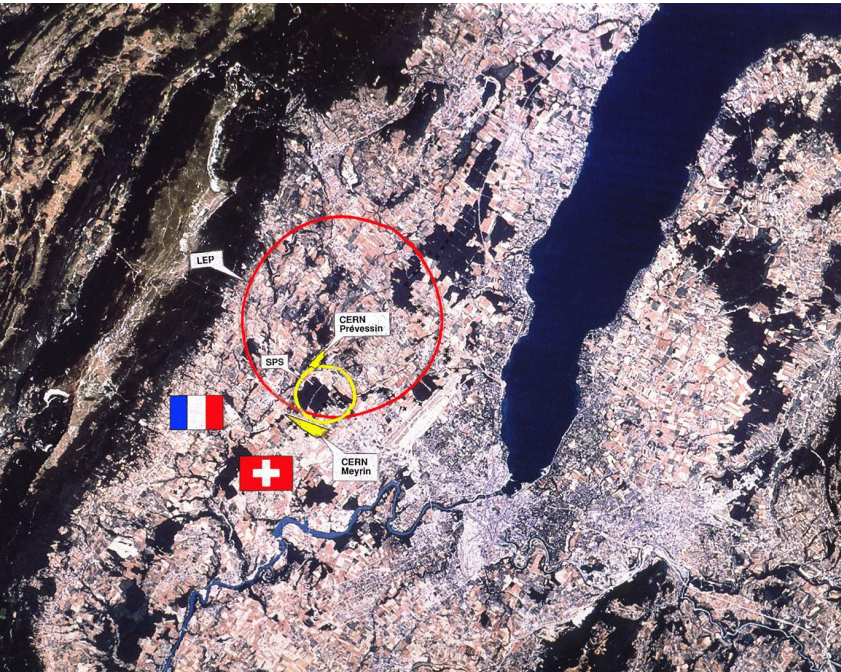


Das LHC Projekt und seine Herausforderungen

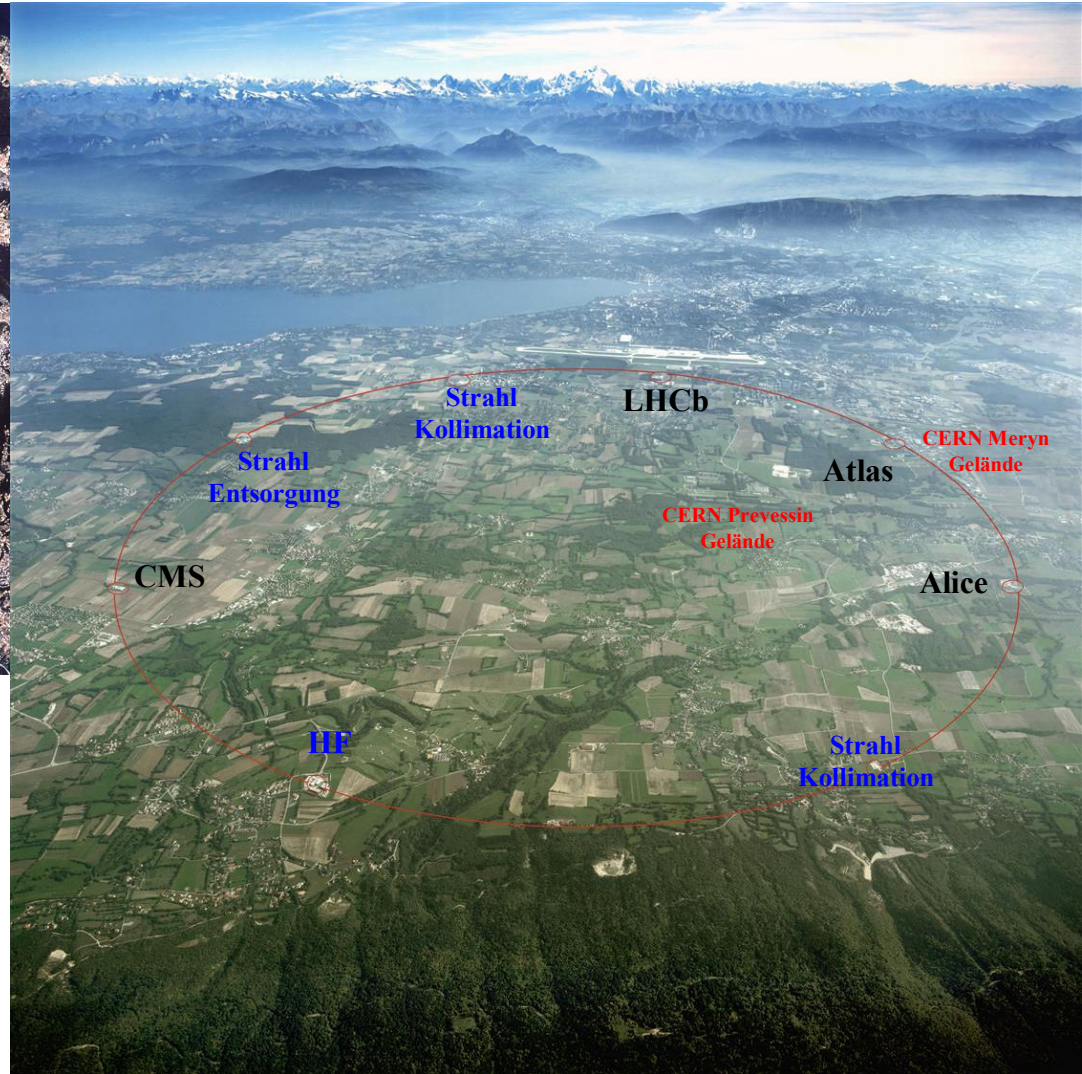


O. Brüning
CERN, Geneva, Switzerland

LHC: Ein Wahrhaftiges Großprojekt



Die Installation erstreckt sich über zwei Länder, wird von 20 Ländern betrieben und hat einen Umfang von ca. 27 km



Inhalt

- Einleitung
- Magnet Technologie
- Luminosität
- LHC Layout Überblick
- Herausforderungen für den LHC Betrieb
- Unfall im September 2008
- Überblick der LHC Parameter
- Plan für die Inbetriebnahme
- Optionen für den LHC Ausbau

Einleitung: Ziele & Leistungsmerkmale

Kollisions-Energie: Higgs Entdeckung verlangt $E_{\text{CM}} > 1 \text{ TeV}$

p Kollisionen $\rightarrow E_{\text{beam}} > 5 \text{ TeV} \rightarrow \text{LHC: } E = 7 \text{ TeV}$

Momentane Luminosität: # Ereignisse im Detektor = $L \cdot \sigma_{\text{event}}$

seltene Ereignisse $\rightarrow L > 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \rightarrow L = 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$

Integrierte Luminosität: $L = \int L(t) dt$

abhängend von der Strahl Lebensdauer, dem LHC Zyklus,
'neu Füll' Zeit und allgemeine Beschleuniger Effizienz

Einleitung: das LHC ist ein Synchrotron

R = konstant:

$v = c \rightarrow B \propto \gamma$

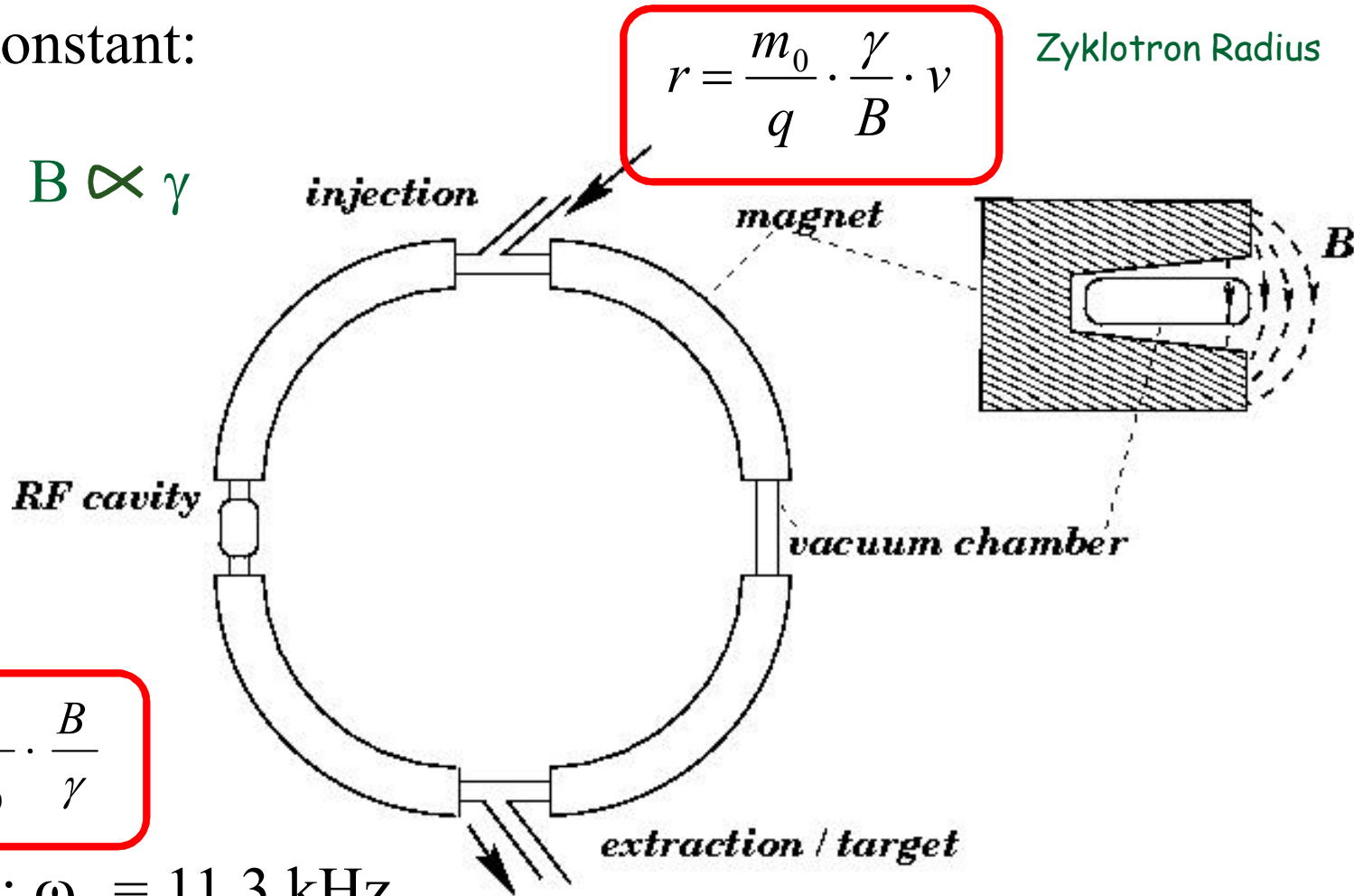
$$r = \frac{m_0}{q} \cdot \frac{\gamma}{B} \cdot v$$

Zyklotron Radius

Zyklotron
Frequenz

$$\omega_0 = \frac{q}{m_0} \cdot \frac{B}{\gamma}$$

LHC / LEP: $\omega_0 = 11.3 \text{ kHz}$



Einleitung: Fokussierung

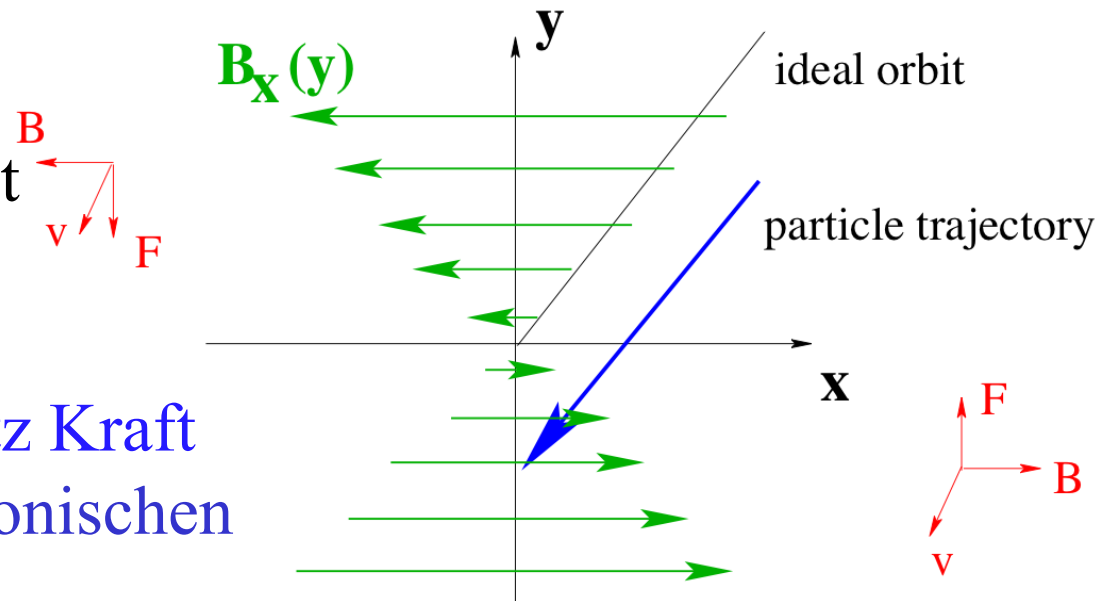
Orbit Störungen: z.B. Gravitation

$$\Delta y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot \Delta t^2$$

$$g \approx 10 \text{ m s}^{-2}$$

$$\Delta y = 18 \text{ mm} \quad \text{in} \quad \Delta t = 60 \text{ msec}$$

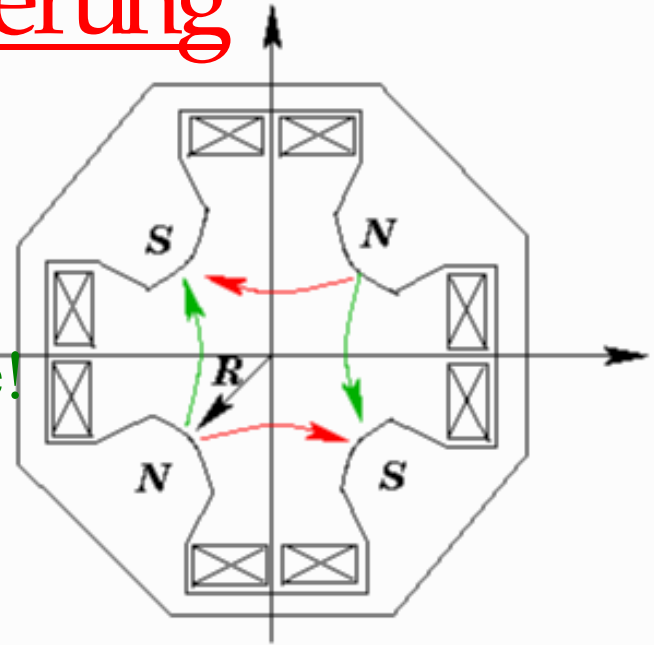
Fokussierung:
lineare Abhängigkeit
des Magnetfeldes
von der Ablage
resultierende Lorentz Kraft
identisch zum harmonischen
Oszillator



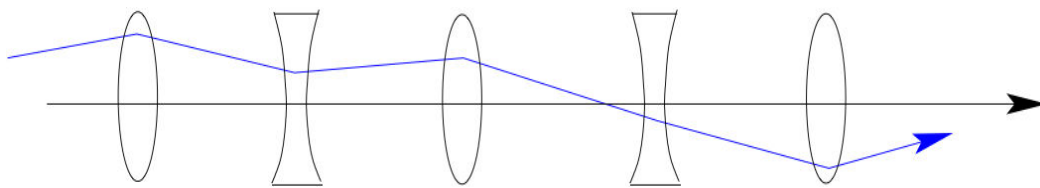
Einleitung: Fokussierung

Fokussierung: **Quadrupol Magnete**
transversale Schwingungs-Frequenz
abhängig von der Fokussierungsstärke!

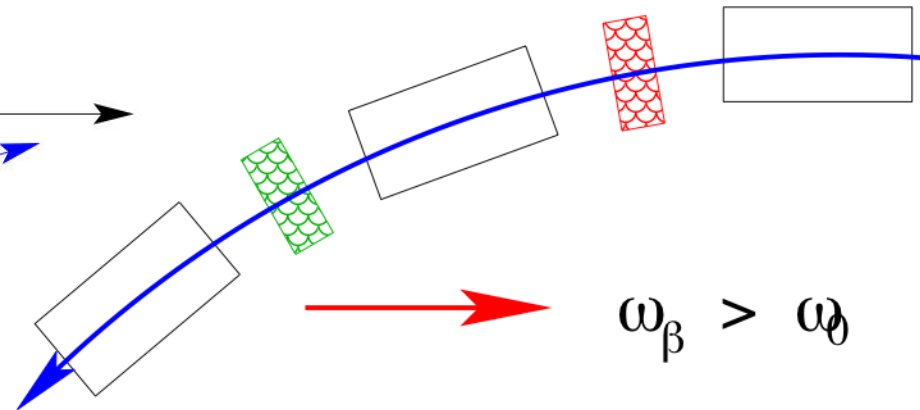
$Q = \text{transversale Schwingungen} /$
Umlauf



Alternierende Gradienten Fokussierung: **optisches Teleskop**

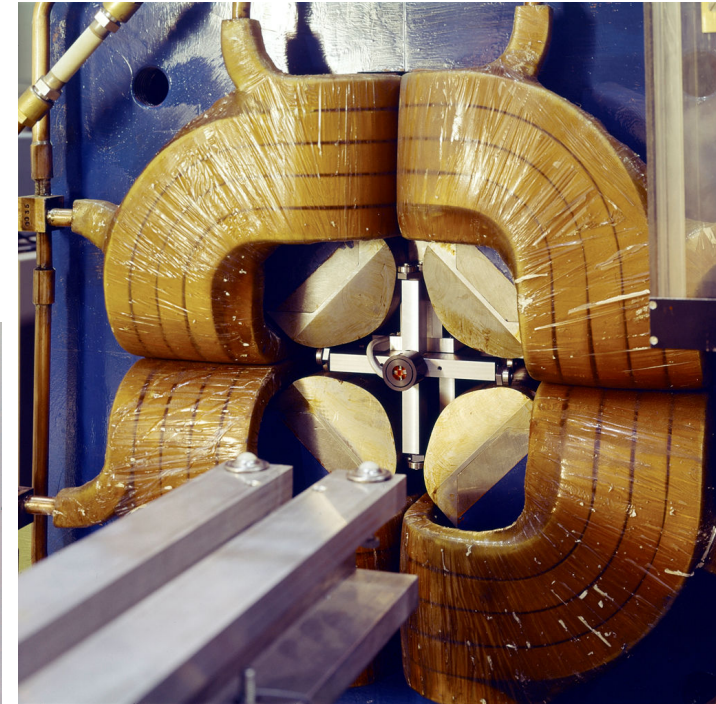


Strahlgröße abhängig von
der Fokussierungsstärke!

