

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**

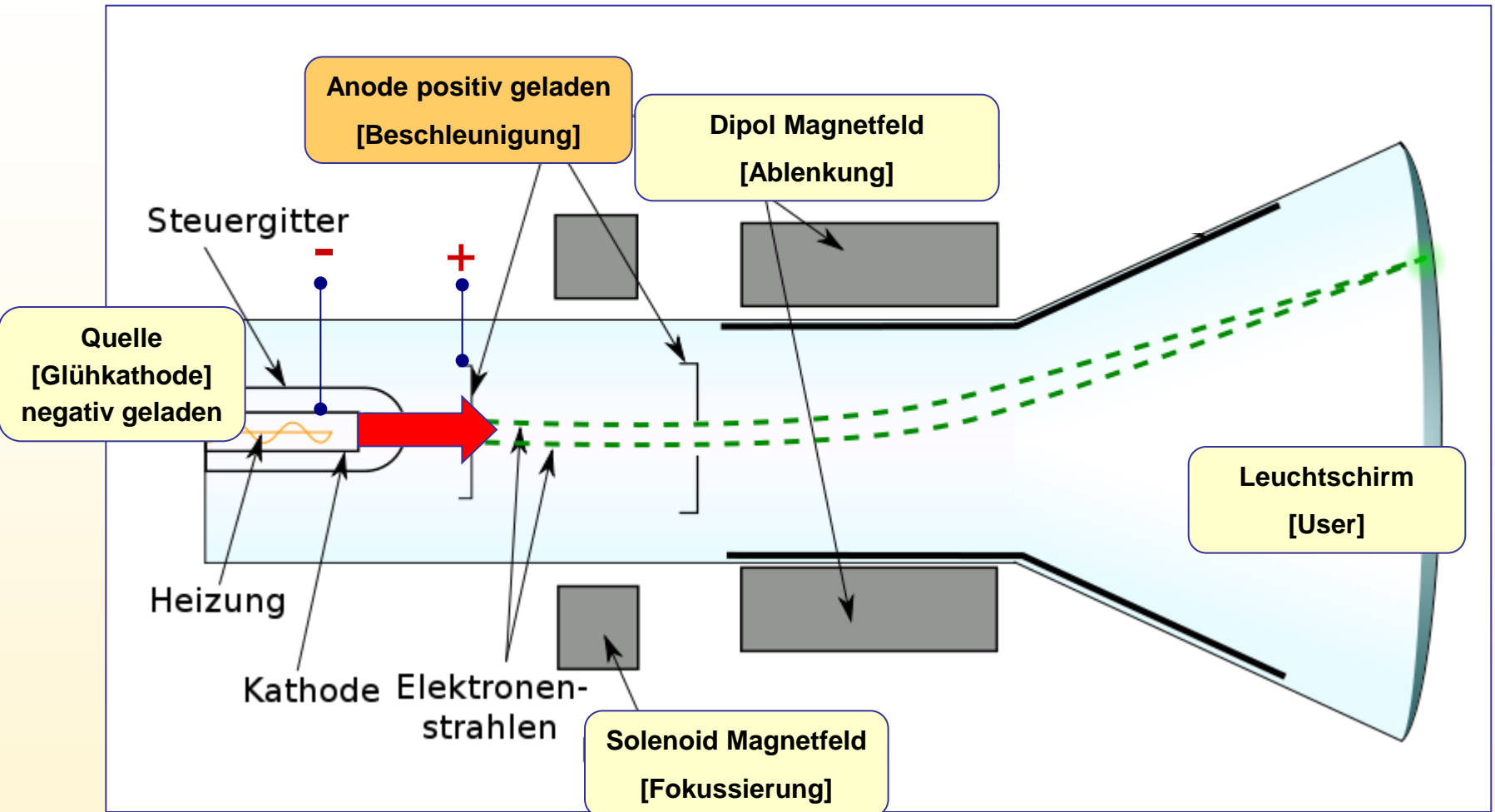
[berühmte Collider, Linearbeschleuniger, Kreisbeschleuniger]

- **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:

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

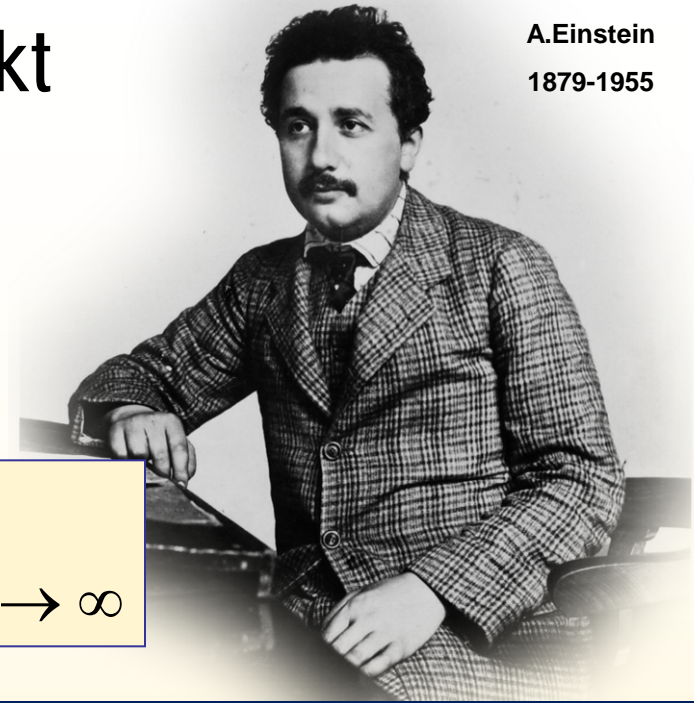
$$c^2 \vec{p} = E \vec{v}$$

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

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

$$E \rightarrow \infty:$$

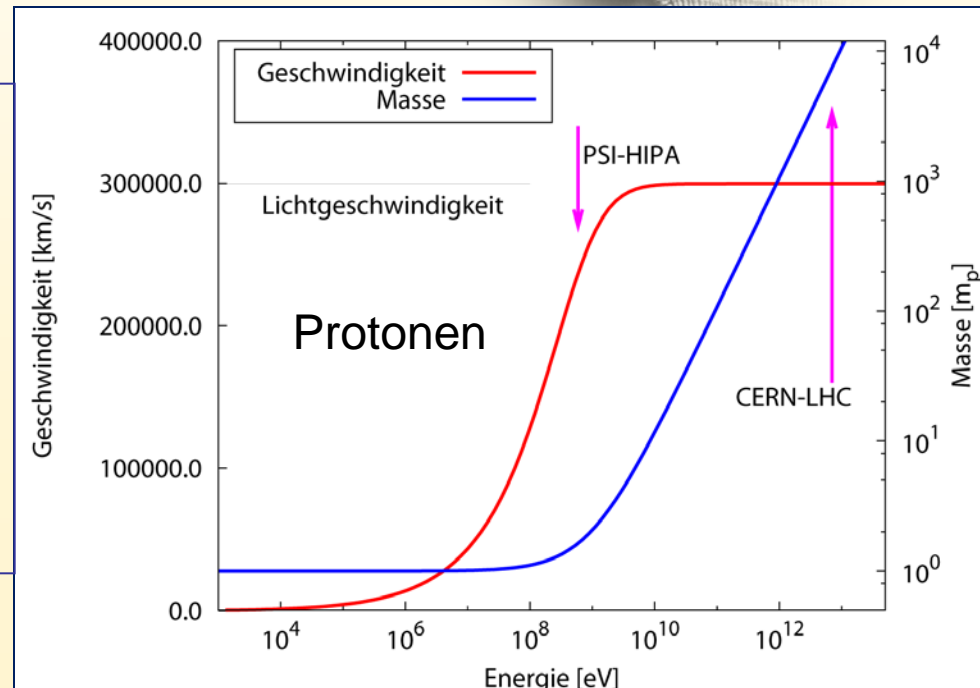
$$v \rightarrow c; m_{\text{eff}} \rightarrow \infty$$



- 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]

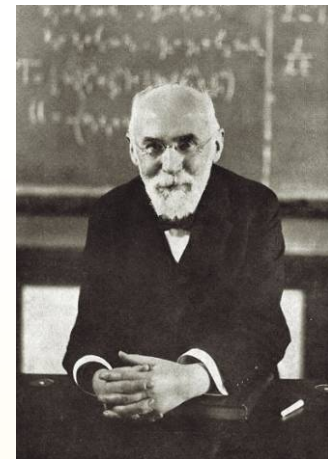
SLS: $E=2.4 \text{ GeV}$, $m_{\text{eff}} \approx 4700 \times m_0$ [Elektronen]



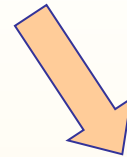
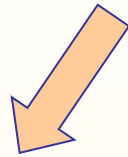
Grundlagen: Lorentzkraft

