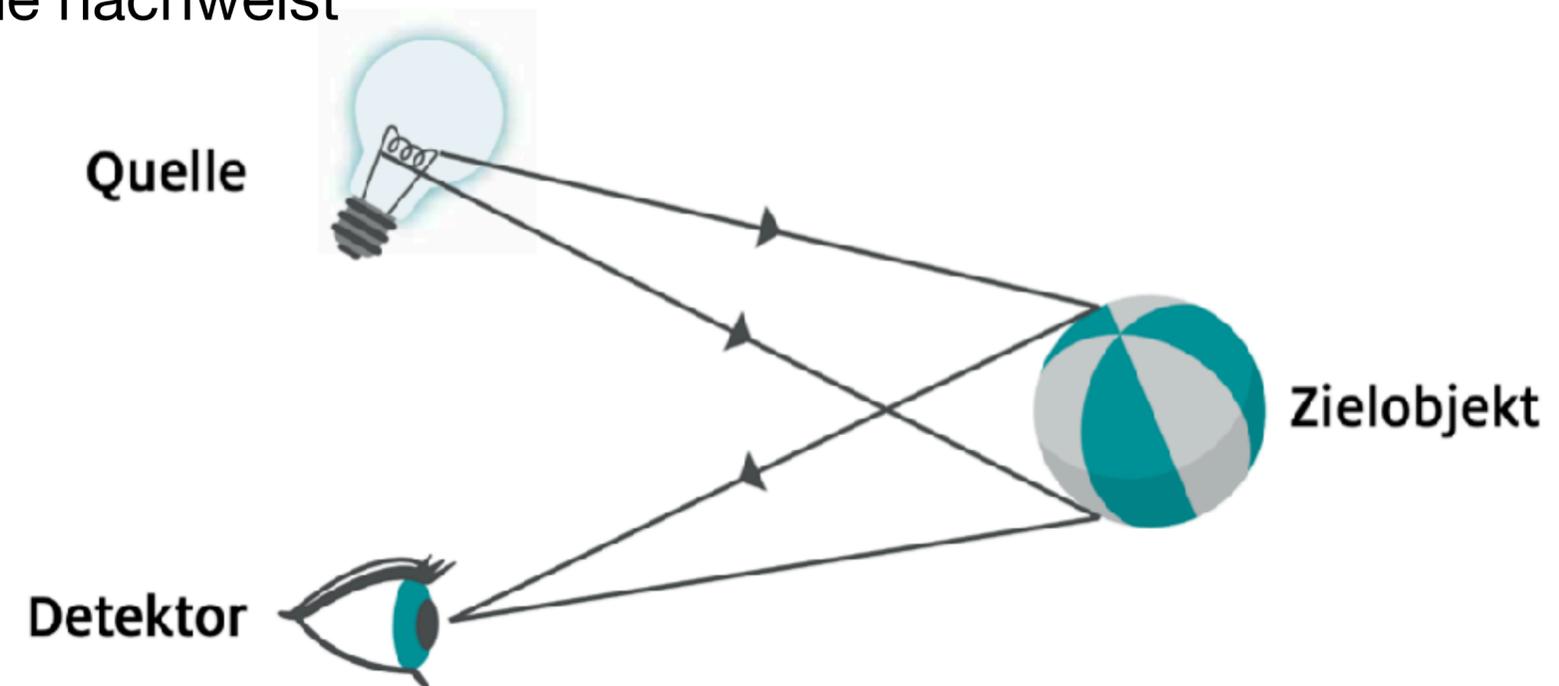
Erzeugung extremer  
Bedingungen

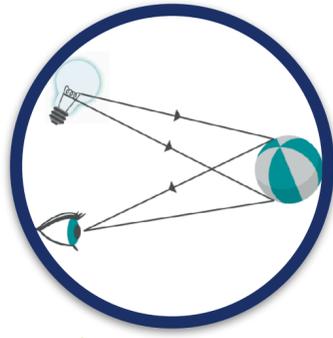


# Strukturuntersuchungen

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)



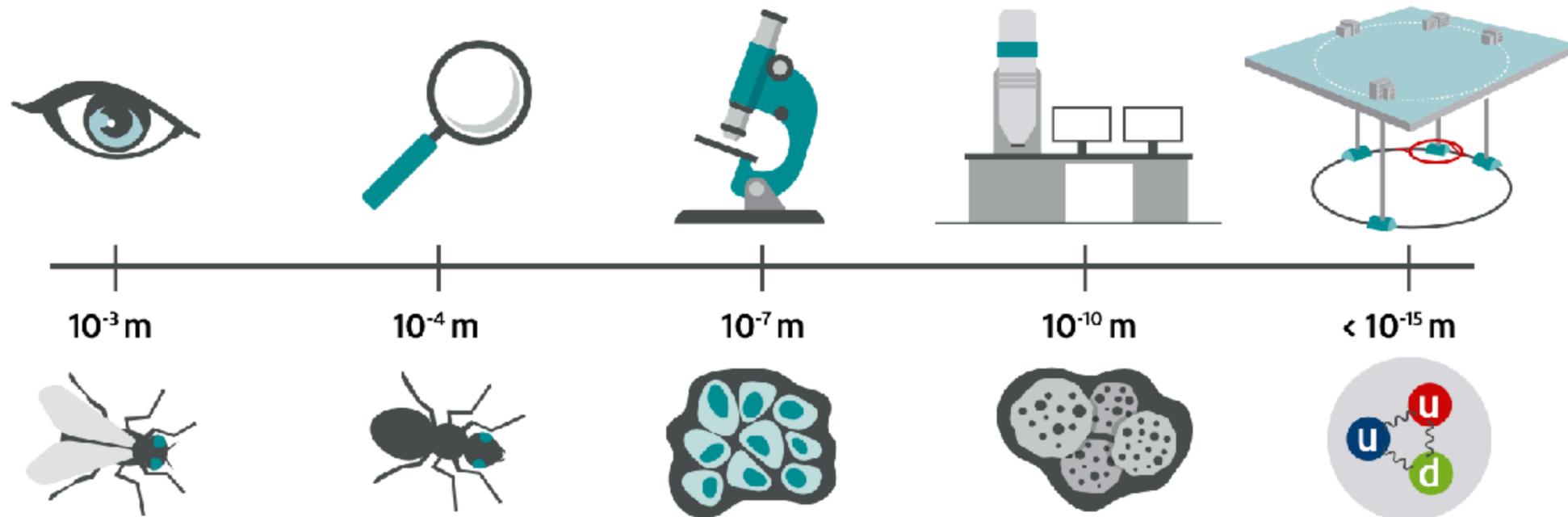


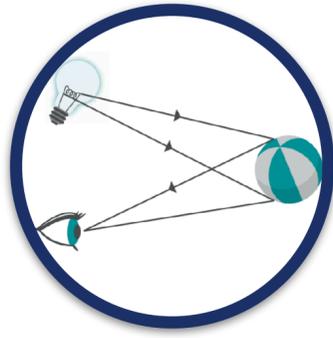
# Strukturuntersuchungen

- ▶ 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  $\lambda$
- ▶ 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?





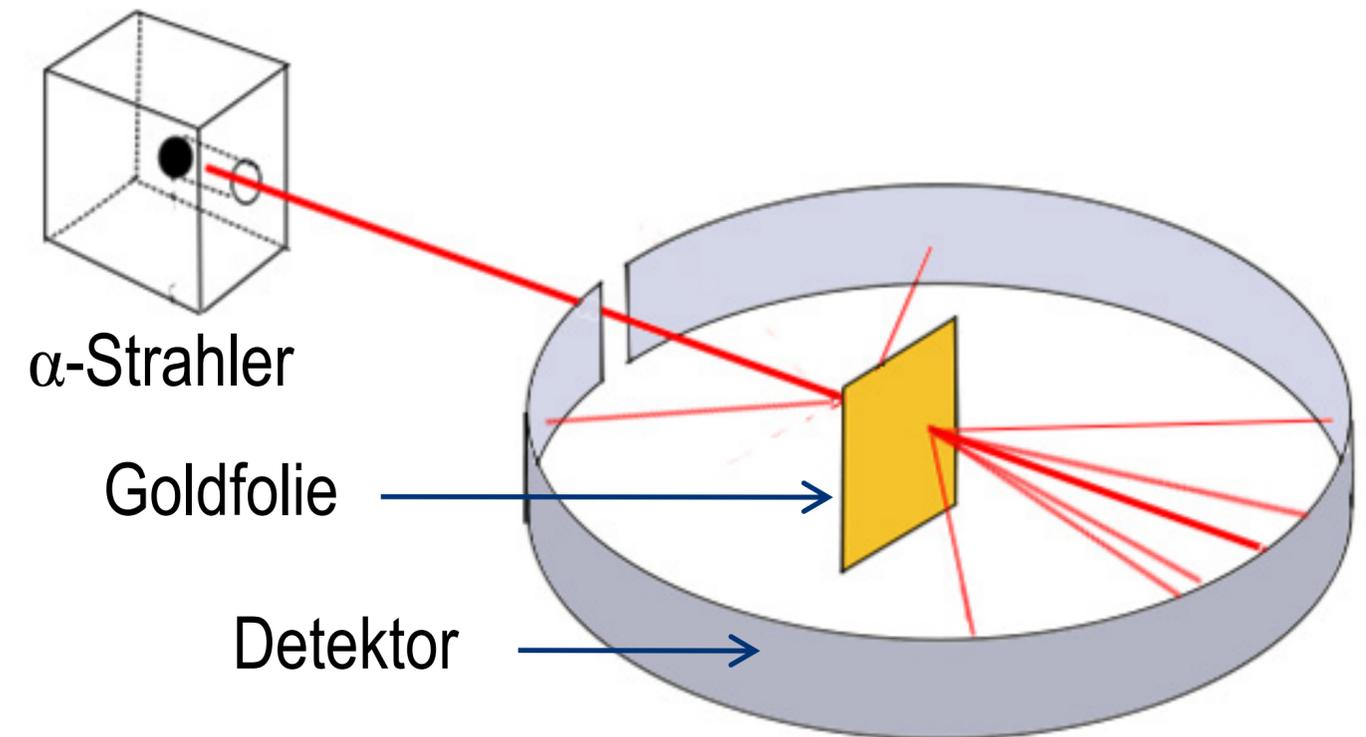
# Strukturuntersuchungen

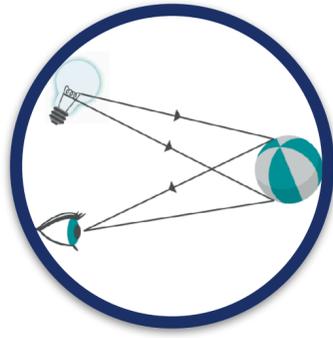
- ▶ Rutherford-Streuexperiment (1911)
- ▶ Streuung von  $\alpha$ -Teilchen an Goldatomen
- ▶ Energie des  $\alpha$ -Teilchen einige MeV

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

- ▶ 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.