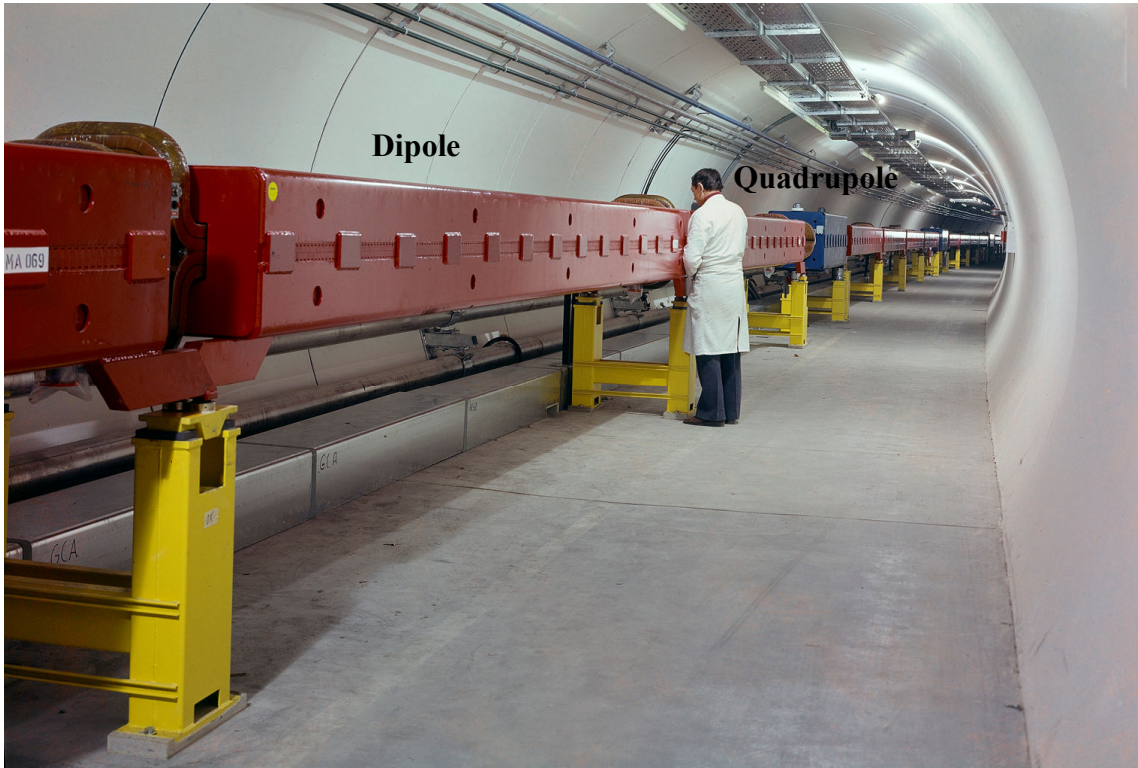


Einleitung: Reguläre Bogenstruktur

■ Synchrotron Zelle im Bogen:
Beispiel normal leitende
SPS Magnete mit Eisenjoch



Magnetanordnung im
SPS Beschleuniger:
Bogen Zelle = 3 Dipol
auf einen Quadrupol



Einleitung: das LHC ist ein Synchrotron

uniformes B Feld: $R = \text{konstant}$

$$p = q \cdot \frac{B \cdot \text{circ}}{2\pi} \approx E/c$$

for $E \gg E_0$

realistisches Synchrotron: B-Feld ist nicht uniform

-Magnetfeld freier Raum für Installation

-unterschiedliche Magnet Typen

-Raum für Experimente etc.

$$E = \frac{q \cdot c}{2\pi} \cdot \oint B \cdot ds$$

$$= \frac{q \cdot c}{2\pi} \cdot \text{circ} F \cdot B$$

→ hohe Strahlenergien

benötigen:

-starkes Magnetfeld

-grossen Speicherring

-kompakte Magnet Installierung

Einleitung: das LHC ist ein Synchrotron

Physik Zielvorgabe: $E = 7 \text{ TeV}$

existierende Infrastruktur: LEP Tunnel: $\text{circ} = 27 \text{ km}$
mit 22 km langen Bögen

Ca. 80% der Bögen kann mit Dipolen bestückt werden: $F = 0.8$

Benötigtes Dipolfeld für das LHC:

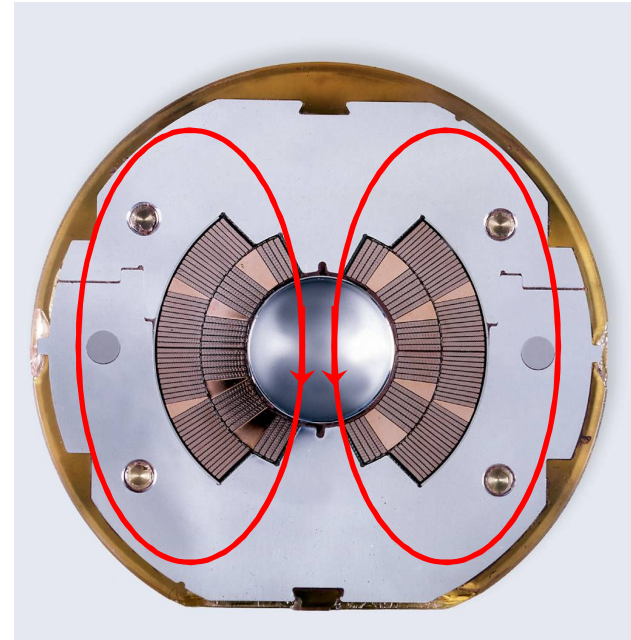
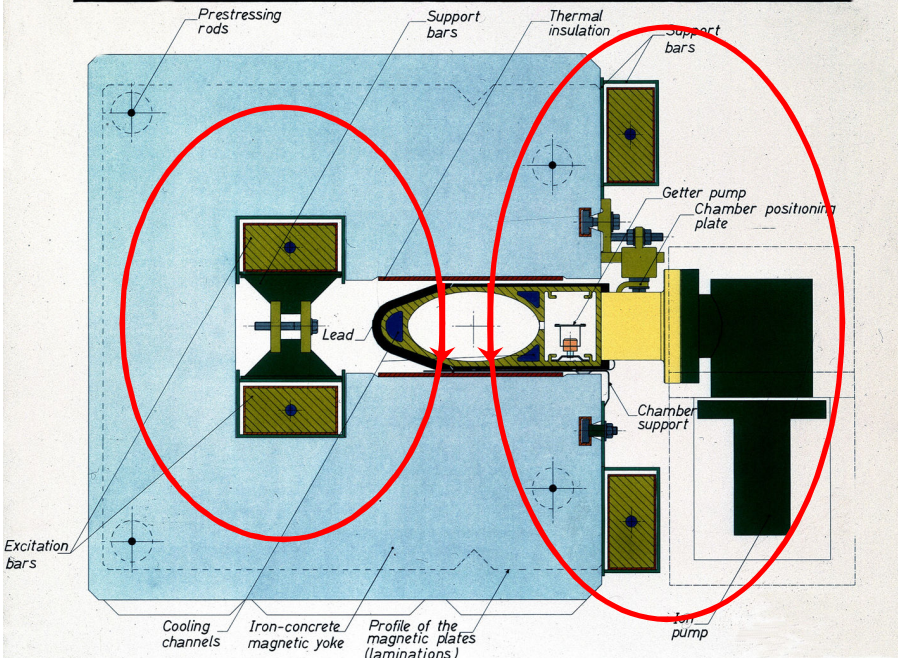
$$\frac{2\pi}{q} \cdot \frac{E/c}{\text{circ} F} = B \quad \rightarrow \quad B = 8.38 \text{ T} \quad (\text{Erdfeld: } 0.3 \cdot 10^{-4} \text{ T})$$

Magnet Technologie

hohe Strahlenergien verlangen starke Magnetfelder

1) Eisen Joch Magnet Design 2) Luftspulen Magnet

CROSS SECTION OF THE DIPOLE MAGNET WITH THE VACUUM CHAMBER



-Feldfehler durch Joch Oberfläche gegeben

-Feldverstärkung durch Eisen

-Eisen erreicht bei 2 T Sättigung

-Verluste durch Ohmscher Widerstand

-Feldfehler durch Spulen Geometrie

-SC Technologie vermeidet Widerstand

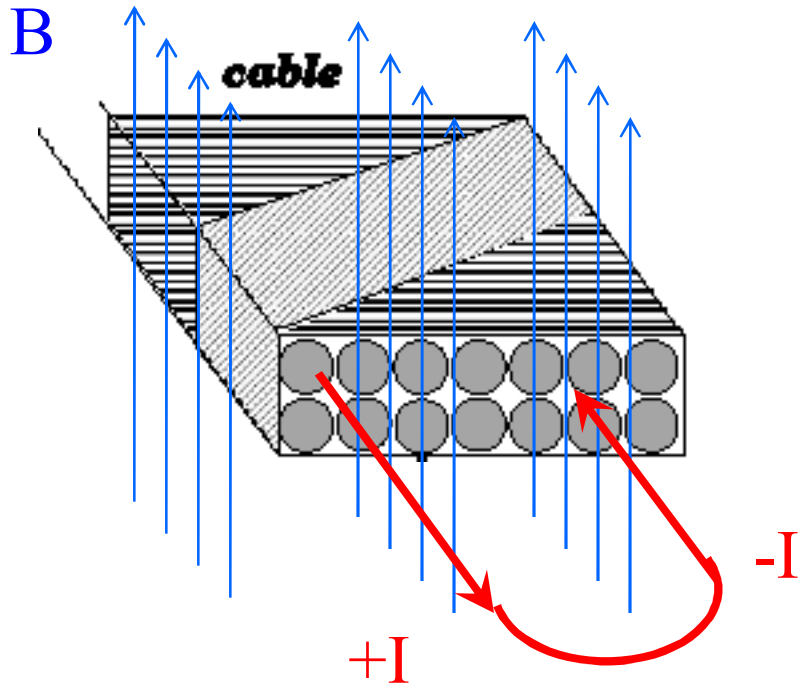
-Gefahr eines Magnet Quenches

-Zeitlich veränderliche Feldfehler

Magnet Technologie

Eddy Ströme: Veränderung des magnetischen Flusses während der Beschleunigung erzeugt Kreisströme:

$$\frac{\partial \mathcal{B}}{\partial t} = -c \cdot \text{rot}(\mathbf{E})$$



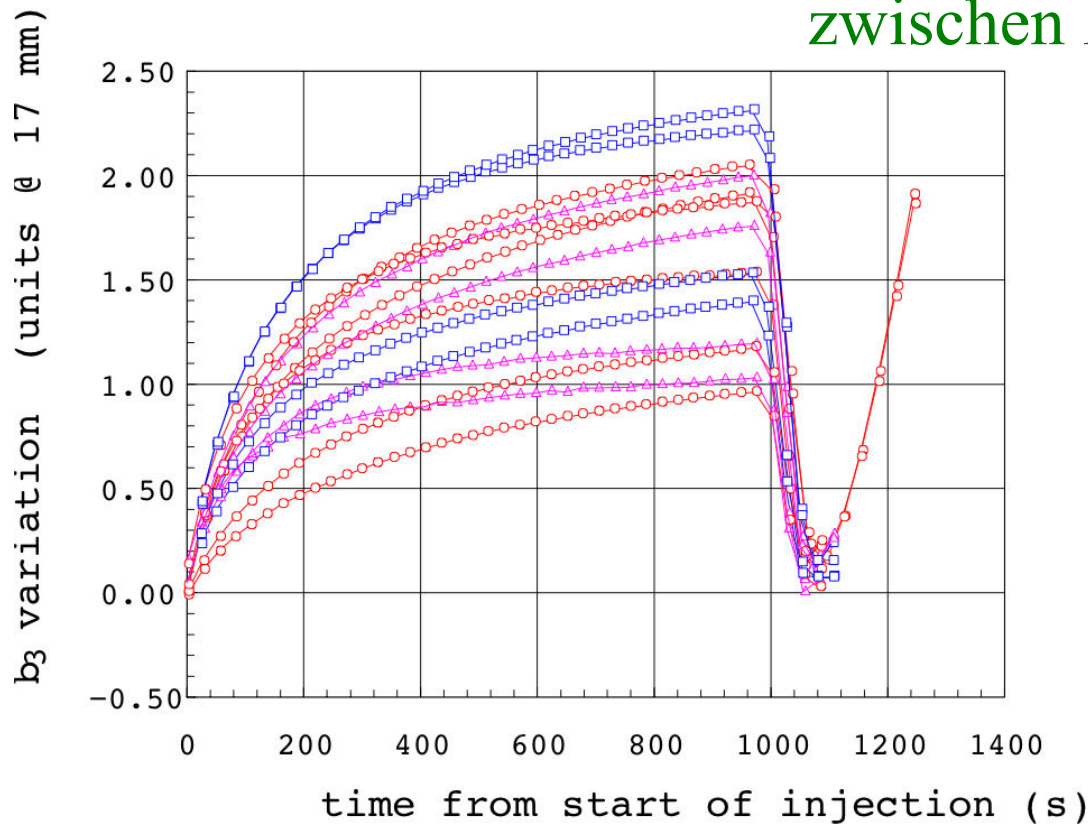
Kreisströme erzeugen magnetisches Moment das die Feldqualität beeinträchtigt

→ langsame Veränderung des Stromes

→ verschwinden bei hohen Stromdichten

Magnet Technologie

‘Persistent‘ Feld Fehler: Ohne Ohmschen Widerstand bleiben Eddy Ströme erhalten → Dämpfung durch Kontaktwiderstand zwischen Kabelwicklungen →

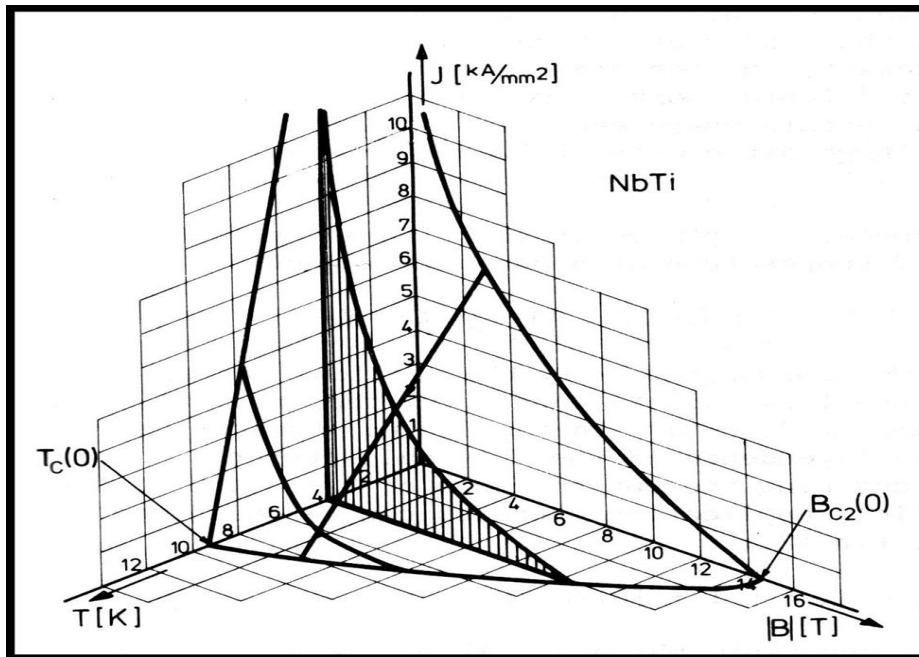


Fehler variieren mit Zeit;
variieren zwischen
Magneten und
Operations-Zyklen

‘Snap back‘ bei
Beschleunigung:
große Feldstörungen über
kurzen Zeitraum

Magnet Technologie

Kritische Fläche für NbTi:



-starke Magnetfelder erschweren den Erhalt der Supraleitung

-niedrige Temperaturen erleichtern den Erhalt der Supraleitung

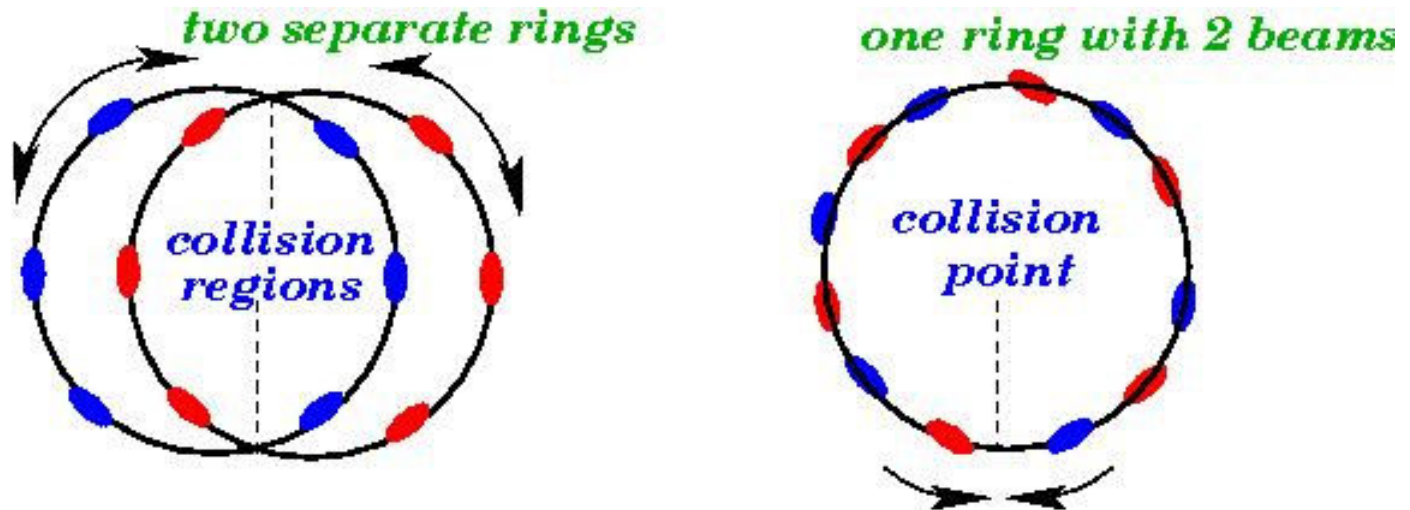
-LHC: $B = 8.4 \text{ T}$; $T = 1.9 \text{ K}$
 $j = 1 - 2 \text{ kA / mm}^2$

andere Maschinen: Tev: $B=4.5\text{T}$; HERA: $B=5.5\text{T}$; RHIC: $B=3.5\text{T}$

He: superfluide und hohe thermale Leitfähigkeit unterhalb 2K!

