

Einführung Teilchenbeschleuniger

M.Seidel

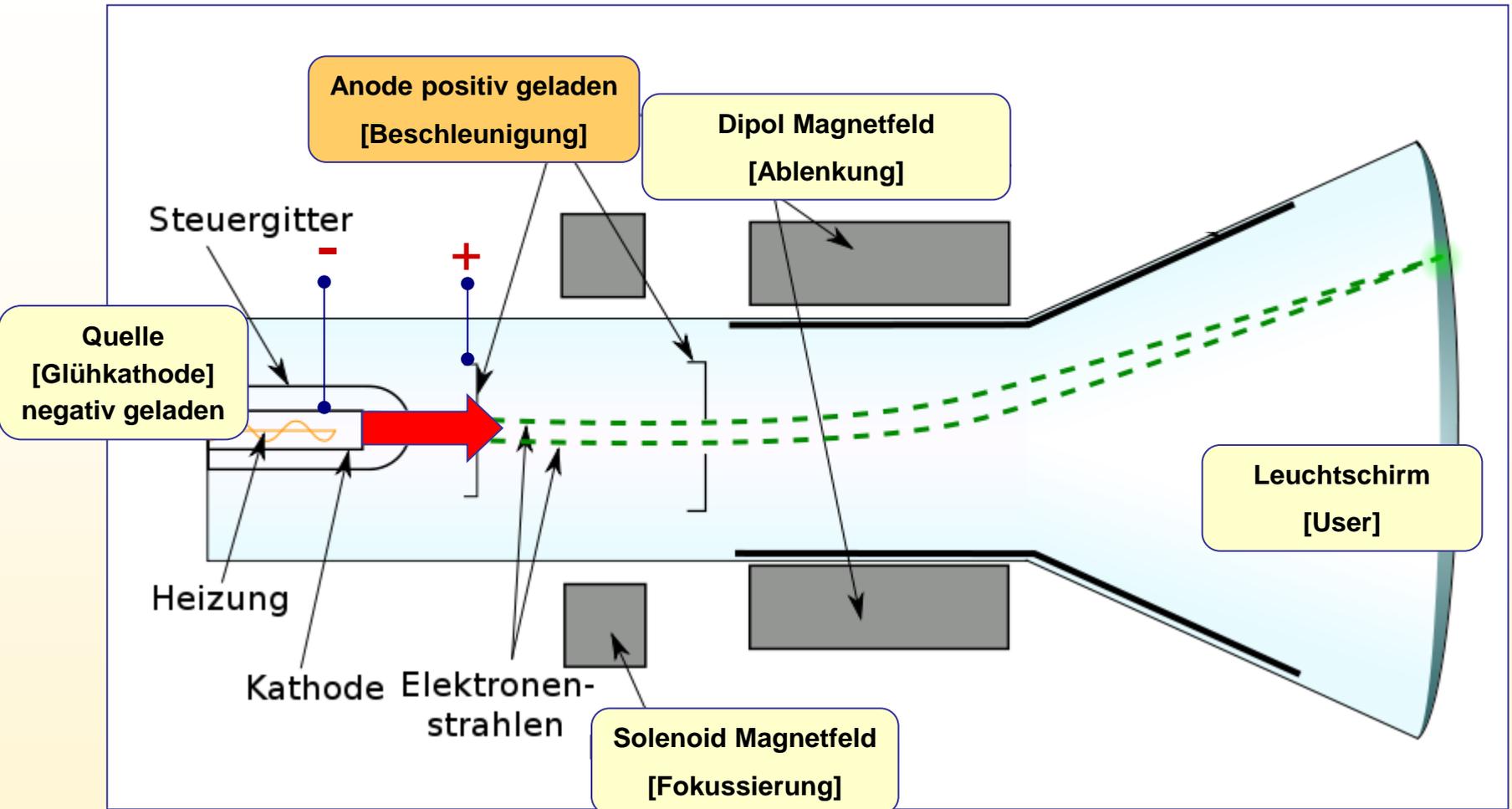
Fachbereich Grossforschungsanlagen, PSI

26.5. 2015

Themen zum Beschleuniger

- **Physikalische Grundlagen**
[Bildröhre, Lorentzkraft, relativistische Beziehungen, Synchrotronstrahlung]
- **Beschleuniger Konzepte**
[Magnete, Beschleunigungsstrukturen, resonante Beschleunigung, Synchrotron, starke Fokussierung]
- **Beispiele von Beschleunigern**
[berühmte Collider, Linearbeschleuniger, Kreisbeschleuniger]
- **Die PSI Beschleuniger**
[Protonenbeschleuniger, SLS]
- **Der Physiker im Umfeld von Beschleunigern**

Eine Bildröhre ist ein kleiner Teilchenbeschleuniger



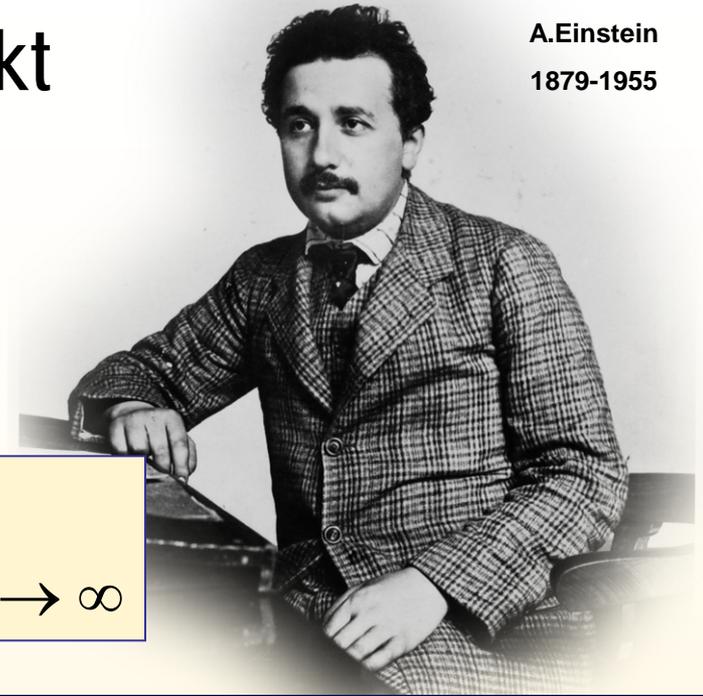
typisch: $U = 20 \text{ kV} \rightarrow E_k = e \times U = 20 \text{ keV} \rightarrow v = 0.27 \times c$

► Elektronen erreichen 27% der Lichtgeschwindigkeit!

Grundlagen – relativistischer Effekt

A.Einstein

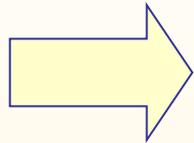
1879-1955



relativistische
Energie-Impuls
Beziehung:

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + c^2 p^2}$$

$$c^2 \vec{p} = E \vec{v}$$



$$v = c \sqrt{1 - m_0^2 c^4 / E^2}$$

$$\vec{p} = m_0 \frac{E}{m_0 c^2} \vec{v}$$

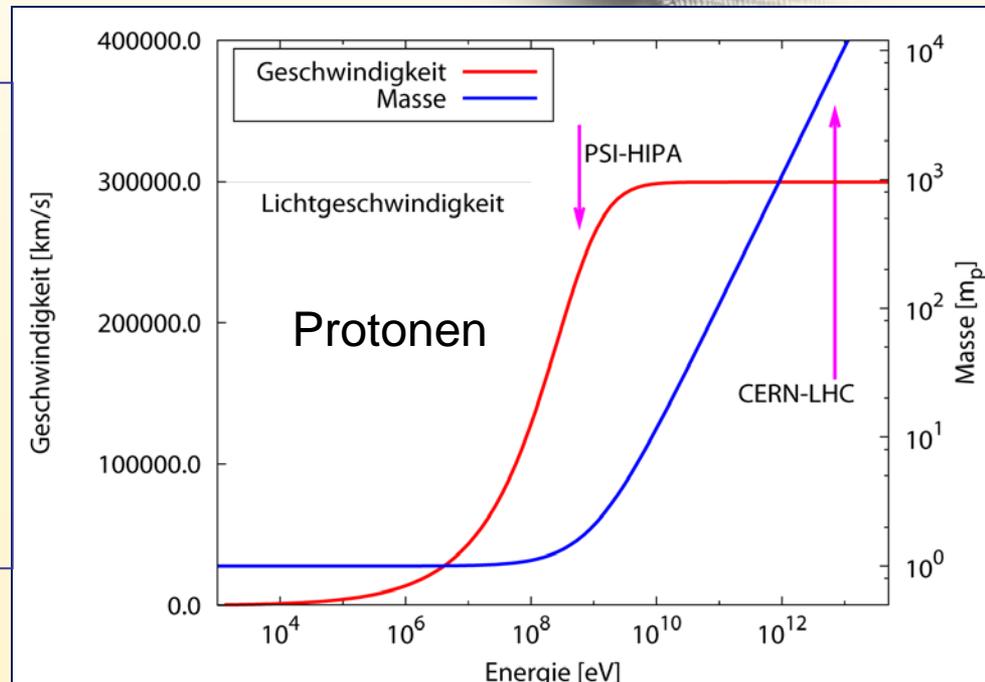
$$E \rightarrow \infty:$$

$$v \rightarrow c; m_{\text{eff}} \rightarrow \infty$$

- beschleunigte Teilchen werden nicht schneller als c
- dafür nimmt die effektive Masse zu
- Beispiel:

LHC: $E=7 \text{ TeV}$, $m_{\text{eff}} \approx 7400 \times m_0$ [Protonen]

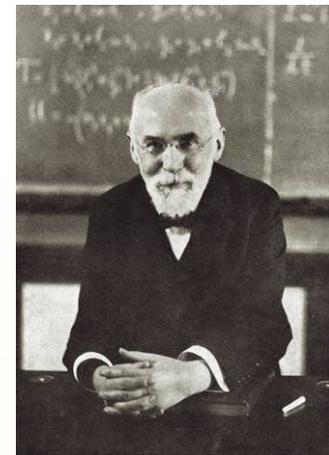
SLS: $E=2.4 \text{ GeV}$, $m_{\text{eff}} \approx 4700 \times m_0$ [Elektronen]