H.A.Lorentz

1853-1928



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

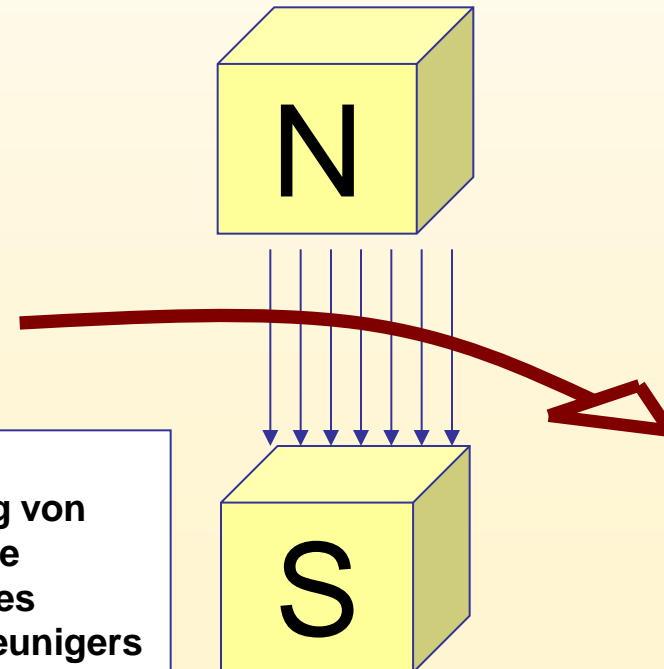
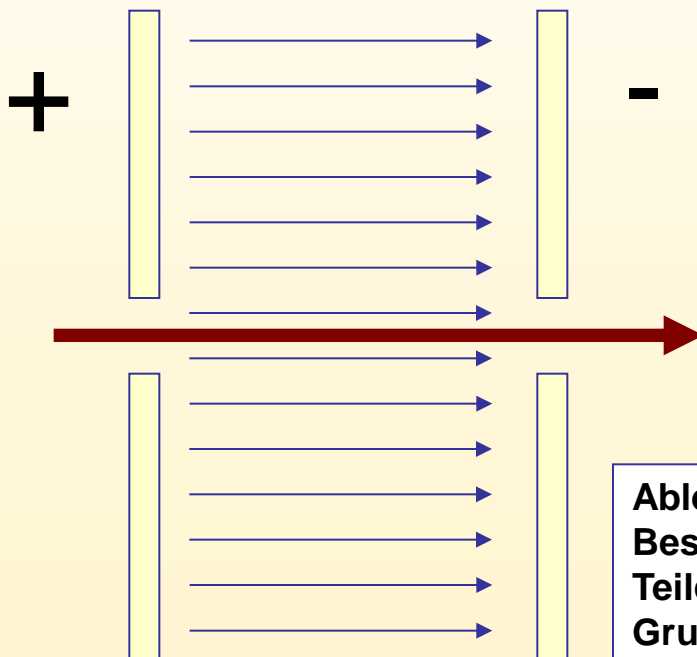


elektrisches Feld:

Energiegewinn; $\Delta E_k = eU$

magnetisches Feld:

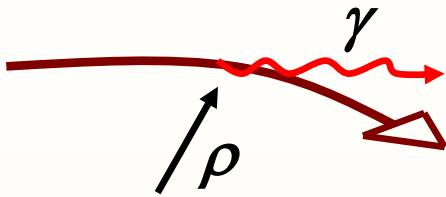
Ablenkung; $\Delta E_k = 0$, $B\rho = p/e$



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:

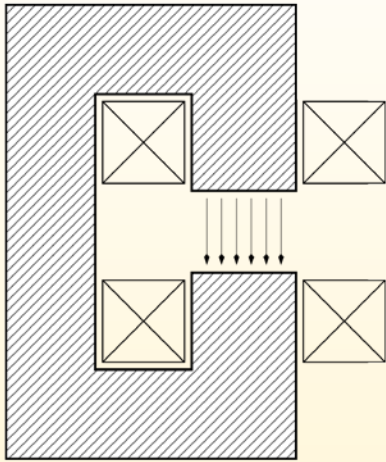
ausgewählte Beschleunigerkonzepte

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

Komponenten: Magnete im Beschleuniger

Dipol

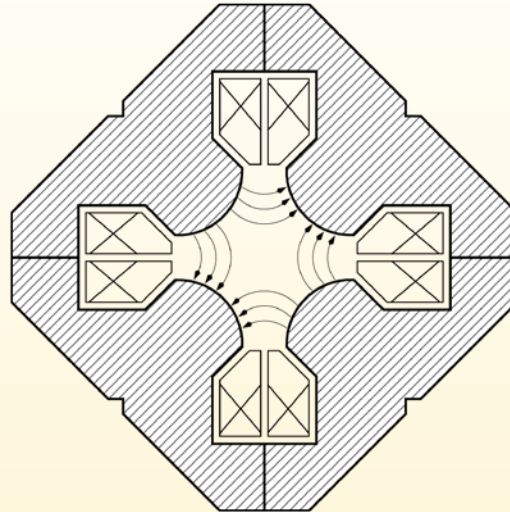
[Ablenkung, festes $B=b_0$]



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

Quadrupol

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

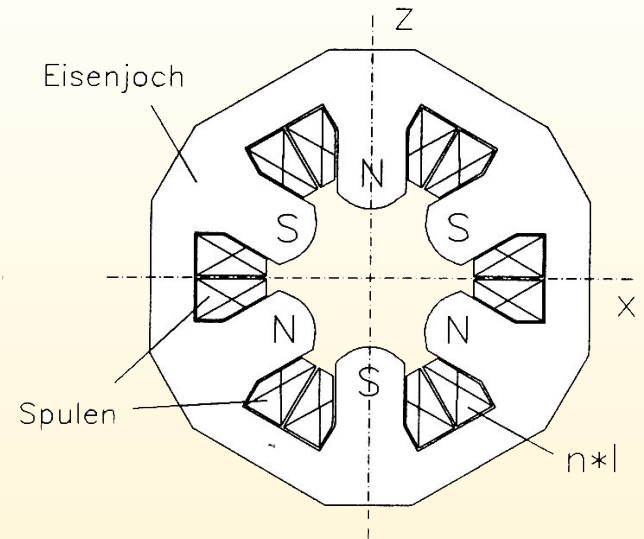


$$d^2x/ds^2 = \pm K \cdot x$$

“ortsabhängiger Dipol”

Sextupol

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



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

“ortsabhängiger Quadrupol”

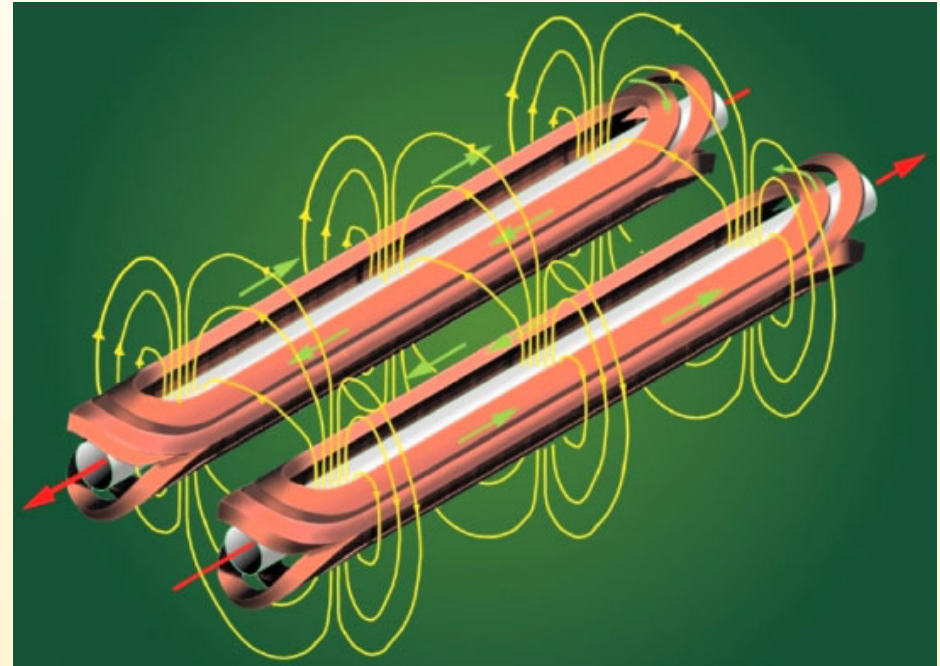
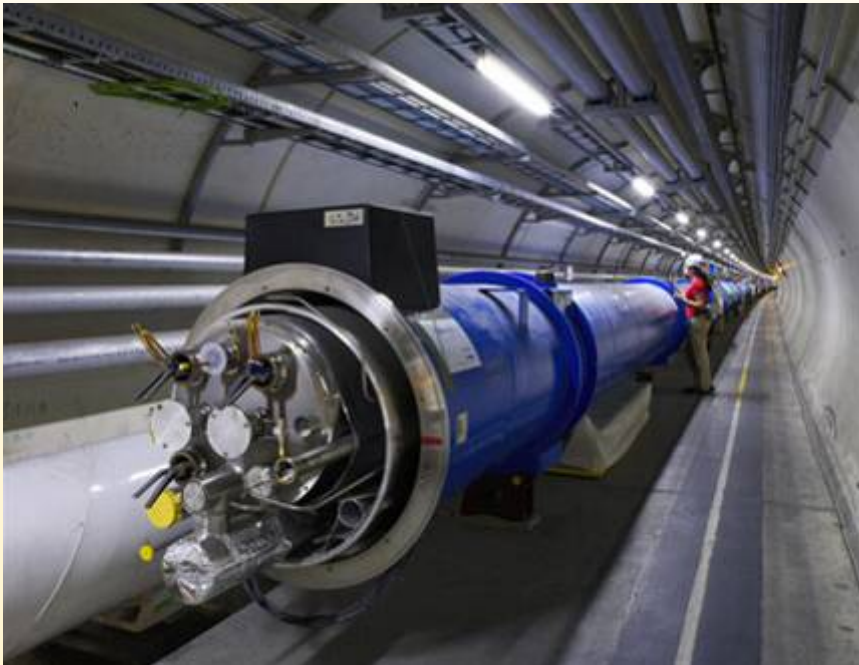
Zahlenbeispiel Dipolfeld:

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

Komponenten: LHC supraleitender Dipol

[vorläufiger Höhepunkt der Magnetentwicklung]

