

Existierende, zukünftige und alternative Beschleunigerkonzepte

- Existierende, zukünftige und alternative Beschleunigerkonzepte
 1. LEP, SLC
 2. Tevatron, PEP-II, KEK-B, HERA, RHIC, CESR, DAΦNE
 3. LHC
 4. Linear-Collider: NLC, TESLA, CLIC
 5. Neutrino-“Beschleuniger”
 6. Myon-Beschleuniger
 7. Free-Elektron-Laser
 8. Laser/Teilchenstrahl-Plasma-Beschleuniger

Übersicht der Beschleuniger-Projekte

Tab. 3.3 Liste einiger im Betrieb oder im Bau befindlicher Teilchenbeschleuniger und Speicherringe.

Name	Ort	Max. Strahlenergie/GeV	Fertigstellung
<i>Protonen-Synchrotrons</i>			
CERN PS	Genf, Schweiz	28	1960
BNL AGS	Brookhaven, USA	32	1960
KEK	Tsukuba, Japan	12	1976
Serpukhov	Serpukhov, UdSSR	76	1967
CERN SPS	Genf, Schweiz	450	1976
Fermilab Tevatron	Batavia, USA	900	1982
<i>Elektronenbeschleuniger</i>			
SLAC Linearbeschleuniger	Stanford, USA	20	1966
DESY-Synchrotron	Hamburg, BRD	7	1964
<i>Speicherringe</i>			
SPEAR	Stanford, USA	e^+e^- 4.2 + 4.2	1972
DORIS II	DESY, Hamburg	e^+e^- 5.6 + 5.6	1974/82
PETRA	DESY, Hamburg	e^+e^- 23 + 23	1978
PEP	Stanford, USA	e^+e^- 15 + 15	1980
CESR	Cornell, USA	e^+e^- 8 + 8	1979
TRISTAN	Tsukuba, Japan	e^+e^- 30 + 30	1986
LEP	CERN, Schweiz	e^+e^- 100 50 + 50 100	1989
Sp̄p̄S	CERN, Schweiz	$p\bar{p}$ 310 + 310	1982
Tevatron	Fermilab, USA	$p\bar{p}$ 900 + 900	1987
HERA	Hamburg, BRD	ep 30e + 820p	1990
<i>Linearbeschleuniger mit kollidierenden Strahlen</i>			
SLC	Stanford, USA	e^+e^- 50 + 50	1988

Davon noch in Betrieb, u.a.:

CERN PS : p, e^\pm , Ionen
(Teststrahlen, Vorbeschl. SPS)

CERN SPS : p, e^\pm , Ionen
(Teststrahlen, Vorbeschl. LHC)

KEK : $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$
(für b-Quark-Fabrik KEK-B)

DORIS II : e^- (Synchrotron-Strahlungsquelle)

PETRA : p, e^+ (Vorbeschl. HERA)

PEP : $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$
(für b-Quark-Fabrik PEP-II)

CESR : $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$
(für CLEO-Exp.)

Tevatron : $p \rightarrow \leftarrow \bar{p}$
(für DØ- & CDF-Exp., 2×1000 GeV)

HERA : $p \rightarrow \leftarrow e^+$
(für H1- & ZEUS-Exp.)

RHIC : $^{197}\text{Au} \rightarrow \leftarrow ^{197}\text{Au}$
(100 GeV/Nukleon)

Large Hadron Collider



Im Tunnel des LEP- e^+e^- -Beschleunigers:

- LHC: größter & höchstenergetischster Beschleuniger weltweit
- Proton \rightarrow \leftarrow Proton
- zwei separate Ringe
- 2×7 TeV Energie
- 4 Experimente:
 - ◇ ATLAS, CMS (Vielzweck-Experimente)
 - ◇ LHC-b (CP-Verletzung bei b-Quarks)
 - ◇ ALICE (Quark-Gluon-Plasma)

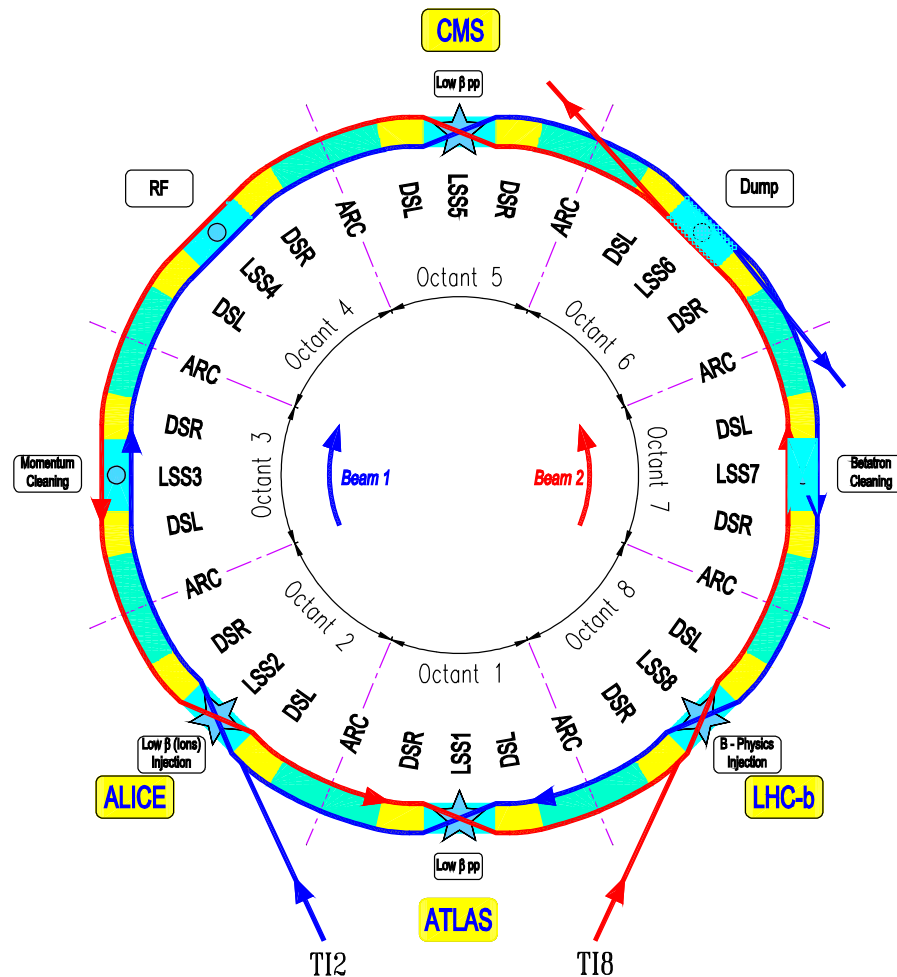
Chronologie von LHC:

- ◇ \sim 1984 erstes Konzept
- ◇ 1991 konkrete Design-Studie
- ◇ Dez. 1994 Zustimmung des CERN Councils
- ◇ 1999 Beginn der Erdarbeiten
- ◇ 2000/1 Demontage von LEP & Experimenten
- ◇ 2004-6 Installation Beschleuniger & Experimente
- ◇ 2004 LHC-Sektor- & Injektionstest
- ◇ Herbst 2006 Testlauf Beschleuniger
- ◇ Frühjahr 2007 Beginn des regulären Messprogramms
- ◇ \gtrsim 15 Jahre Laufzeit des Messprogramms

LHC-Parameter:		Injektion	Kollision
Ringumfang	[m]	26658.883	
Ringabstand	[mm]	194	
Anzahl Ablenkmagnete		1232	
Länge je Magnet	[m]	14.3	
B -Ablenkfeldstärke	[T]	0.535	8.33
Protonenergie	[GeV]	450	7000
Protonen/Bunch		1.15×10^{11}	
Bunchanzahl		2808	
Strahlstrom	[A]	0.584	
Energie im Strahl	[MJ]	23.3	362
Synchrotron-Strahlungsleistung	[W]	0.06	3600
Energieverlust/Umlauf	[eV]	0.12	6710
RF-Frequenz	[MHz]	400.8	
ges. RF-Spannung	[MV]	8	16