Magnet Technologie

Speicherringe mit kollidierenden Strahlen:



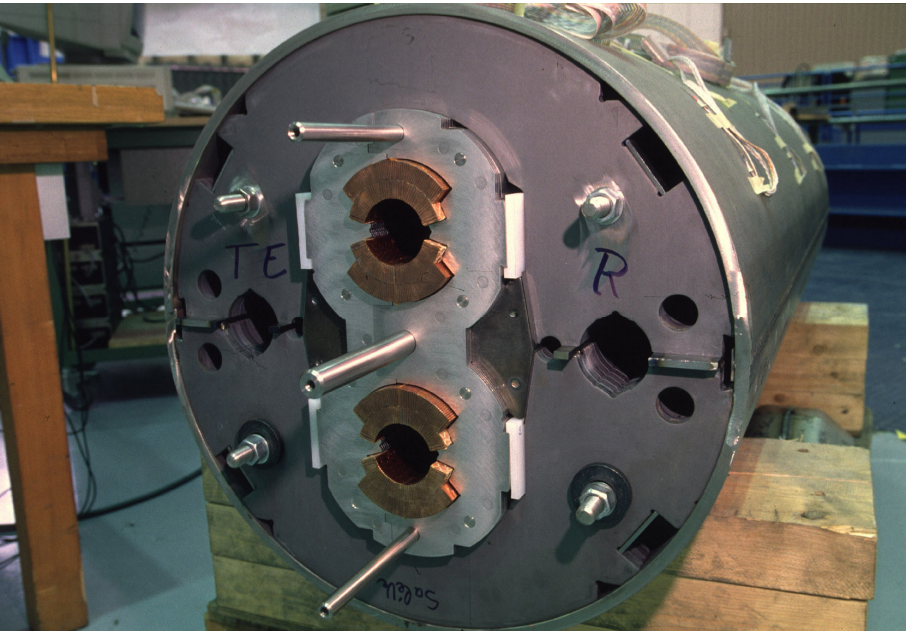
Ring mit einer Apertur benötigt Teilchen & Anti-Teilchen
Ineffizient für Hadronen! (Tevatron, Chicago USA)

Entwurf mit 2 Ringen benötigt doppelte Infrastruktur (Preis!)

➔ **LHC hat ein neues effizientes 2-in-1 Magnet Design**

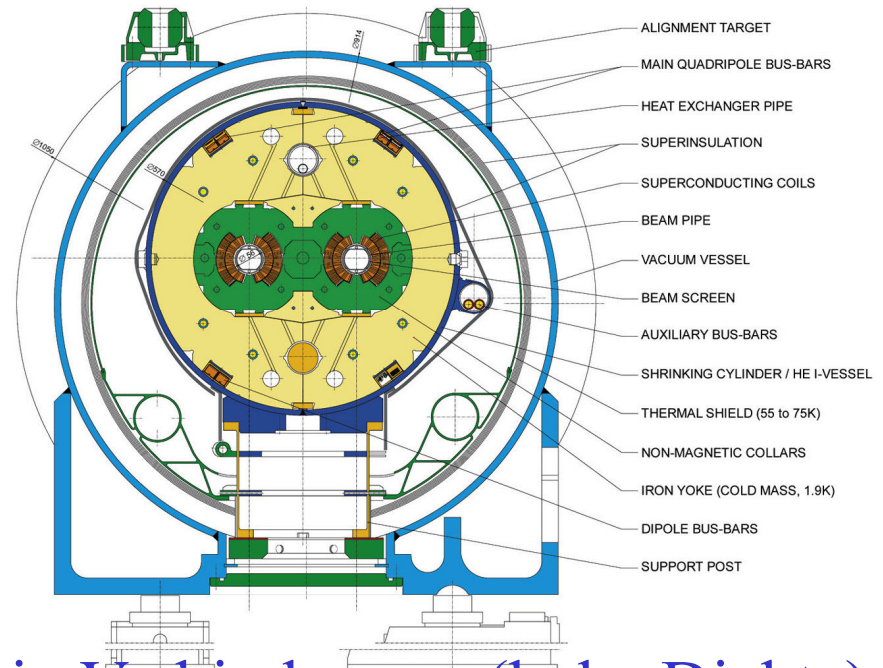
Magnet Technologie

2-in-1 Dipol Magnet mit gemeinsamer Infrastruktur:



LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN AC/DI/MMA - HE 107 - 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

-15 m lang

→ wenig Verbindungen (hohe Dichte)

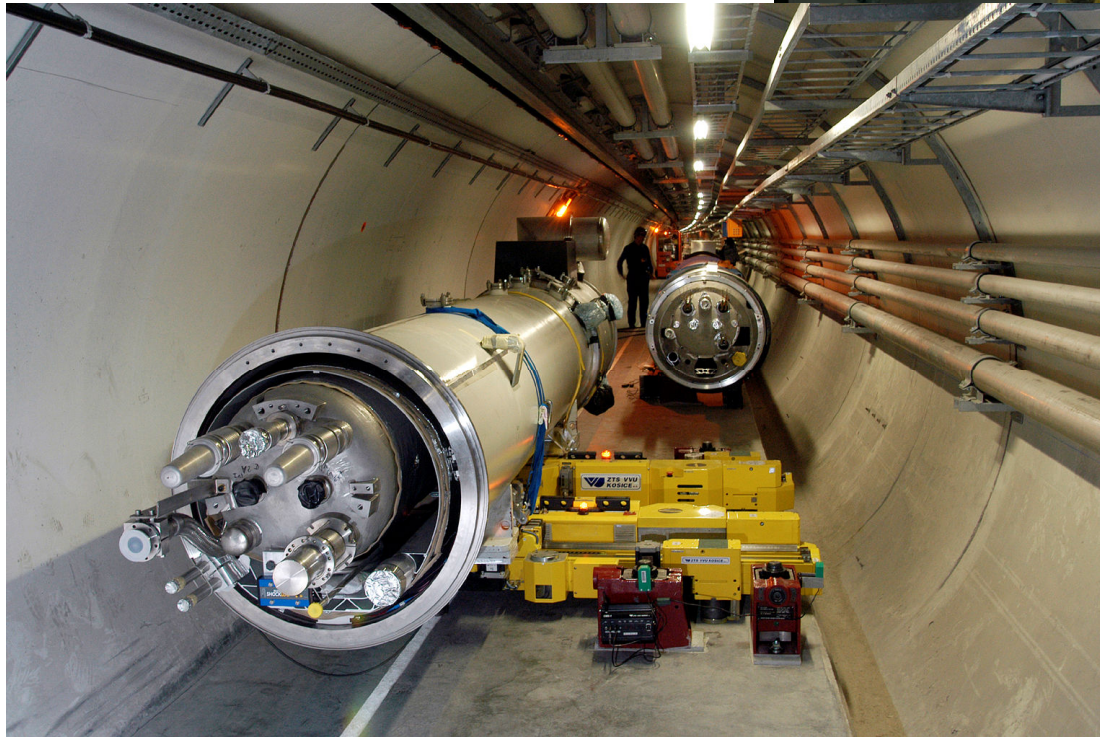
schwerer Transport (ca. 30 Tons)

-kompakte 2-in-1 Magnete → ermöglicht p-p Kollisionen

-korrektur Magnete → kleine mechanische Toleranzen

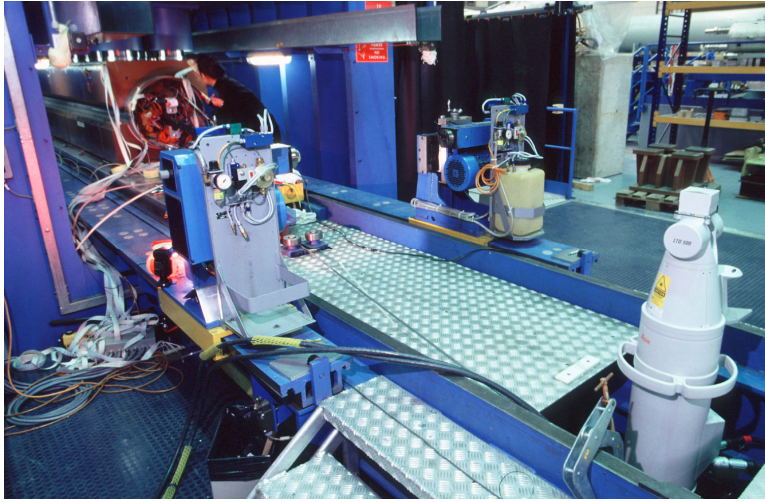
Magnet Technologie

15 m lang, 30 Tonnen
schwerer Transport &
kleine Tolleranzen

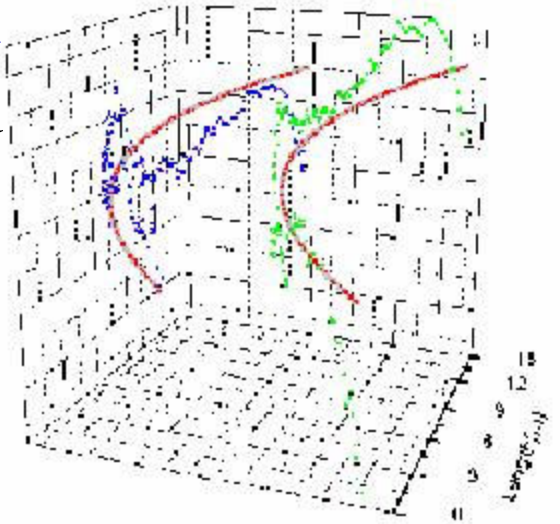


Magnet Technologie

Mechanische Tolleranzen im μm Bereich



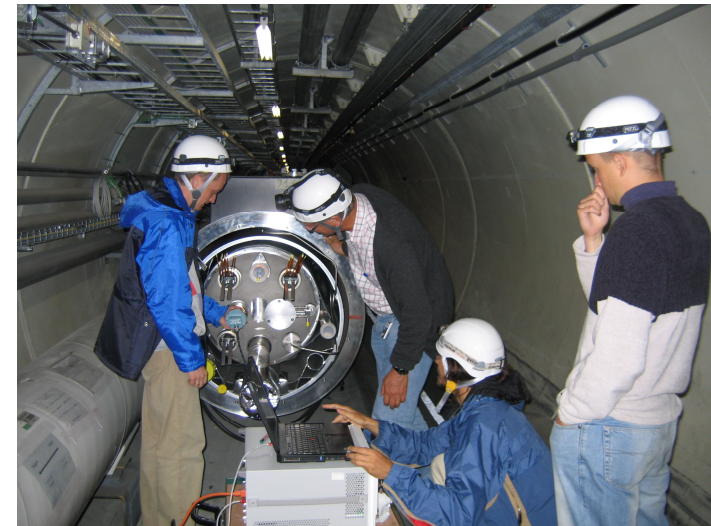
Alle Magnete sind gebogen und haben eine Sagitta (ca. 2cm)
→ genaue Vermessung



→ Klassifizierung & Platz Sortierung für Installation an kritischen Stellen

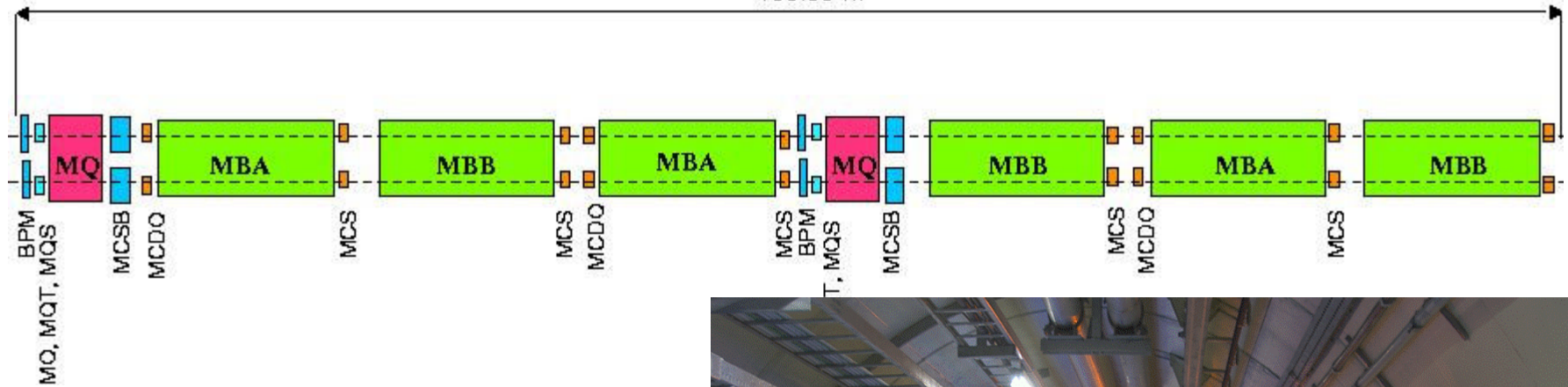
Präzisions-Aufstellung im Tunnel:

→ mm genaue Vermessung über 27km

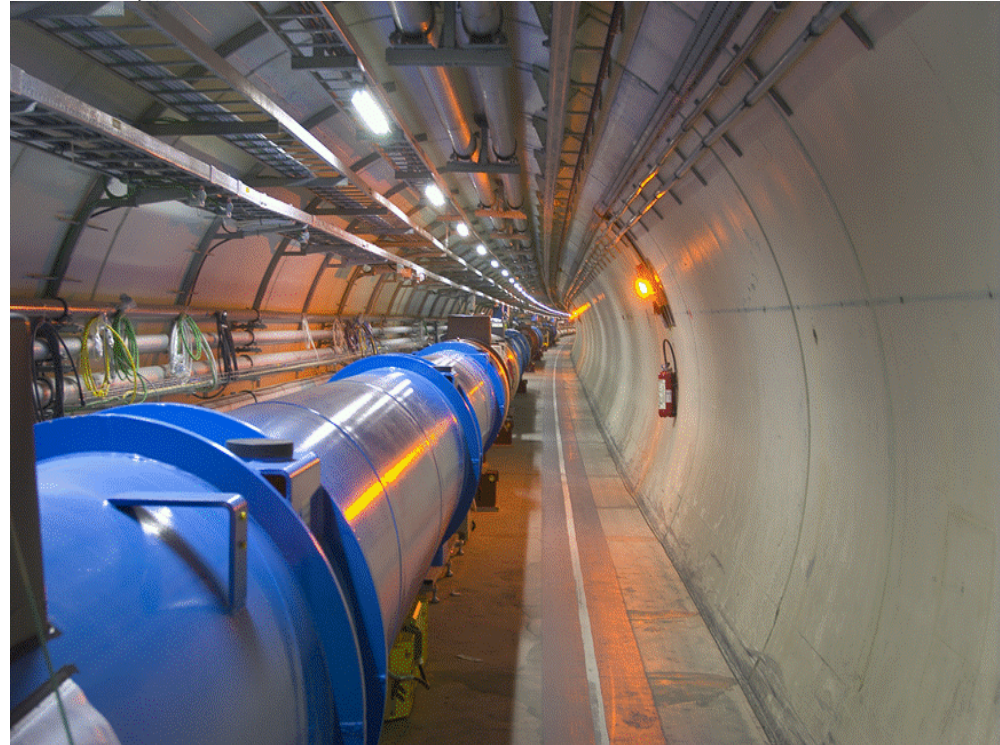


Magnet Technologie: Quadrupol Magnete

106.90 m



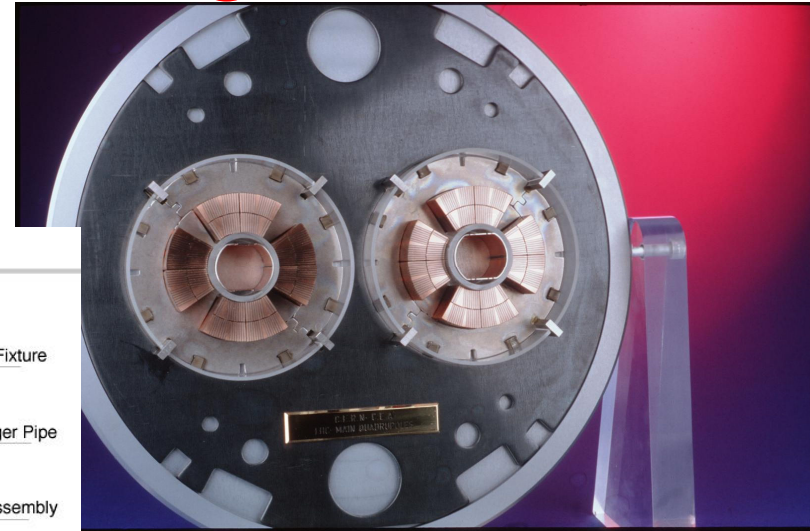
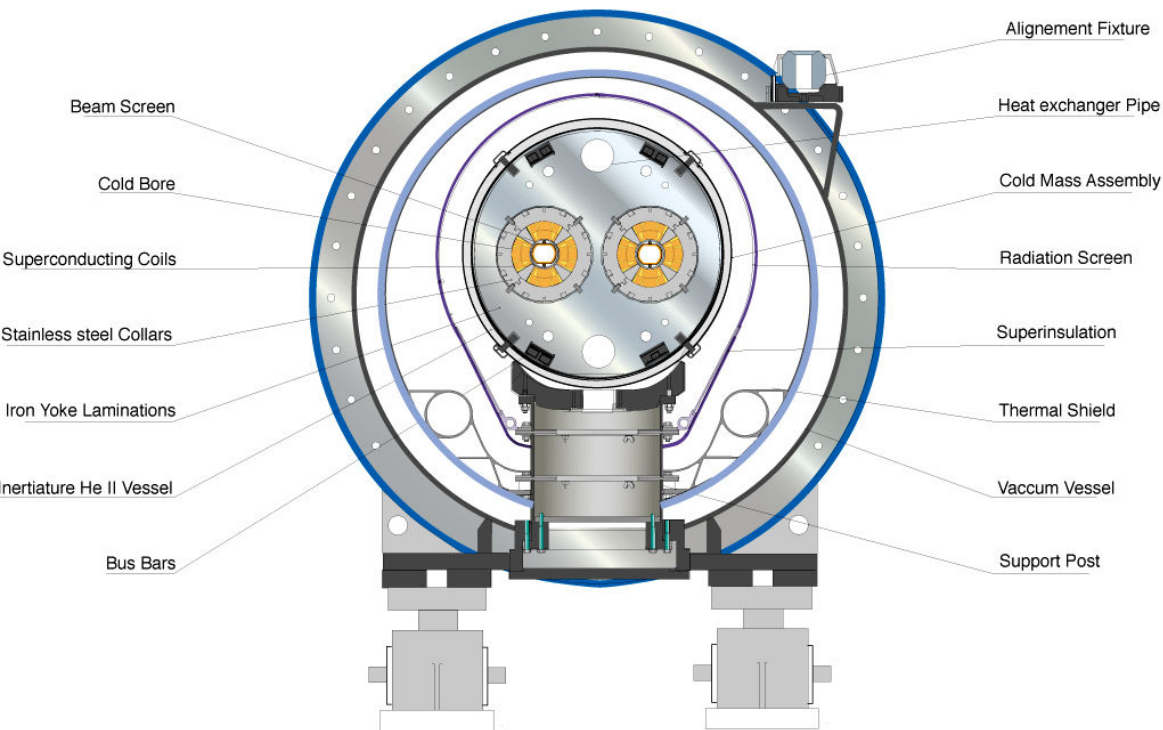
Grundzelle im Bogen
ist ca. 106m lang



Magnet Technologie

SC LHC Quadrupol Magnet:

LHC quadrupole cross section



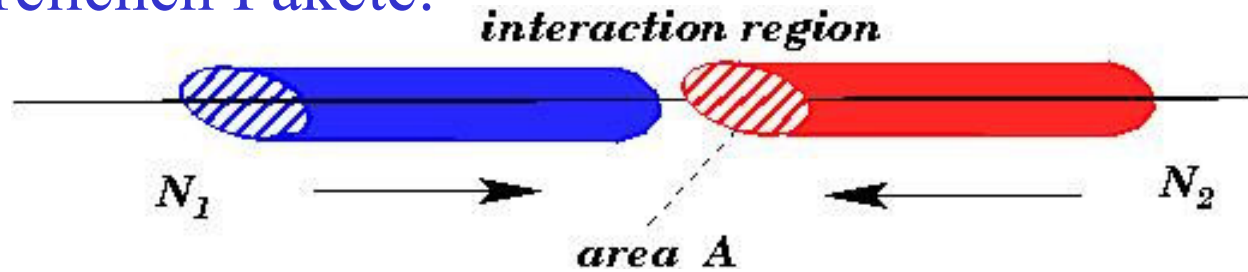
Luftspule mit
 $\cos(2\theta)$ Symmetrie
und 2 Magnetspulenn
in einem Kühlbehälter!

CERN AC - SQ1 - 12/97

Luminosität

 Kollidierende Teilchen Pakete:

$$L = \frac{n_b \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot f_{rev}}{A}$$



$$A = 4\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \quad \text{mit:} \quad \sigma = \sqrt{\beta \varepsilon}$$

β hängt von der Magnetanordnung und Einstellung ab

$\varepsilon = \varepsilon_n / \gamma$ ε_n wird von den Vorbeschleunigern vorgegeben

Ziel:

→ hohe Teilchen Paket Intensität; viele Pakete;

$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ kleines β am WP and hohe Kollisions-Energie

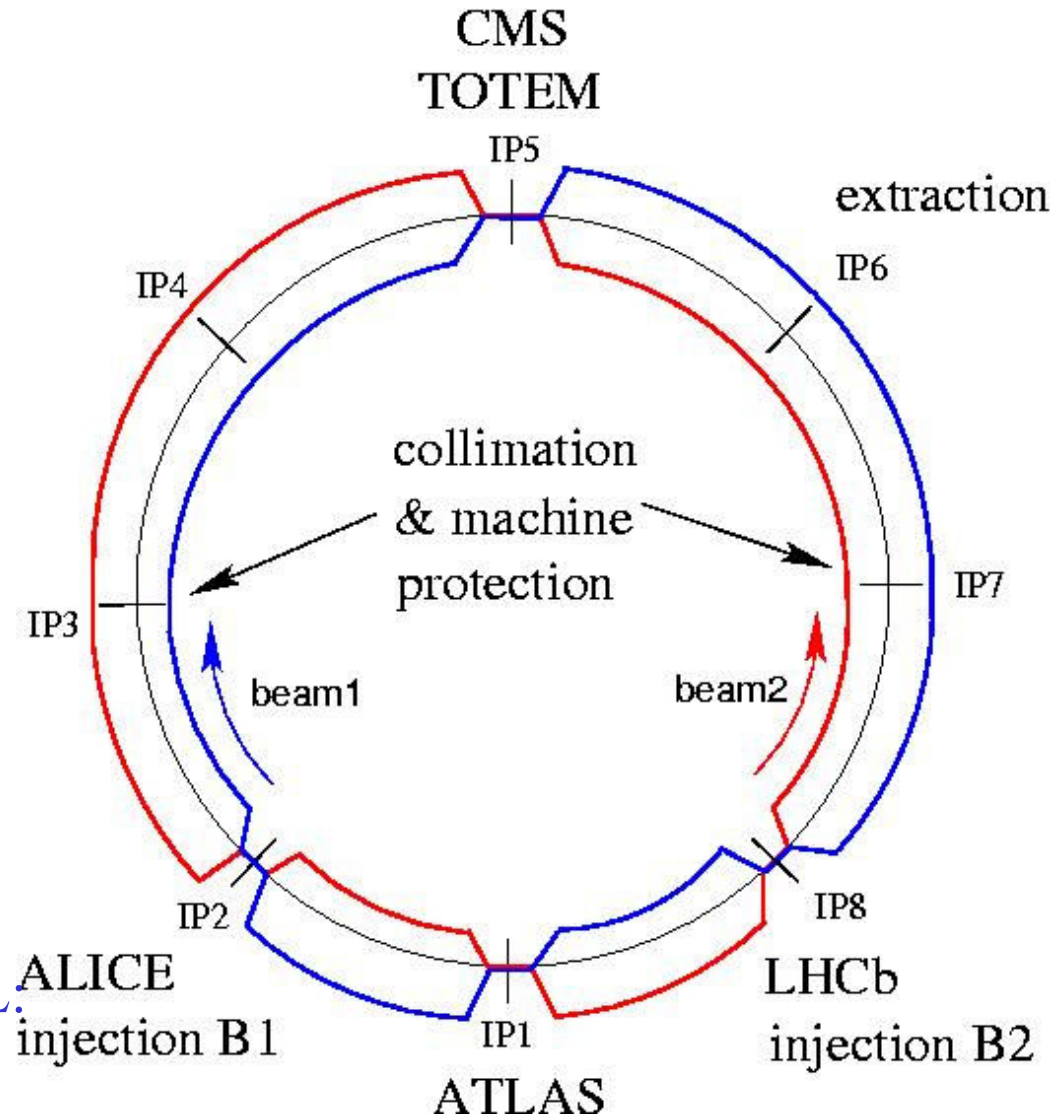
LHC Überblick

2-in-1 Magnet Design
p-p & Pb-Pb Kollisionen

7 TeV p Strahlenergie
→ > 1 TeV CM Energie
→ Higgs Entdeckung

2 Experimente mit hoher L
 $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
→ 2808 Pakete / Strahl
mit $1.15 \cdot 10^{11}$ TpP

2 Experimente mit niedriger L:
ALICE (Pb-Pb) & LHCb



LHC Überblick

Alter LEP Tunnel

→ 8.4 T Dipole Magnete

→ 10 GJ EM Energie

(1 MJ schmilzt 2 kg Cu!)

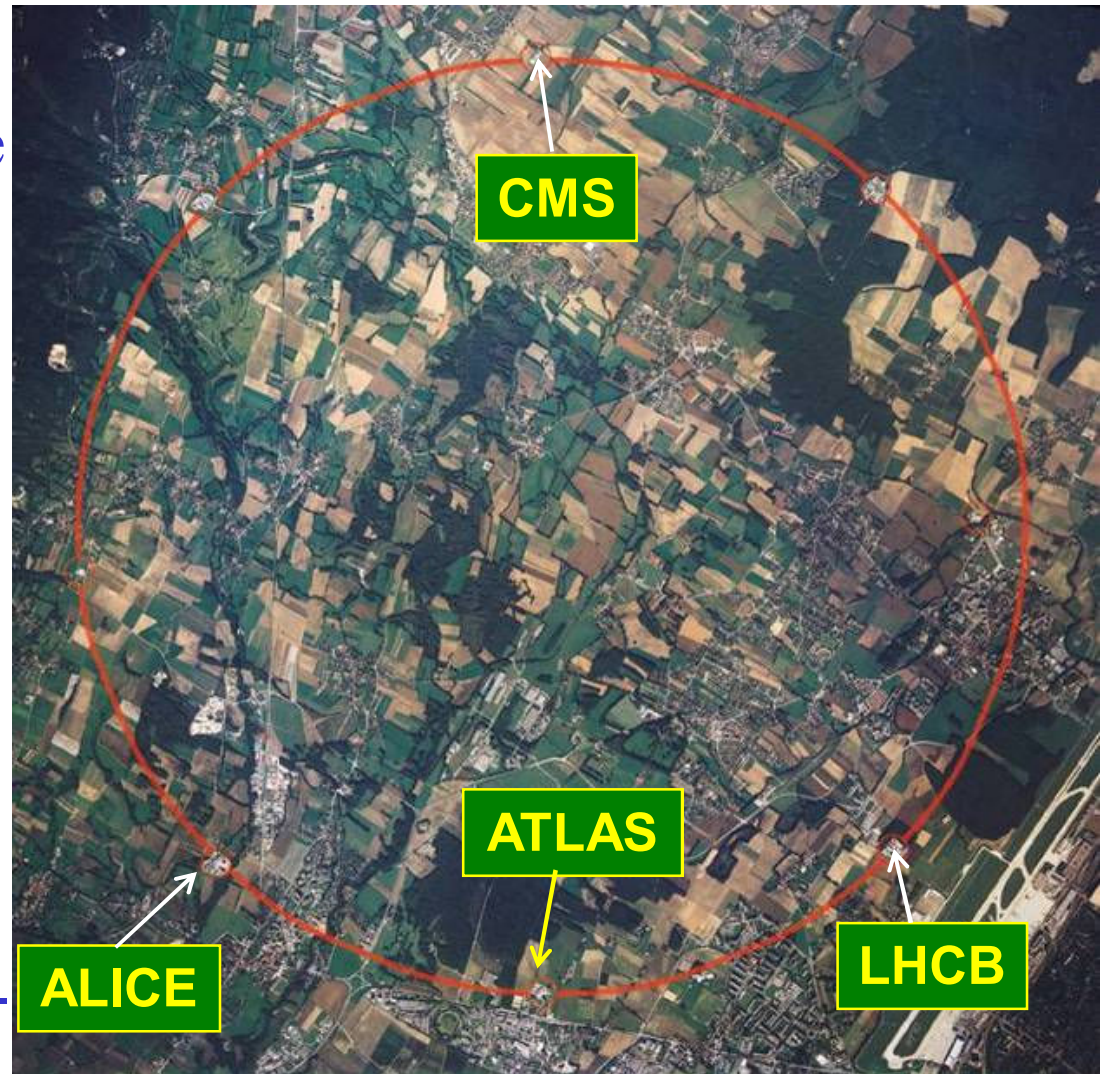
→ 8 Sektoren

2808 Pakete pro Strahl
mit $1.15 \cdot 10^{11}$ TpP

→ 360 MJ / Strahl

→ Kreuzungswinkel &
Strahl-Strahl
Wechselwirkung

Kombinierte Injektions-
Experimental Bereiche



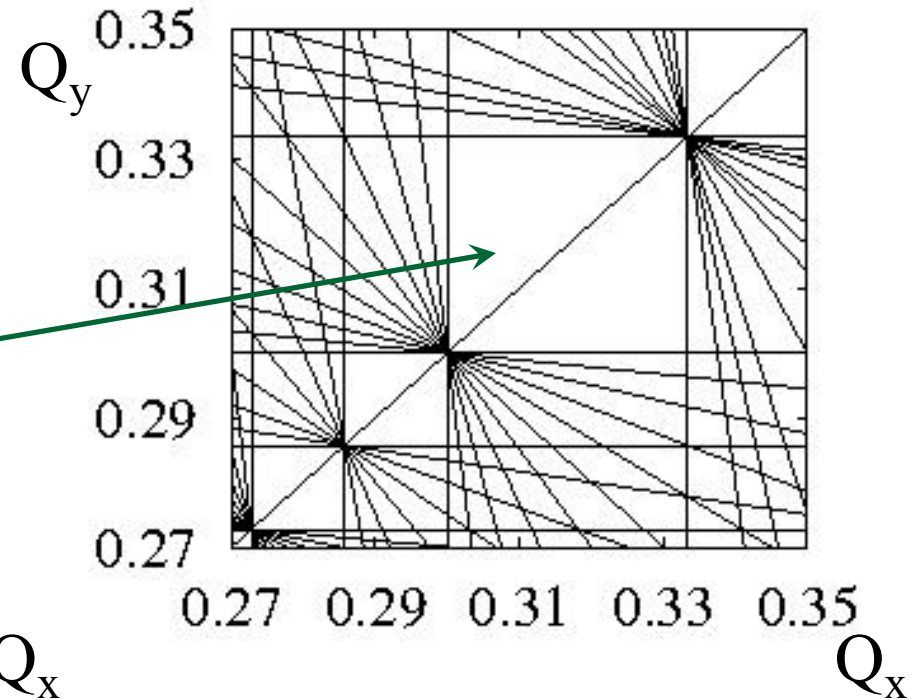
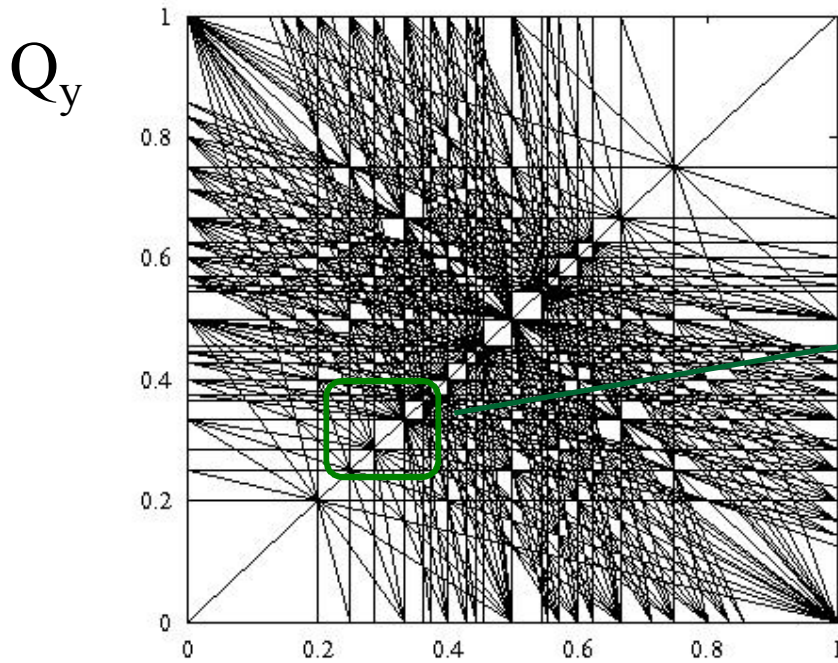
Herausforderungen für die Operation

