

Beschleuniger und Detektoren

Das CERN



III. Physikalisches
Institut B

RWTHAACHEN
UNIVERSITY



NETZWERK
TEILCHENWELT

Das CERN

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)



© CERN

- ▶ Das größte Teilchenphysik-Forschungszentrum der Welt
- ▶ im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich

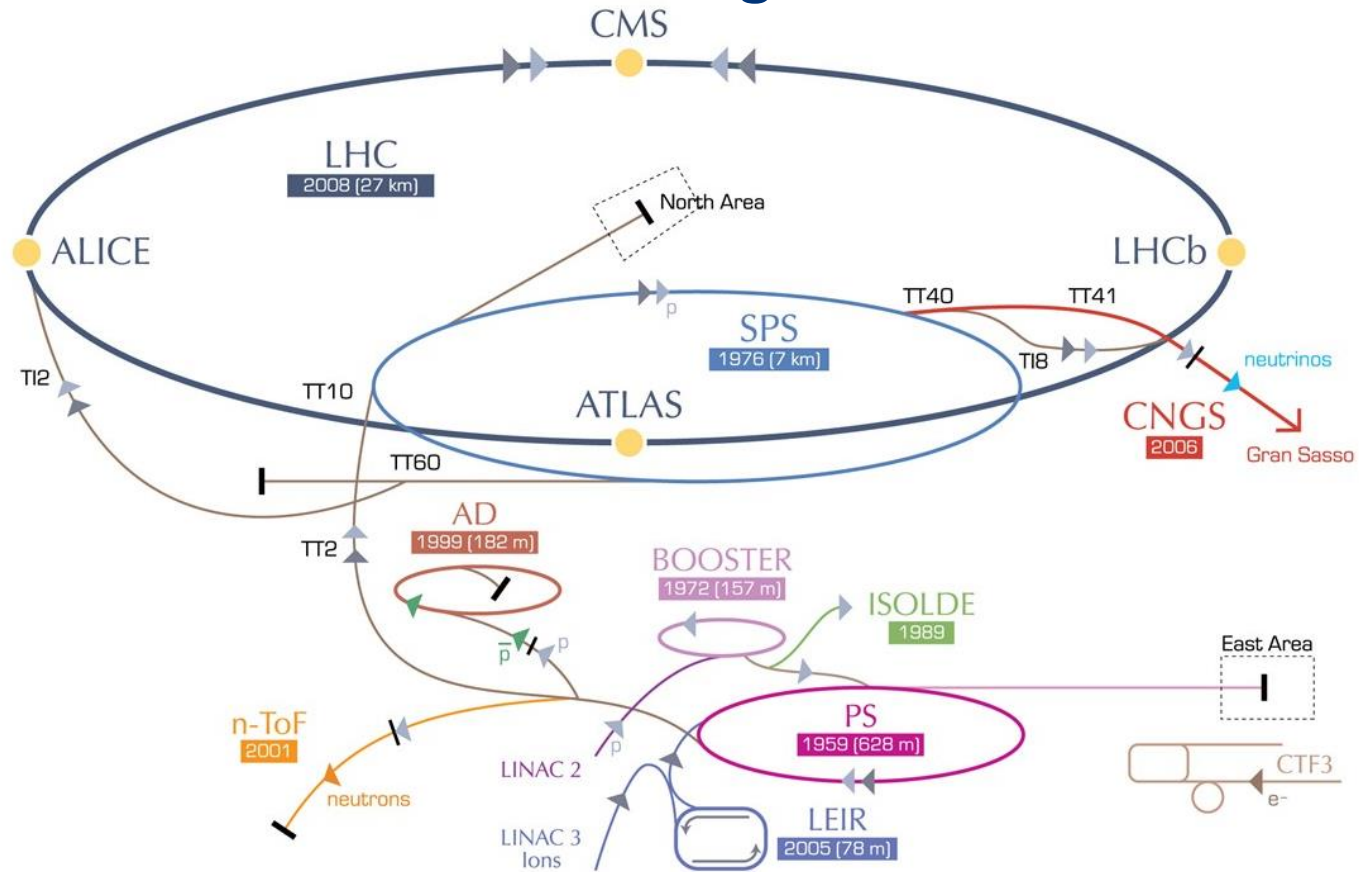
Das CERN

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

- ▶ 23 Mitgliedstaaten
- ▶ Über 600 Institute und Universitäten benutzen CERN Anlagen (auch von nicht Mitgliedstaaten)
- ▶ 2500 CERN Angestellte (Planung, Bau, Betrieb)
- ▶ ~14 000 Gastwissenschaftler
- ▶ ~17 000 Wissenschaftler arbeiten mit Daten vom CERN



Das CERN - Beschleuniger



▶ p [proton] ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} [antiproton] ↔ proton/antiproton conversion ▶ neutrinos ▶ electron

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight



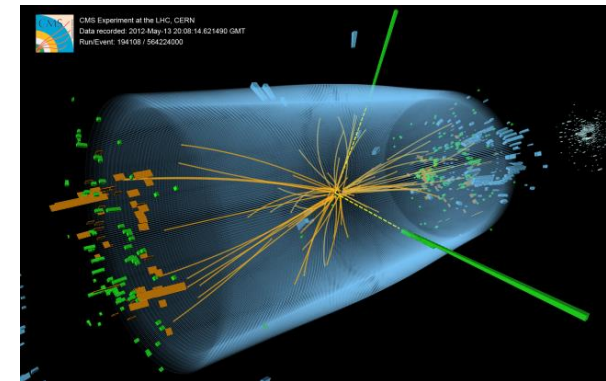
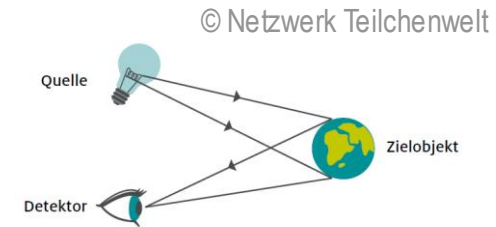
Warum forschen wir überhaupt in der Teilchenphysik?

Oder:

Wofür braucht man das?

Forschungsziele

- ▶ Strukturuntersuchungen
- ▶ Erzeugung bisher unbekannter Teilchen
- ▶ Erzeugung extremer Bedingungen



Das CERN – Entwicklungen

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

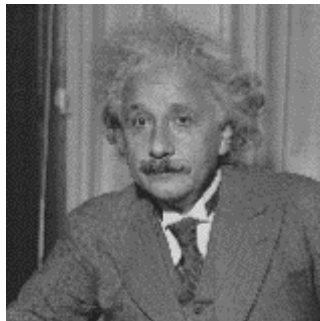
- ▶ Grundlagenforschung = Erkenntnisgewinn!
 - z.B. Entstehung des Universums



© CERN

Grundlagenforschung

▶ als Motor für Innovation



© Lambert/Getty Images



Relativitäts-
theorie



© Andrey Armyagov/ Shutterstock



Maxwell



Elektro-
magnetismus



© Wikipedia

100% Wissenschaft

Das CERN – Entwicklungen

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

- ▶ Grundlagenforschung = Erkenntnisgewinn!
 - z.B. Entstehung des Universums
- ▶ Anwendungen:
 - World Wide Web



© CERN

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



© CERN



© CERN

This machine is a server.
DO NOT POWER IT DOWN!

Das CERN – Entwicklungen

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

- ▶ Grundlagenforschung = Erkenntnisgewinn!
 - z.B. Entstehung des Universums
- ▶ Anwendungen:
 - World Wide Web (1989 erfunden, um wissenschaftliche Daten auszutauschen)
 - Medizin: PET, Tumorthherapie
 - Weiterentwicklung für Computerchips, Magneten (z.B. für MRT), Detektoren...



© CERN

“Places like CERN contribute to the kind of knowledge that not only enriches humanity, but also provides the wellspring of ideas that become the technologies of the future.”