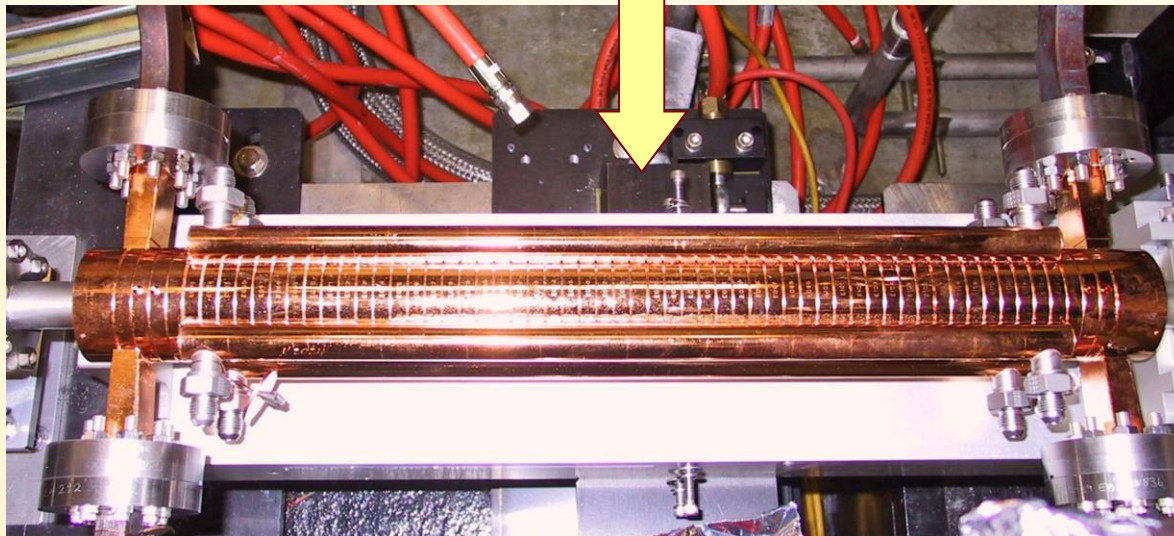
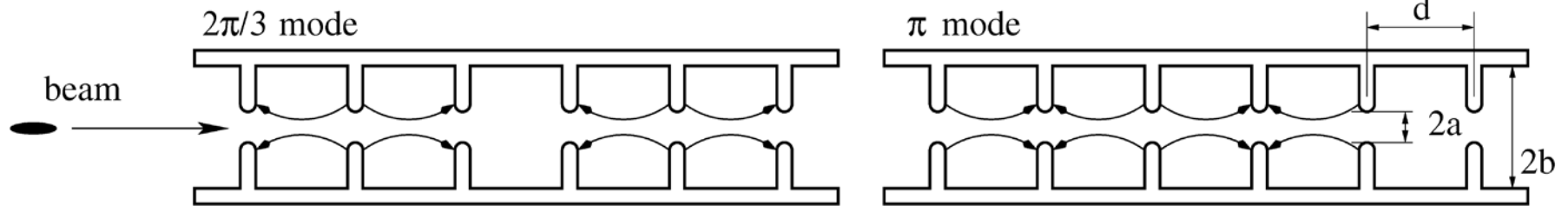
- ▶ 1232 Dipolmagnete, 2 parallele Magnete pro Kryostat
- ▶ $B = 8.33 \text{ Tesla @ } 7 \text{ TeV} \rightarrow \rho = 2800\text{m}$
- ▶ Temperatur 1.9 K, diverse Korrekturspulen



Beschleunigungsresonatoren

gekoppelte Resonatoren “Disk loaded Waveguide”

= LINAC Struktur



NLC / Stanford Struktur

Parameter:

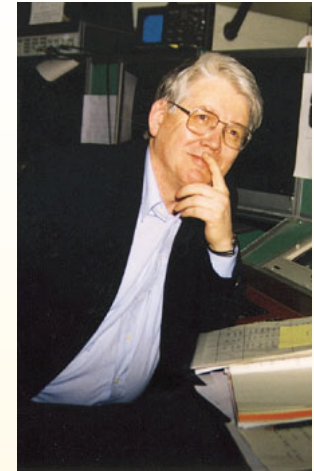
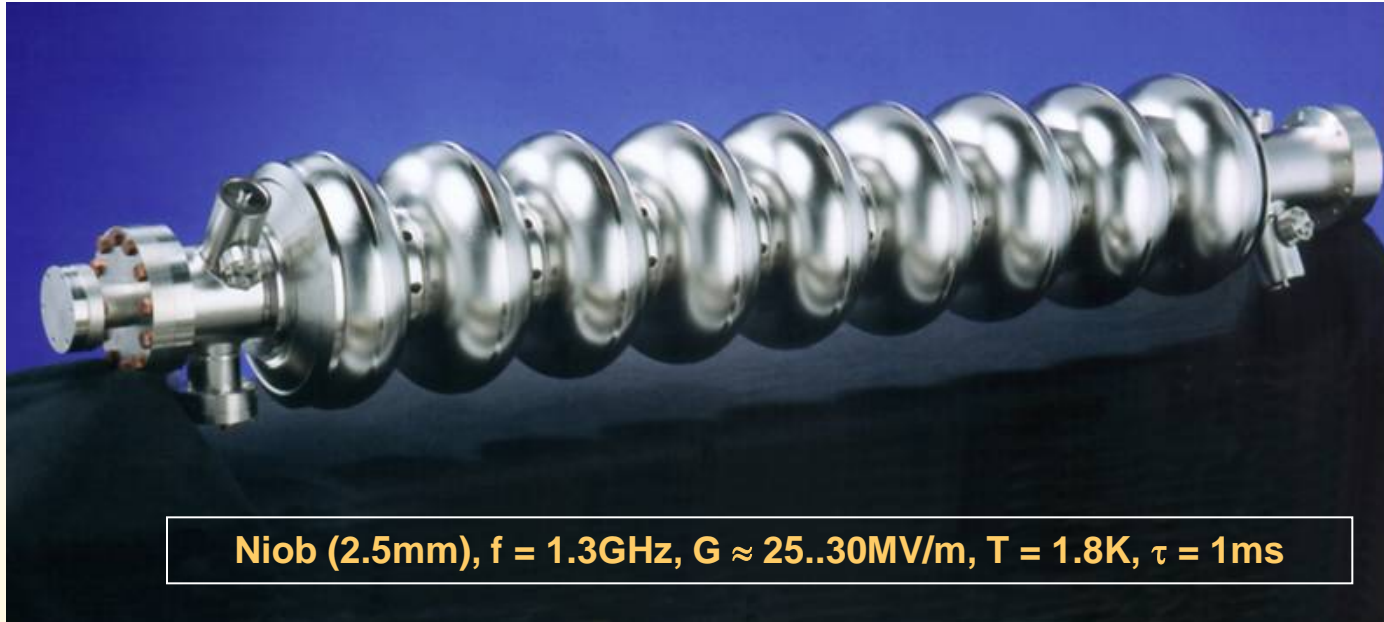
Länge: $l = 60 \text{ cm}$

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

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

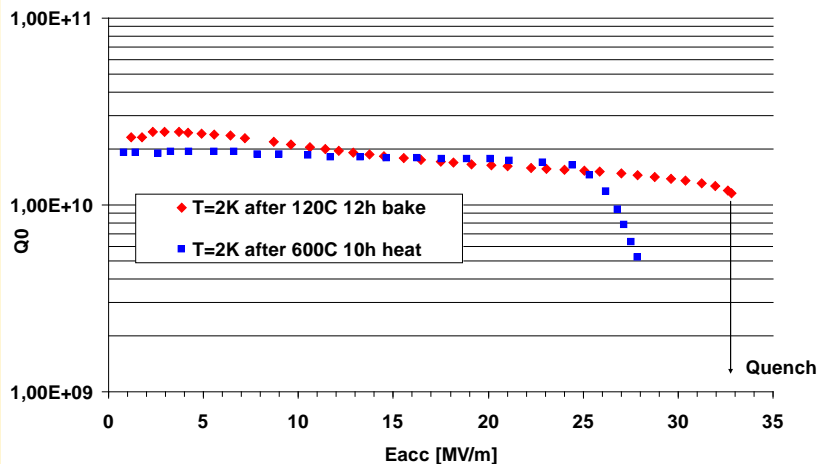
Pulslänge: $\tau \approx 500 \text{ ns}$