		Injektion	Kollision
Energiestreuung δ (RMS)	$[10^{-4}]$	3.06	1.11
β^* in IP1&5	[m]	18	0.55
transv. Emittanz $\varepsilon_{x,y}$	$[\mu\text{m rad}]$	3.5	3.75
Bunchlänge (RMS)	[cm]	17.5	7.7
Strahldurchmesser an IP1&5 (RMS)	$[\mu\text{m}]$	375.2	16.7
Betatron-Tunes $Q_{x,y}$ (hori, vert)		64.28, 59.31	64.31, 59.32
Synchrotron-Tune Q_s		5.5×10^{-3}	1.9×10^{-3}
Übergangsenergie γ_t		55.68	
Spitzenluminosität	$[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$	—	1.0×10^{34}
Strahllebensdauer	[h]	—	14.9

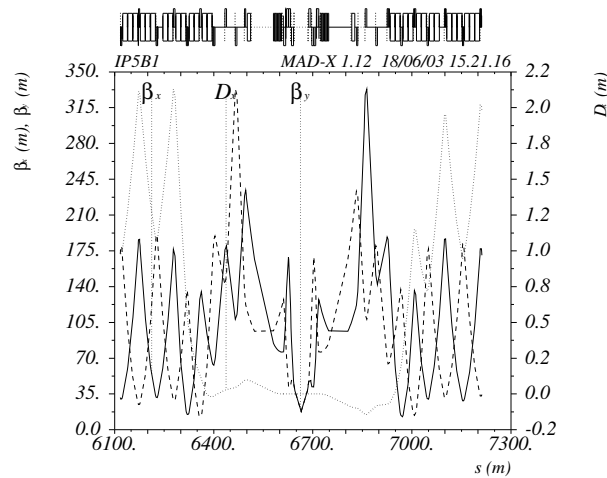
LHC-Ring:



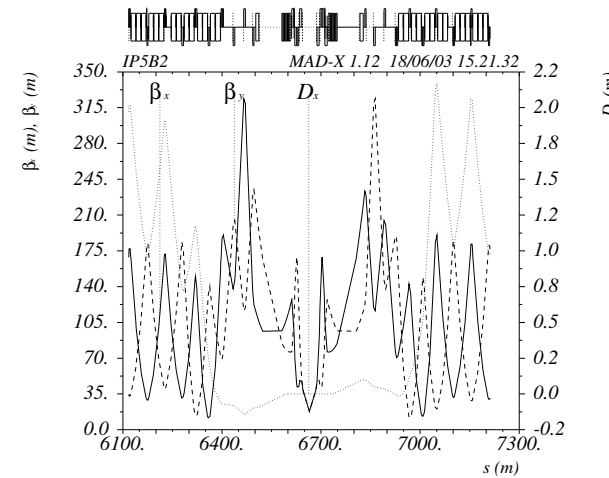
- Ring besteht aus 8 Oktanden
- 4 Wechselwirkungszone: IP1, IP2, IP5, IP8
- Strahlinjektion in IP2 und IP8
- Strahlextraktion (Dump) in IP6
- RF-Beschleunigungsstrukturen in IP4
- Reduktion der Impulsstreuung in IP3
(große Dispersionsfunktion $D(s)$:
Teilchen mit großer Impulsstreuung $\delta \rightarrow$ Kollimator)
- Reduktion der Betatron-Amplitude in IP7
(kleine Dispersionsfunktion $D(s)$:
Teilchen mit großer Betatron-Ampl. $\beta_{x,y} \rightarrow$ Kollimator)

Figure 3.2: Schematic layout of the LHC. The blue line indicates Beam1 and the red line Beam 2. Beam 1 circulates clockwise and Beam 2 counter clockwise.

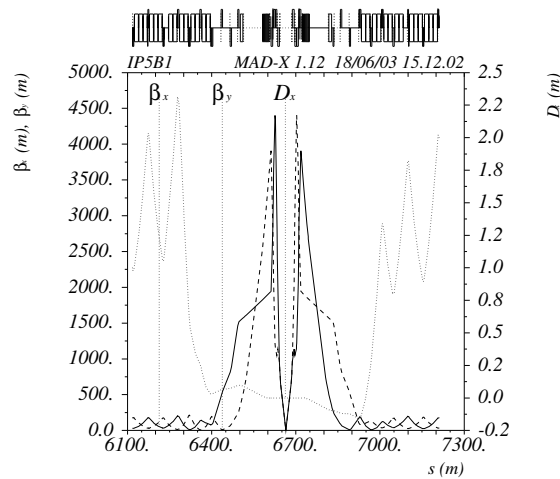
Strahloptik in Kollisionspunkten IP1&5:



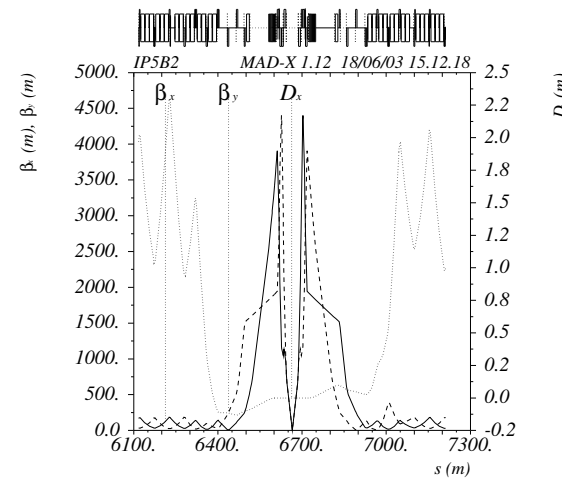
(a) Beam 1, injection optics



(b) Beam 2, injection optics



(c) Beam 1, collision optics



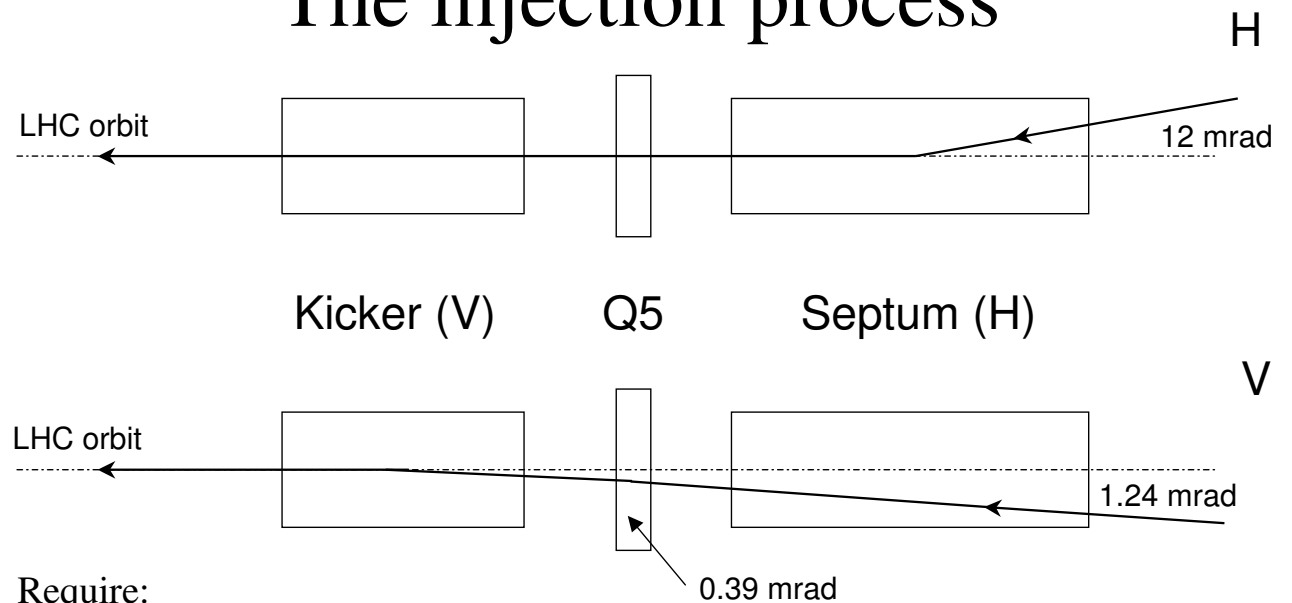
(d) Beam 2, collision optics

Figure 4.3: Injection (top) and collision (bottom) optics of the high-luminosity insertions at IP1 and IP5 for a β^* of 18 m and 0.55 m.

