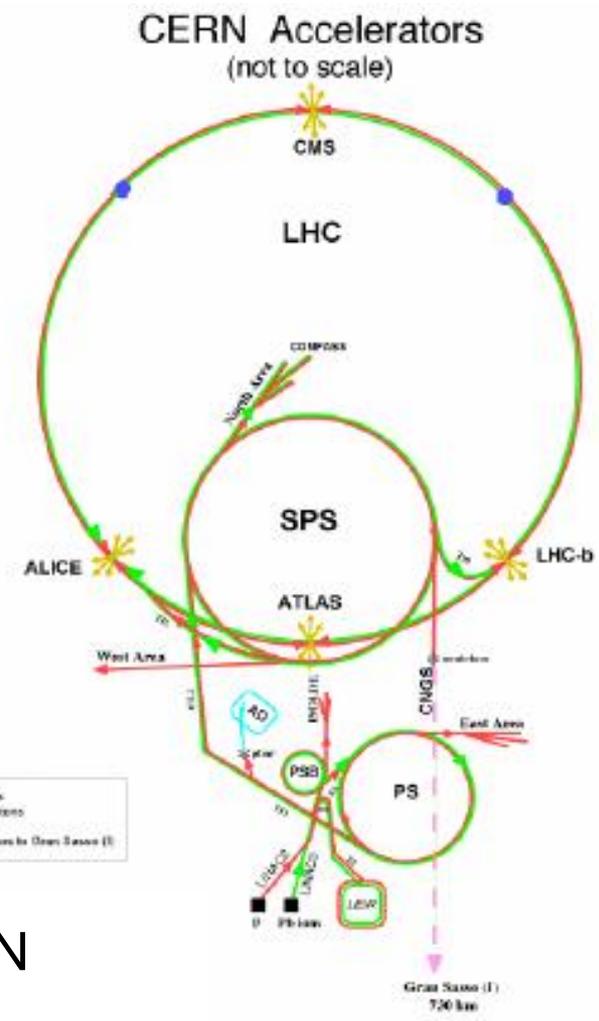




Teilchenbeschleuniger: Der Large Hadron Collider und seine Injektorbeschleunigerkette

Lehrerprogramm – CERN
28. November 2019

Prof. Michael Benedikt
Directorate for Accelerators and Technology, CERN





Inhalt

- **Einleitung**
 - Hauptkomponenten von Synchrotronbeschleunigern
 - Teilchenbeschleuniger und Experimente für die Hochenergiephysik
- **Der Large Hadron Collider (LHC)**
 - LHC Magneten und Kühlung
 - LHC Strahlparameter
- **LHC Injektorkette**
 - Protonenquelle und Linearbeschleuniger
 - Die Injektorsynchrotrons
 - LHC Füllung und Zyklus
- **Zusammenfassung**



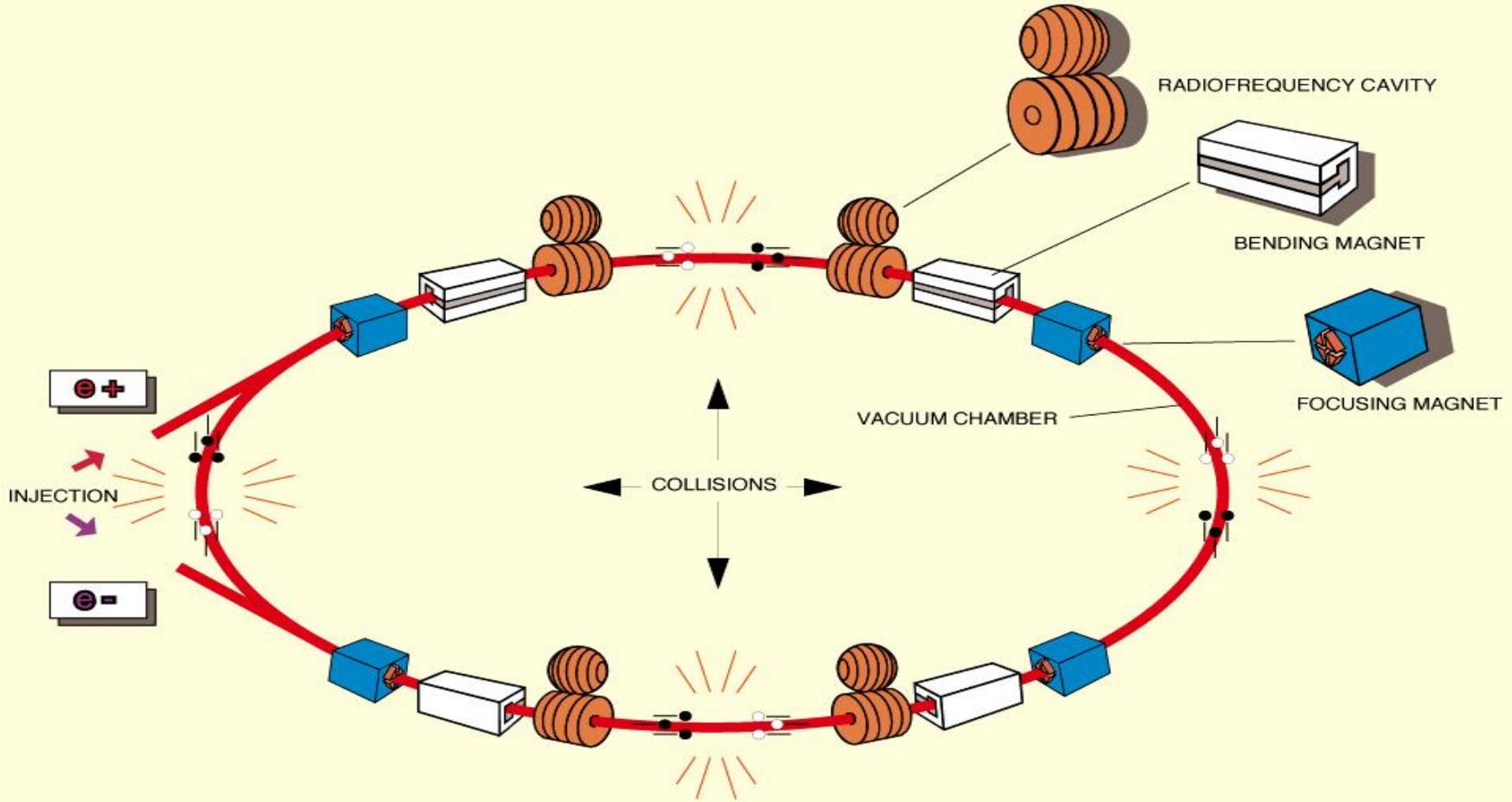
Hauptkomponenten von Synchrotrons

- **Synchrotron (Kreisbeschleuniger, fixer Bahnradius, viele Umläufe)**
 - **Ablenkmagnete (Dipole)** um den Strahl auf der Umlaufbahn zu halten
 - Sollbahn definiert durch Ablenkmagnete und gerade Verbindungen.
 - **Fokusiermagnete (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.



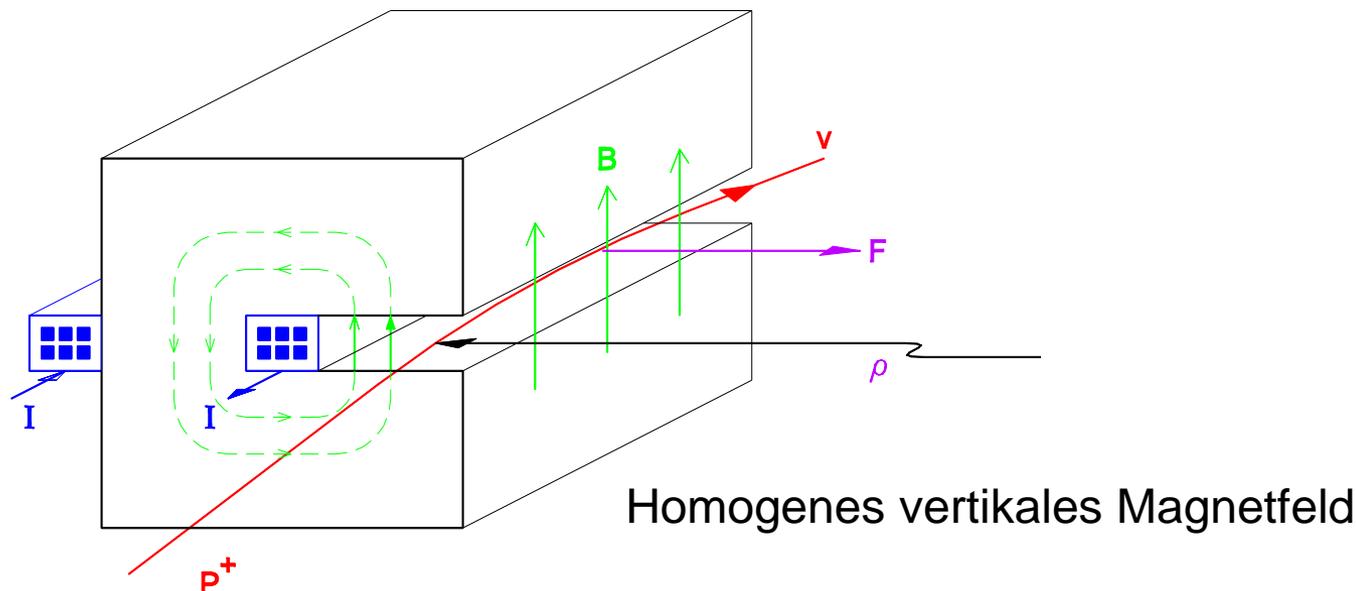
Hauptkomponenten von Synchrotrons

THE PRINCIPAL MACHINE COMPONENTS OF THE LEP ACCELERATOR.



CERN AC - E509

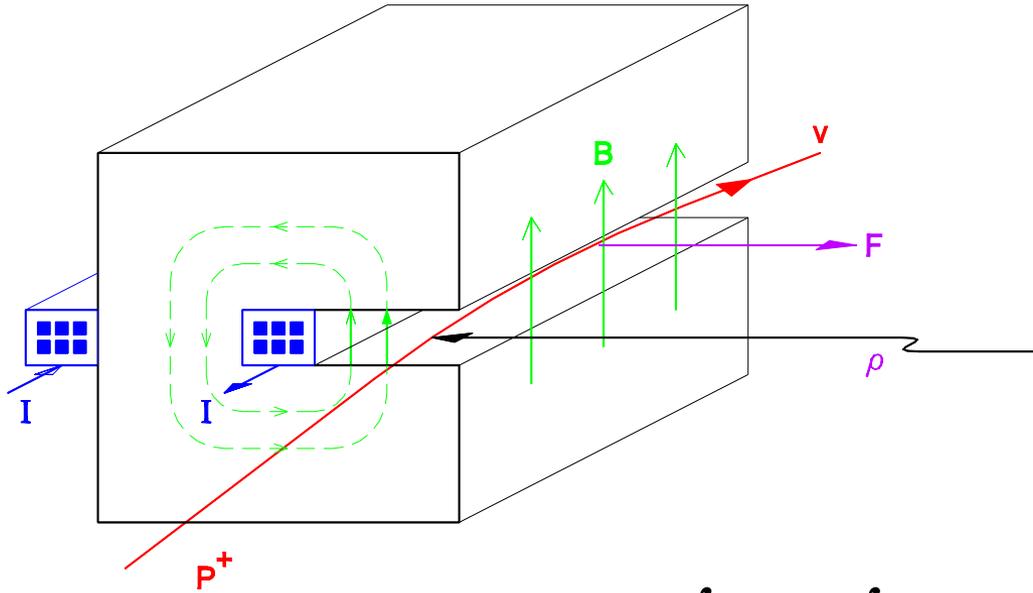
Dipol – hält Strahl auf der Umlaufbahn



- **Teilchen werden durch Dipolmagnetfeld B auf Kreisbahn gehalten:**
 - Lorentzkraft $\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ hält der Zentrifugalkraft die Waage. Radiale Richtung:
- $$F = q \cdot (v \cdot B) = m \cdot \gamma \cdot v^2 / \rho \Leftrightarrow \boxed{q \cdot (B \cdot \rho) = m \cdot \gamma \cdot v = m \gamma \beta \cdot c = p} \quad \text{(relativistischer Impuls)}$$
- **Magnetfeld muss bei Beschleunigung proportional zum Impuls steigen**



Dipol – Feldberechnung



- Maxwell: $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}$ Integralform $\rightarrow \oint_C \mathbf{H} d\mathbf{s} = \int_S \mathbf{j} d\mathbf{S}$
- Integration entlang geschlossenen Flußlinie B mit $H_{\text{Eisen}} = \frac{B_0}{\mu_r \mu_0} \ll H_{\text{Spalt}} = \frac{B_0}{\mu_0}$

$$\oint_C \mathbf{H} d\mathbf{s} \approx H_{\text{Spalt}} \cdot h_{\text{Spalt}}$$

$$\oint_S \mathbf{j} d\mathbf{S} = I_0$$

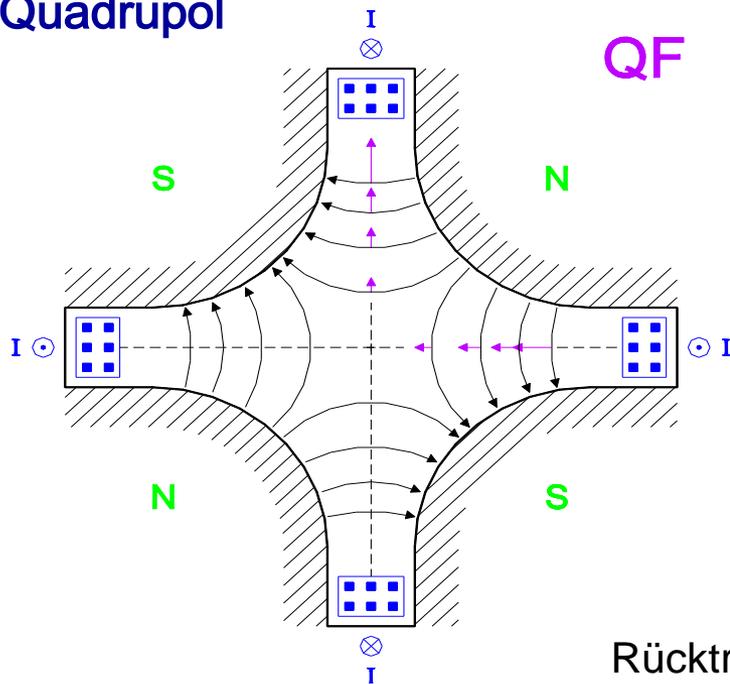
$$I_0 = \frac{B_0 h}{\mu_0}$$

mit $\mu_r(\text{Eisen}) \sim 1000$, rel. Permeabilität
und $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$