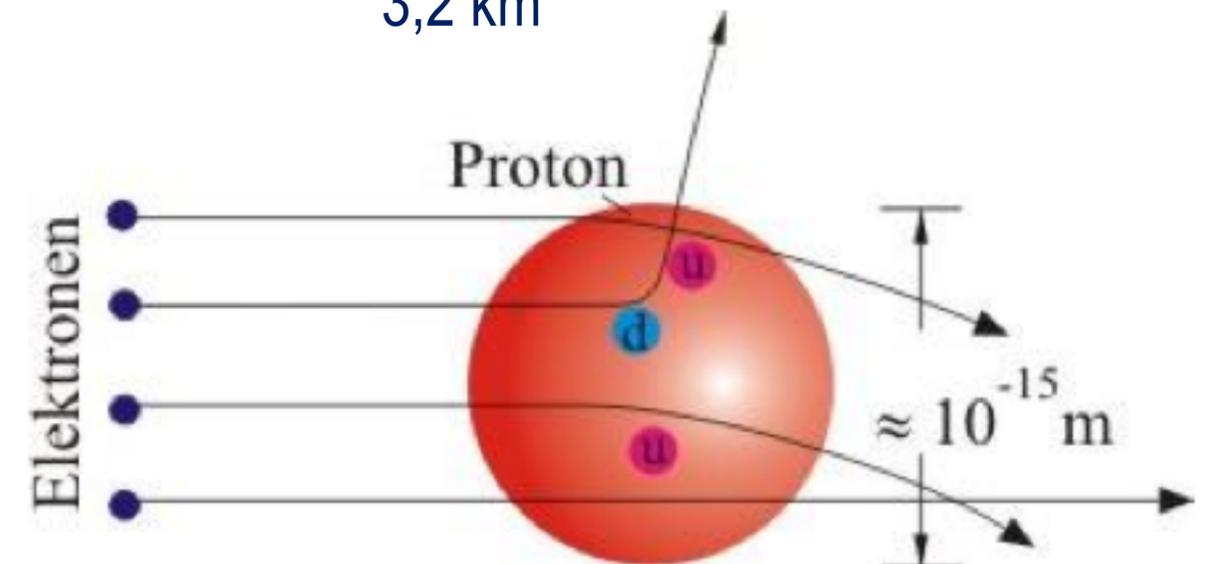
- ▶ Streuung von Elektronen an Protonen
- ▶ Elektronen Energie bis zu 50 GeV

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

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

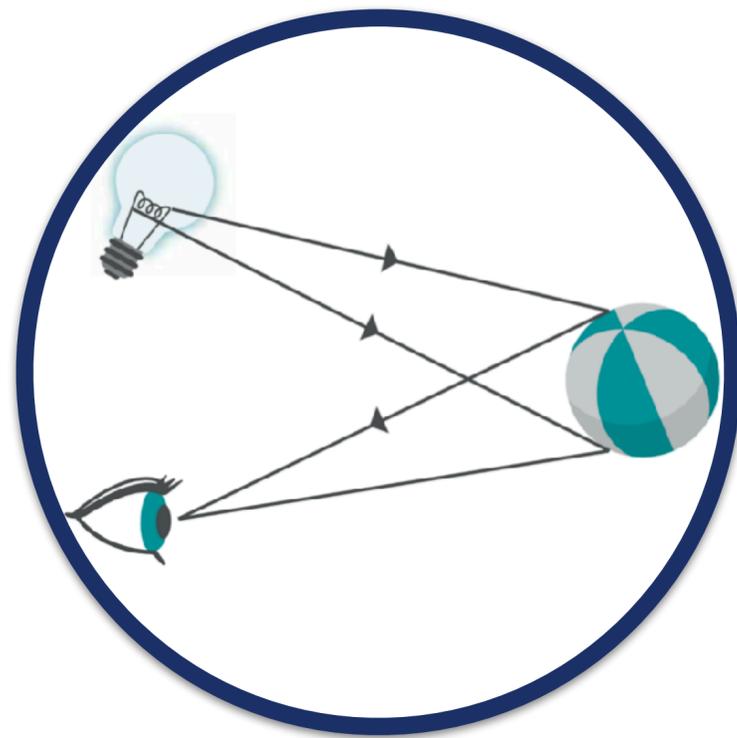
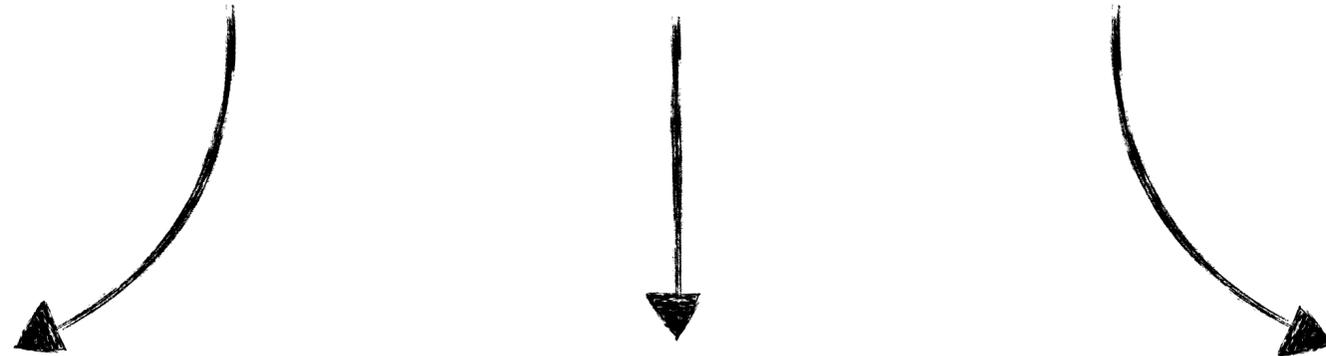


← 3,2 km →

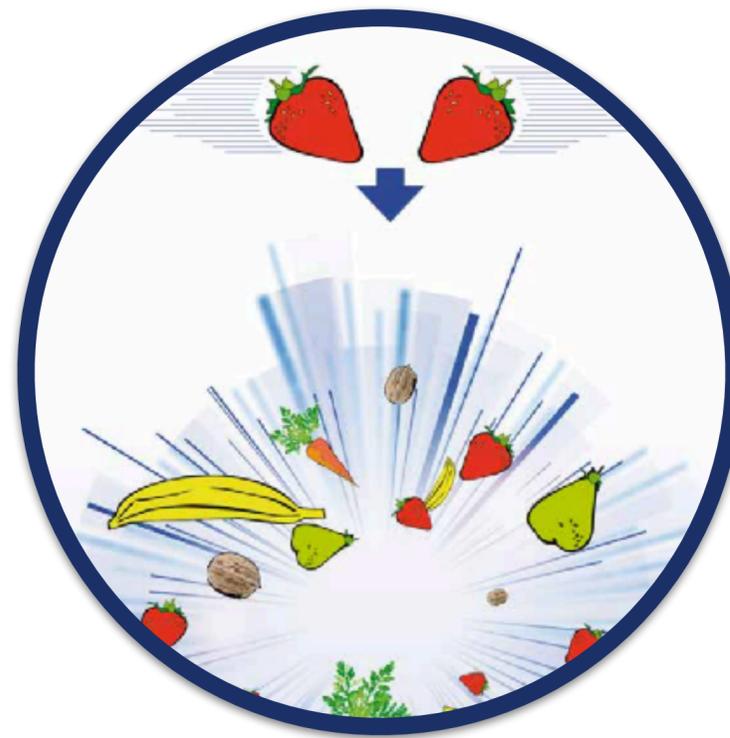


# Forschungsziele

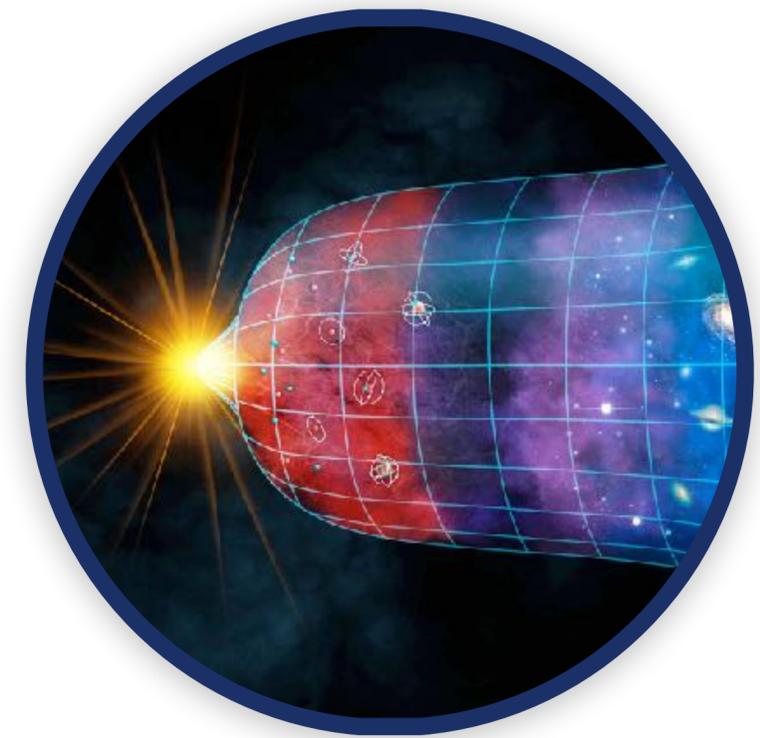
Wofür benötigen die Teilchenphysiker\*innen Beschleuniger?



