

Kerne und Teilchen

Moderne Physik III

Vorlesung # 14

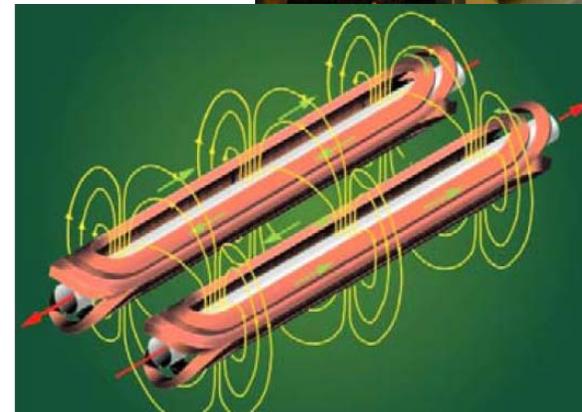
6. Detektoren und Beschleuniger

6.2 Teilchenbeschleuniger

- Zyklotron
- Synchrotron
- Internationale Teilchenbeschleuniger

7. Grundlagen der Elementarteilchen-Physik

7.1 Der Teilchenzoo

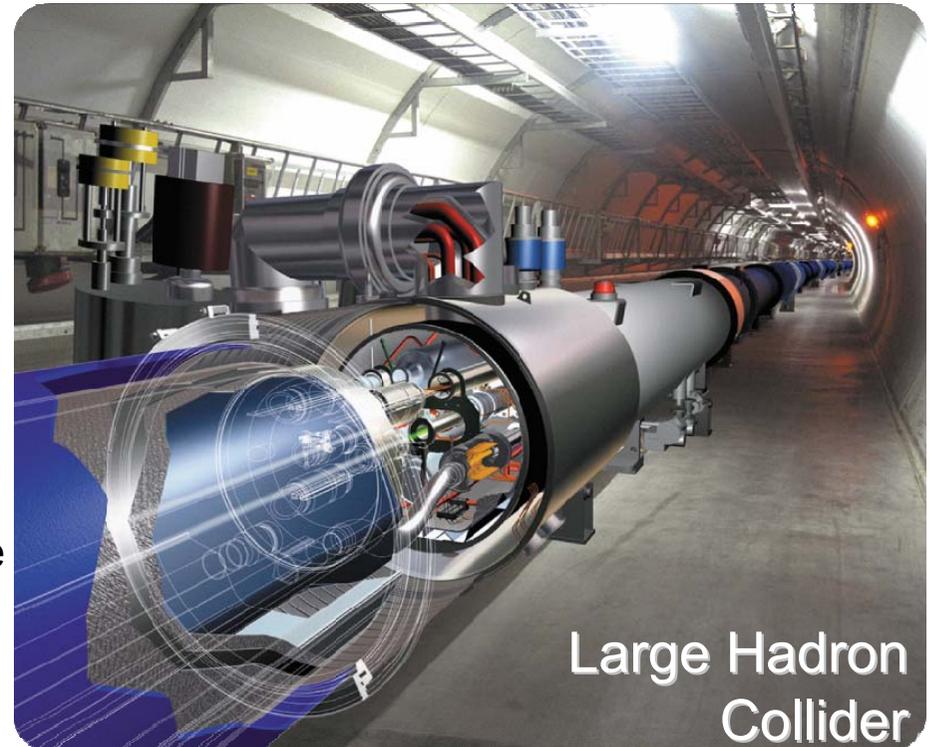


6.2 Teilchenbeschleuniger

- **1930**: Ernest Orlando Lawrence (Berkeley) baut das erste **Zyklotron** mit $\varnothing = 13 \text{ cm}$ & beschleunigt Protonen auf **$E = 80 \text{ keV}$** (500 \$ für weitere F&E)
- **2010**: am CERN (Genf) erreicht der LHC als Protonen-**Synchrotron** mit $\varnothing = 8.6 \text{ km}$ die bisher höchste Energie **$E = 3.5 \text{ TeV}$** (2012 **4TeV** , 2015 **7TeV**)



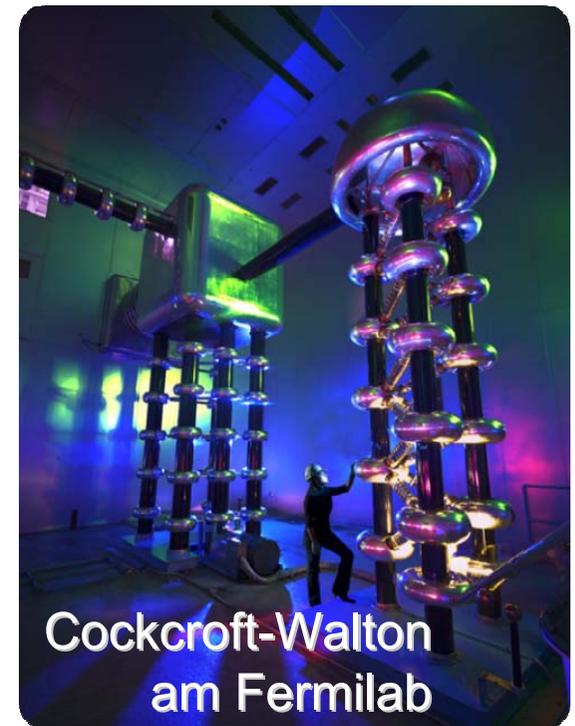
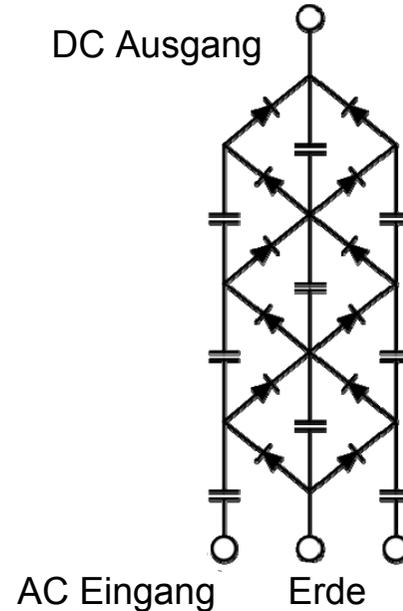
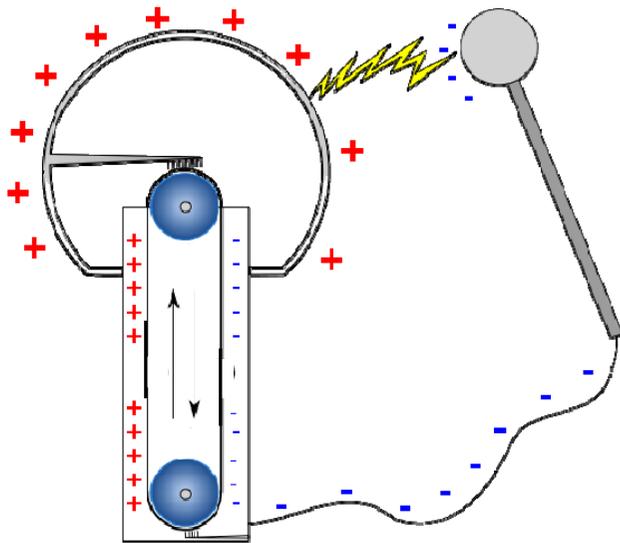
Ernest O. Lawrence
Lawrence Berkeley
National Laboratory
(1939)



Large Hadron
Collider

Elektrostatische Generatoren

- **Van-de-Graaff-Generatoren:** elektrostatisches Prinzip, kontinuierlicher Transport positiver Ladung auf Elektrode, damit: Ionenquelle auf positiver HV, maximale Energie ~ 12 MeV (mit Tandem-Prinzip 25 MeV)
- **Cockcroft-Walton Generatoren:** Prinzip der Spannungsvervielfachung mit Dioden & Kapazitäten, \rightarrow Konversion eines AC-Eingangssignals im Niederspannungsbereich in ein DC-Ausgangssignal bei großer HV (bis 1 MV), dienen heute als Injektoren