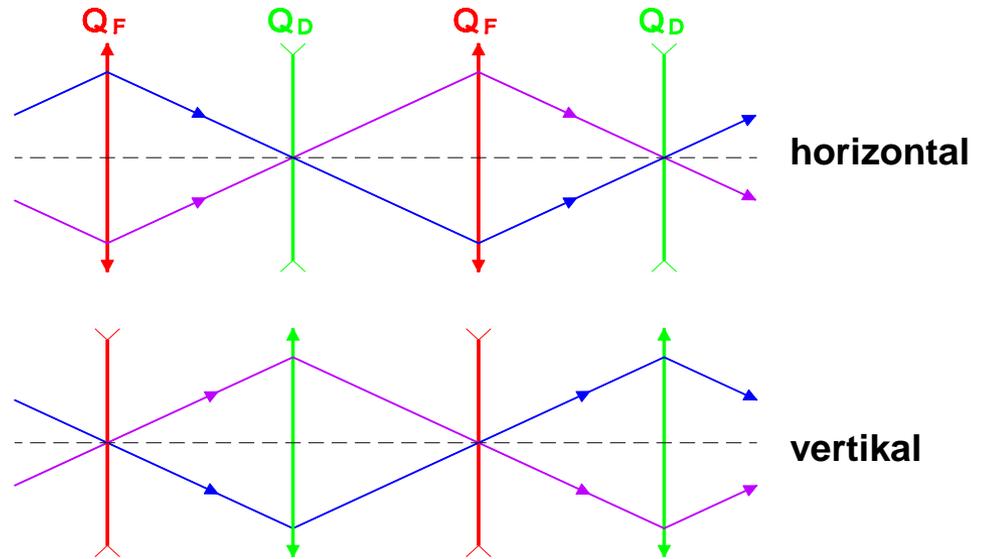
- Für $B = 1\text{T}$ und Spalt 5 cm benötigt man $I_0 = 40000\text{A}$.

Quadrupol – fokussiert die Teilchen

Quadrupol



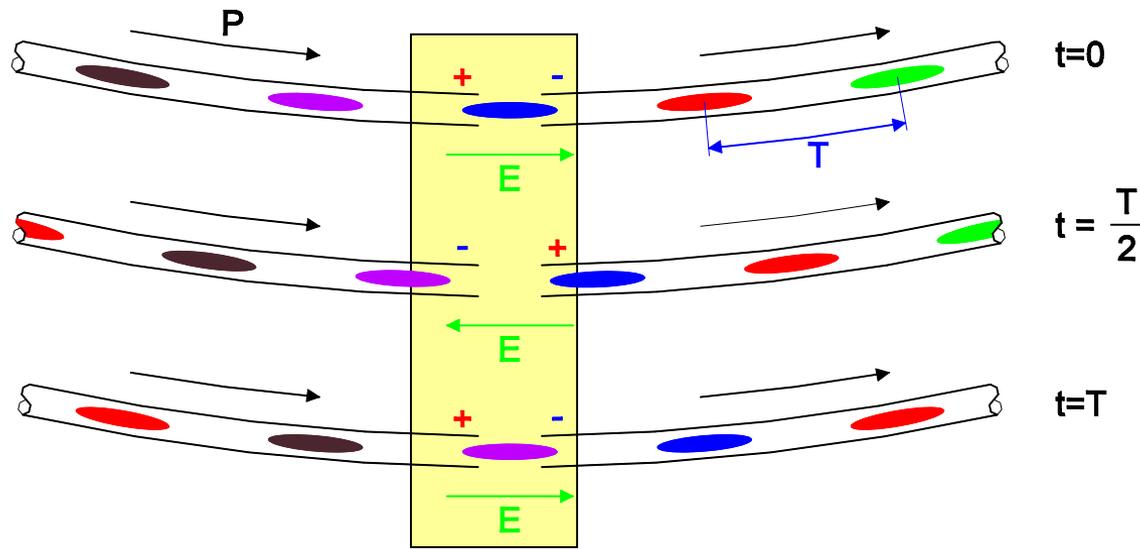
“Alternating gradient” Fokussierung



Rücktreibende Kraft prop. Auslenkung: $F_x = \pm G \cdot x$, $-F_z = \pm G \cdot z$

- Optische Linsen fokussieren sowohl **horizontal** als auch **vertikal**.
- Magnetische Linsen (“**Quadrupole**”) fokussieren in einer, aber defokussieren in der anderen Ebene.
- Mit **alternierenden Gradienten** (QF, QD, QF, QD,.....) erhält man insgesamt eine Nettofokussierung.
- Teilchen schwingen um die Sollbahn „Betatronschwingungen“.

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 .



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.



Warum baut man Kollisionsmaschinen

- **Freisetzung von Energie durch Kollision Strahl-target/Strahl-Strahl.**
 - Maßgeblich für Erzeugung neuer Teilchen ist die im *Schwerpunktsystem* zur Verfügung stehende Energie.
 - Berechnung über Impulserhaltung und Energieerhaltung.
- **Allgemein: Reaktionsenergie = Summe der Energien der beteiligten Teilchen abzüglich Energie der Schwerpunktsbewegung.**
- **Strahl gegen Strahl (collider, gleiche Teilchen bzw. Antiteilchen):**
 - Zusammenprall zweier gegenläufiger Teilchen, jedes mit Gesamtenergie γE_0

Impulse: $p_1 + p_2 = 0 \leftrightarrow p_1 = -p_2 = q$, Energien: $E_1 = E_2 = E = \gamma E_0 = \gamma mc^2$.

 - Schwerpunkt in Ruhe, daher steht die **gesamte kinetische Energie als Reaktionsenergie zur Verfügung:**

$$E_R = 2(E - mc^2)$$
$$E_R = 2 \cdot E$$

Stossteilchen bleiben erhalten.
falls Teilchen - Antiteilchenkollision (Annihilation).



„Fixed target“

- **Strahl gegen ruhendes target:**

- Laborsystem (Proton auf ruhendes Proton):
Impulse $\mathbf{p}_1 = \mathbf{p}$, $\mathbf{p}_2 = 0$, Energien: $E_1 = E = \gamma mc^2$, $E_2 = mc^2$.
- Im Schwerpunktsystem:
Impulse: $\mathbf{p}'_1 = -\mathbf{p}'_2 = \mathbf{q}$, Energien: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon = \sqrt{(\mathbf{q}^2 c^2 + m^2 c^4)}$

- **Verbindung LS-SS über Lorentzinvarianz des Vierervektorquadrats der Summe der Viererimpulse (E/c, p) in LS und SS:**

$$(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)_{LS}^2 = \left(\frac{1}{c} \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} + mc, \mathbf{p} \right)^2 = \left(\frac{1}{c} 2 \cdot \varepsilon, 0 \right)^2 = (\mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2)_{SS}^2$$

daraus folgt für Teilchenenergie im SS: $\varepsilon_{SS} = \sqrt{\frac{1}{2}(m^2 c^4 + E_1 mc^2)}$

- **Reaktionsenergie: Energien im SS (minus Ruheenergie):**

$$E_R = 2(\varepsilon - mc^2) = \sqrt{2mc^2(mc^2 + E)} - 2mc^2$$

$$E_R = 2\varepsilon = \sqrt{2mc^2(mc^2 + E)}$$

Stossteilchen bleiben erhalten.

Stossteilchen annihilieren.



“Collider” vs. “Fixed Target”

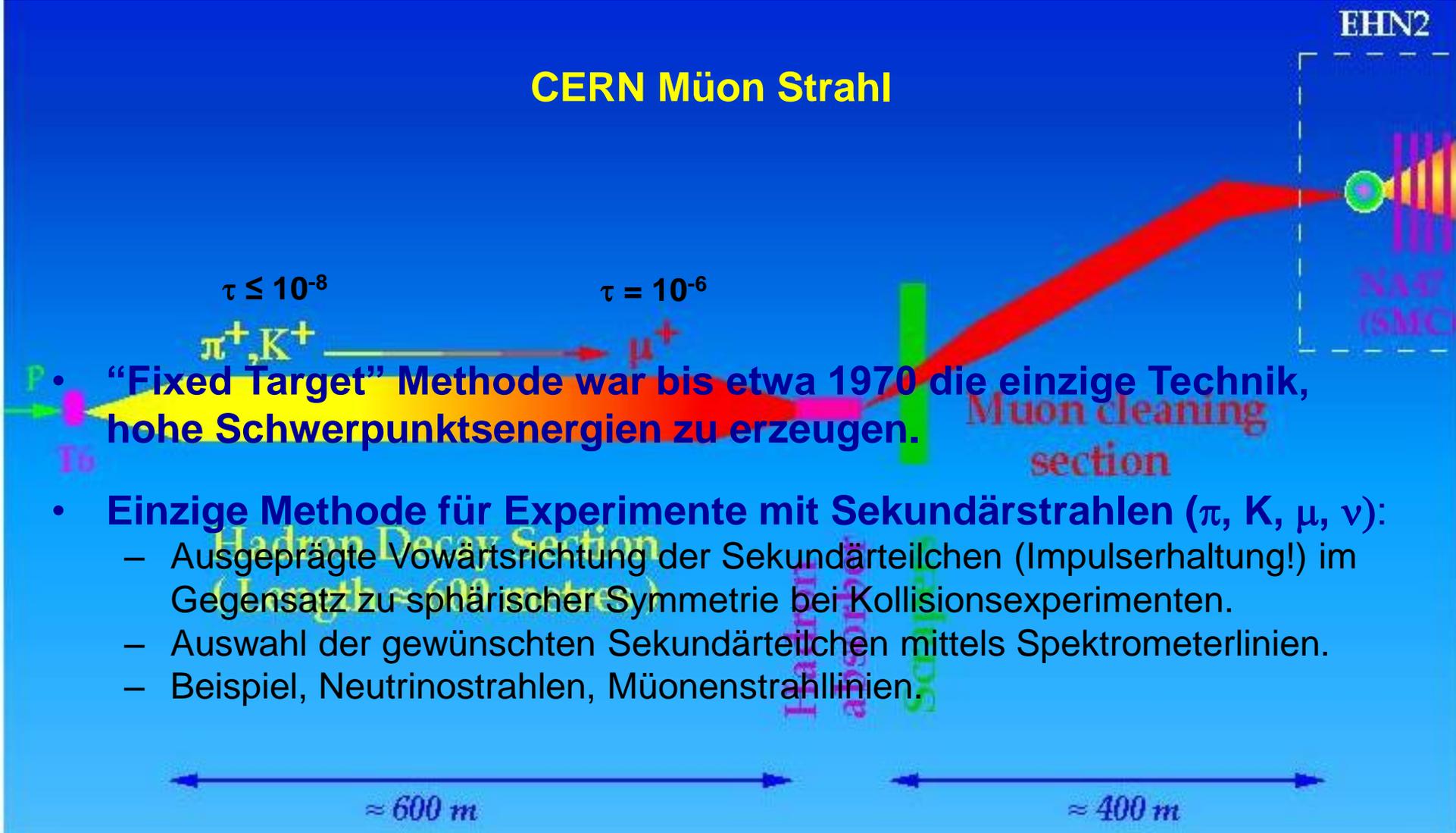
Collider	Strahlenergie pro Strahl	Schwerpunktsenergie “Fixed Target”	Schwerpunktsenergie “Collider”
SPS (proton-antiproton) CERN, 1981-1991	315 GeV	24 GeV	630 GeV
Tevatron (proton-antiproton) Fermilab USA, running	900 GeV	41 GeV	1800 GeV (1.8 TeV)
LHC (proton-proton) CERN, Start 2007	7000 GeV	115 GeV	14000 GeV (14 TeV)
LEP (electron-positron) CERN, 1989-2000	100 GeV	0.32 GeV	200 GeV
CLIC (electron-positron) CERN under study	3000 GeV	1.73 GeV	6000 GeV (6TeV)

Wollte man 14 TeV (LHC Protonen) mit der “Fixed Target” Methode erreichen müßte man ein Synchrotron mit ca. 400000 km Umfang bauen (Erde-Mond).....



„Collider“ und „Fixed Target“ Experimente

CERN Müon Strahl





Prinzip von Kollisionsmaschinen (i)

- **Teilchen gegen Antiteilchen (p^+ , p^- oder e^- , e^+):**

- Umgekehrte Bewegungsrichtung, umkehrte Ladung, gleiche Masse
- Magnetische Ablenkung (Lorentzkraft):

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = -q(-\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \text{gleiche Richtung für Teilchen und Antiteilchen.}$$

- Beide Strahlen im gleichen Magnetfeld (in der gleichen Vakuumkammer).
- Separation der Strahlen mit elektrischen Feldern: **entgegengesetzte Krafrichtung für Teilchen und Antiteilchen**

- **Problem: Effizienz der Antiteilchenerzeugung (=Sekundärstrahl)**

- CERN PS: 25 GeV p^+ → fixes W-Target → $1p^-/10^6p^+$.
- Strahlenschutzaspekte, Aufbereitung des p^- Strahles, Gesamtwirkungsgrad
- Praktisch nur möglich für p^+ - p^- und e^- - e^+ .