Grundlagen: Lorentzkraft

H.A.Lorentz

1853-1928



$$\vec{F} = e\vec{E} + e\vec{v} \times \vec{B}$$

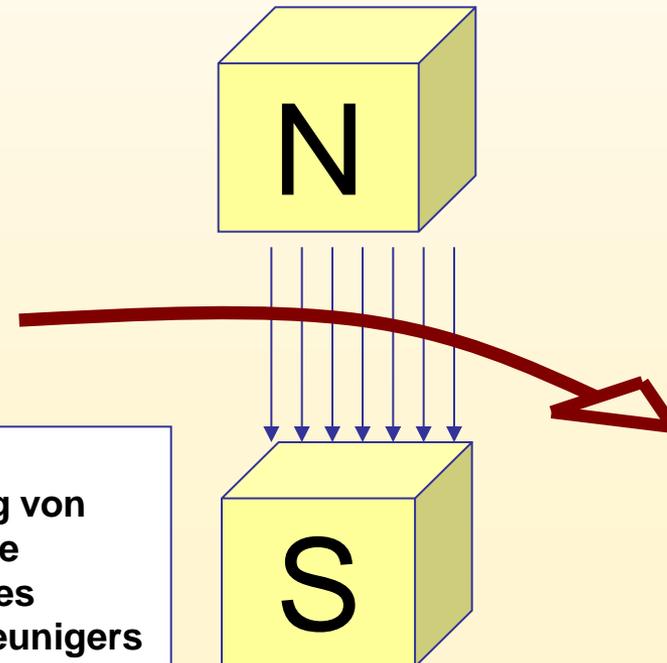
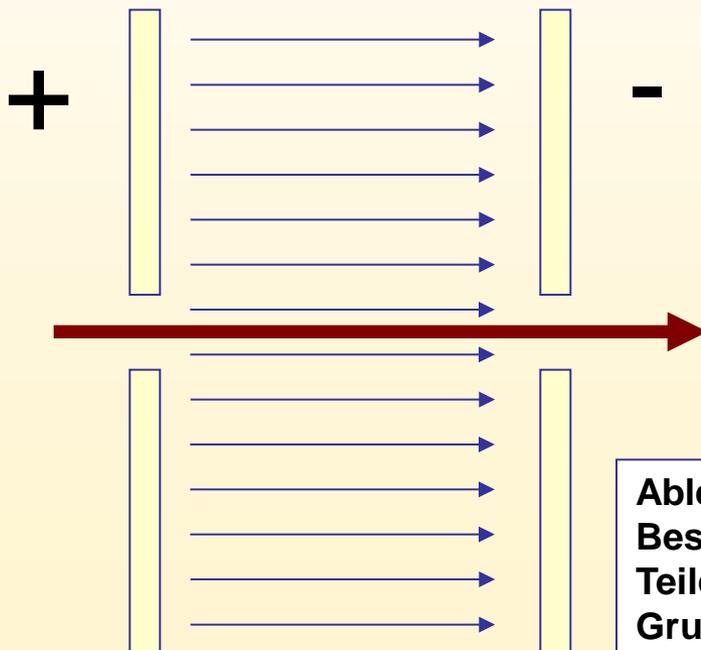


elektrisches Feld:

Energiegewinn; $\Delta E_k = eU$

magnetisches Feld:

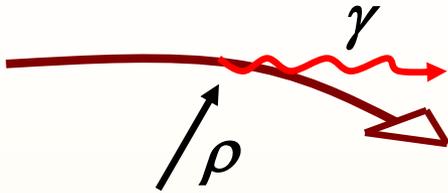
Ablenkung; $\Delta E_k = 0$, $B\rho = p/e$



Ablenkung und Beschleunigung von Teilchen sind die Grundlagen jedes Teilchenbeschleunigers

Grundlagen: Synchrotronstrahlung

[der Unterschied zwischen Elektronen und Protonen ...]



beschleunigte geladene Teilchen
senden Strahlung aus
in Vorwärtsrichtung



A.M.Lienard
1869-1958

$$P_\gamma = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0} \times \frac{E^4}{E_0^4 \rho^2}$$

abgestrahlte
Leistung

Teilchenenergie

Ruheenergie
(Masse)

Ablenkradius

- ▶ abgestrahlte Leistung $\propto E_0^{-4}$!
d.h. **der Faktor zwischen e und p ist 10^{13}** → grosse Auswirkungen
- ▶ Elektronen: die Energie der Strahlung liegt im Röntgenbereich, d.h. sie ist vielfältig praktisch nutzbar [Synchrotronlichtquellen]

$$E_c [\text{keV}] = 2.2 \frac{E^3 [\text{GeV}]}{\rho^2 [m]}$$

Energie der
Strahlung



Nächste Folien:

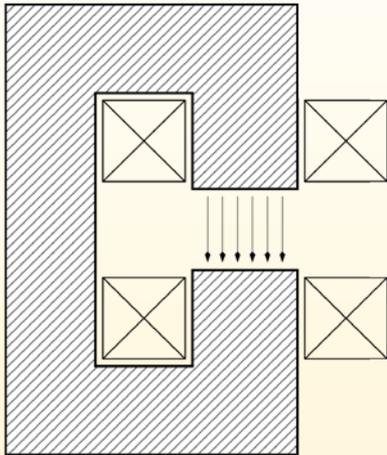
ausgewählte Beschleunigerkonzepte

[Magnete, Beschleunigungsstrukturen,
resonante Beschleunigung, Synchrotron, starke Fokussierung]

Komponenten: Magnete im Beschleuniger

Dipol

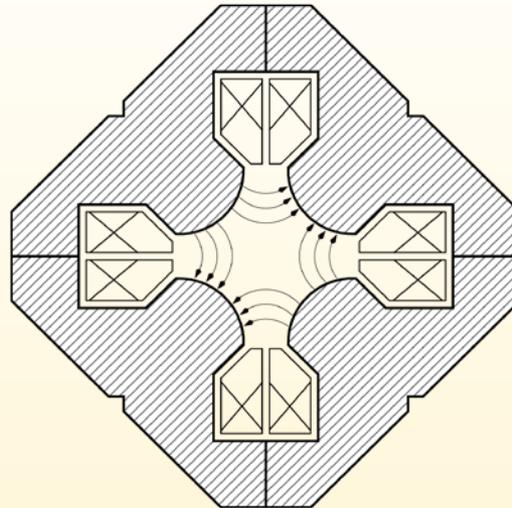
[Ablenkung, festes $B=b_0$]



$$d^2x/ds^2 = \pm 1/\rho$$

Quadrupol

[Fokussierung, $B=b_1 \cdot x$]

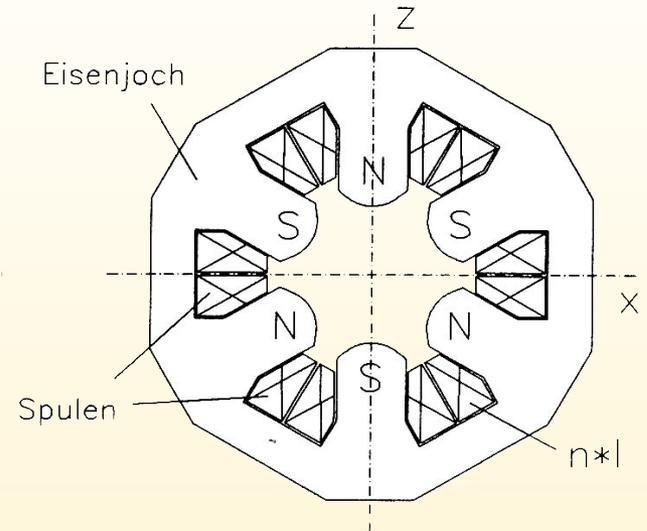


$$d^2x/ds^2 = \pm K \cdot x$$

“ortsabhängiger Dipol”

Sextupol

[chromatische Korrekturen, $B=b_2 \cdot x^2$]



$$d^2x/ds^2 = \pm K' \cdot x^2$$

“ortsabhängiger Quadrupol”

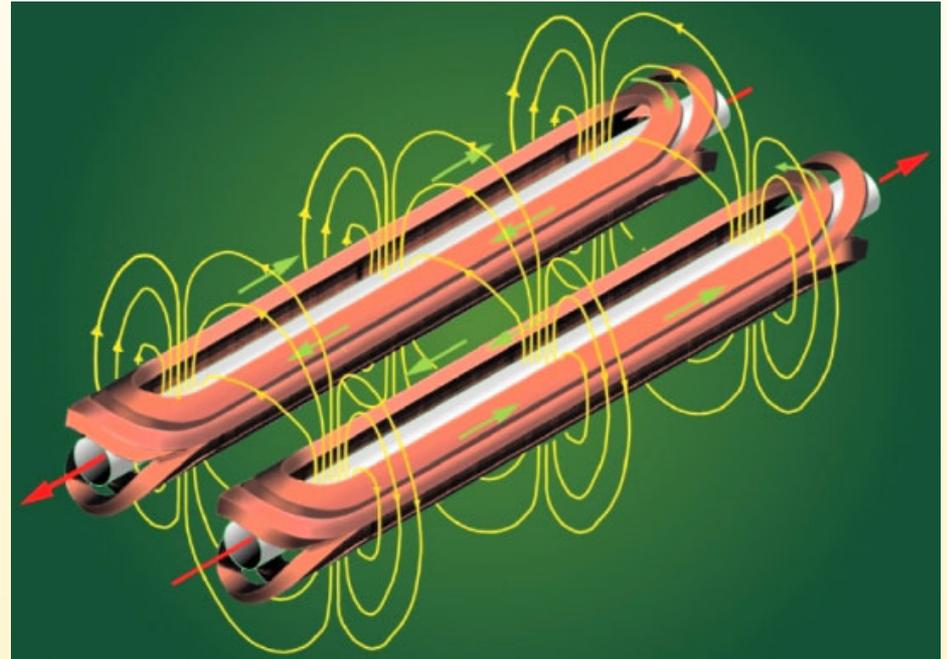
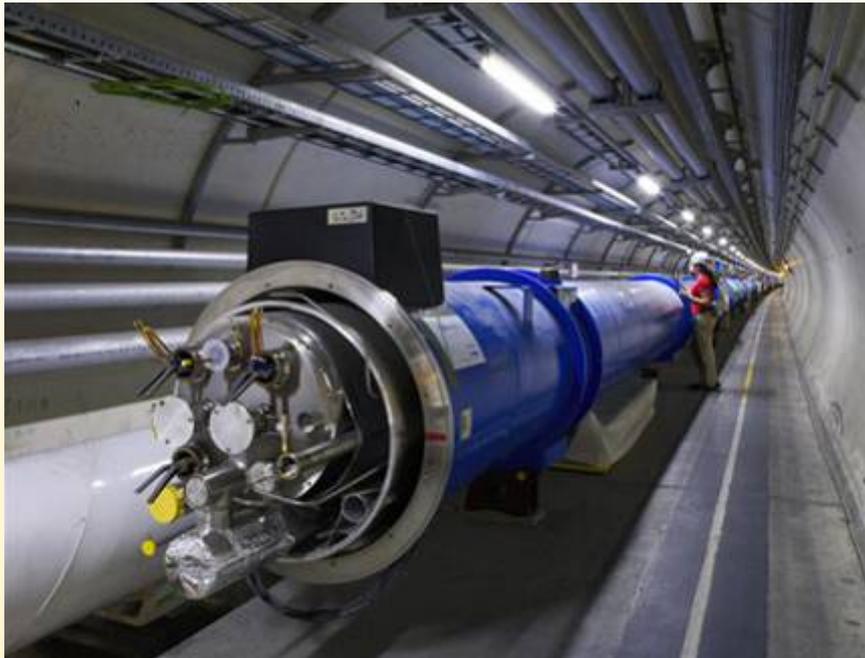
Zahlenbeispiel Dipolfeld:

PSI-HIPA, Eisendipol: 2Tesla, $E_k=590\text{MeV}$, $\rho=2\text{m}$

Komponenten: LHC supraleitender Dipol

[vorläufiger Höhepunkt der Magnetentwicklung]

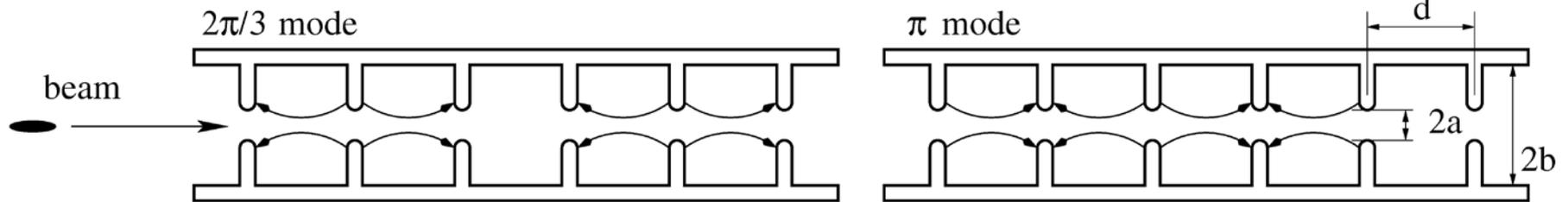
- ▶ 1232 Dipolmagnete, 2 parallele Magnete pro Kryostat
- ▶ $B = 8.33 \text{ Tesla @ } 7 \text{ TeV} \rightarrow \rho = 2800\text{m}$
- ▶ Temperatur 1.9 K, diverse Korrekturspulen



Beschleunigungsresonatoren

gekoppelte Resonatoren “Disk loaded Waveguide”

= LINAC Struktur



NLC / Stanford Struktur

Parameter:

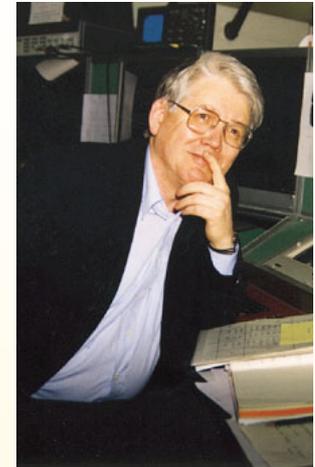
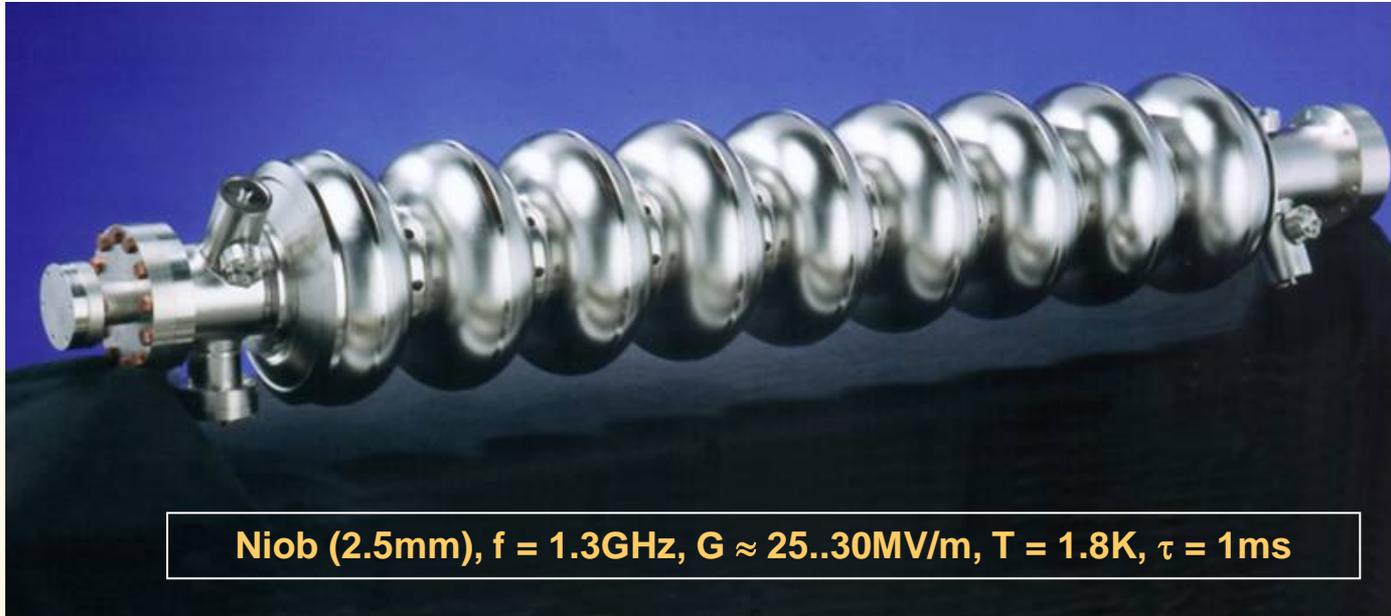
Länge: $l = 60 \text{ cm}$

Frequenz: $f = 11.424 \text{ GHz}$ (X-Band)

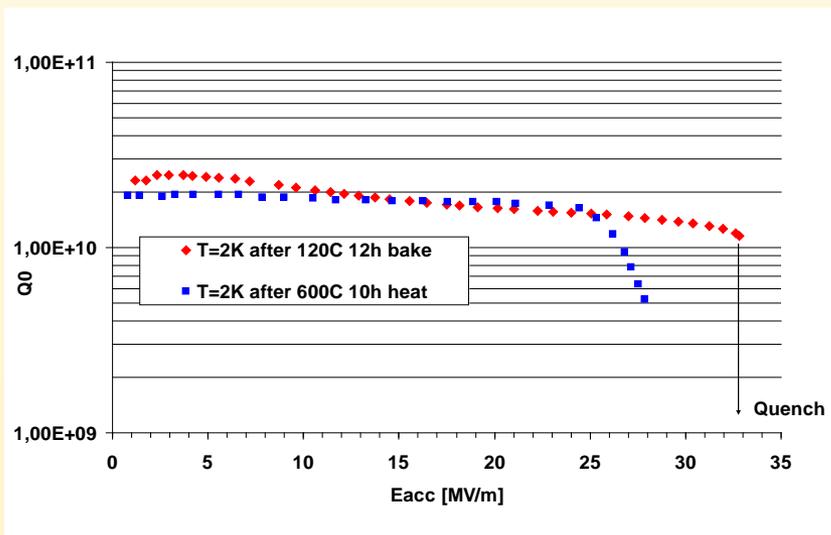
max. Gradient: $G = 75 \text{ MV/m}$ (!)

Pulslänge: $\tau \approx 500 \text{ ns}$

Komponenten: supraleitender Resonator (TESLA collaboration)



B.H.Wiik
[1937-1999]
ehem. Direktor
DESY Hamburg



Signifikante Entwicklung seit CEBAF mit <10MeV/m, ~1990

Zahlenbeispiel:
Gütefaktor $Q_0 = 2 \cdot 10^{10}$ @ 1.3 GHz
entspricht 1 Jahr Kirchenglocke @ 500Hz !!!

Resonante Beschleunigung: Zyklotron

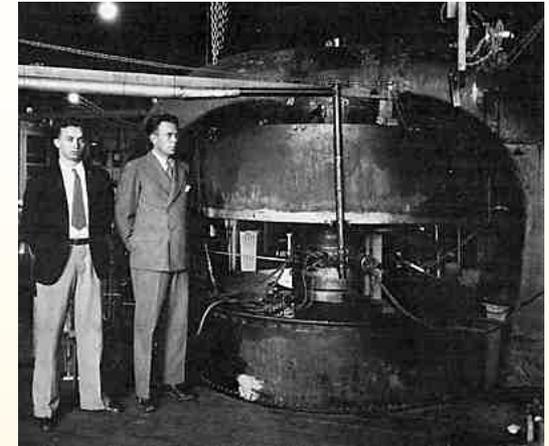


erstes Zyklotron 1931

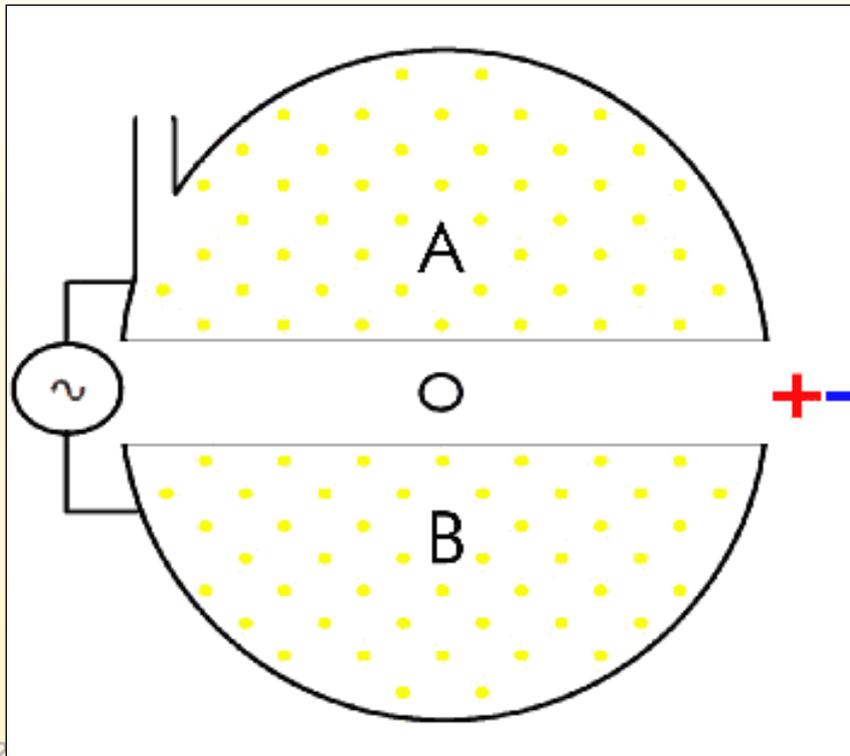
Zahlenbeispiel:

Spannung: 1kV

Finale Energie: 80keV



[Lawrence & Livingston,
27inch Zyklotron]

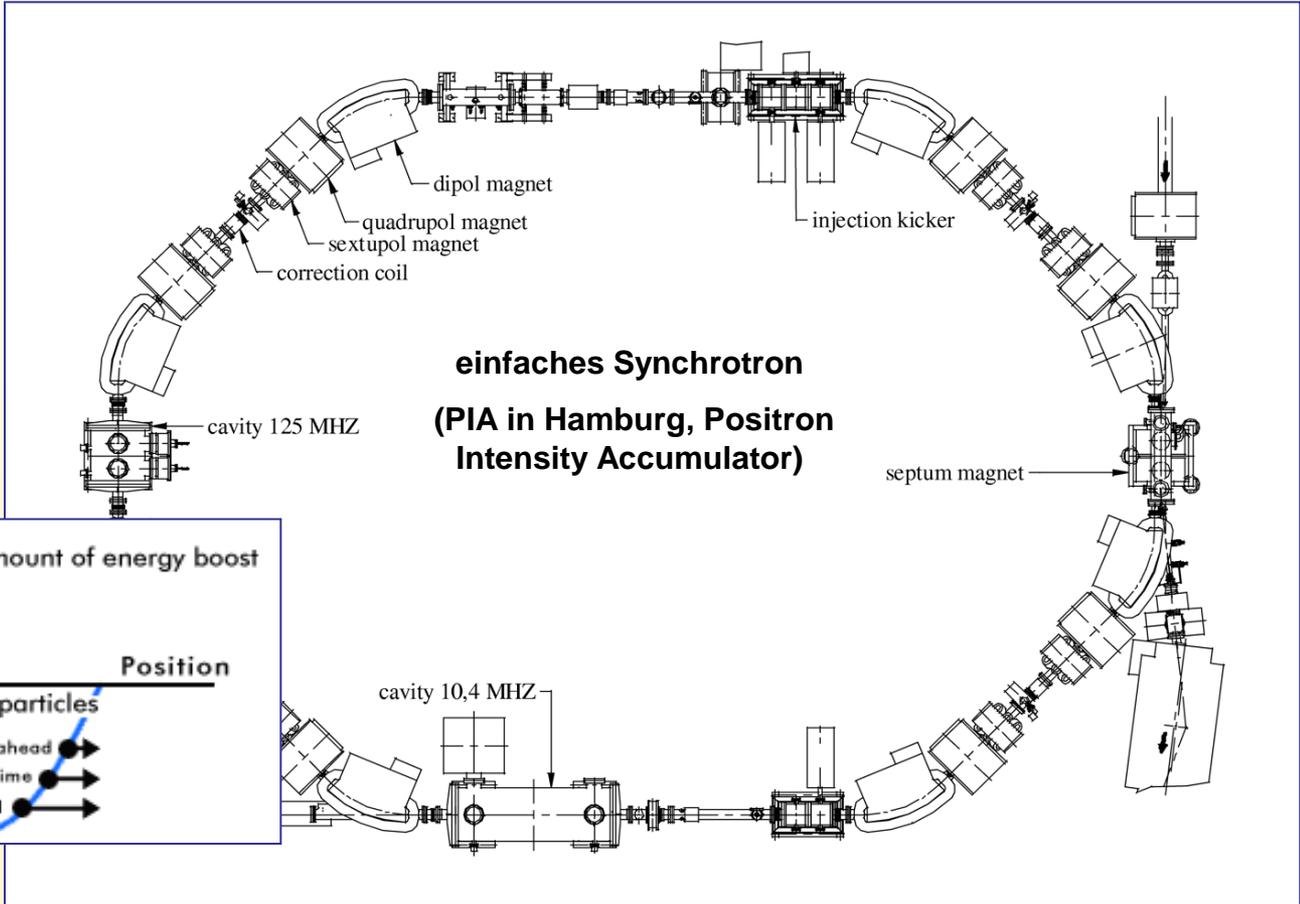
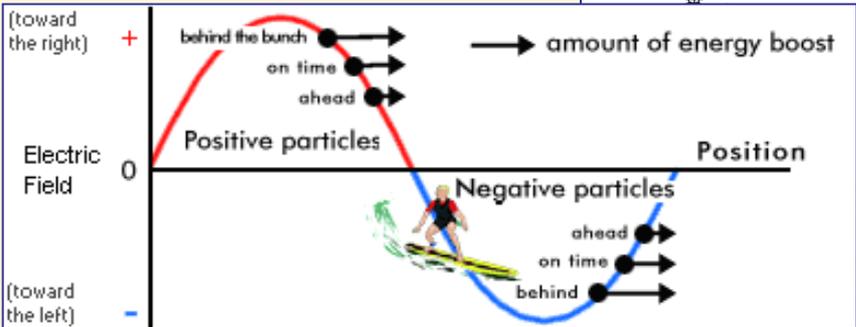


Prinzip: HF-Wechselspannung,
mehrfache Anwendung der
Beschleunigungsspannung

Synchrotron

- ▶ McMillan (USA) Veksler (UdSSR) unabhängig in 1945
- ▶ Konzept der Phasenstabilität (longitudinal Fokussierung) und alternierende Gradienten (transversale Fokussierung, siehe nächste Seite)
- ▶ Magnete „rampen“ mit der Teilchenenergie

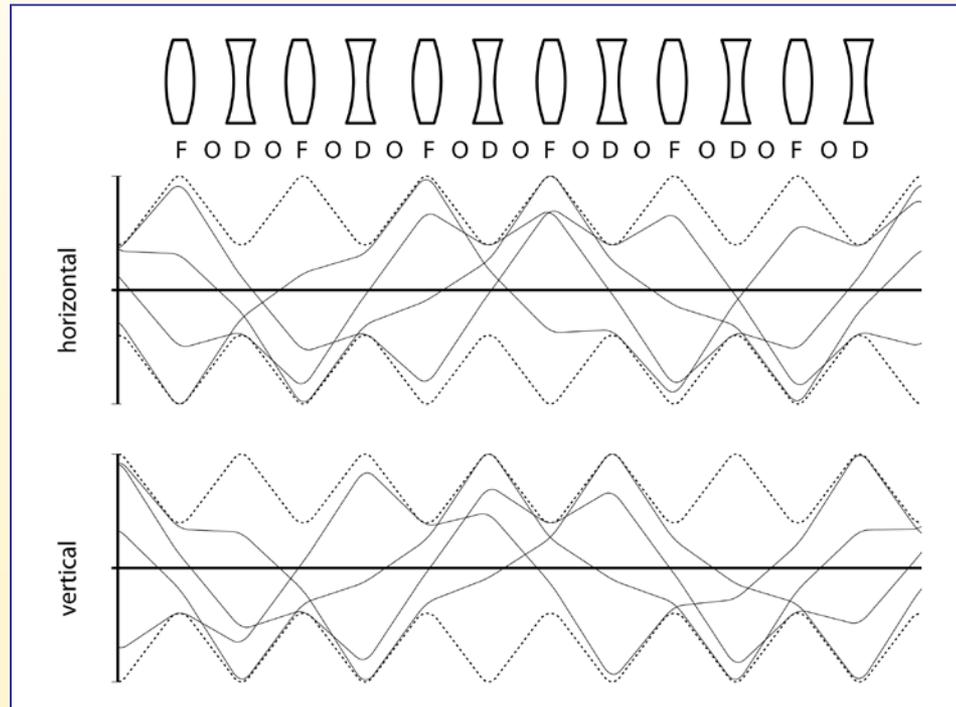
Phasenstabilität:
 „surfen auf der HF-Welle“



Prinzip der starken Fokussierung durch alternierende Quadrupole

- ▶ erste Theorie durch Courant und Snyder [1958]
- ▶ Strahlgrösse wird wesentlich kleiner / unabhängig von der Beschleunigergrösse
 - Magnete mit kleinerer Öffnung (Apertur)
 - günstiger, kompakter, erlauben grosse Beschleuniger
- ▶ alle grossen Beschleuniger verwenden das Konzept heute: LHC, TEVATRON, HERA, PETRA III, SLS etc.

Trajektorien in einem
“FODO lattice”



Theory of the Alternating-Gradient Synchrotron^{*†}

E. D. COURANT AND H. S. SNYDER

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

The equations of motion of the particles in a synchrotron in which the field gradient index

$$n = -(r/B)\partial B/\partial r$$

varies along the equilibrium orbit are examined on the basis of the linear approximation. It is shown that if n alternates rapidly between large positive and large negative values, the stability of both radial and vertical oscillations can be greatly increased compared to conventional accelerators in which n is azimuthally constant and must lie between 0 and 1. Thus aperture requirements are reduced. For practical designs, the improvement is limited by the effects of

A grayscale photograph of a control room. In the foreground, a curved desk is equipped with several computer monitors, keyboards, and mice. A person is seated at the desk on the right side, looking towards the monitors. The background features a wall with several large monitors displaying data and charts. The overall scene is dimly lit, with the primary light source being the screens.