Fabiola Gianotti, Director-General of CERN

Teilchenbeschleuniger weltweit

 **Fermilab**

 **J-PARC**



Beschleuniger und Detektoren

Beschleuniger



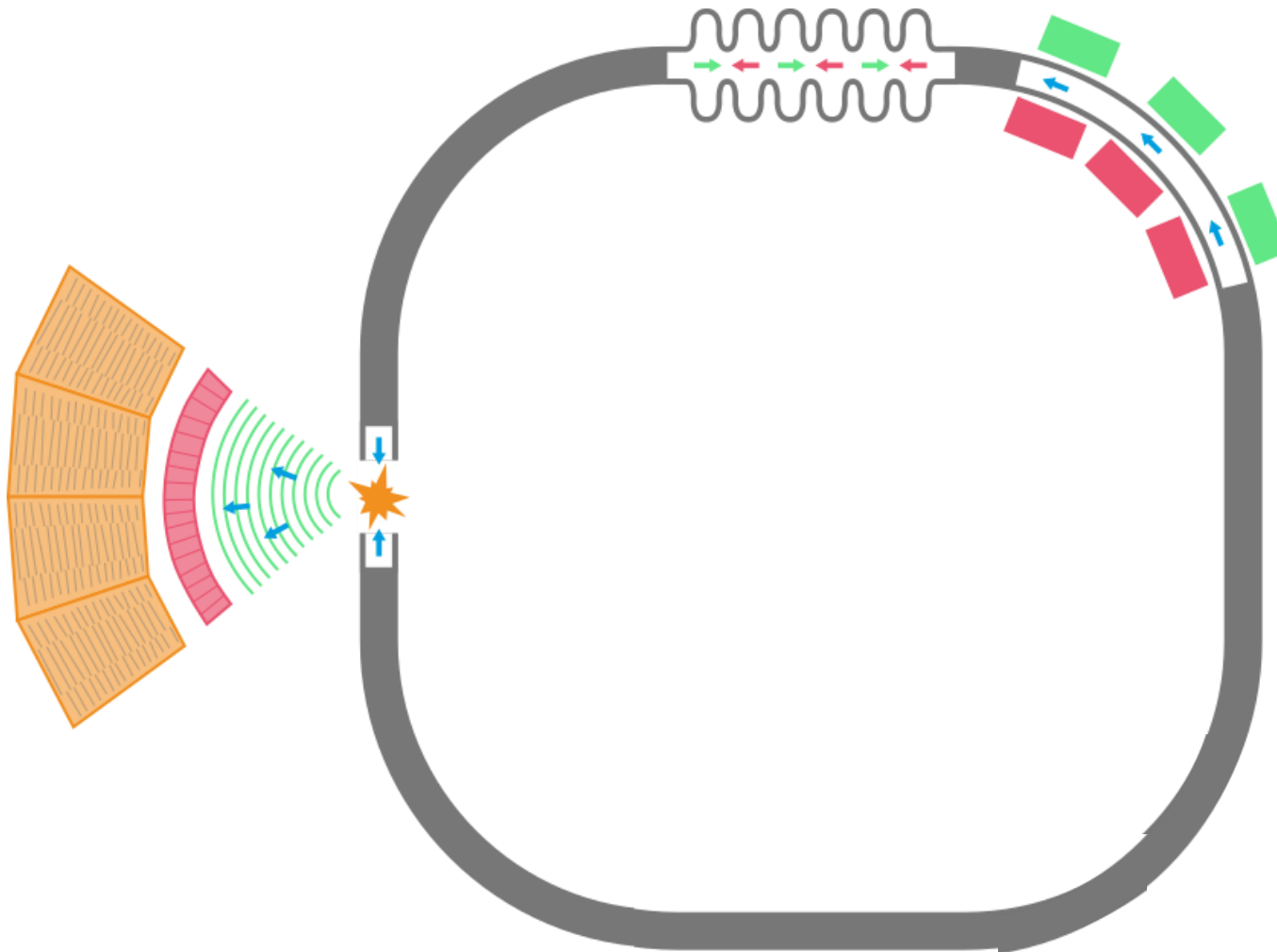
III. Physikalisches
Institut B

RWTHAACHEN
UNIVERSITY



NETZWERK
TEILCHENWELT

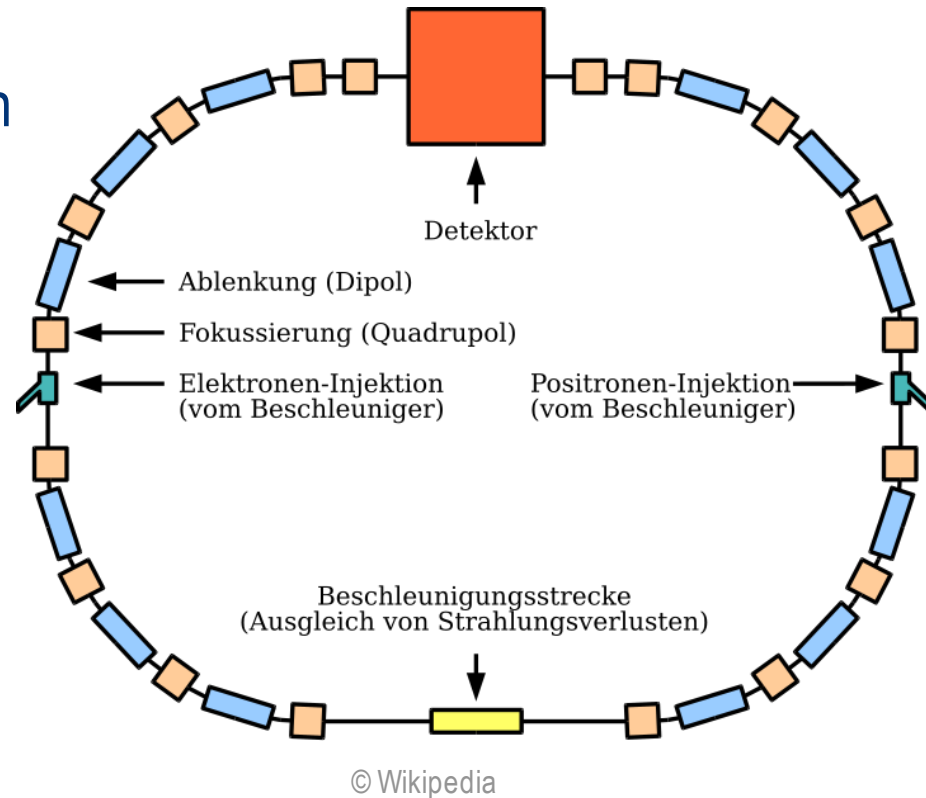
Überblick über die Teilchenbeschleuniger



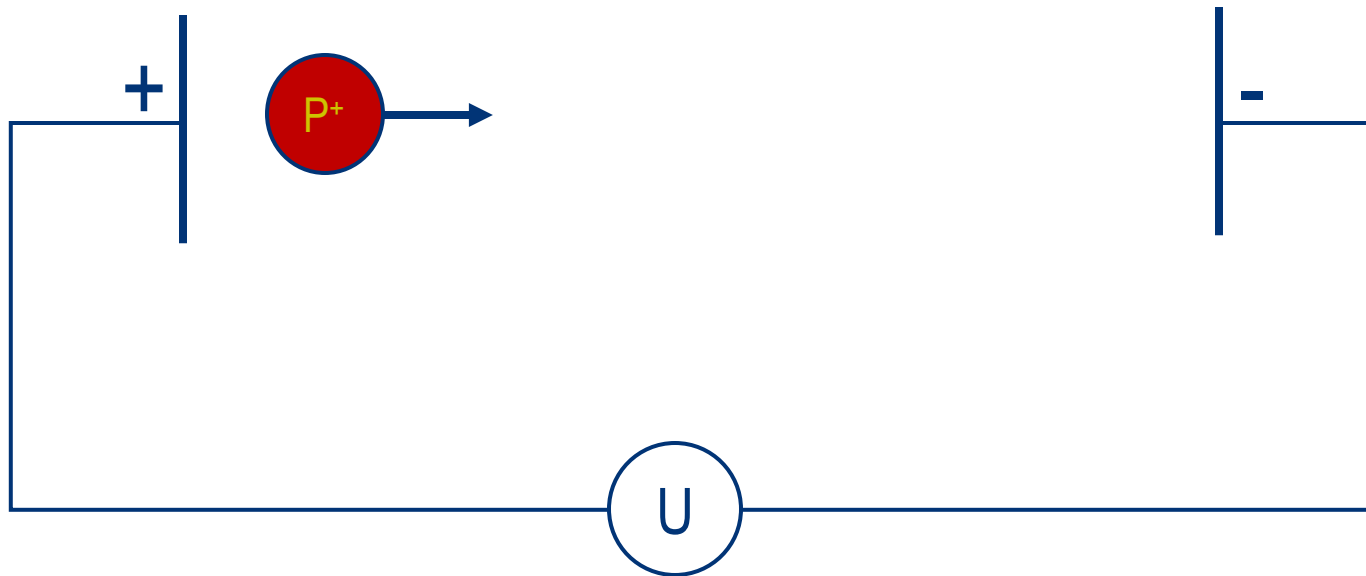
Überblick über die Teilchenbeschleuniger

► Ziel: hochenergetische Teilchen

- Um möglichst kleine Strukturen auflösen zu können oder
- Um möglichst schwere Teilchen zu erzeugen
- Energie-Masse-Äquivalenz von Albert Einstein (1905):
 $E = mc^2$