- Magnetfeldfehler & Resonanzen
- Effizienz der Strahl Halo Beseitigung (Kollimation)
- Gespeicherte Energie und Maschinenschutz
- Kollektive Effekte und Impedanzen
- Strahl-Strahl Wechselwirkung
- Magnetöffnung - Apertur
- Elektronenwolken
- Alter des Vorbeschleuniger Komplexes und lange Zyklen

Herausforderungen: Feld Qualität & Resonanzen

Tune: $Q =$ transversale Schwingungen pro Umlauf

Resonanzen: $n Q_x + m Q_y + r Q_s = p$; "Ordnung" = $n+m+r$

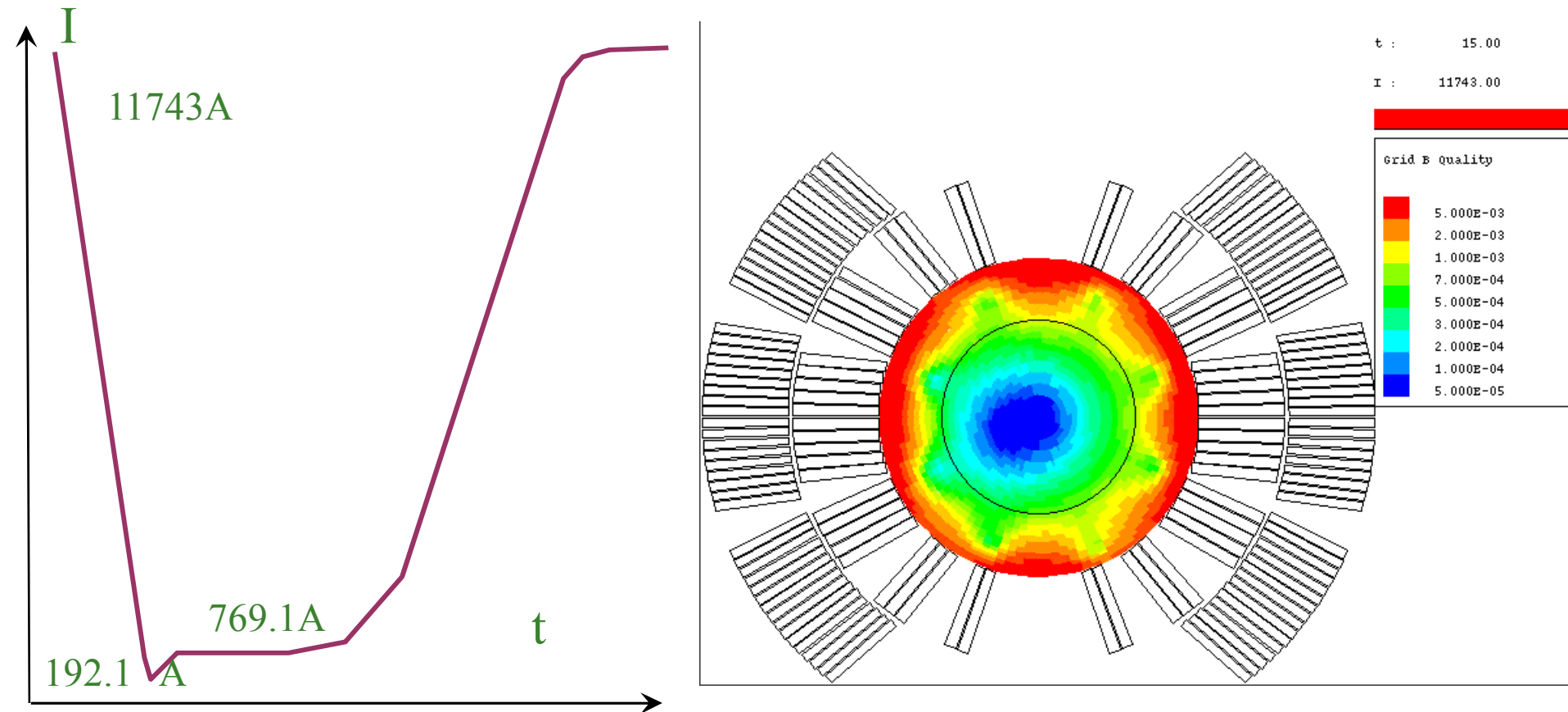


**Komplexe nicht-lineare Dynamik; Langzeit Stabilität
(3 Körper Problem) → Limit für Feldqualität and ΔQ Tolleranzen**

Herausforderungen: Magnet Fehler

Zeitliche Veränderung der Feldfehler in Supraleitenden Magneten

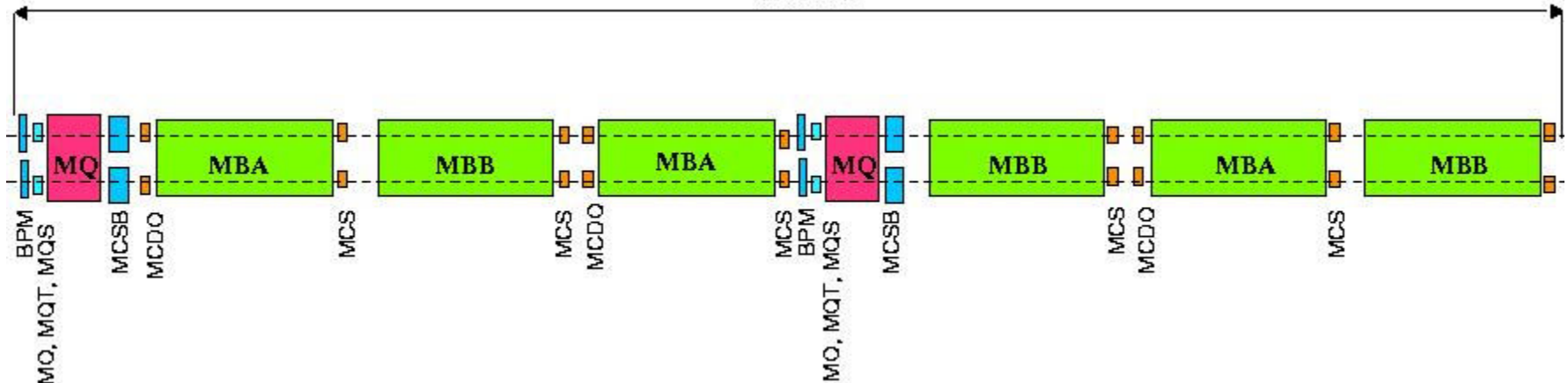
Luca Bottura CERN, AT-MAS



Herausforderungen: Magnet Fehler

112 Korrekturkreise / Strahl (+ Strahl Lagekorrektur)

106.90 m



Alle Magnetkreise werden vor Verschluss getestet

Feld Fehler in SC Magneten verändern sich mit der Zeit

→ Steuerung während Operation

→ passive Strahl Messmethoden!



Herausforderungen: Halo Beseitigung

Magnet Quench:

- Strahlverlust → mehrere Stunden ohne Kollisionen
- Schnelles abführen der gespeicherten EM Energie

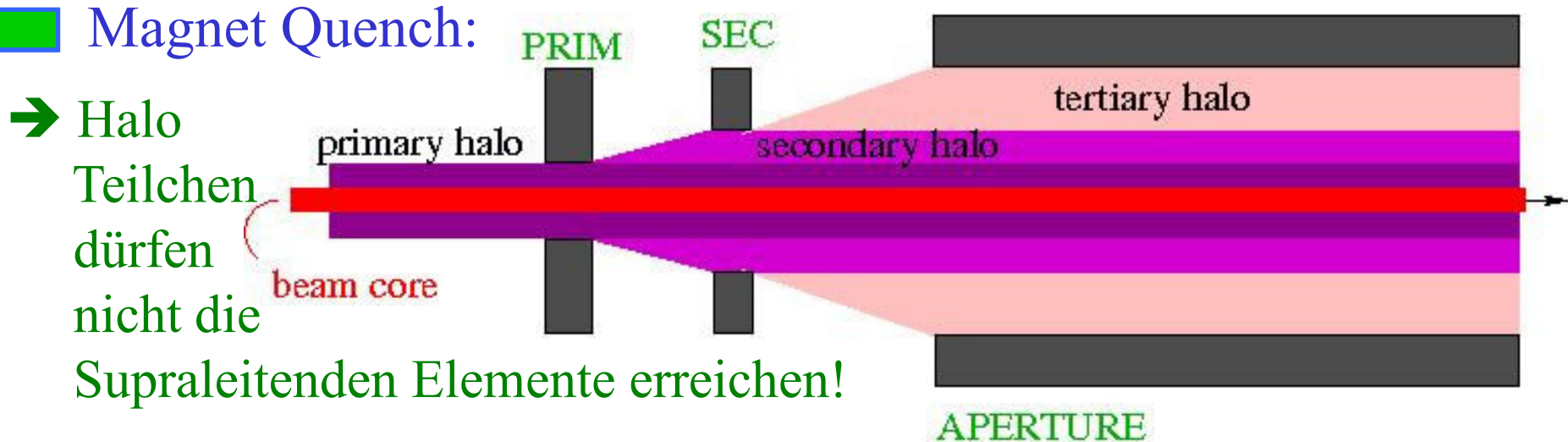
LHC nominale Strahlintensität: $I = 0.5\text{A} \Rightarrow 3 \cdot 10^{14} \text{ p /Strahl}$

Quench Level: $N_{\text{Verlust}} < 7 \cdot 10^8 \text{ m}^{-1} \rightarrow 2.2 \cdot 10^{-6} N_{\text{Strahl}}!$

(verglichen zu 20% bis 30% in anderen SC Maschinen)

- kontrollierte Halo Entfernung in jeder Operations-Phase!
- genaue Kontrolle & Korrektur der Optik and Strahlage
- ständige Überprüfung des supraleitenden Zustandes

Herausforderungen: Halo Beseitigung



Strahl Kern: 0 to 2σ

primäres Strahl Halo: 2 to 6σ ; Ursache: Nicht-Linearitäten; Störfelder; IBS etc. (kann Elemente beschädigen)

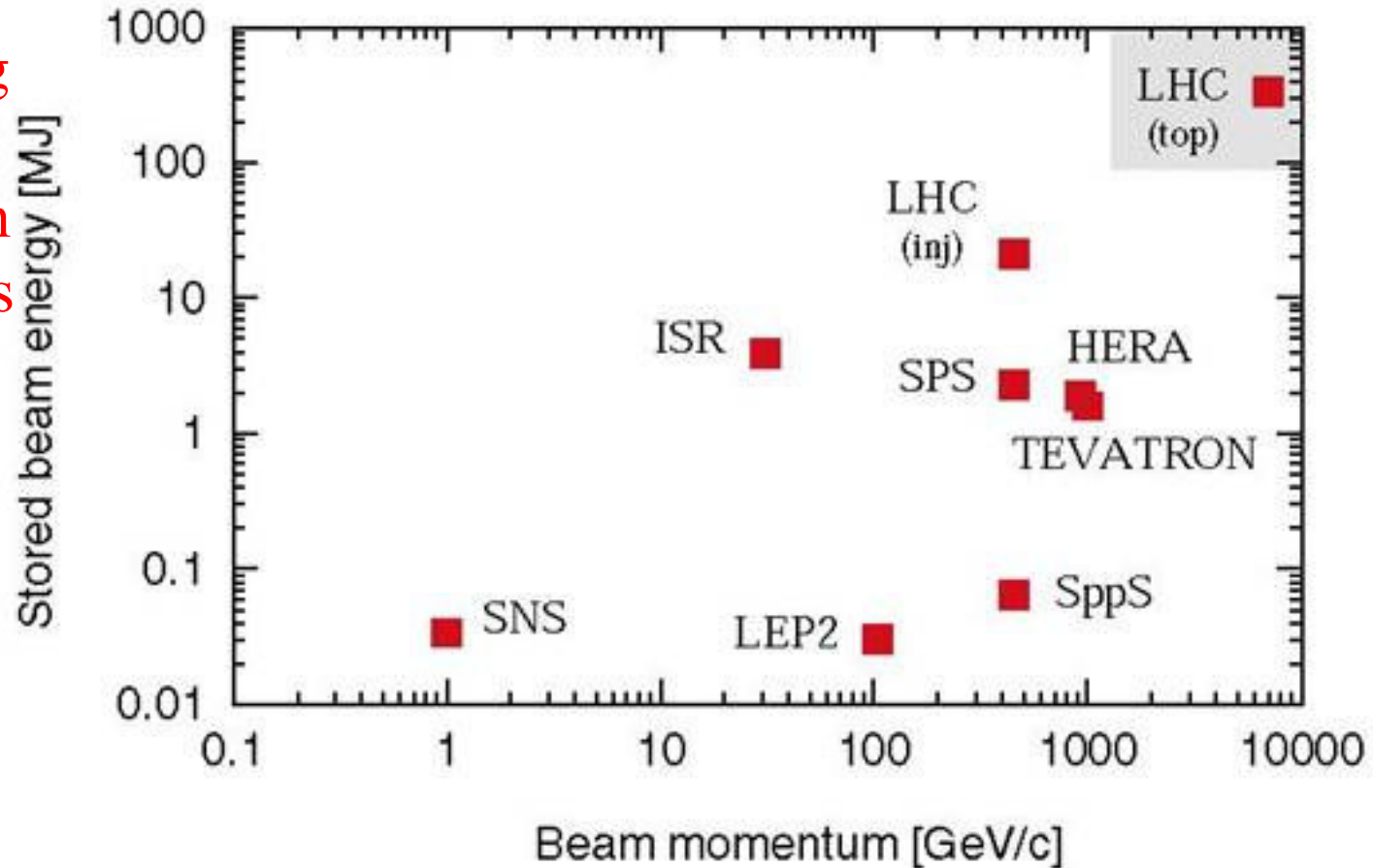
sekundäres Halo: 6 to 8σ ; Ursache: Kollimatoren (Quench)

tertiäres Halo: $> 8 \sigma$; Ursache: Kollimatoren (save)

Herausforderungen: Strahlenergie

Beispiellose Strahlenergie: (Faktor 200)

- potentielle Beschädigung von Komponenten
- Im Falle eines Unfalls darf der Strahl niemals Maschinen Installationen erreichen!

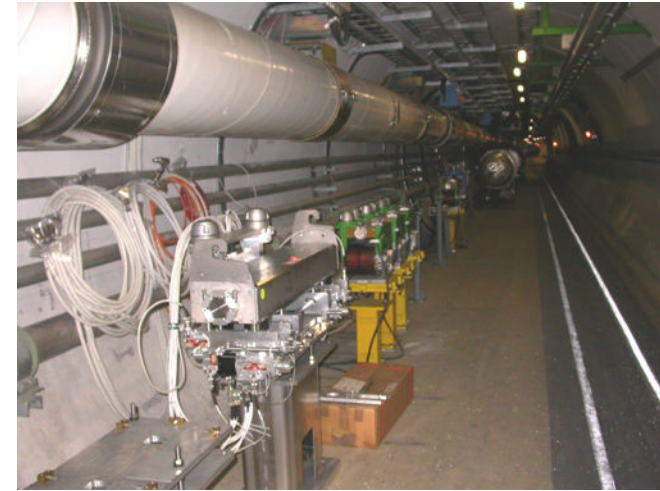


Herausforderungen: Strahlenergie

Beispiellose Strahlenergie:

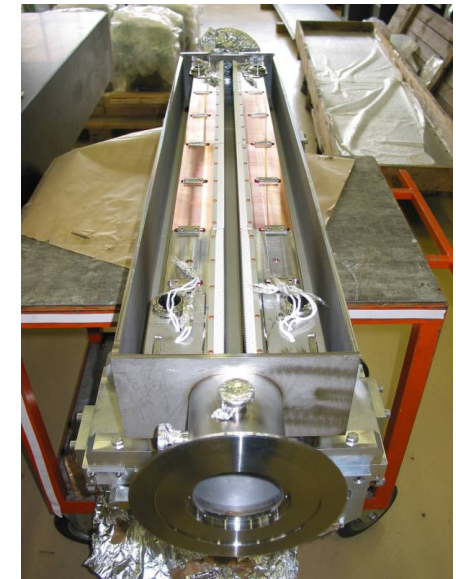
- alle Absorber und Kollimatoren müssen den Aufprall bei einer asynchronen Strahl Entsorgung verkraften können (Betrifft 136 Kollimatoren & Absorber)

- Maschinen Überwachungs- / Schutz- System!