Strahlinjektionsprinzip IP2&8:

- zu injizierender Strahl besteht aus Abfolge von vielen Bunchen (so genannter Bunchzug von $\sim 7.4 \mu\text{s}$ Dauer mit 3 oder 4×72 Einzelbunchen)
- neuer Strahl wird in freie Lücke in LHC-Strahl eingefügt
- zu injizierender Strahl kommt von außerhalb des Rings
- liegt unterhalb der Ebene des Sollorbits
- Septummagnet bringt zu injizierenden Strahl auf LHC-Sollorbit aber noch unterhalb der Ebene (12 mrad Ablenkwinkel)
- Strahl läuft von unten auf LHC-Sollorbit zu (1.24 mrad Winkel)
- Quadrupol Q5 reduziert Annäherungswinkel (um 0.39 mrad)
- Kickermagnet bringt zu injizierenden Strahl auf LHC-Sollorbit (0.85 mrad Kickwinkel)
- Kickermagnet: Anstiegszeit des B -Feldes $< 1 \mu\text{s}$, Plateaulänge $8 \mu\text{s}$, Abfallzeit des B -Feldes $< 3 \mu\text{s}$ (Abfallszeit = Länge der Zeitlücke für Strahldump-Kicker)

The injection process



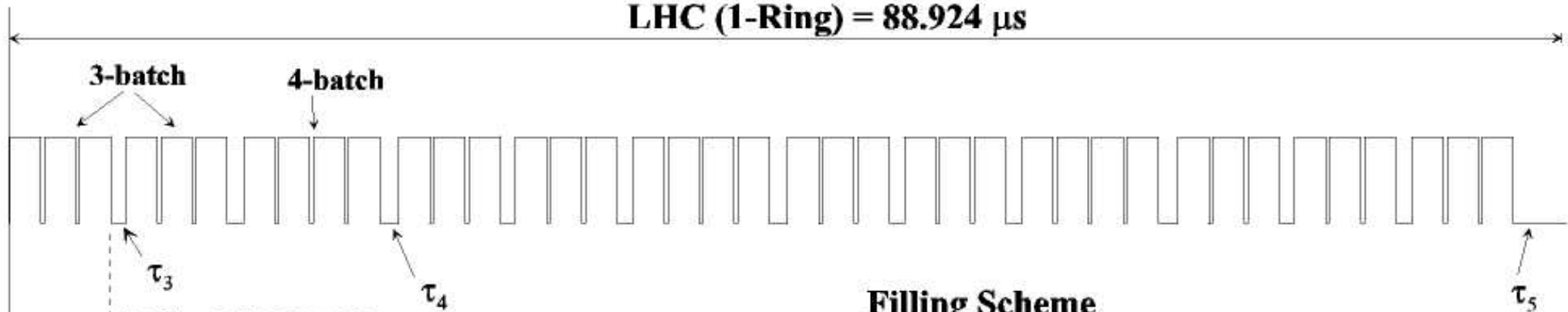
Require:

- $< 1 \mu\text{s}$ rise time (gap between SPS injections),
- $< 3 \mu\text{s}$ fall time (abort gap),
- $8 \mu\text{s}$ flat-top length (1 SPS batch)

LHC Bunch-Struktur des Strahls:

Bunch Disposition in the LHC, SPS and PS

LHC (1-Ring) = 88.924 μ s

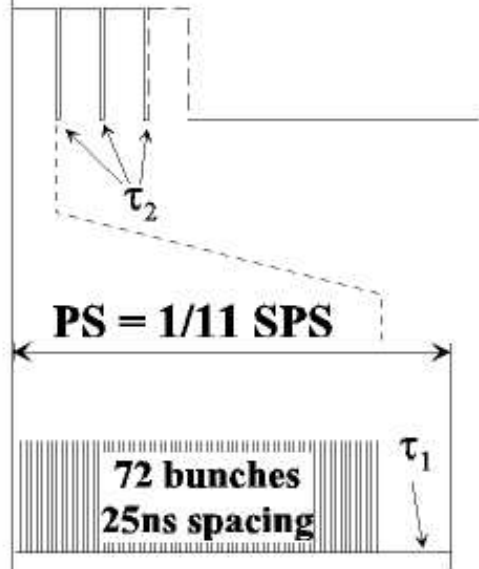


Filling Scheme

$$3564 = \{[(72b + 8e) \times 3 + 30e] \times 2 + [(72b + 8e) \times 4 + 31e]\} \times 3 + \{[(72b + 8e) \times 3 + 30e] \times 3 + 81e\}$$

Beam Gaps

- $\tau_1 = 12$ missing bunches (72 bunches on h=84)
- $\tau_2 = 8$ missing bunches (SPS Injection Kicker rise time = 220 ns.)
- $\tau_3 = 38$ missing bunches (LHC Injection Kicker rise time = 0.94 μ s.)
- $\tau_4 = 39$ missing bunches (" ")
- $\tau_5 = 119$ missing bunches (LHC Dump Kicker rise time = 3 μ s.)



Septum- und Kickermagnete:

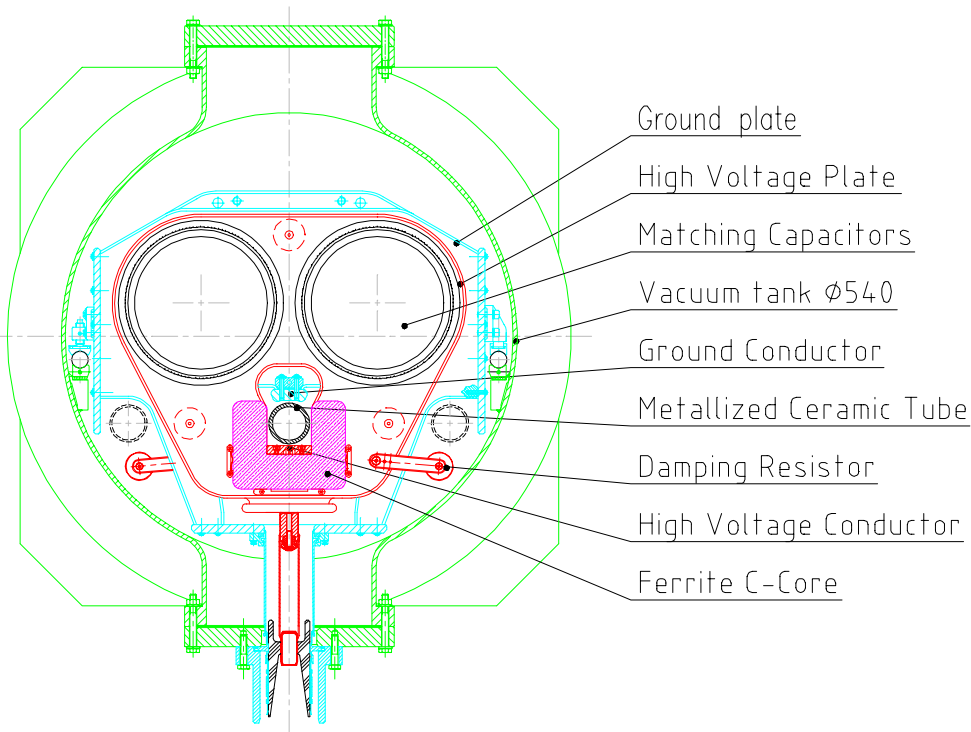
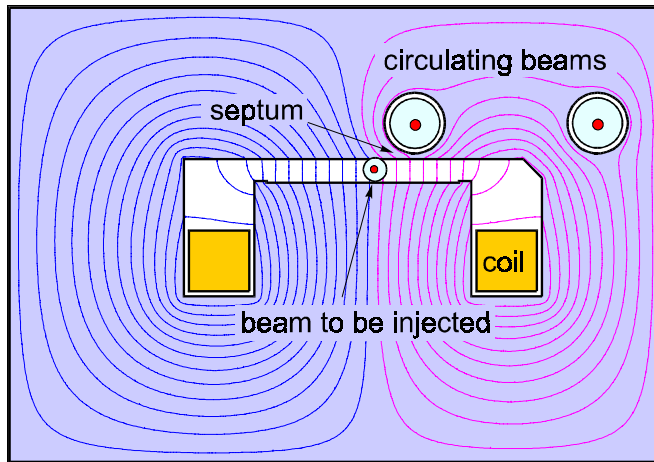


Figure 4: Kicker magnet cross section.