1. Zyklotron

- Zyklotron:** geladene Teilchen (q) werden zwischen zwei Halbschalen (Dees) durch eine **feste Wechselspannung** U (10-1000 kV) mit fester Frequenz ω (Zyklotronfrequenz) beschleunigt, homogenes B-Feld eines Elektromagneten: spiralförmige Bahn, Anwachsen des Radius: $r \sim m \cdot v$ ↪ Extraktion der Ionen

Zentripetalkraft

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = q \cdot v \cdot B$$

Lorentzkraft

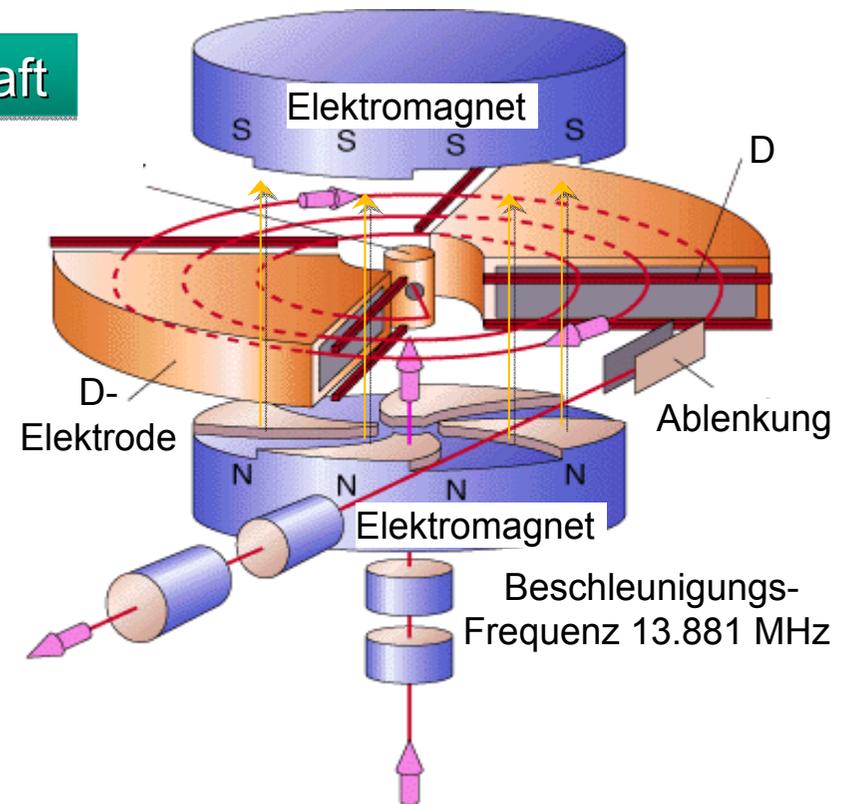
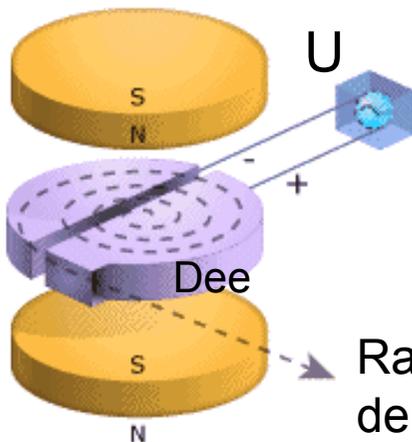
$$\omega = v/r$$

$$\omega = \frac{q}{m} \cdot B$$

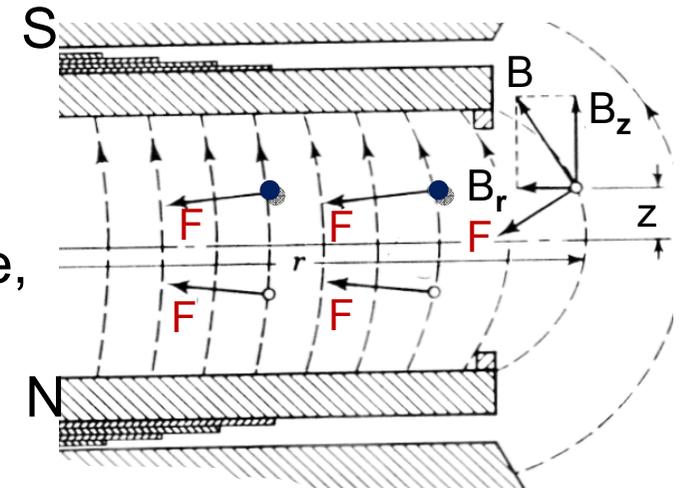
Zyklotronfrequenz

ω unabhängig von
Radius r , Impuls $m \cdot v$

Radius r wächst linear an mit dem Impuls $p = m \cdot v$, T ist konstant

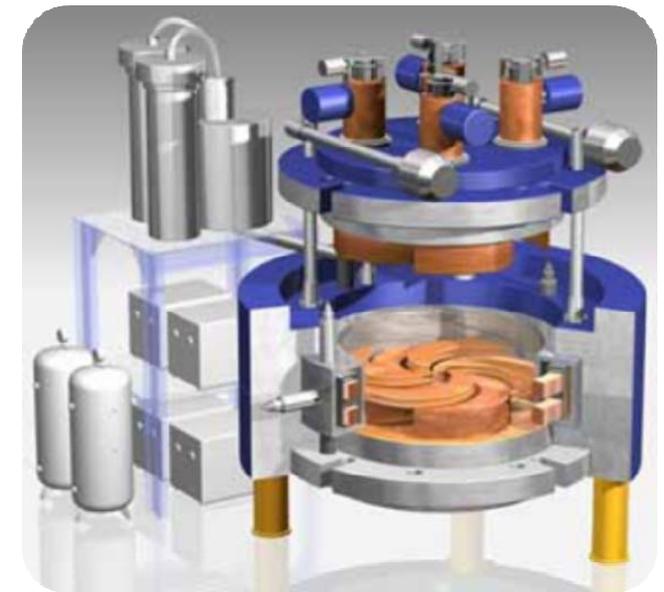


- **Schwache Fokussierung:** Magnetfeld ist azimuthal homogen, nimmt aber radial nach außen hin ab, daher rücktreibende Kraft für Ionen in die Sollebene, ↪ vertikale & horizontale Fokussierung



- **Relativistische Effekte:** Massenzuwachs limitiert Energie $E_p \sim 20 \text{ MeV}$
Synchrozyklotron: ω ist variabel

