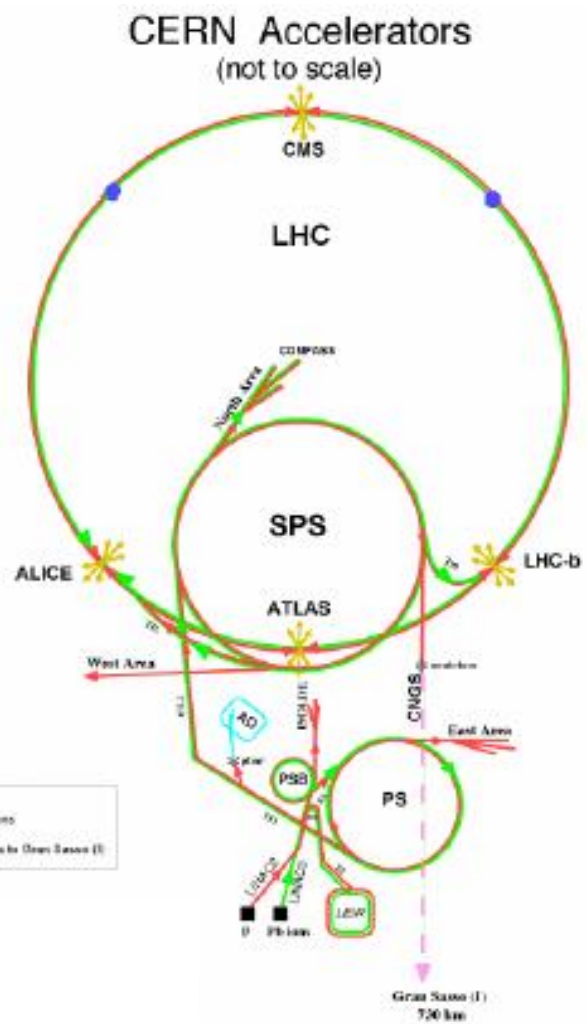




Teilchenbeschleuniger: Der Large Hadron Collider und seine Injektorkette

10. November 2022

Dr. Michael Benedikt
CERN





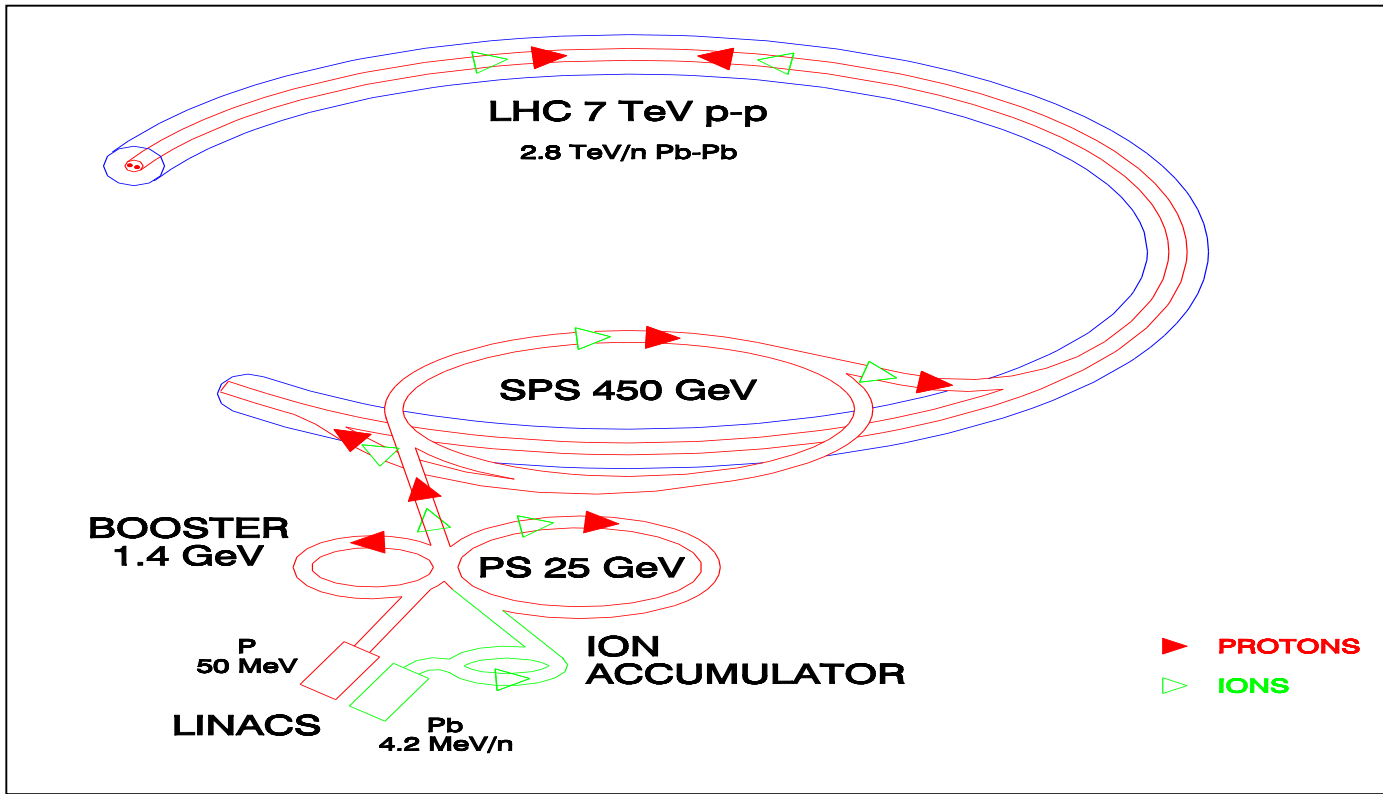
Beschleuniger für Hochenergiephysik

- **Erzeugung hoher Energiedichte (auf kleinstem Raum)**
 - Erzeugung von Teilchen nach Masse – Energie Äquivalenz: $E = m \cdot c^2$
 - „Urknallsimulation“ -> gleiche Bedingungen, gleiche Teilchen.
- **Verwendung von Teilchen als Sonden**
 - Teilchen-Welle Dualismus: $E = h\nu$, $\lambda\nu = c$, $\lambda \propto 1/E$.
 - Benötigt ebenfalls höchste Teilchenenergien.
- **Prinzip – warum Teilchenbeschleuniger**
 - Teilchenbeschleuniger erteilt Teilchen (hohe) kinetische Energie.
 - Teilchen auf **ruhendes Ziel** geschossen: **“fixed target” Methode**.
oder mit **gegenlaufenden Teilchen** kollidiert **“collider” Methode**.
 - Beobachtung mit Detektoren um Kollisionpunkt.



LHC – Injektorbeschleunigerkette (i)

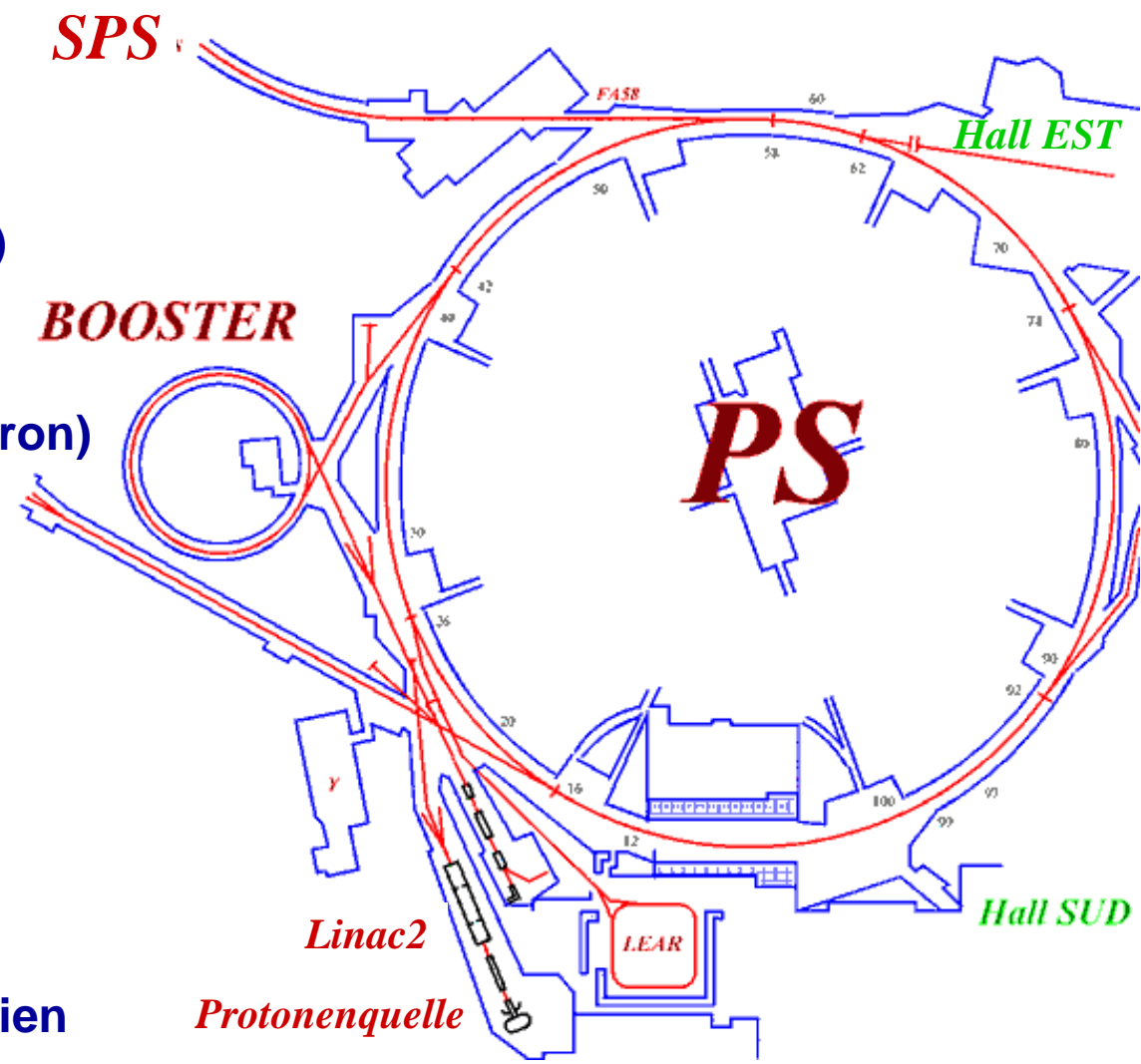
- Funktionsprinzip ähnlich der Gangschaltung beim Auto...
 - Je “schneller” (je mehr Energie/Impuls) - desto höher der Gang (größer der Beschleuniger)
 - Limitierter dynam. Arbeitsbereich: Stromversorgungen, Magnete, RF ($\beta < 1$)
 - Typischerweise 1 Größenordnung im Impuls pro Stufe.