Prinzip von Kollisionsmaschinen (ii)

- **Teilchen – Teilchen ($p^+ - p^+$, $e^- - e^-$)**
 - Umgekehrte Bewegungsrichtung
 - **Lorentzkraft zeigt für beide**
 - Erfordert Magnetfelder entgegen
 - Vakuummammern.
 - Keine Probleme bei Teilchener
- **Intersecting Storage Rings (ISR)**
 - 2 getrennte Beschleuniger, die
- **Large Hadron Collider (LHC,**
 - **Doppelaperturmagneten mit**





Der Large Hadron Collider

- **Zirkulare Kollisionsmaschine mit 26,6 km Umfang (Synchrotron).**
- **Hadronenkollisionen (Teilchen – Teilchen):**
 - Protonen – Protonen 7 + 7 TeV (**aktuell 6.5 + 6.5 TeV**)
 - Bleiionen – Bleiionen 574 + 574 TeV
- **Installation im Tunnel des Vorgängerbeschleunigers Large Electron Positron Collider (LEP)**
 - Elektronen – Positronen 0.1 + 0.1 TeV (limitiert durch Synchrotronstrahlung)
- **Injektorbeschleuniger und technische Infrastruktur vorhanden.**
- **Substantielle Beteiligung USA, Russland, Japan, Kanada, Indien**

Umfang	Anzahl Bunches	Protonen pro Ring	Bunch-abstand	Hoch-frequenz	Kollisions-energie	Kreuzungs-punkte	Strahlgrösse bei Kollision	Netz-leistung
26.6 km	2808	$3 \cdot 10^{14}$	25 ns	400 MHz	7 + 7 TeV	4	0.06 mm	125 MW

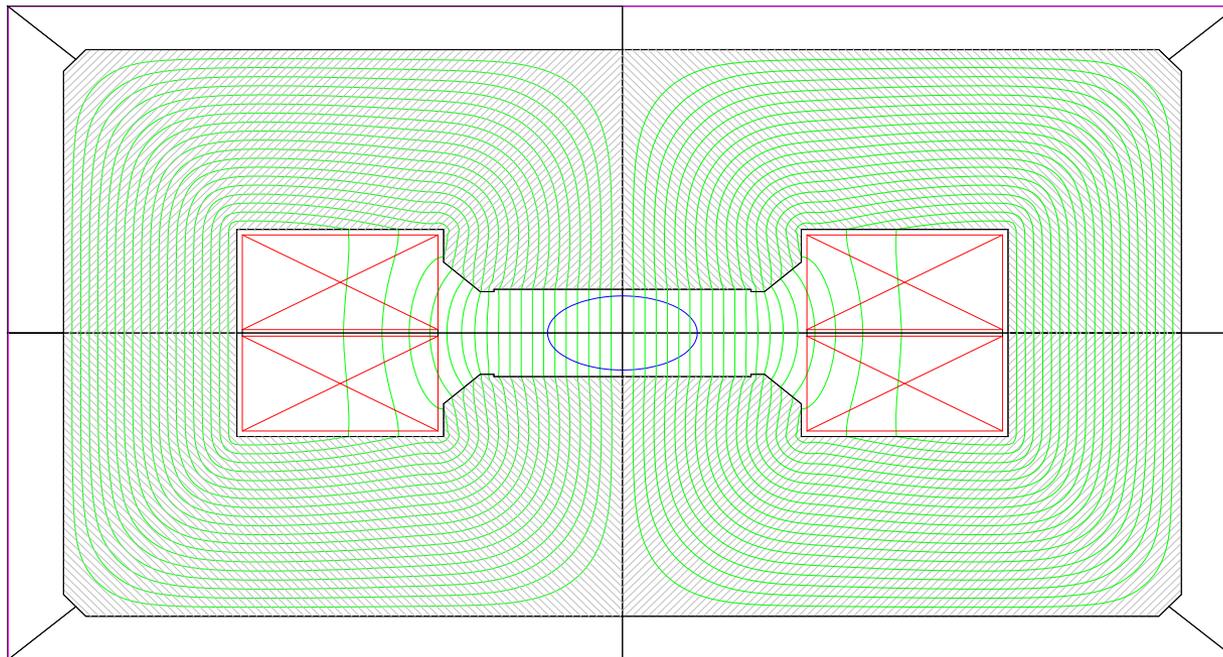


LHC – Technische Herausforderungen

- **Hohe Magnetfelder zur Ablenkung und Fokussierung der Teilchen.**
 - Design und Konstruktion von supraleitende Magneten.
 - Wesentlicher Kostenfaktor, 1200 Dipole, 400 Quadrupole.
 - Hohe Feldqualität erforderlich (10^8 Strahlumläufe pro Füllung).
- **Kühlsystem für supraleitende Magnete.**
- **Hohe gespeicherte Strahlenergie.**
 - Hohe Strahlintensität um viele Kollisionen zu erzeugen
 - Unkontrollierter Strahlverlust kann Beschleuniger zerstören

- **Eisendipolmagnet (max. 2T):**

- parallele Polplatten, Magnetfeld B steht senkrecht auf Oberfläche.
- Feldqualität durch mechanische Präzision
- Feldformende Wirkung nur bis Eisensättigung; Maximalfeld $\leq 2\text{T}$.
- Oberhalb ist die Feldverteilung/qualität durch Stromverteilung gegeben.

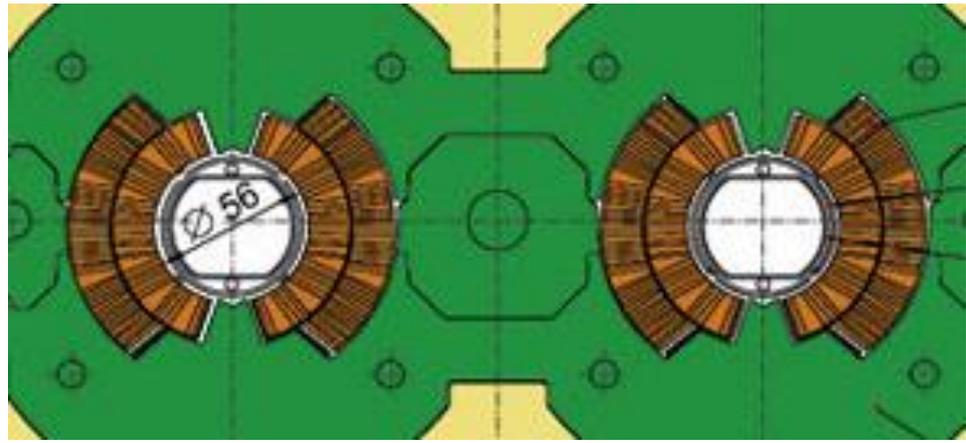
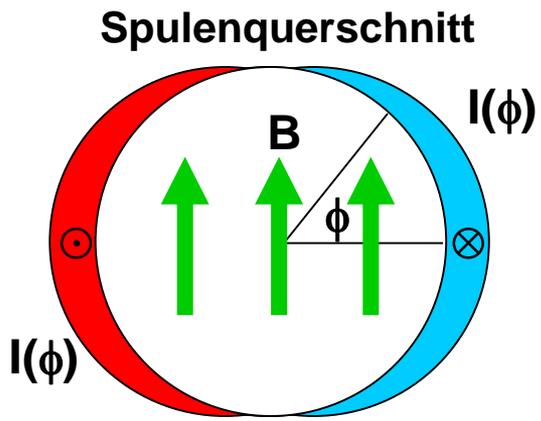


Dipolmagnete für hohe Felder (ii)

- **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".





LHC – Magnete

- **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: **$\sim 1000 \text{ A/mm}^2$** .
 - Max. Dipolfeld **8.3 T** bei **Gesamtstrom $\pm 1 \text{ MA}$** 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: $E = \frac{1}{2} \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \, dV$ $B=8.3 \text{ T}, H=B/\mu_0, V=15 \cdot 0.1 \cdot 0.1 \text{ m}^3$
 - **$E = 7.6 \text{ MJ/Magnet}; \sim 10 \text{ GJ insgesamt} \sim 15 \text{ t Cu schmelzen (2000 kg TNT)}$.**

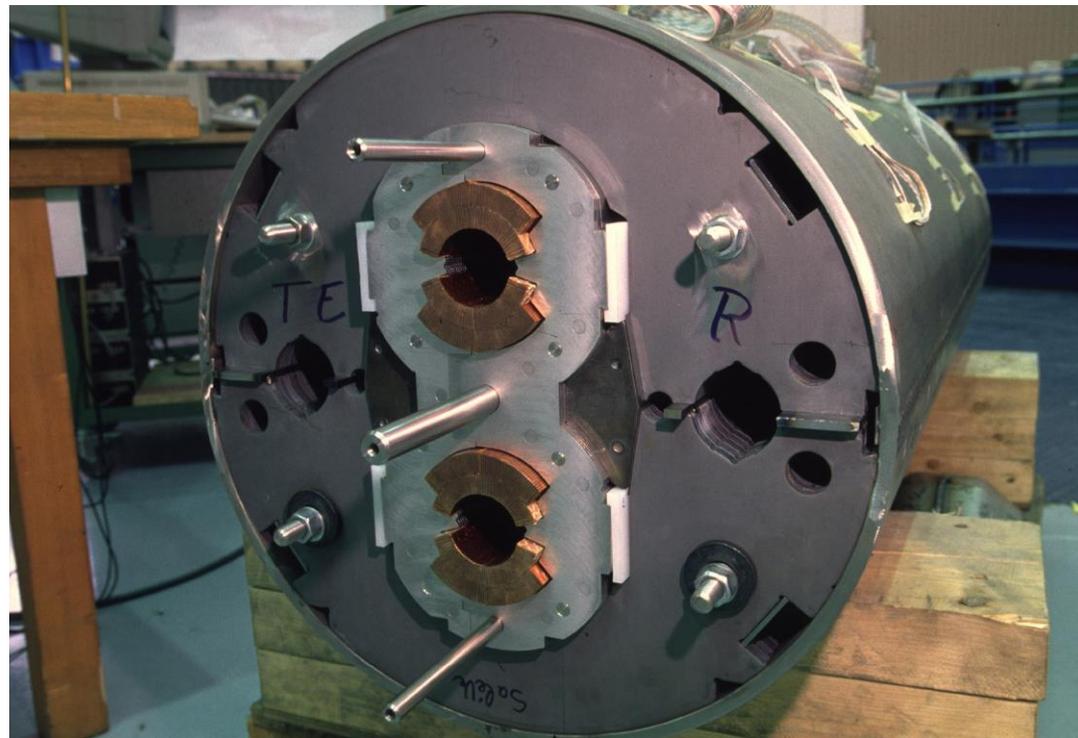
Kraftwirkung auf Spulen

- 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!





LHC – Kühlsystem für tiefste Temperaturen

- **Warum Kühlung?**

- Erreichen und Erhaltung des supraleitenden Zustands ($\text{NbTi} \leq 9 \text{ K}$).
- Ableitung thermische Energie durch Teilchenverlust, Leiterbewegungen in Spule, etc. hervorgerufen.