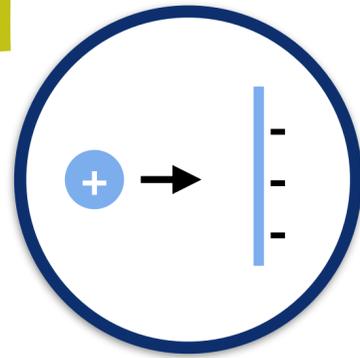
Strukturuntersuchungen



Erzeugung neuer Teilchen



Erzeugung extremer  
Bedingungen

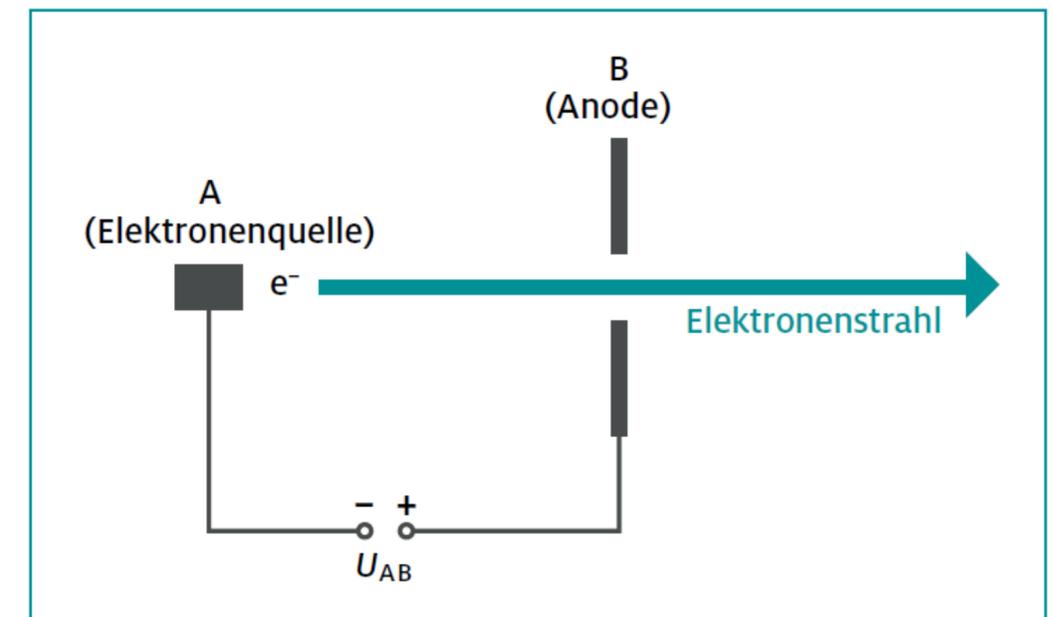
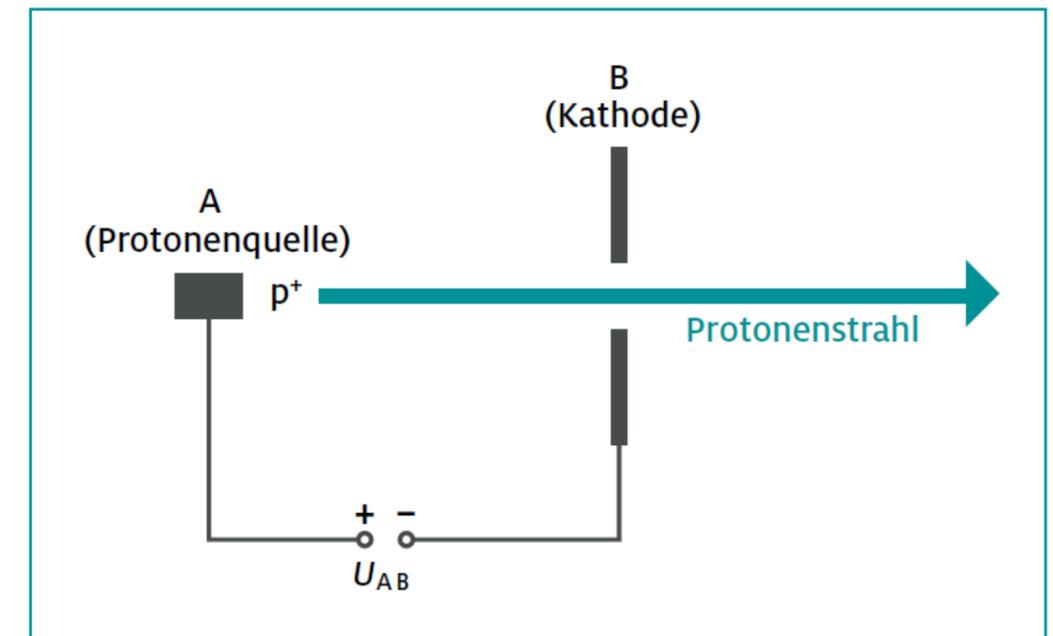


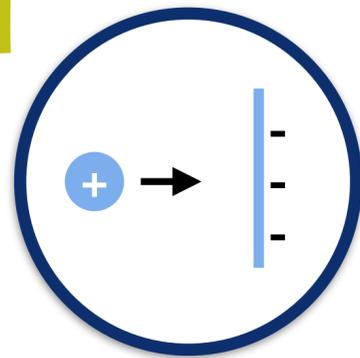
# Physik der Beschleuniger

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

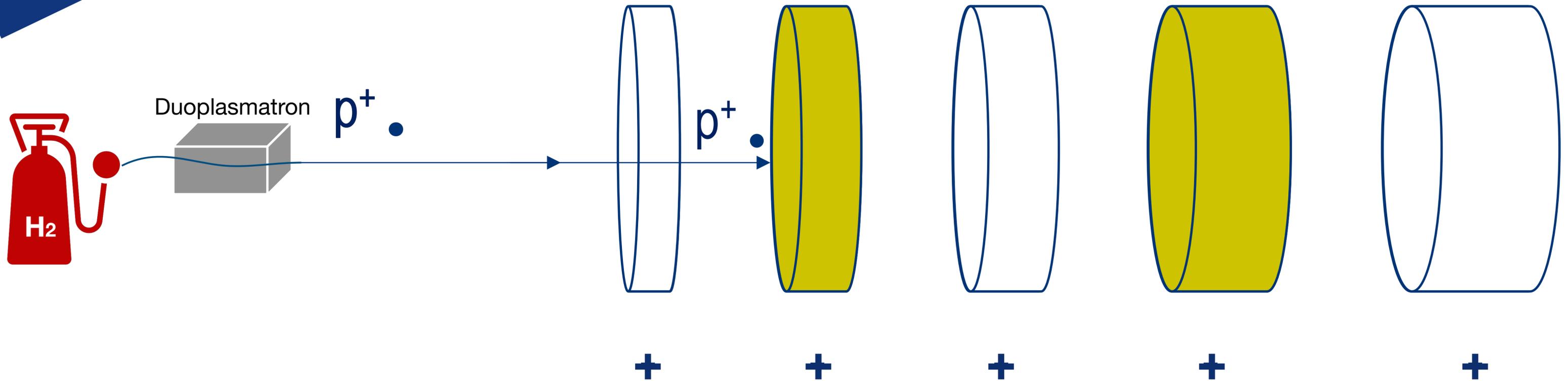




# Physik der Beschleuniger

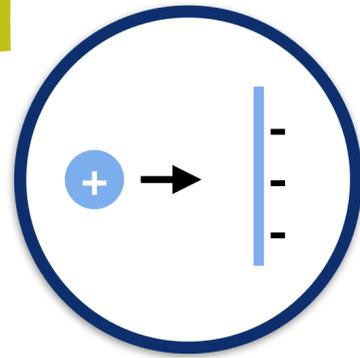
Wie werden die Teilchen beschleunigt?

- 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

LHC-Game später ;-)



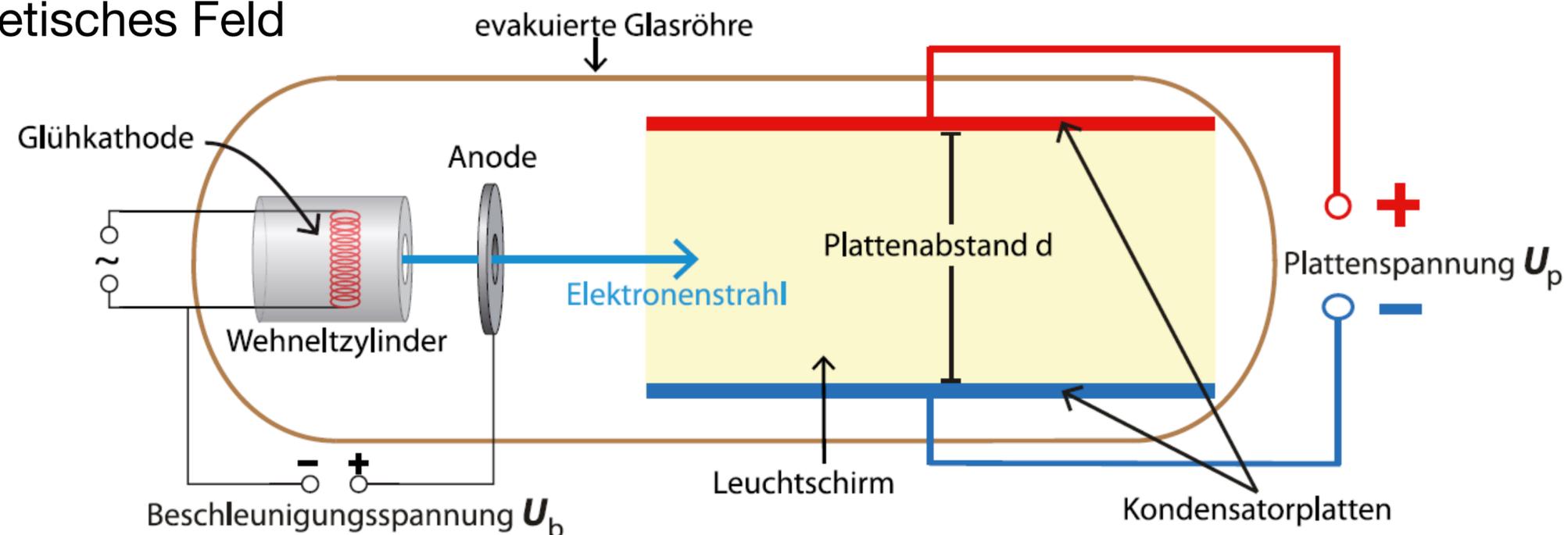
# Physik der Beschleuniger

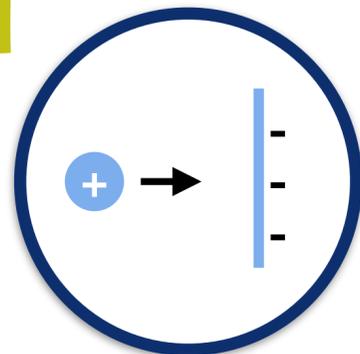
Wie werden die Teilchen beschleunigt?

## ► 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

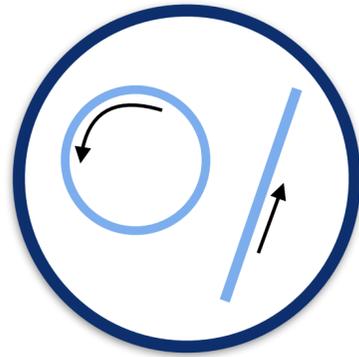
Wie werden die Teilchen beschleunigt?

- ▶ 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...



