Swiss Light Source

- 3 Fundamentele Sonden für Material Forschung
- Protein Kristallographie
- Luftbild SLS
- Elektromagnetische Strahlung
- Erzeugung von Röntgenstrahlung
- Synchrotron Licht Erzeugung
- Synchrotron Strahlung Spektrum von Bend
- Elektromagnetisches Spektrum
- Aurora (Sumitomo)
- Spektrometer
- SLS's hohe Brillanz
- Oktagon Speicherring
- **SLS** Speicherring
- Spring8 (Japan)
- Undulatoren
- Spektrum des Undulator U19
- Bild Undulator UE56
- Bild Undulator UE212
- SLS Undulatoren
- Selektion der Wellenlänge
- **SLS Strategie**
- **SLS** Komponenten
- **SLS** Beamlines
- SLS Injektionsregion
- **SLS Tunnel**
- **SLS** Girder
- Linac 100 MeV
- **SLS Linac**
- **SLS** Booster
- Vorteile SLS Booster
- Lebensdauer Strahlstrom vs. Top-up
- **Booster Standard Zelle**
- **Booster Magnet BD**
- **Booster Synchrotron**
- Auflistung Komponenten SLS
- SLS Komponenten Beschleuniger und Strahllinien
- SLS Gebäude
- Stabile Temperatur im Tunnel des Speicherrings
- Energieverlust durch Synchrotronstrahlung
- SLS Kavität





Einzigartige Spezialität des PSI:

3 fundamentale Sonden für Material Forschung

Müonen (µSR)

=> interne Magnetfelder in Kristallen

Neutronen (SINQ)

=> Atomkerne

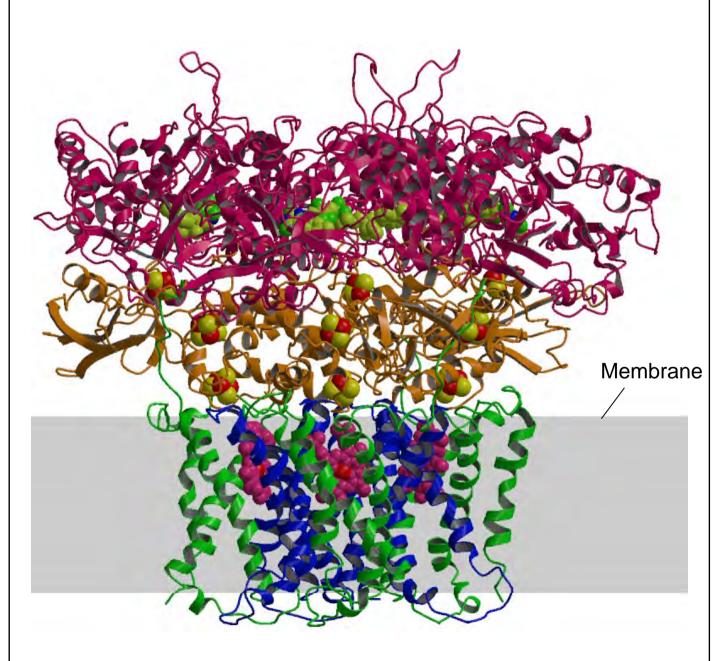
Photonen (SLS)

=> Elektronenhülle





Protein Kristallographie



Succinat-Dehydrogenase, auch Komplex II genannt, ist Teil der Atmungskette.



EM-Strahlung

Wirkt auf ein Elektron mit der Energie $E = \gamma mc^2$ eine Kraft, so sendet es elektromagnetische Wellen aus mit der Leistung

$$P \sim (F_p^2 + \gamma^2 F_s^2)$$

F_p = Kraft parallel zur Geschwindigkeit

F_s = Kraft senkrecht zur Geschwindigkeit

Beispiele:

- Elektronen werden in Antenne durch HF-Felder hin und her geschüttelt
 - => Radio/ TV/ Radar-wellen
- 2) Elektronen werden in Röntgenröhre auf ca. 70 keV beschleunigt und dann in Elektrode brüsk abgebremst
 - => Röntgenstrahlen
- Elektronen werden im Magnetfeld B durch Lorentzkraft e(v x B) abgelenkt
 - => Synchrotronstrahlung

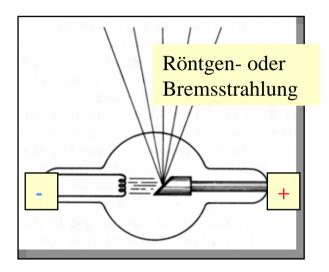
nimmt mit der Energie E = γ mc² drastisch zu



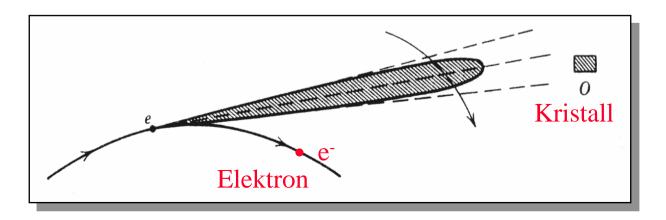


Erzeugung von Röntgenstrahlen

1. Röntgenröhre



2. Synchrotronstrahlung eines Elektrons in einem magnetischem Feld





Schnelle Elektronen im Magnetfeld erzeugen Synchrotron-Licht

Lichtquelle bewegt sich





Dopplereffekt

positive Interferenz

Verschiebung zu höheren Frequenzen

=> kleine Wellenlängen λ

enger Ausbreitungskegel

=> scharfe Bündelung (Laser-artig) Periodenlänge λ_u gibt scharfe Spektrallinien bei harmonischen n

=> hohe Brillanz

$$\lambda \sim \lambda_{\rm u} (c - v_{\rm e}) \sim n \lambda_{\rm u} / E_{\rm e}^2$$