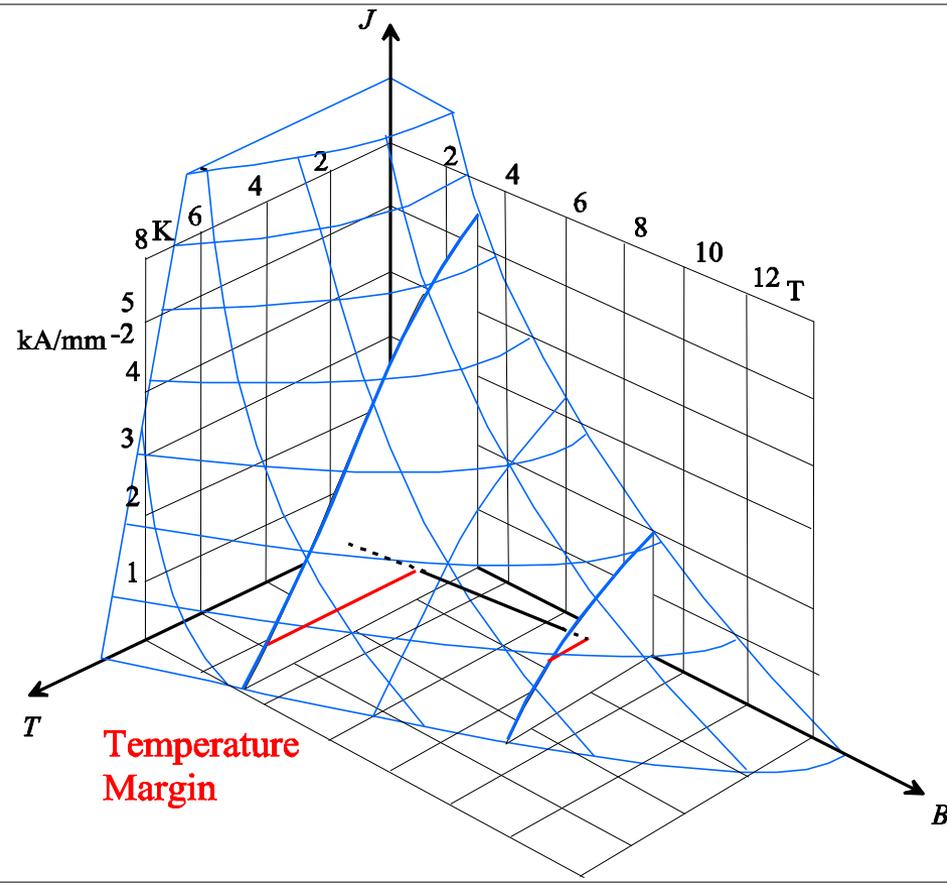
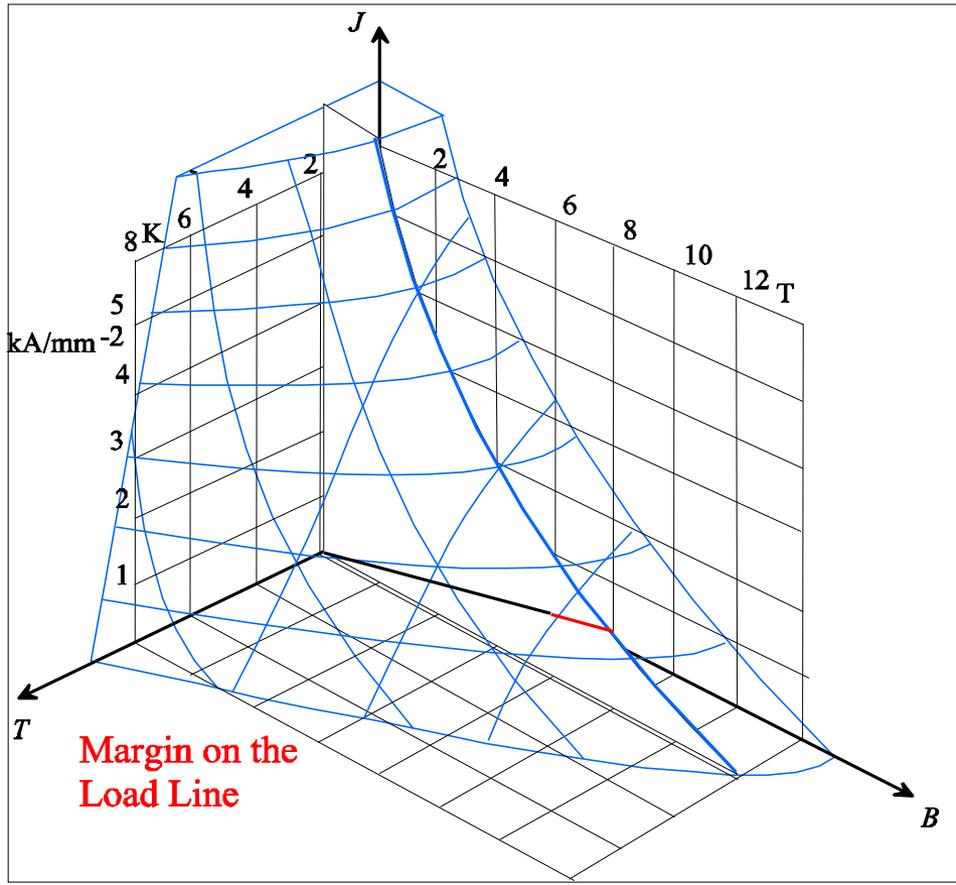
- **Warum Kühlung auf 1.9 K (supraflüssiges He)**

- Bisherige supraleitende Beschleuniger: Kühlung auf $\sim 4.2 \text{ K}$ (flüssiges He) und maximale Dipolfelder bis zu $\sim 6 \text{ T}$.
- Für LHC: Absenken der Temperatur auf 1.9 K (supraflüssiges He) erhöht die “kritische Stromdichte” bei der Supraleitung zusammenbricht.
- **Höhere Ströme und Erhöhung des Magnetfelds um etwa 1.5 T.**
- **Erlaubt Erhöhung der Strahlenergie um $\sim 20\%$!**



Kritische Fläche NbTi

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





LHC – Kühlsystem Parameter

- LHC Kryogeniesystem = weltgrößtes Helium-Kühlsystem:**

- Masse von 30000 t muss auf 1.9 K gekühlt und gehalten werden.
- Dazu sind ca. 100 t flüssiges He notwendig.
- Um eine Energie (Wärme-) menge ΔQ bei T_{tief} zu eliminieren, muss bei Raumtemperatur T die mechanische Arbeit ΔW aufgewendet werden:

$$\Delta W = \Delta Q \cdot (T - T_{\text{tief}}) / T_{\text{tief}} = \Delta Q \cdot (300 - 1.9) / 1.9 \sim 155 \cdot \Delta Q$$

für idealen Kreisprozess, realistischer Wirkungsgrad gibt Faktor ~1000:

Ein Watt bei 1.9K “kostet” ~ 1 kW bei Raumtemperatur!

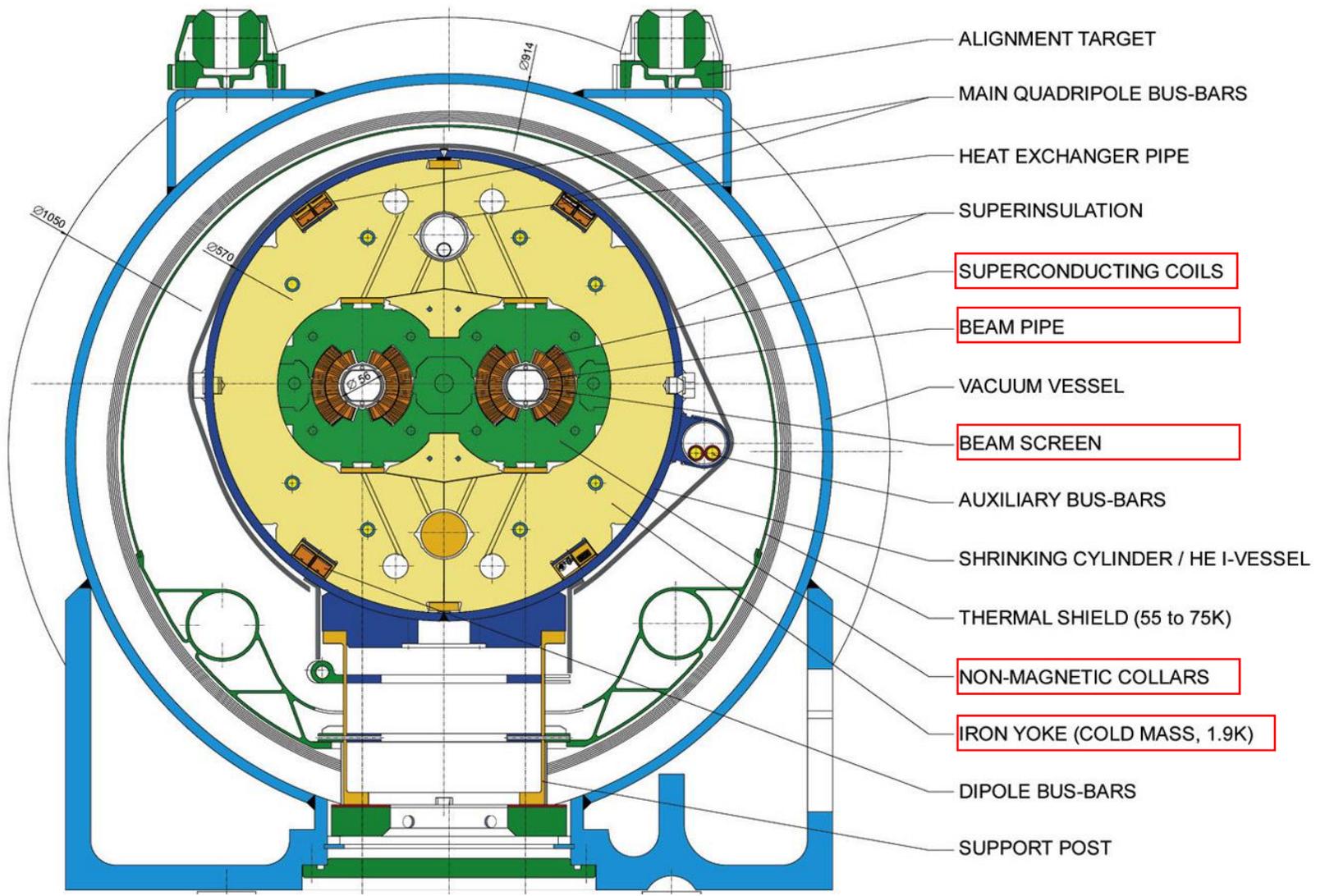
Temperatur	1.9 K (Magnete)	5 - 20 K (Beam screen)	50 - 75 K (Kryostat)
Kühlleistung (LHC gesamt)	10 kW	20 kW	150 kW

- Das **Heliumverflüssigungssystem**, benötigt eine **Netzleistung von 50 MW (40% der LHC Gesamtnetzleistung)**.
- Netzleistung der Stadt Klagenfurt: 50 MW

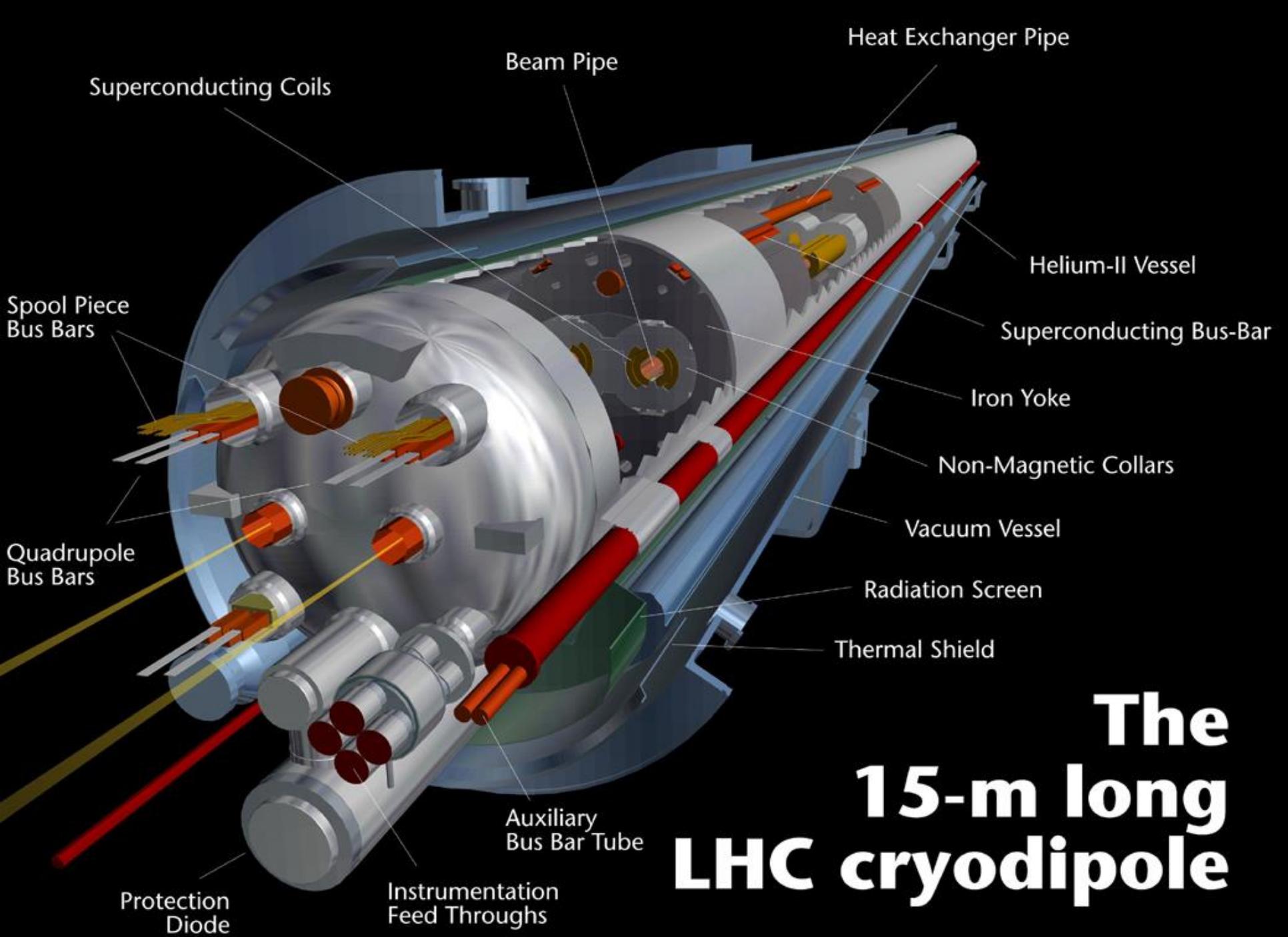


LHC – Dipolquerschnitt

CERN AC/DI/MM - HE107 - 30 04 1999



- ALIGNMENT TARGET
- MAIN QUADRIPOLE BUS-BARS
- HEAT EXCHANGER PIPE
- SUPERINSULATION
- SUPERCONDUCTING COILS**
- BEAM PIPE**
- VACUUM VESSEL
- BEAM SCREEN**
- AUXILIARY BUS-BARS
- SHRINKING CYLINDER / HE I-VESSEL
- THERMAL SHIELD (55 to 75K)
- NON-MAGNETIC COLLARS**
- IRON YOKE (COLD MASS, 1.9K)**
- DIPOLE BUS-BARS
- SUPPORT POST



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



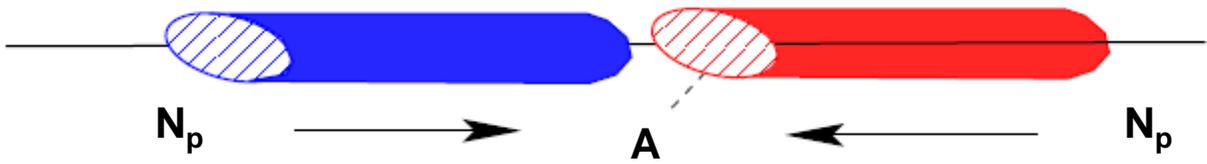
Luminosität im LHC

- **Luminosität L ist wichtigster „Collider“ Parameter für Experimente:**
 - Für bestimmte Reaktion X, beschrieben mit Wirkungsquerschnitt σ_X [cm²].
 - Anzahl der zu erwartenden Reaktionsrate R_X [Reaktionen pro Sekunde]:

$$R_X = L \cdot \sigma_X$$

L [cm⁻²s⁻¹], soll möglichst hoch sein.