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

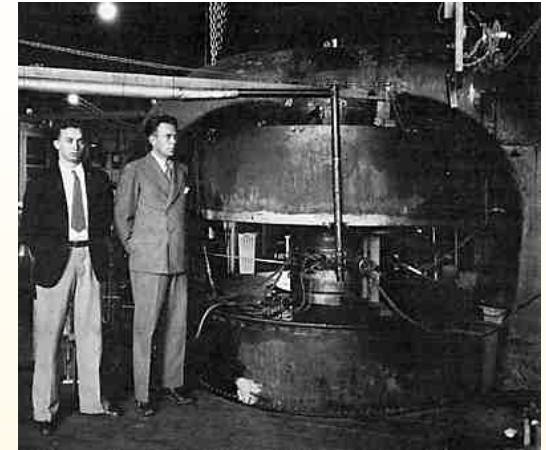


erstes Zyklotron 1931

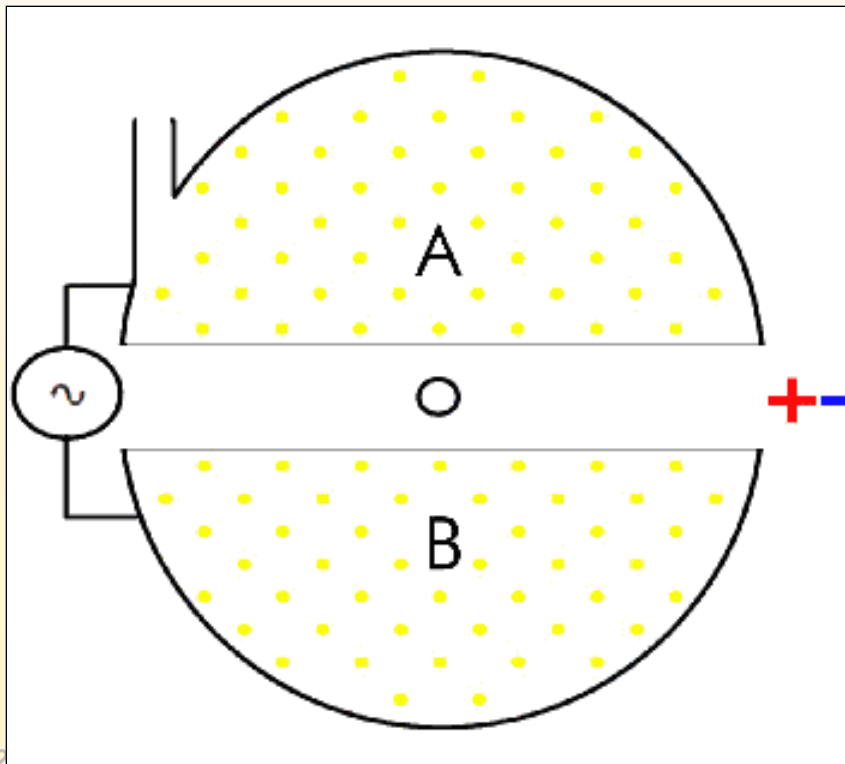
Zahlenbeispiel:

Spannung: 1kV

Finale Energie: 80keV



[Lawrence & Livingston,
27inch Zyklotron]

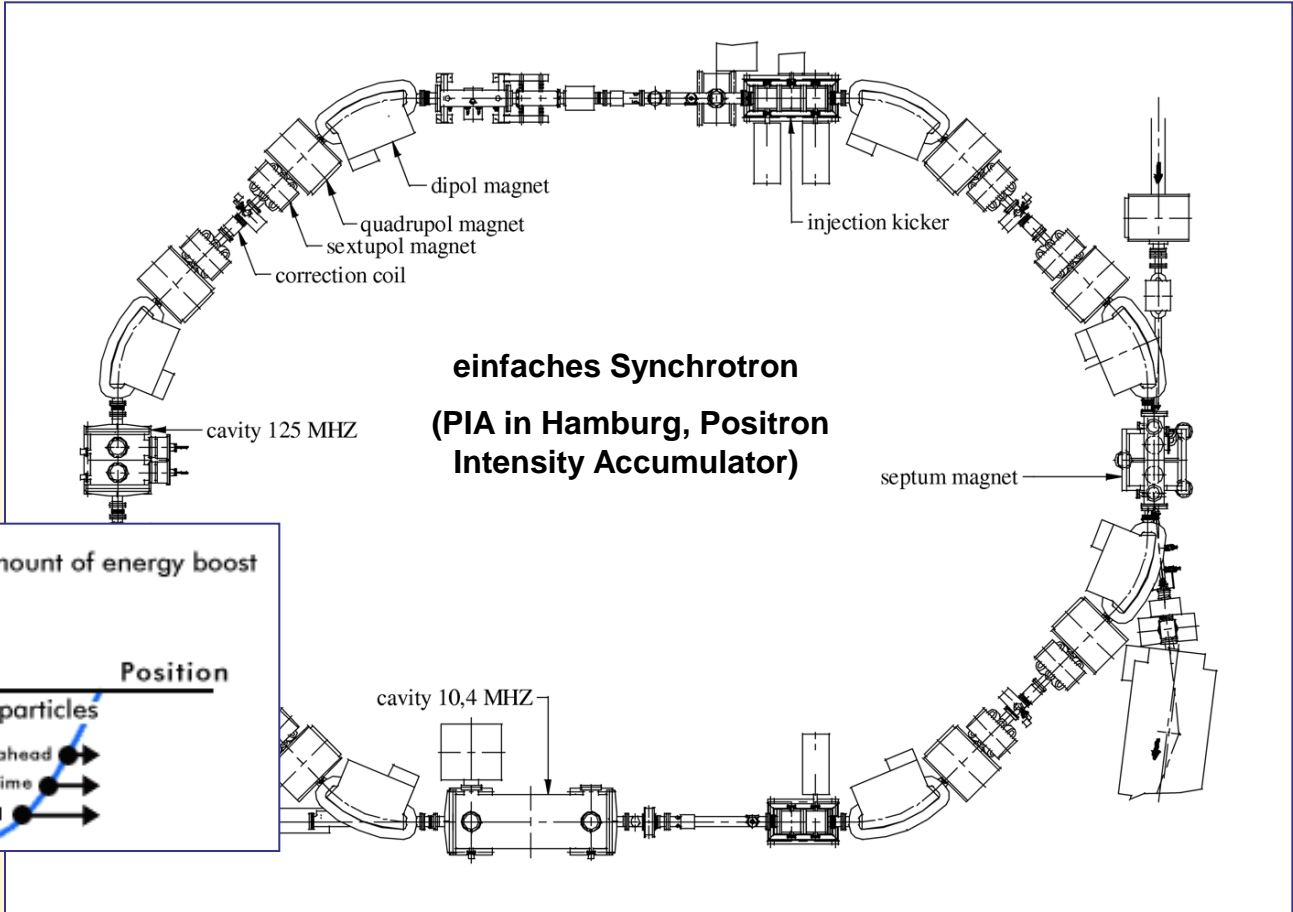
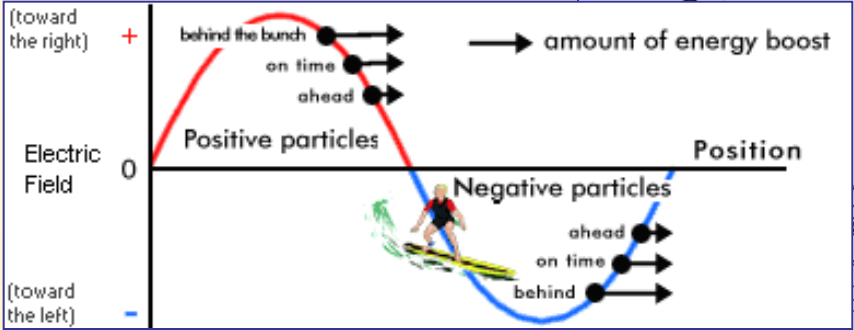


Prinzip: HF-Wechselspannung,
mehrfache Anwendung der
Beschleunigungsspannung

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

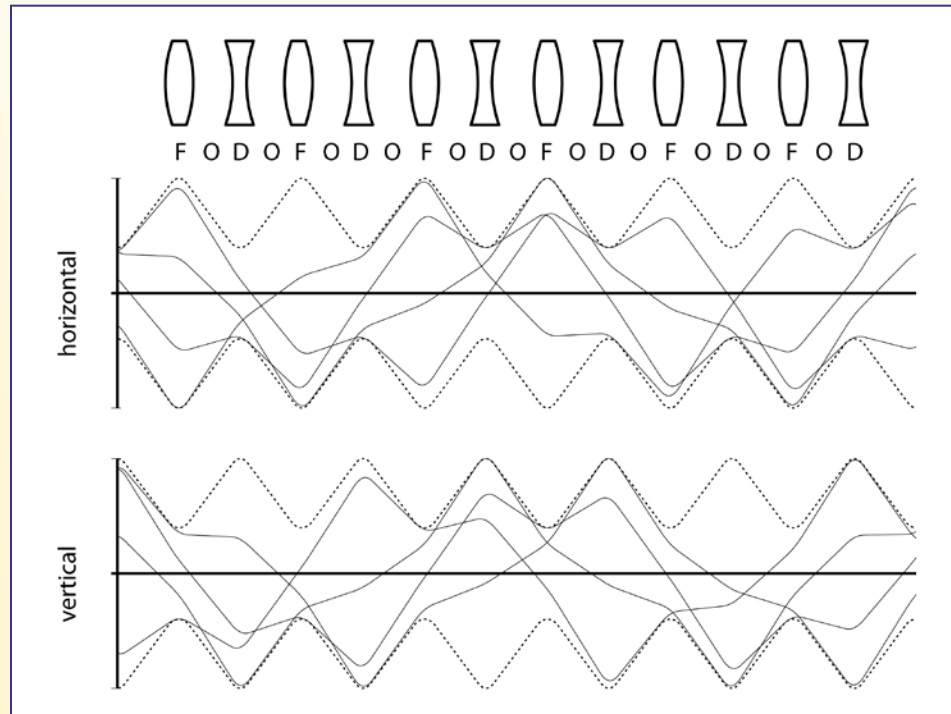
Phasenstabilität:
 “surfen auf der HF-Welle”



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 photograph of a control room, likely for a particle accelerator. The room is filled with numerous computer monitors of various sizes, some mounted on the wall and others on desks. A person is visible in the background, sitting at a desk and looking at the monitors. The overall scene is dimly lit, with the primary light source being the screens themselves. The text is overlaid on the left side of the image.