@eurozahler





# Beschleunigerarten

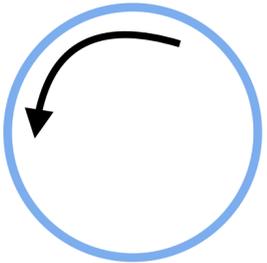
Linear- und Kreisbeschleuniger



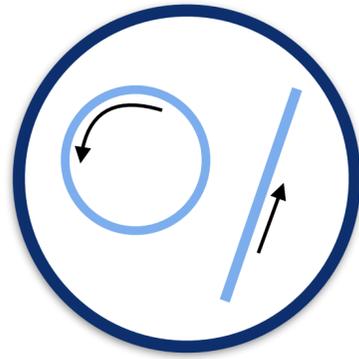
## ▶ Linearbeschleuniger

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

## ▶ Kreisbeschleuniger

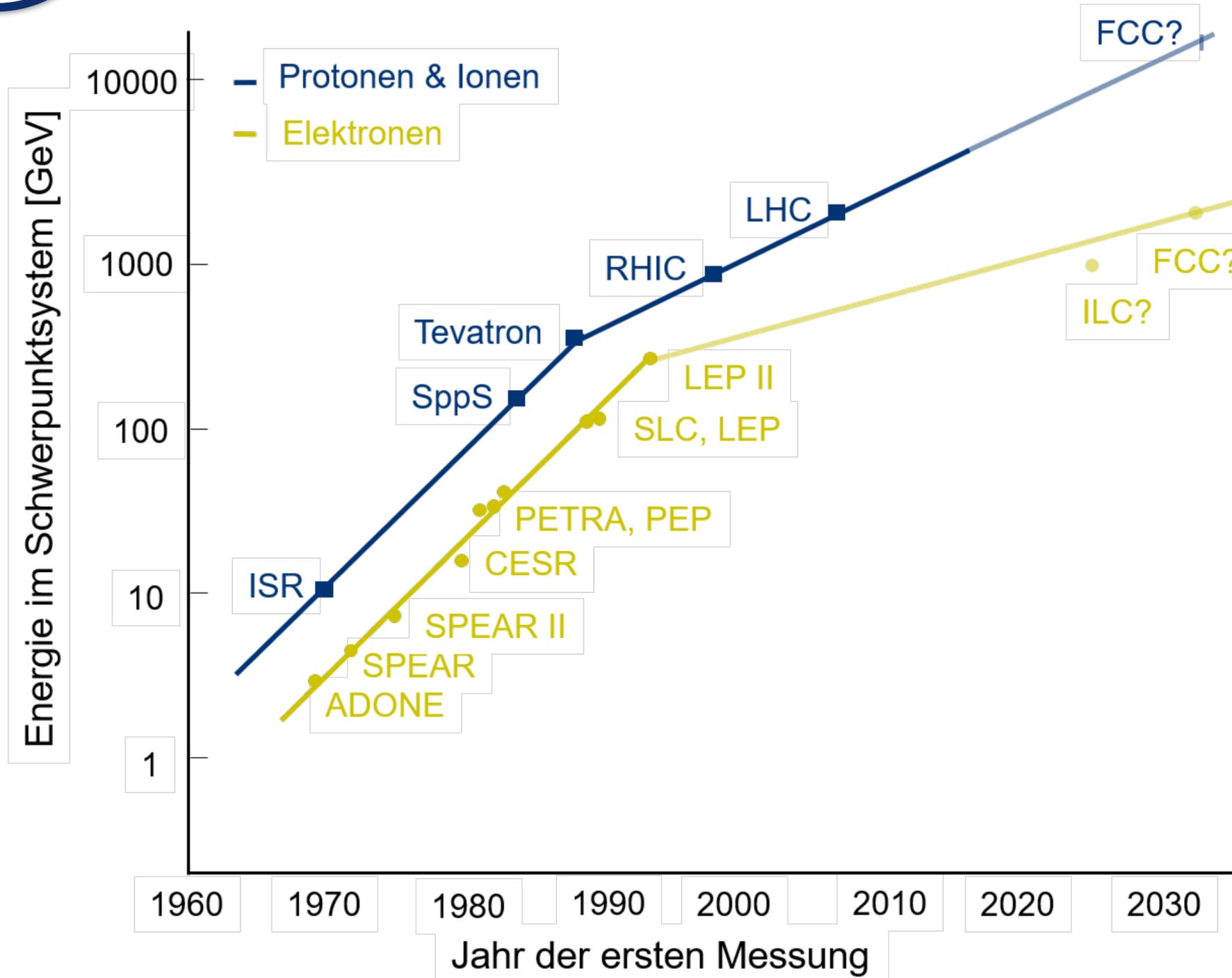
- 
- ▶ Elektrisch geladene Teilchen durchqueren elektrische Felder
  - ▶ Magnetische Felder zwingen Teilchen auf Kreisbahn
  - ▶ **Vorteile:**  
Mehrfaches Durchlaufen der elektrischen Felder
  - ▶ **Nachteile:**  
Hohe Magnetfeldstärken nötig

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



# Beschleunigerarten

Linear- und Kreisbeschleuniger



# Die Physik der Beschleuniger

Teil 2



---

**Fachvortrag**

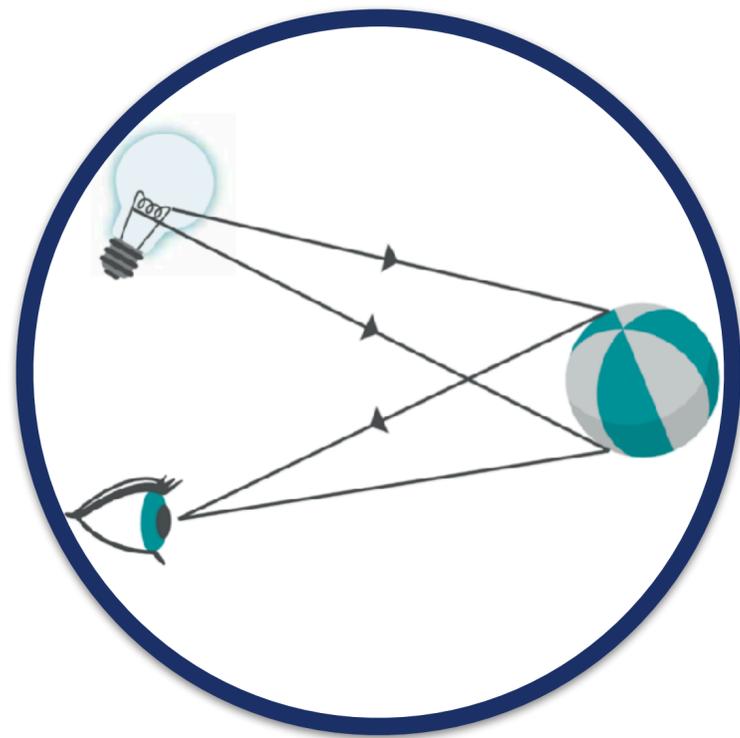
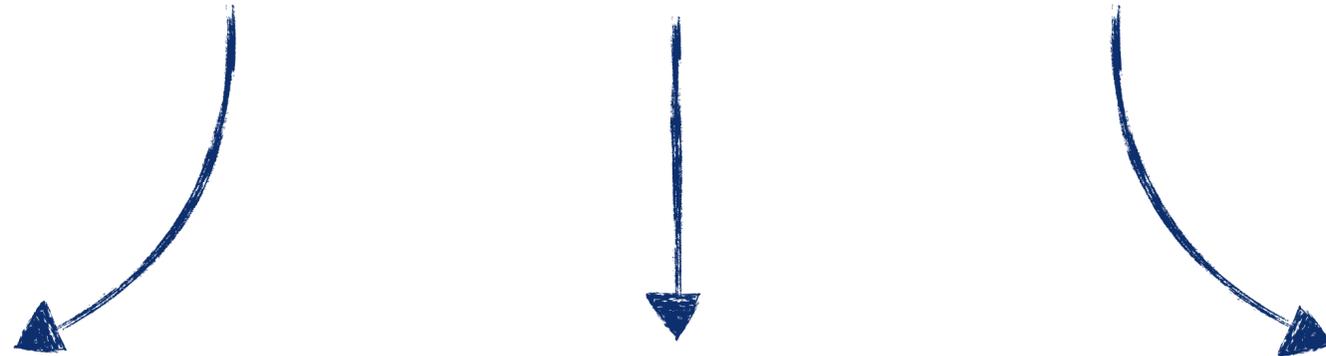
Moritz Springer

NETZWERK  
TEILCHENWELT

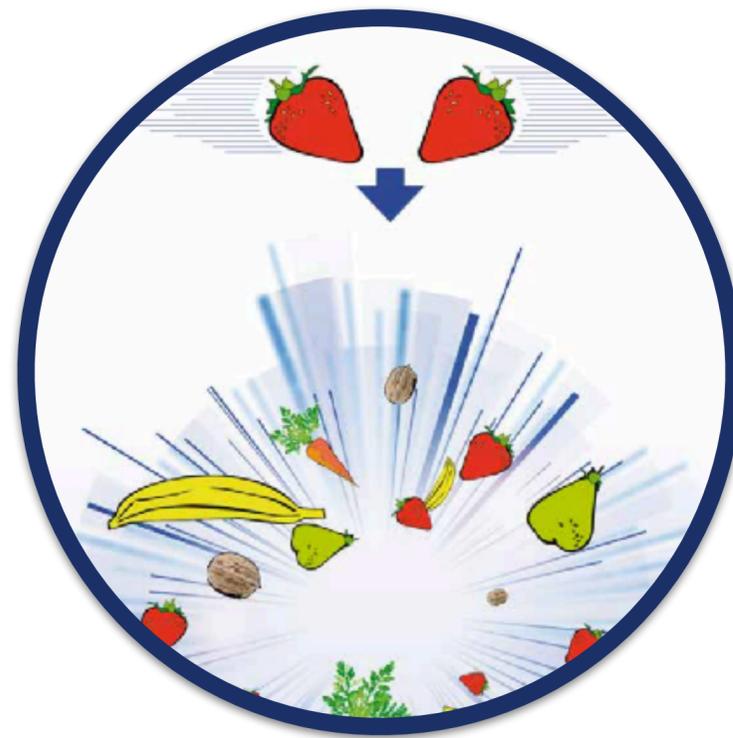


# Forschungsziele

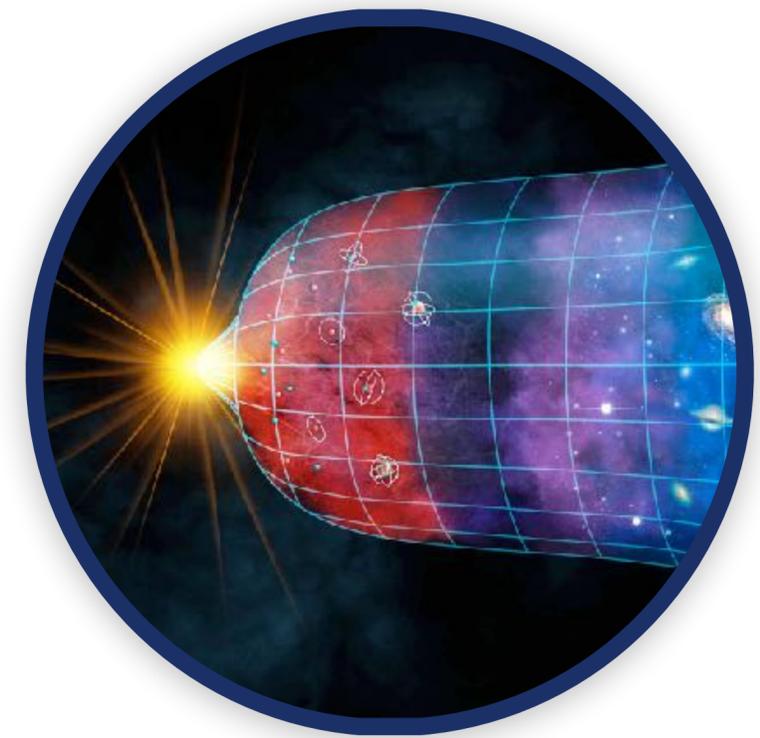
Wofür benötigen die Teilchenphysiker\*innen Beschleuniger?