=> kleine Wellenlänge λ braucht hohe Elektronen-Energie E_e

=> grosser Speicherring

Synchrotron Strahlung Spektrum von Bend mit Feld B

Spektraler Fluss
$$\sim \frac{E \cdot I \cdot G_1}{}$$

E = Energie, I = Strom

$$G_1(x) = x \int_{x}^{\infty} K_{5/3}(x') dx'$$

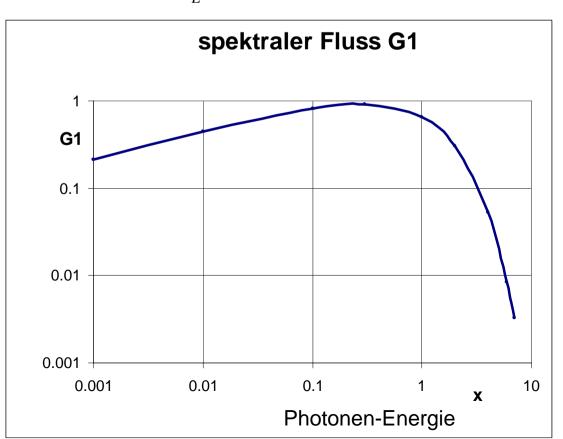
$$x \equiv \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$$
, $\varepsilon = Photon - Energie$

krit. Energie:
$$\varepsilon_c = 665 \, eV \cdot E^2 [GeV] \cdot B[T]$$
 (SLS: 5.4 keV)

$$G_1 \approx A x^{1/3} g(x)$$

$$g(x) = [(1 - (\frac{x}{x_L})^N]^{\frac{1}{S}}$$

$$A = 2.11$$
, $N = 0.848$
 $x_L = 28.17$, $S = 0.0513$







Elektromagnetisches Spektrum

	Wellenlänge λ	Energie ε
UKW (100MHz)	3m	
Radar (3GHz)	0.1m	
rotes Licht	700nm	1.8 eV
violettes Licht	400nm	3 eV
<mark>Vakuum</mark>	200nm	6 eV
Ultraviolett	4nm	300 eV
weiche Röntgenstrahlen	<mark>0.4nm</mark>	3 keV
harte Röntgenstrahlen	<mark>0.04nm</mark>	30 keV
Gammastrahlen		1-10 MeV

Synchrotron Strahlung:

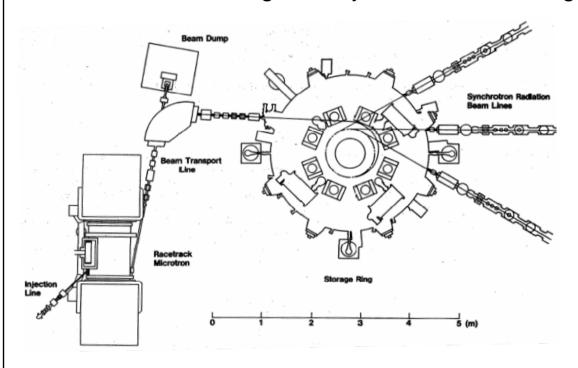
Wellenlänge λ frei wählbar

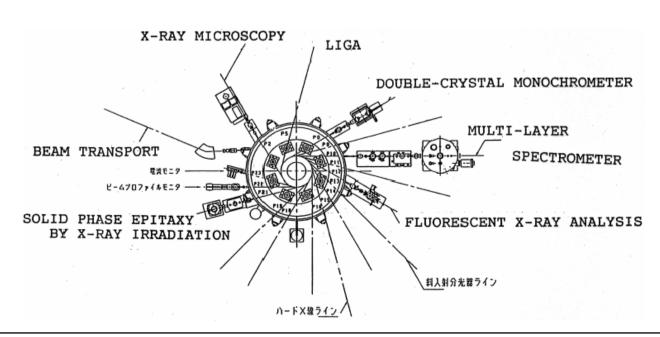
Aurora (Sumitomo, 1989)

ein sehr kompakter Speicherring , Bahnradius = 0.5m supraleitend, B = 4.3 T

E = 650 MeV (Einschuss bei 150 MeV)

kritische Wellenlänge der Synchrotron-Strahlung = 1 nm



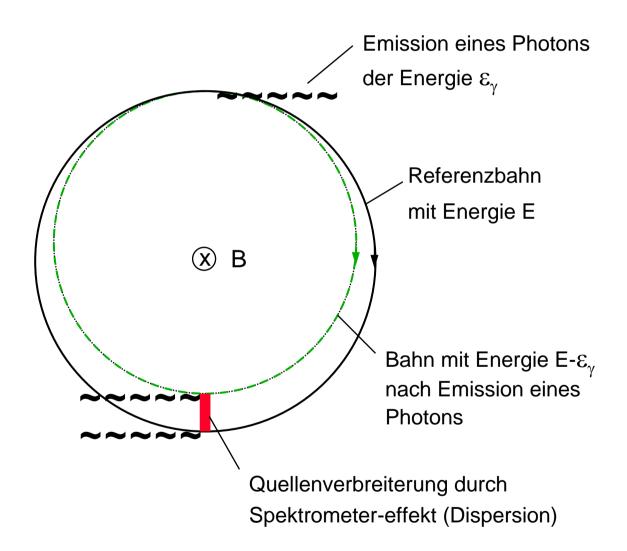




Spektrometer

Ein homogenes Magnetfeld B wirkt als Spektrometer.

Dies führt zu einer Vergrösserung der Quellengrösse der Synchrotronstrahlung (grosse Emittanz).



Rezept für Speicherring mit kleiner Strahlemittanz:

- ⇒ Baue ein Anti-Spektrometer !!
- ⇒ grosser Ring mit vielen separaten Magneten





hohe Brillanz

- Messungen an sehr kleinen Proben (Krystalle mit Kantenlänge < 20 μm)
- kleine Strahldivergenz
 - => kompakte Spiegel
 - => kleine Aberrationen
- kurze Messzeit
- höhere Kohärenz
 - => Bilder mit Phasenkontrast