$$\omega = \frac{q}{\gamma \cdot m} \cdot B$$

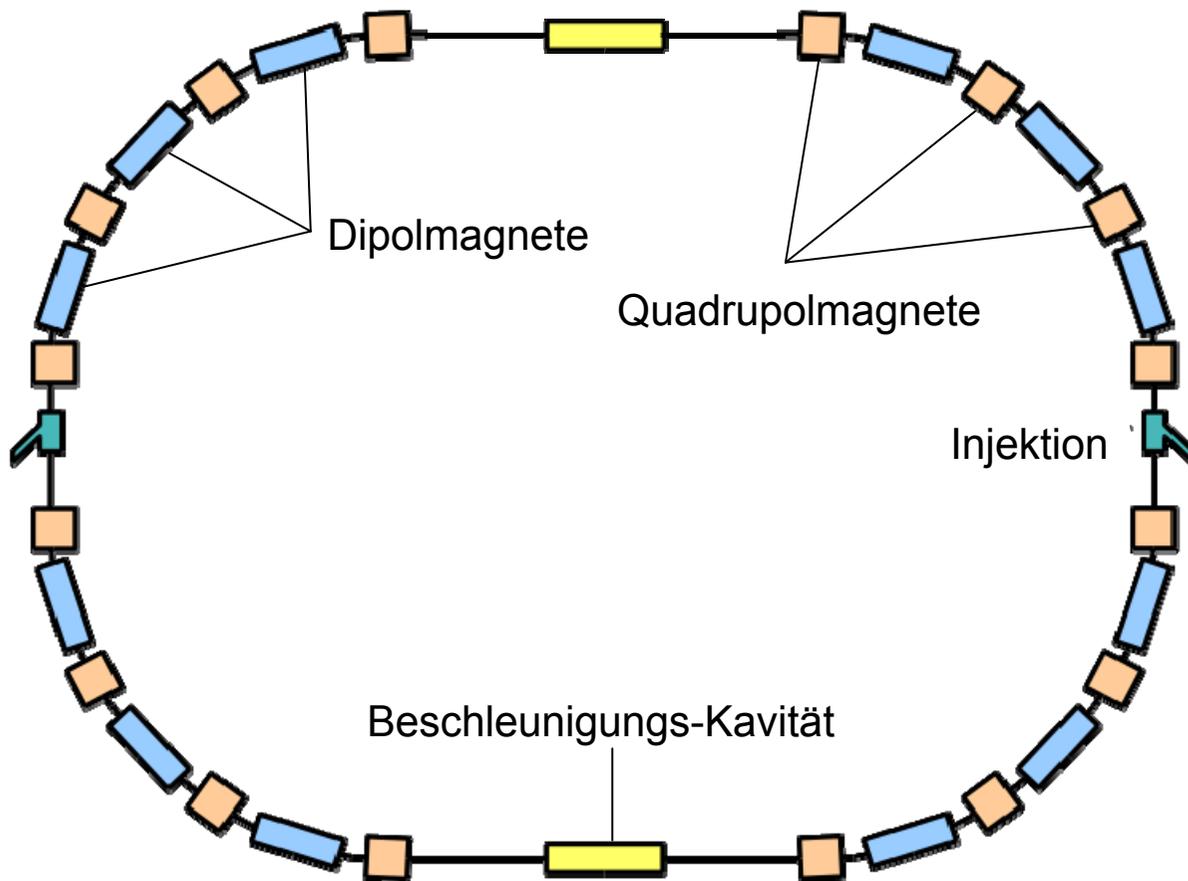


Medizintechnik: modernes Kompaktzyklotron: Einsatz zur Erzeugung medizinisch nutzbarer Radioisotope



2. Synchrotron

- **Synchrotron**: das magnetische Führungsfeld B für die gepulsten Teilchenstrahlen wird **synchrotron** mit der anwachsenden Energie E hochgefahren (CERN-LHC: 13 min Beschleunigungszeit)



Dipolmagnet

Ablenkung der Teilchen
mit festem Radius R

Quadrupolmagnet

Bahn-Fokussierung
auf Soll-Trajektorien

supraleitende Kavität

Beschleunigung mit
HF-Feldern, Ausgleich
von Strahlungsverlusten

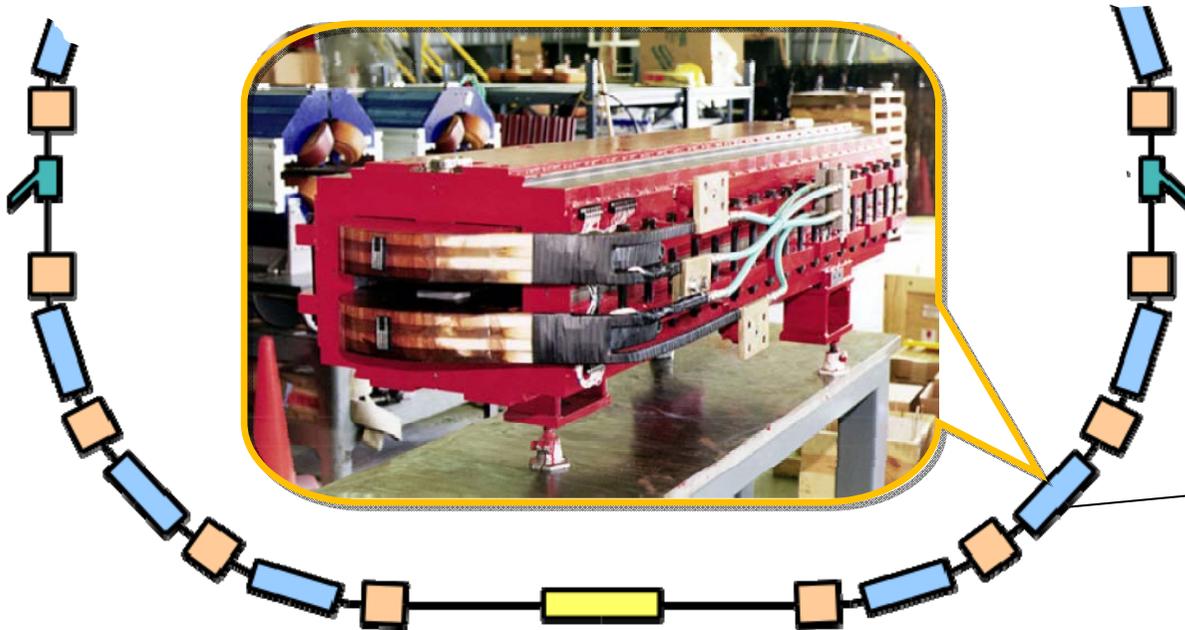
Synchrotron: Dipolmagnete

- **Dipolmagnete:** homogenes Feld zur Ablenkung auf Sollradius r

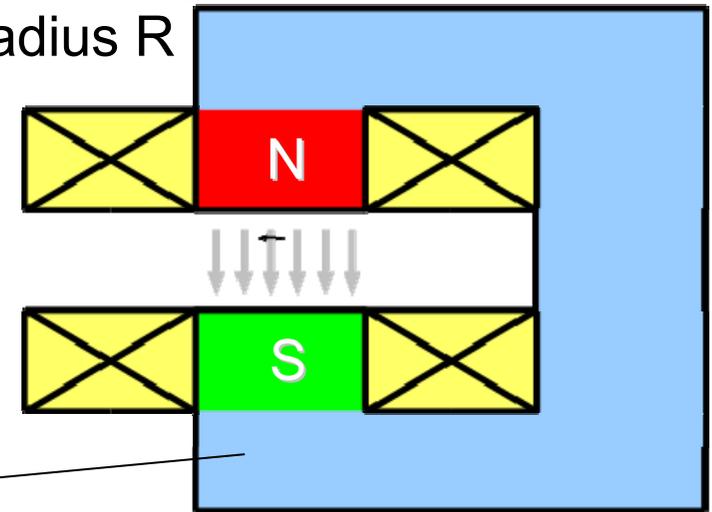
$$p = r \cdot q \cdot B \quad \xrightarrow{q = e \cdot z} \quad c \cdot p = c \cdot r \cdot z \cdot B = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot z \cdot B [\text{T}] \cdot r [\text{m}]$$

$$p [\text{GeV}/c] = 0.3 \cdot z \cdot B [\text{T}] \cdot r [\text{m}]$$

Elektromagnet (Eisenjoch) $B \sim 1 \text{ T}$
 supraleitender Magnet (LHC) $B \sim 9 \text{ T}$