- **L ist proportional der Zahl der Teilchenkollisionen pro Sekunde.**



$$L \propto \left(\frac{N_P}{A} \right) \cdot k_P \cdot N_P$$

- N_p ... Intensität pro Paket
- A ... Strahlquerschnitt im Kollisionspunkt
- k_p ... Pakete pro Ring

- **2808 (ns-kurze) Pakete pro Ring**, → sehr kurzer Paketabstand 25ns.
- **Paketintensität von ~ 10¹¹ PpP** und **Querschnitt 60×60 μm²** bei Kollision.



Maschinenschutzsystem im LHC

- **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.



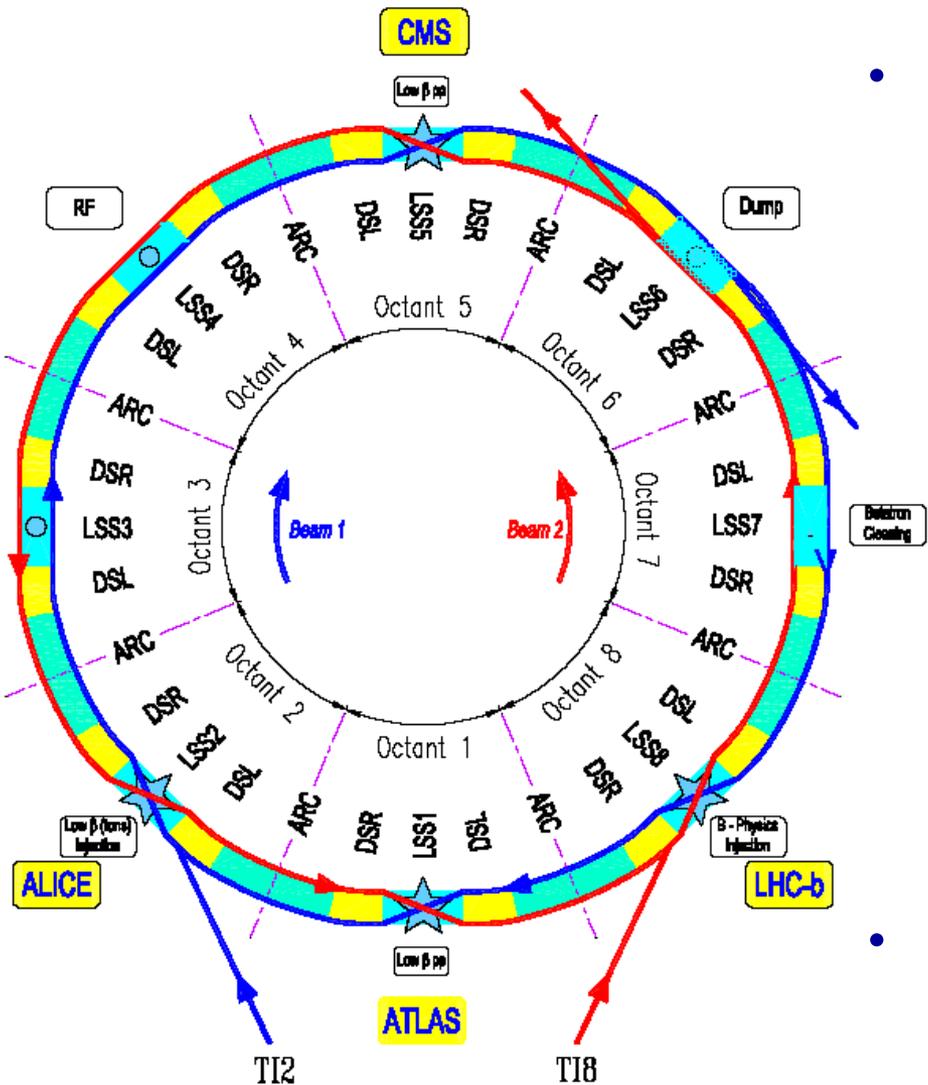
Nicht geplanter Materialtest (SPS Extraktionsfehler, Stahl, 1.5mm)
288 LHC Pakete, 450 GeV: 25 cm Schnitt in Vakuumkammer, SPS Extraktionskanal.



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



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:

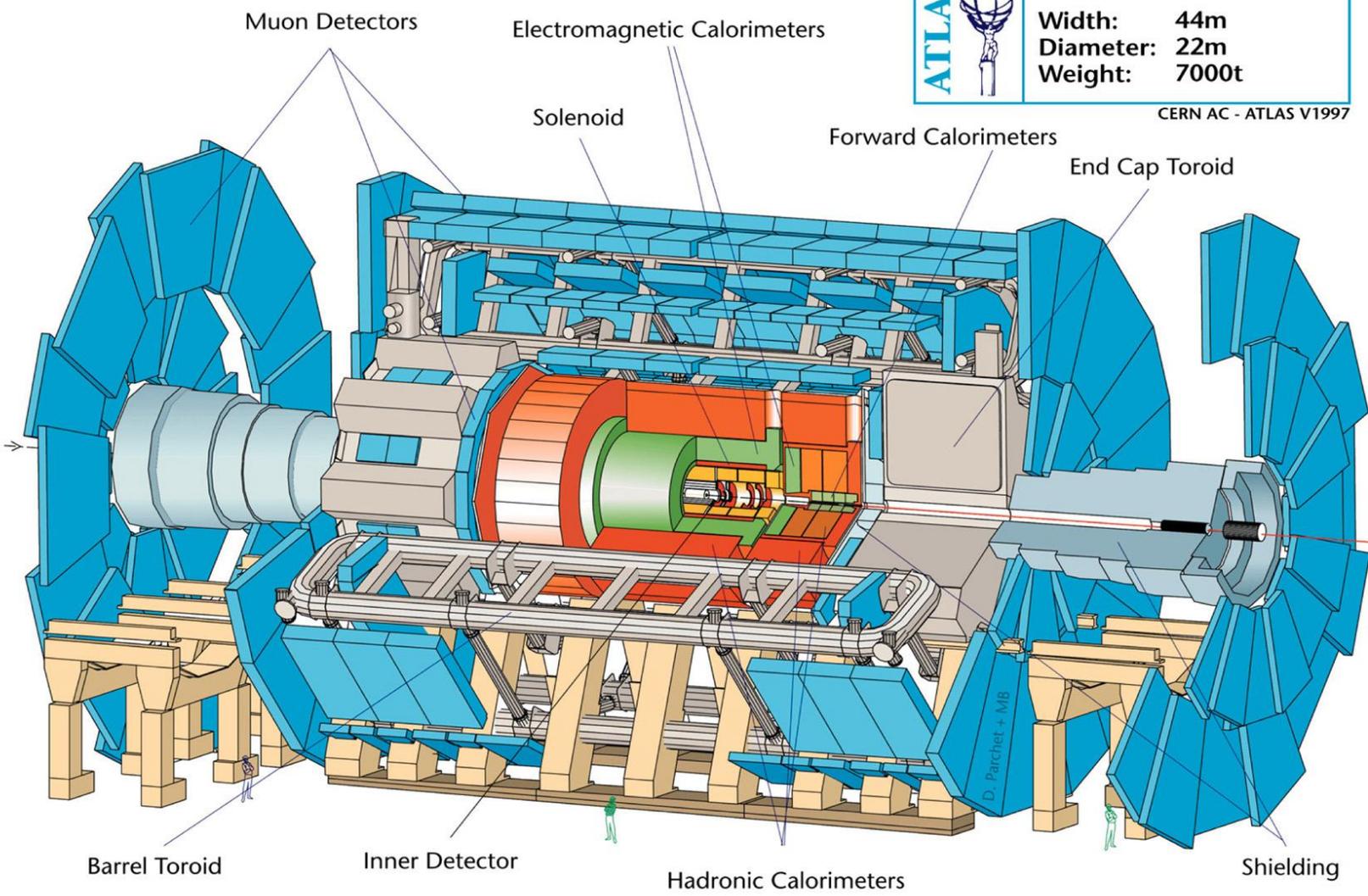
- ATLAS, CMS, LHC-b, ALICE



LHC ATLAS Detector

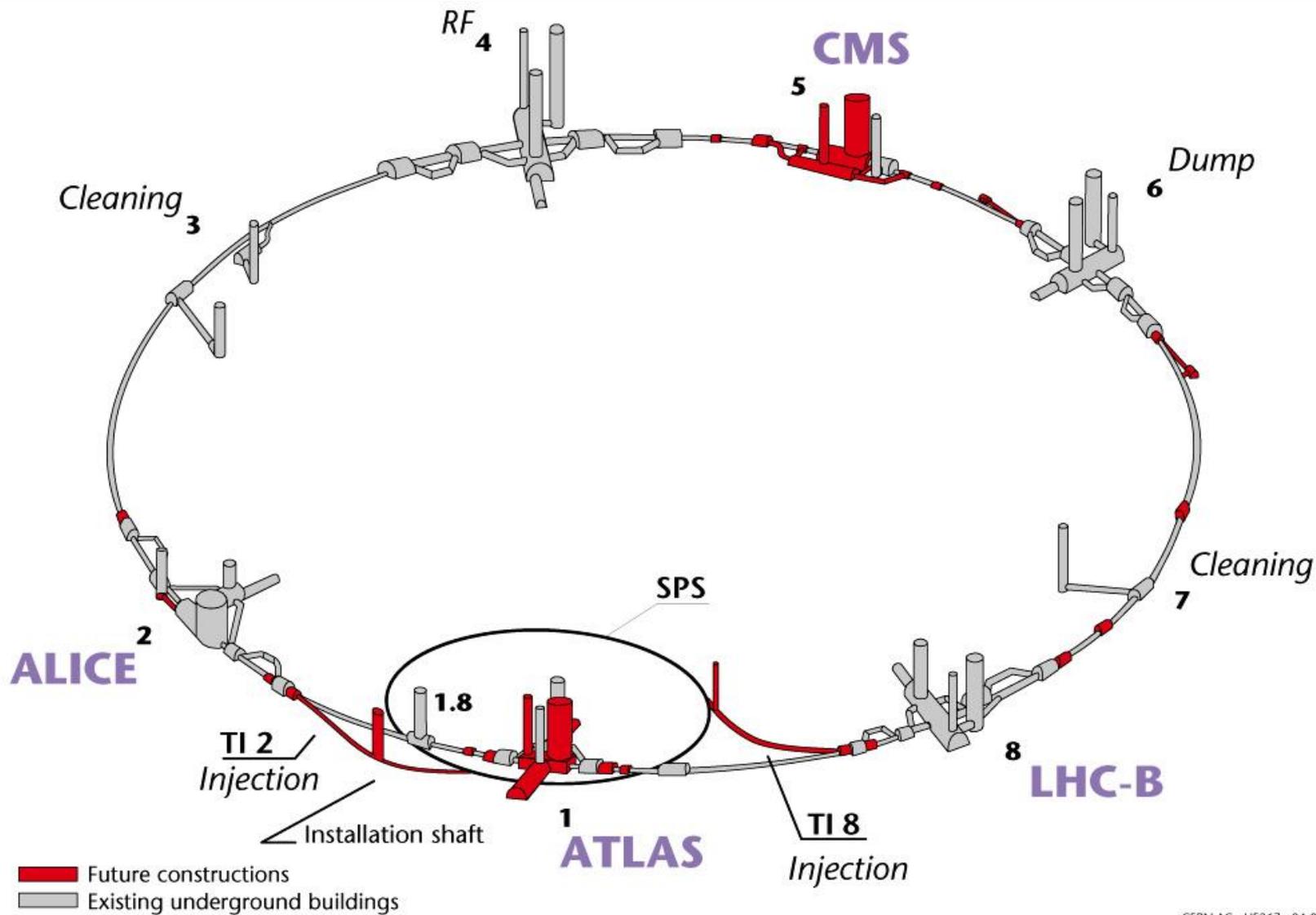
ATLAS 	Detector characteristics	
	Width:	44m
	Diameter:	22m
	Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997