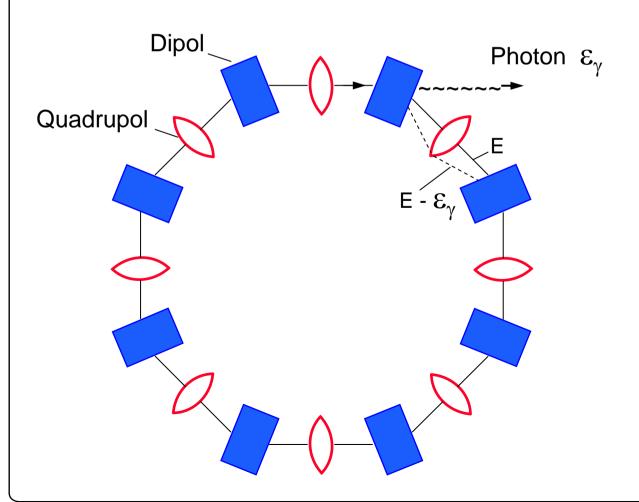
Oktagon Speicherring

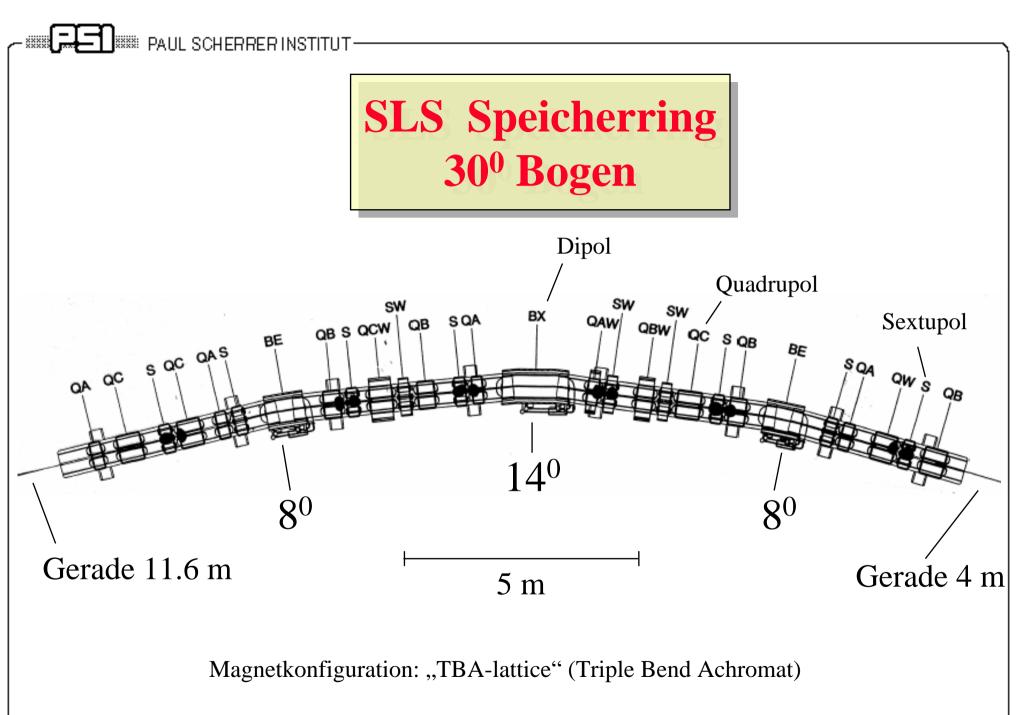
Der Speicherring als Anti-Spektrometer

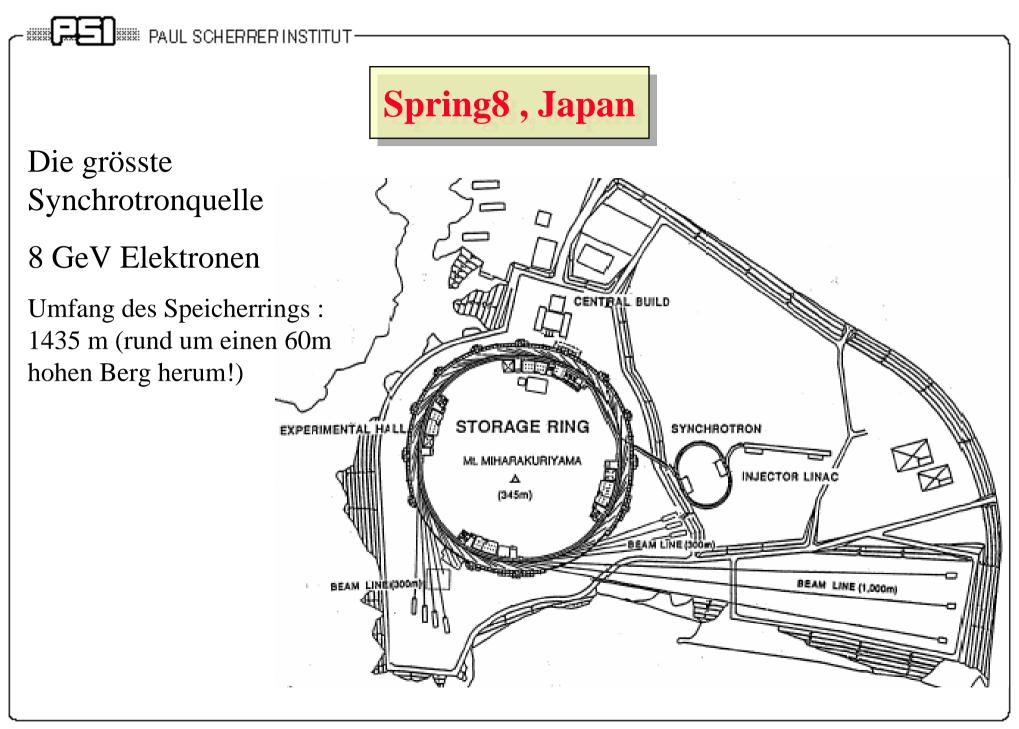
Ein Elektron, das ein Photon mit der Energie \mathcal{E}_{γ} emittiert, verliert diese Energie und wird im Dipol mehr abgelenkt (----). Die Quadrupole fokussieren dieses Elektron wieder in den nächsten Dipol zurück. Dies verbessert die Emittanz ϵ des Strahls.

$$\varepsilon \sim n^{-3}$$
 (n = Anzahl Dipole)

=> für gute Emittanz braucht es viele Dipole









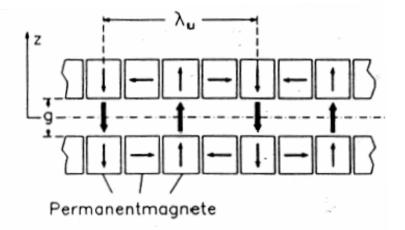
Undulatoren

Ein Undulator zwingt Elektronen auf einen Slalomkurs.