LHC – Injektorbeschleunigerkette (ii)

- **Protonenquelle**
 - 90 keV, gepulst alle 1.2 s.
- **Linac2 (Linearbeschleuniger)**
 - 50 MeV, gepulst alle 1.2 s.
- **PS Booster (4-Ring Synchrotron)**
 - 1.4 GeV, 1.2 s Zyklus.
- **PS (Synchrotron)**
 - 25 GeV, 3.6 s Zyklus.
- **SPS (Synchrotron)**
 - 450 GeV, 21.6 s Zyklus.
- **Verbunden durch Transferlinien**



Startpunkt...

- 90 kV Hochspannungsplattform im Faraday-Käfig.

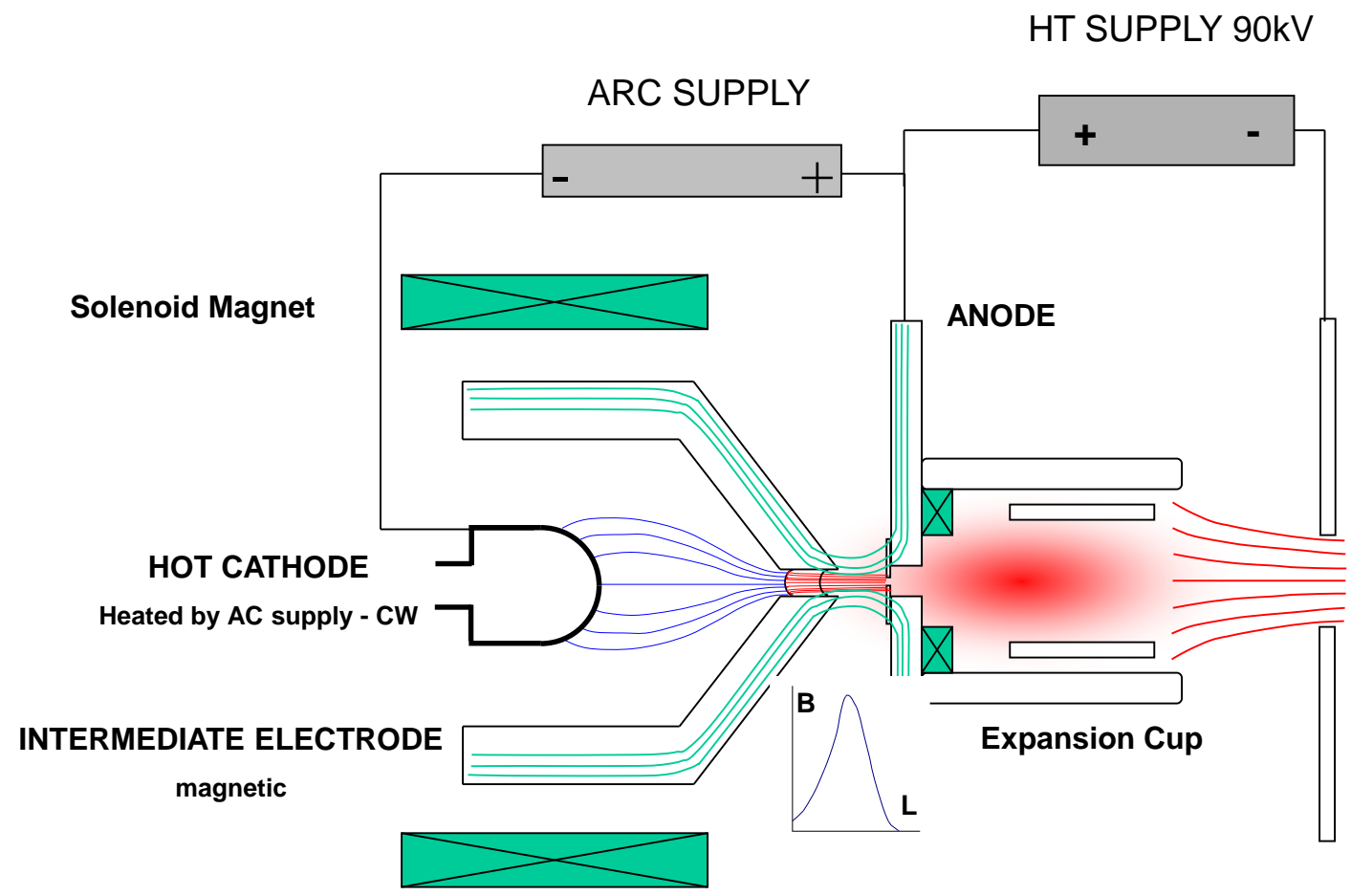


Modell
(1:1)

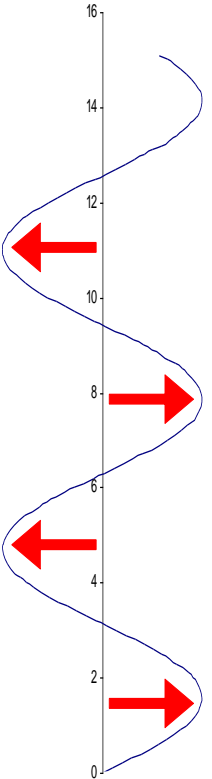
Strahlweg
zu Linac2



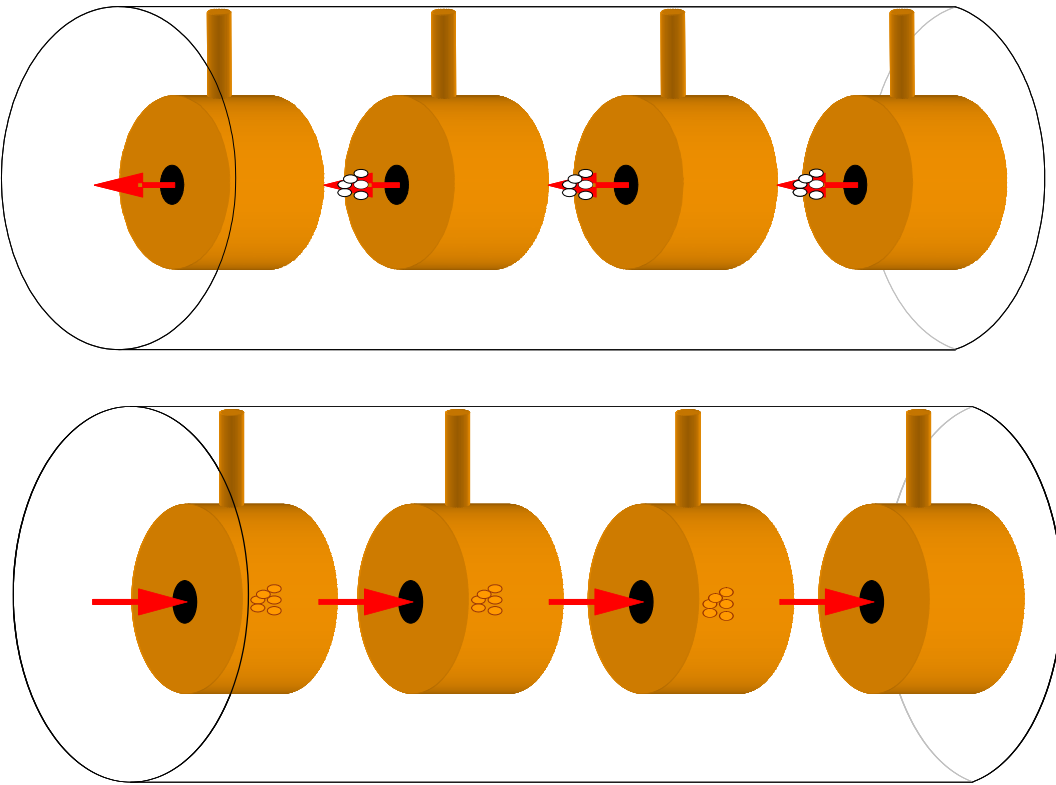
Duoplasmatron Protonenquelle (i)



Alvarez Linearbeschleuniger - Prinzip



Beschleunigungs
Feld 200 MHz



Teilchen werden
zwischen den
Driftröhren
beschleunigt.