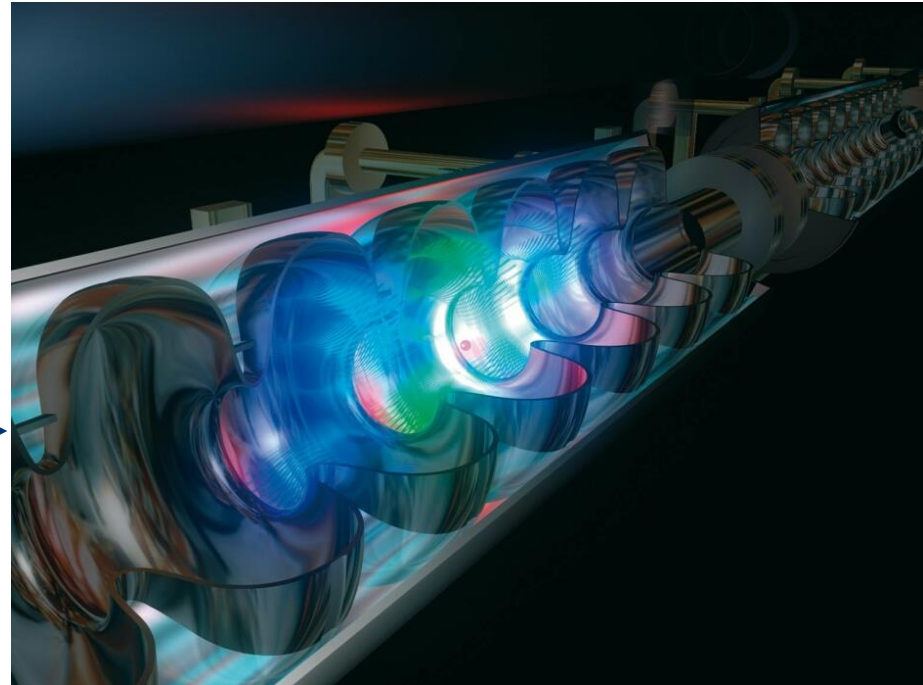
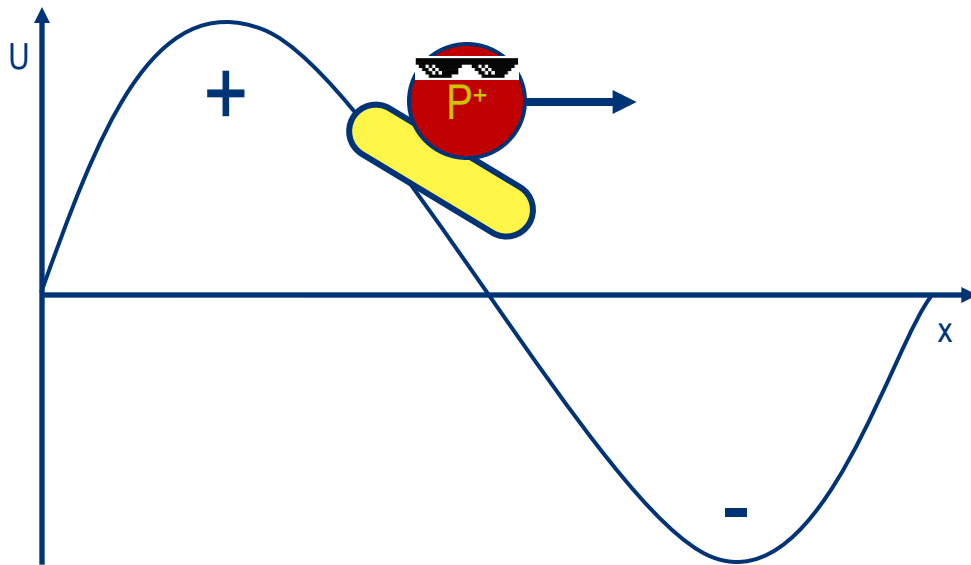
Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?



kinetische Energie \propto Spannung

Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?

Protonen „surfen“ auf einer Radio-Welle





Verschiedene Arten von Beschleunigern

Linear Beschleuniger

z.B. European XFEL

- Teilchen fliegen entlang einer geraden Strecke

Vorteil:

- Beschleunigung kann bei „Null“ beginnen

Nachteil:

- Beschleunigungsstrecken werden nur einmal genutzt

Kreis Beschleuniger

z.B. LHC

- Teilchen fliegen auf einer Kreisbahn

Vorteil:

- Mehrfaches Durchlaufen der Beschleunigungsstrecken

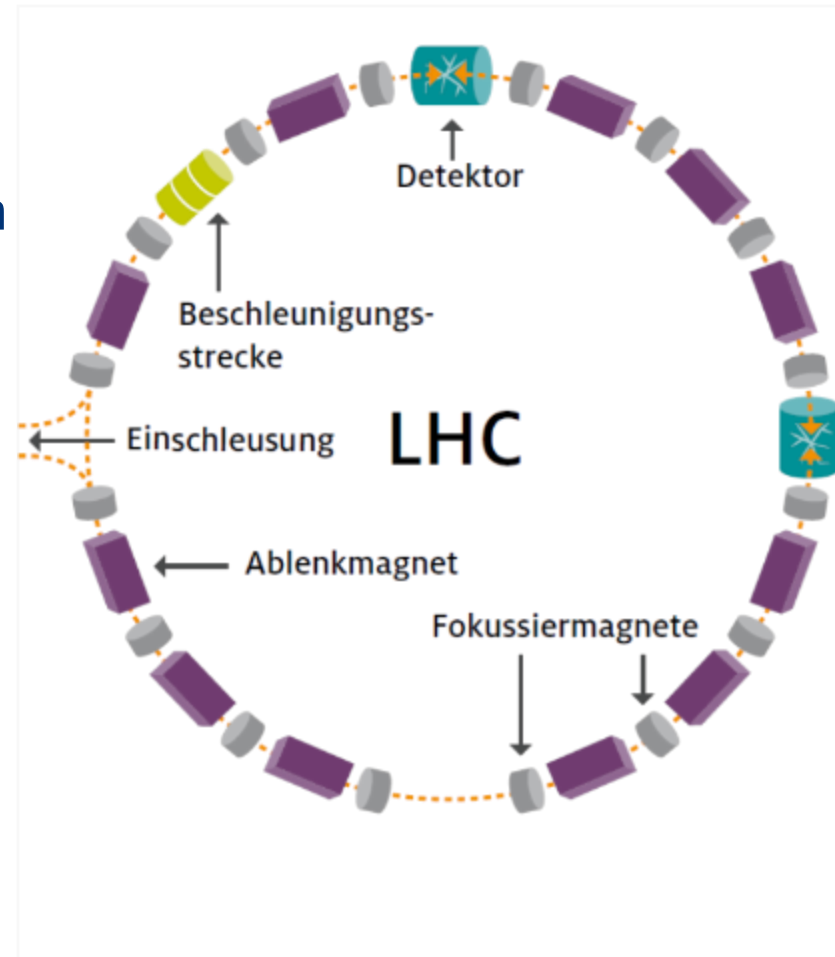
Nachteil:

- Benötigt starke Magneten zum Krümmen der Teilchenbahn

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



Alles beginnt mit dieser Flasche

► Protonen Quelle

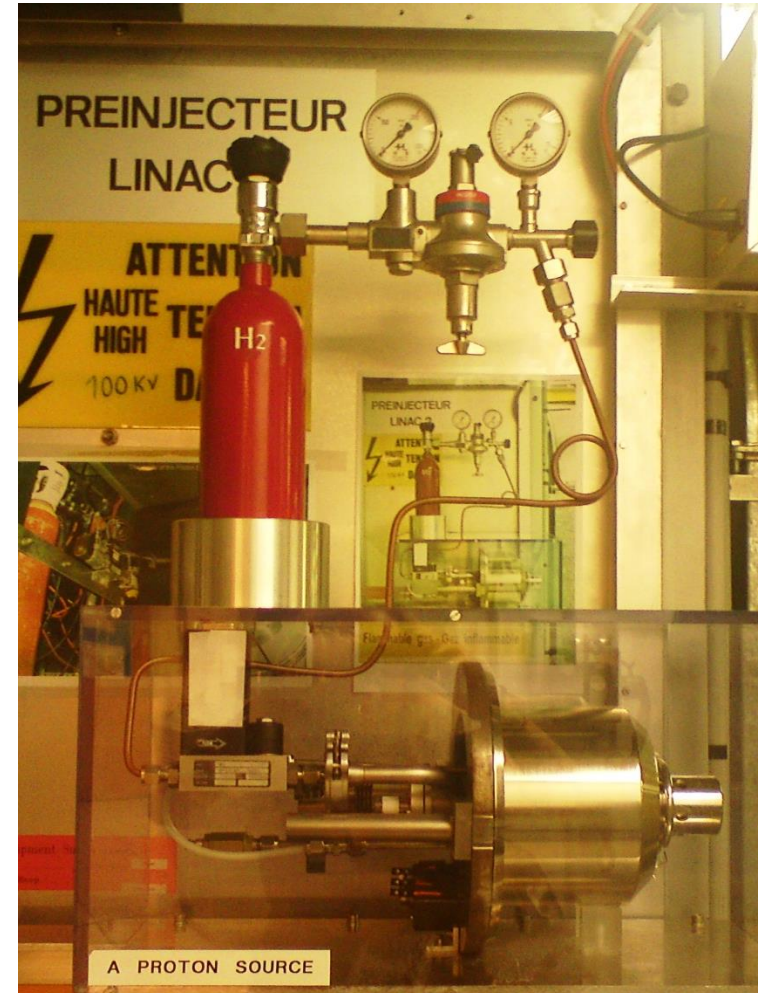
- Protonen werden durch Ionisation von Wasserstoff gewonnen
- Ca. $1,3 \times 10^{20}$ Protonen pro Jahr



Wie viele Flaschen Wasserstoff hat der LHC bereits verbraucht?



Keine einzige! Der LHC müsste für einen Luftballon voll ungefähr 1 Millionen Jahre laufen



Der LHC ist ...