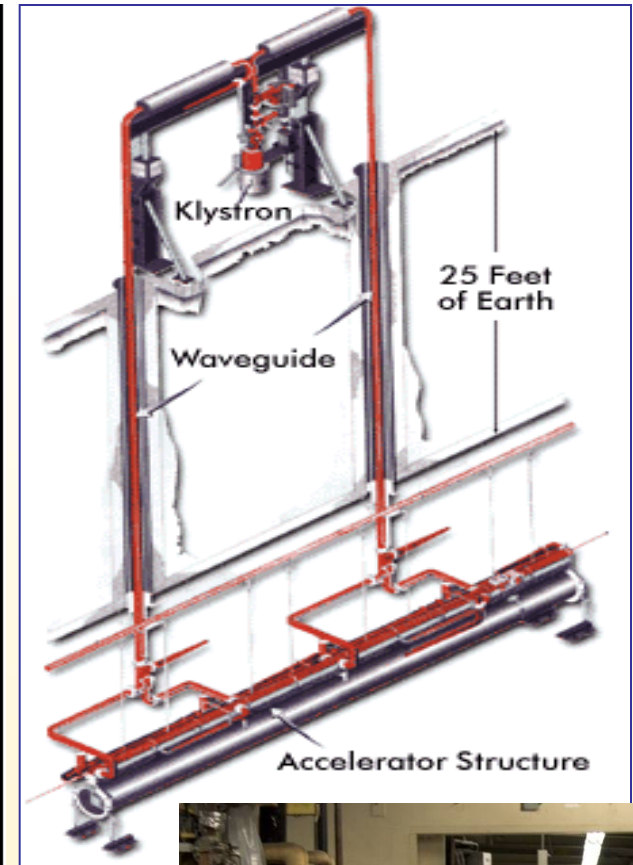
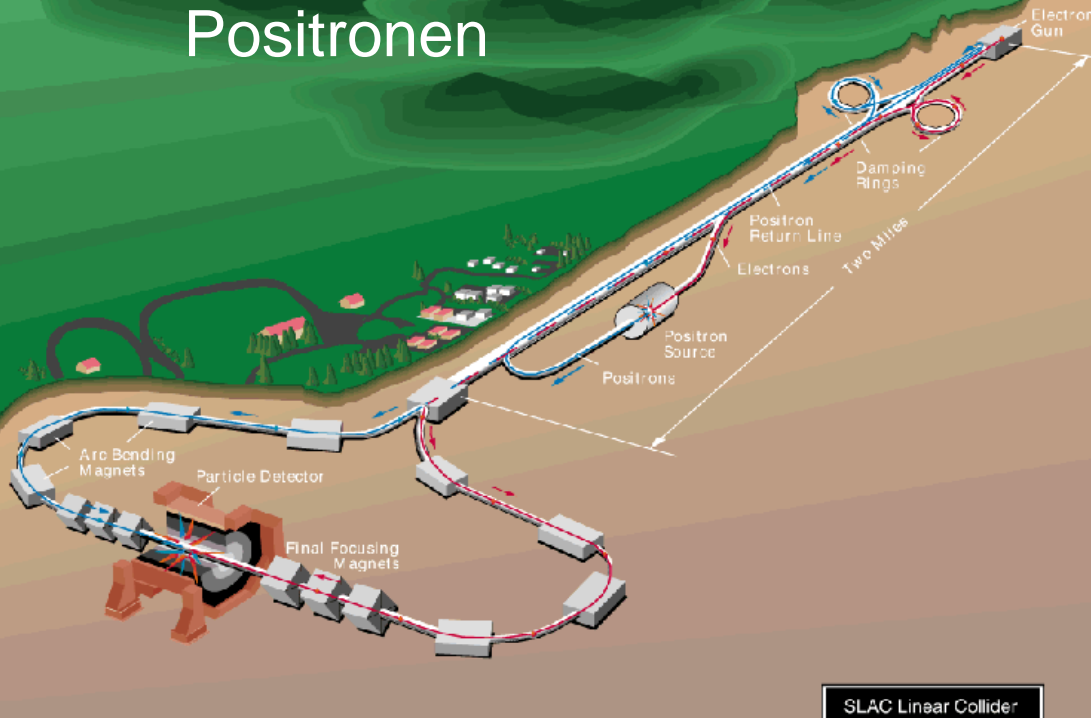
Nächste Folien:

Auswahl "berühmter" Beschleuniger für Teilchenphysik

[Stanford Linear Collider, CERN - Large Hadron Collider]

Stanford Linear Accelerator Center (SLC, bis 1997)

Elektronen gegen
Positronen

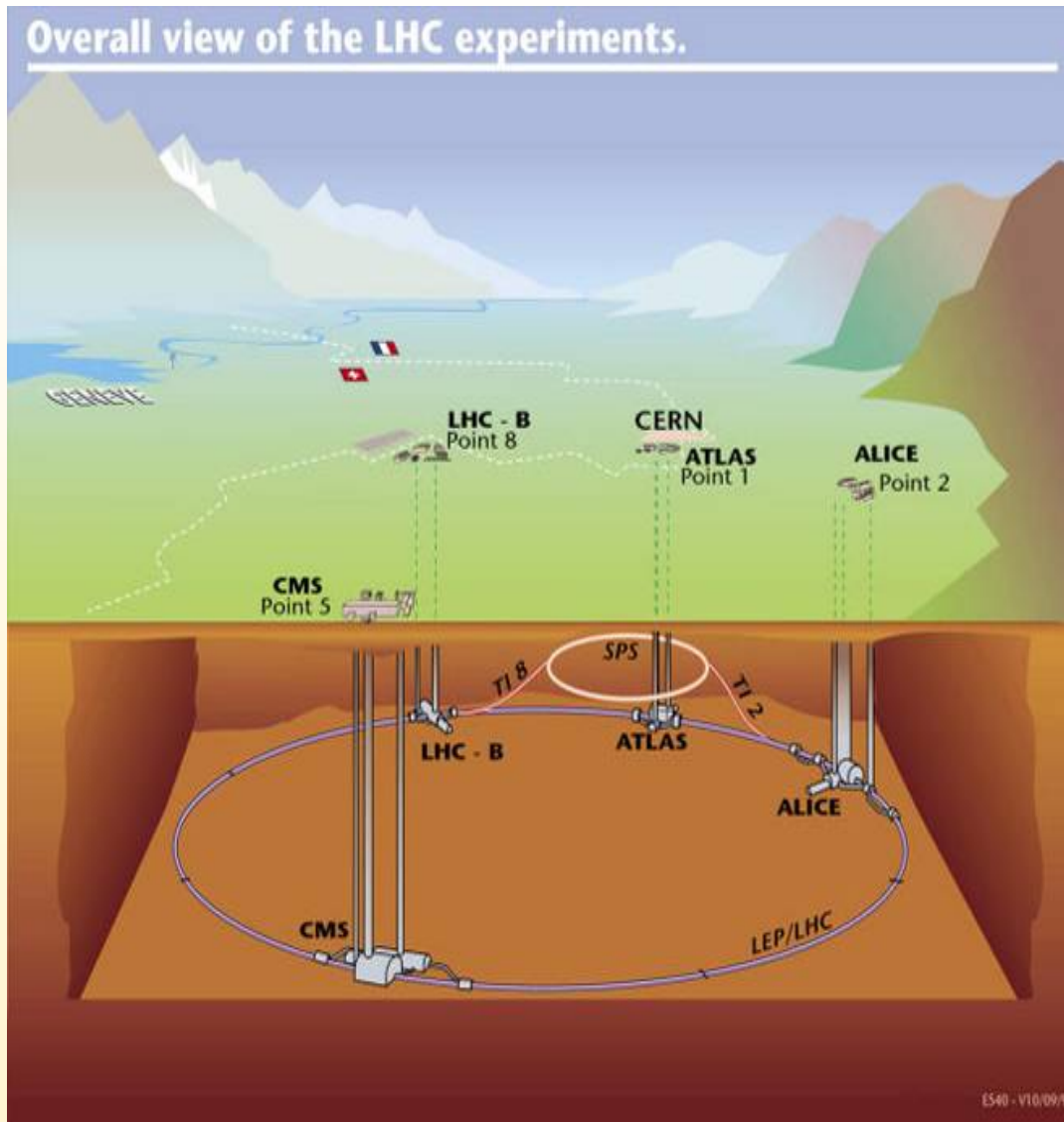


- einziger Linear Collider, Menlo Park/Kalifornien/USA
- Linac: 3km Länge
- 2x50GeV e^+/e^- Kollisionen, polarisiert!

SLAC Linac von oben



LHC – der grösste Teilchenbeschleuniger heute



26.05. 2015, M.Seidel

27 km Umfang

100 m unter der Erde

7 TeV pro Protonenstrahl

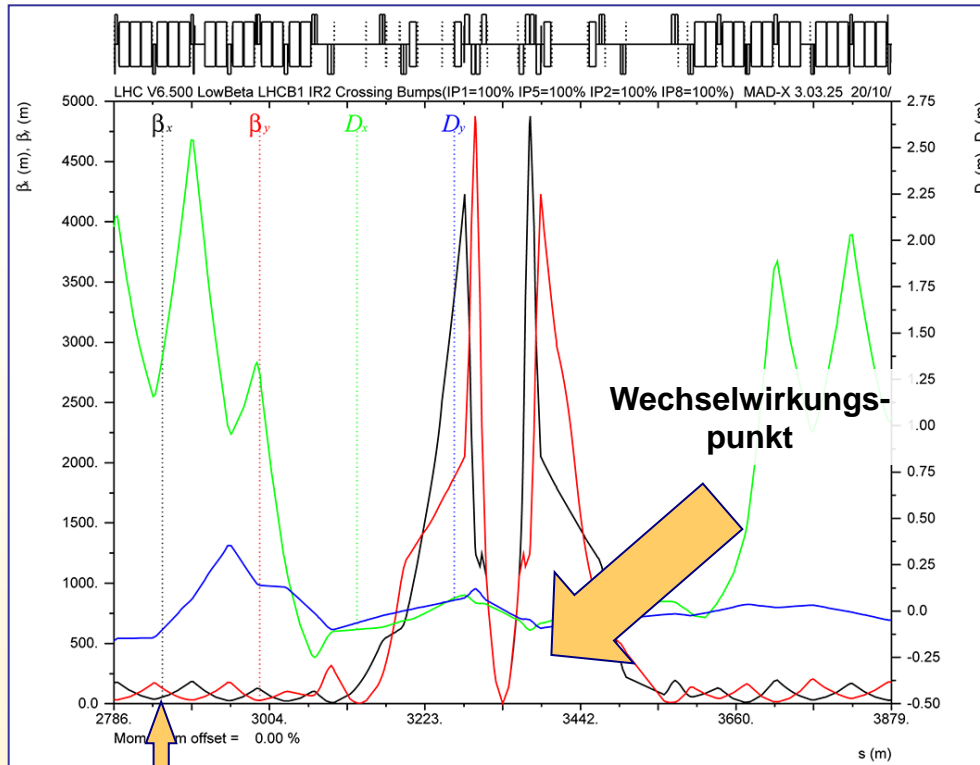
Beschleunigung der p auf
99,9999991% von c