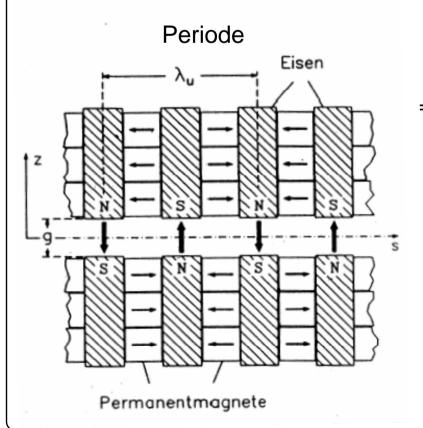
Revolution im Undulatorbau 1980:

Klaus Halbach, Berkeley, benutzt Permanentmagnete (PM)

=> ermöglicht kurze Perioden λ_u (15-60 mm)



PM-Material: SmCo₅, NdFeB ein Bleistift aus PM entspricht 15'000 Ampere-windungen !!

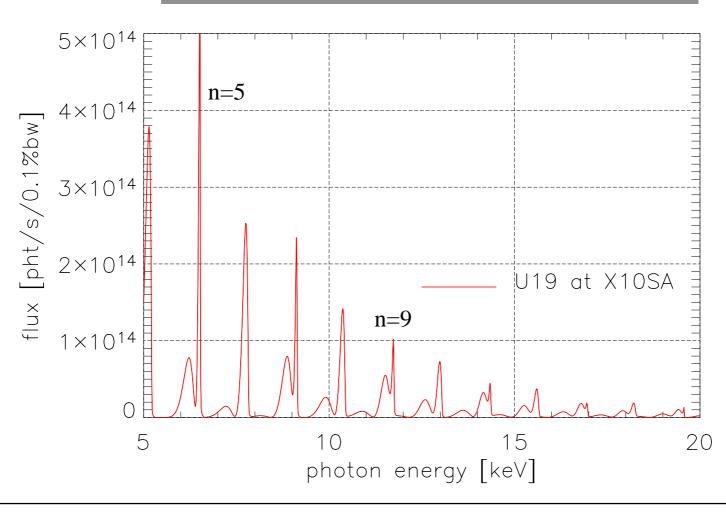


Variation des Feldes mit Magnetspalt g => variiert Wellenlänge λ

Hybrid-Undulator mit PM und Eisen



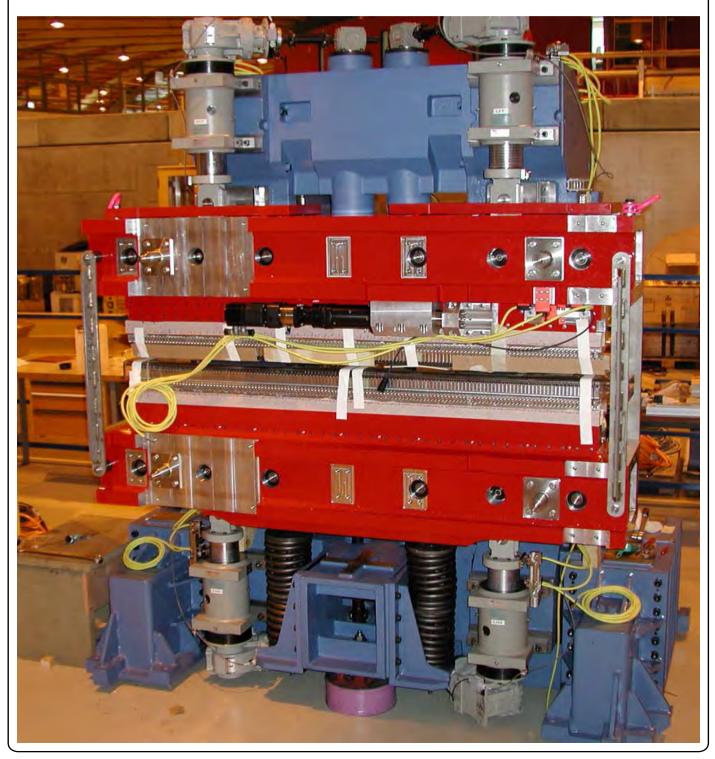
Spektrum des Undulator U19 für Protein Krystallographie





Undulator UE56

Permanent Magnete, 62 Perioden à 56 mm helikale Felder geben zirkulare und lineare Polarisation









SLS Undulatoren

1. In Vacuum Undulatoren

19mm Periode, variabler Spalt, minimum = 5mm Röntgenstrahlen von 3 bis 20 keV (13. harmonische)

2. Zwilling Undulatoren vom Typ Apple II

Periode = 56 mm, variabler Spalt flexible Polarisation (linear oder elliptisch), 90 bis 3000 eV

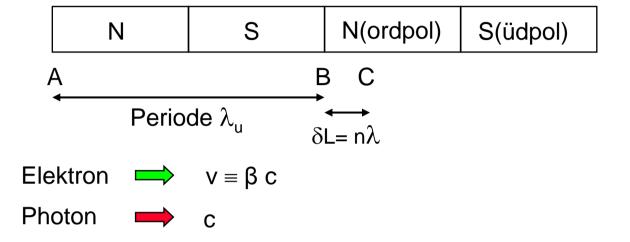
3. Electromagnetischer Zwilling Undulator UE212

212 mm Periode, 2 x 4.5 m lang, flexible Polarisation (linear oder elliptisch), 10 bis 800 eV

FE

Selektion der Wellenlänge im Undulator

Im Undulator findet ein Wettrennen zwischen dem Elektron (auf Slalomkurs) und einem emittierten Photon statt!