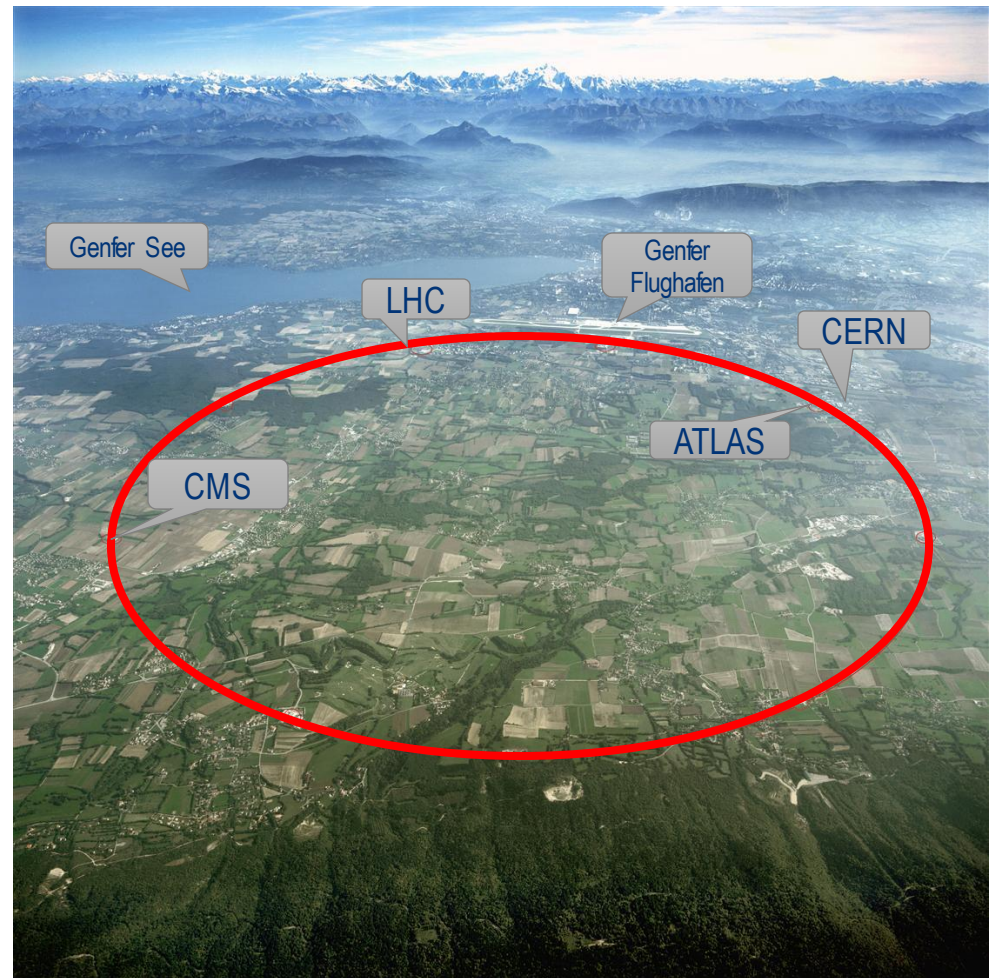
© CERN



„... der größte und leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger der Welt ...“

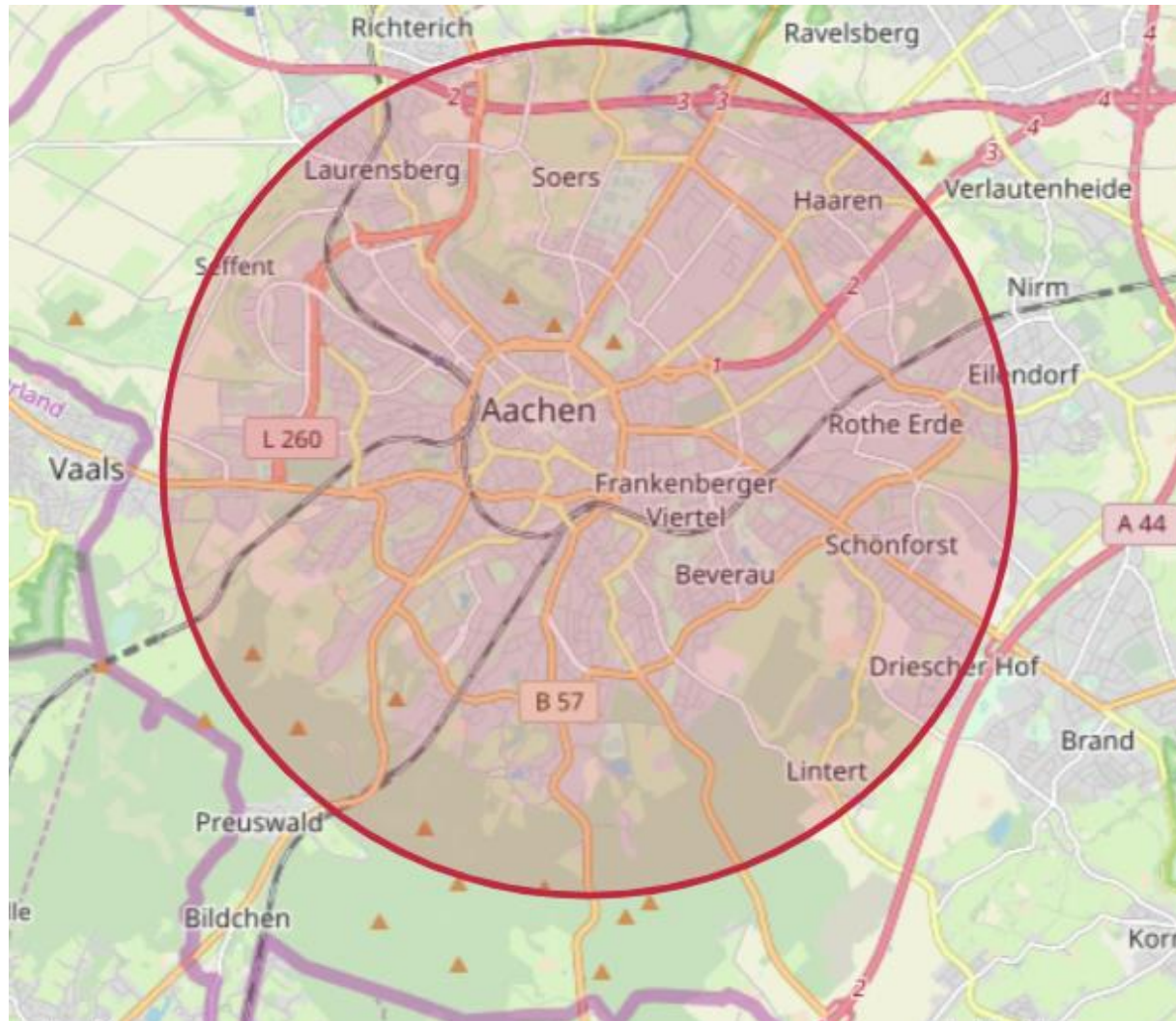
Der LHC ist ... groß

- 26 659 m Umfang
- 100 m unter der Erde
- Vgl. Hamburger U-Bahn:
- ca. 45 km Tunnel-Strecke



© CERN

... sehr groß



Warum so groß?

- Kollisionen Energie der Protonen am LHC: 7 TeV
- Injektion aus SPS mit 450 GeV

Beschleunigung mit AA Batterien?

Benötigte Strecke:

- 4 700 000 000 000 Batterien ($\hat{=}$ 50 mm)
- 230 Millionen km (1,5 x Entfernung Erde – Sonne)

Kreis Beschleuniger: Benutze elektrische Felder mehrmals

- Benötigte Zeit: ca. 7 Jahre (vgl. LHC: 20 min)

Beschleunigung mit supraleitenden RF Cavities

Elektrische Felder:

AA Batterien: 30 V/m

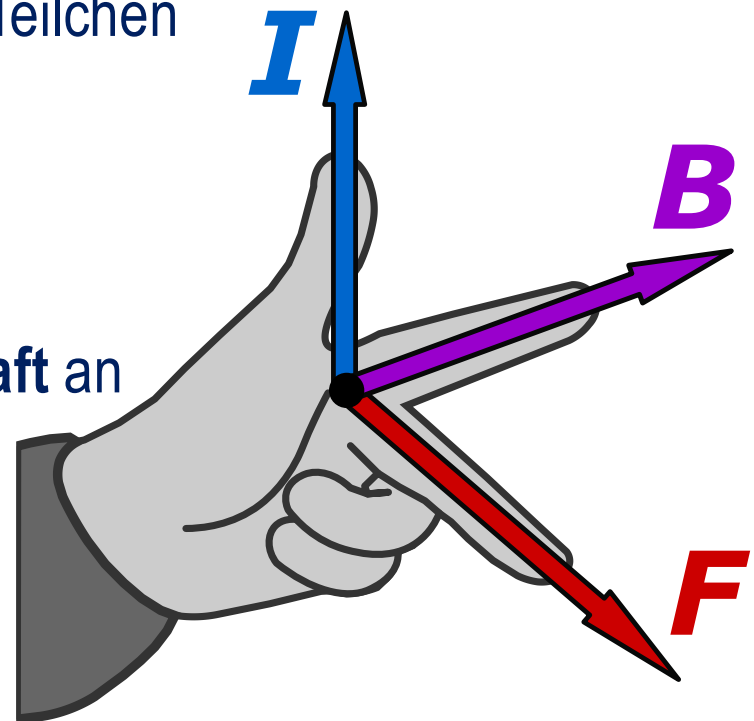
LHC: 5,5 MV/m



Bildquelle: Wdwd [CC BY 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/)

Lorentzkraft

- ▶ Die Hand-Regel zeigt schnell, in welche Richtung geladene Teilchen bewegt werden
- ▶ **Linke** Hand für **negativ geladene** Teilchen
- ▶ **Rechte** Hand für **positiv geladene** Teilchen
- ▶ **Daumen** zeigt in **Flugrichtung**
- ▶ **Zeigefinger** zeigt in Richtung des **Magnetfeldes**
- ▶ **Ringfinger** gibt die Richtung der **Kraft** an