Ablenkung mit festem
 Radius R

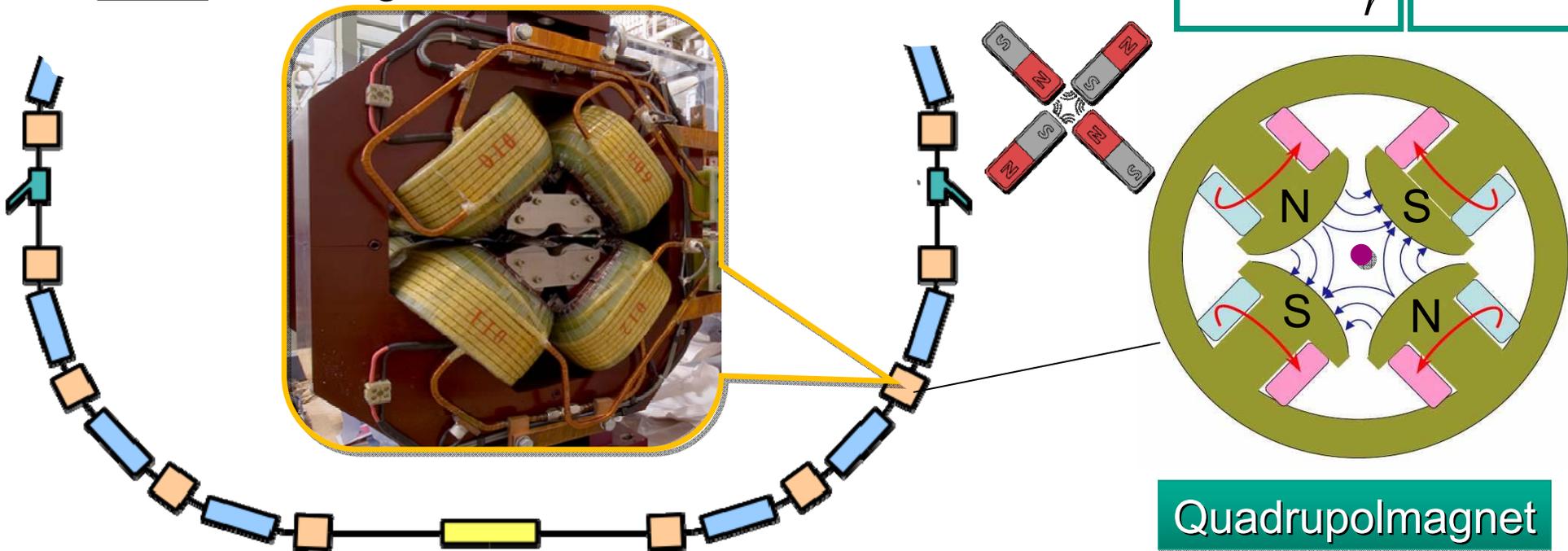


Dipolmagnet

Synchrotron: Quadrupolmagnete

- **Quadrupolmagnete**: Dipolfeldbeitrag verschwindet, die Feldstärke wächst mit wachsendem Abstand von der longitudinalen Achse rasch an
 - ein Quadrupol: Fokussierung in x-Richtung, Defokussierung in y-Richtung
 - **starke Fokussierung** durch alternierende Quadrupolmagnete: gegeneinander gedrehte Quadrupole sind in beide Richtungen fokussierend

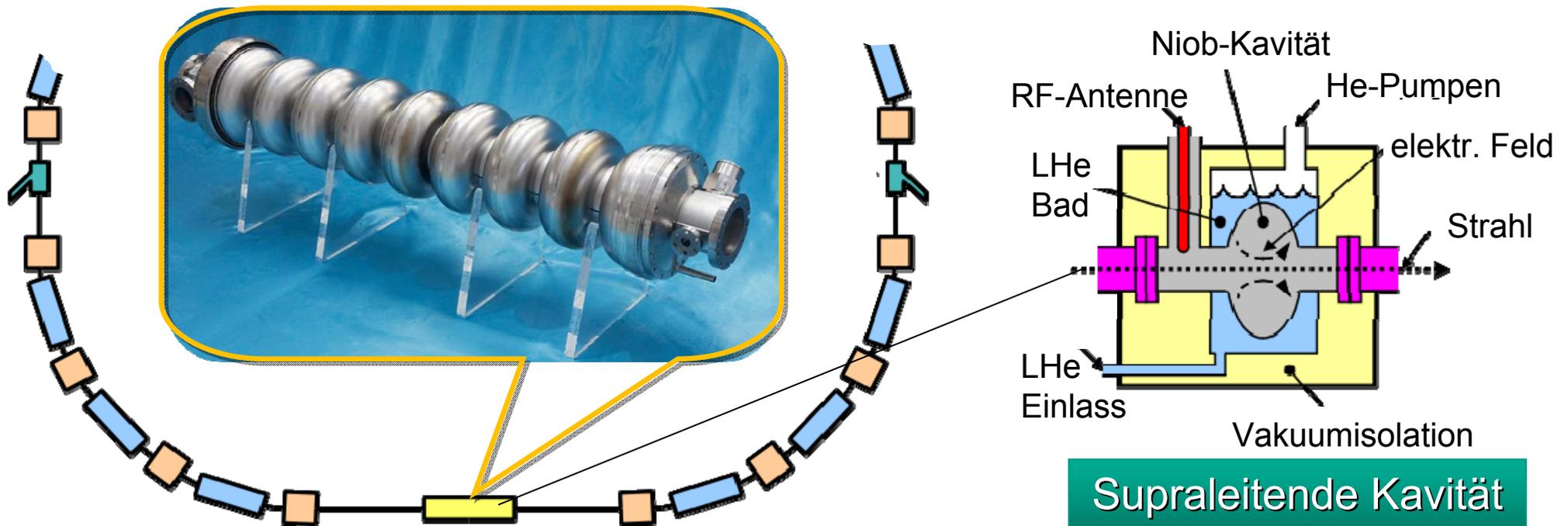
$$B_x = B_0 \cdot \frac{y}{r} \quad B_y = B_0 \cdot \frac{x}{r}$$



Synchrotron: Kavitäten

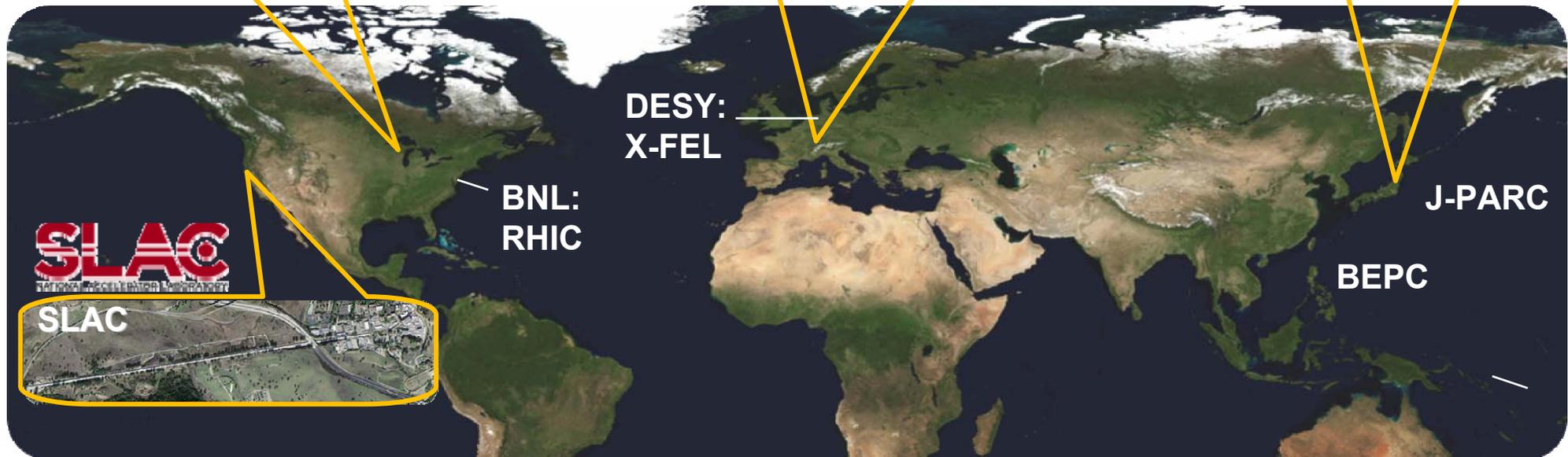
- **Kavitäten:** Anregung resonanter elektrischer Felder via HF-Einkopplung im Frequenzbereich 200 MHz – 3 GHz, enge Bandbreite, hohe Güte Q
 - **normalleitend** (300 K): Cu-Kavität ↪ Verluste durch Wand und Strahl
 - **supraleitend** (1.8 K): Niob-Kavität ↪ hohes Q ($\sim 5 \cdot 10^{10}$), Beschleunigung durch die TM_{01} Mode (Magnetfeld transversal, Elektr. Feld longitudinal)