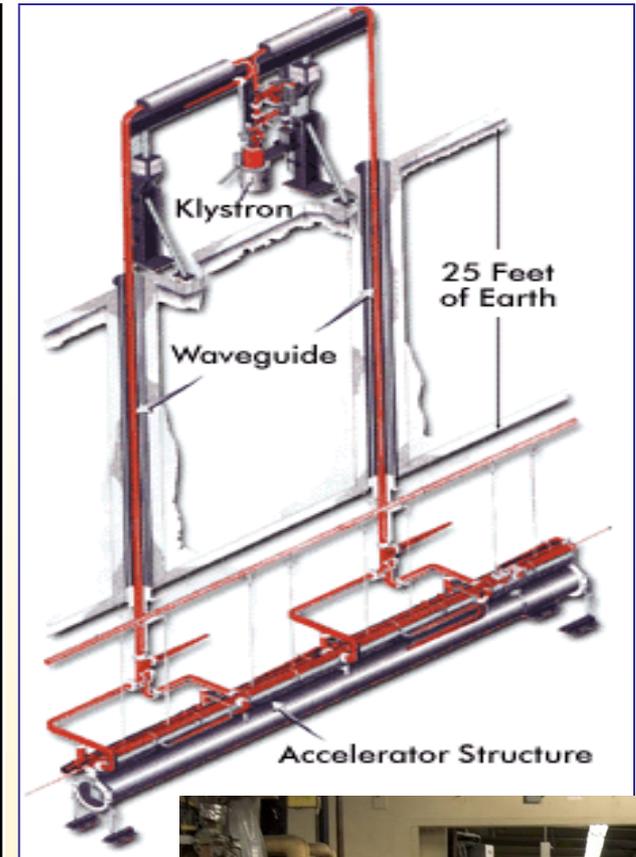
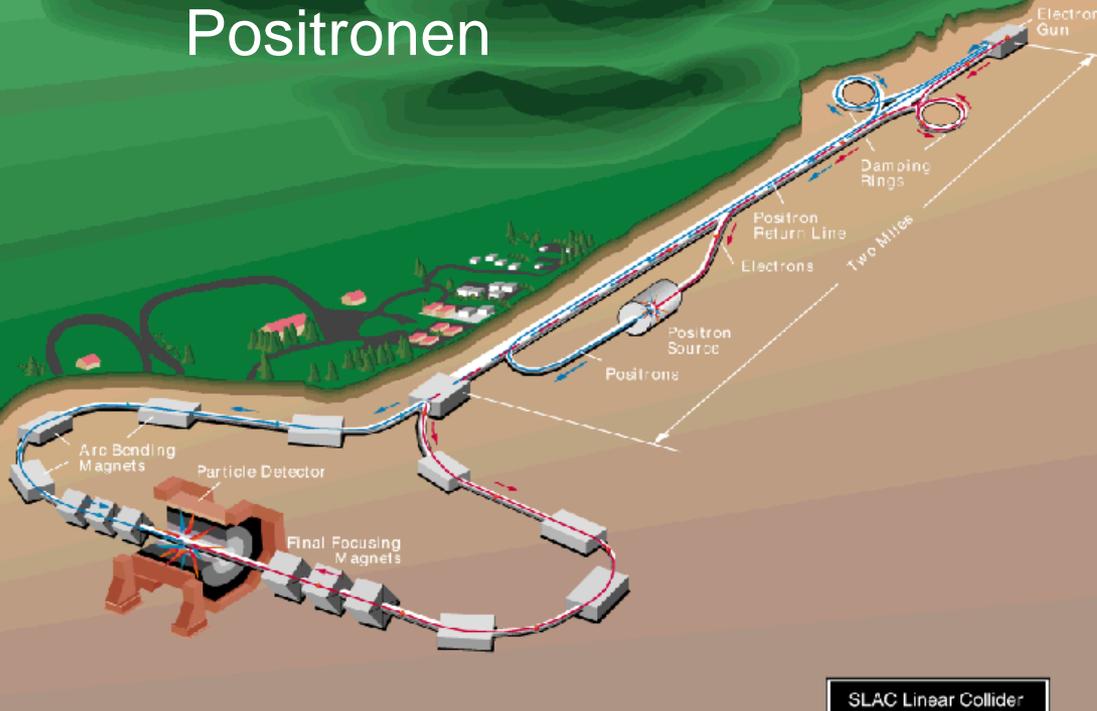
Nächste Folien:

Auswahl "berühmter" Beschleuniger für Teilchenphysik

[Stanford Linear Collider, CERN - Large Hadron Collider]

Stanford Linear Accelerator Center (SLC, bis 1997)

Elektronen gegen
Positronen

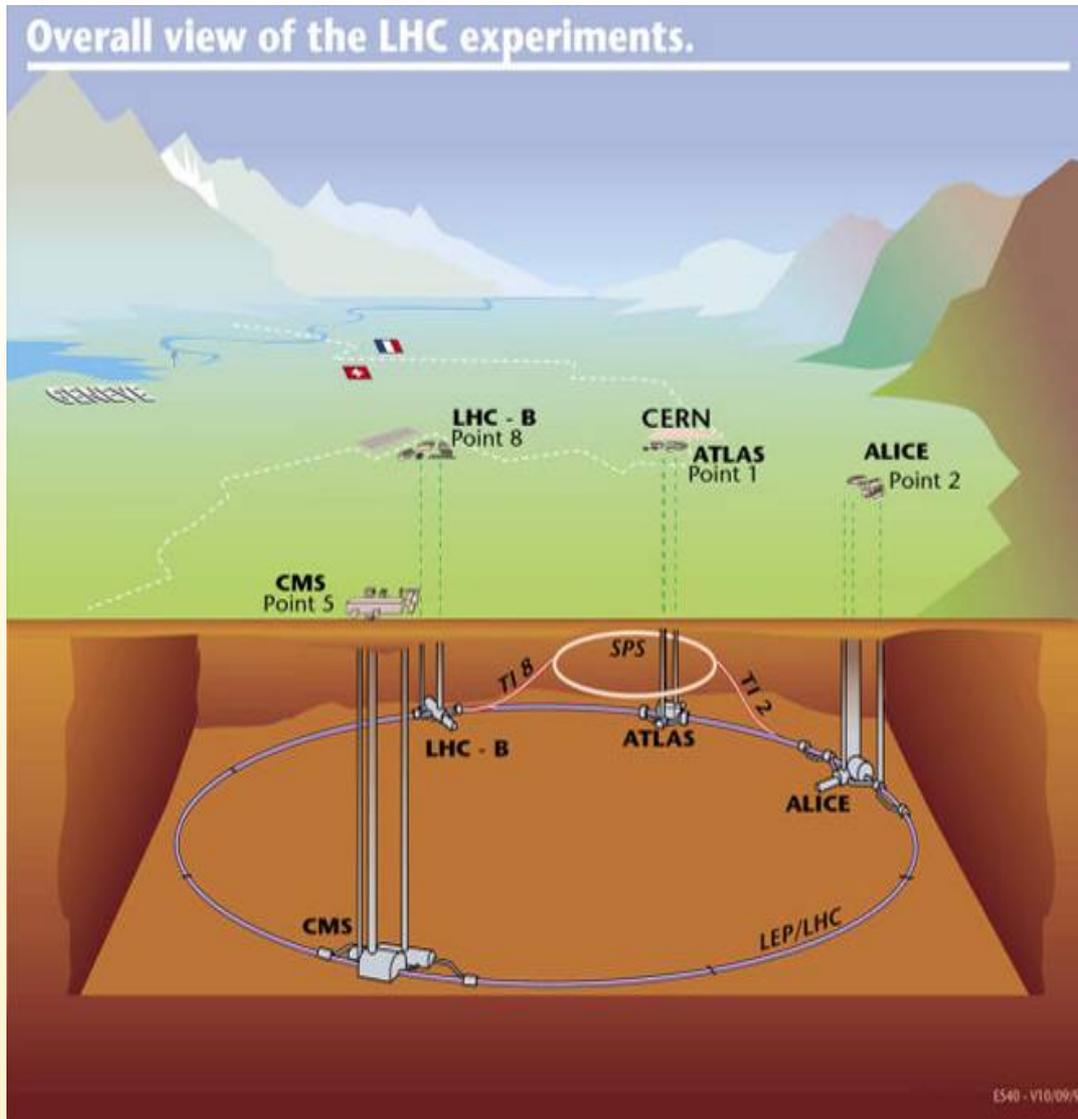


- einziger Linear Collider, Menlo Park/Kalifornien/USA
- Linac: 3km Länge
- 2x50GeV e^+/e^- Kollisionen, polarisiert!

SLAC Linac von oben



LHC – der grösste Teilchenbeschleuniger heute



27 km Umfang

100 m unter der Erde

7 TeV pro Protonenstrahl

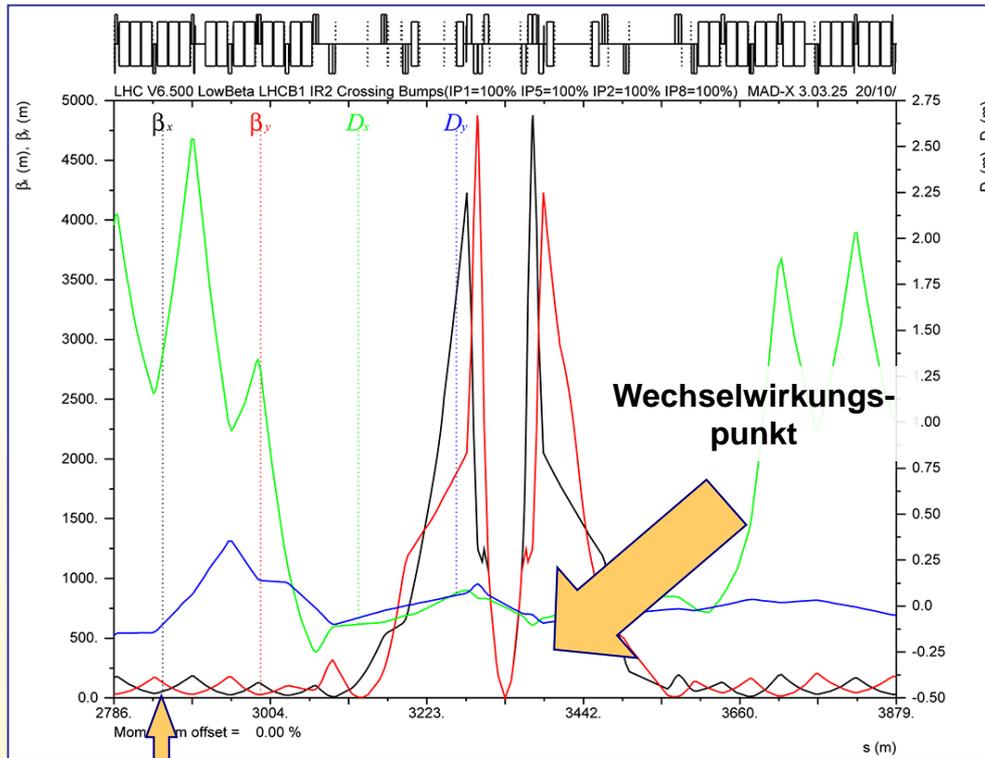
Beschleunigung der p auf
99,9999991% von c

CMS/ATLAS: lokale Erzeugung
von Urknall-Bedingungen,
Higgs etc.