Bei A emittiert ein Elektron ein Photon 1 mit Wellenlänge λ und fliegt mit Geschwindigkeit $v=\beta c$ weiter nach B. Dort emittiert es ein weiteres Photon 2 mit der gleichen Wellenlänge λ . Ist das Photon 1 in diesem Moment aber bereits bei C, d.h. n Wellenlängen weiter, so gibt es eine positive Interferenz zwischen Photon 1 und 2. Damit wird diese Wellenlänge verstärkt.

$$\delta L \equiv n\lambda \approx (1-\beta)\lambda_u$$
, $1-\beta \approx \frac{1}{2\gamma^2}$

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2n\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)$$

$$K = 0.0934 \ \lambda_u[mm] \ B[T]$$

Umweg durch Slalom





SLS Strategie

Qualität

hohe Brillanz , kleine Emittanz
 viele Magnete , grosser Ring

Flexibilität

- grosser Wellenlängenbereich
- Geraden von 4m, 7m und 11m f
 ür optimale Anpassung der Undulatoren
- individuelle, digitale Speisegeräte

Stabilität

- Trennung der Gebäudehülle vom Boden
- stabile Temperatur im Tunnel und in der Halle
- Girder Konzept für Speicherring
- Regelung der Strahlposition ,
 schnell (bis 100Hz) und genau (< 0.5 μm)
- Konstanter Strahlstrom durch top-up Injektion (konstante Wärmelast auf optischen Komponenten)





SLS-Komponenten

Beschleuniger

Elektronenquelle 100 keV

LINAC 100 MeV

Booster , 3Hz 0.1-2.4 GeV

Speicherring, 288m 2.4 GeV

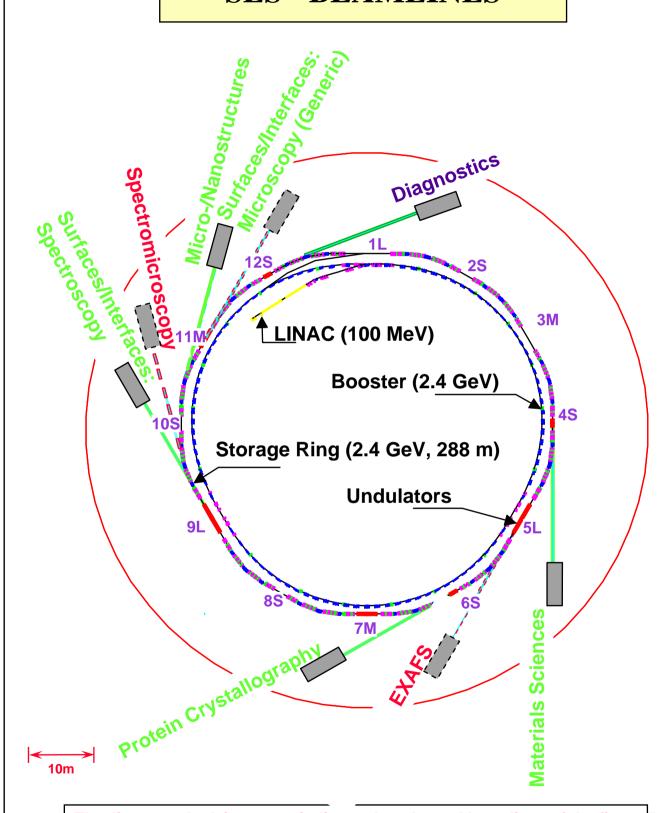
Strahl-Linien

- Protein Krystallographie
- Oberflächen-Spektroskopie
- Oberflächen-Mikroskopie
- Materialwissenschaften
- Umweltforschung



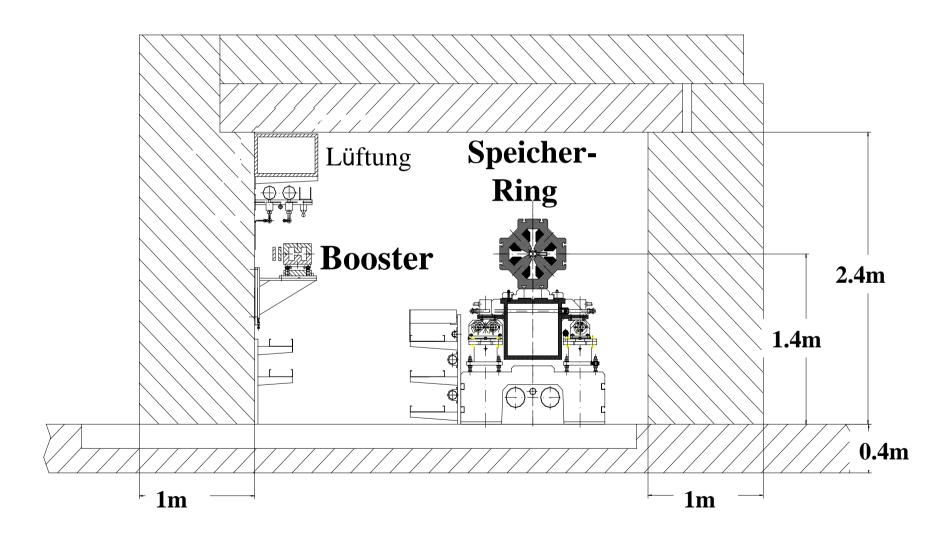


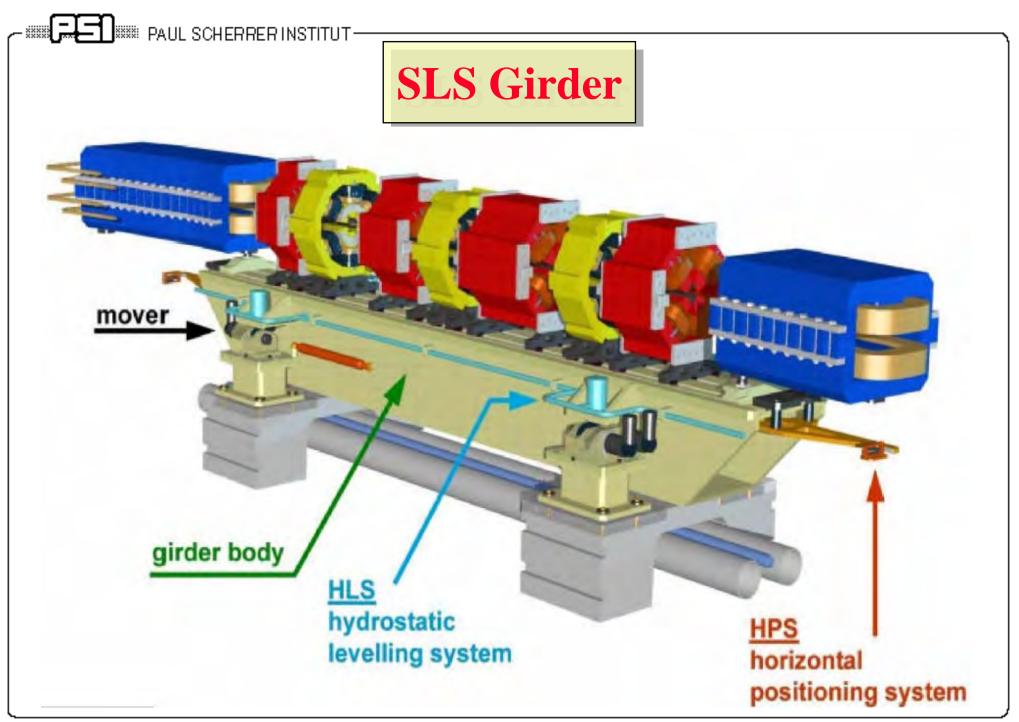
SLS - BEAMLINES



The lines marked in green indicate the planned beamlines of the first generation from "insertion devices" like wigglers, wavelength shifters or undulators and from superconducting bending magnets. The lines marked in red indicate second phase beamlines.