Der LHC ist ... kalt



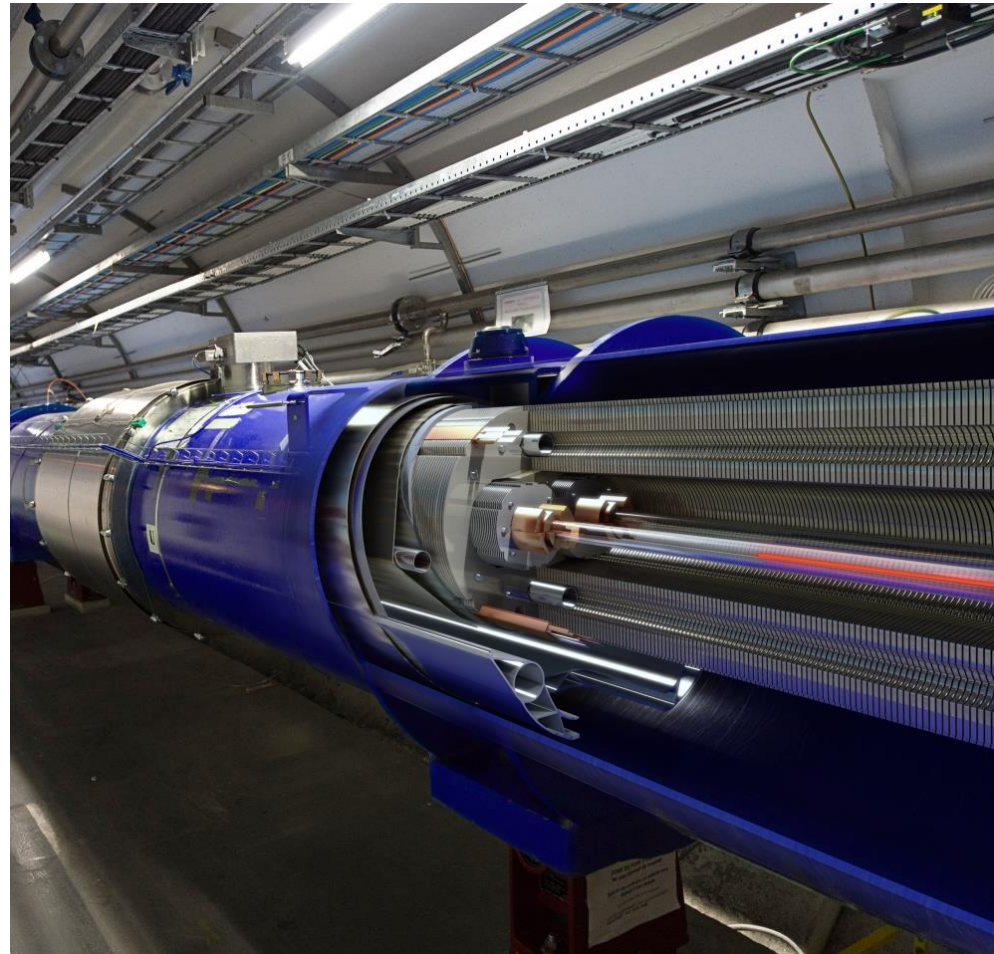
Wie kalt ist der absolute Nullpunkt?



-273,15°C



Wie kalt wird es im LHC?



© CERN

Der LHC ist ... kalt

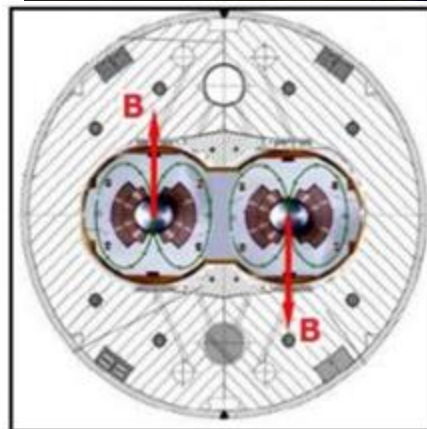
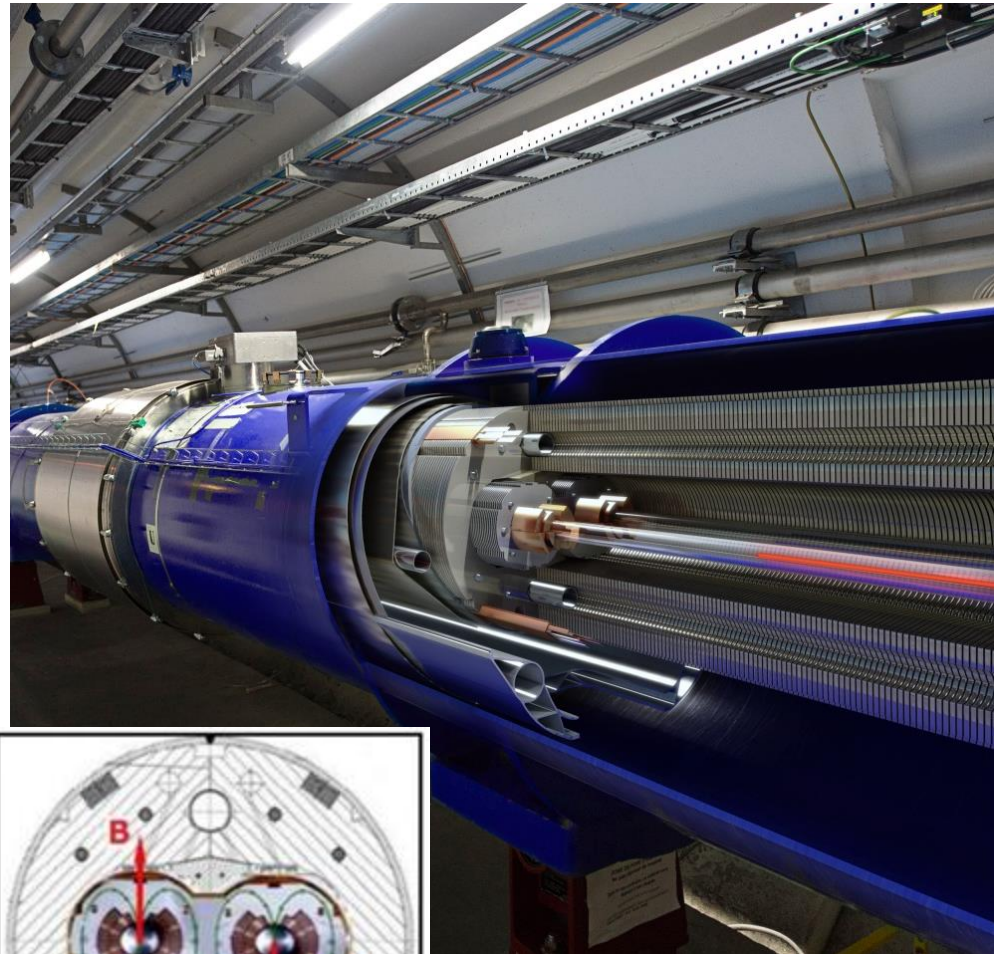
- Supraleitende Magneten
- Betriebstemperatur:
1,9 K (-271,3 °C)
- Kälter als das Weltall (2,7 K)

Warum so kalt?

$$Br = \frac{\gamma m v}{q}$$

- B : Stärke des Magnetfeldes
- r : Krümmungsradius der Teilchenbahn
- γ : Lorentzfaktor
- v, m, q : Geschwindigkeit, Masse und Ladung des Teilchens

- Extrem starke Magnetfelder benötigt, damit der Krümmungsradius "nur" 27km ist
- Nur mit supraleitenden Magneten möglich



© CERN

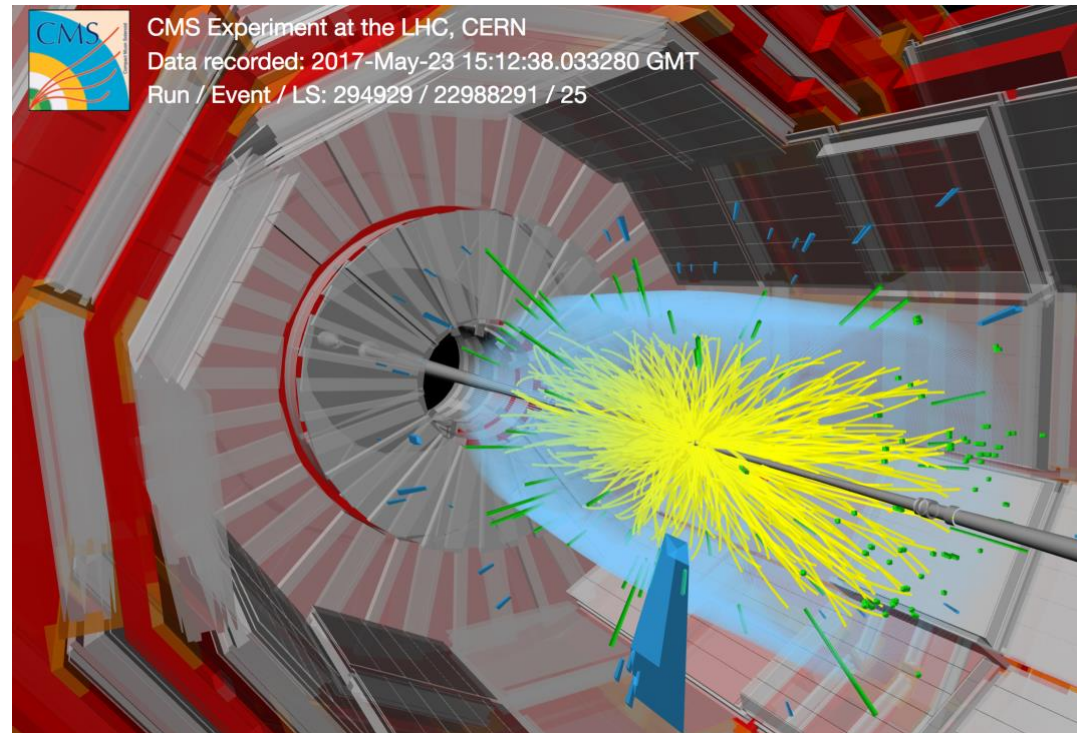
Der LHC ist ... energiegeladen



Wieviel Prozent der Lichtgeschwindigkeit erreichen die Protonen im LHC?