LHCb: Untersuchung der CP
Verletzung in B-
Mesonensystemen

ALICE: Schwerionen,
Erzeugung und Untersuchung
eines Quark-Gluonen-Plasmas

LHC - Strahloptik in der Wechselwirkungszone



β_x/β_y Optikfunktionen
 $\sim (\text{Strahlgrösse})^{1/2}$

Beispiele
 versch. Collider

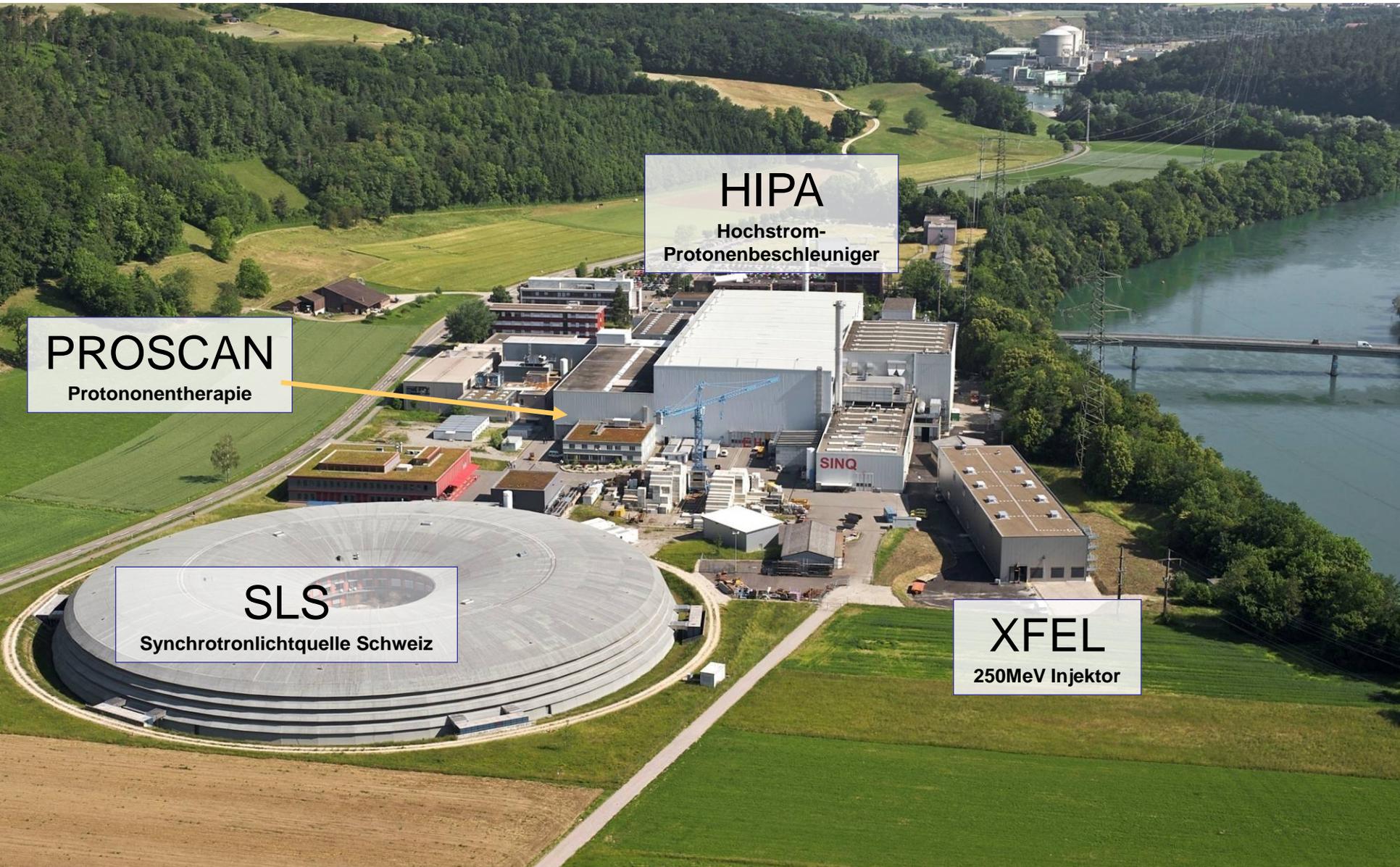
um die Wechselwirkungsrate
 (Luminosität) zu maximieren
 werden beide Strahlen am
 Wechselwirkungspunkt stark
 konzentriert

$$L[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}] \propto \frac{I_1 I_2}{\sigma_x \sigma_y}$$

Strahlgrösse

	Energie [GeV]	Strahlgrösse [μm]
SLC	50 x 50	1.5 x 0.65
HERA	27.5 x 920	130 x 30
LHC	7000 x 7000	375 x 17

Die PSI Teilchenbeschleuniger



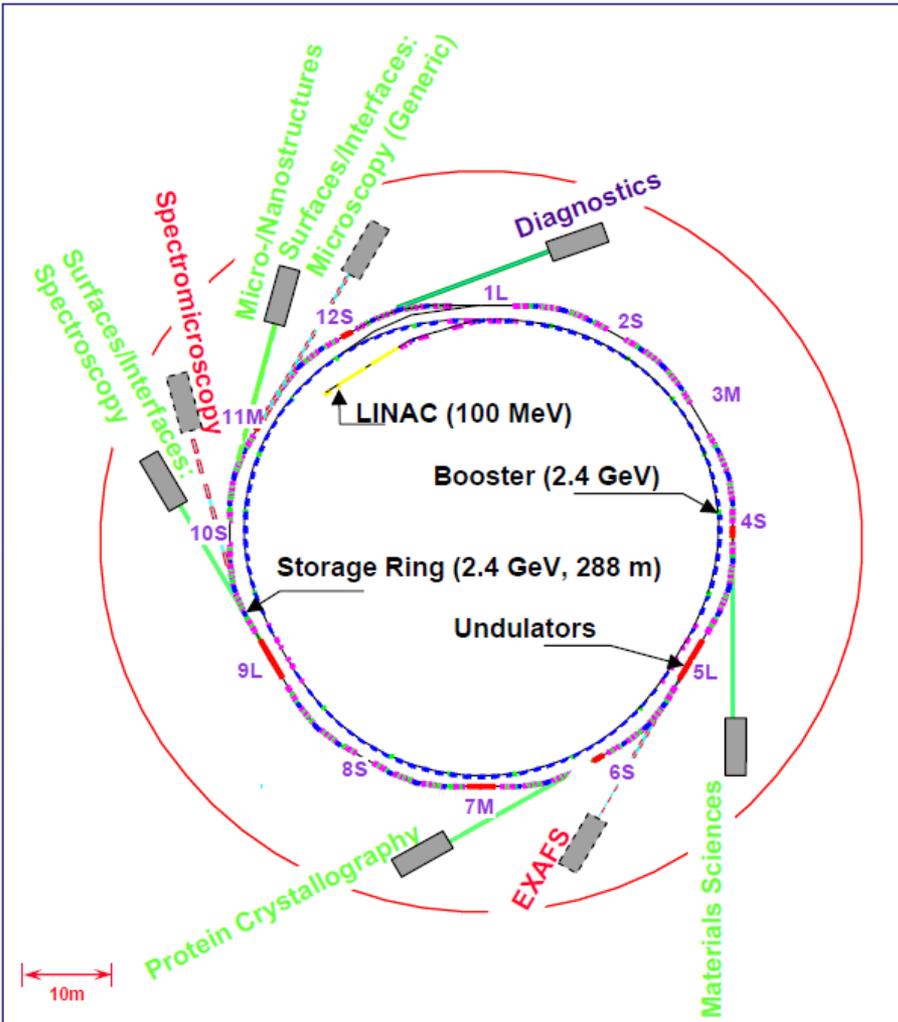
HIPA
Hochstrom-
Protonenbeschleuniger

PROSCAN
Protonentherapie

SLS
Synchrotronlichtquelle Schweiz

XFEL
250MeV Injektor

Swiss Light Source (SLS) – ein Synchrotron



SLS Parameter

- Länge: 288m
- Energie: 2.4GeV
- Strom 400mA
- 21 Strahllinien

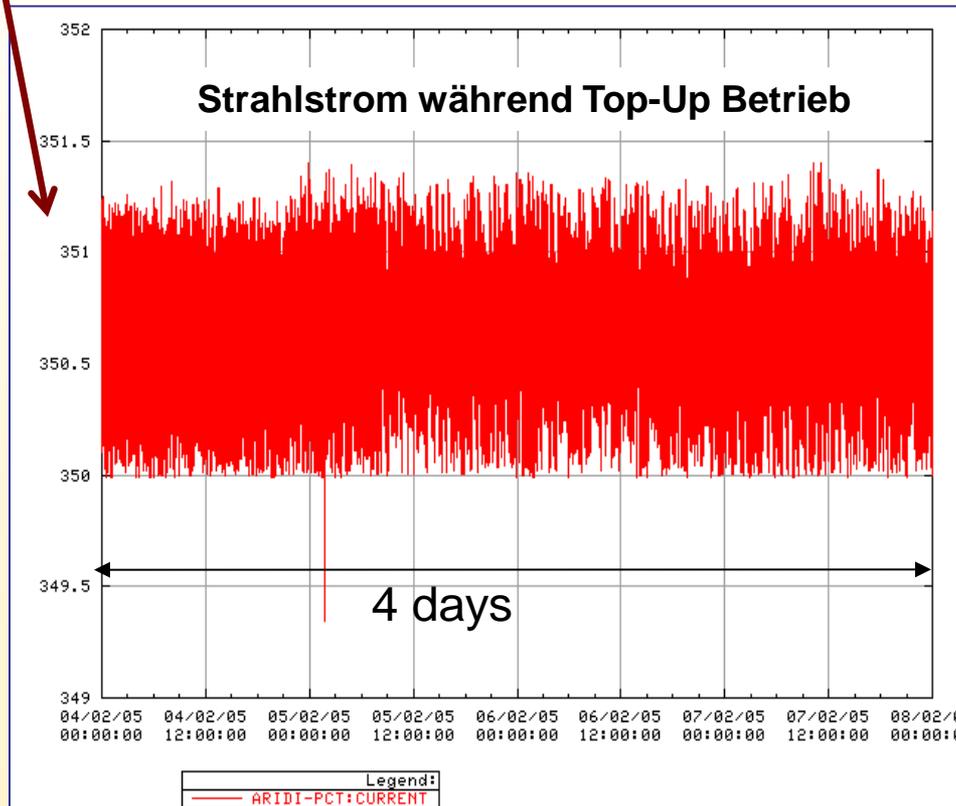
Integrierter Boosterring
mit voller Energie →
Top-Up Betrieb

Magnetanordnung:

12 TBA Zellen
(triple bend achromat);
12 gerade Strecken für
Undulatoren

SLS Glanzlichter – kleine Emittanz (Strahlgrösse), sub- μm Photon-Strahl Stabilität