**Strukturuntersuchungen**



**Erzeugung neuer Teilchen**



**Erzeugung extremer  
Bedingungen**



# Erzeugung „neuer“ Teilchen

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

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

- ▶ Energie im Schwerpunktsystem  $E_{cm} \approx 100 \text{ GeV}$

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

- ▶ Energie im Schwerpunktsystem  $E_{cm} \approx 7 \text{ GeV}$



Masse-  
Ruheenergie-  
Äquivalenz

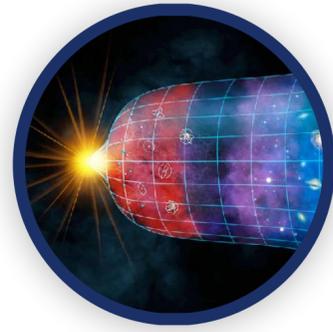
$$E=mc^2$$



# Erzeugung „neuer“ Teilchen

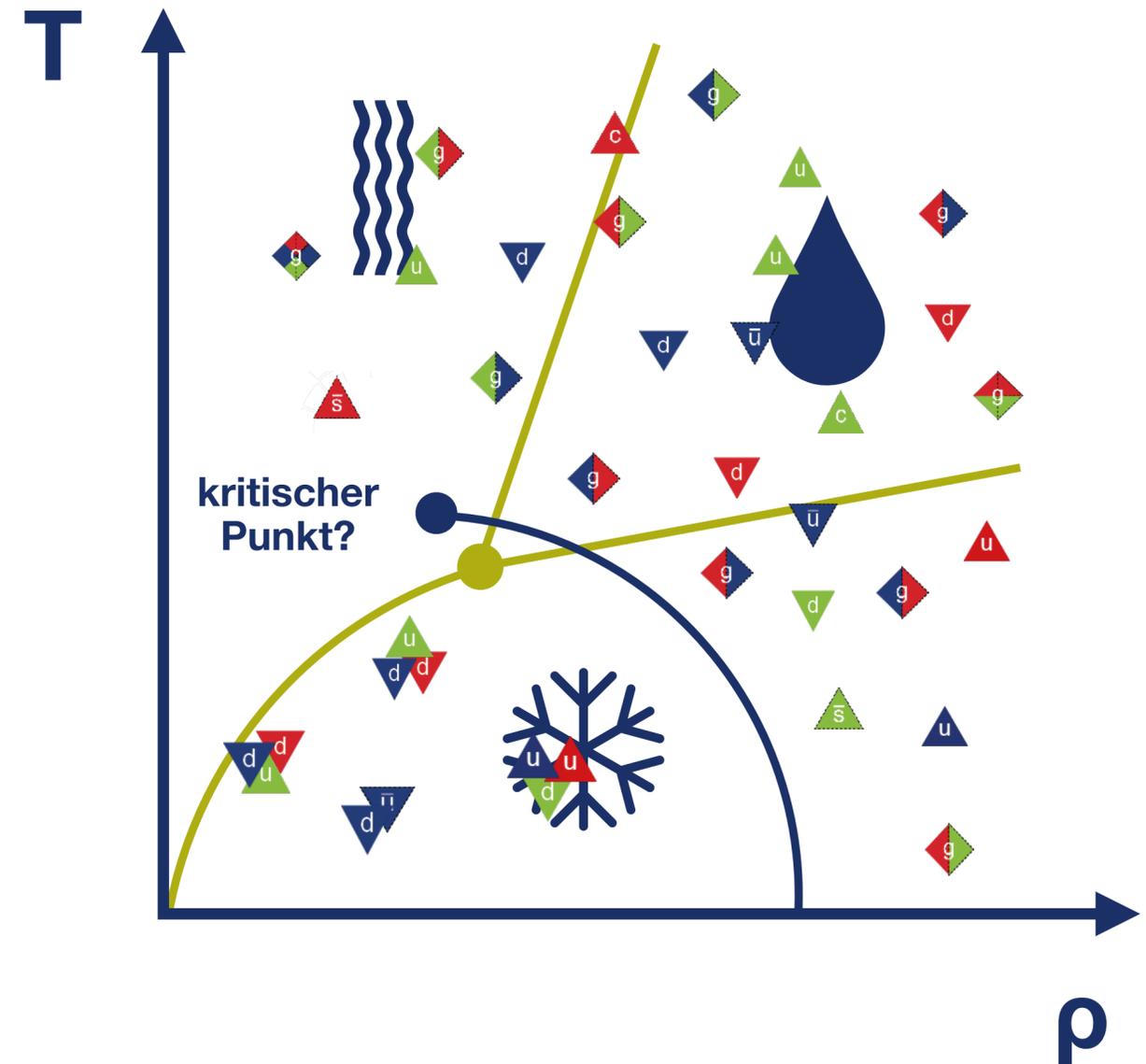
- ▶ Am Beispiel der Austauschpartikel der schwachen Wechselwirkung:  $W^\pm$ ,  $Z^0$
- ▶ **Massen vorhergesagt 1968**
  - ▶ Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam
  - ▶  $m_W = 77 \text{ GeV}$  |  $m_Z = 88 \text{ GeV}$
- ▶ Existierender Beschleuniger: SPS (CERN)
  - ▶ Protonenstrahl mit  $E_{kin} = 400 \text{ GeV}$  :-)
  - ▶ 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  $\sqrt{E_{kin}} \approx 540 \text{ GeV}$
  - ▶ **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)