LHC Tunnel Layout

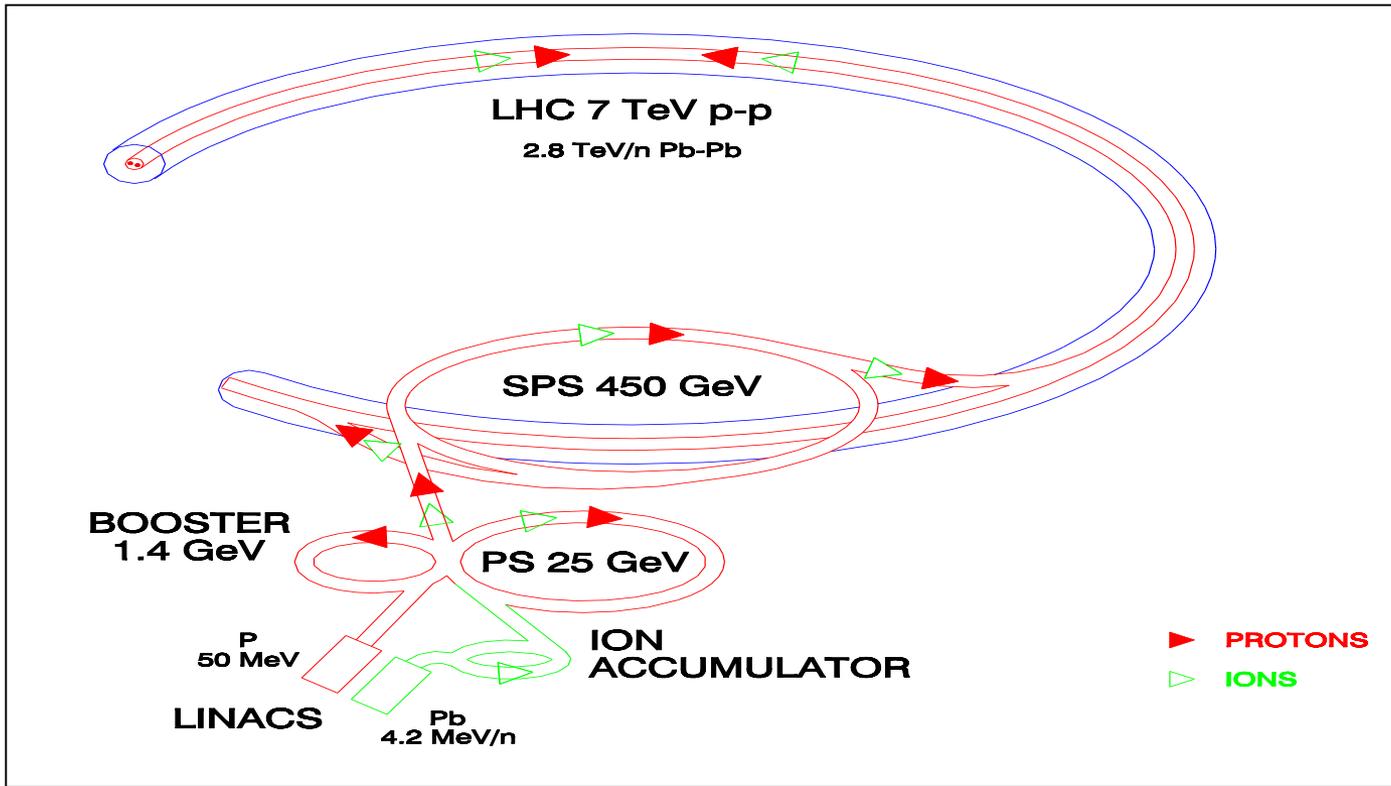


CERN AC - HF267 - 04-07-1997



LHC – Injektorbeschleunigerkette (i)

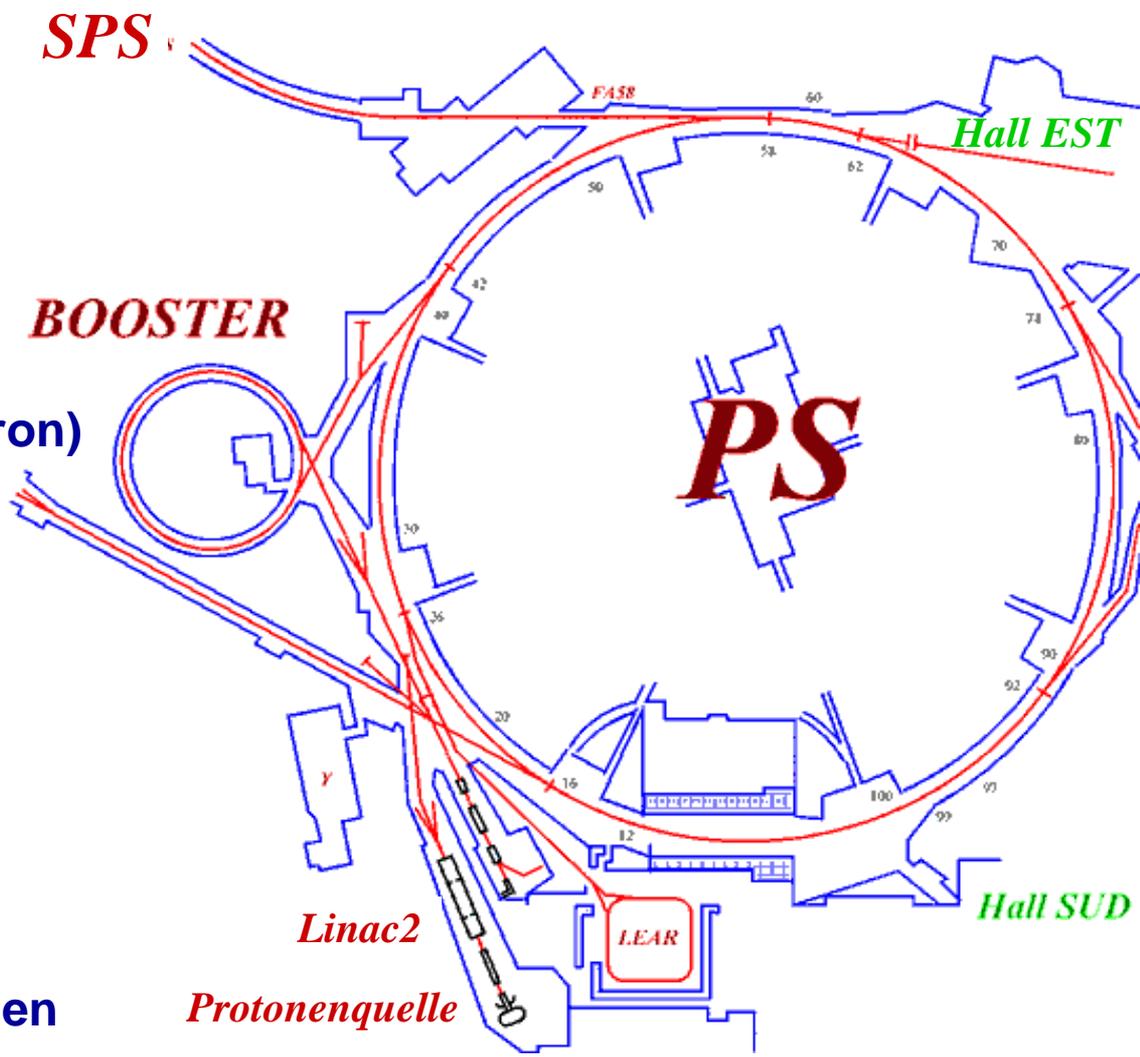
- Funktionsprinzip ähnlich der Gangschaltung beim Auto...
 - Je “schneller” (je mehr Energie/Impuls) - desto höher der Gang (größer der Beschleuniger)
 - Limitierter dynam. Arbeitsbereich: Stromversorgungen, Magnete, RF ($\beta < 1$)
 - Typischerweise 1 Größenordnung im Impuls pro Stufe.





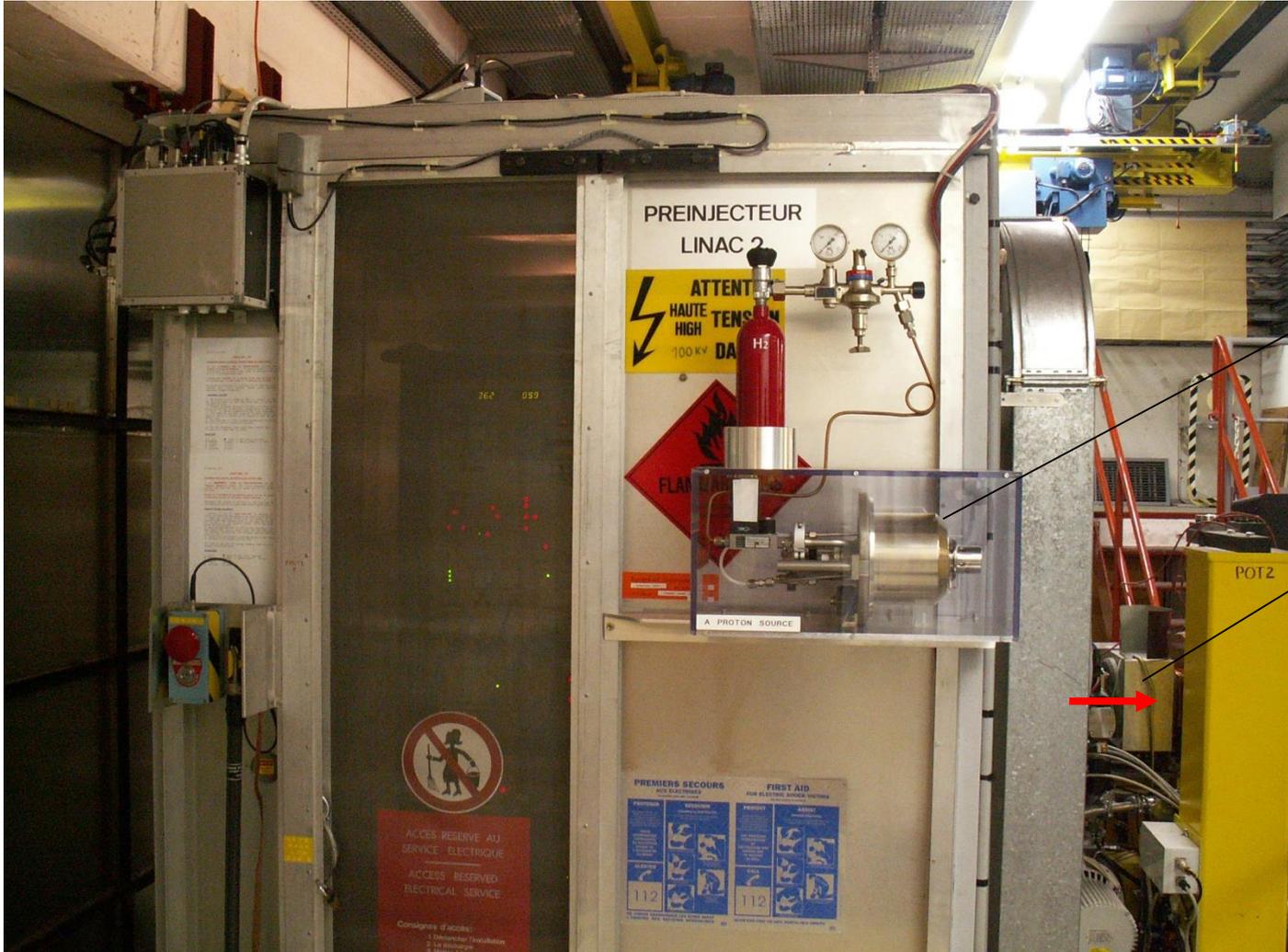
LHC – Injektorbeschleunigerkette (ii)

- **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.

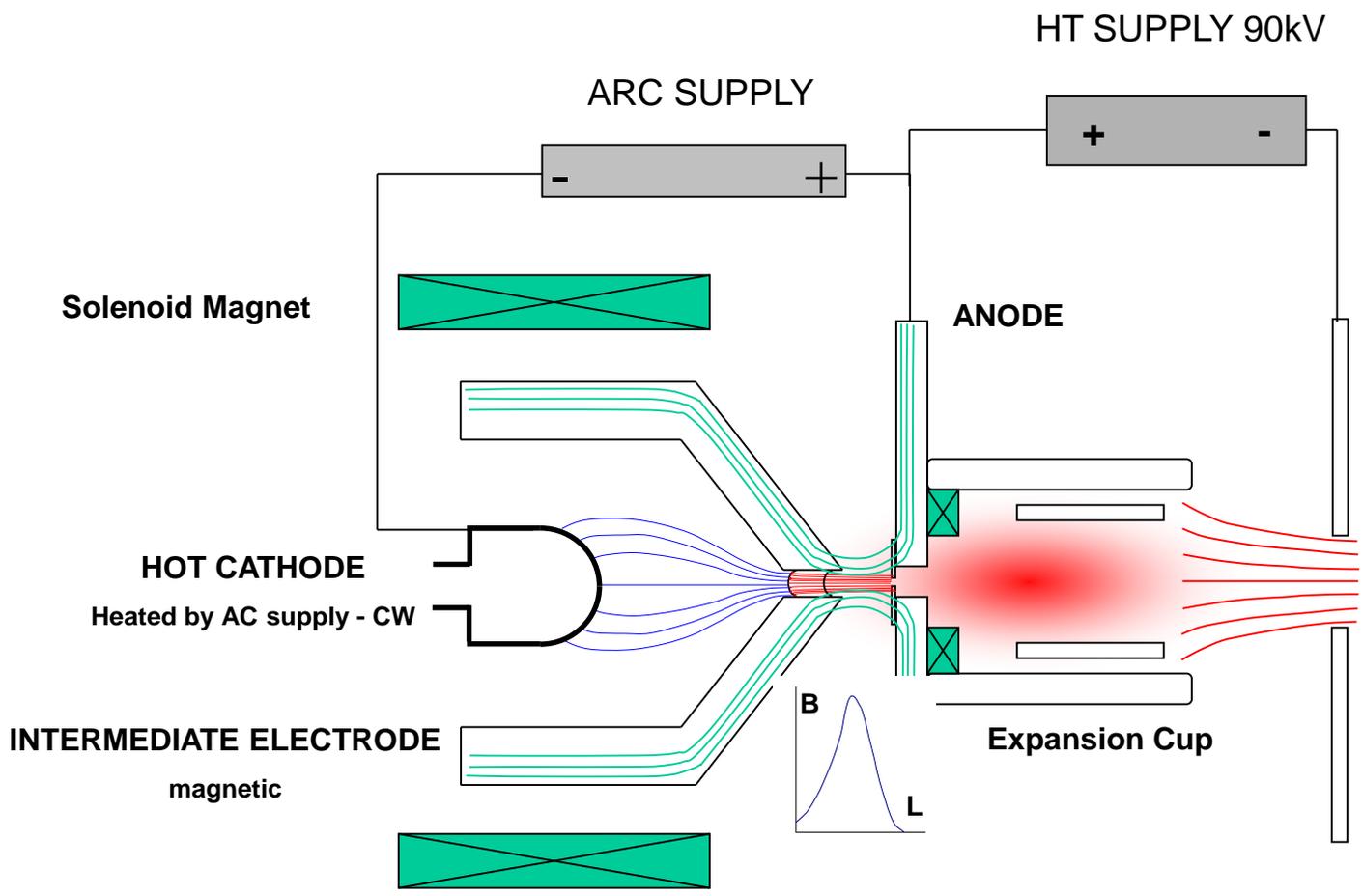


Modell
(1:1)