- 13 TeV Schwerpunktenergie
- 99,9999991% Lichtgeschwindigkeit
- 11 245 Umläufe pro Sekunde

- Gespeicherte kinetische Energie aller Protonen entspricht ICE mit 150km/h



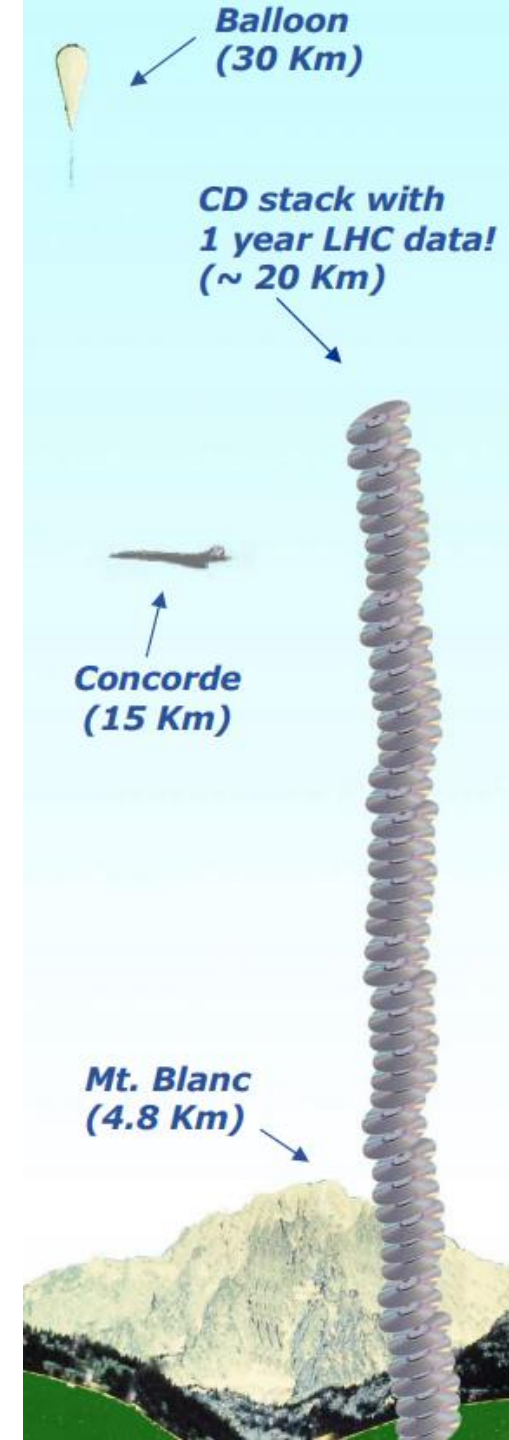
© CERN

Der LHC ist ... vernetzt



- 10 Petabyte Daten pro Experiment pro Jahr
- Weltweit größtes Computer Netz
- 170 Rechenzentren mit insgesamt ca. 1 000 000 CPUs
- Vernetzt tausende Wissenschaftler aus über 40 Ländern

© CERN



© CERN

Teil 2: Beschleuniger und Detektoren

Teilchendetektoren



III. Physikalisches
Institut B

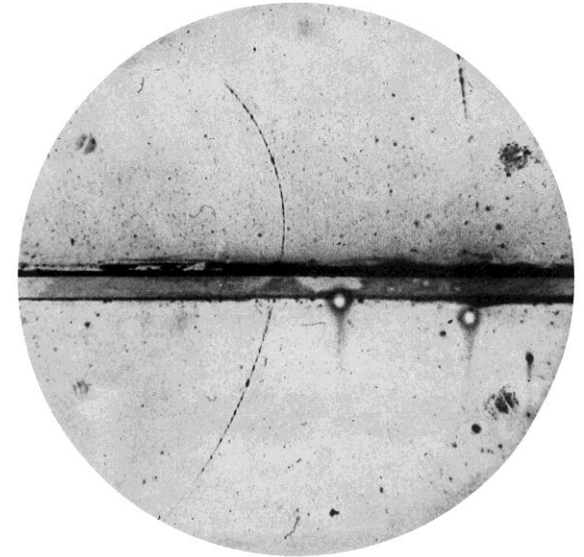
RWTHAACHEN
UNIVERSITY



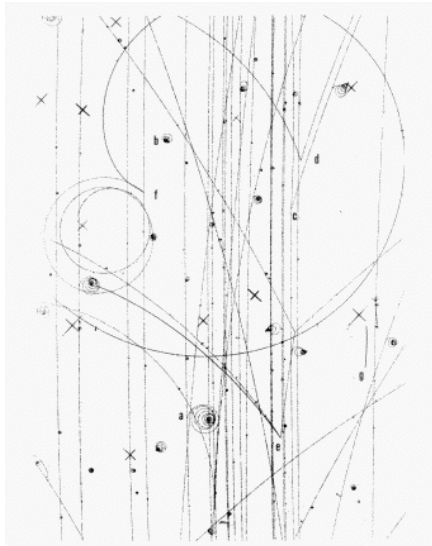
NETZWERK
TEILCHENWELT

Nebelkammer

- ▶ Übersättigtes Gasmisch (Isopropanol in Luft)
- ▶ Spur des Teilchen wird als Kondensstreifen sichtbar
- ▶ Nobelpreis für Entwicklung 1927
- ▶ Entdeckung des Positrons



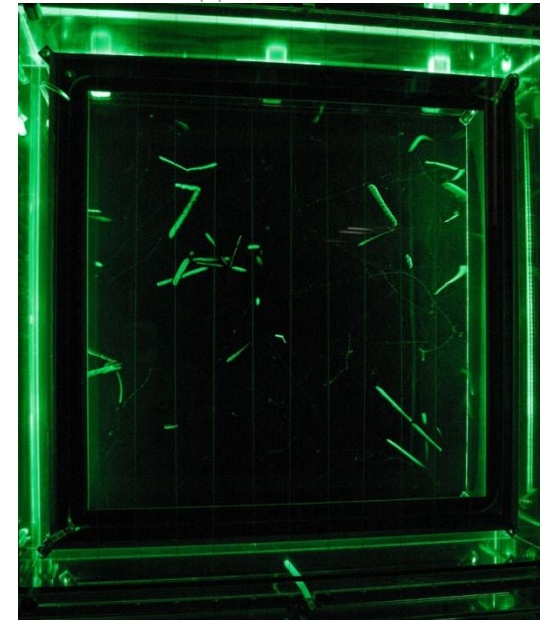
Anderson, Carl D. (1933). "The Positive Electron". *Physical Review* **43** (6): 491–494.



© CERN



© CERN



© DESY

Moderne Teilchendetektoren

Beispiel: CMS Detektor (Compact Muon Solenoid)

► Mehrere Detektorschichten

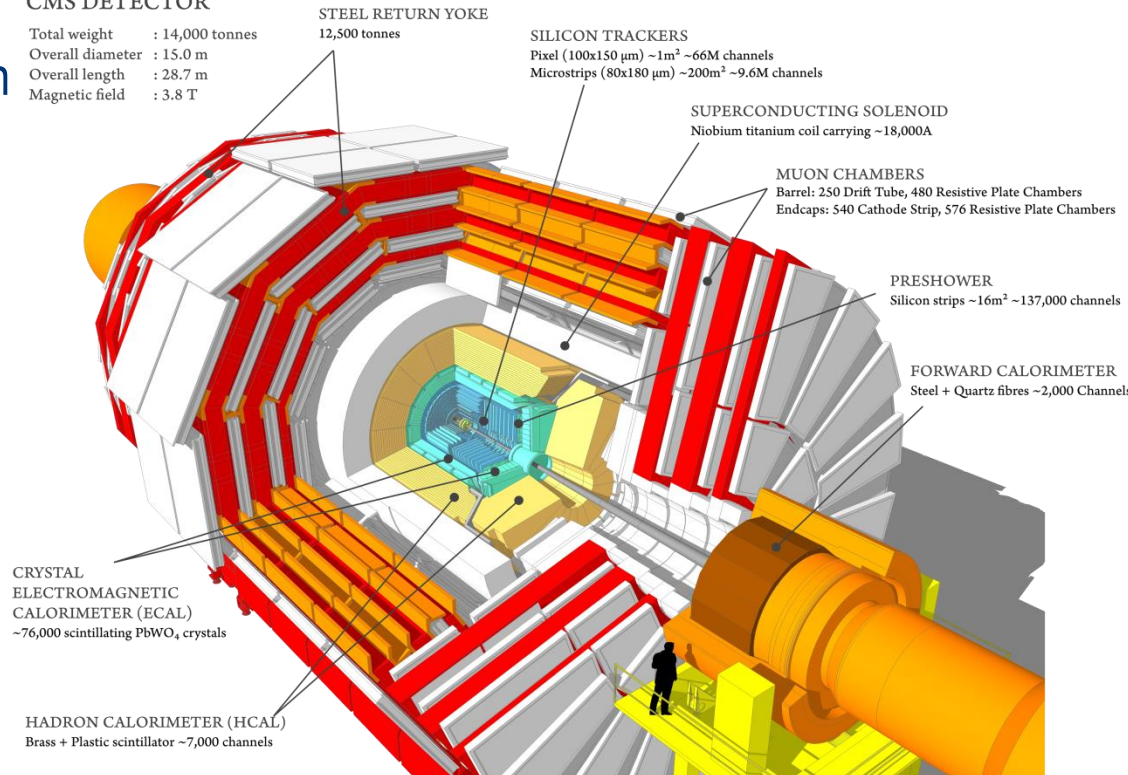
- Spurdetektor
- Kalorimeter
- Myonen Detektor