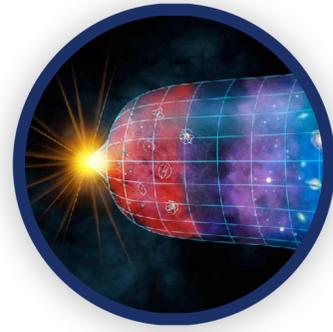




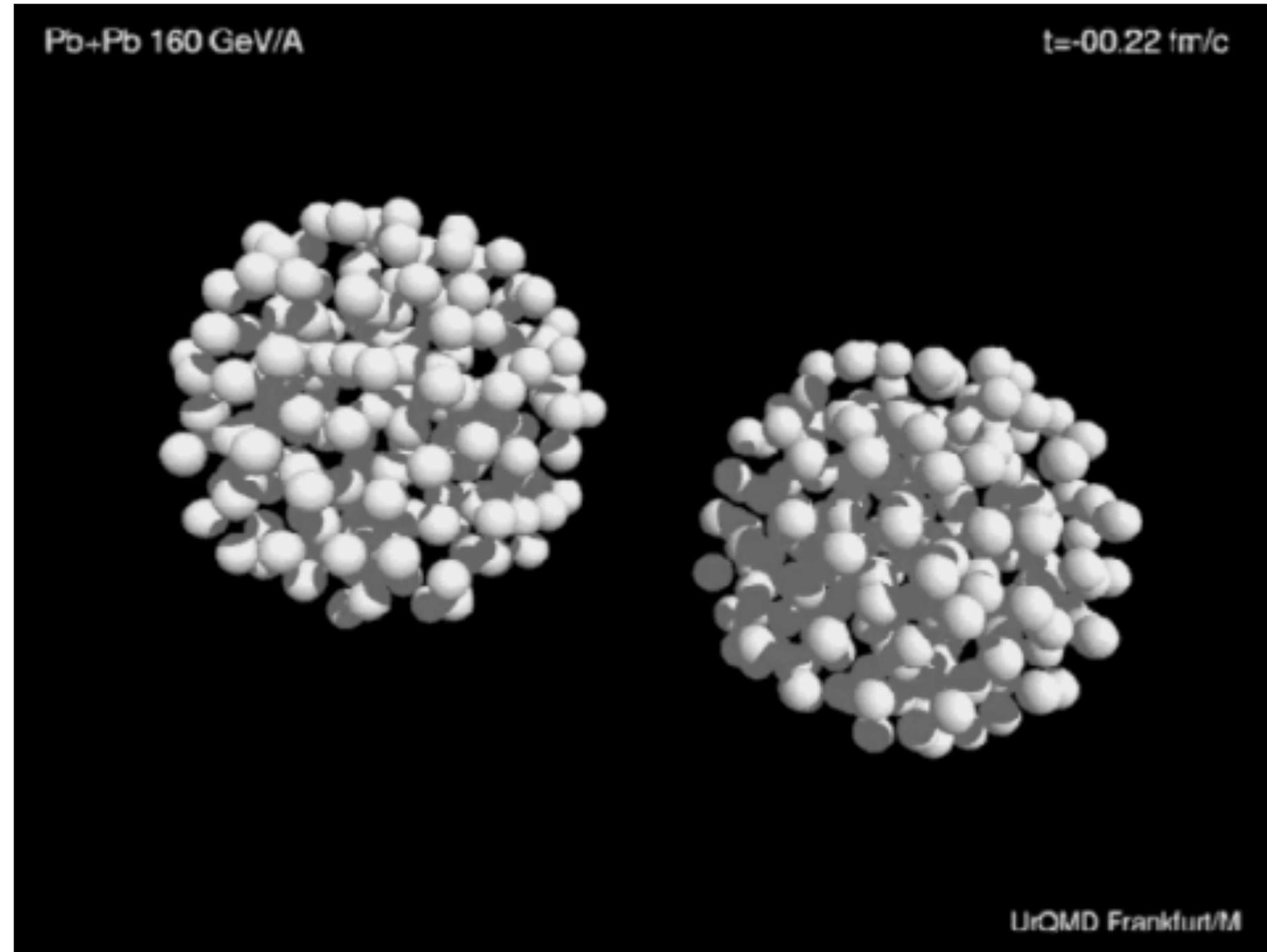
# Erzeugung extremer Bedingungen

- ▶ 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





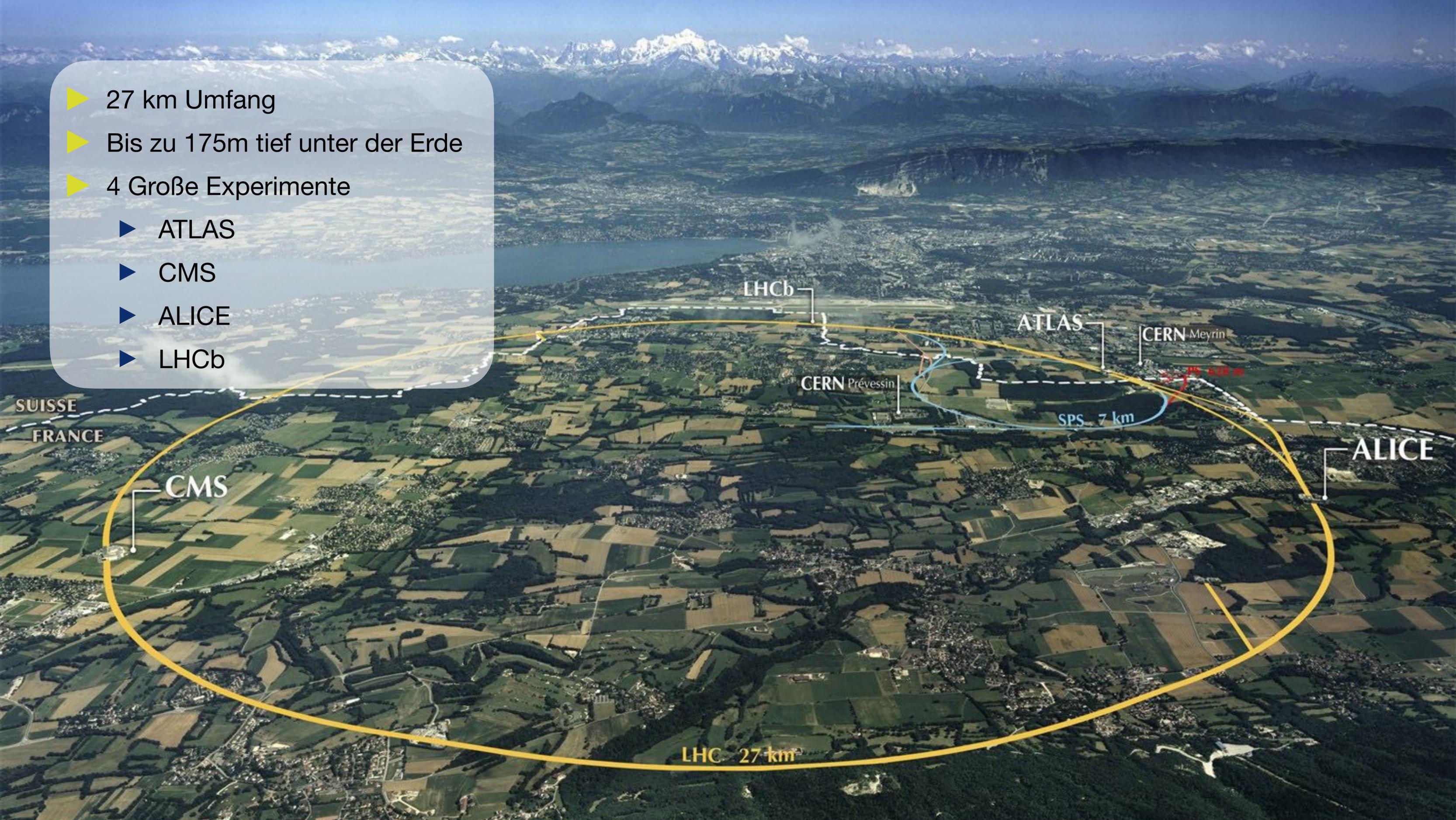
# Das CERN

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



LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

CERN Prévessin

SPS 7 km

SUISSE  
FRANCE

CMS

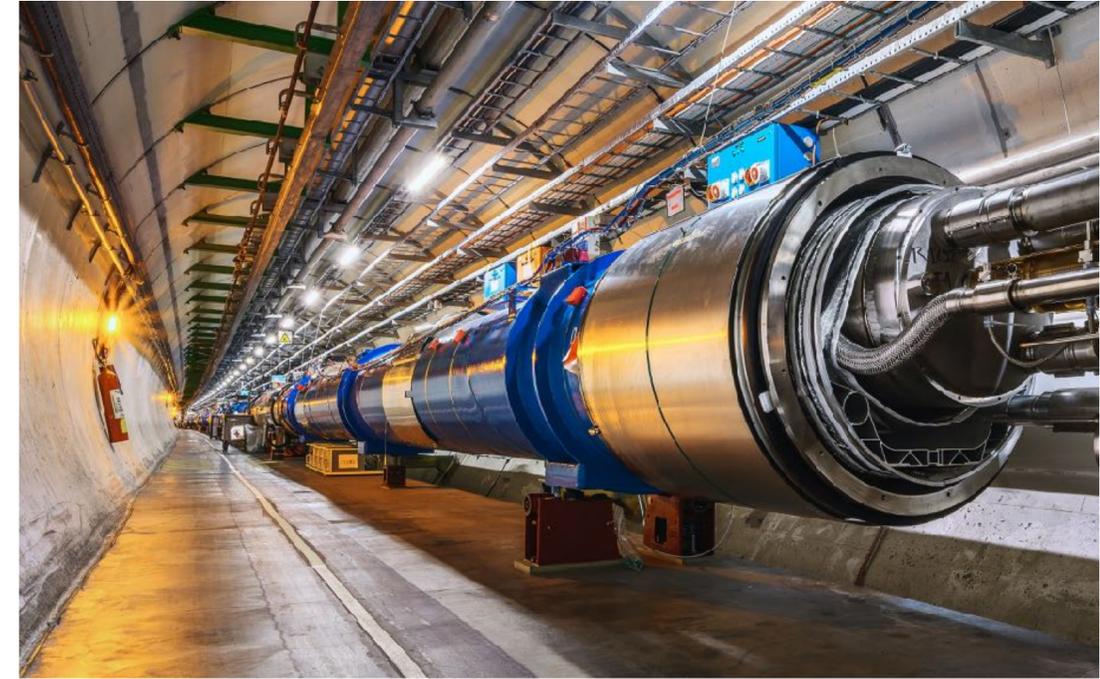
ALICE

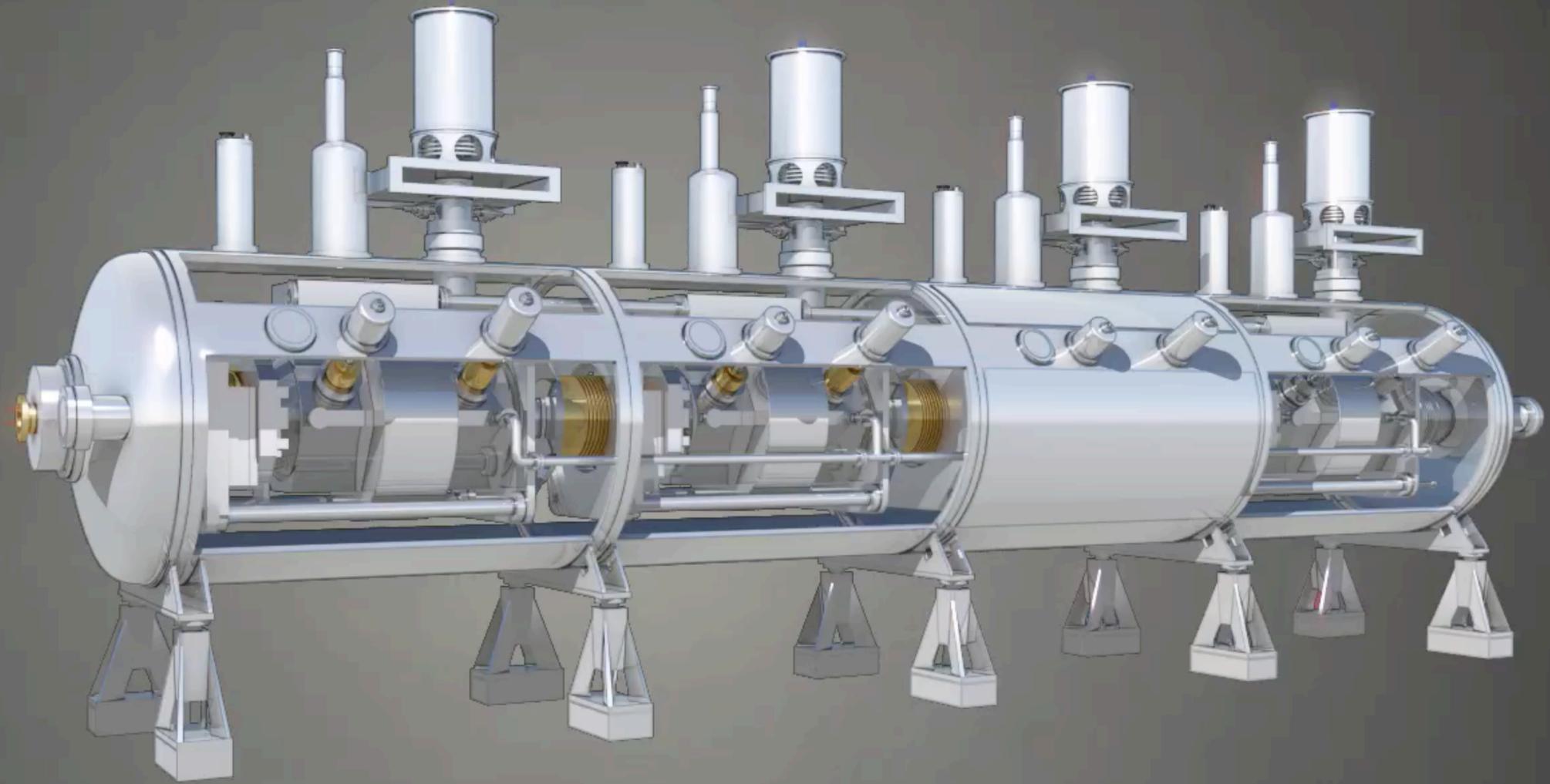
LHC 27 km



# Large Hadron Collider (LHC)

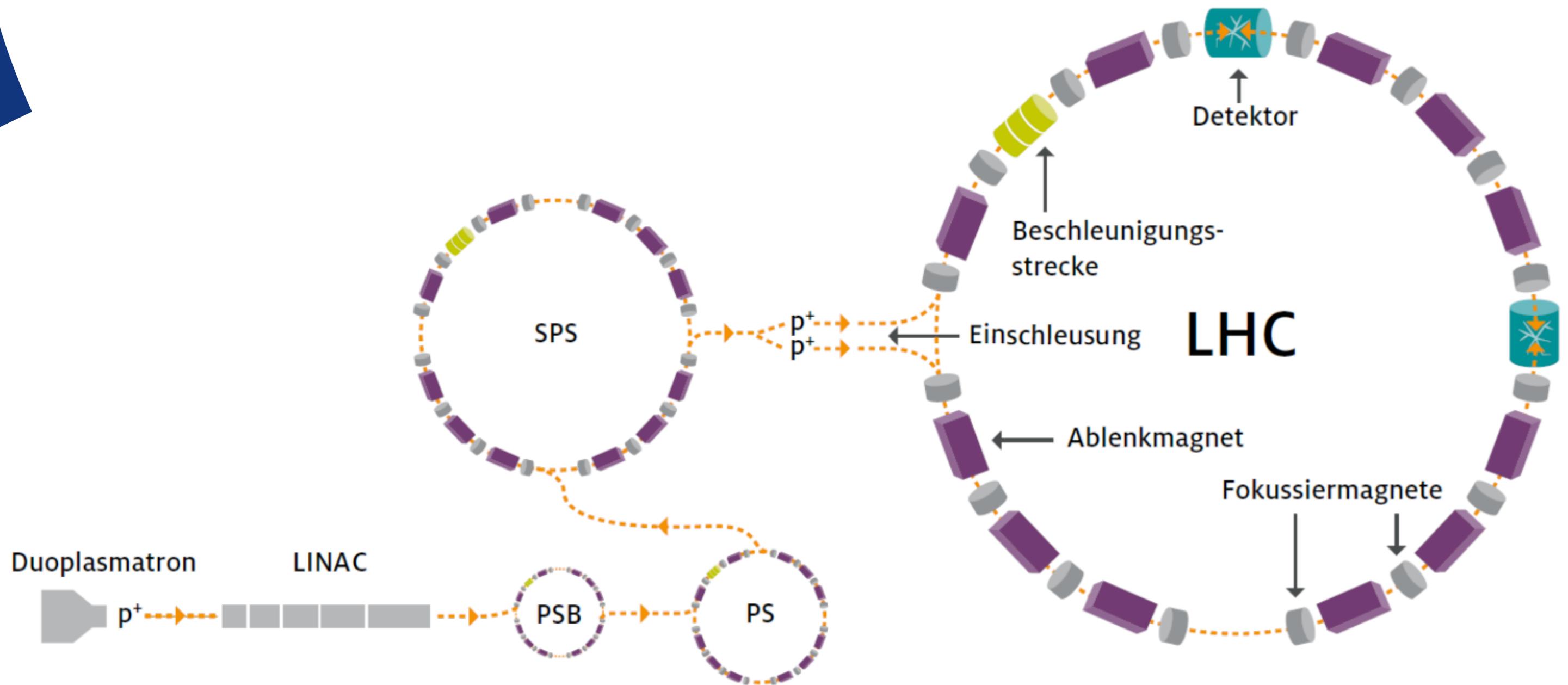
- ▶ Beschleunigung durch **16 supraleitende Hochfrequenz-Hohlraumresonatoren** (je 8 pro Strahlrohr)
- ▶ elektromagnetische stehende Welle bei der Resonanzfrequenz der Kavität
- ▶ LHC Kavitäten erreichen einen Beschleunigungsgradienten von bis zu 5,5 MV pro Meter
- ▶ Die Betriebsfrequenz liegt bei ca. 400 MHz







# Large Hadron Collider (LHC)



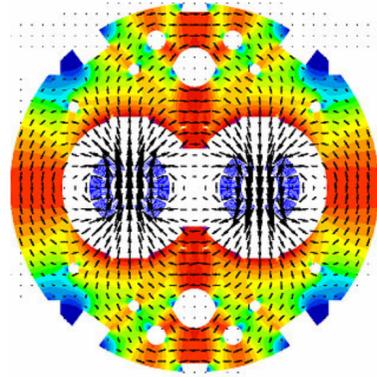
# Warum ist der LHC so groß?