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

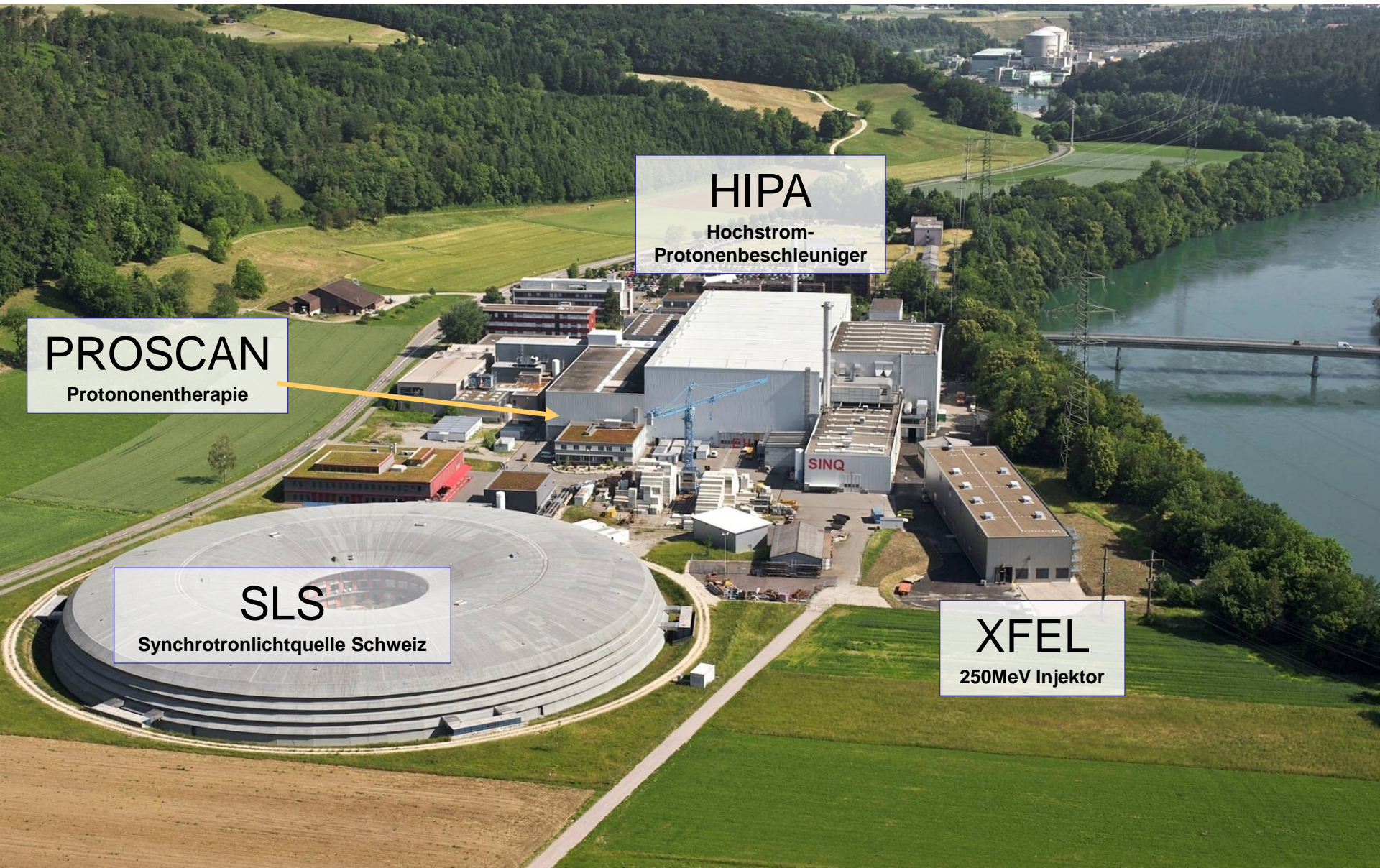
um die Wechselwirkungsrate
 (Luminosität) zu maximieren
 werden beide Strahlen am
 Wechselwirkungspunkt stark
 konzentriert

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

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



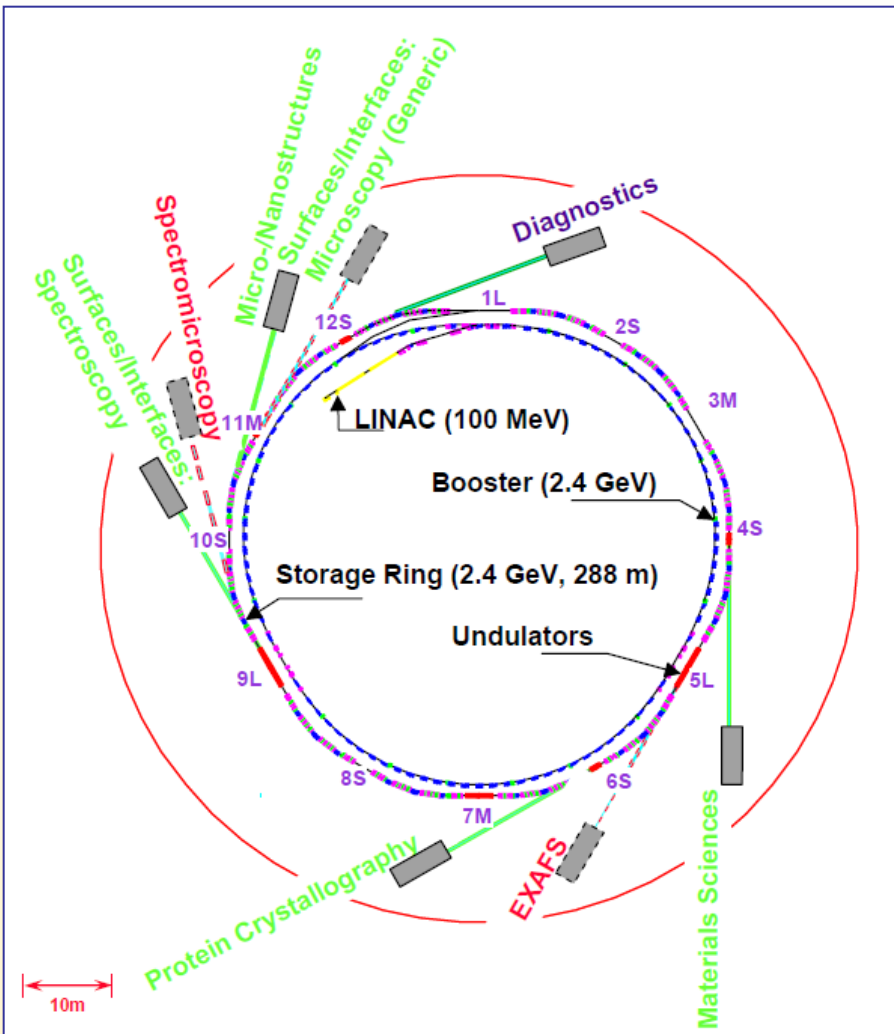
HIPA
Hochstrom-
Protonenbeschleuniger

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

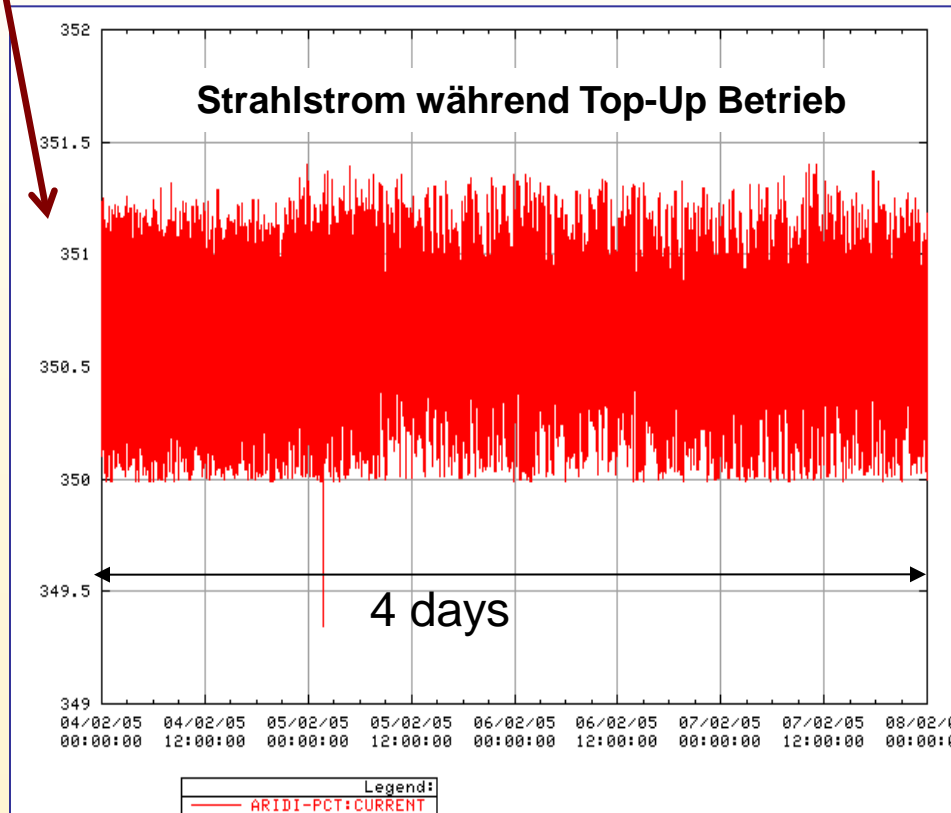
Integrierter Boosterring
mit voller Energie →
Top-Up Betrieb