Beachte: Skale 349..352mA



Top-Up Betrieb:

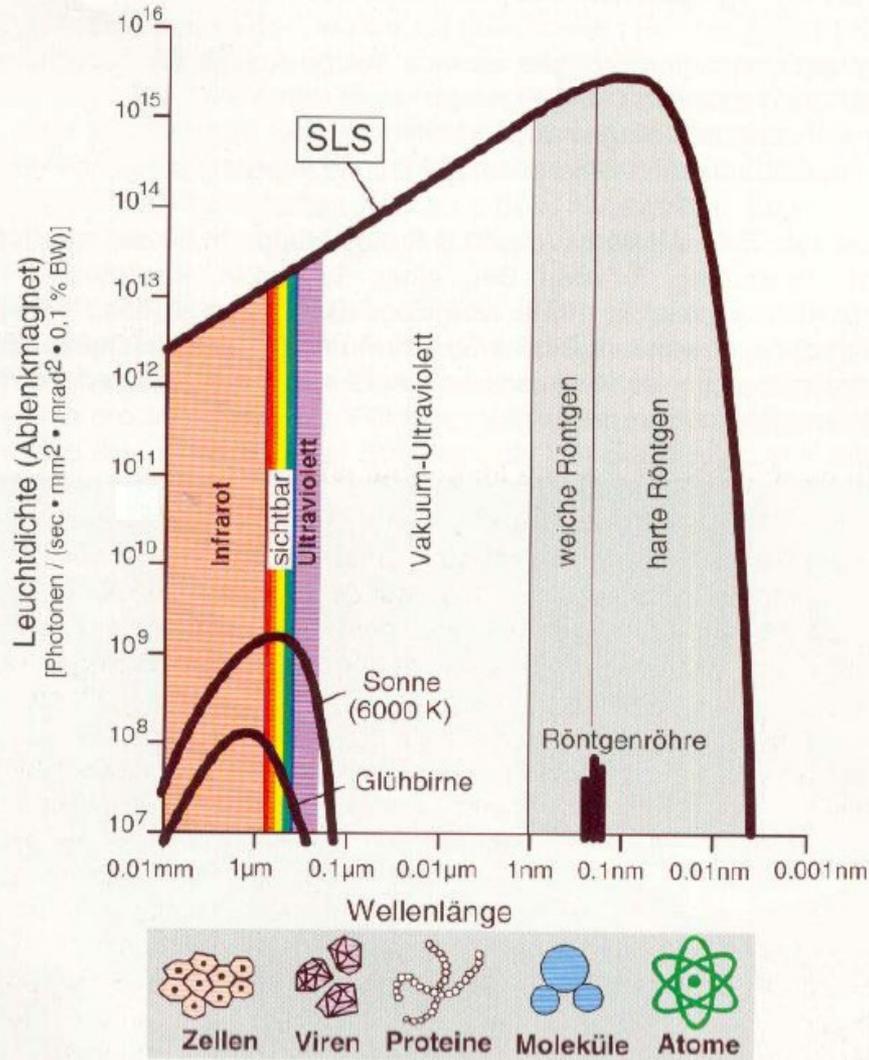
- Strahl-Injektion alle ~2mins
- Strahlstrom: $\pm 1\text{mA}$
- ▶ thermische Stabilität
- ▶ konstante Empfindlichkeit der Positionsmonitore

SLS Rekordemittanz (vertikal):

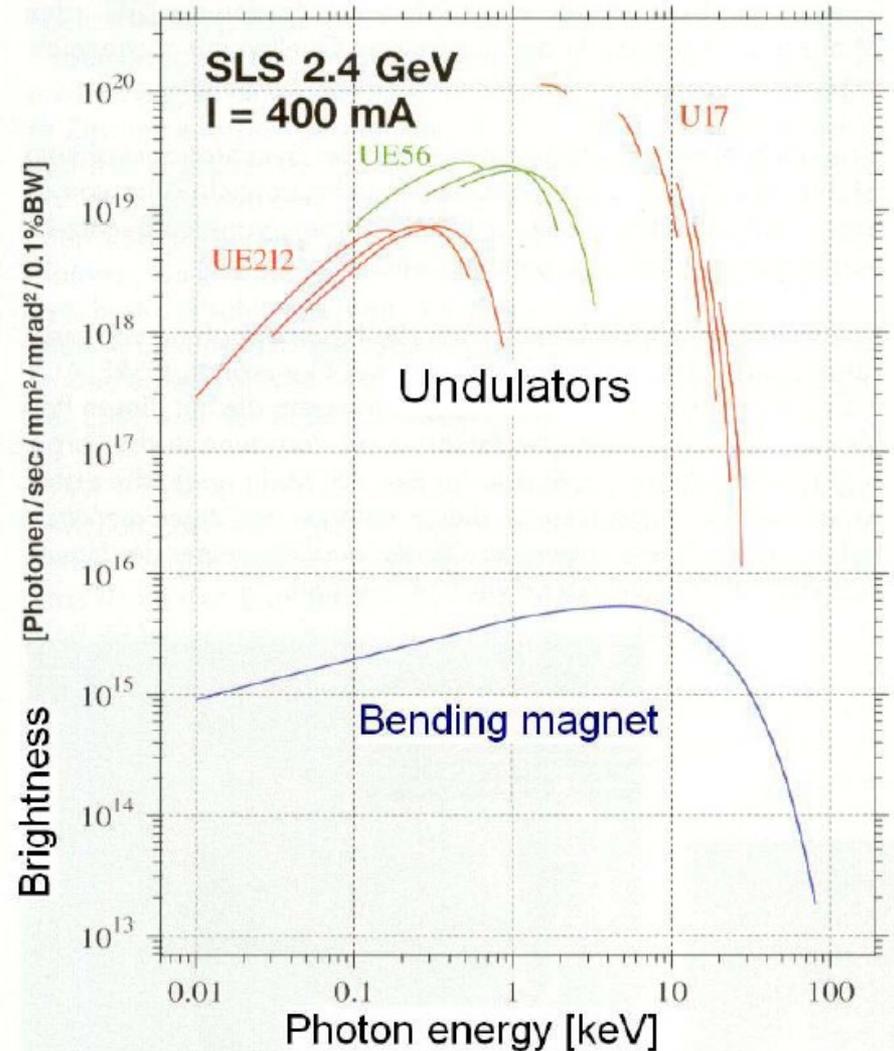
$$\varepsilon_y = 1..10 \cdot 10^{-12} \text{m rad}$$