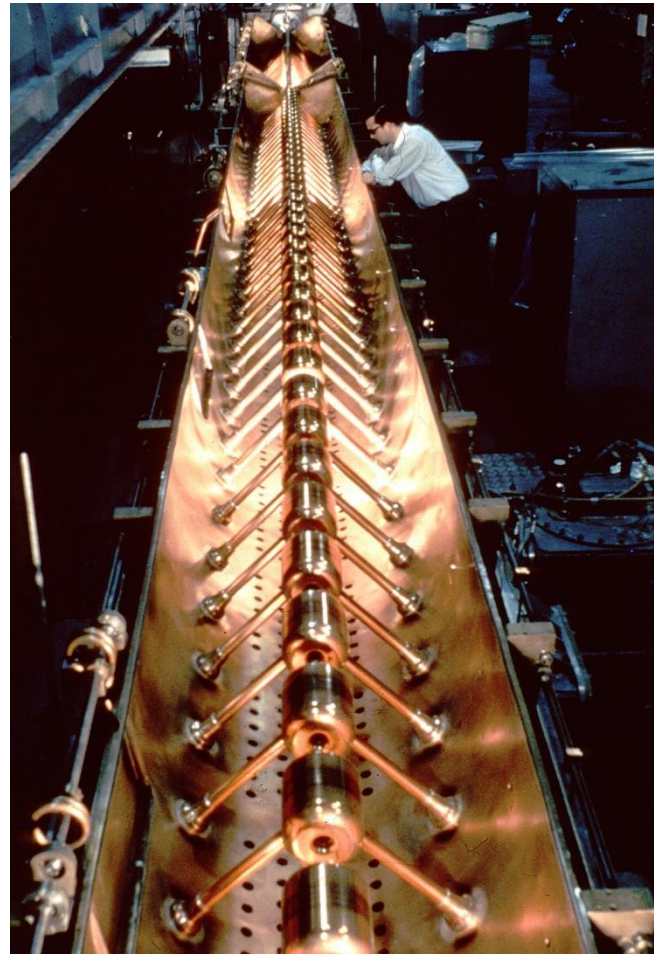
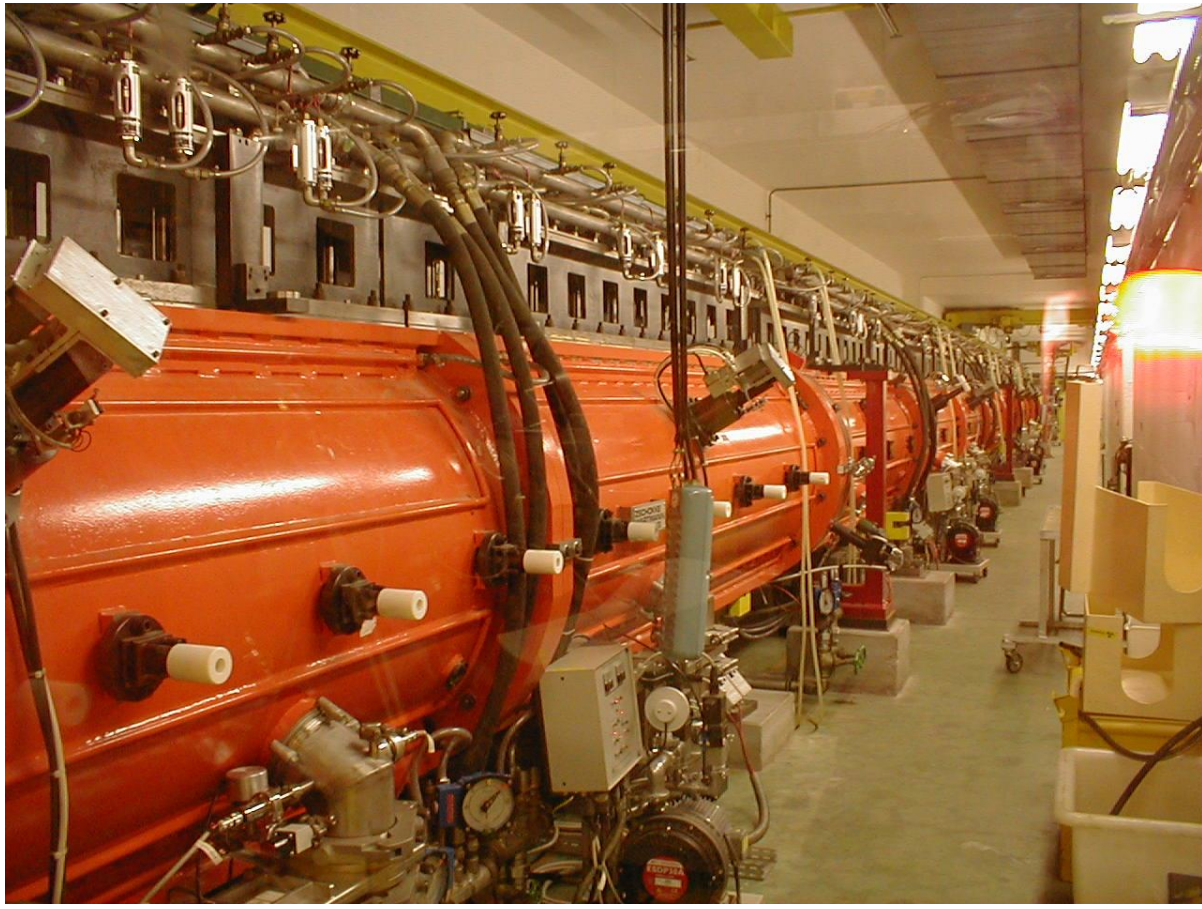
$\frac{1}{2}$ RF Periode
später würden
Teilchen wieder
gebremst. →
Abschirmung in
der Röhre.

**Länge der Driftröhren und Abstände nimmt mit steigender Teilchenenergie zu
(schnellerer Strahl legt größere Distanz pro RF Periode zurück).**



Linac2 – Alvarez Linearbeschleuniger

- Folgt auf Protonenquelle, beschleunigt den Strahl auf **50 MeV**.
- Beschleunigung mit elektrischem Feld, Fokussierung mit Quadrupolen.
- RF 200 MHz, Länge 30 m.





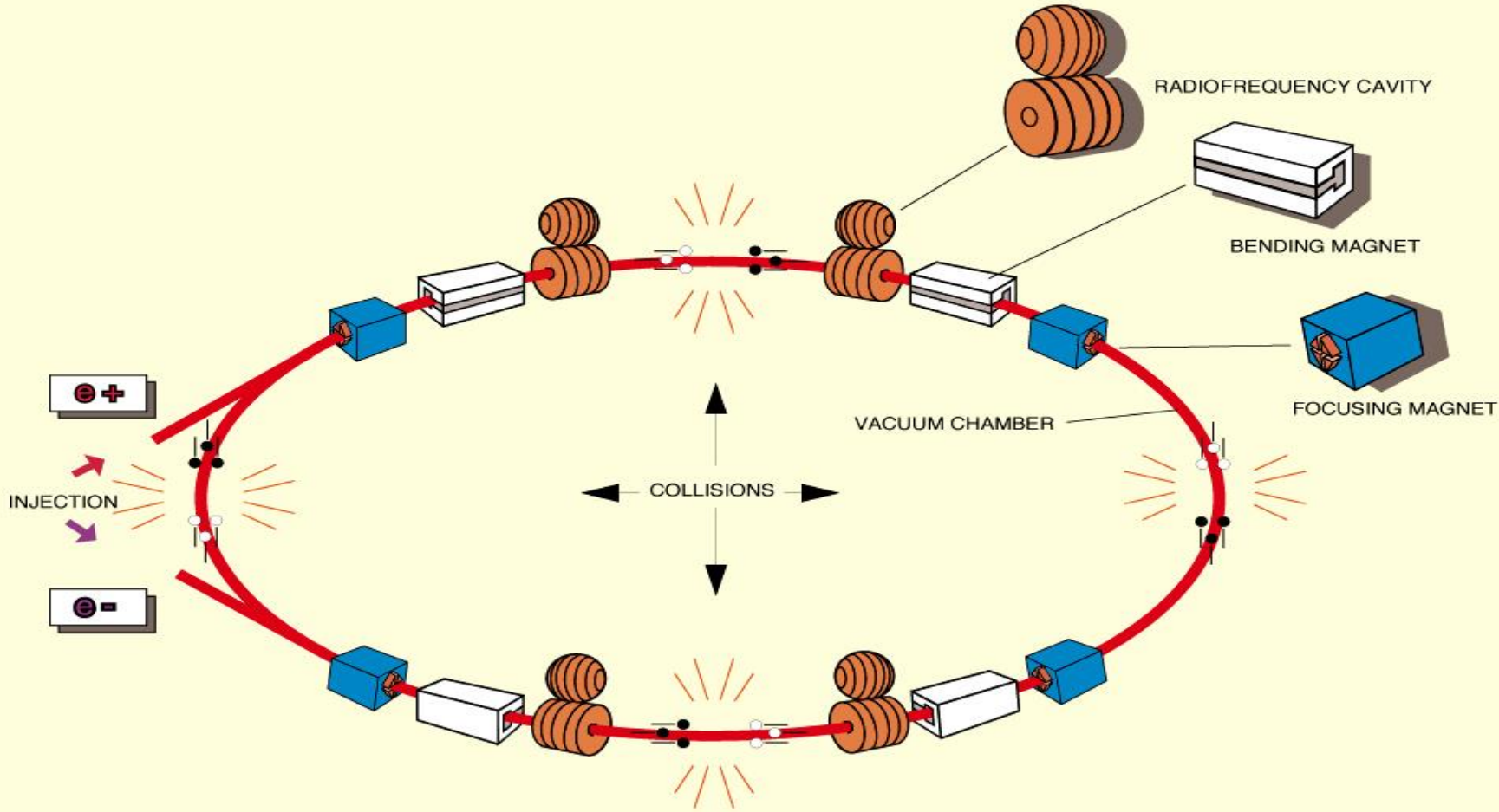
Hauptkomponenten von Synchrotrons

- **Synchrotron (Kreisbeschleuniger, fixer Bahnradius, viele Umläufe)**
 - **Ablenkmagnete (Dipole)** um den Strahl auf der Umlaufbahn zu halten
 - Sollbahn definiert durch Ablenkmagnete und gerade Verbindungen.
 - **Fokussiermagnete (Quadrupole)** um den Strahl stabil zu halten.
 - Nicht alle Teilchen sind genau auf Sollbahn, Injektionsfehler, Ablenkfehler in Dipolmagneten (limitierte mechanische und elektrische Präzision)
 - **Beschleunigungsstrukturen (Kavitäten)** um den Strahl mit hochfrequenten elektrischen Wechselfeldern zu beschleunigen.
 - Prinzip: Synchrotrons arbeiten mit niedrigen Beschleunigungsspannungen (viele Umläufe, Energiegewinn pro Umlauf $q \cdot U$), benötigen aber Dipole, mit sehr hohen Magnetfeldern bei hohen Teilchenenergien, für Kreisbahn.