▶ Tunnel war vorgegeben ( $r = 4,2 \text{ km}$ )

▶ Energie war vorgegeben (7 TeV pro Strahl)

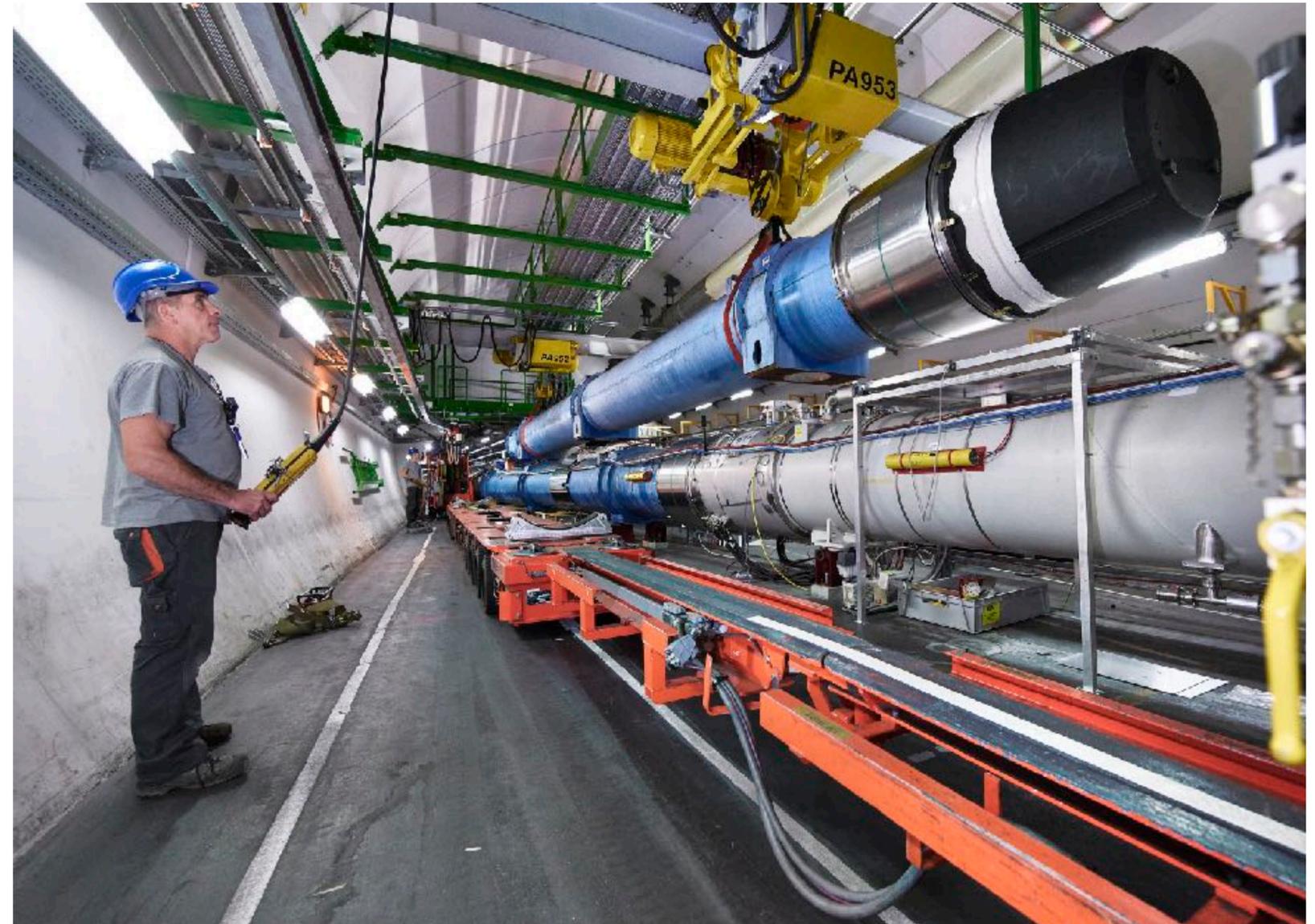
$$F_L = F_Z$$
$$\Leftrightarrow Q \cdot v \cdot B = \gamma \cdot m \cdot \frac{v^2}{r}$$
$$\Leftrightarrow B = \frac{p}{Q \cdot r} \underset{r=4,2\text{km}}{\approx} \underset{E_p=7\text{TeV}}{8} \text{ T}$$

▶ Magnetfeldstärken sind der limitierende Faktor also wird der Beschleuniger größer!



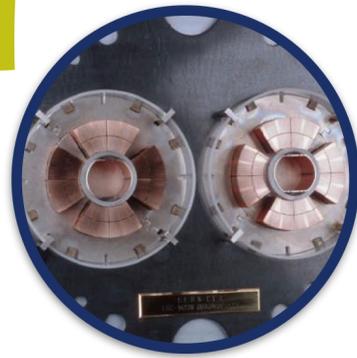
# LHC Dipol Magnete

- ▶ **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!



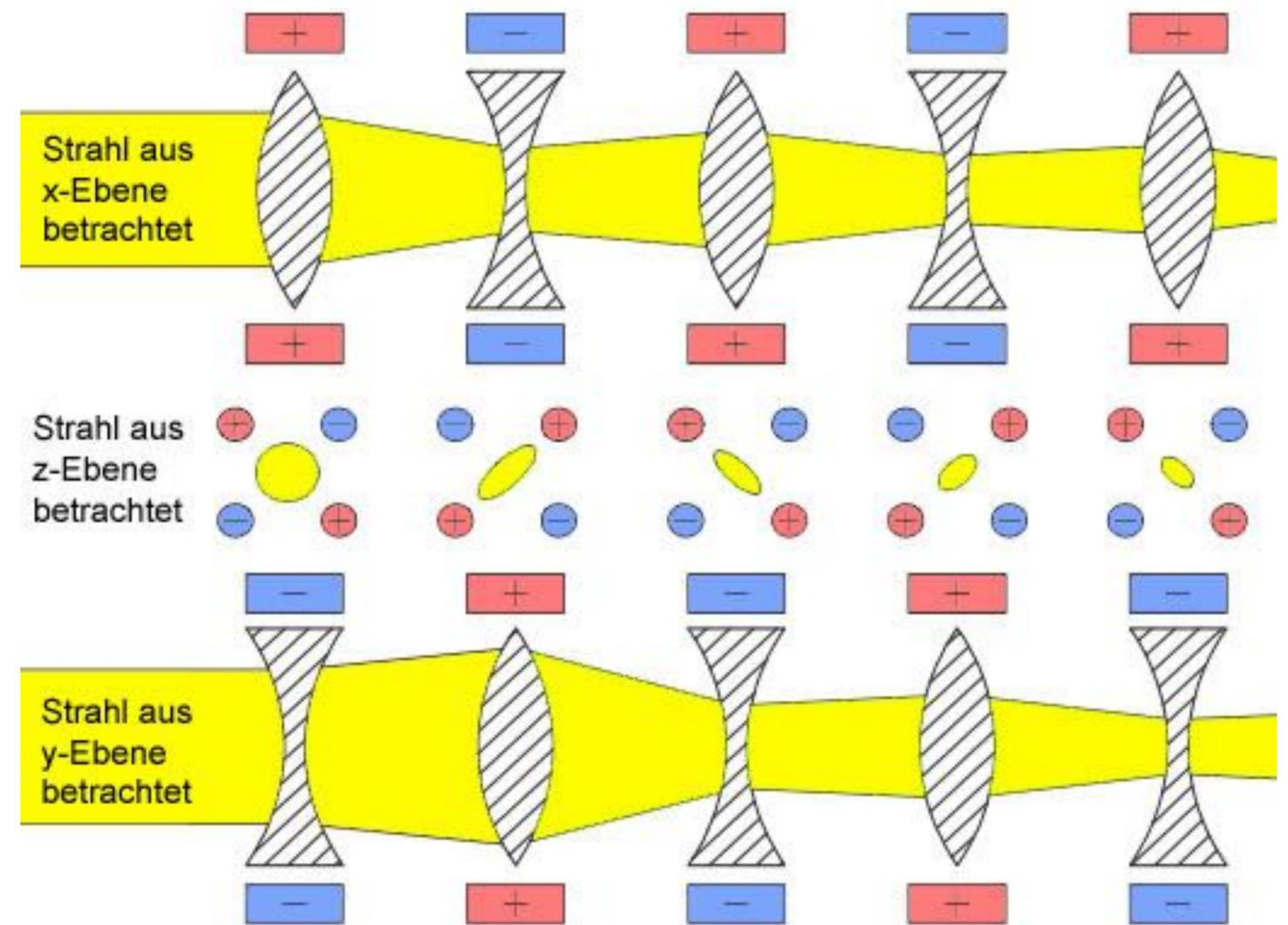
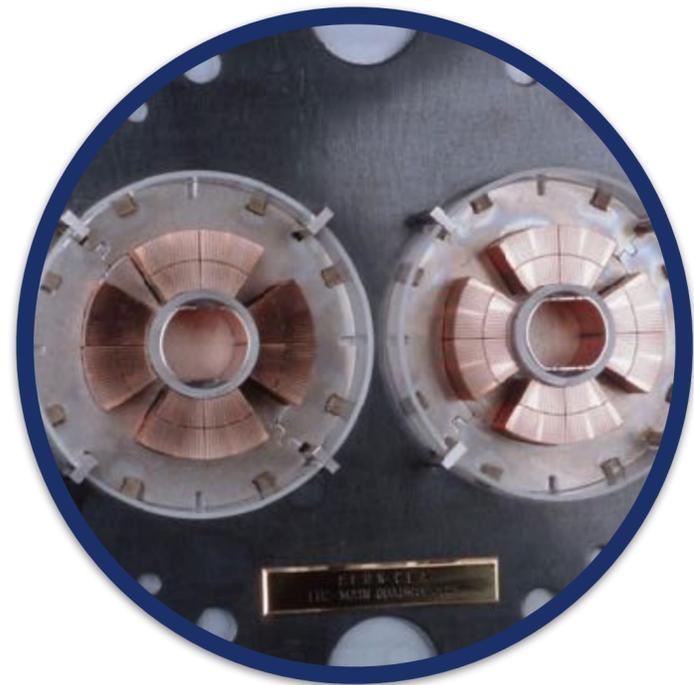
0,1 Tesla