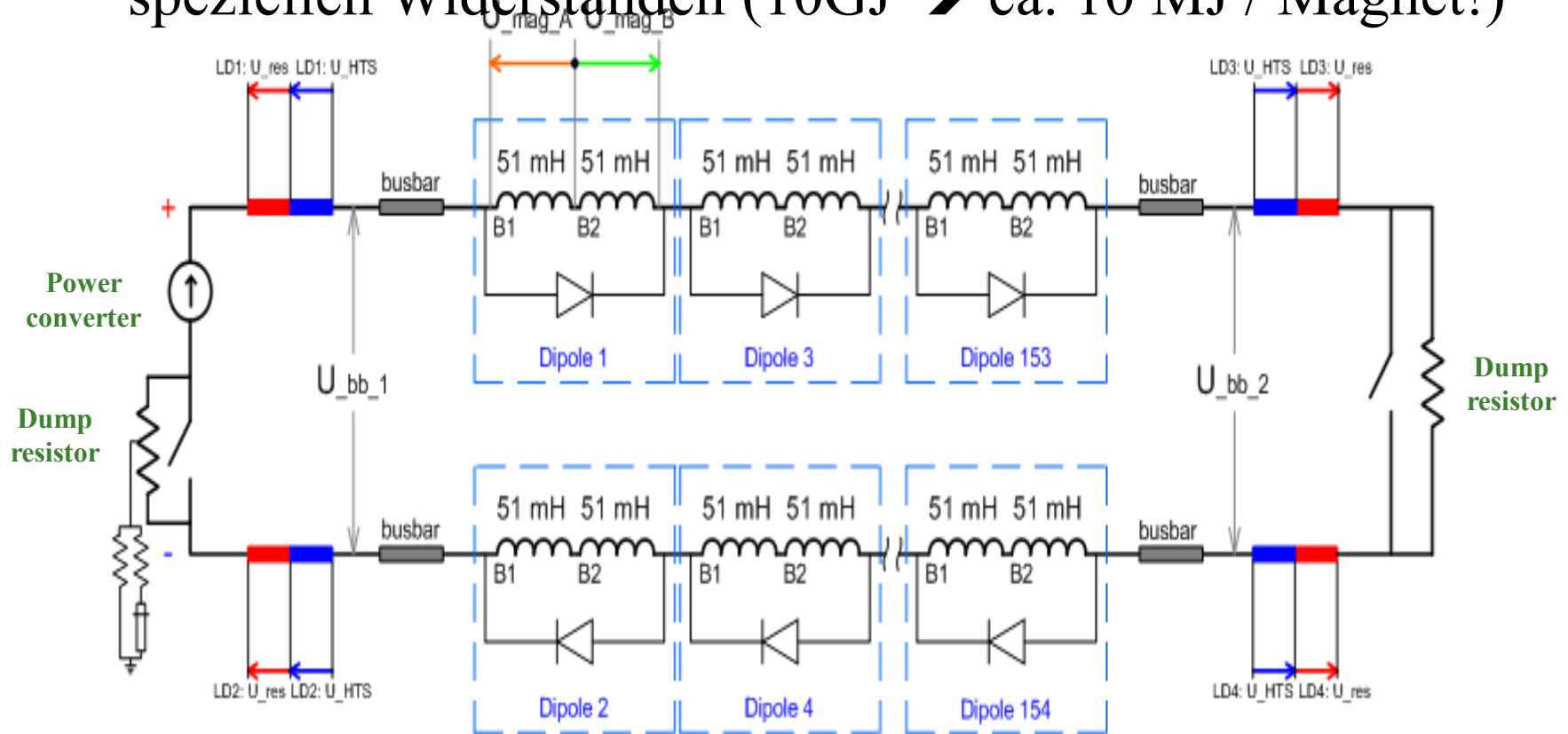
Robuste Kollimator Backen

- Fiber verstärktes Graphit ist robuster als Cu Backen
- Fiber verstärktes Graphit hat einen größeren elektrischen Widerstand als Cu Backen



Herausforderung: Energie Abführung beim Quench

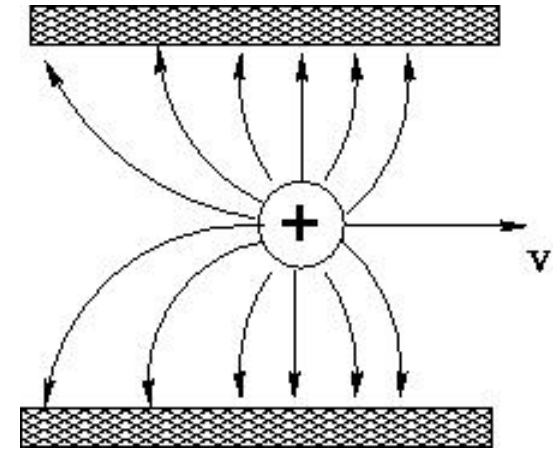
Quench Schutzsystem: Abschalten der Stromversorgung bei einem Magnet Quench und Vernichtung der Energie in speziellen Widerständen ($10\text{GJ} \rightarrow \text{ca. } 10\text{ MJ} / \text{Magnet!}$)



Herausforderungen: Strahl Instabilitäten

Strahlrohr Impedanz:

- Spiegelladungen bewegen sich hinter dem Strahl wegen des Ohmschen Widerstandes
- ‘Wake fields‘ (Heck Wellen) können Strahl Instabilitäten antreiben
- Der Effekt verstärkt sich bei kleineren Öffnungen der Kollimator Backen
- Leitfähigkeit von Graphit Backen limitiert entweder die kleinste Kollimator Öffnung → Strahlgröße am WP oder den Strahl Strom



2 Phasen Kollimations System für das LHC:

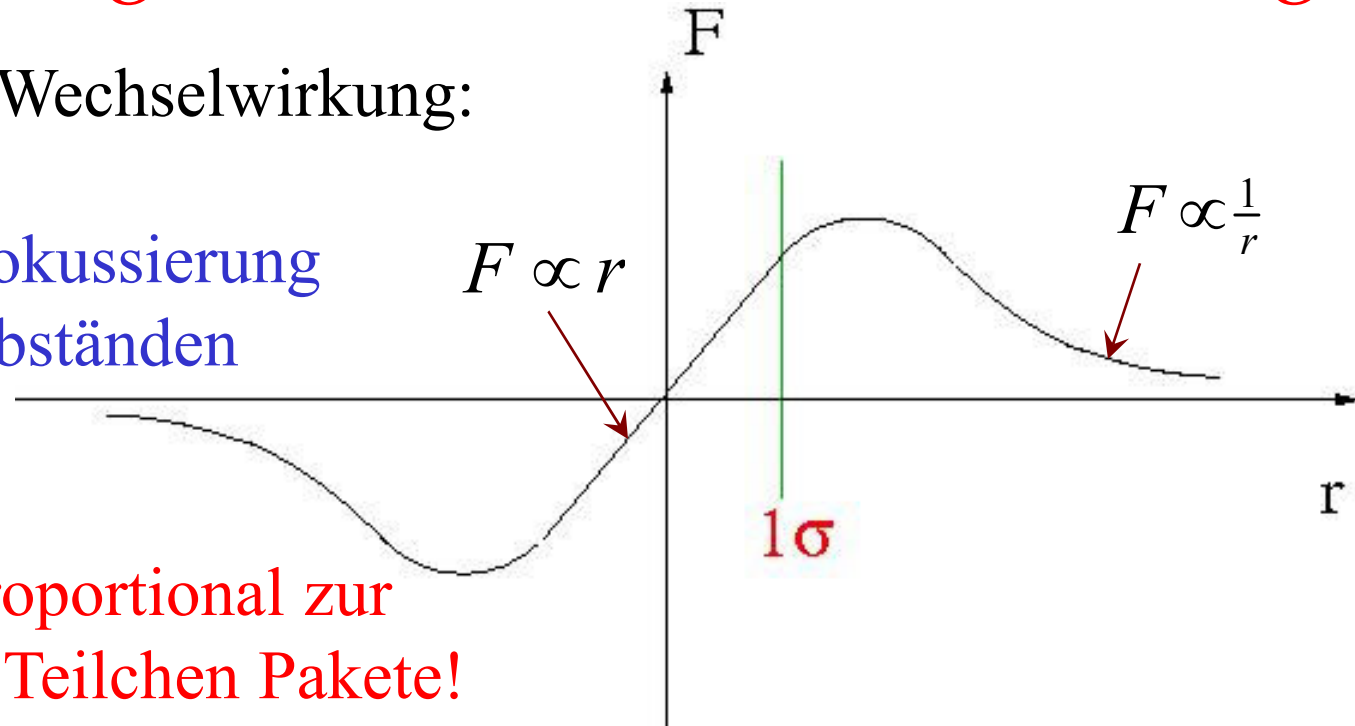
- Phase 1: Graphite Backen für Robustheit bei Inbetriebnahme
- Phase 2: nominal Leistung (niedrige Impedanz oder Feedback)

Herausforderungen: Strahl-Strahl Wechselwirkung

Strahl-Strahl Wechselwirkung:

→ zusätzliche Fokussierung bei kleinen Abständen

→ Störung ist proportional zur Intensität der Teilchen Pakete!



starkes nicht-lineares Feld:

→ Störungen hängen von der Schwingungsamplitude ab

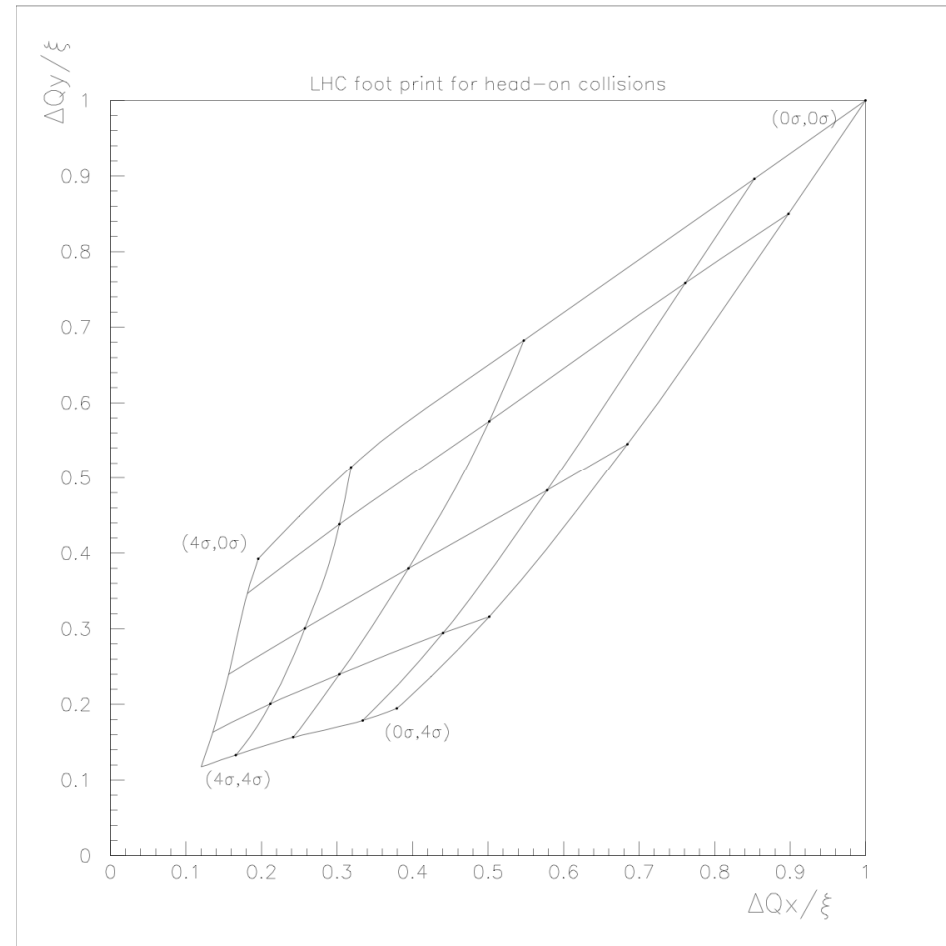
→ Limitierung der maximalen Teilchen Paket Intensität

Herausforderungen: Strahl-Strahl Wechselwirkung

Tune Verteilung aufgrund der Strahl-Strahl Wechselwirkung:

$$\Delta Q = \frac{r_p}{4\pi} \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{N_b}{\varepsilon} = \xi_{beam-beam}$$

Tune Abdruck
'Footprint':

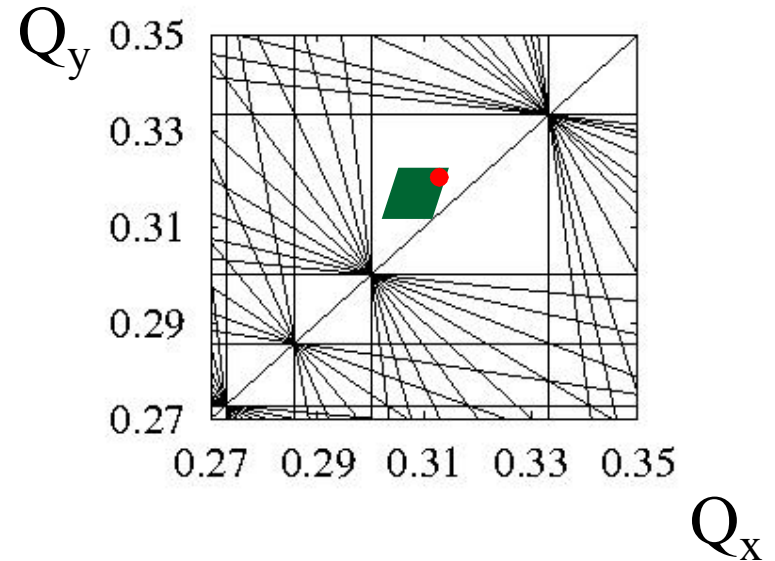


Herausforderungen: Strahl-Strahl Wechselwirkung

LHC Arbeitspunkt: $n+m < 12$

→ $Q_x = 64.31; Q_y = 59.32$

Strahl Tune Verteilung muss kleiner als 0.015 sein!



Das LHC hat 3 Experimente mit direkten Strahl Kollisionen

Anzahl der Teilchen pro Paket ist limitiert:

→ $N < 1.5 \cdot 10^{11}$ → nominal: $N < 1.15 \cdot 10^{11}$

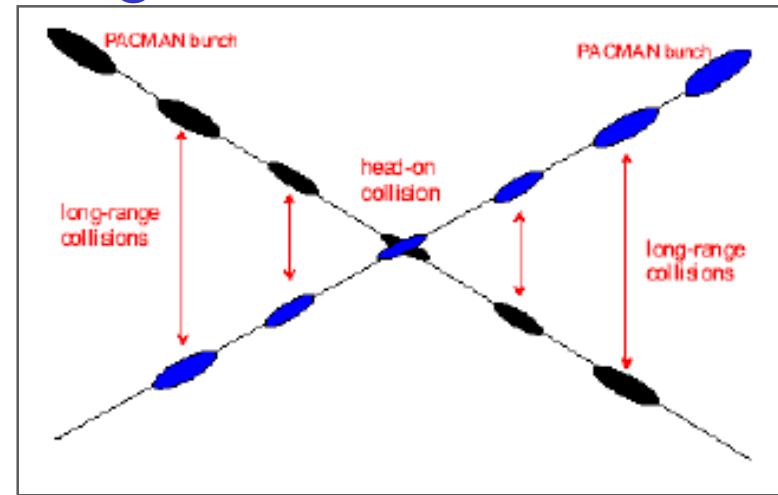
→ ultimate: $N < 1.7 \cdot 10^{11}$

Herausforderungen: Magnet Apertur

Parasitäre Strahl-Strahl Wechselwirkungen:

Operation mit 2808 Strahl Paketen bedeutet ca. 30 ungeplante Kollisionen pro Wechselwirkungszone.