Strahlweg
zu Linac2



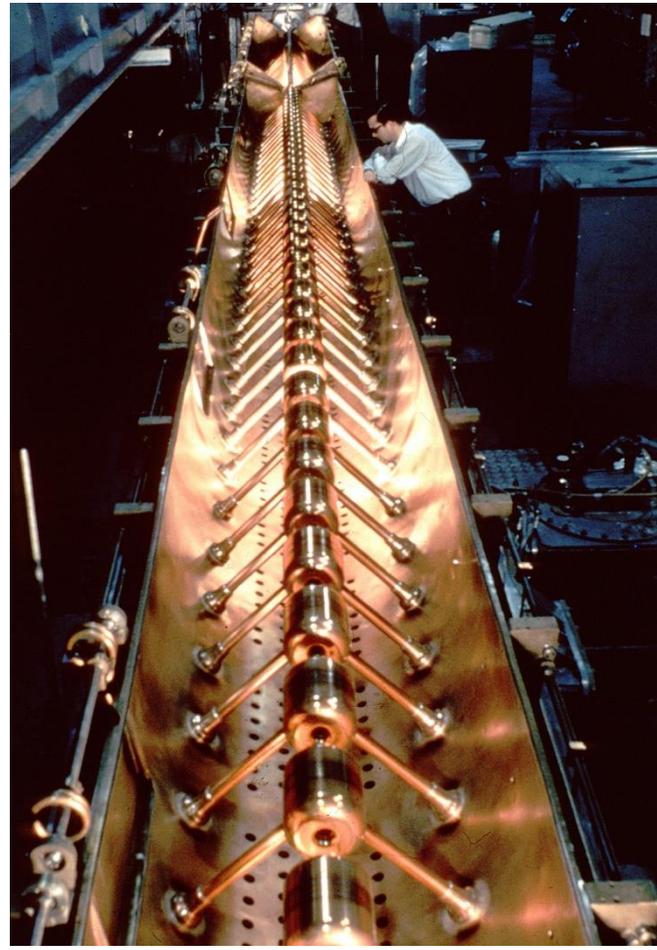
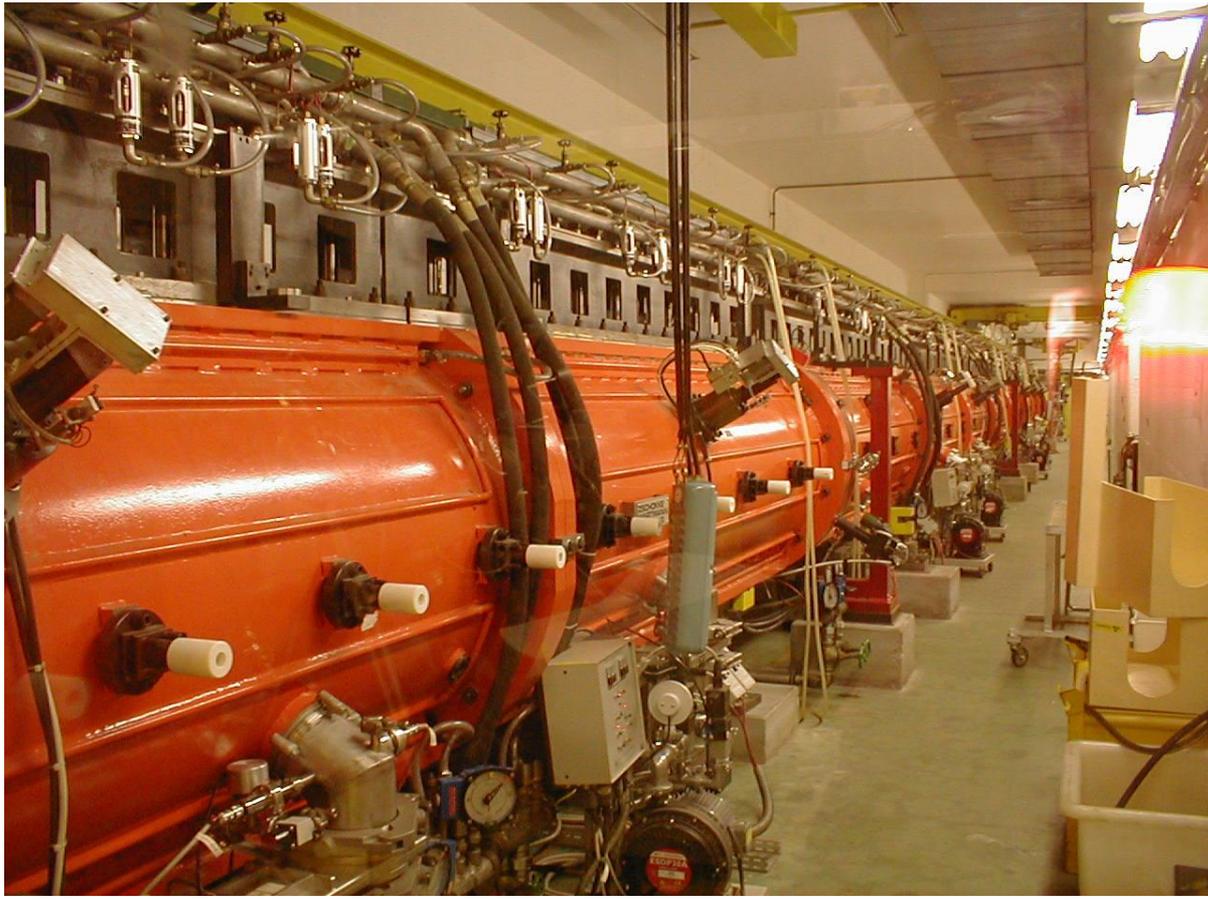
Duoplasmatron Protonenquelle (i)



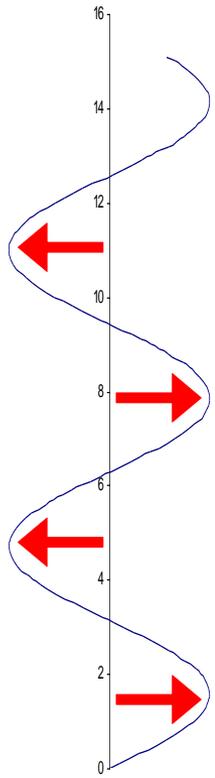


Linac2 – Alvarez Linearbeschleuniger

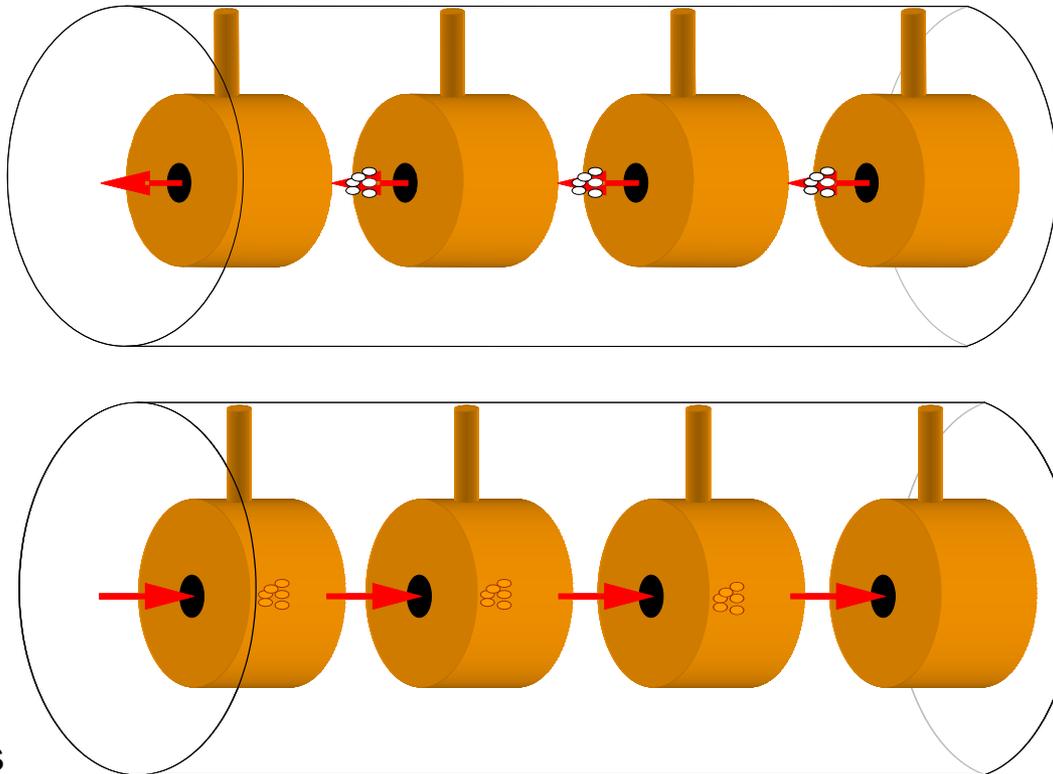
- Folgt auf Protonenquelle, beschleunigt den Strahl auf **50 MeV**.
- Beschleunigung mit elektrischem Feld, Fokussierung mit Quadrupolen.
- RF 200 MHz, Länge 30 m.



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).**

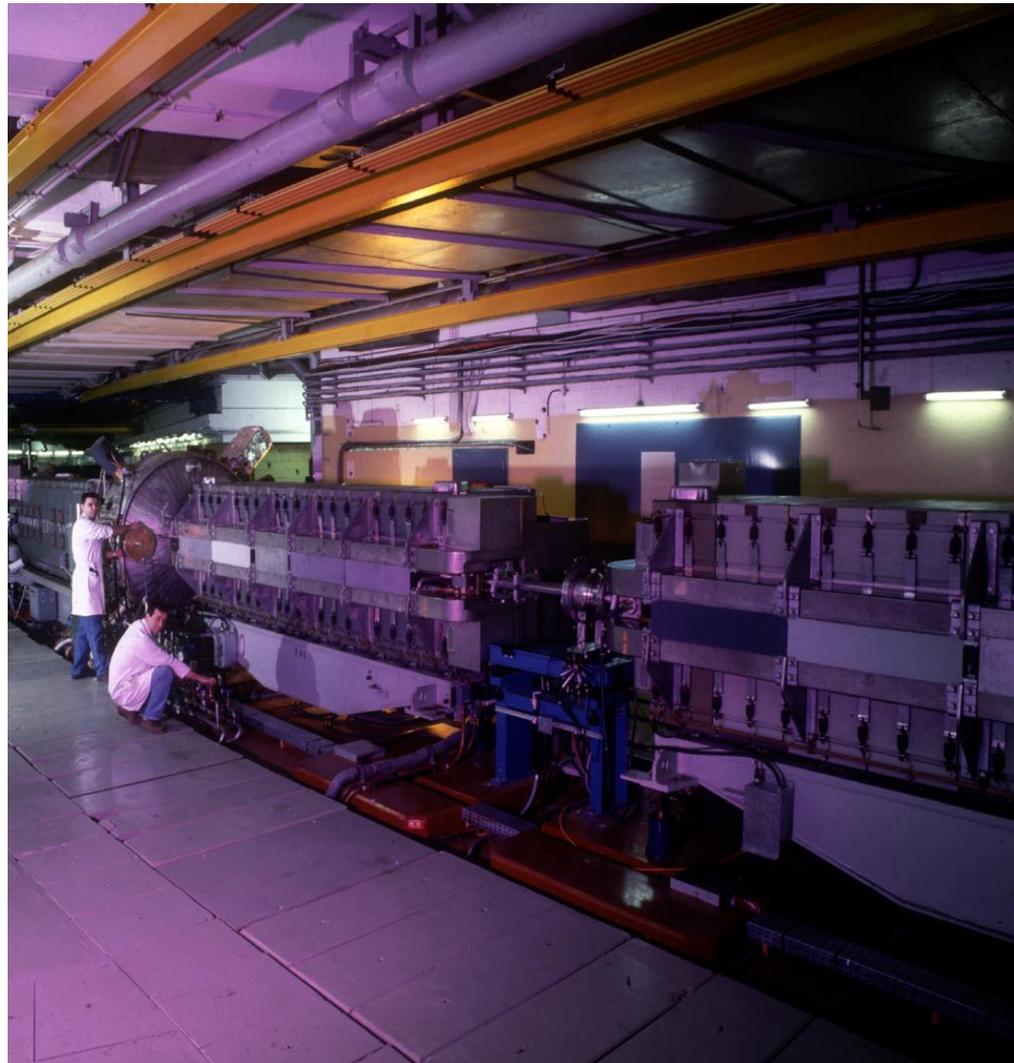
PS Booster Synchrotron (PSB)