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:

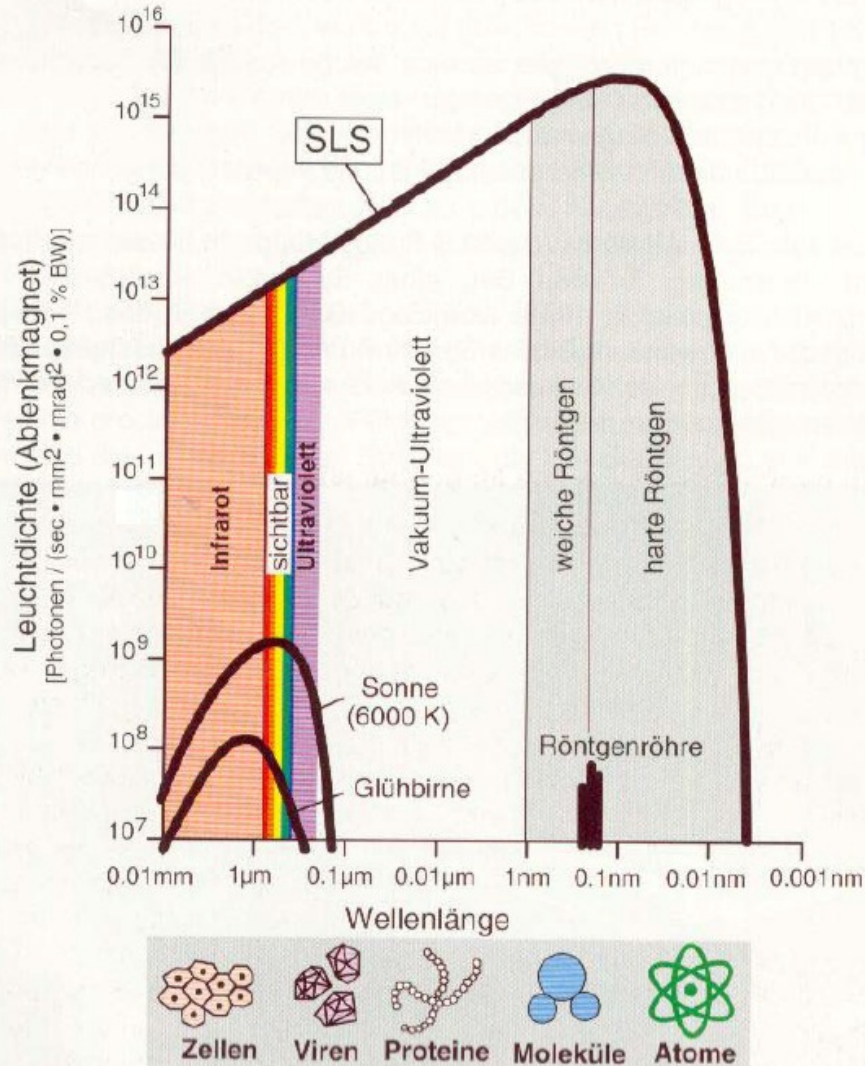
- Strahl-Injektion alle ~2mins
- Strahlstrom: $\pm 1\text{mA}$
- ▶ thermische Stabilität
- ▶ konstante Empfindlichkeit der Positionsmonitore

SLS Rekordemittanz (vertikal):

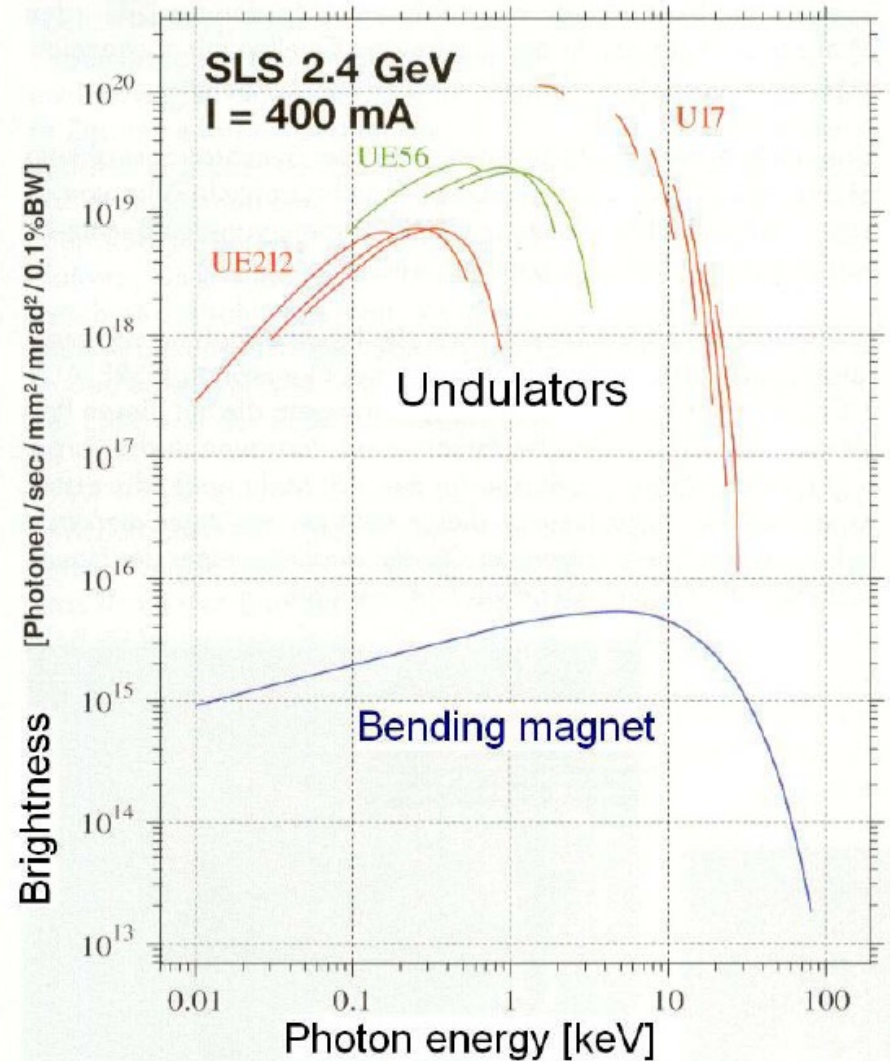
$$\varepsilon_y = 1..10 \cdot 10^{-12} \text{m rad}$$