Aufbau eines Kryomoduls:



3. Internationale Teilchenbeschleuniger

 Fermilab



DESY – Deutsches Elektronen Synchrotron

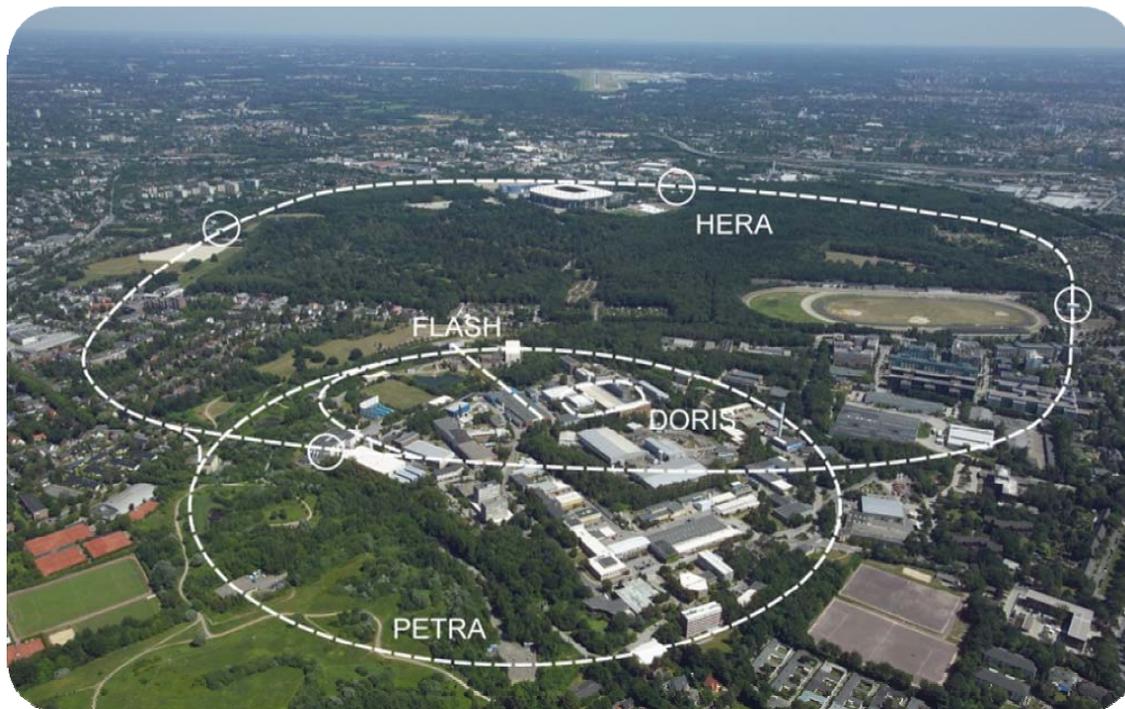


■ HERA: Hadron-Elektron Ring Anlage

Elektron (27.5 GeV) – Proton (820 GeV) Kollisionen , $\sqrt{s} = 320 \text{ GeV}$

Umfang des Rings: 6.3 km, Messbetrieb: 1992-2007 (H1, Zeus, Hermes)
- 650 supraleitende Magnete

■ PETRA: Positron-Elektron Tandem Ring Anlage



- Energien bis 19 GeV
- Nachweis des Gluons (1978)
- heute: PETRA-III
Synchrotronstrahlungsquelle

■ XFEL: X-ray-Free Electron Laser



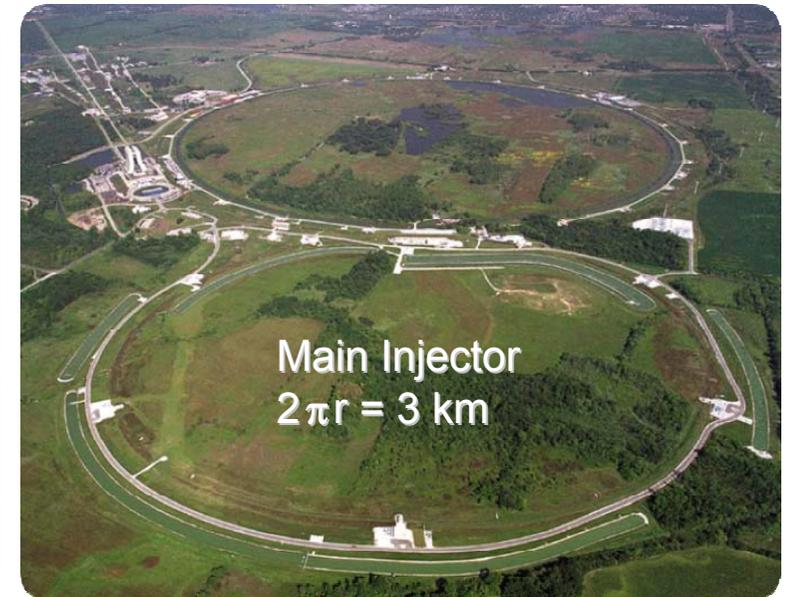
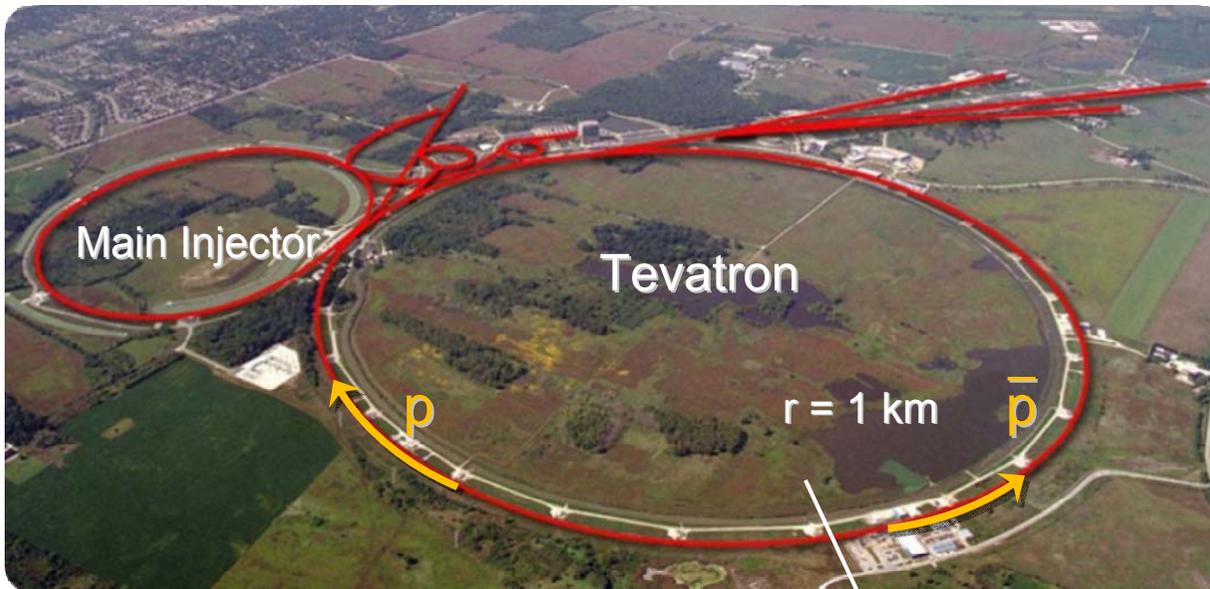
Freie-Elektronen-Laser im
Röntgenbereich mit
 $\Lambda = 0.1 - 6 \text{ nm}$, $\Delta t = 100 \text{ fs}$