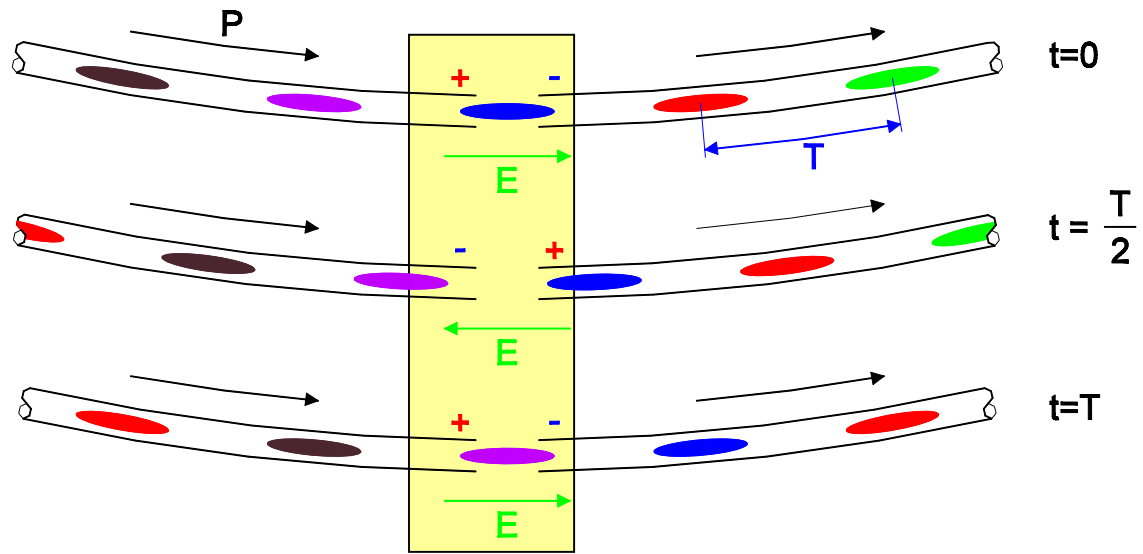
Hauptkomponenten von Synchrotrons

THE PRINCIPAL MACHINE COMPONENTS OF THE LEP ACCELERATOR.



CERN AC - E509

HF elektrische Felder–Beschleunigung



- Der Strahl macht im **Synchrotron** 10^4 bis 10^6 Umläufe pro Sekunde.
- An einer (mehreren) Stellen ist eine **Hochfrequenz-Beschleunigerstrecke** (kV...MV), bei deren Durchquerung der Strahl Energie (keV.....MeV) gewinnt.
- Es ergibt sich eine **Strahlstruktur (Pakete)**, innerhalb einer (Zeit)Periode T (Abstand zwischen 2 Teilchenpaketen) durchläuft **E** eine volle Sinuswelle.
- Anzahl (möglicher) Pakete = Hochspannungsfrequenz/Umlauffrequenz = h.

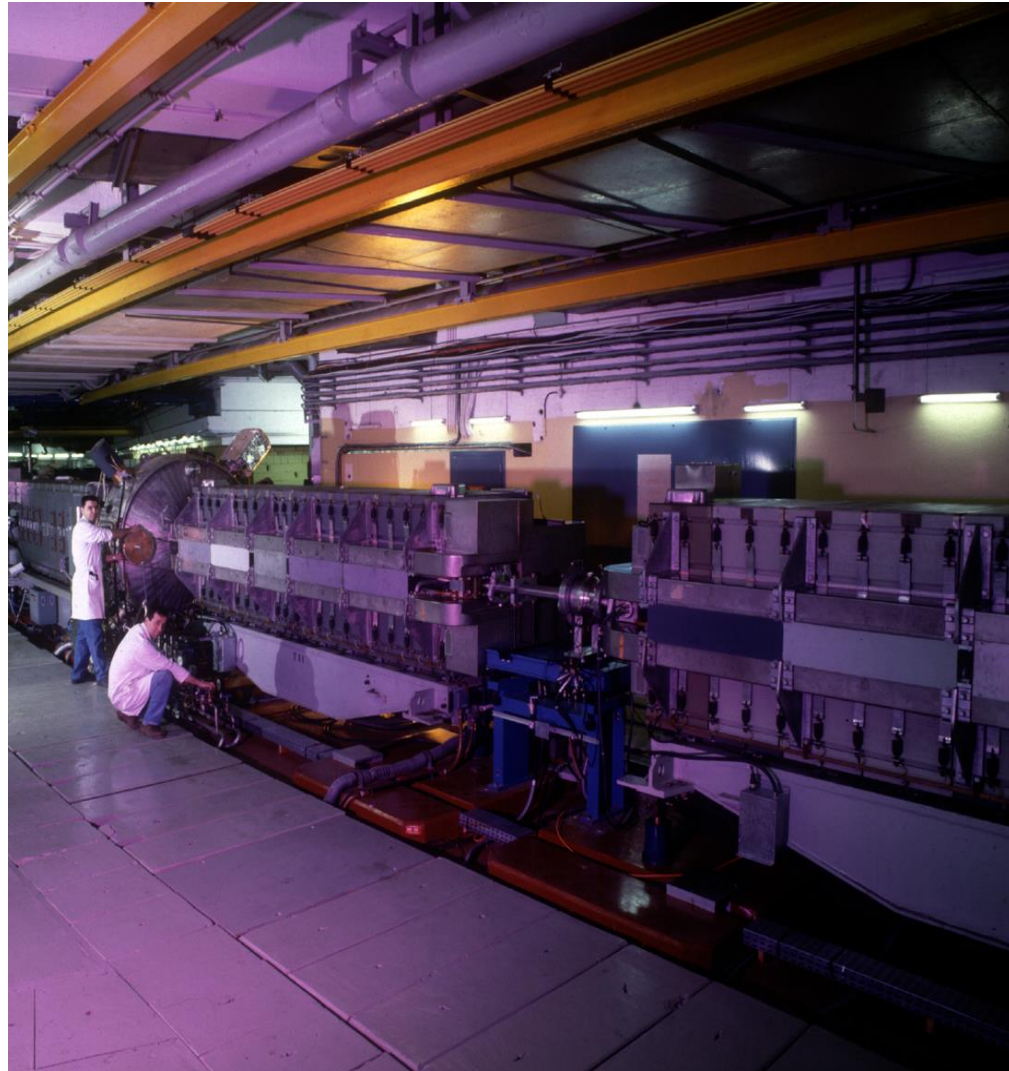
PS Booster Synchrotron (PSB)

- **Synchrotron mit 4 vertikal separierten Ringen (Radius 25 m) (Umfang $\frac{1}{4}$ des PS Synchrotrons).**
- **Injektion des ($\sim 20\mu\text{s}$) Linacstrahles nacheinander in die 4 Ringe**
- **1 Teilchenpaket pro Ring**
- **Beschleunigung 50 MeV \rightarrow 1.4 GeV.**
- **Extraktion zum PS (1 bis 4 Pakete).**
- **Zykluslänge 1.2 s.**



Proton Synchrotron (PS)

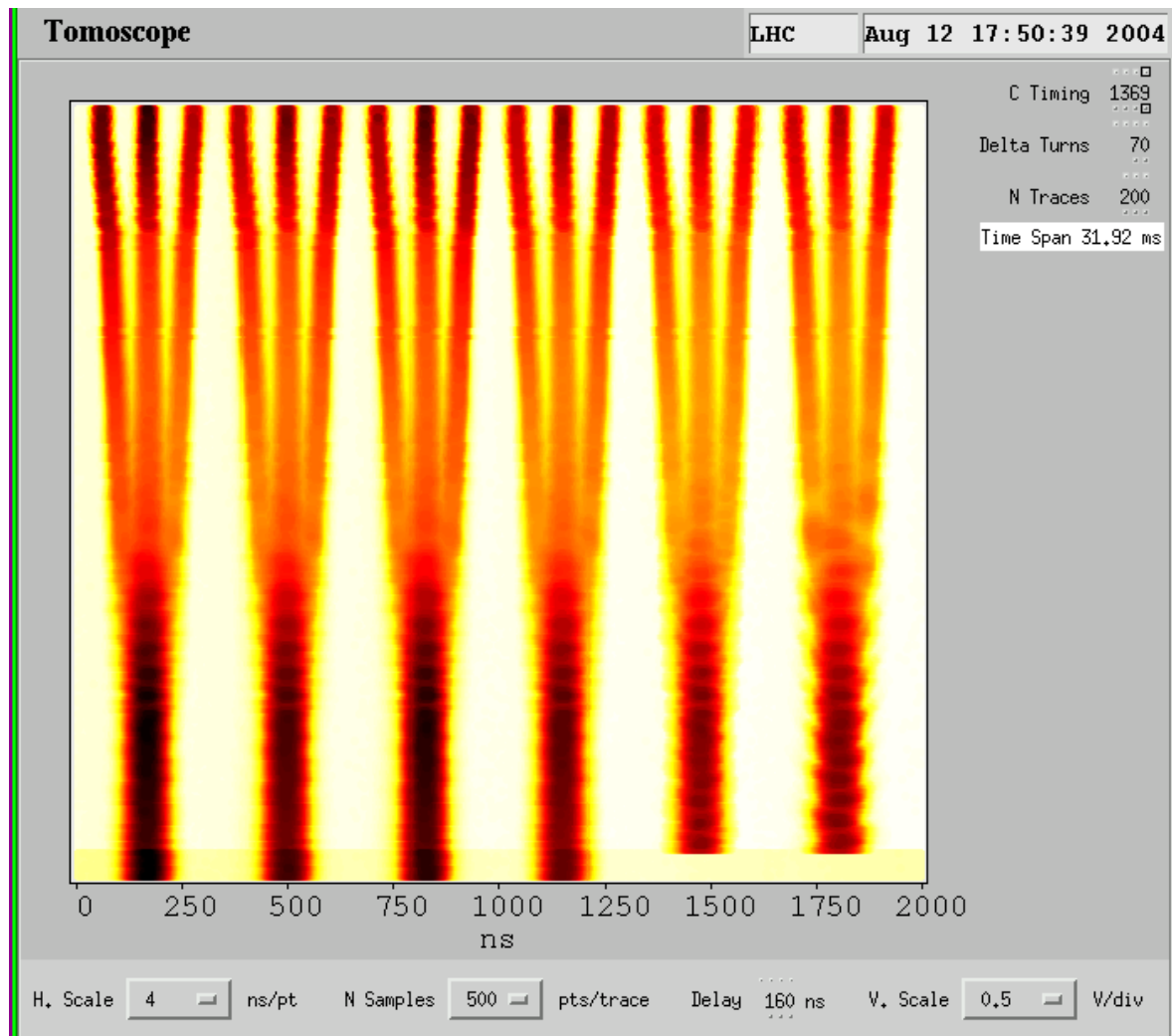
- Synchrotron, (Radius 100 m)
- Doppelinjektion vom PSB:
4 Pakete + 2 Pakete 1.2 s später
- Beschleunigung 1.4 → 25 GeV.
- Longitudinale Aufspaltung der
6 Pakete in 72 Pakete:
→ Erzeugt LHC Zeitstruktur
(25ns Paketabstand).
- Extraktion der 72 Pakete zum SPS.
- Zykluslänge 3.6 s