$$\sigma_y \sim 5 \mu\text{m}$$

SLS Anwendungen – Wellenlänge der Strahlung

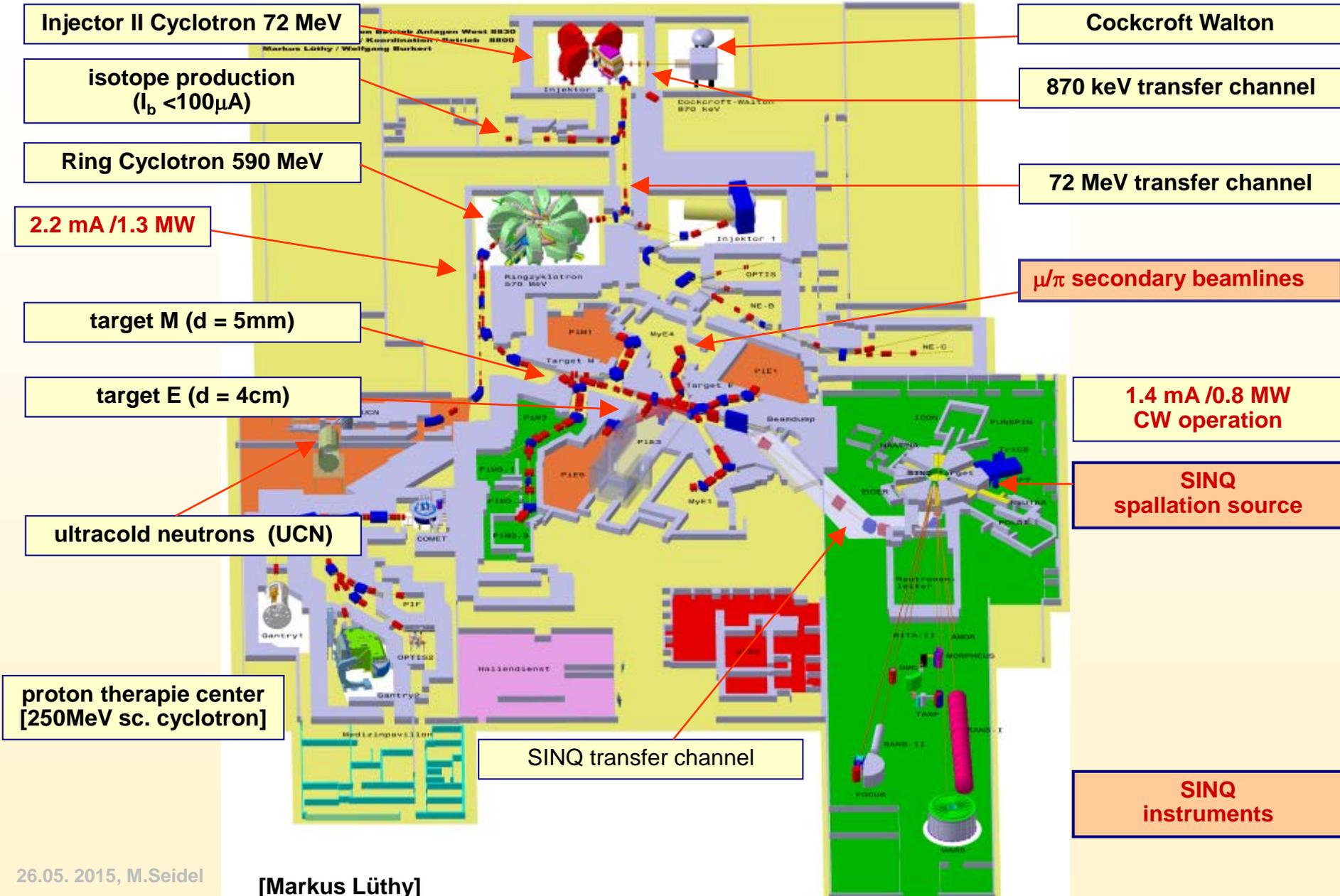


Bending magnet brightness in comparison to light bulb, sun and X-ray tube



Undulator brightness in comparison to bending magnet brightness

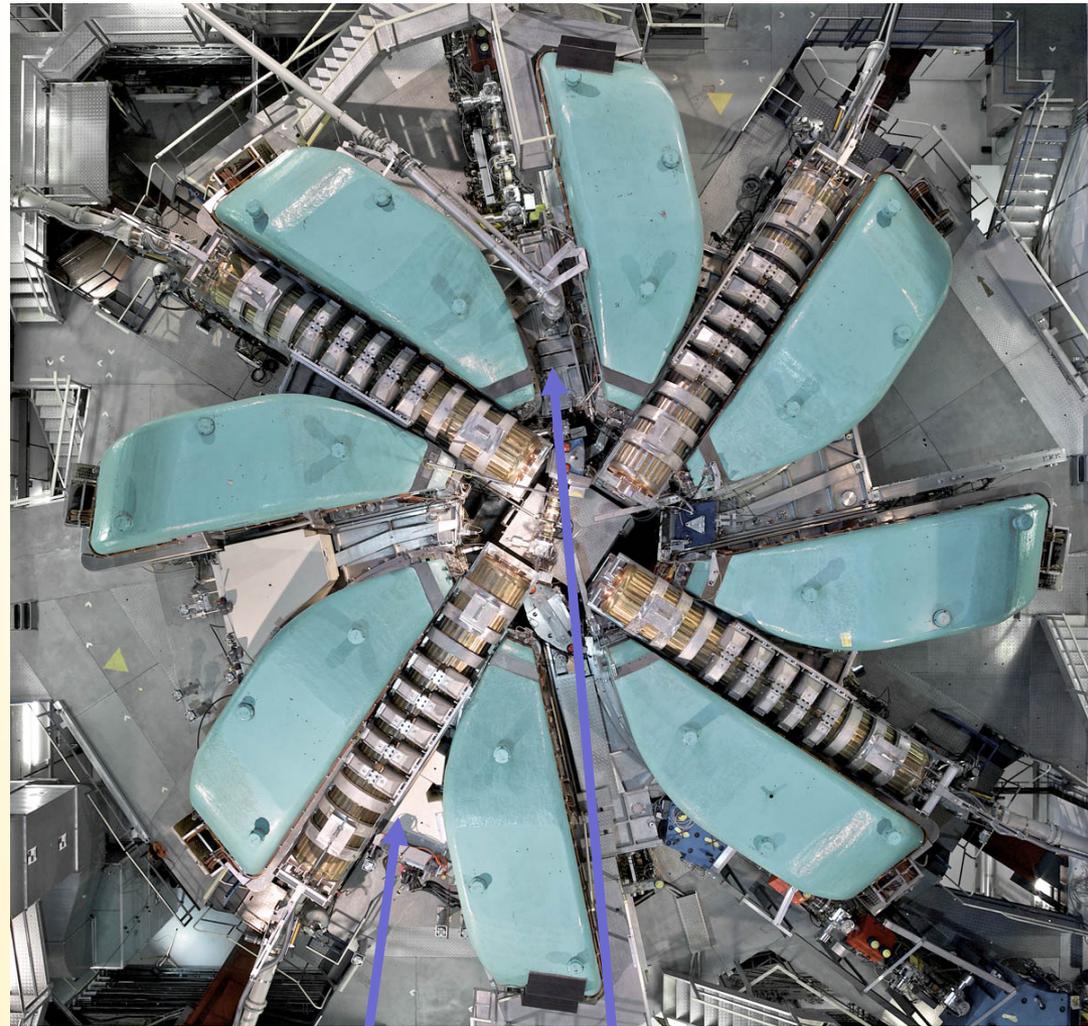
Übersicht PSI Protonenbeschleuniger



Herz von PSI-HIPA:

- 1974 neues Konzept: separate Sektoren [H.Willax et al]
- 8 Magnete (je 280t)
- 4 Beschleunigungs-Resonatoren (50MHz), 1 Flattop (150MHz)
- \varnothing 15m, 186 Umläufe
- Strahlleistung 1MW, Verluste ≤ 200 W, Betrieb: 8 Monate im Jahr
- Forschung: Teilchenphysik, Neutronenstreuung, Myonen-Resonanzspektroskopie

Das Ring Zyklotron

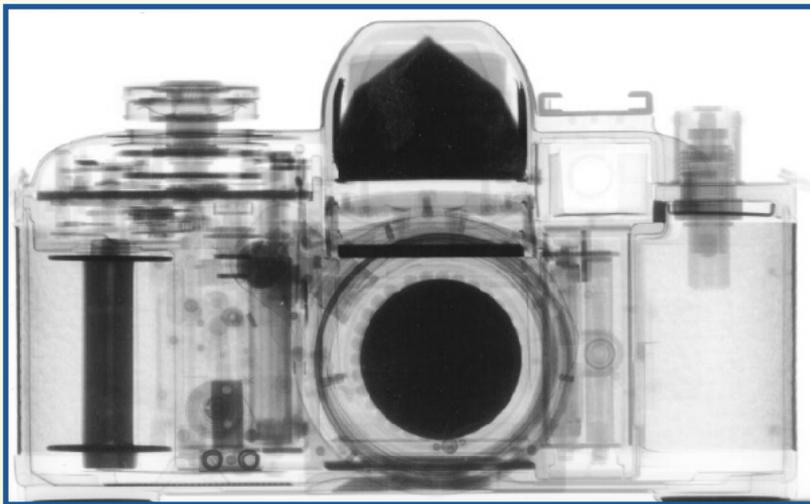
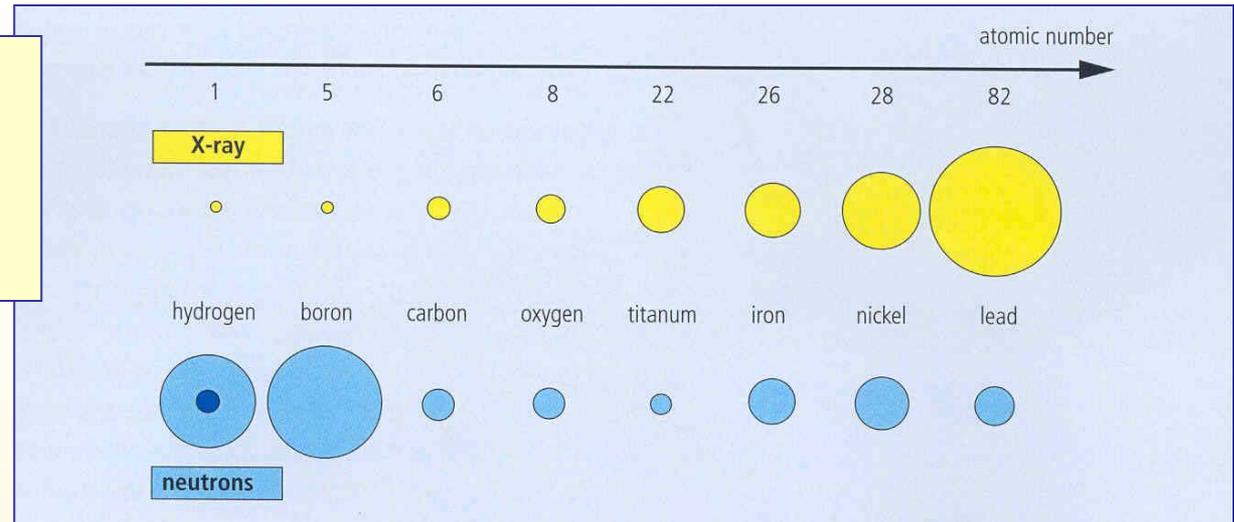


50MHz
Resonator

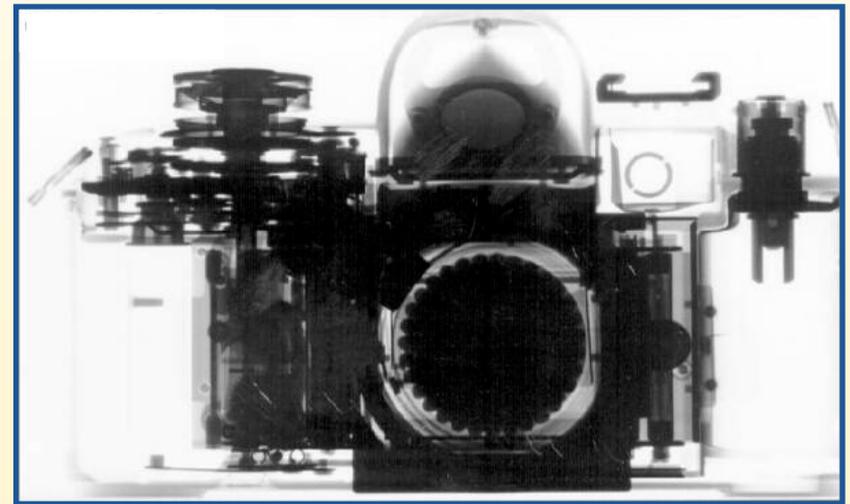
150MHz (3 harm.)
Resonator

Neutronen Streuung – ergänzt sich mit auf Synchrotronlicht basierten Untersuchungen

**Wechselwirkungs-
Wahrscheinlichkeit für
Röntgenstrahlung und
Neutronen –
verschiedene Materialien**



neutron radiography



X-ray radiography

Teilchenbeschleuniger – ein weites Feld für Physiker

► Beschleunigerphysik/-technologie:

Strahldynamik, computergestützte Simulationen, computergestützte Kontroll- und Regelungssysteme, Hochfrequenztechnik, Magnetbau, Vakuumtechnik/Vakuumphysik, mechanische Konstruktion, thermomechanische Probleme

► Anwendung in der Forschung:

Teilchenphysik, Struktur der Materie (Synchrotronstrahlung, FEL, Neutronen, μ SR)

► Anwendung in Medizin/Industrie:

Krebstherapie, Isotopenproduktion, Lebensmittel-Sterilisation, Analyseverfahren, ADS

→ am PSI sind praktisch alle Gebiete vertreten!

Particle Accelerator Physics and Modeling (PAM 1 & 2)

<http://amas.web.psi.ch/people/aadelmann/ETH-Accel-Lecture-1/>

2 Lectures Fr 10 at HIT F31.2

2 Exercises Fr 13 at HIT F31.2

8 ETH Points (30 min. oral exam.)

Contact:

andreas.adelmann@psi.ch

Content

- Building Blocks of Particle Accelerators
- Lie Algebraic Structure of Classical Mechanics and Applications to Particle Accelerators
- Symplectic Maps & Analysis of Maps
- Linear & Circular Machines, Cyclotrons, FELs
- Plasma Wakefield Accelerators

Exercises

- theoretical work
- design of an accelerator simulation tool with Python