► Zwiebelförmig um das Strahlrohr aufgebaut

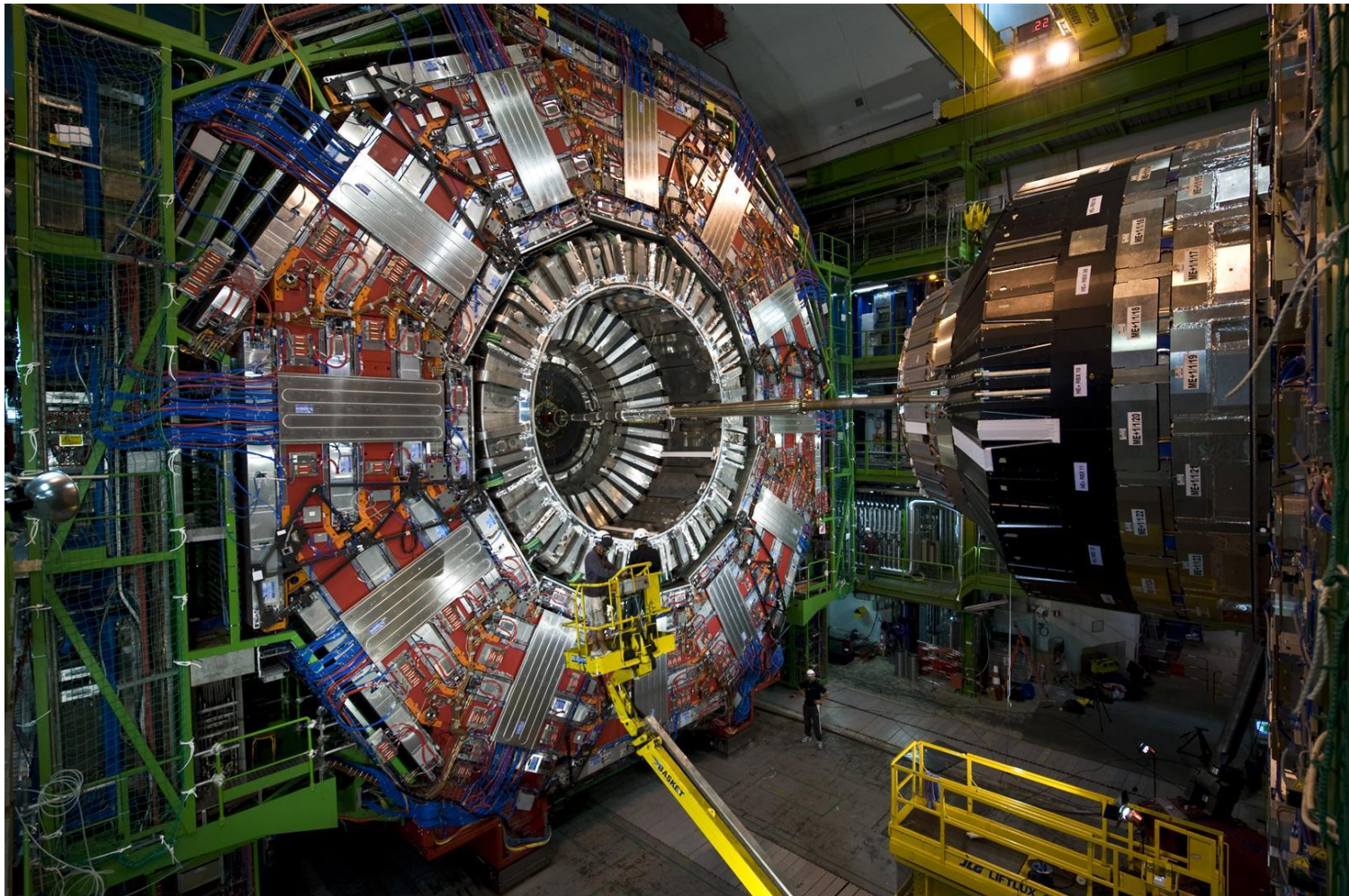
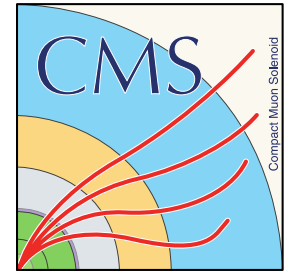
► Starke Magnetfelder

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T



Der CMS Detektor



Was misst ein typischer Teilchen Detektor?

▶ Spurdetektoren:

- **Spur**
- **Impuls** und Vorzeichen der **elektrischen Ladung**

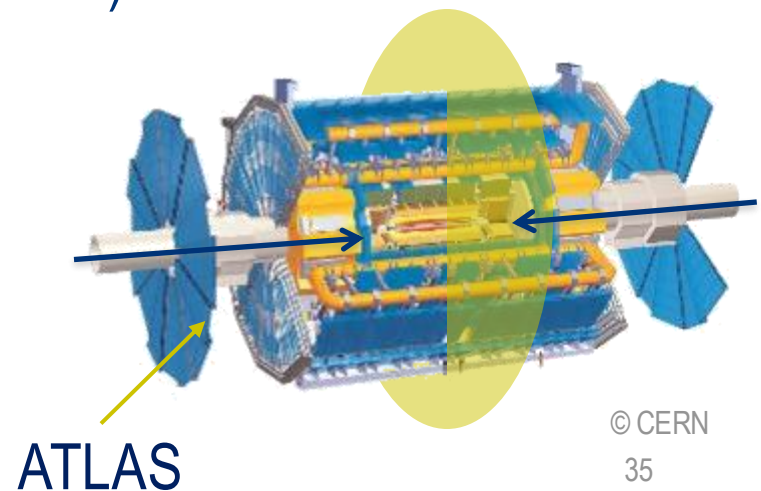
▶ Kalorimeter:

- **Energie**

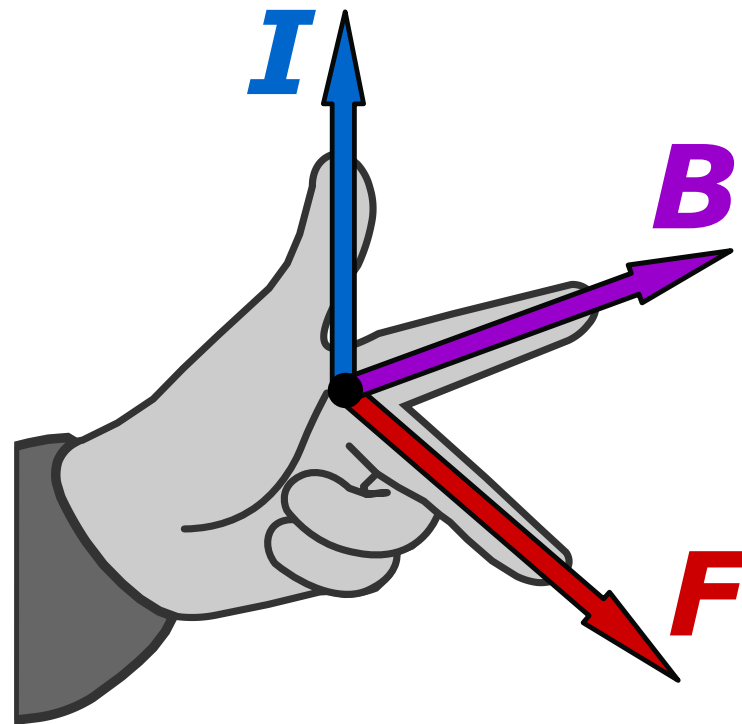
▶ Besonders wichtig sind die **transversalen Anteile** von Impuls und Energie (**senkrecht zum Strahlrohr**):

- P_T : transversaler Impuls
- E_T : transversale Energie
- Aus Energieerhaltung:

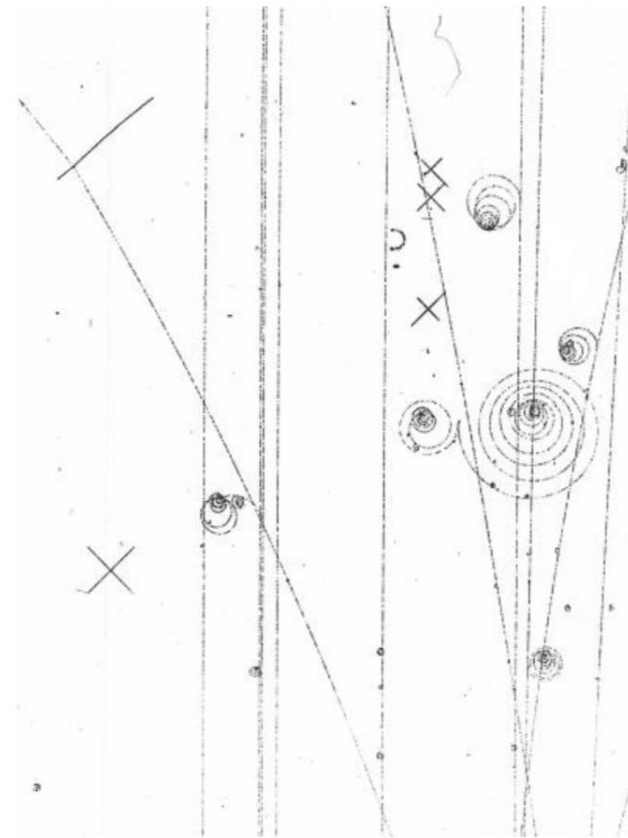
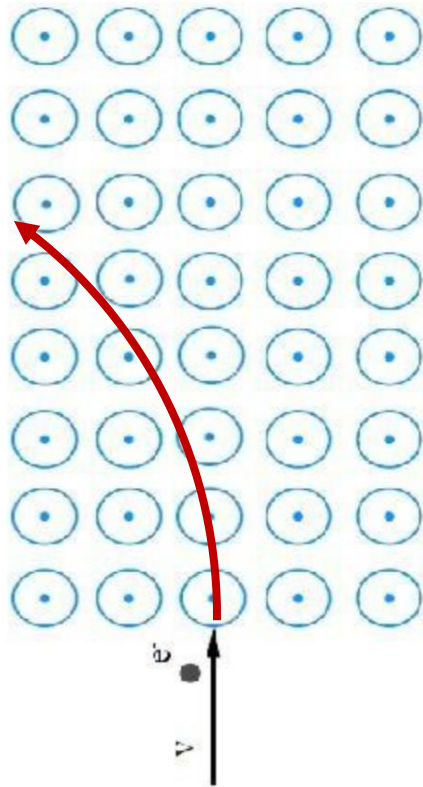
$$\sum E_T = 0$$