→ Operation benötigt einen Kreuzungswinkel → **Verkleinerung der Apertur!**



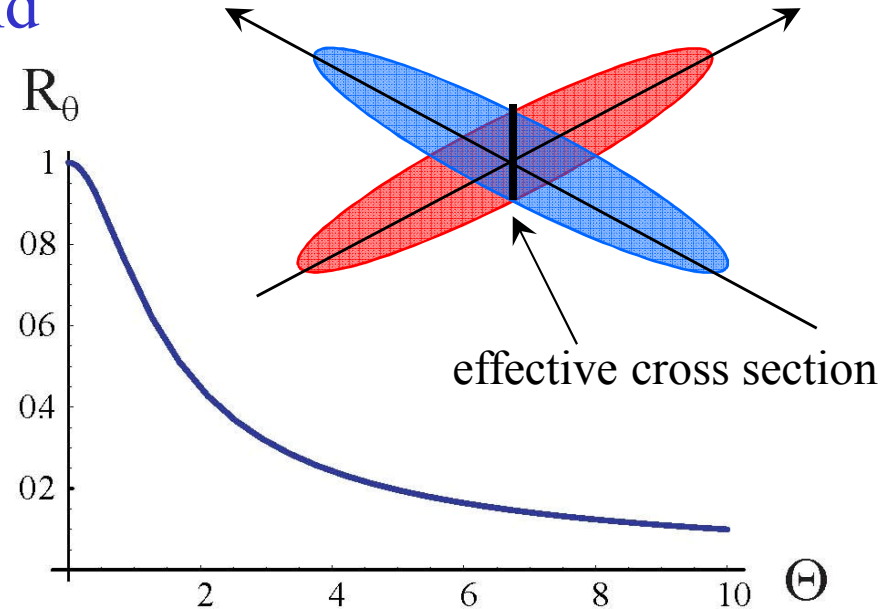
nicht-lineare Felder und Fokussierung durch Wechselwirkung

Eine effiziente Operation verlangt eine große Strahltrennung an den parasitären Wechselwirkungen → **Abstand von 9σ ist an der Grenze der Magnet Apertur!** → Spielraum verlangt Operation mit weniger Paketen, kleineren Intensitäten, größere Strahlgrößen am WP (Lumi) (or larger triplet apertures → **upgrade studies**)

Herausforderungen: Kreuzungswinkel

Luminositätsverlust auf Grund kleinerer Überlappung:

$$R_{\theta} = \frac{1}{\sqrt{1 + \Theta^2}}; \quad \Theta \equiv \frac{\theta_c \sigma_z}{2\sigma_x}$$



Großer Kreuzungswinkel:

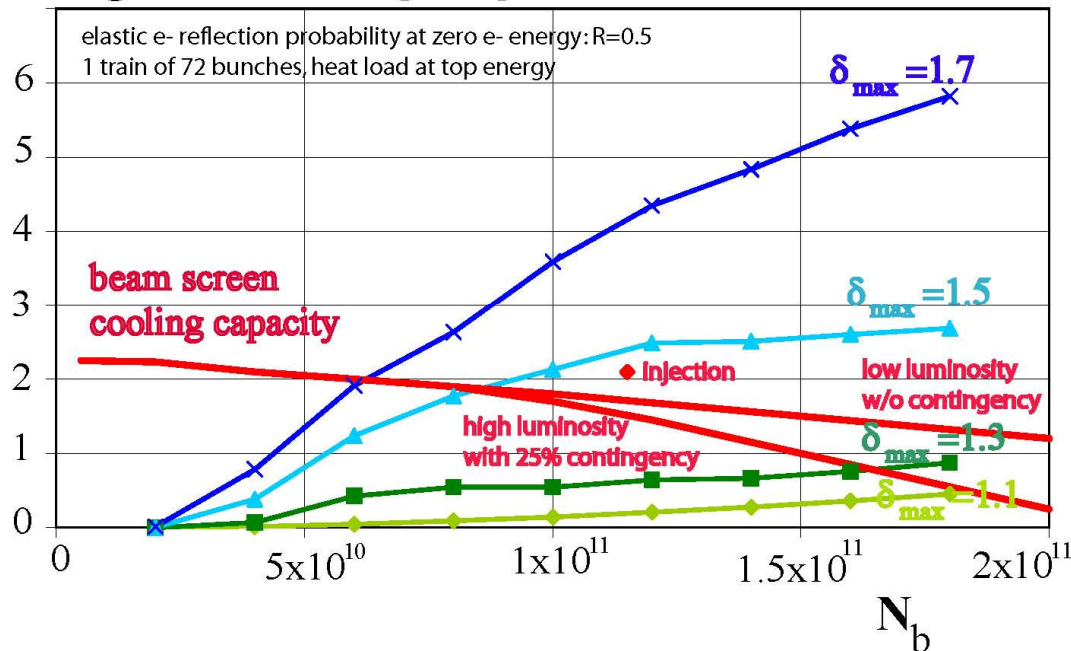
- schwächere Wechselwirkung der parasitären Kollisionen
- Verkleinerung der mechanischen Magnet Apertur
- Verkleinerung der Luminosität
- ineffiziente Nutzung des Strahl Stromes (Maschinen Schutz und Unfall Risiko!)

Herausforderungen: Elektronen Wolken

Synchrotron Licht löst Elektronen von der Vakuum Wand:

- Strahl beschleunigt die Elektronen → Einschlag auf Vakuum Wand
- Erzeugung von sekundär Elektronen → δ_{\max} Multiplikation; e-Wolke
- Erwärmung, Instabilitäten und Anwachsen der Strahlgröße

average arc heat load [W/m]



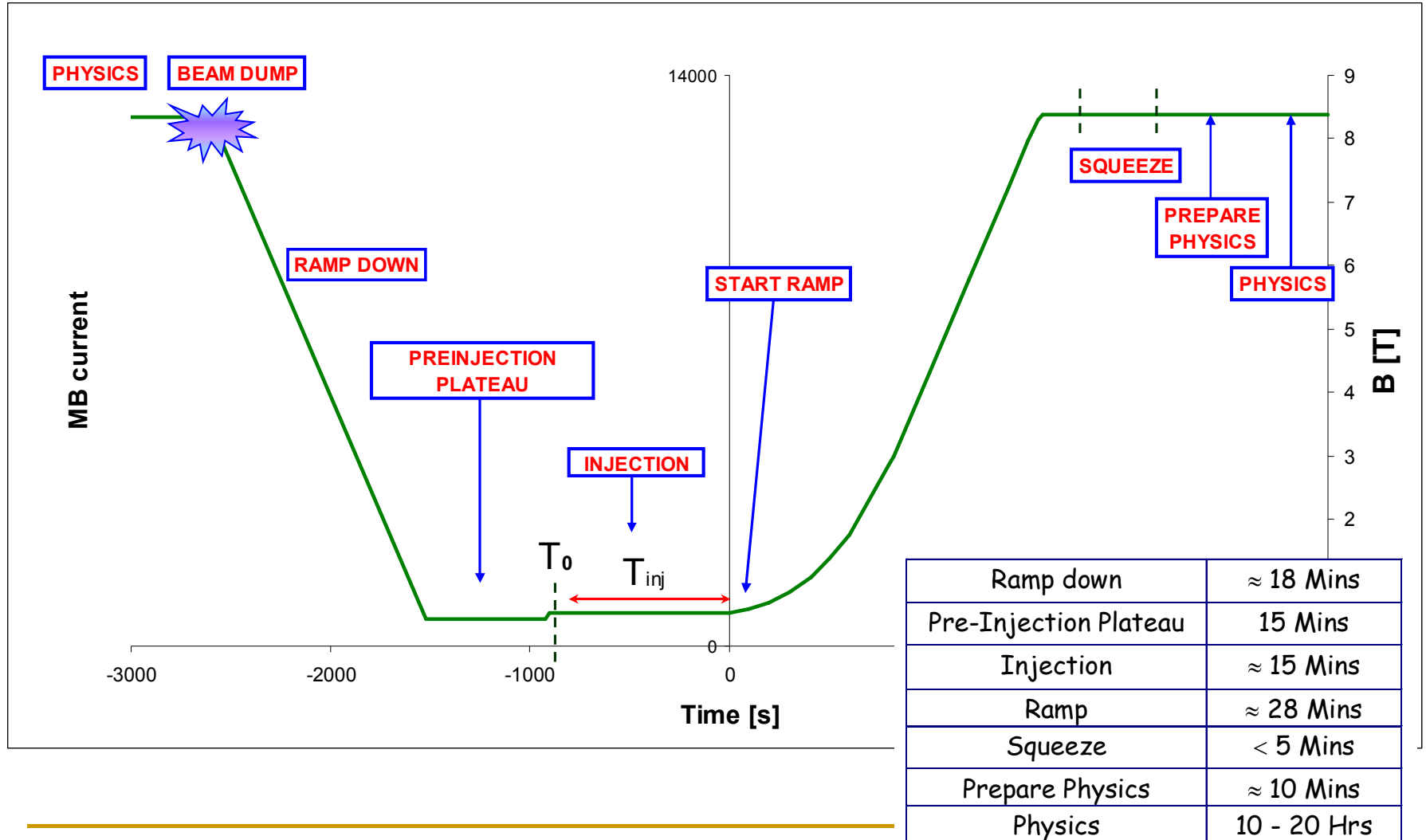
- Effekt unterbleibt bei kleinen Intensitäten und Großen Paket Abständen
- sekundär Emission nimmt während des Betriebes ab ('beam scrubbing')

[F. Zimmermann / CERN]

Herausforderungen für die Operation

- Magnetfeldfehler & Resonanzen Strahl Lebensdauer
- Effizienz der Strahl Halo Beseitigung (Kollimation) Quench
- Gespeicherte Energie und Maschinenschutz Schadens Risiko
- Kollektive Effekte und Impedanzen Verluste & Strahlgröße
- Strahl-Strahl Wechselwirkung Strahl Lebensdauer & Halo
- Magnetöffnung – Apertur Magnet Quench
- Elektronenwolken Kühlung und Instabilitäten
- Alter der Vorbeschleuniger und lange Zyklen 1h+

LHC Operations Zyklus

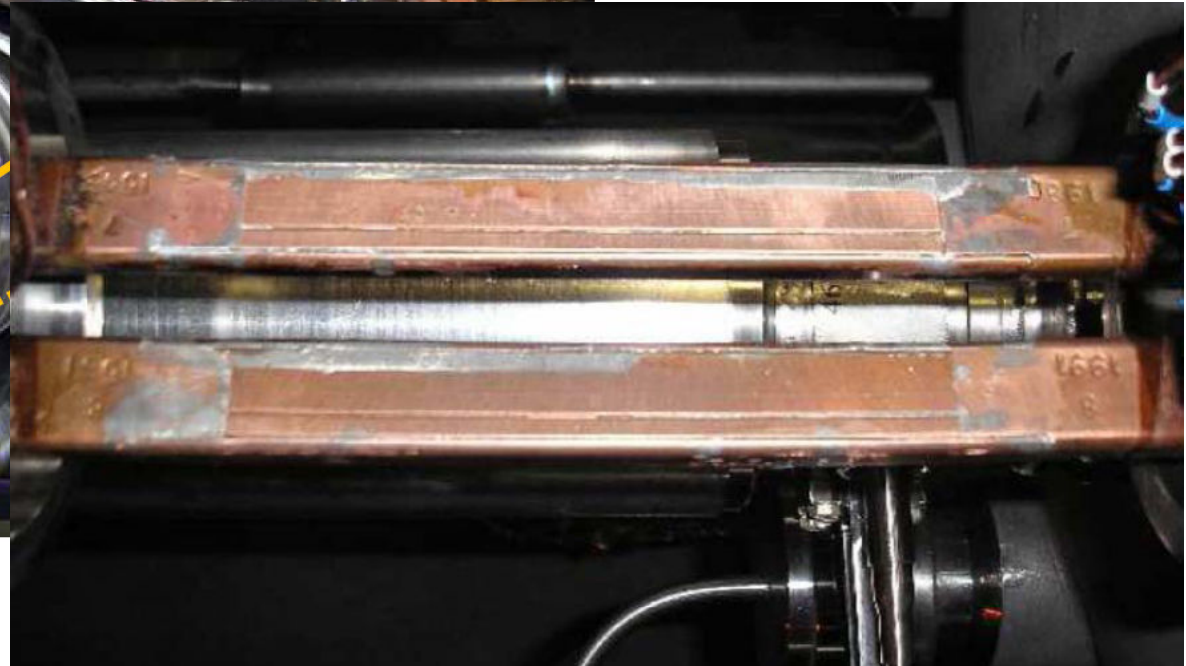


Unfall im September 2008

■ Elektrischer Kontakt an Magnetverbindung:

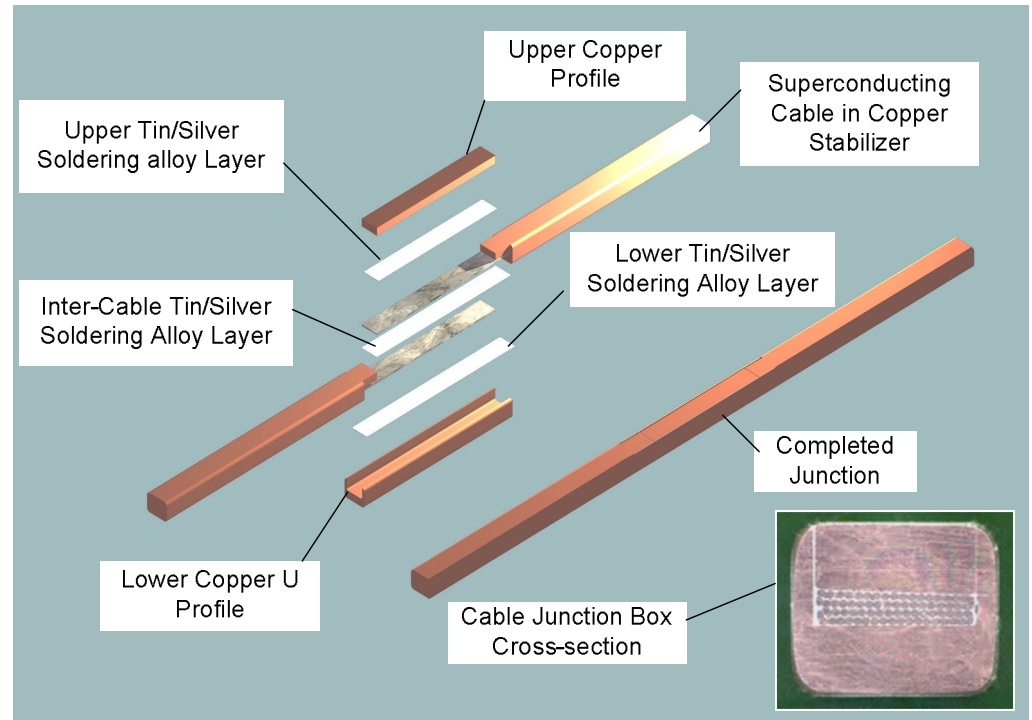


ca. 2000
Verbindungen



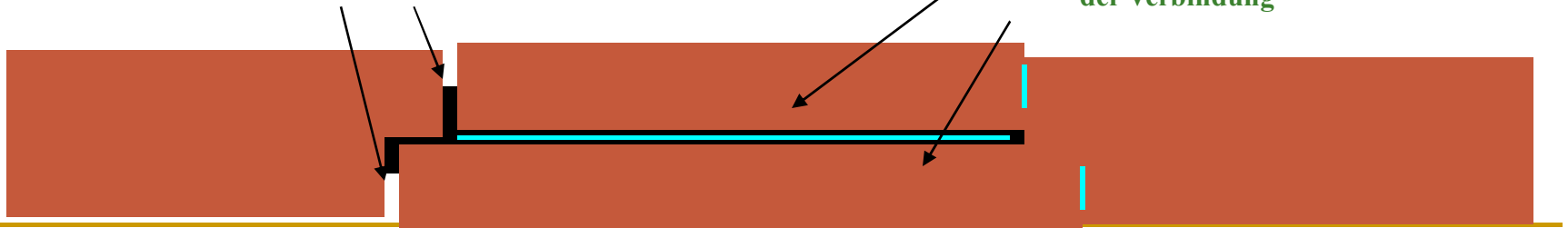
Unfall im September 2008

■ Lötverbindung der Magnetverbindungen:



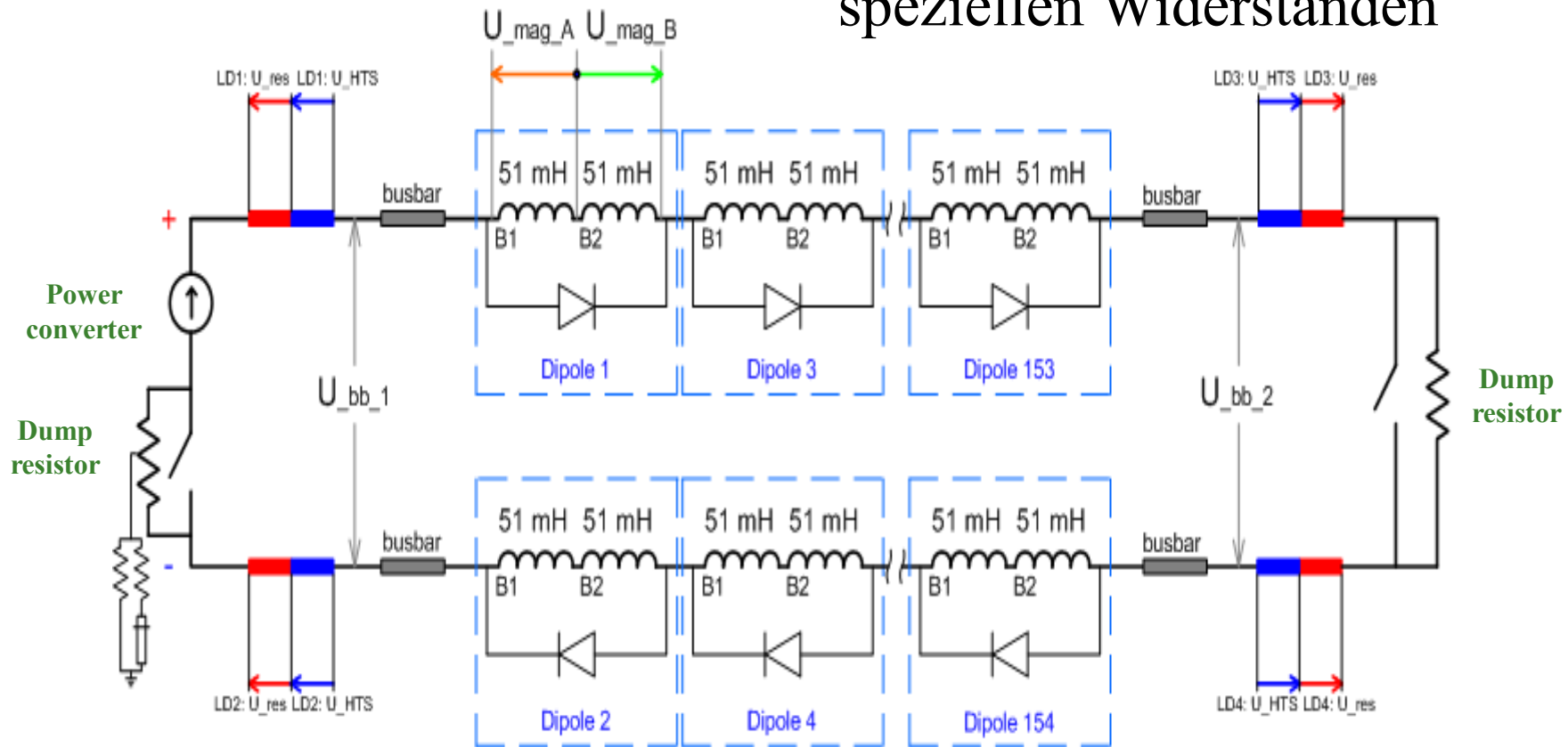
Mangel an elektrischem Kontakt an mindestens einer Seite der Verbindung