- (Lambertson)-Septummagnet:
 - ◇ Dipolfeld für Injektionsstrahl
 - ◇ Strahl auf Sollorbit verläuft in B -feldfreien Raum (B -Feldabschirmung durch Mu-Metall)
 - ◇ Septummagnetlänge: 4 m
 - ◇ Anzahl Septummagnete: 5/Injektionszone
- Kickermagnet:
 - ◇ kurzzeitiges Dipolfeld \rightarrow Kick (=kleine Ablenkung) des Injektionsstrahls
 - ◇ Konzept: Kondensator (54 kV) über Stromschiene entladen
 - ◇ Pulsform-Schaltungen für notwendiges Zeitprofil:

Anstiegszeit 0.5%-99.5%:	0.9 μ s
Plateauzeit :	bis zu 7.9 μ s
Plateaurippel :	$< \pm 0.5\%$
Abfallzeit 99.5%-0.5%:	3.0 μ s
 - ◇ HV-Versorgung, Pulsformung, HV-Schalter: außerhalb des LHC-Tunnels
 - ◇ Zuleitung über 35 m lange Koaxialkabel (10 Stück parallel)
 - ◇ Kickermagnetlänge: 2.65 m
 - ◇ Anzahl Kickermagnete: 4/Injektionszone

Strahldump in IP6:

Strahldump: 7 TeV Strahlen in einem Umlauf
(88 μs) aus LHC extrahieren & absorbieren

- 15 Kickermagnete
($t_{\text{Anstieg}} < 3 \mu\text{s}$, $t_{\text{Plateau}} > 90 \mu\text{s}$)
- 15 Septummagneten
(vergleichbar zu Injektionsseptum)
- 10 Dilution-Kickermagnete
(verteilen Strahlintensität auf Absorber)

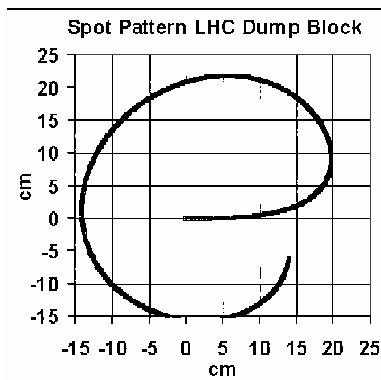
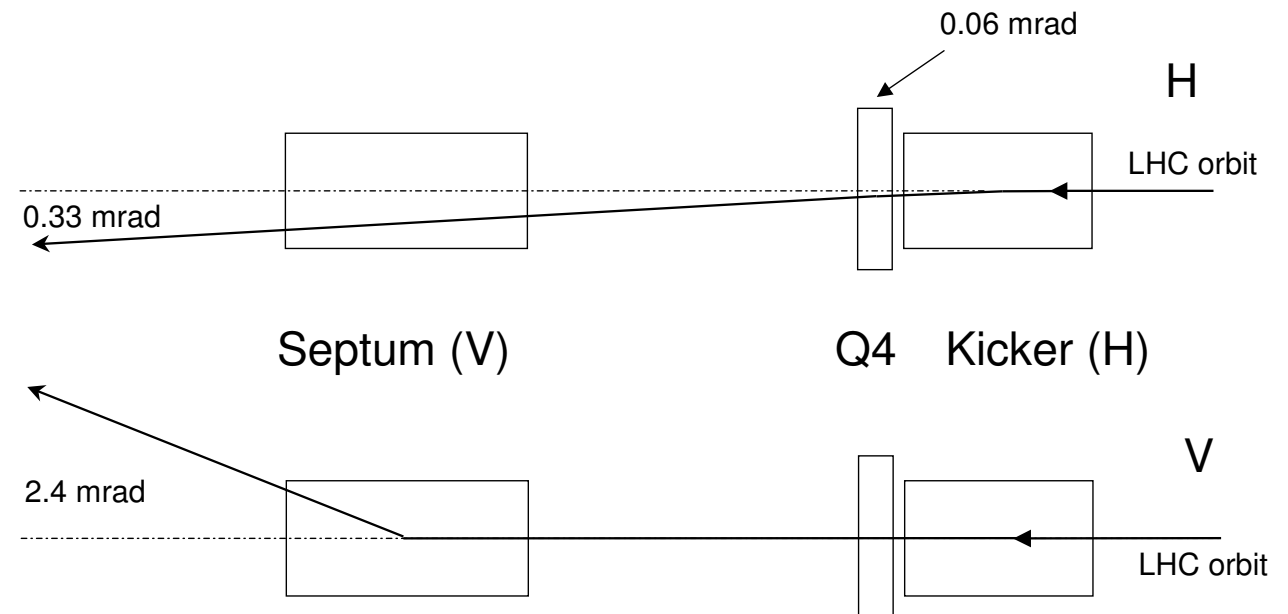


Figure 17.6 Beam spot figure on absorber block.

- Absorberblock je:
 - ◇ 7.7 m langer, segmentierter Kohlenstoff-Zylinder mit $\text{Ø}0.7\text{m}$
 - ◇ in Stahlmantel eingeschlossen
 - ◇ rund 6 t Eigengewicht
 - ◇ umgeben von ~ 900 t Eisen-Stahl-Strahlungsschilde
 - ◇ muss 428 MJ absorbieren
 - ◇ max. Temperatur 1050-1250 $^{\circ}\text{C}$
 - ◇ wassergekühlt
 - ◇ muss 20 Jahre halten

The extraction process



Require:

- <3 μs extraction kicker rise time (abort gap),
- >89 μs extraction kicker flat-top length (full LHC turn)

Linea-Collider: NLC, TESLA, CLIC

- Elektron-Positron-Collider limitiert durch Synchrotron-Strahlung (Energieverlust $\propto E^4/R$)
- größter e^+e^- -Beschleuniger: LEP (27 km Umfang, 2×10^4 GeV, ~ 10 MW Synchrotron-Strahlungsverluste)
- höhere Teilchenenergie \rightarrow Lineare Collider (LC)

Unterscheidung i.W. durch Beschleunigungs-System:

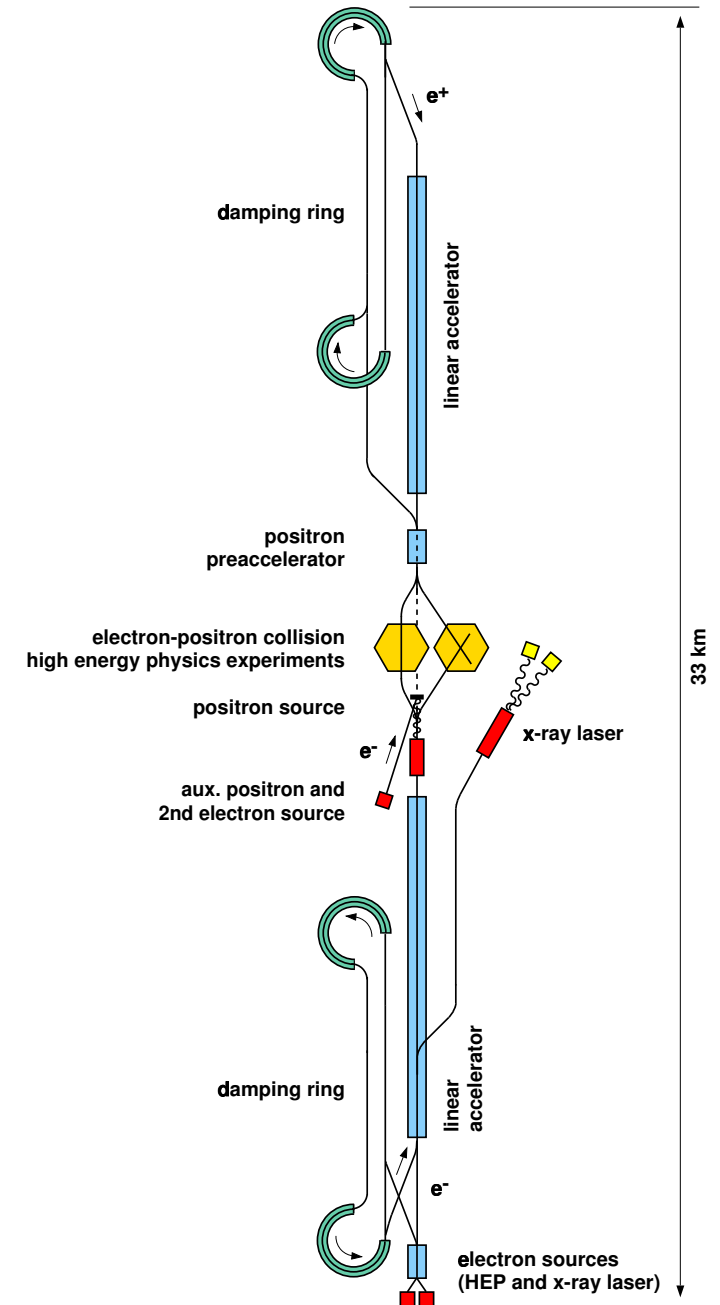
- ▷ normalleitende Beschl.resonatoren (=Cavities)
 - ◇ (nahezu) beliebig hohe Beschleunigungsgradienten
 - ◇ hohe thermische Verluste in Cavities
 - ◇ nur sehr kurze Strahlpulse möglich
- \rightarrow Strahllagekorrektur für aktuellen Strahl nicht möglich
 - ◇ i.A. starke "Beam-Strahlung" (longit. Synch.-Strahlung)
- ▷ supraleitende Beschleunigungsresonatoren (TESLA)
 - ◇ Beschl.gradienten theor. auf ~ 55 MV/m beschränkt
 - ◇ praktisch erreicht ~ 35 -40 MV/m