- **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.**



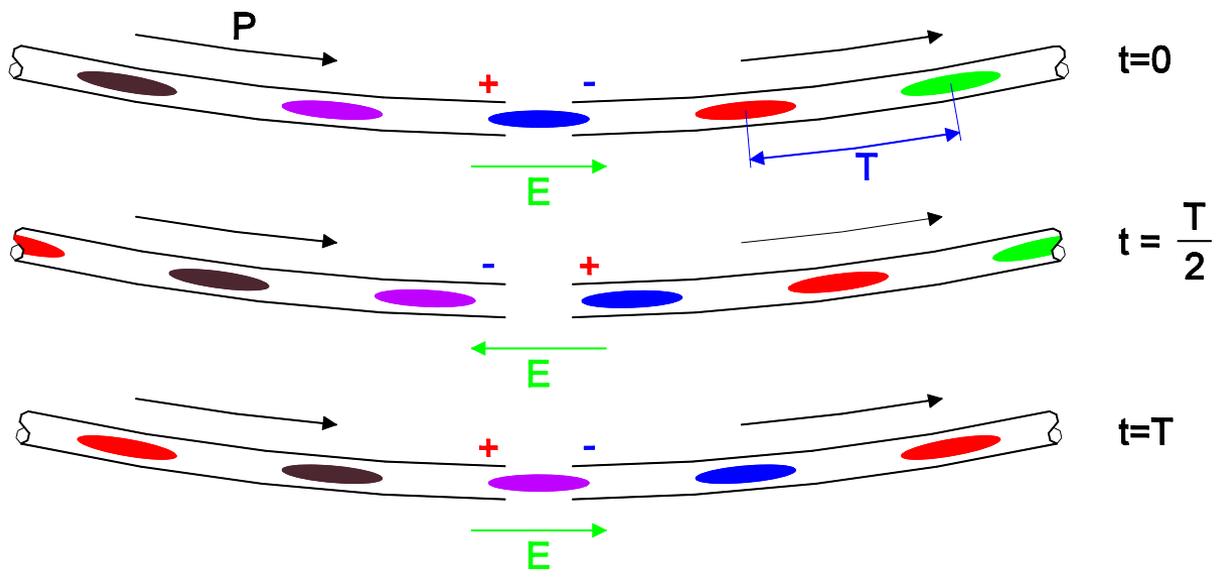
Proton Synchrotron (PS)

- 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



RF harmonische Nummer und Pakete

- **Verbindung zwischen HF und Strahlumlaufgeschwindigkeit:**
 - Falls $f_{RF} = f_{rev}$ nur ein Paket wird beschleunigt. “Richtige” Spannung nur 1x pro Umlauf.
 - Falls $f_{RF} = h \cdot f_{rev}$, **h Pakete beschleunigt**, Synchronisationsbedingung hmal pro Umlauf erfüllt.
- **“Harmonische Nummer” h.**

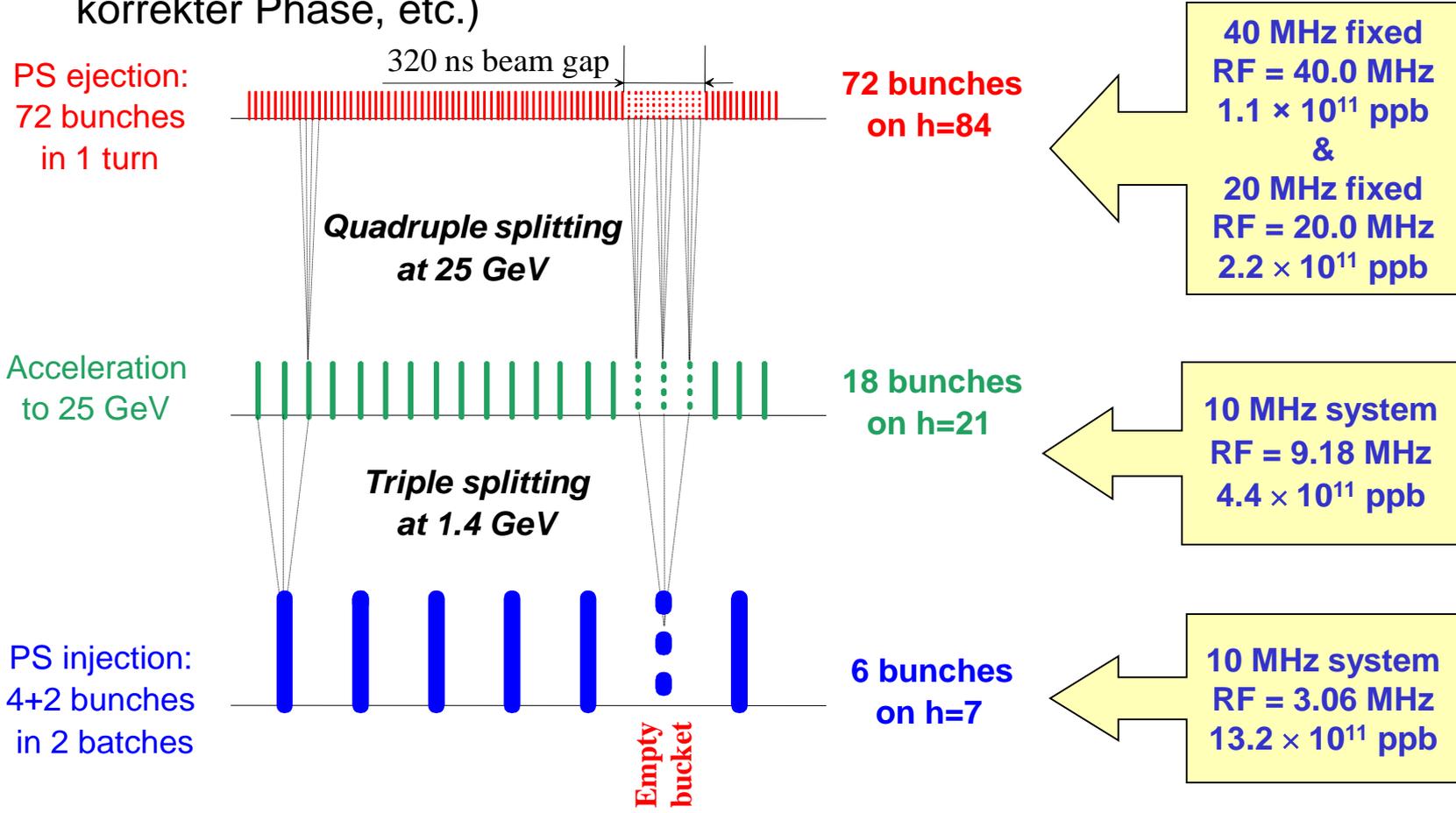




Fabrikation des 25 ns Abstands im PS

• Longitudinales “bunch splitting” (Grundprinzip)

- Verringerung der Spannung am Grundsystem bei gleichzeitiger Spannungserhöhung am höher harmonischen System (adiabatisch mit korrekter Phase, etc.)





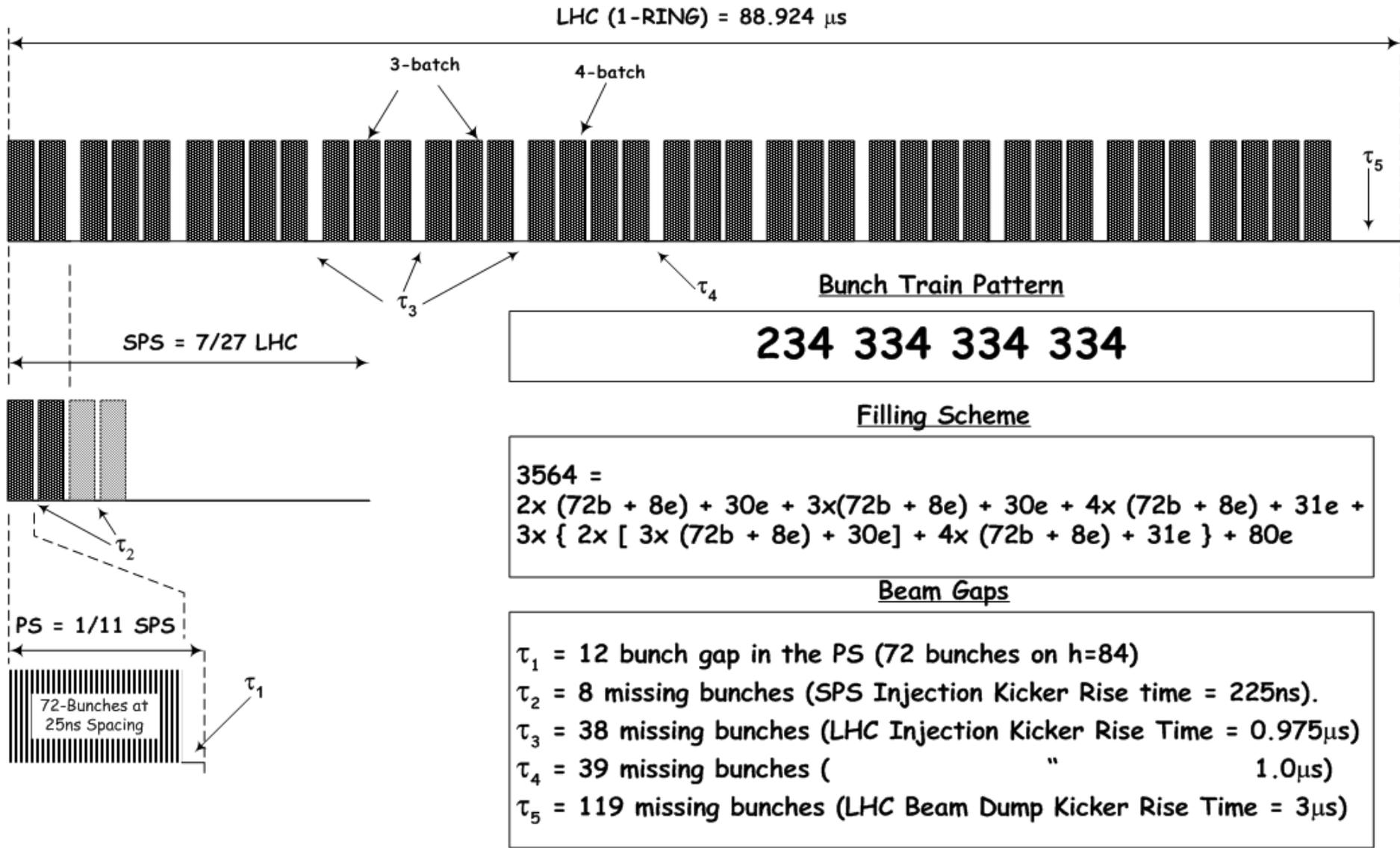
Super Proton Synchrotron (SPS)

- 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



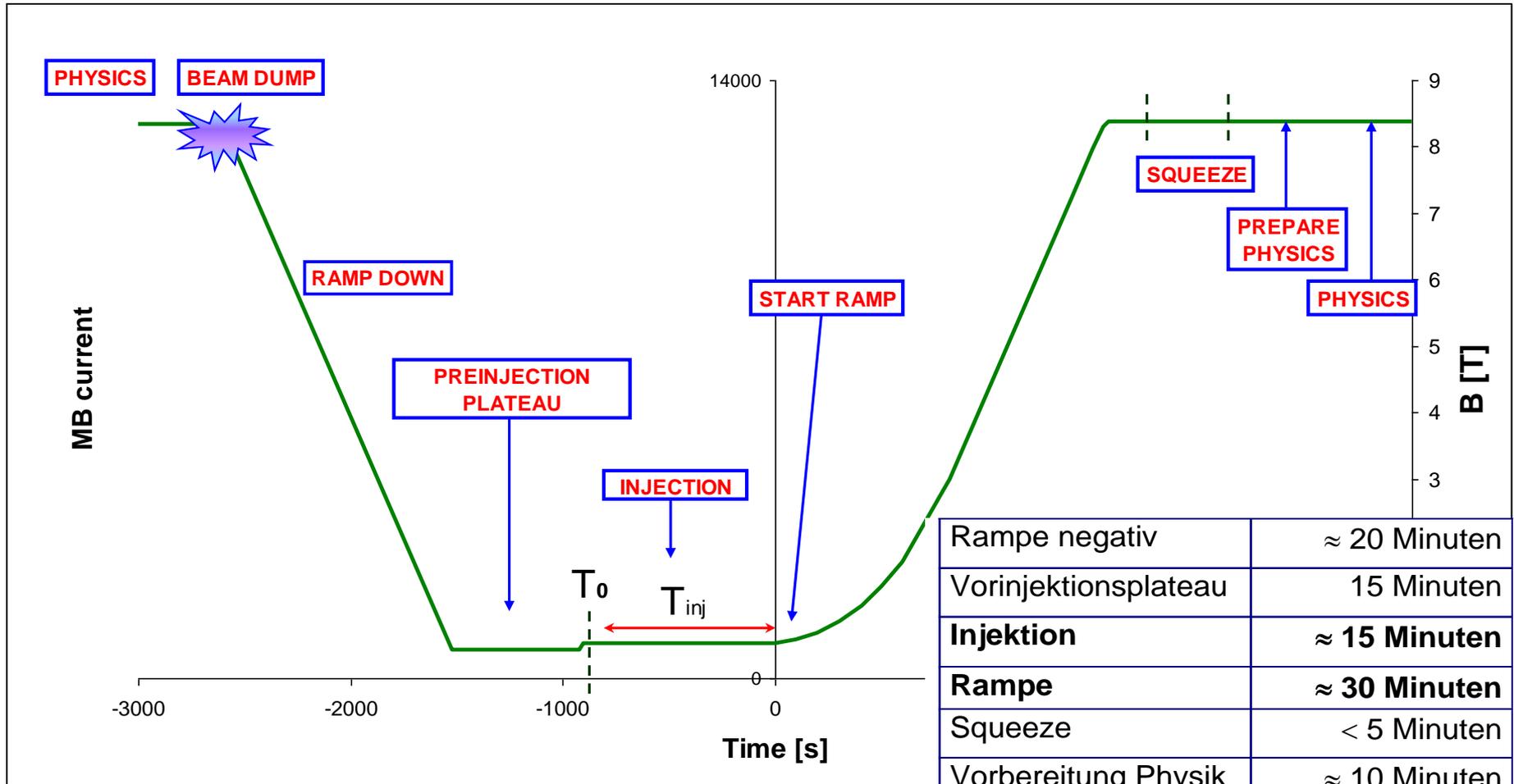


LHC Injektionsschema





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