Mangel an Lötzinn innerhalb der Verbindung



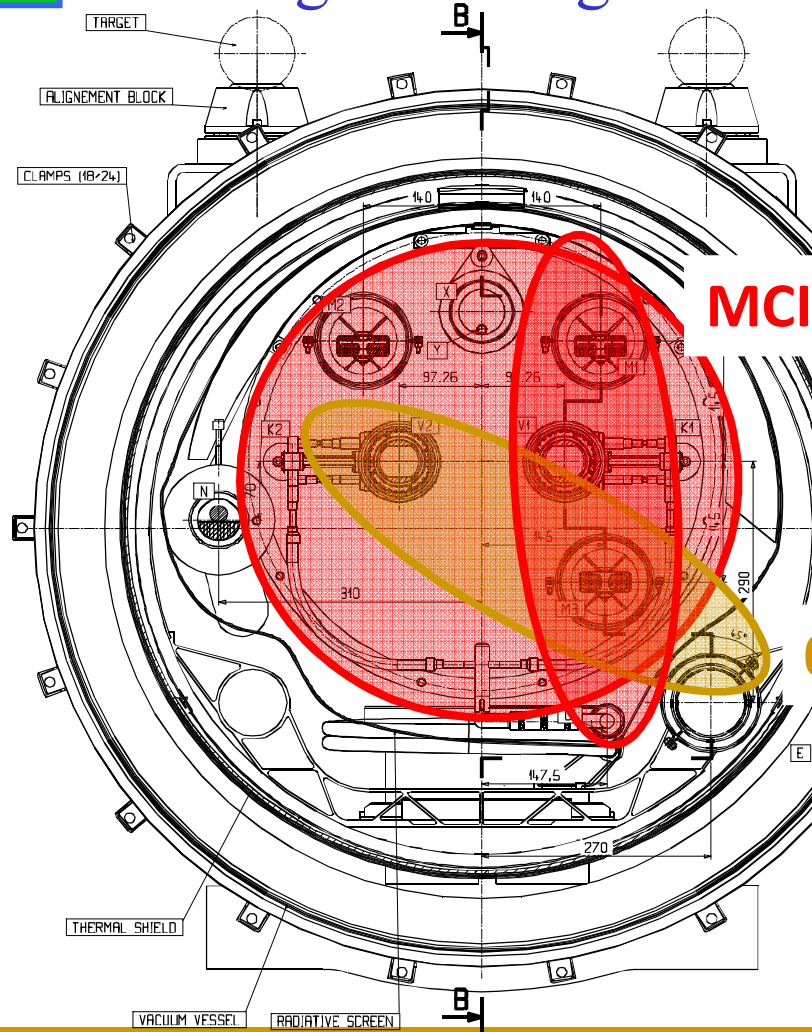
Unfall im September 2008

Quench Schutzsystem: Abschalten der Stromversorgung bei einem Magnet Quench und Vernichtung der Energie in speziellen Widerständen



Unfall im September 2008

■ Lichtbogen in Folge eines offenen Kontaktes:



→ Öffnung der He Versorgungsleitung und des Strahlvakuums

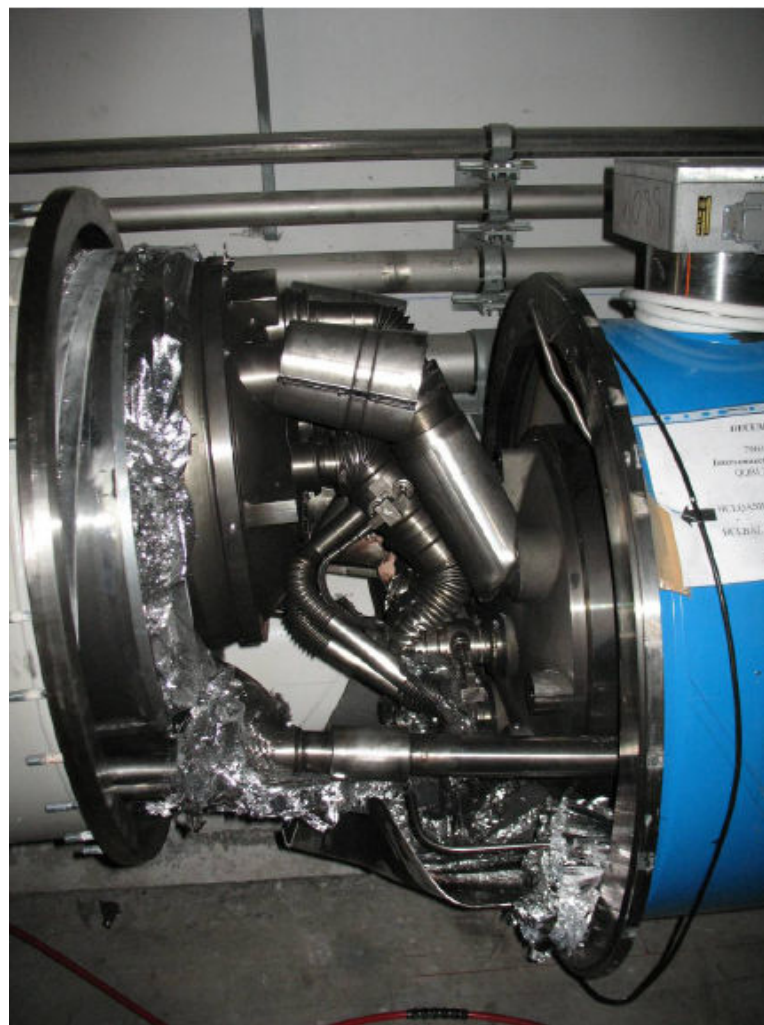
→ He strömt in das Isoliervakuum
→ longitudinale Druckwelle

080919 incident

→ He strömt in das Strahlvakuum
→ Verschmutzung des ultra Hochvakuums

Unfall im September 2008

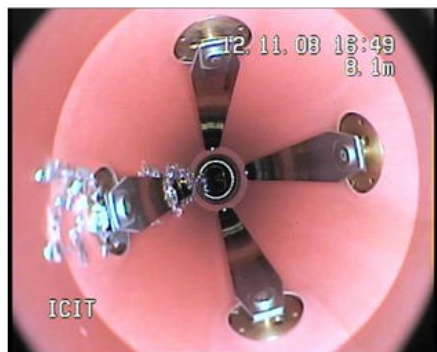
■ Druckwelle:



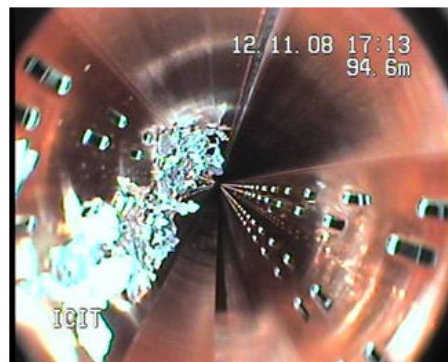
Unfall im September 2008

Hochvakuumverunreinigung:

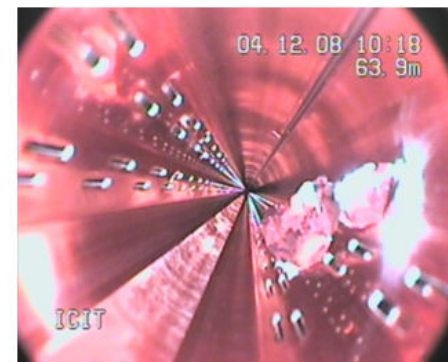
Beam Screens with MLI and Fibers



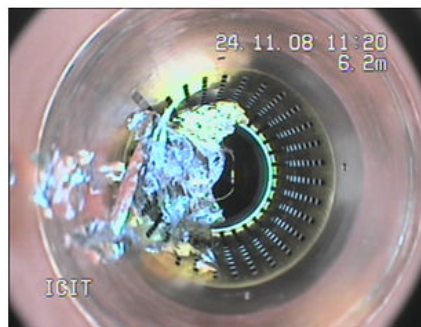
QBQI 8L4.V2



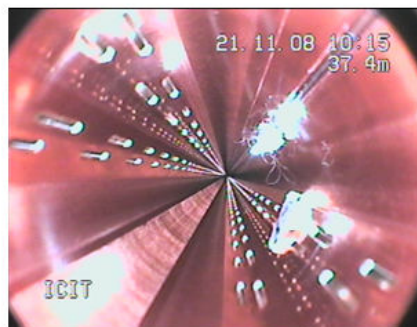
A10L4.V2



B9R3.V1



QBQI 14L4.V2



A13L4.V1



QBQI 12L4.V1

Zusammenfassung

Der LHC Betrieb ist extrem herausfordernd!!!

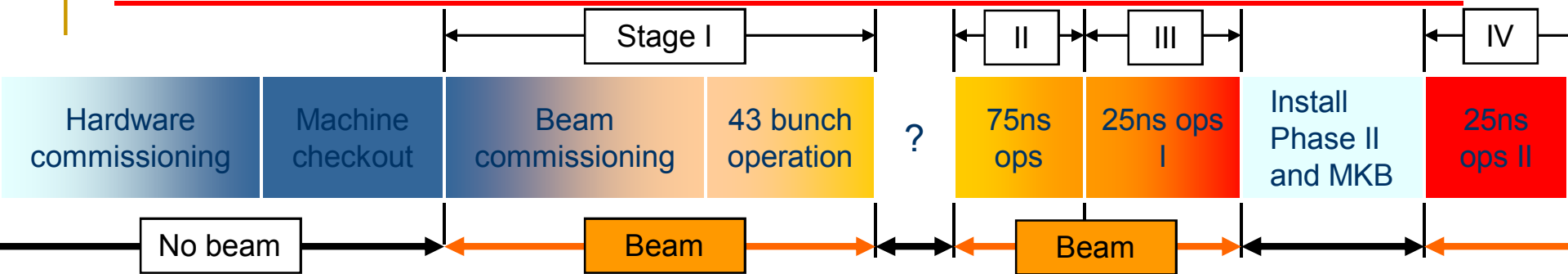
LHC Ausbaustudien könnten mehr Operations-Spielräume verschaffen → R&D Forschung wird schon jetzt betrieben!

Unfall im September 2008 hat eine Überarbeitung und den Ausbau des Schutzsystems in Gang gesetzt → 1 Jahr Betrieb Stopp

In Betriebnahme verläuft in Phasen um die verschiedenen Herausforderungen einzeln abzuarbeiten

Nach ein Jähriger Unterbrechung ist das LHC bereit und gut gerüstet für einen neuen Start im September 2009

Phase der Inbetriebnahme für Protonen



Pilot physics run

- Erste Kollisionen
- 43 Pakete, kein Kreuzungs-Winkel, injektions Optik, moderate Intensitäten
- Leichte Leistungsverstärkung (156 Pakete, Optik in 1 and 5, erhöhte Intensität)

75ns operation

- Operation mit mehreren Paketen, moderate Intensitäten
- Relaxierte Maschinen Parameter (squeeze und Kreuzungs-Winkel)
- Push squeeze und Kreuzungs-Winkel

25ns operation I

- Nominaler Kreuzungs-Winkel
- Push squeeze
- Erhöhe die Intensität auf 50% des nominalen Wertes

25ns operation II

- Streben nach nominaler Leistung

Zusammenfassung Operation's Phasen

Mechanische Apertur	} genaue Analyse und Definition von Prozeduren Während der Installation → Optimierung in Stage I
Polarität's Fehler	
Globale Magnet Feld Qualität & Operation der Korrektur Kreise	
Kollimations Effizienz	
Strahlleistung und Maschinen Schutz	von Stage I zu Stage II
Kollektive Effekte und Impedanz	Nur in Stage III
Triplet Apertur und Strahl-Strahl WW	nur > Stage III
Electronen Wolken Effekt	Nur in Stage IV

Zusammenfassung

Schon das nominale LHC ist sehr herausfordernd!!!

LHC upgrade Studien können zusätzliche Tolleranzen und Spielräume für den nominalen Betrieb bereitstellen

→ R&D Ergebnisse sollten direkt nach der Inbetriebnahme benötigt!

Strahlungslimit der Magnete (700fb^{-1}) kann in 2017 erreicht sein

→ müssen schon jetzt einen Ersatz vorbereiten
grössere Triplet Aperturen verringern Kollimator Impedanz!

Strahlen und Maschinen Schutz sind eine große Herausforderung

Offizielle Kollaborationen für R&D Studien sind im Gange mit US-LARP und den Europäischen ESGARD & FP7 Initiativen

Ursprüngliche Design Parameter

Parameters	'white book'	DIR-TECH/84-01 & ECFA 84/85 CERN 84-10
# bunches	3564	slightly too large (kicker rise time)
N / bunch	$0.34 * 10^{11}$	margins for beam-beam effects
β^*	1m	margins for aperture and impedance
ϵ_n	1.07 μm	factor 3 margin for N_b/ϵ_n for injector chain
σ^*	12 μm	
σ_L	7.55cm	
full crossing angle	100 μrad	margins for triplet aperture
events / crossing	1 \leftrightarrow 4	detector efficiency
peak luminosity	$0.1 * 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$	
luminosity lifetime	56h	long physic runs ==> efficiency
E[TeV]	8.14	10 T dipole field
E[MJ]	121	70 x energy in existing SC storage rings

Nominale Parameter

Parameters	'white book'	Competition with SSC
# bunches	2808	
N / bunch	$1.15 * 10^{11}$	factor 3 smaller margin for beam-beam
β^*	0.55m	reduced margins for aperture and impedance
ϵ_n	1.75 μ m	
σ^*	16.7 μ m	
σ_L	7.55cm	
full crossing angle	285 μ rad	factor 3 smaller margin for triplet aperture
events / crossing	19.2	
peak luminosity	$1.0 * 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$	
luminosity lifetime	15h	1 physics run per day
E[TeV]	7	
E[MJ]	366	quench & damage potential (200 x)!

Optionen der Leistungsverbesserung

CERN hat drei Haupt-Optionen für eine Leistungsverbesserung identifiziert und sie nach ihrem Kosten und Arbeits Aufwand in drei Phase eingeteilt (2001):

Phase 0: Leistungssteigerung ohne Veränderung der Infrastruktur

Phase 1: Leistungssteigerung mit lokalen Veränderungen (Triplet)

Phase 2: Leistungssteigerung mit signifikanten Veränderungen der Infrastruktur

Ultimative Parameter (Phase0)

Parameters	nominal	'Ultimate'	
# bunches	2808	2808	
N / bunch	$1.15 * 10^{11}$	$1.7 * 10^{11}$	beam-beam
β^*	0.55m	0.5m	impedance
ϵ_n	$1.75 \mu\text{m}$	$1.75 \mu\text{m}$	
σ^*	$16 \mu\text{m}$	$16.7 \mu\text{m}$	
σ_L	7.55cm	7.55cm	
full crossing angle	$285 \mu\text{rad}$	$> 315 \mu\text{rad}$	triplet aperture
events / crossing	19.2	44.2	detector efficiency?
peak luminosity	$1.0 * 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$	$2.4 * 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$	
L lifetime	15h	10h	1 physics run per day
E[TeV]	7	7 -> 7.45	
E[MJ]	366	541	quench & damage risk

Optionen der Leistungssteigerung: Phase 1

 Vergrößerung der mechanischen Apertur der Triplet Magnete:

1) Neue Magnete für die Fokussierung neben den Experimenten:

→ erlaubt kleineres β^* am Wechselwirkungspunkt (Strahlgrösse)

→ höhere Luminosität (Rate der Ereignisse)

→ höheres Magnetfeld and der Spule (kritische Oberfläche!)

→ a) neue Magnet Technologie (Nb₃Sn [USLARP])

→ b) neues Layout mit kleinen Gradienten (existing NbTi)

→ verlangt grösseren Kreuzungswinkel

→ Reduktion der Luminosität

→ erzeugt grösseres β^* in den Magneten (Feldqualität)

Optionen der Leistungssteigerung: Phase 2

4 Gebiete für die Verbesserung der Infratraktur:

1) New Multi Turn Extraction im PS → kleinere Verluste

2) PS Magnet Renovierung und Austausch (PS2):

→ Programm 50 Magnete Aufzuarbeiten und Auszutauschen

→ keine Dauerlösung → PS2 Projekt

3) Erneuerung des Protonen Linacs: LINAC4

→ überkommt Engpässe für die 'ultimativen' LHC Parameter

→ Löst das Problem der Instandhaltung vom LINAC2

→ LINAC4 Ausbau kann den PSB überspringen(space charge)

4) Magnet Renovierung im SPS

→ Programm SPS Magnete Aufzuarbeiten und Auszutauschen

→ CERN 'White Paper'

Optionen der Leistungssteigerung:

Proton Accelerators for the Future (PAF) Studie – identifizierte Szenarios des Ausbaus:

- Zuverlässige Operation für den LHC (mit ultimativen Strahl Parametern)
- Optionen für neue Experimente in der Zukunft