- ◇ geringste Verluste in Cavities
- ◇ lange Strahlpulse möglich
- \rightarrow Strahllagekorrektur für aktuellen Strahl möglich
 - ◇ nur geringe "Beam-Strahlung"
- ▷ "Drive-beam"-Beschleunigung (CLIC)
 - ◇ intensiver, niederenergetischer Strahl parallel zu Linear-Collider erzeugt HF in Resonatoren im Multi-GHz-Bereich
(entspricht langgestrecktem Klystron)
 - ◇ HF-Leistung beschleunigt Teilchen im Haupt-Beschleuniger
 - ◇ (nahezu) beliebig hohe Beschleunigungsgradienten (> 60 MV/m)
 - ◇ Multi-GHz-Bereich führt zu starken Wake-Feldern (Effekte wachsen \propto Frequenz³)
- \rightarrow derzeit noch Research&Development (R&D)

TESLA: Supraleitender Linearer e^+e^- Collider

		TESLA-500
Accelerating gradient	E_{acc} [MV/m]	23.4
RF-frequency	f_{RF} [GHz]	1.3
Fill factor		0.747
Total site length	L_{tot} [km]	33
Active length	[km]	21.8
No. of accelerator structures		21024
No. of klystrons		584
Klystron peak power	[MW]	9.5
Repetition rate	f_{rep} [Hz]	5
Beam pulse length	T_P [μ s]	950
RF-pulse length	T_{RF} [μ s]	1370
No. of bunches per pulse	n_b	2820
Bunch spacing	Δt_b [ns]	337
Charge per bunch	N_e [10^{10}]	2
Emittance at IP	$\gamma \varepsilon_{x,y}$ [10^{-6} m]	10, 0.03
Beta at IP	$\beta_{x,y}^*$ [mm]	15, 0.4
Beam size at IP	$\sigma_{x,y}^*$ [nm]	553, 5
Bunch length at IP	σ_z [mm]	0.3
Beamstrahlung	δ_E [%]	3.2
Luminosity	$L_{e^+e^-}$ [10^{34} cm $^{-2}$ s $^{-1}$]	3.4
Power per beam	$P_b/2$ [MW]	11.3
Two-linac primary electric power (main linac RF and cryogenic systems)	P_{AC} [MW]	97
e^-e^- collision mode:		
Beamstrahlung	δ_{E,e^-e^-} [%]	2.0
Luminosity	$L_{e^-e^-}$ [10^{34} cm $^{-2}$ s $^{-1}$]	0.47

Table 1.3.1: TESLA parameters for the $E_{cm} = 500$ GeV baseline design. The machine length includes a 2% overhead for energy management. The klystron power and primary electric power quoted include a 10% regulation reserve.



TESLA: Optik

- vor Wechselwirkungspunkt: Ablenkung des Strahls aus Beschleunigungsstrecke, damit so gen. “Beam-Strahlung” ($\hat{=}$ longitudinale Synchrotron-Strahlung) nicht in Wechselwirkungszone gelangt
 - Magnetgitter mit Dipolen & fokus./defokus. Quadrupolen
 - Fig.7.2.1: Betatron-Funktion, Dispersionsfunktion, Magnetgitter auf einer Seite des Wechselwirkungspunkts (engl. Interaction Point, IP)
 - “Final Focus” ist spezielle Anordnung von Fokussierungsmagneten (im Bild nicht detailliert)
- am IP Strahlgröße: $533 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$!
(horizontal \times vertikal, notwendig für Luminosität)

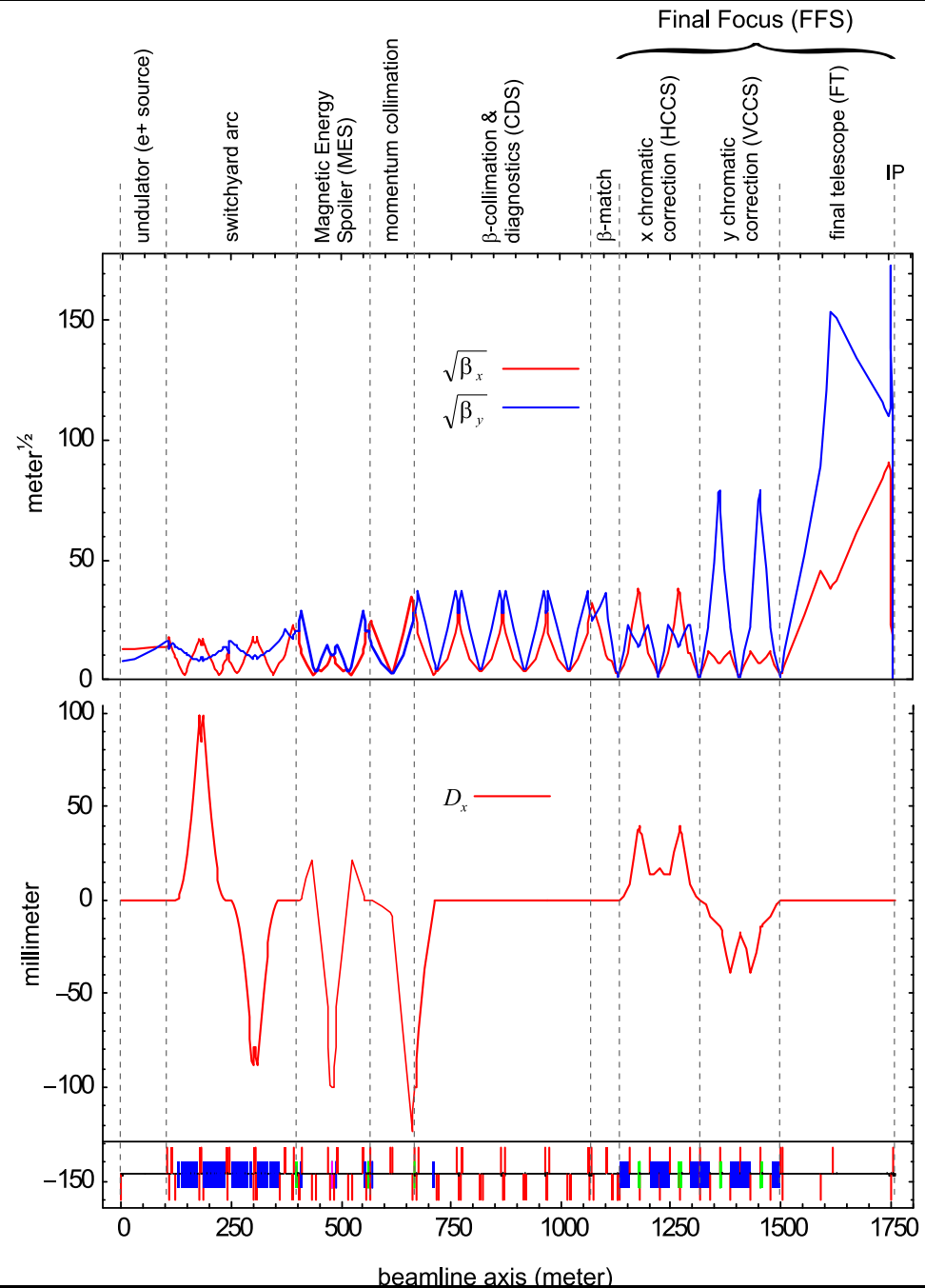


Figure 7.2.1: Optics functions for the TESLA BDS (e^-).