Erinnerung: Lorentzkraft

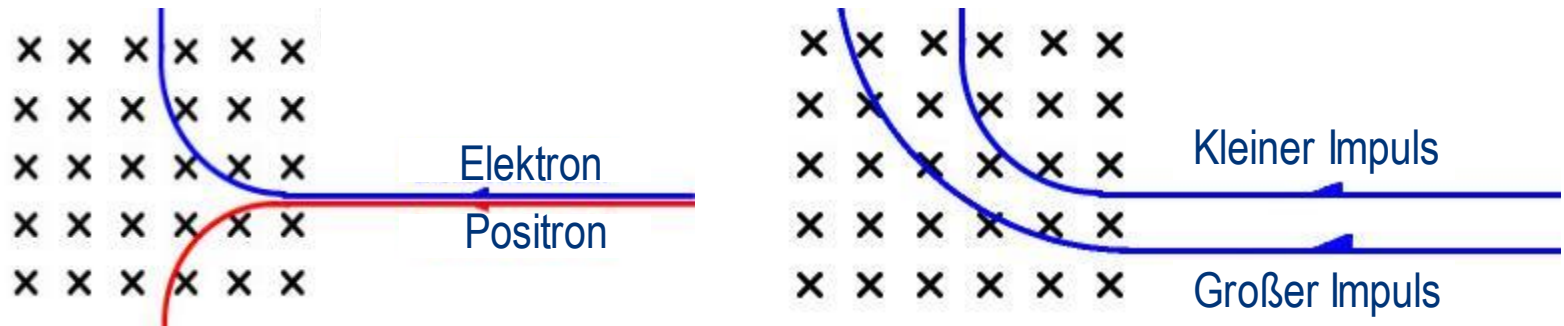


Blasenkammer: Spuren im Magnetfeld



Magnetfelder und geladene Teilchen

- ▶ Ein Magnetfeld lenkt elektrisch geladene Teilchen senkrecht zu ihrer Flugbahn ab (Lorentzkraft):



x: Das Magnetfeld zeigt vom Betrachter weg

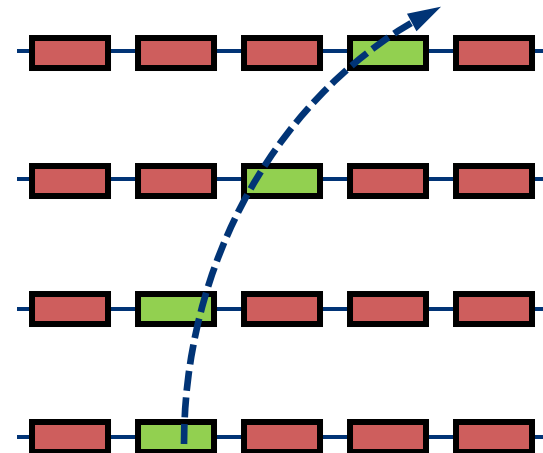
- ▶ Die Richtung und Stärke der **Bahnkrümmung** hängen von der **elektrischen Ladung** und vom **Impuls** (also von Masse und Geschwindigkeit) des Teilchens ab.

Spurdetektor

- ▶ Ziel: Ladung und Impuls messen
 - Rekonstruktion aus Teilchenspur
- ▶ In CMS: Silizium Pixel Detektor
 - Mehrere Schichten aus Silizium Pixeln
 - Geladene Teilchen erzeugen elektrisches Signal in Pixel
 - Teilchenspur wird aus mehreren „Treffern“ im Detektor rekonstruiert



©Megadeth

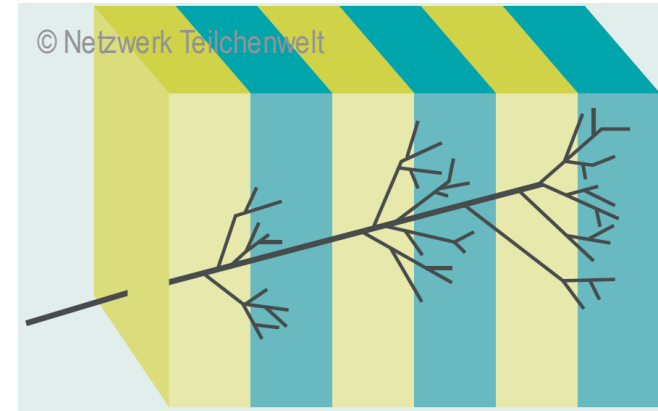


Der CMS Pixel Detektor hat
65 Millionen einzelne Pixelsensoren
(= 65 Megapixel)

Kalorimeter

- ▶ Ziel: Energie messen
 - Teilchen werden im Detektor gestoppt
 - Energie des Teilchens wird im Detektor deponiert
- ▶ Zwei Arten von Kalorimetern
 - Elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL)
 - Nachweis von elektromagnetischen Kaskaden in szintillierendem Material
 - Hadronisches Kalorimeter (HCAL)
 - Erzeugung hadronischer Kaskaden in Absorber Schicht
 - Nachweis in sensitiven Schichten via Szintillation

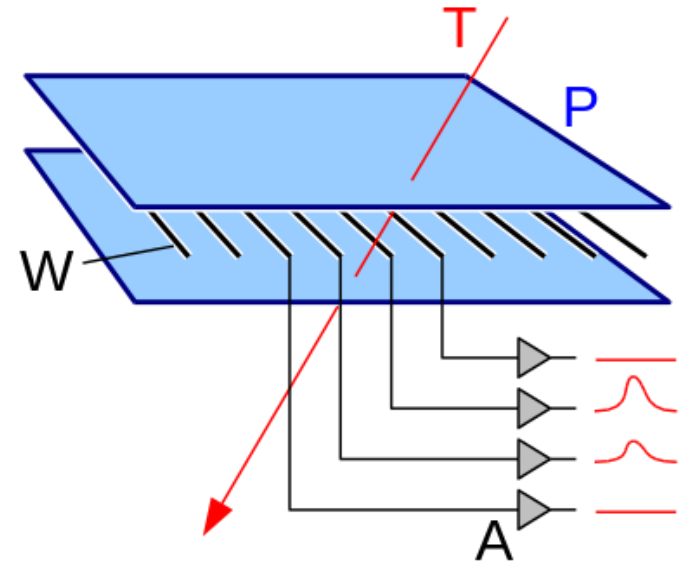
Das HCAL von CMS besteht zum Teil aus Messing von recycelten Patronenhülsen vom 2. Weltkrieg



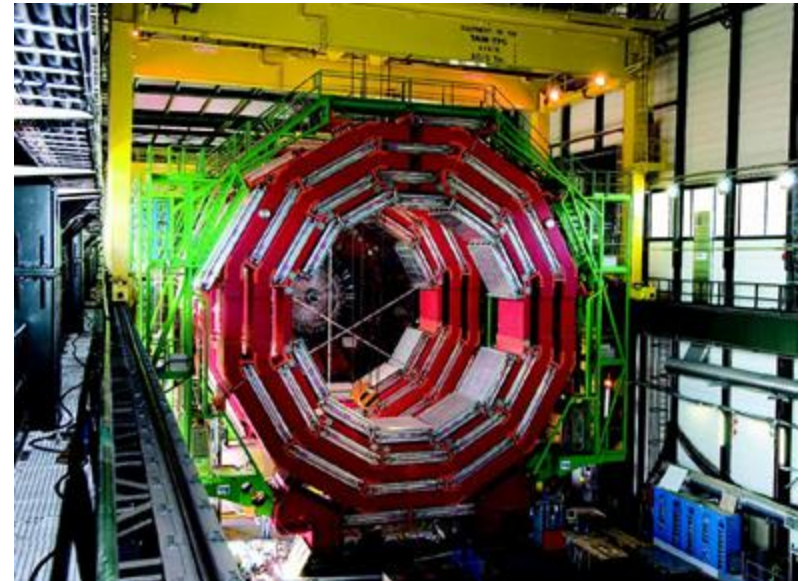
© CERN

Myonen Detektor

- ▶ Ziel: Nachweis von Myonen
 - Myonen werden nicht im Kalorimeter gestoppt
 - Nachweis über Driftkammern
- ▶ Driftkammern
 - Prinzip ähnlich zu Geiger-Müller-Zählrohr
 - Mehrere Drähte in gasgefüllter Kammer erlauben bessere Ortsauflösung



© Michael Schmid CC BY 3.0



© CERN

Und jetzt?

1. Theorie aufgestellt
2. Beschleuniger läuft
3. Detektor gebaut
4. ???
5. Nobelpreis