Dreifach Aufspaltung bei 1.4 GeV

- Wasserfall-Ansicht der longitudinalen Gymnastik
- Injektion des 2.PSB batch (Pakete 5 & 6)
- Dreifach Aufspaltung mit verschieden gestimmten Kavitäten des 10 MHz Systems.
 - h=7 zu h=21
 - Horizontal $2\mu\text{s}$ (~ 1 Umlauf)
 - Vertical 32 ms
 - Z-Richtung: Intensität

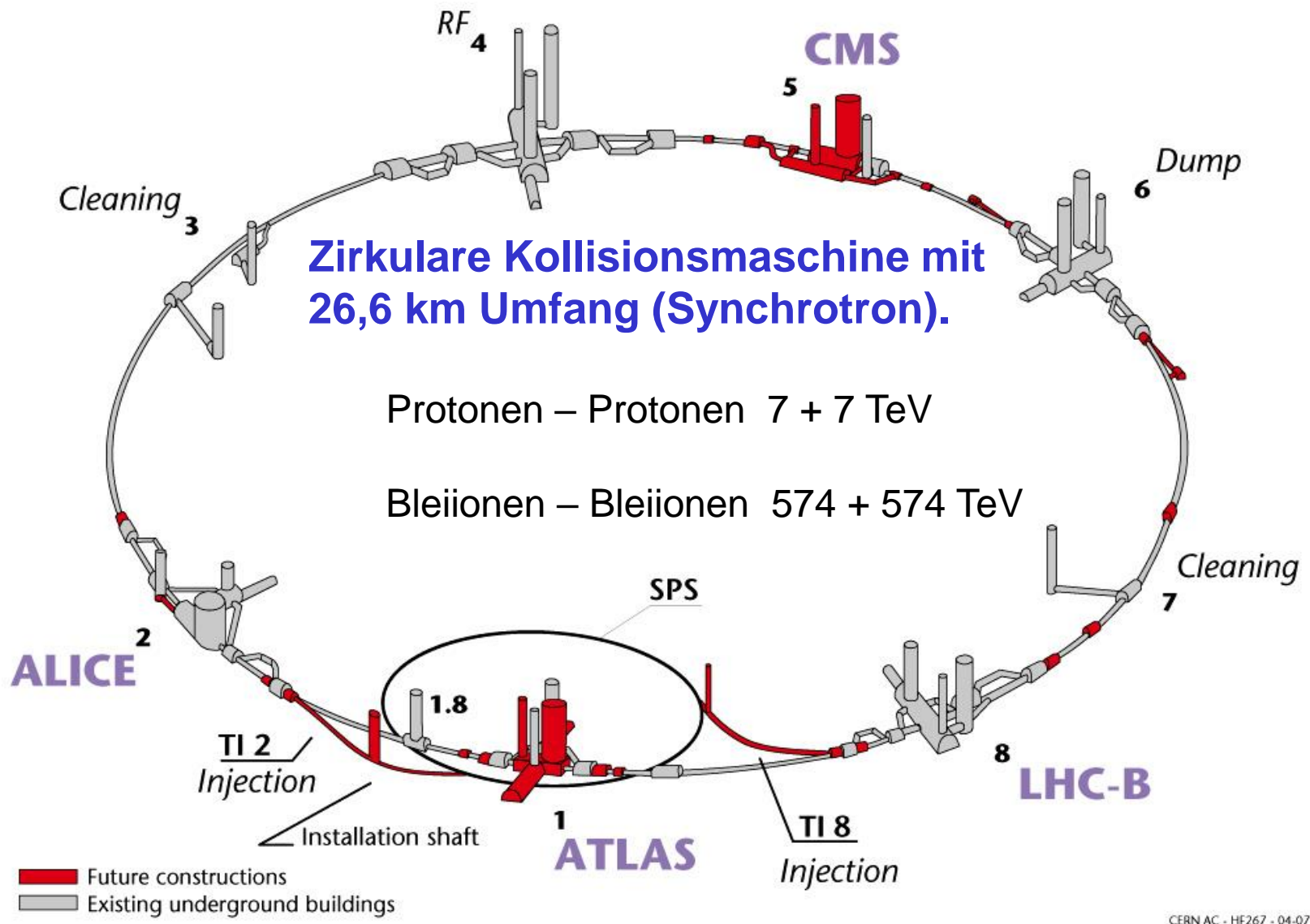


- Synchrotron, (Radius 1100 m)
- Bis zu 4 Injektionen von jeweils 72 Paketen vom PS im Abstand von 3.6 s.
- Beschleunigung 25 → 450 GeV.
- Überprüfung der Strahlqualität.
- Extraktion von bis zu 288 Pakten zum LHC.
- Zykluslänge 21.6 s





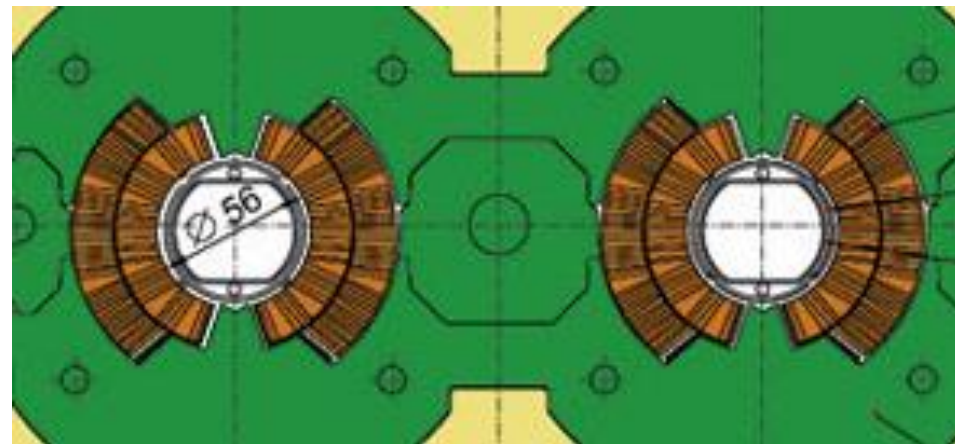
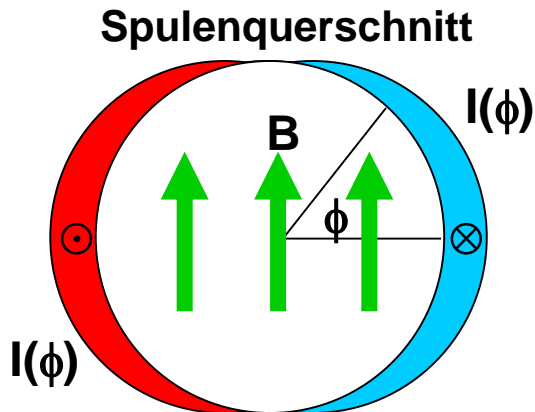
Der Large Hadron Collider – LHC