TESLA: einige weitere Beschleuniger-Elemente

● Positron-Quelle:

- ◇ Undulator-Magnet erzeugt intensive γ -Strahlung
(γ -Energie mehrere MeV)
- ◇ γ -Photonen auf Absorber-Target
- e^+e^- -Paarbildung (im Feld der Atomkerne)
- ◇ Einfangen der Positronen durch Solenoid-Magnet
- ◇ und Beschleunigung der Positronen
- ◇ Speicherung im Emittanz-Dämpfungsring

● Emittanz-Dämpfungsring:

- ◇ “hundknochen-förmiger” Ring
- ◇ ca. 17 km Umfang, 5 GeV Strahlenergie, bis zu 160 mA Strahlstrom
- ◇ Emittanz $\gamma\epsilon$: Dämpfung durch Wiggler-Magnete
- ◇ Injektion: $\gamma\epsilon \approx 0.01 \text{ m}/10 \times 10^{-5} \text{ m}$ (e^+/e^-)
- ◇ Extraktion: $\gamma\epsilon_x / \gamma\epsilon_y \approx 8 \times 10^{-6} \text{ m} / 0.02 \times 10^{-6} \text{ m}$
- ◇ Dämpfungszeit 28 ms/50 ms für e^+/e^-

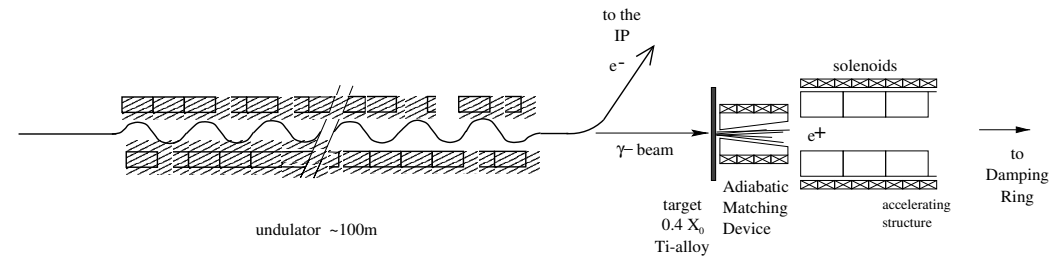


Figure 4.3.1: Sketch of the positron source layout.

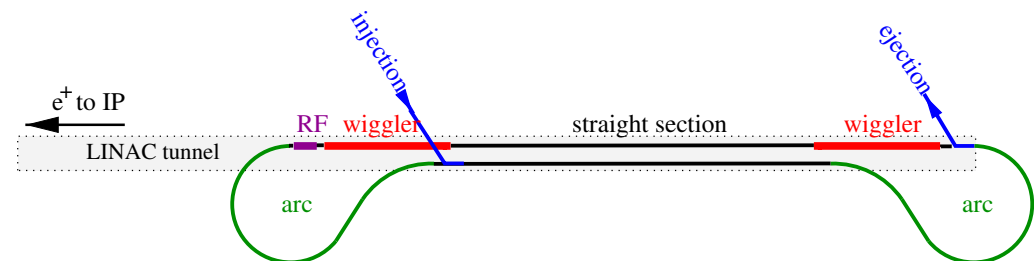
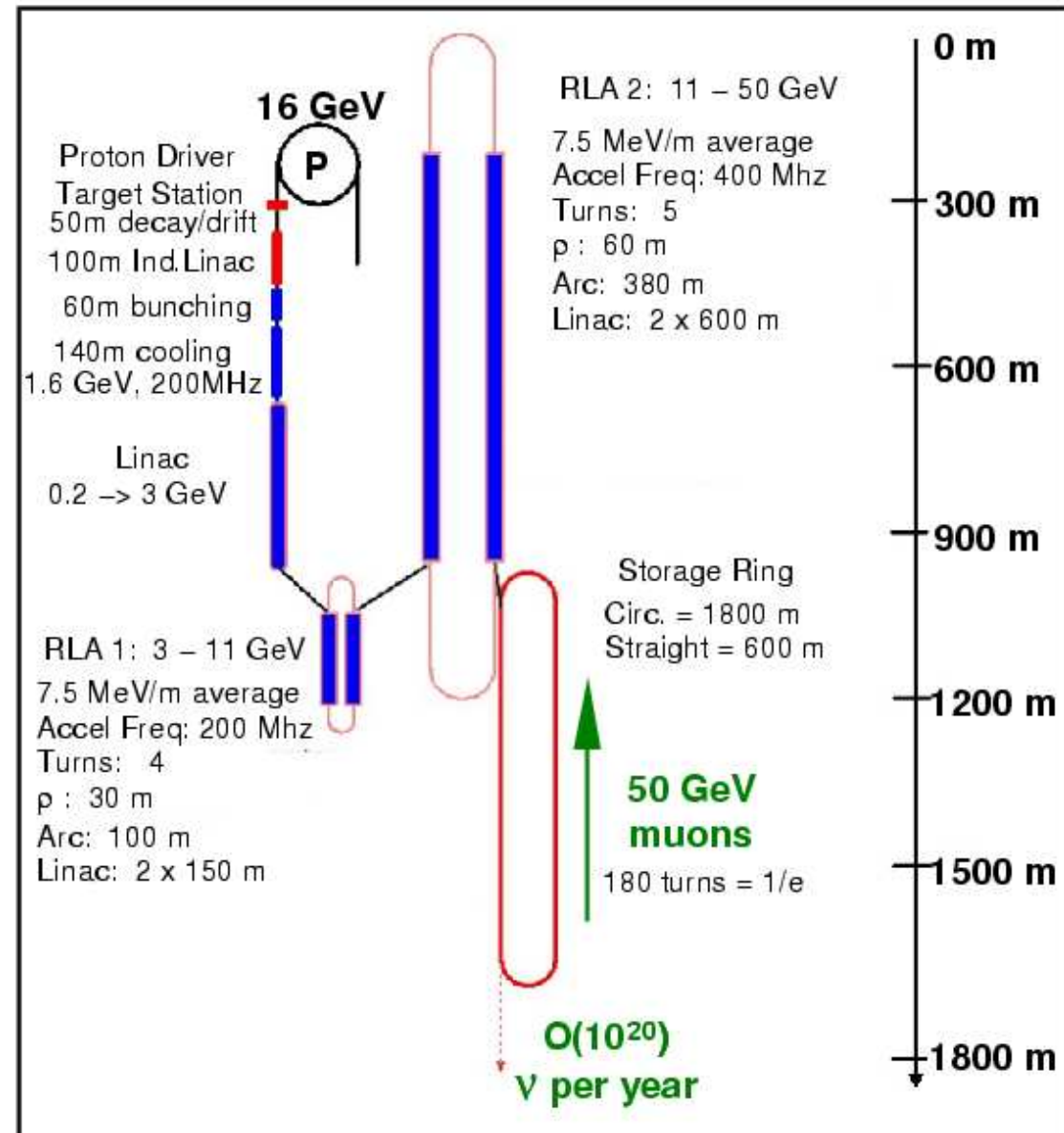


Figure 5.1.1: Conceptual layout of the positron damping ring. The electron ring is similar with the exception that the injection point is located close to the indicated ejection position at the beginning of the linac.