Tevatron am Fermilab

- **Tevatron:** Synchrotron für Proton-Antiproton Kollisionen (1987 – 2012)
774 Niob-Titan supraleitende Dipolmagnete (4.2 T), 240 NbTi Quadrupole
Umfang: 6.3 km, Kollisionsenergie bei D0 und CDF: $E_{\text{CMS}} = 1.96 \text{ TeV}$

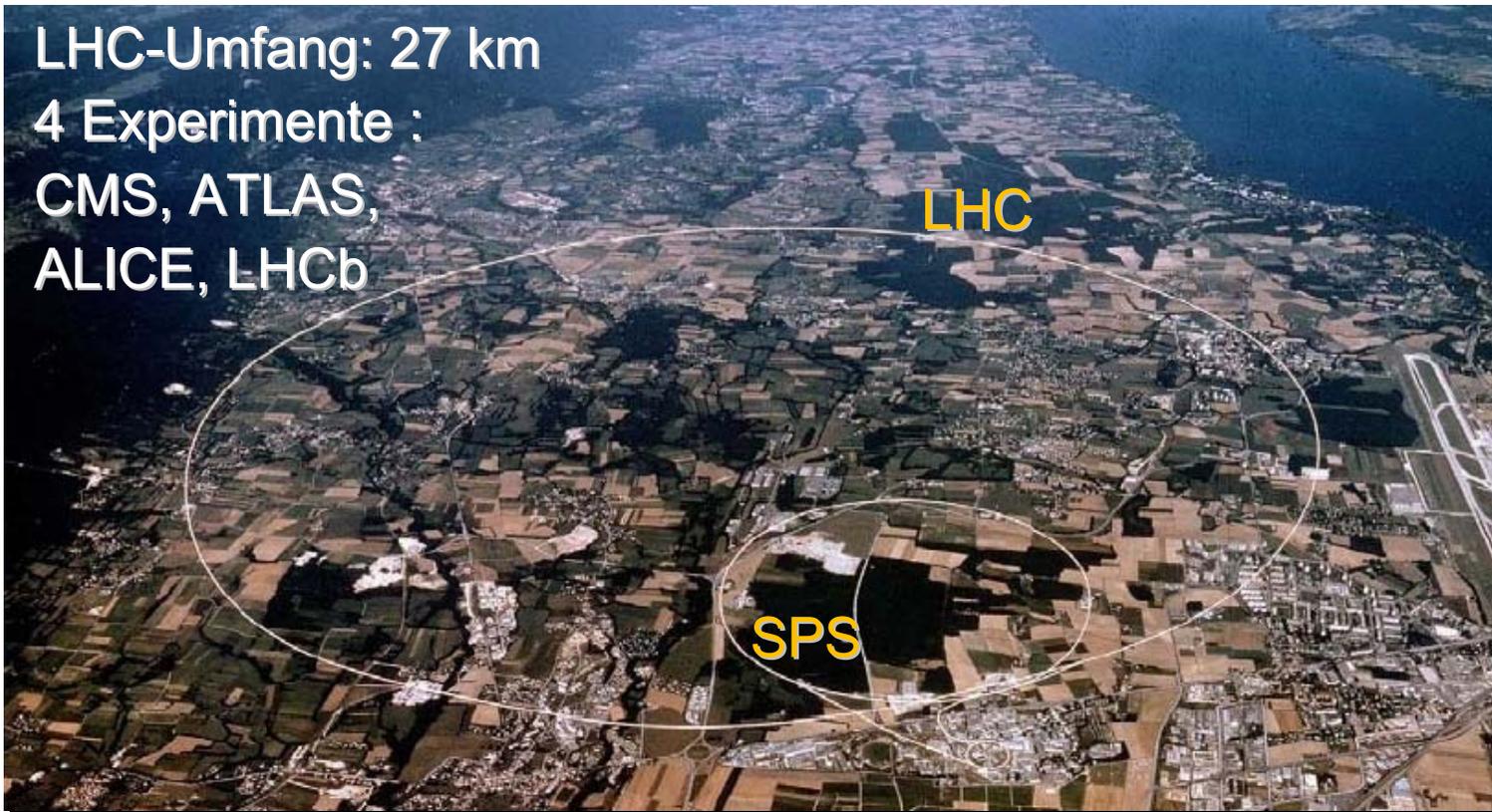
Beschleunigungsstufen:

- I – Cockcroft-Walton: 750 keV H^- , II – Linac: 400 MeV H^- , III – Booster: 8 GeV
- IV – Main Injector: 120 GeV (plus Erzeugung von Antiprotonen, 150 GeV)
- V – Tevatron: 980 GeV (Speicherung und Kollisionen)



LHC - Large Hadron Collider

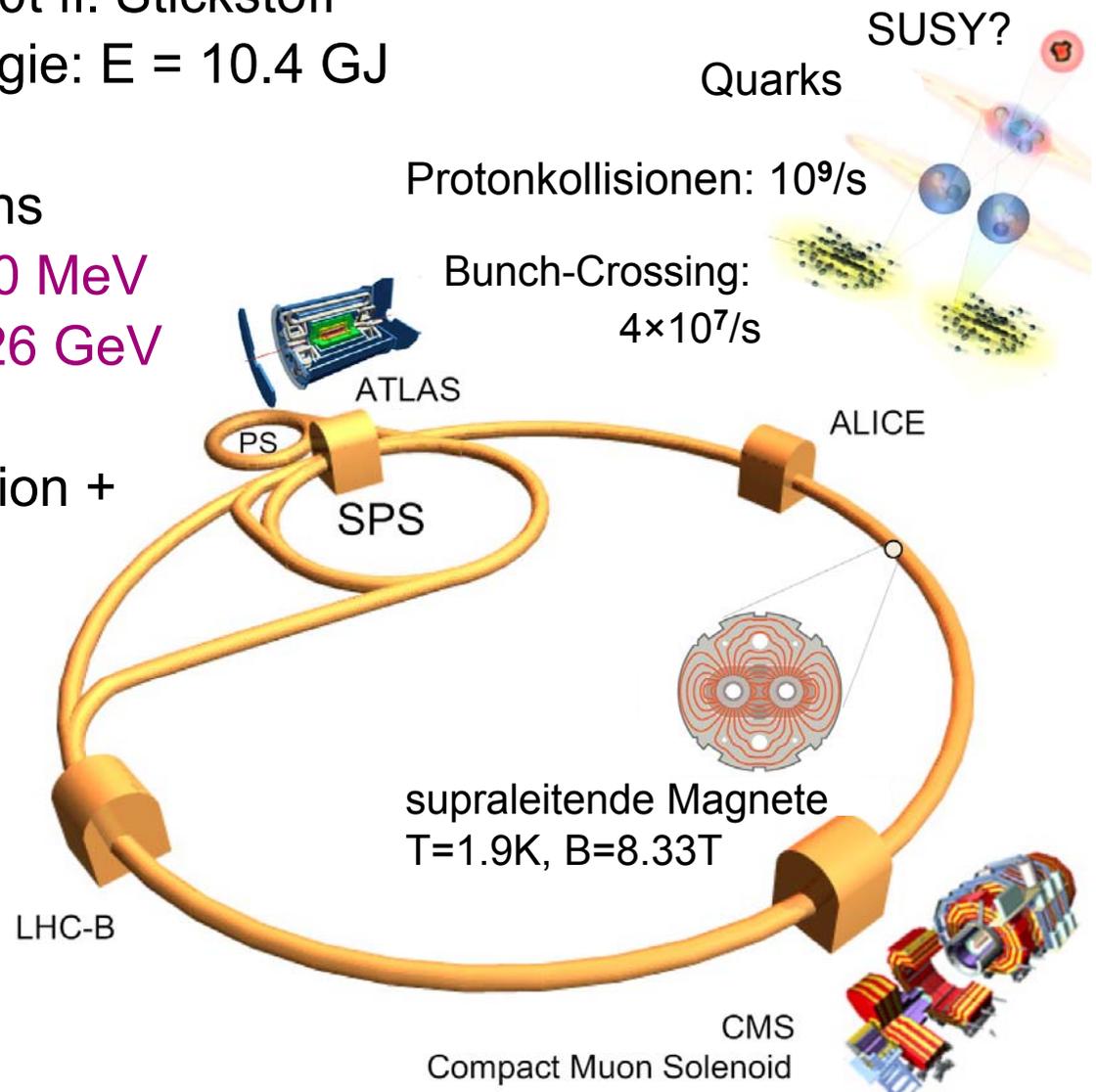
- p-p Kollisionen bei $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ Schwerpunktsenergie
Beginn Datennahme: Frühjahr 2010 bei $E_p = 3.5 \text{ TeV}$
Zielsetzung: Nachweis Higgs-Boson & Supersymmetrie
Suche nach Quark-Gluon Plasma (574 TeV Pb-Ionen)