CERN AC - HF267 - 04-07-1997

Dipolmagnete für hohe Felder

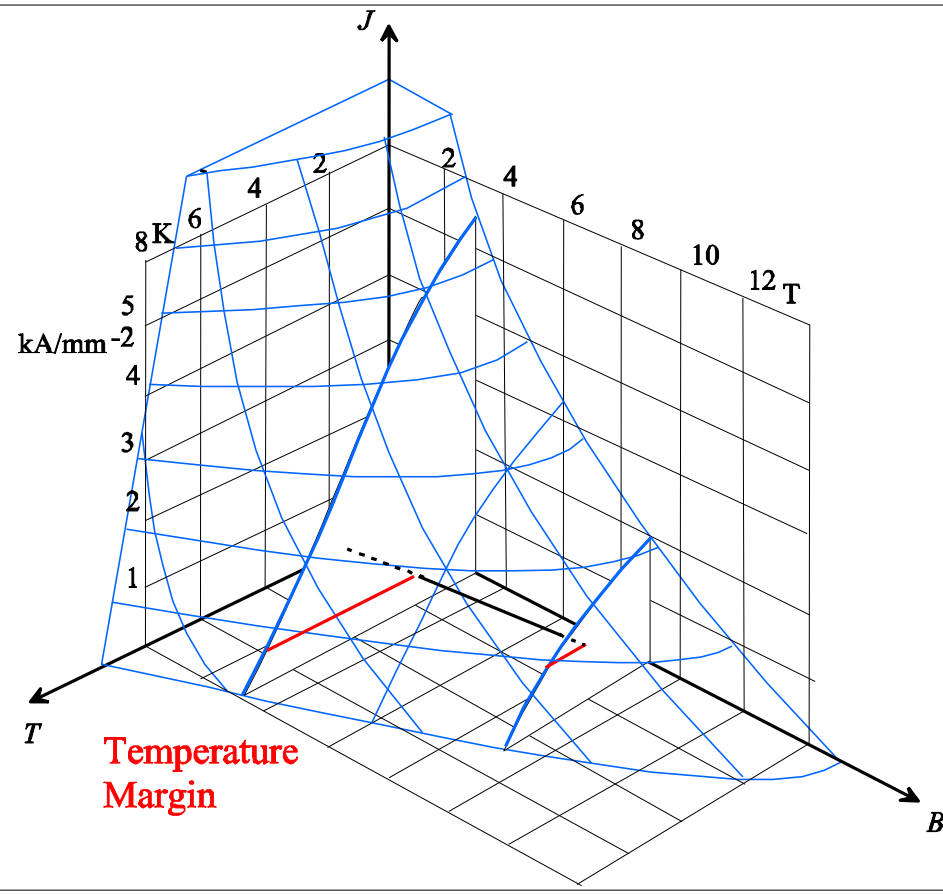
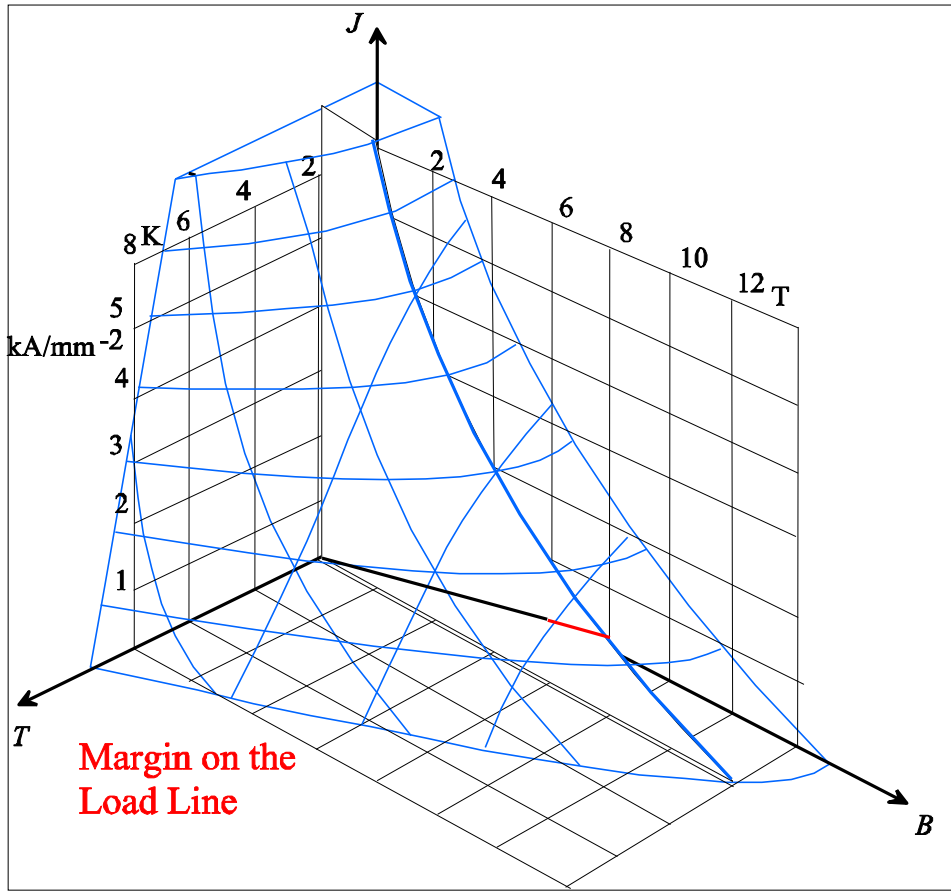
- **Supraleitender Dipolmagnet ($B \leq 10$ T)**
 - Feldverteilung/qualität durch Stromverteilung gegeben.
 - Sehr hohe Ströme notwendig \rightarrow Supraleitung ermöglicht hohe Stromdichten und vermeidet Ohm'sche Verluste.
- **Spulengeometrie zur Dipolfelderzeugung:**
 - Azimutale Stromverteilung: $I(\phi) = I_0 \cos(\phi)$ **Dipol**, ($I_0 \cos(2\phi)$ Quadrupol)
 - 2 horizontal verschobene Kreise, Annäherung durch "Stromschalen".





Supraleitung - Kritische Fläche NbTi

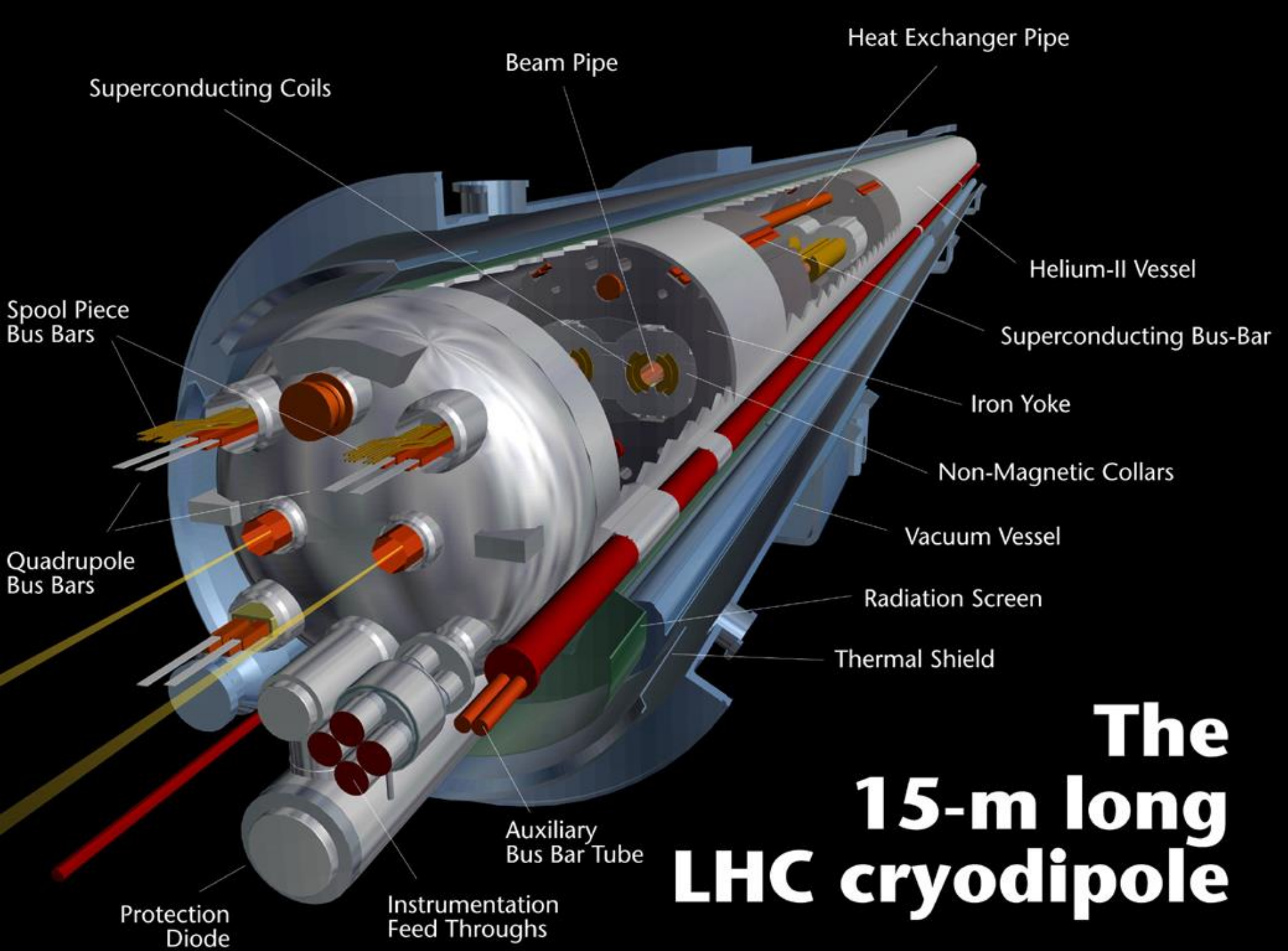
- **Beschreibung des supraleitenden Zustands:**
 - Sprungtemperatur, kritische Stromdichte, kritisches Magnetfeld





Supraleitende Magnete das Hauptsystem des LHC

- ca. 1300 Dipolen (Ablenkmagneten), a 15 m Länge.
- ca. 500 Quadrupolen (Fokussiermagneten), a 3 m Länge.
 - Supraleitende Spulen aus NbTi Kabeln.
 - Stromdichte im SC Kabel: **~1000 A/mm²**.
 - Max. Dipolfeld **8.3 T** bei **Gesamtstrom ± 1 MA** über Spulenquerschnitt.
- **Problem: Quenching (plötzlicher Zusammenbruch der Supraleitung)**
 - Bei Zufuhr thermischer Energie im Bereich von einigen mJ durch:
 - Unbeabsichtigter Teilchenverlust in Magneten.
 - Bewegungen der Leiter in der Spule (hohe magnetische Kräfte).
 - Schnelle kontrollierte Ableitung der Energie zum Schutz vor Überhitzung.
 - Gespeicherte Energie: $E = \frac{1}{2} \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV$ $B=8.3 \text{ T}, H=B/\mu_0, V=15 \cdot 0.1 \cdot 0.1 \text{ m}^3$
 - **E = 7.6 MJ/Magnet; ~ 10 GJ insgesamt ~ 15t Cu schmelzen (2000 kg TNT).**