Neutrino-“Beschleuniger”

- Höchstintensiver Protonenstrahl
($> 10^{13}$ Protonen/ Schuss, 10-20 GeV)
- * auf Target (muss \gtrsim MW absorbieren, z.Zt. Quecksilber)
- produzierte Pion-Teilchen einfangen \rightarrow Pion-Zerfall in langem Flugtunnel \rightarrow Myonen
- * Kühlung des Myonstrahls (v.a. transversal)
- Phasenrotation des Myonstrahls (große Energiestreuung dE , kurze Pulsdauer $dt \rightarrow$ geringes dE , großes dt + Bunchstruktur)
- speichern der Myonen in Kreisbeschleuniger mit langen geraden Abschnitten
- Myonzerfall \rightarrow Neutrinos, starke Bündelung in geradem Abschnitt, wg. Lorentzfaktor $\gamma \gg 1$
- ▷ große technologische Herausforderungen in *
- \rightarrow Neuentwicklungen erforderlich:
Research&Development (R&D)



Myon-Beschleuniger

- Myon: ~ 200 -fach höhere Masse gegenüber Elektron
- Synchrotron-Strahlung $200^4 \approx 2 \times 10^9$ -fach geringer
- ◇ höhere Strahlenergie in Beschleuniger mit geringem Radius möglich
- ◇ Kollisionen: punktförmige Myonen \leftrightarrow Protonen mit komplizierter Struktur
- ◇ hohe Myon-Masse → starke Kopplung ans Higgs-Boson
→ direkte Erzeugung und Präzisionsuntersuchung des Higgs-Bosons
- ▷ Myon-Collider benötigt μ^+ und μ^- -Strahlen
- Neutrino-Fabrik ist erster Schritt zu Myon-Collider
- neue technologische Probleme bei Myon-Strahlenergie \gtrsim TeV, u.a.:
- ◇ Neutrinos aus Myon-Zerfall mit Energie $E_\nu \sim$ TeV
- ◇ Wirkungsquerschnitt Neutrino-Nukleon wächst $\propto E_\nu$
- ◇ signifikante Strahlungsbelastung durch Neutrinos
- Myon-Collider z.B. tief unterirdisch

Free-Elektron-Laser (FEL)

- Elektronenstrahl durchläuft Undulator
- Spontane Emission von Synchrotron-Strahlungsphotonen
- Elektronenstrahl wechselwirkt mit Synchrotron-Strahlungsphotonen
- Bunch wird durch Wechselwirkung in Mikro-Bunche aufgeteilt
- Mikro-Bunche emittieren kohärent Synchrotron-Strahlungsphotonen

→ SASE-Prinzip:

Self-Amplified-Spontaneous-Emission

- Intensität der Synchrotron-Strahlung $\propto (\text{Teilchenzahl im Bunch})^2$
- FEL-Parameter:
 - ◇ Photon-Energiebereich: 0.2-12.4 keV
 - ◇ Photonstrahl-Leistung: 20-100 GW

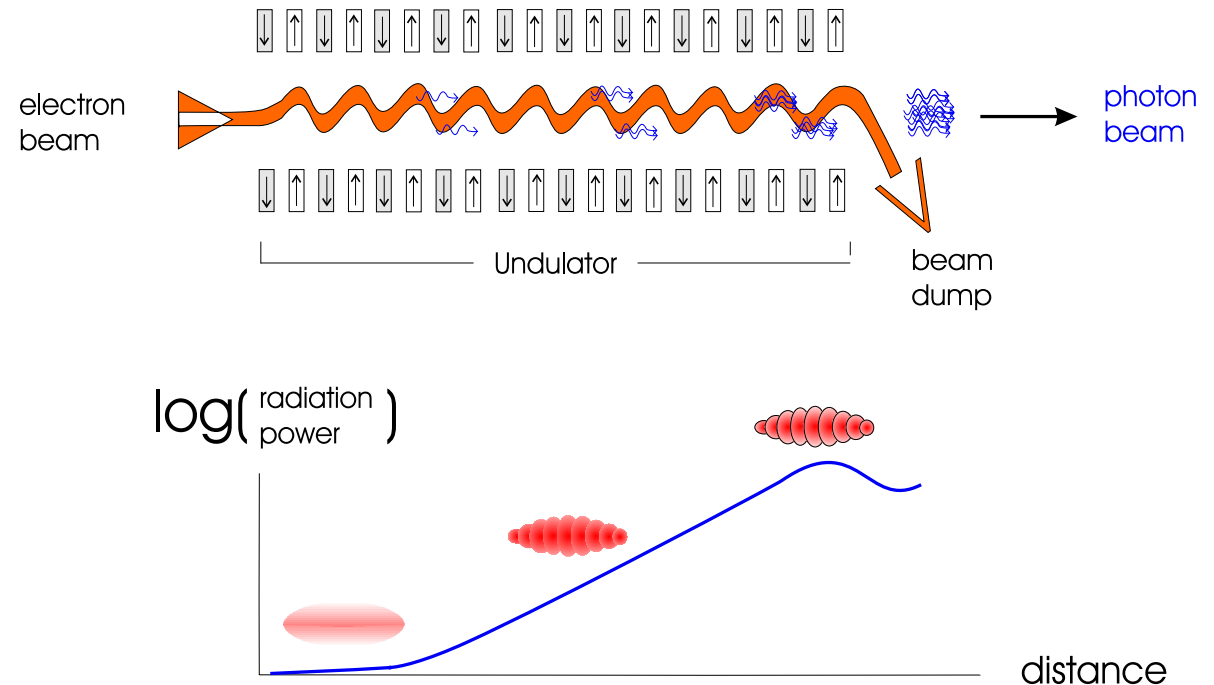


Figure 9.1.1: Schematic Diagram of a Single-Pass Free Electron Laser (FEL) operating in the Self-Amplified-Spontaneous-Emission (SASE) mode. The bunch density modulation (“micro-bunching”), growing up in parallel to the radiation power, is schematically shown in the lower part of the figure. Note that in reality the number of slices is much larger.

- ◇ Zahl der Photonen/Bunch: $(1-20) \times 10^{12}$
- ◇ typ. Photonstrahl-Divergenz: $1 \mu\text{rad}$
- ◇ typ. Photonstrahl-Durchmesser: $20 \mu\text{m}$