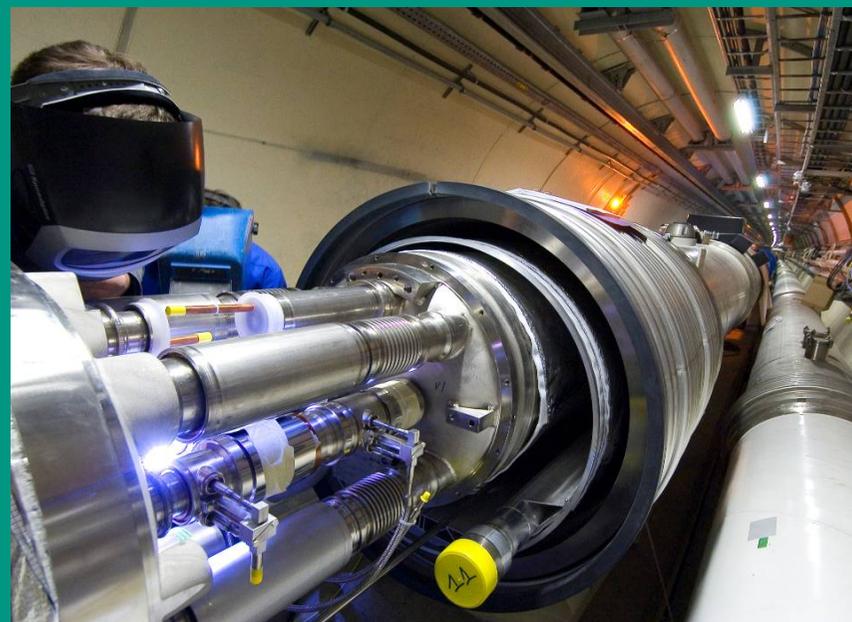
- Design: 1232 Dipol-Magnete mit $B = 8.3 \text{ T}$ (bei 7 TeV)
 - Kühlung: 120t He (1.8 K), 10.000t fl. Stickstoff
 - gespeicherte magnetische Energie: $E = 10.4 \text{ GJ}$
 - Strahlenergie: Protonen 724 MJ
 - Strahlpakete kollidieren alle 25 ns
 - **Beschleunigung**: I – LINAC 2: **50 MeV**
 II – Booster: **1.4 GeV**, III – PS: **26 GeV**
 IV – SPS: 450 GeV
 V – LHC: derzeit 3.5 TeV (Injektion + Beschleunigung: 40 min.)

200 Tage Physik-Runs/Jahr
integrierte Luminosität $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$

LHC Strahlparameter -	
Luminosität	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Bunche/Strahl	2808
Protonen/Bunch	1.15×10^{11}



BAU DES BESCHLEUNIGERS

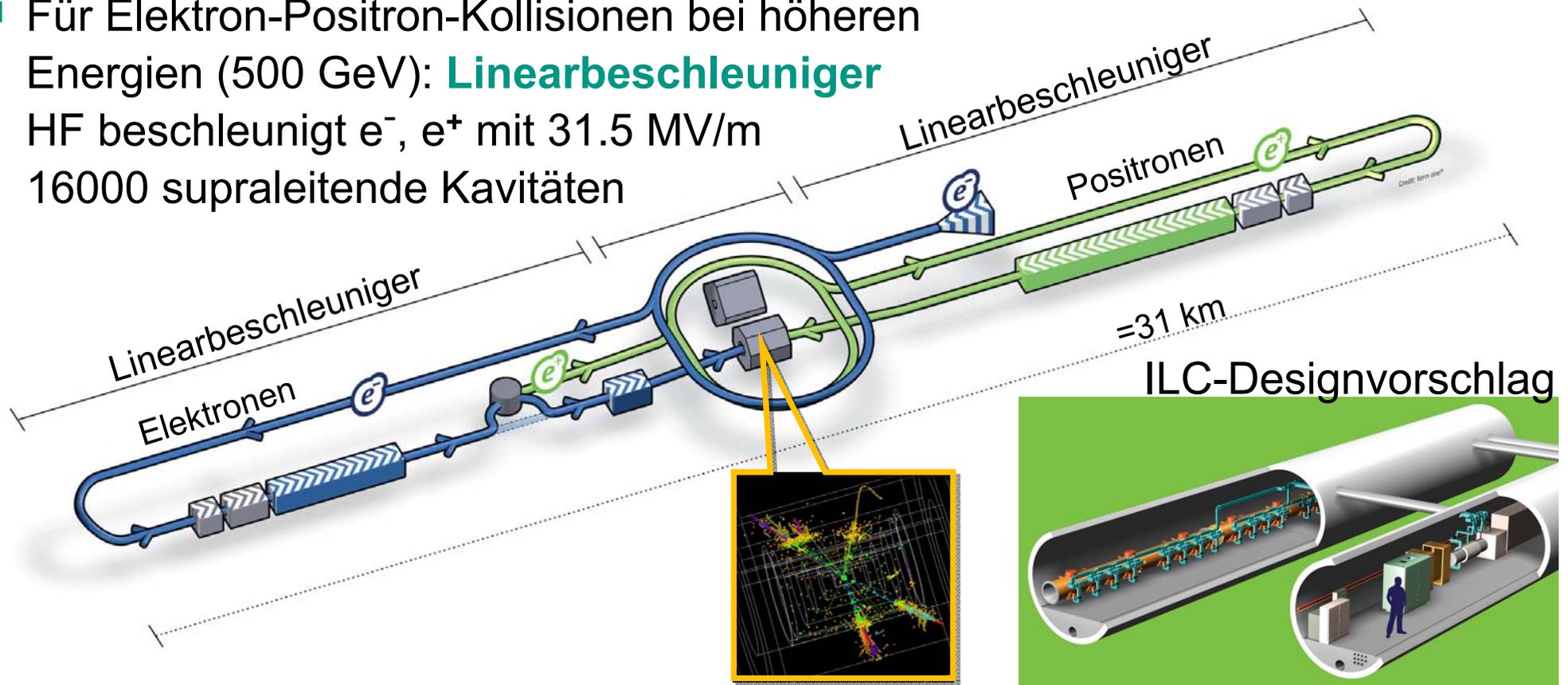


Insgesamt
30.000 km
Transportweg

ILC – International Linear Collider



- Hohe Synchrotronstrahlungsverluste beim LEP Ringbeschleuniger:
 - bei $E = 50 \text{ GeV}$ (e^- , e^+) $\Delta E = 130 \text{ MeV}$ pro Umlauf
 - bei $E = 90 \text{ GeV}$ (e^- , e^+) $\Delta E = 1.7 \text{ GeV}$ pro Umlauf ($\Delta P = 17 \text{ MW}$)
- Für Elektron-Positron-Kollisionen bei höheren Energien (500 GeV): **Linearbeschleuniger**
HF beschleunigt e^- , e^+ mit 31.5 MV/m
16000 supraleitende Kavitäten