Superconducting Coils

Beam Pipe

Heat Exchanger Pipe

Helium-II Vessel

Superconducting Bus-Bar

Iron Yoke

Non-Magnetic Collars

Vacuum Vessel

Radiation Screen

Thermal Shield

Auxiliary Bus Bar Tube

Instrumentation Feed Throughs

Protection Diode

Spool Piece Bus Bars

Quadrupole Bus Bars

The 15-m long LHC cryodipole



LHC – Dipolmagnet



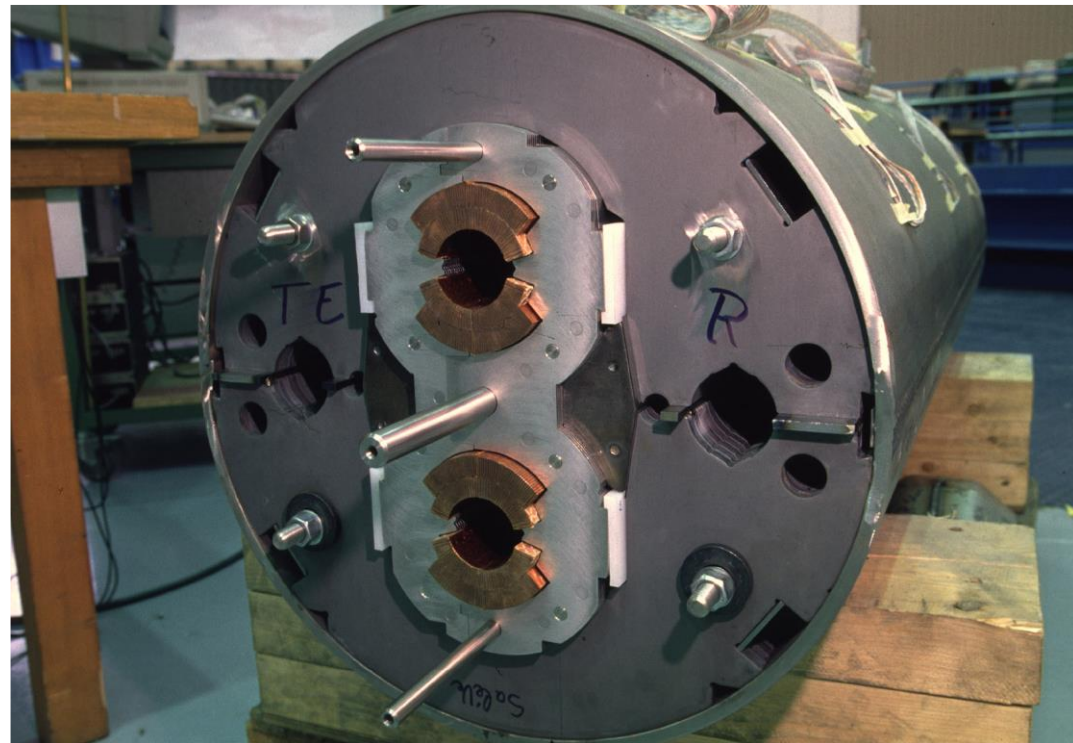
Kraftwirkung auf Spulen

- Kraft auf stromführenden Leiter in Magnetfeld (rechtwinkelig dazu):

$$F = q \cdot v \cdot B = I \cdot \ell \cdot B \quad \text{mit } I = 11 \text{ kA, } B_{\text{mittel}} \sim 4 \text{ T}$$

$F = 44000 \text{ N / m / Windung}$. Mit insgesamt 80 Windungen ergibt sich:

- Kraft von 4 MN pro m Spule
- Gewichtskraft von 4 E-Loks
 - Sehr hohe mechanische Anforderungen!



- **Strahl selbst ist gefährlich für den Beschleuniger:**

- Pro Strahl gespeicherte Energie (bei 7 TeV):

$$E_{\text{Strahl}} = 2808 \cdot 1,1 \times 10^{11} \cdot 7 \times 10^{12} \cdot 1,602 \times 10^{-19} = 350 \text{ MJ}$$

- **Entspricht Energie zum Schmelzen von 500 kg Cu bzw. 60 kg TNT...**
- Unkontrollierter Teilchenverlust führt zur Zerstörung des Beschleunigers.
- Spezielle Strahl- und Beschleunigerüberwachungssysteme.



Geplanter Materialtest (Cu, 2mm)
72 (48) LHC Pakete, 450 GeV

- **Strahl selbst ist gefährlich für den Beschleuniger:**

- Pro Strahl gespeicherte Energie (bei 7 TeV):

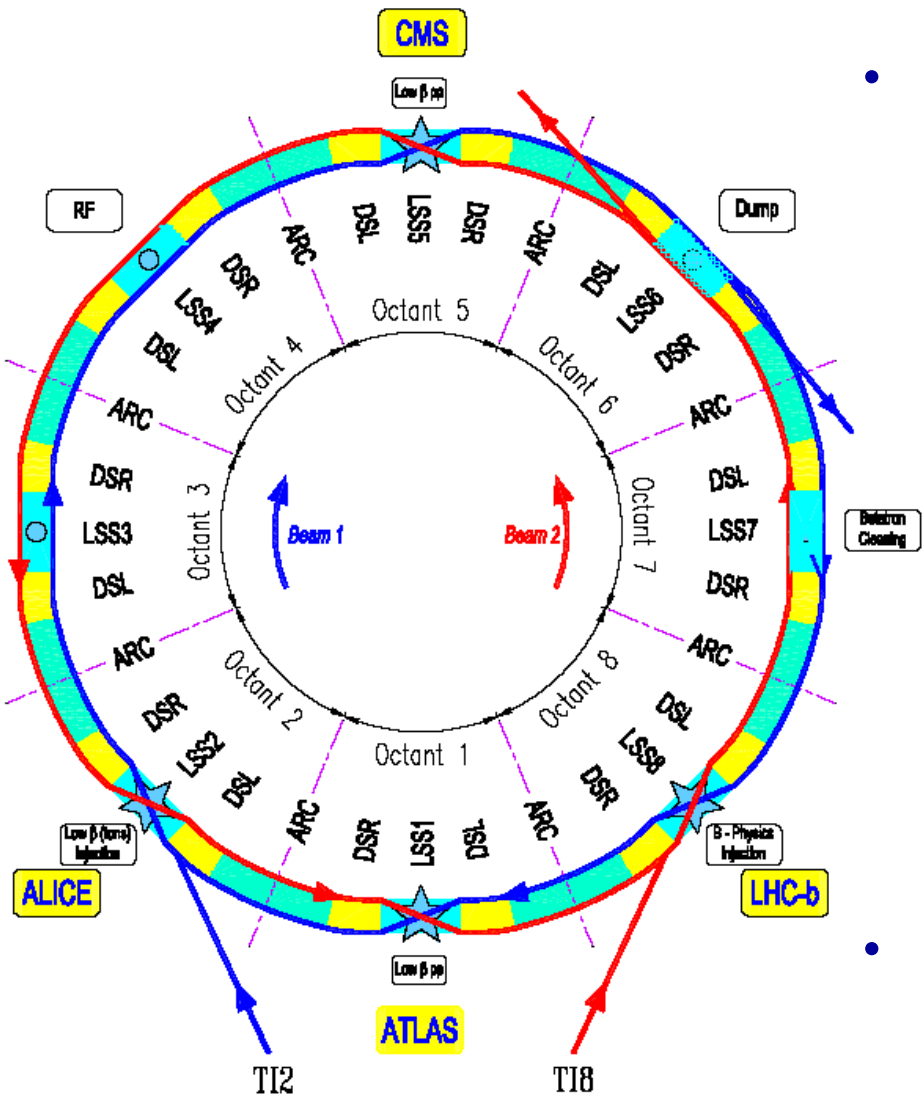
$$E_{\text{Strahl}} = 2808 \cdot 1,1 \times 10^{11} \cdot 7 \times 10^{12} \cdot 1,602 \times 10^{-19} = 350 \text{ MJ}$$

- **Entspricht Energie zum Schmelzen von 500 kg Cu bzw. 60 kg TNT...**
- Unkontrollierter Teilchenverlust führt zur Zerstörung des Beschleunigers.
- Spezielle Strahl- und Beschleunigerüberwachungssysteme.





Kollisionen im LHC



• Kreuzungspunkte:

- Die zwei Strahlen kollidieren an 4 Kreuzungspunkten (300mrad).
- 2808 Teilchenpakete pro Ring (ein Paket alle 7.5 m, 30 cm Länge).
- Mit der Umlauffrequenz:
 $f_{rev} = 27\text{km}/3 \cdot 10^8\text{ms}^{-1} = 11 \text{ kHz}$ folgt:

Paketkollisionen = Pakete * f_{rev} = $3 \cdot 10^7/\text{s}$ pro Kreuzungspunkt.

- Um jeden Kollisionspunkt ist ein Experiment angeordnet.

• 4 große Experimente:

- ATLAS, CMS, LHC-b, ALICE

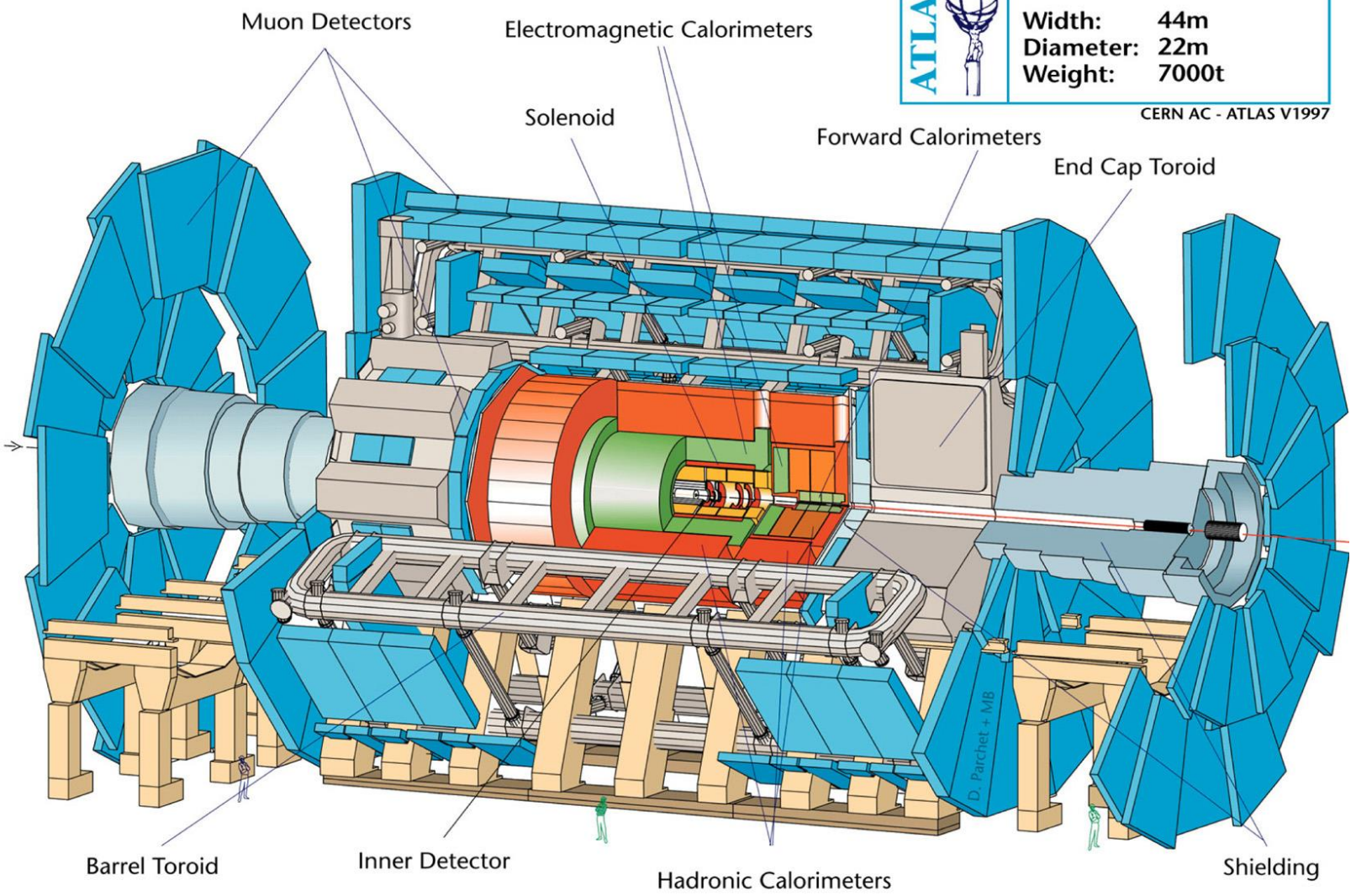


LHC ATLAS Detector



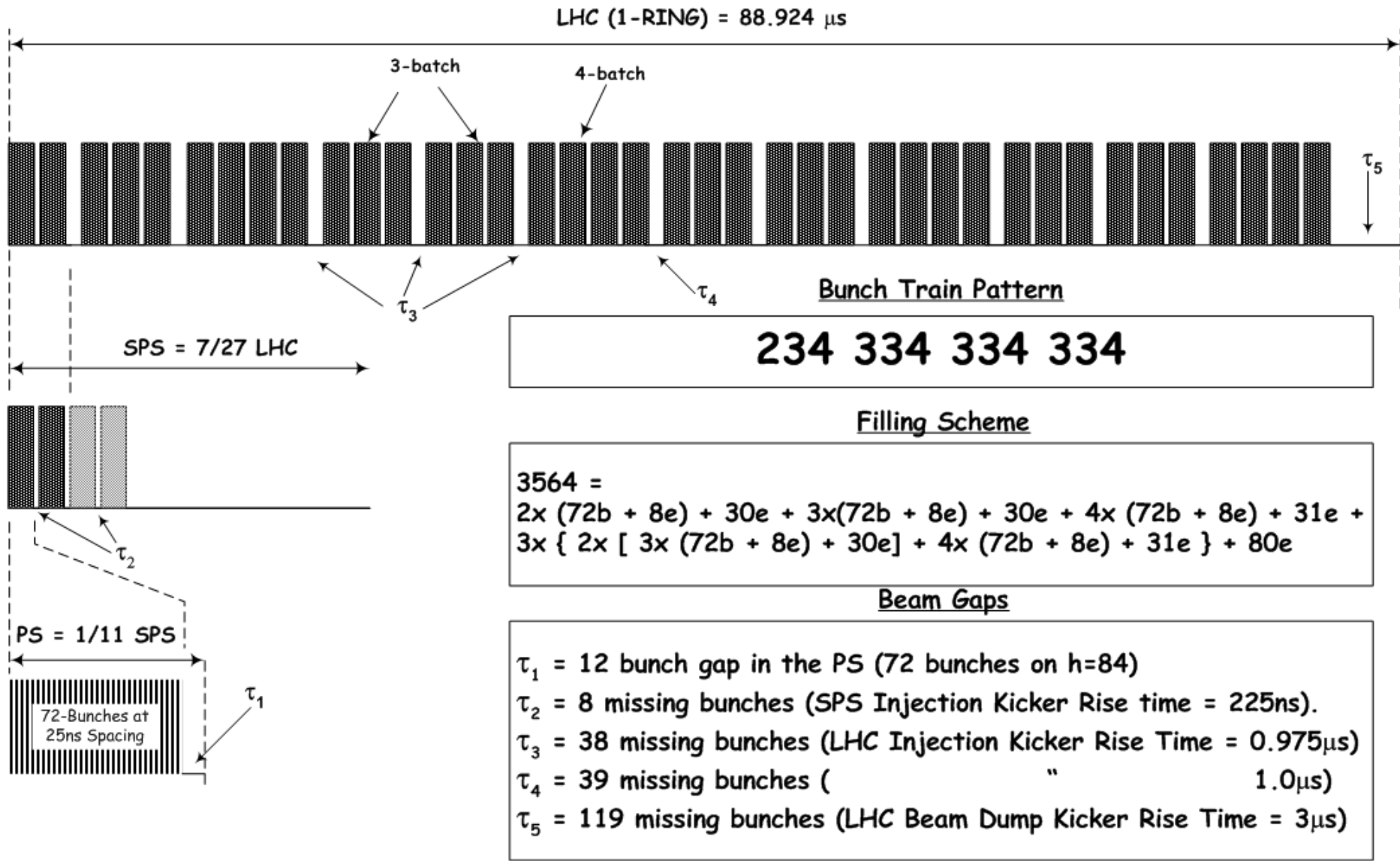
Detector characteristics	
Width:	44m
Diameter:	22m
Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997



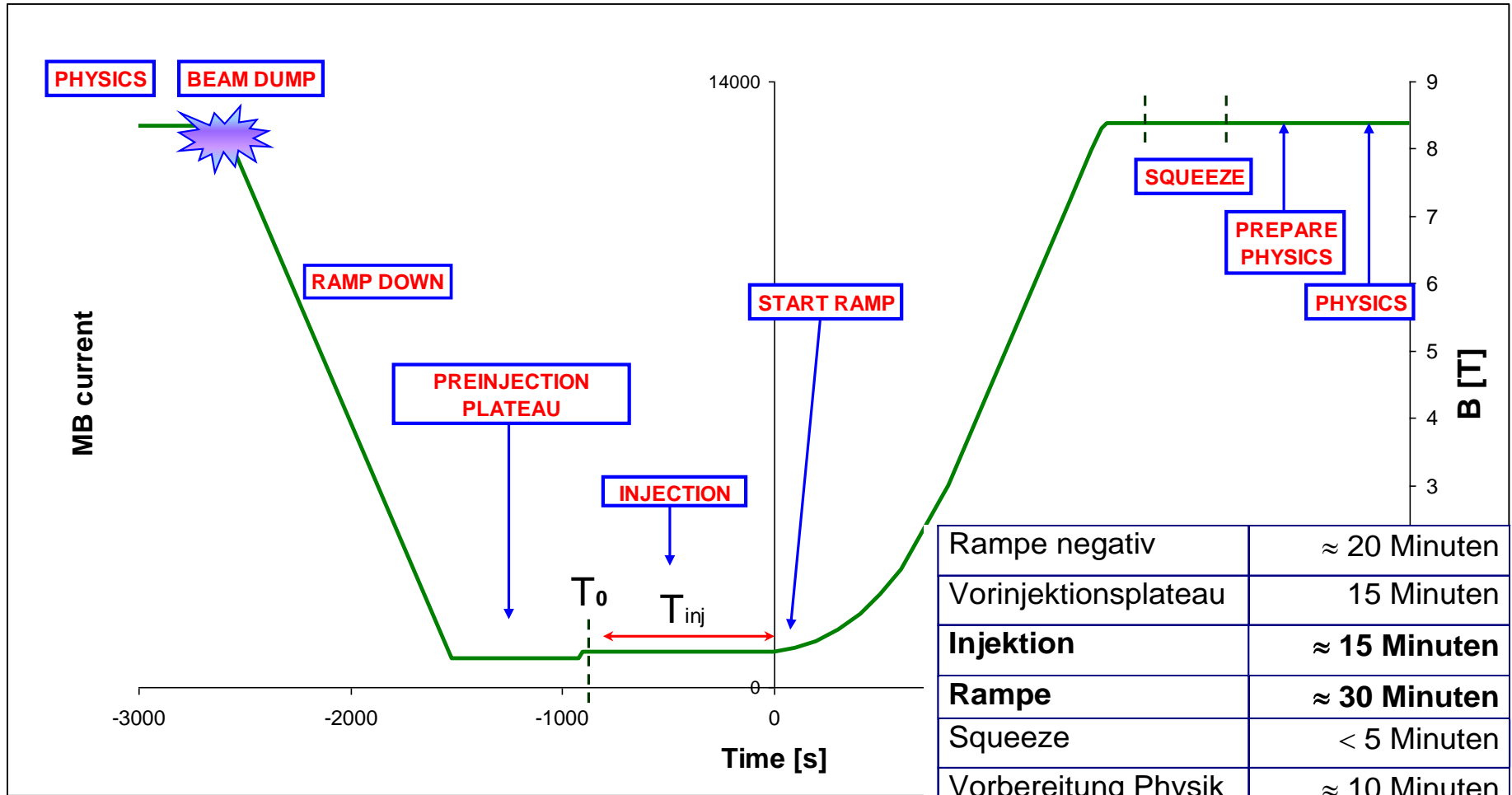


LHC Injektionsschema





LHC Zyklus



Rampe negativ	≈ 20 Minuten
Vorinjektionsplateau	15 Minuten
Injektion	≈ 15 Minuten
Rampe	≈ 30 Minuten
Squeeze	< 5 Minuten
Vorbereitung Physik	≈ 10 Minuten
Physikmodus	10 - 20 Stunden



LHC