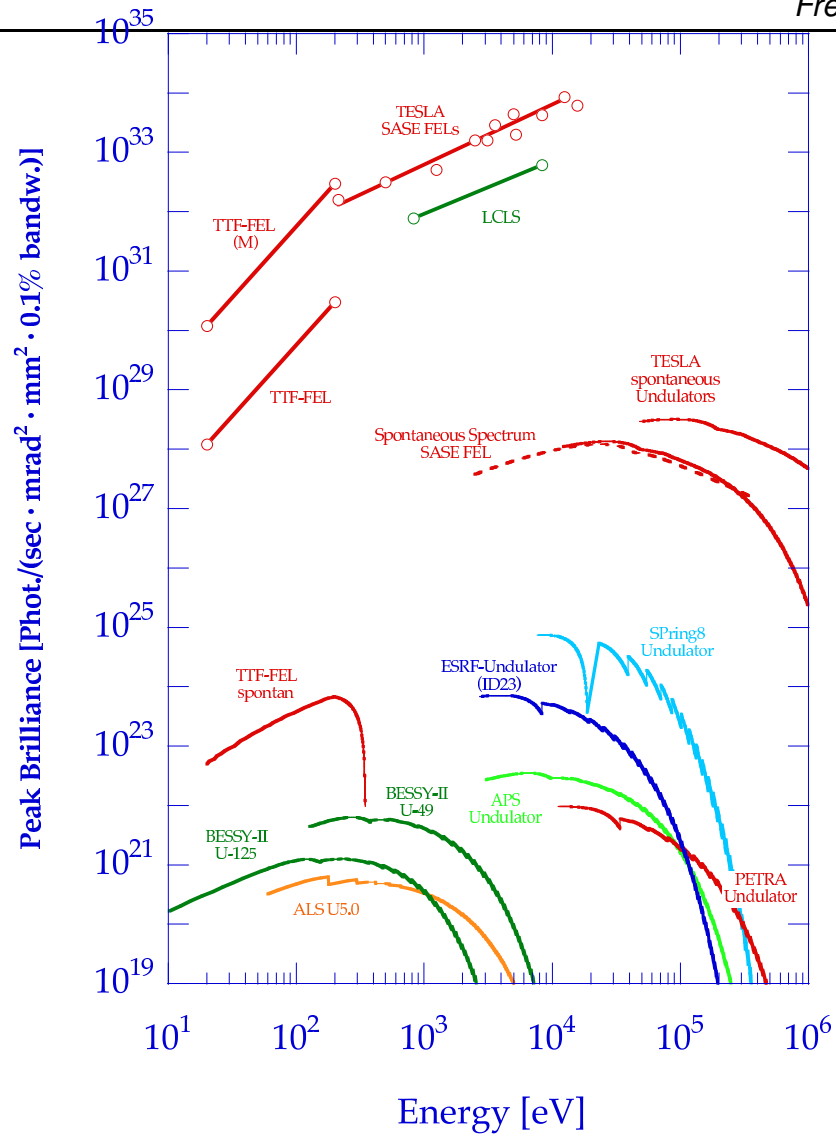


Figure 9.1.2: Spectral peak brilliance of X-ray Free Electron Lasers (XFEL) and undulators for spontaneous radiation at TESLA, in comparison with third-generation synchrotron radiation sources. For comparison, also the spontaneous spectrum of an XFEL undulator is shown. The label TTF-FEL indicates design values for the FEL at the TESLA Test Facility, with (M) for the planned seeded version. First lasing was demonstrated at TTF FEL in the year 2000 at 11 eV photon energy, and a peak brilliance of $(6 \pm 4) \cdot 10^{25}$ in the above units has been achieved up to now.

Variable	Unit	Value
Linac Parameters		
optimised gradient for XFEL operation	MV/m	18
linac repetition rate f_{rep} for XFEL	Hz	5
bunch length (rms)	fs	80
bunch spacing	ns	93
number of bunches per train		11500
bunch train length	μ s	1070
bunch charge	nC	1
normalised emittance at undulator entrance	mmrad	1.6
uncorrelated rms energy spread	MeV	5.1
RF duty cycle	%	0.5
average electron beam power (27 GeV branch)	MW	≤ 0.8
average electron beam power (50 GeV branch)	MW	≤ 1.4
over-all power efficiency AC to electron beam	%	28
FEL Parameters		
typical saturation length	m	100 - 220
photon energy range	keV	0.2 - 12.4
photon beam power range	GW	20 - 100
number of photons per bunch	10^{12}	1 - 20
typical photon beam divergence (rms)	μ rad	1
typical photon beam diameter (rms)	μ m	20

Table 9.1.1: Key parameters for XFEL operation with TESLA. More detailed tables on XFEL operation are given in part V.

Laser/Teilchenstrahl-Plasma-Beschleuniger

- Limitierung der Beschleunigungsgradienten in herkömmlichen Resonatoren auf typ. $< 100 \text{ MV/m}$
(höhere Gradienten \rightarrow stärkere HF-Felder \rightarrow Feldemission aus Resonatorwänden \rightarrow Oberflächenbeschädigung)
- alternative Beschleunigungsmethoden gesucht, z.B. mittels Plasma:
 - ◇ Plasma: Elektronen e^- & Ionen I^+ , im Mittel neutral
 - ◇ Plasma: e^- sehr beweglich, I^+ "träge"
 - ◇ durchlaufender Teilchen- (a)/ Laserpuls (b)
- \rightarrow transv. Verschiebung der e^- bzgl. I^+
- \cong transversale Wake-Felder
- ◇ verschobene e^- oszillieren transversal durch pos. I^+ -Kanal
- \rightarrow Wake-Felder laufen durch Plasma
- ◇ zu beschleunigender Elektronenbunch "surft" auf beschleunigendem Wake-Feld
- ◇ (theor.) Beschleunigungsgradienten: bis zu $\sim 100 \text{ GV/m}$!

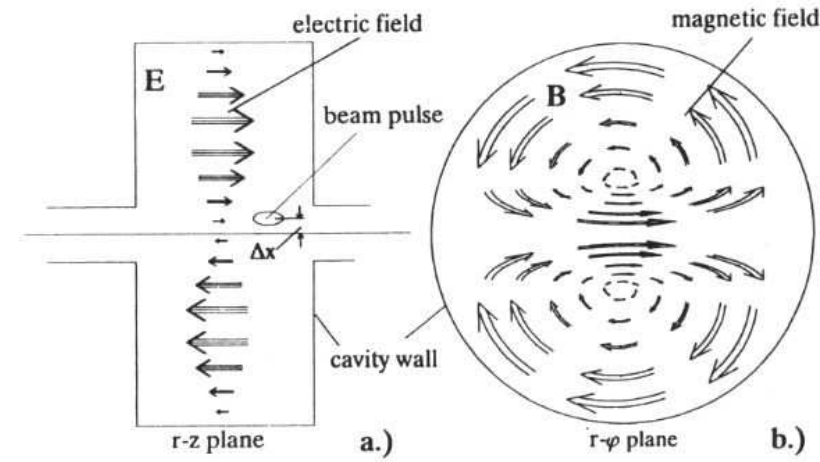
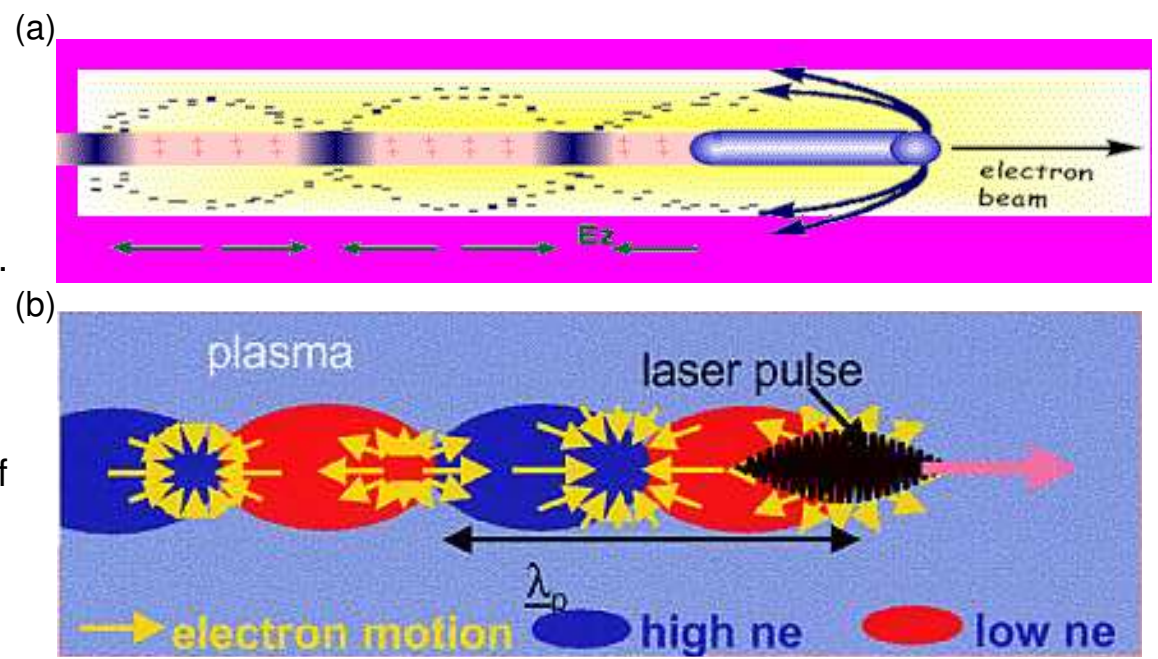


Fig. 12.3. Transverse parasitic mode
transv. Wake-Felder durch nicht-zentrierten Teilchenstrahl



Zusammenfassung

- Physik der Beschleuniger: angewandte Elektrodynamik mit Berührungspunkten zu vielen weiteren Gebieten:
 - ◇ Hochfrequenztechnik
 - ◇ Magnettechnik
 - ◇ Supraleitung für Magnete & Hochfrequenz-Resonatoren
 - ◇ Nicht-lineare Theorie
 - ◇ Chaos
 - ◇ Laser
 - ◇ Plasma
 - ◇ ...
- Prinzipien werden bis zur technologischen Grenze ausgereizt
- neue Prinzipien werden gesucht/untersucht, um zu höheren Strahlenergien & -intensitäten zu gelangen
- Teilchenführung basiert meist noch auf Magnete
(abgesehen von "Channeling" von Teilchen entlang Kristallebenen für Spezialanwendungen)
- Physik der Beschleunigung: immer noch weites Feld für neue Ideen & Konzepte !