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

SLS Anwendungen – Wellenlänge der Strahlung

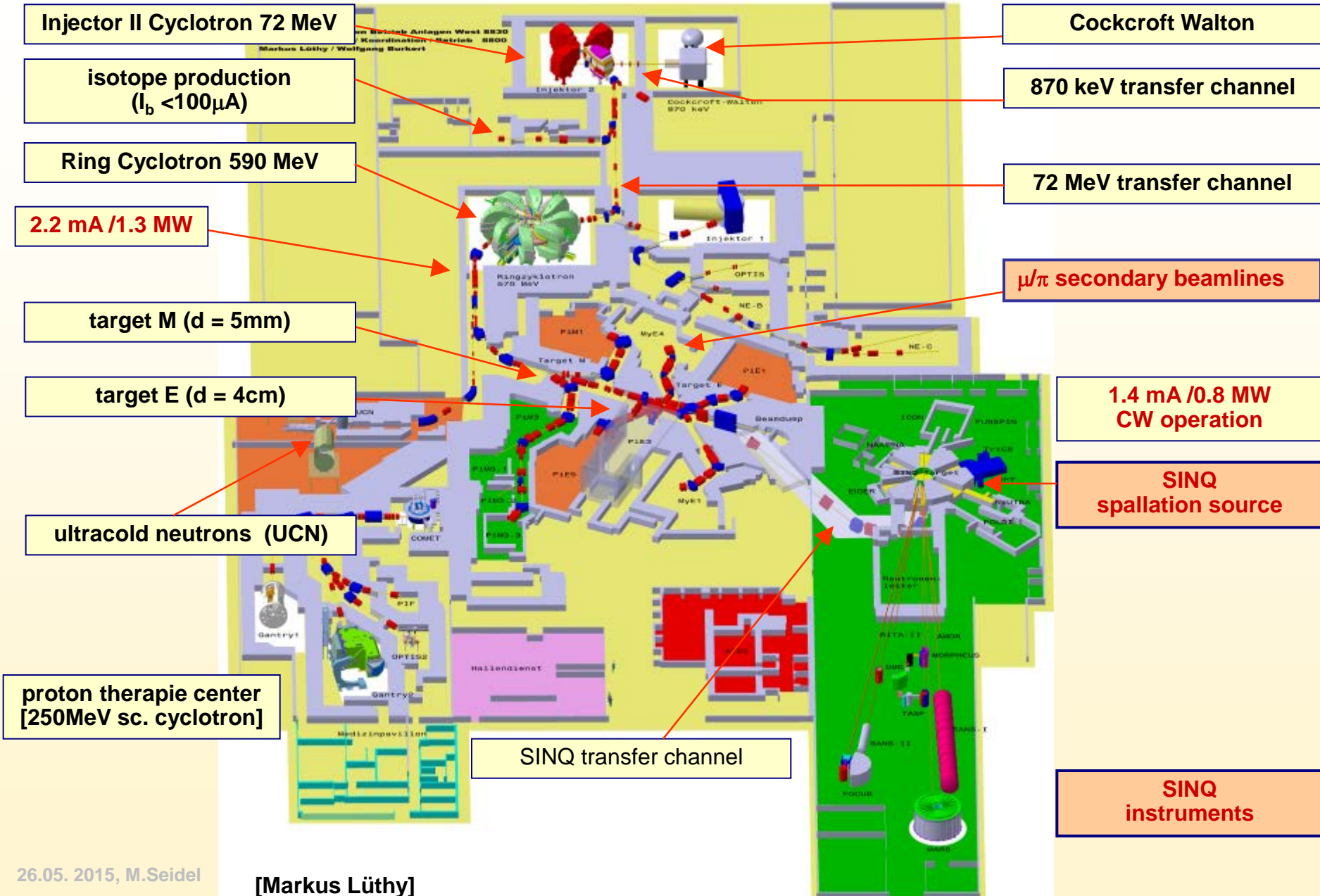


Bending magnet brightness in comparison to light bulb, sun and X-ray tube



Undulator brightness in comparison to bending magnet brightness

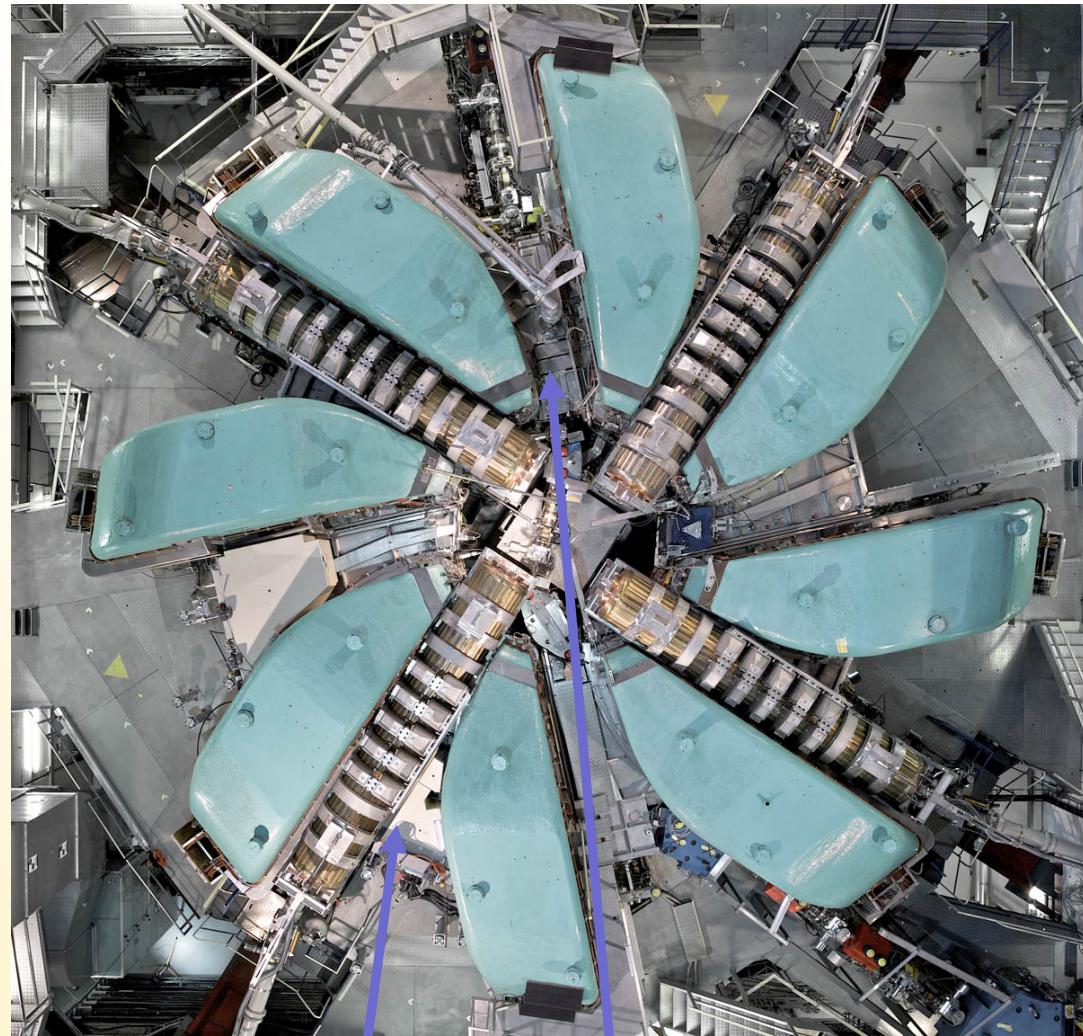
Übersicht PSI Protonenbeschleuniger



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

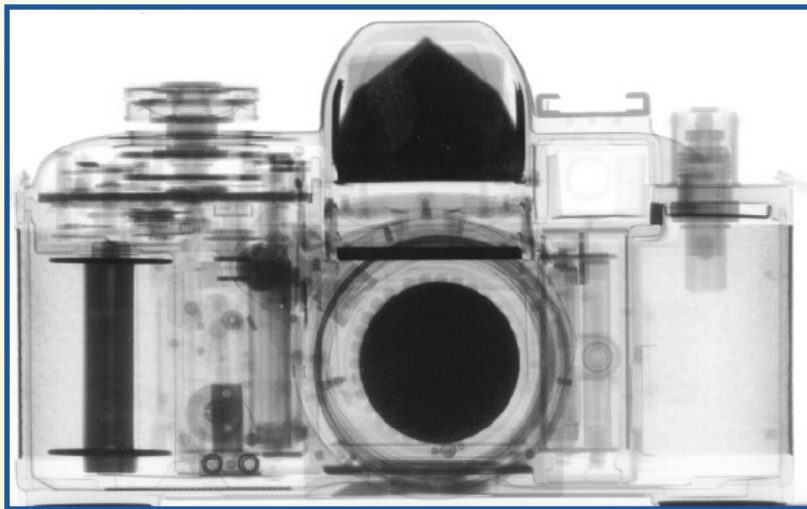
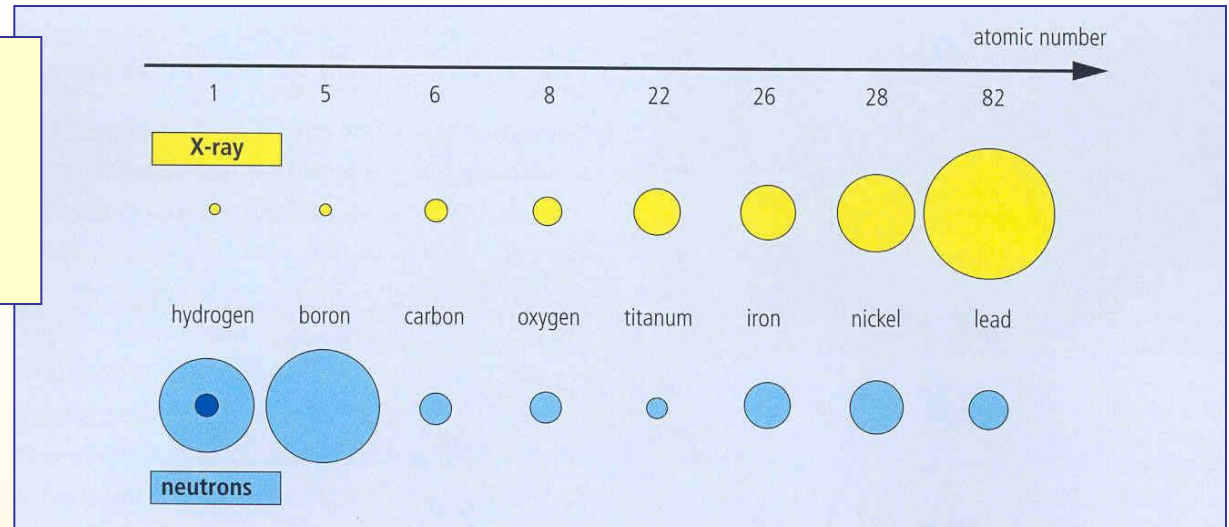


50MHz
Resonator

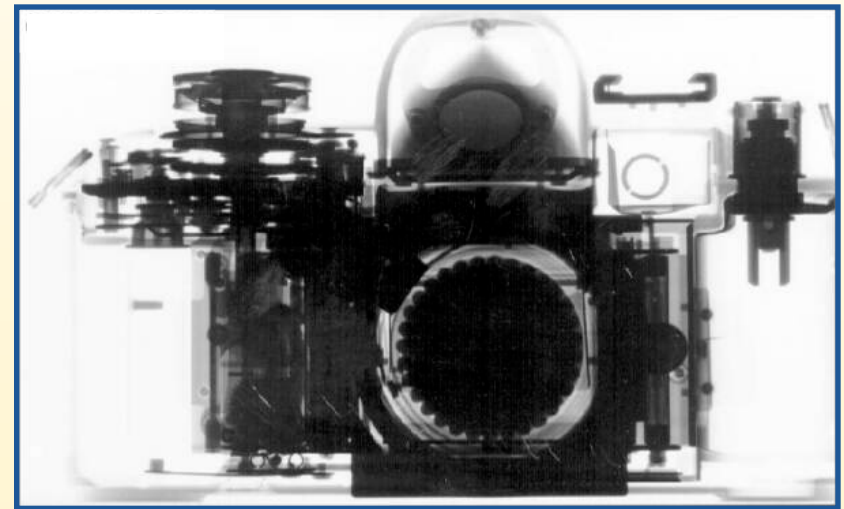
150MHz (3 harm.)
Resonator

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