Luminosität L bei Collider-Experimenten

Luminosität L

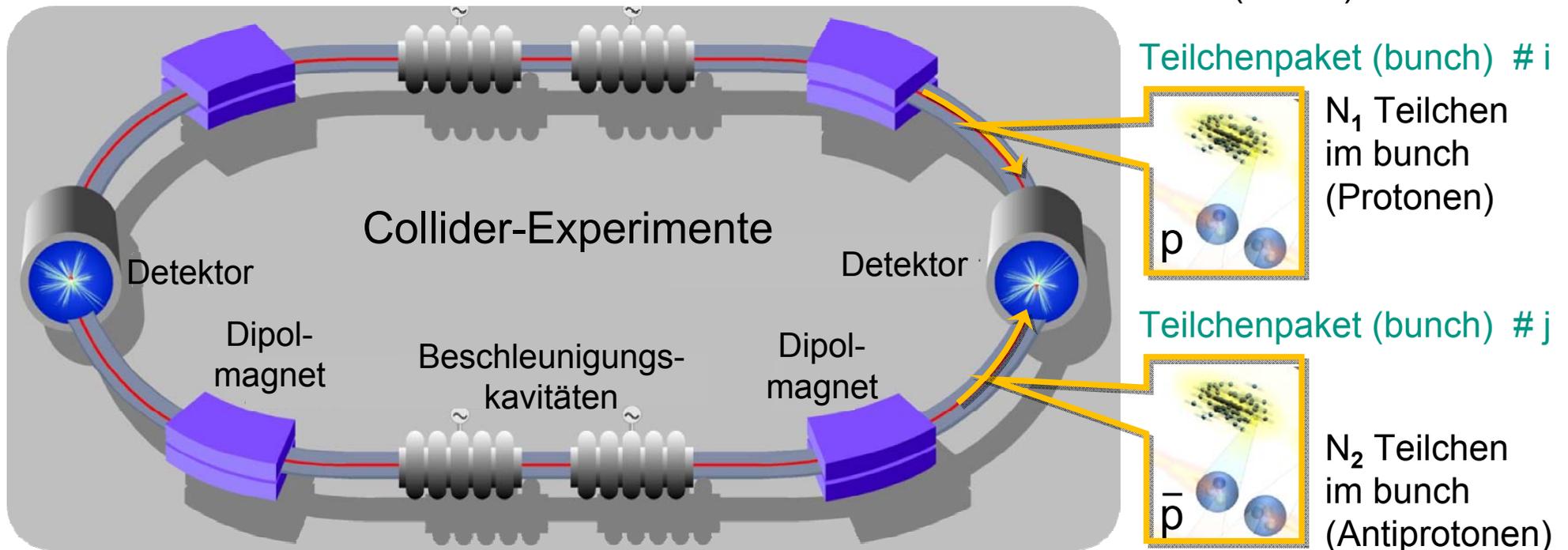
- verbindet Wirkungsquerschnitt σ mit Rate R

- L in $[\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}]$, integrierte Luminosität $\int L dt$ in $[\text{cm}^{-2}]$

$$R = \frac{dN}{dt} = \sigma \cdot L$$

$$L = f \cdot n \cdot \frac{N_1 \cdot N_2}{4\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}$$

f = Umlauffrequenz des Strahls = $c/2\pi r$
 n = Zahl der Teilchenpakete (bunch)
 $N_{1,2}$ = # Teilchensorte 1,2 pro bunch
 $\sigma_{x,y}$ = effektive Fläche des Strahls bei der Kollision (klein!!)

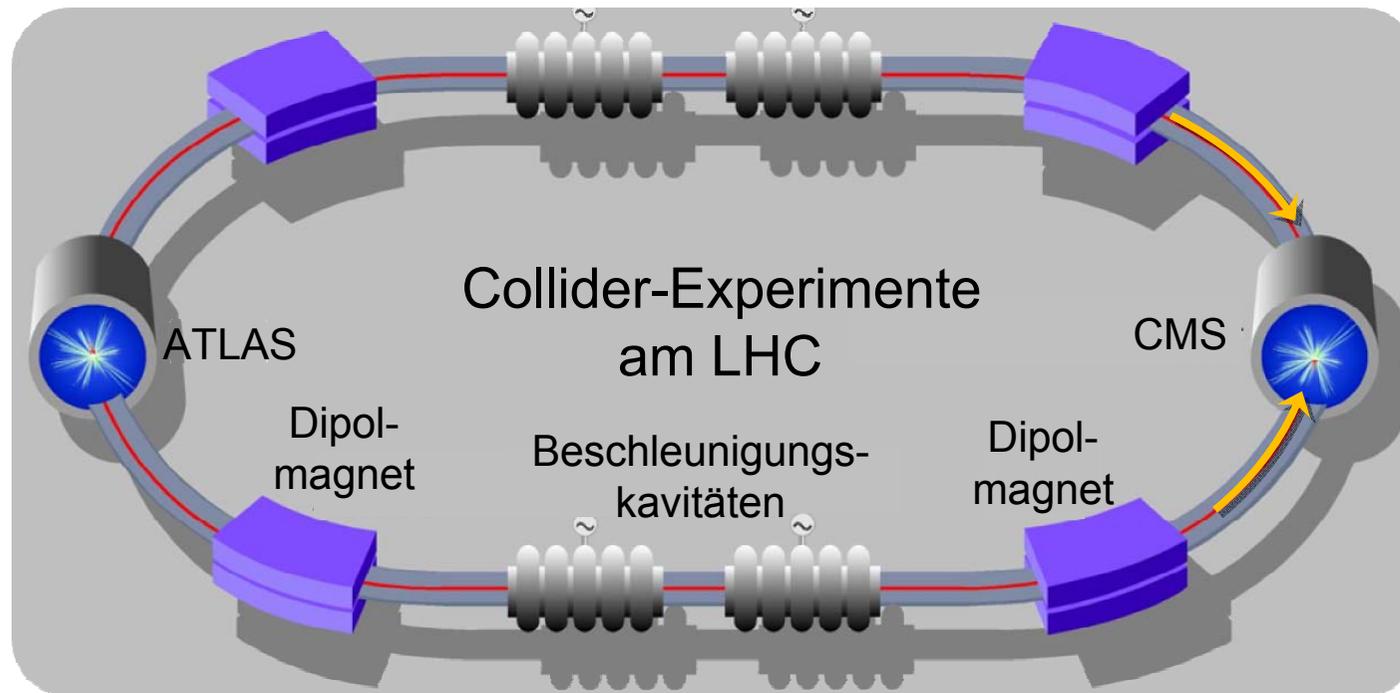


Luminosität am LHC

- Designluminosität am LHC: $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$$L = f \cdot n \cdot \frac{(N_1)^2}{4\pi \cdot \sigma_b^2}$$

- f = Umlauffrequenz des Strahls = $c/2\pi r$ $\sim 10^4 \text{ s}^{-1}$
- n = Zahl der Teilchenpakete = 2808
- N_1 = # Protonen pro bunch = $1.15 \cdot 10^{11}$
- σ_b = effektive Fläche des Strahls bei der Kollision (klein!!) = $16 \mu\text{m}$



- mit $\sigma_{\text{inel}} = 60 \text{ mb}$ beträgt am LHC die Kollisionsrate R der Protonen
- $R = \sigma_{\text{inel}} \cdot L \sim 10^9 \text{ s}^{-1}$

Verfügbare Energie in Beschleunigern