SLS Tunnel

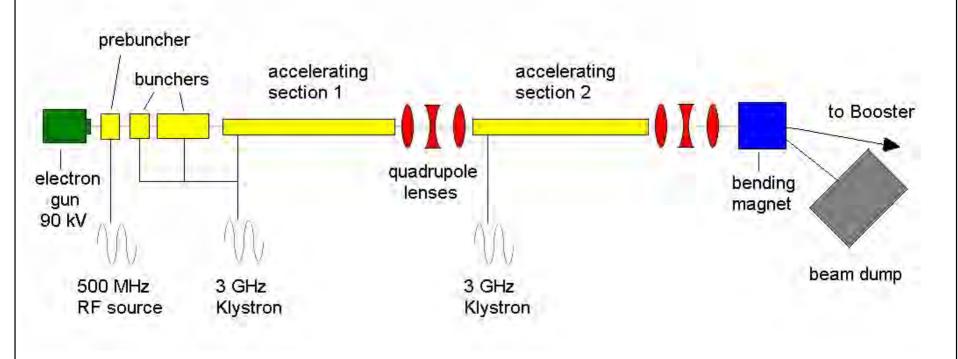






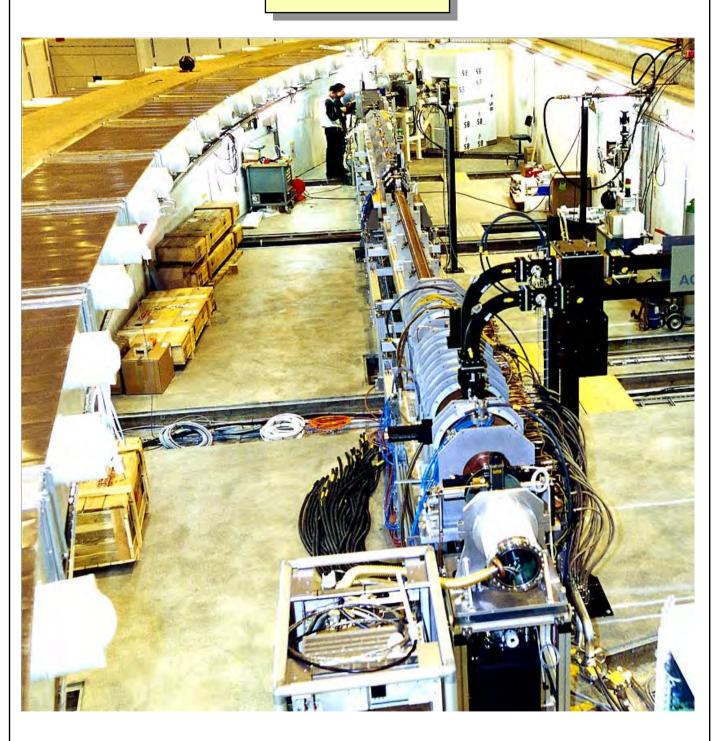


Linac 100 MeV





SLS Linac



90 keV Elektronenquelle und 100 MeV Linearbeschleuniger (11 m lang)





Was ist speziell am SLS Booster?

Booster and Speicherring sind im gleichen Tunnel



grosser Umfang (270 m) gibt Platz für "FODO lattice" mit vielen kompakten Magneten und einfacher Vakuumkammer

Vorteile:

- kleine Strahlemittanz gibt ideale top-up Injektion
- Einsparung von Kosten bei Gebäude, Abschirmung und Betrieb
- Platz für 3 dispersionslose Geraden (RF Kavität, Injektion vom Linac)
- einfache Transferlinie zwischen Booster and Speicherring



SLS Booster, Vorteile

sehr gute Strahlqualität

effiziente Injektion in den Speicherring, komplettes Füllen des Speicherrings mit 3 Hz dauert ca. 12 min.

kompakte Magnete

- kleiner Leistungsverbrauch (< 200 kW)
- einfache Vakuumkammer (30·20 mm)

Top-up Injektion

kontinuierliches Nachfüllen alle 2 min. hält den Strahlstrom konstant auf ± 1.5 •10⁻³



Lebensdauer vs. top-up

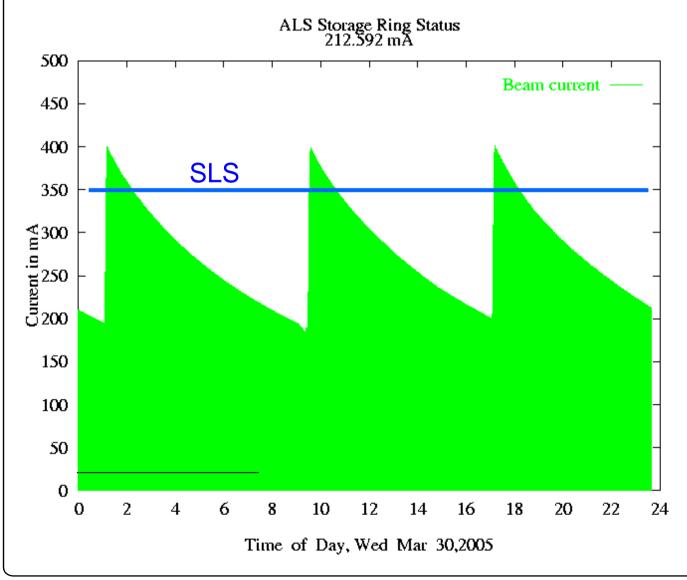
Vergleich ALS – SLS:

ALS (Berkeley, Kalifornien):

Lebensdauer ~ 10 h , Strahlstrom 400 => 200 mA SLS:

Lebensdauer ~13 h, nicht relevant!