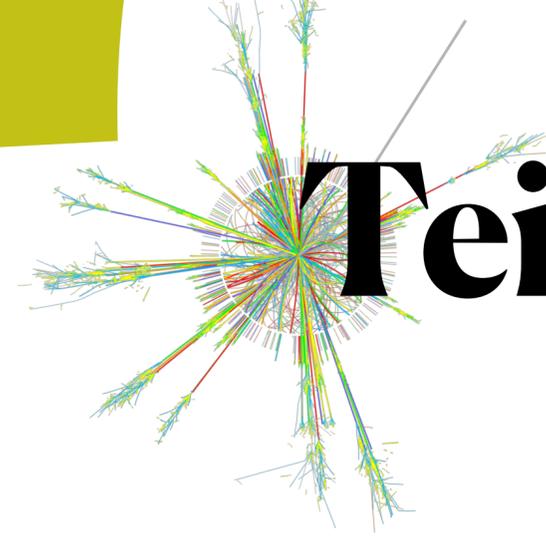
# LHC Quadrupol Magnete

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



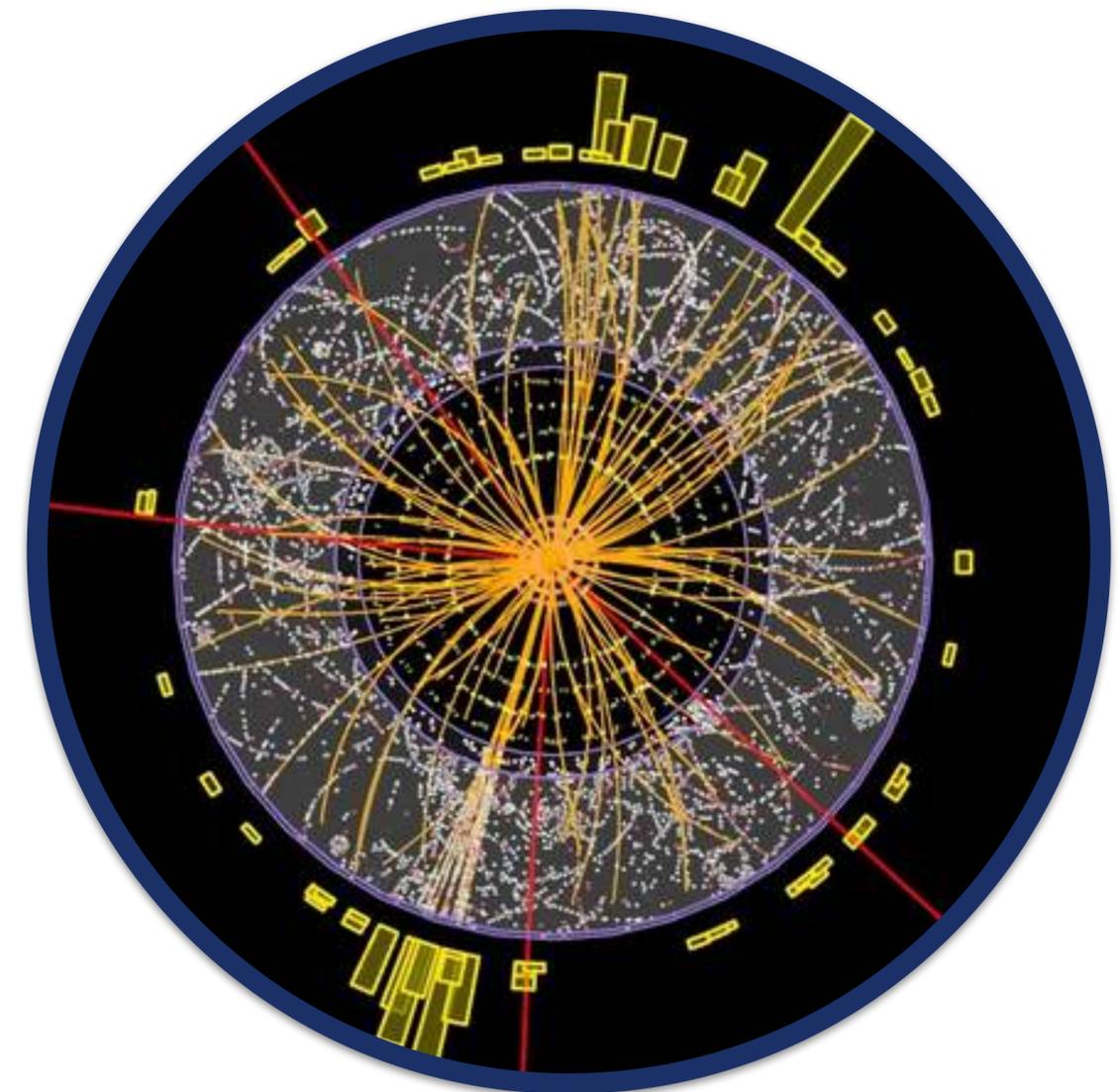


CMS  
Compact Muon Solenoid  
Solénoïde compact pour muons



# 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



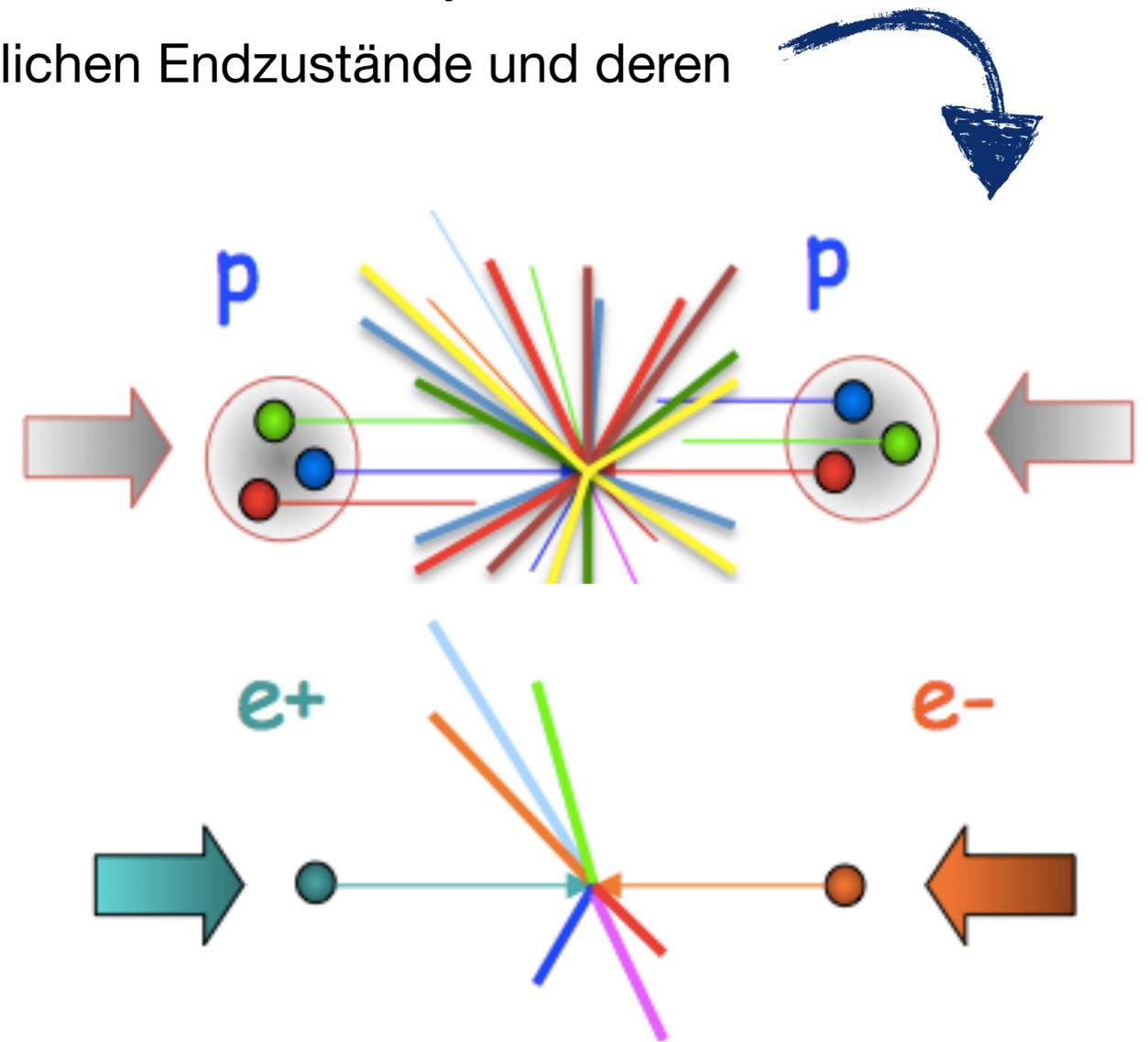
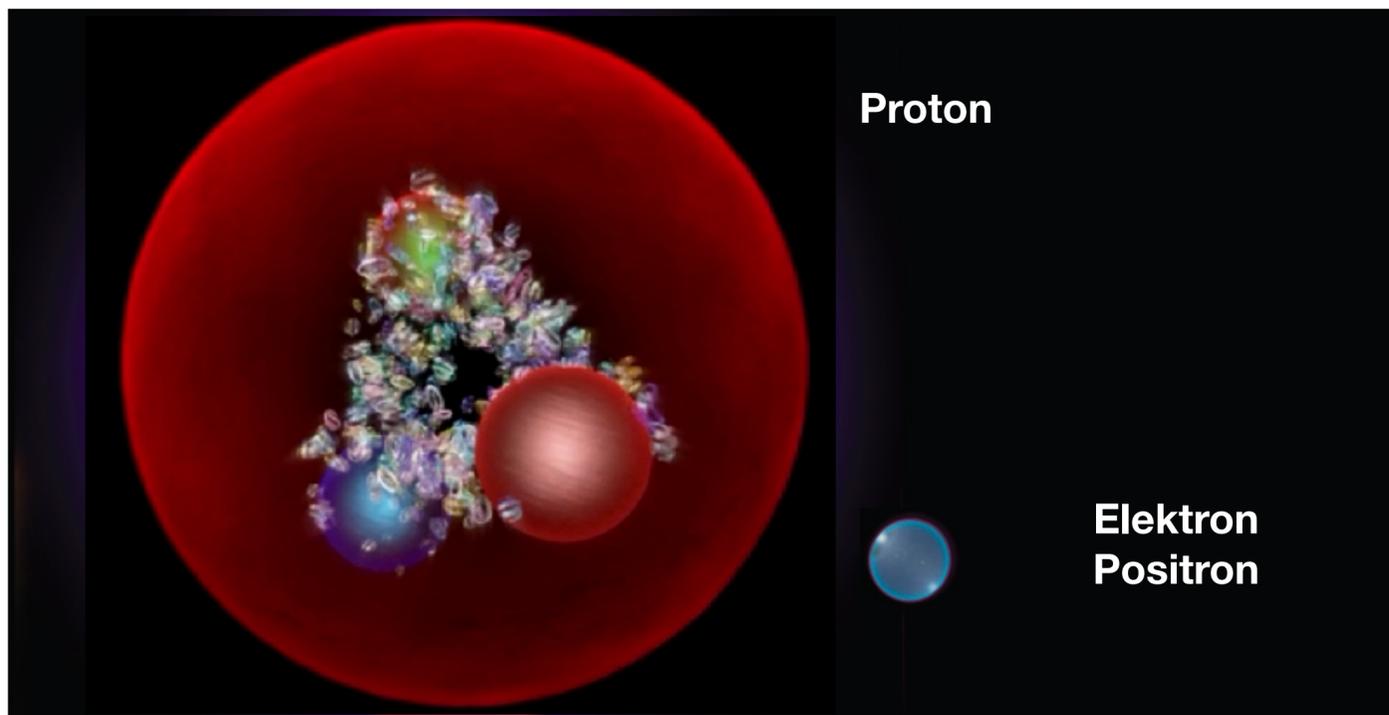
# Large Electron-Positron Collider (LEP)

- ▶ 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





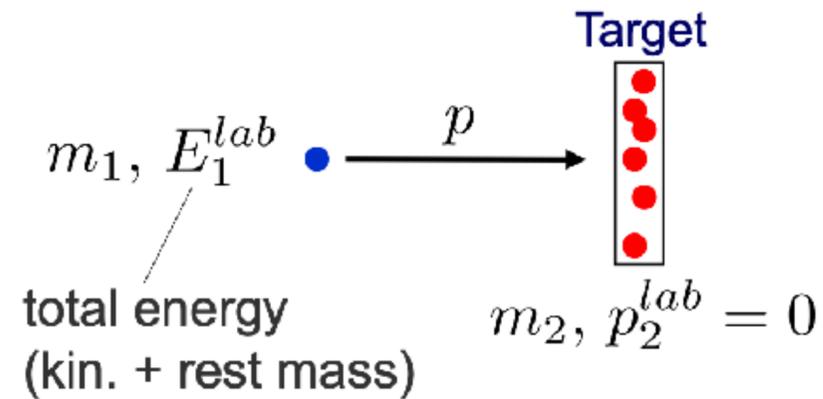
# Backup





# Fixed-Target vs. Collider

Fixed-target experiment:



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

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

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:

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



# Fixed-Target vs. Collider

## √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  $E \equiv E_1 = E_2$

# LHC Quadrupol Magnete