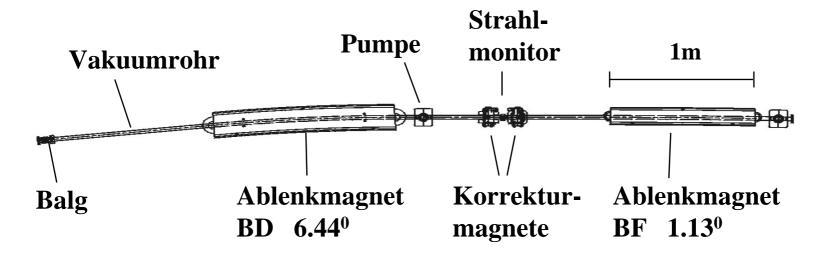
top-up alle 2 min. Strahlstrom 350-351 mA





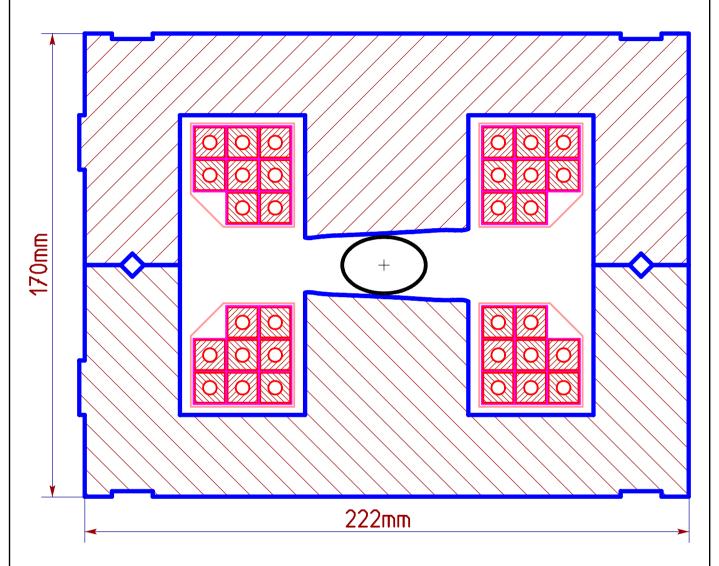


Booster Standard Zelle





Booster Magnet BD

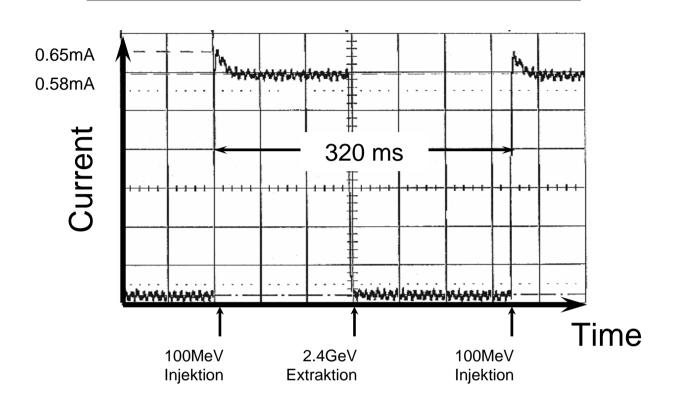


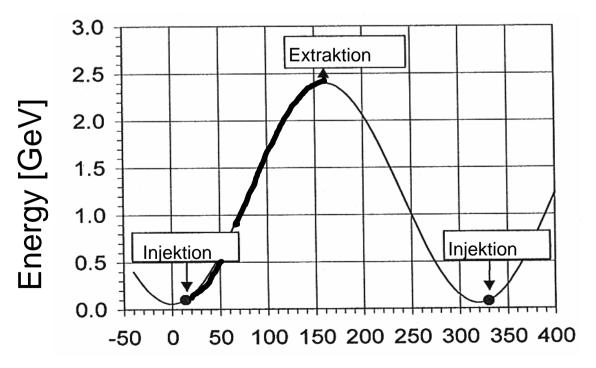
The Booster has 48 BD magnets , 1.26 m long Bending Angle = 6.441° , max. Field at 2.4 GeV = 0.714 T Vacuum Chamber = 30x20 mm





Beschleunigung der Elektronen im Booster Synchrotron





Time [ms]





Beschleuniger Anlage

- 600 Magnete
- 600 m Vakuumrohre
- 300 Vakuumpumpen
- 150 Strahlmonitore
- 5 Hochfrequenz Kavitäten
- 50 km Leistungskabel
- 500 km Signalkabel
- 2.5 MW Leistungsbedarf





SLS-Komponenten

Beschleuniger

Elektronenquelle 100 keV

LINAC 100 MeV

Booster , 3Hz 0.1-2.4 GeV

Speicherring, 288m 2.4 GeV

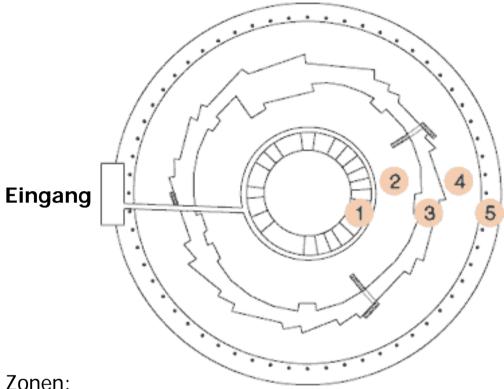
Strahl-Linien

- Protein Krystallographie
- Oberflächen-Spektroskopie
- Oberflächen-Mikroskopie
- Materialwissenschaften
- Umweltforschung





SLS Gebäude



5 Zonen:

- 1. Bürogebäude (3 Geschosse)
- 2. Technische Galerie
- 3. Tunnel (Speicherring, Linac und Booster)
- 4. Areal für Strahllinien
- 5. Aussenring (60 Säulen und Lüftungssystem)

Gebäudekonzept:

Trennung des Ringfundaments von Gebäudehülle

- Die Zonen 3 und 4 besitzen ein separates 40 cm dickes Ringfundament, das vom Boden der Zonen 2 und 5 (20 cm dick) durch eine 3 cm dicke Fuge getrennt ist.
- sehr stabile Temperaturen im Tunnel und in der Halle
- => stabile Bedingungen für den Elektronenstrahl und die Strahllinien





stabile Temperatur im Tunnel des Speicherrings

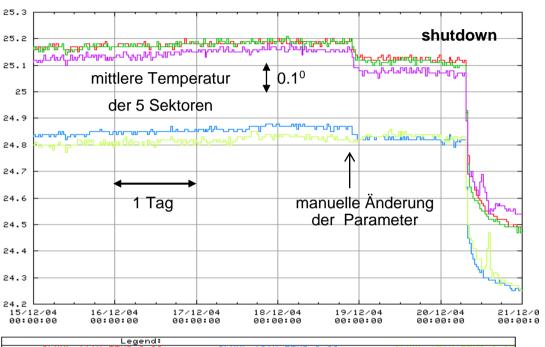
- => sehr wichtig für stabile Strahlen!
- Luftzirkulation mit 5 Anlagen à 6'000 m³/h
- 150 Düsen erzeugen eine schraubenförmige Strömung mit guter Durchmischung der Luft; Elimination von heissen Stellen.
- Temperaturstabilität : $25^0 \pm 0.05^0$
- Anlage "ein": Kühlleistung 40 kW
 Anlage "aus": Heizleistung 90 kW
- Strategie: kleine Temperaturdifferenz zwischen Tunnel und Halle



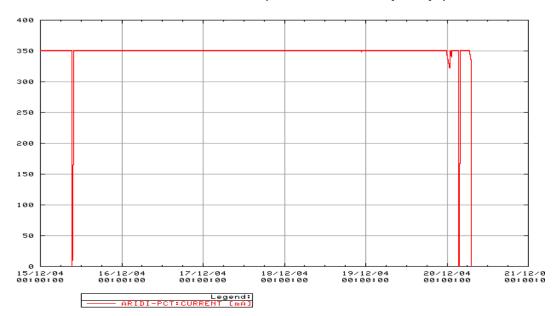


Stabilität der Tunnel Temperatur

Letzte Betriebswoche im 2004



Strahlstrom (350 mA top up)





Energieverlust durch Synchrotronstrahlung

In einem homogenem Magnetfeld B wird ein Elektron mit hoher Energie $E = \gamma \, mc^2$ (Impuls p = E/c) wird durch die Lorentzkraft $F_L = e \, c \, B$ auf einer Kreisbahn mit Radius ρ gehalten. Dabei gilt:

$$p = e B \rho$$

Auf dieser Kreisbahn verliert das Elektron durch die Synchrotronstrahlung Energie mit der Rate:

$$P_{EM} \sim \gamma^2 F_L^2 \sim \frac{E^4}{\rho^2}$$

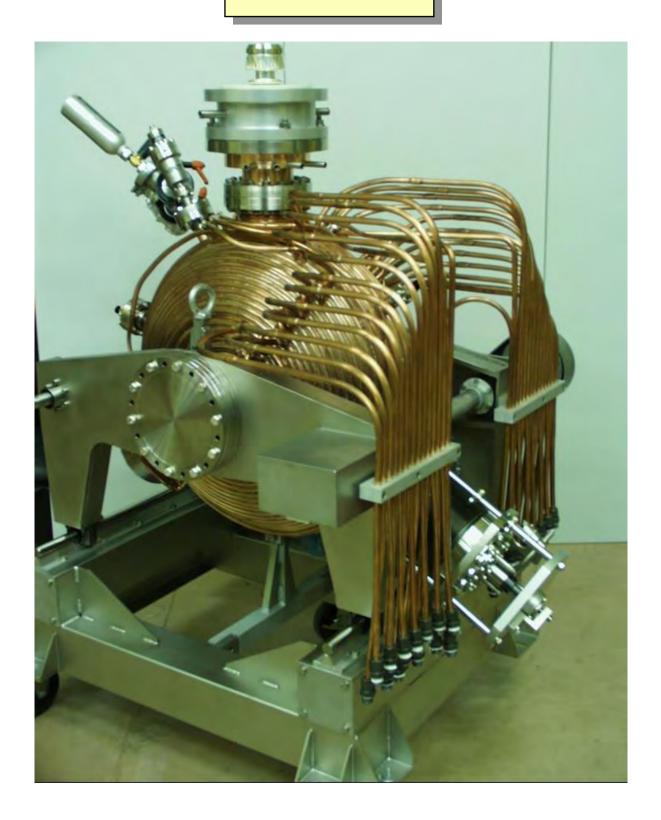
Pro Umlauf gibt dies einen Energieverlust von:

$$\frac{dE}{dn} = 88 \, keV \, \frac{E^4 \, [GeV]}{\rho \, [m]}$$

Der Energieverlust nimmt mit der Energie dramatisch zu und limitiert damit den Einsatz von Kreisbeschleunigern und Speicherringen bei sehr hohen Energien.



SLS Kavität



4 Kavitäten im Speicherring, 1 Kavität im Booster 500 MHz, 600 kV Spannung, 55 kW Verlustleistung



Energieverlust durch Synchrotronstrahlung

Beispiele für Elektronen-Speicherringe:

1. Aurora (E = 0.65 MeV, Umfang = 3.14 m)

$$B\rho$$
 = E/0.3 = 2.15 Tm , B = 4.3 T , $\,\rho$ = 0.5m , ϵ_c = 1.2 keV
$$dE/dn = 31~keV/Umlauf$$

2. SLS (E =2.4 GeV, Umfang = 270 m)

$$B\rho$$
 = 8 Tm , B = 1.4 T , ρ = 5.7 m , ϵ_c = 5.4 keV
$$dE/dn = 580 \; keV/Umlauf$$

3. LEP II, CERN (E = 105 GeV, Umfang = 26 km)

$$B\rho$$
 = 350 Tm , B = 0.113T , ρ = 3.1 km , ϵ_c = 830 keV

dE/dn = 3.5 GeV/Umlauf (= 3.3 %/Umlauf!)

=> Energielimite für Kreisbeschleuniger durch Synchrotronstrahlung, da Verlust ~ E⁴; höhere Energien für Elektronen nur mit Linac's