

Polarisierte Elektronenstrahlen – ein wichtiges Werkzeug zur Untersuchung der Kernkraft

Wolfgang Hillert

Elektronen-Stretcher Anlage



Physikalisches Institut der Universität Bonn

Drei einfache Fragen:

- **Wozu braucht** man polarisierte Elektronen?
- **Wie erzeugt** man polarisierte Elektronen?
- **Wie beschleunigt** man polarisierte Elektronen?

Aufbau der Materie

**Elektromagnetische
Wechselwirkung**

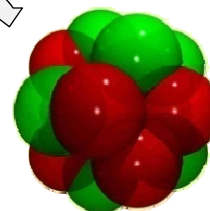
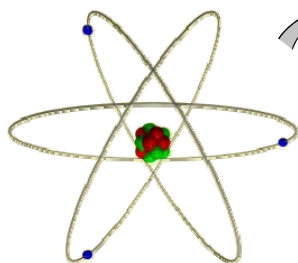
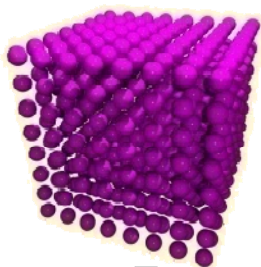
**Starke
Wechselwirkung**

Kristallgitter

Atom

Atomkern

Hadron



10^{-9}m

10^{-10}m

10^{-14}m

10^{-15}m

„Nanometer“

„Femtometer“

Baryonen - Spektroskopie

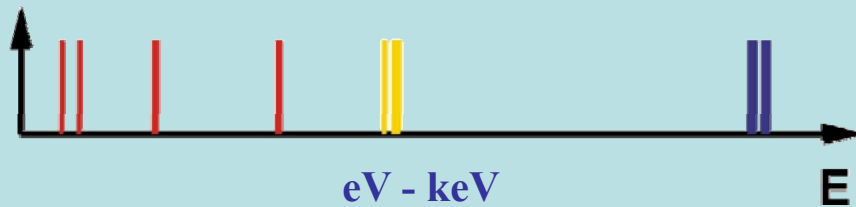
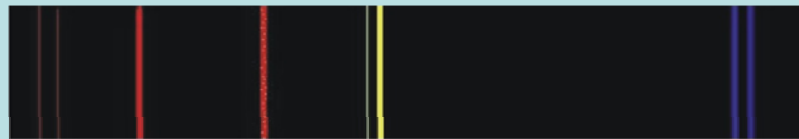
Atomphysik



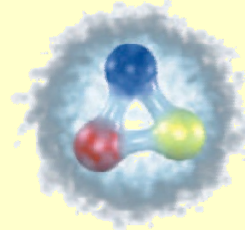
Atom: 10^{-10} m

Anregung mit Photonen:

Linienpektrum



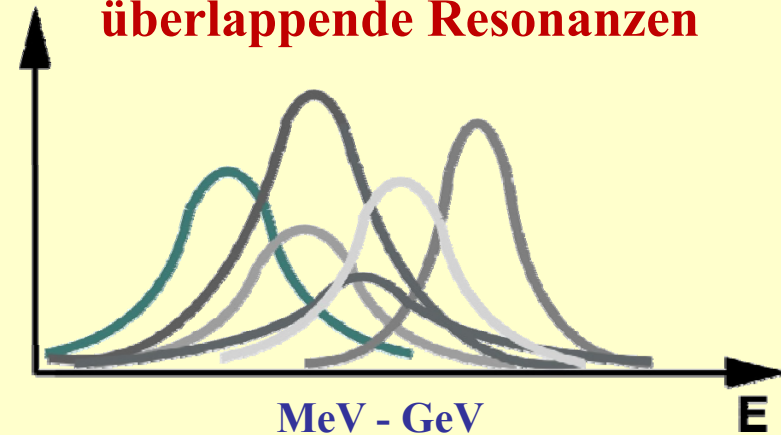
Hadronenphysik



Hadron: 10^{-15} m

Anregung mit Photonen:

überlappende Resonanzen

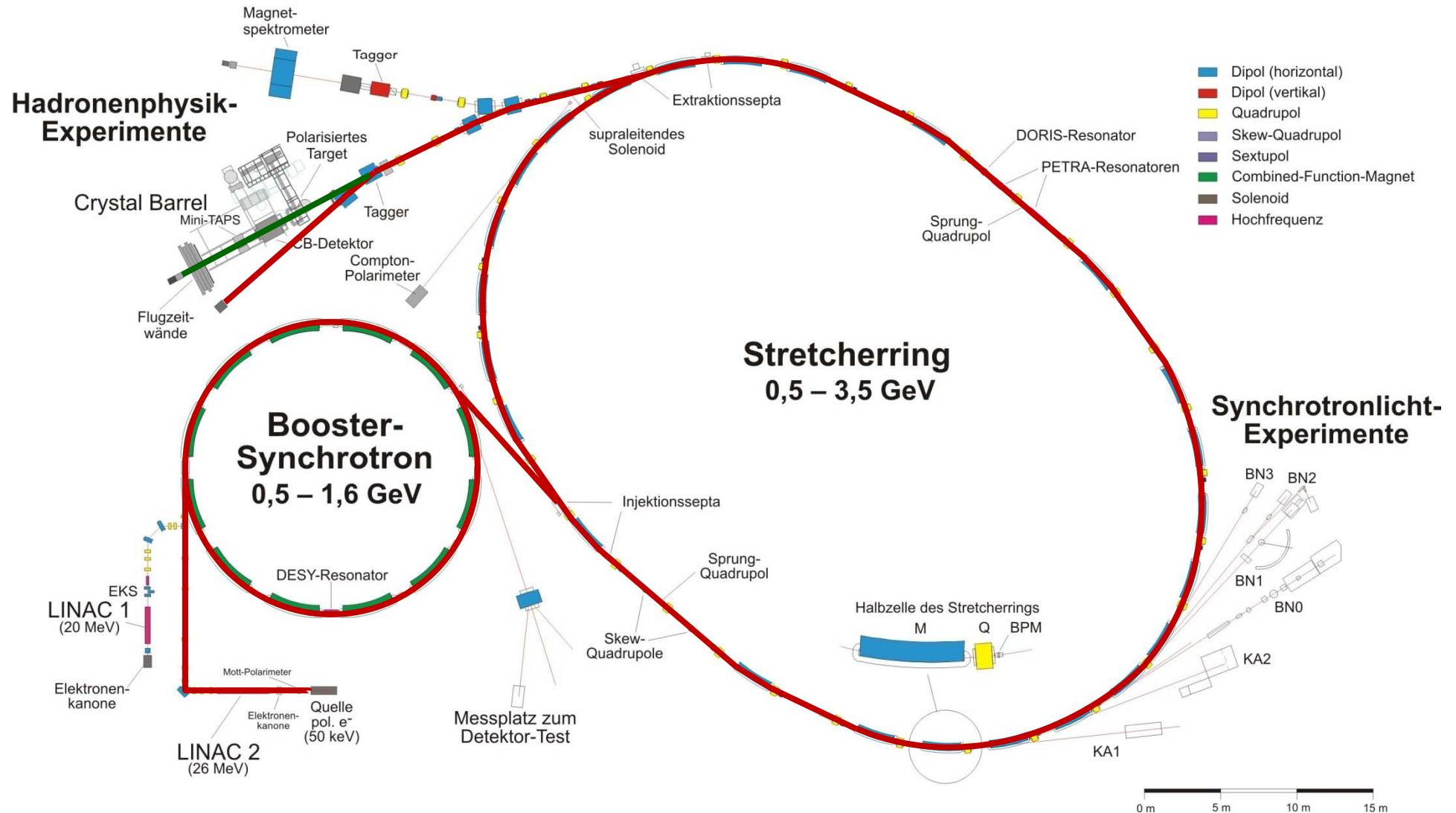


Linienbreite aus $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$

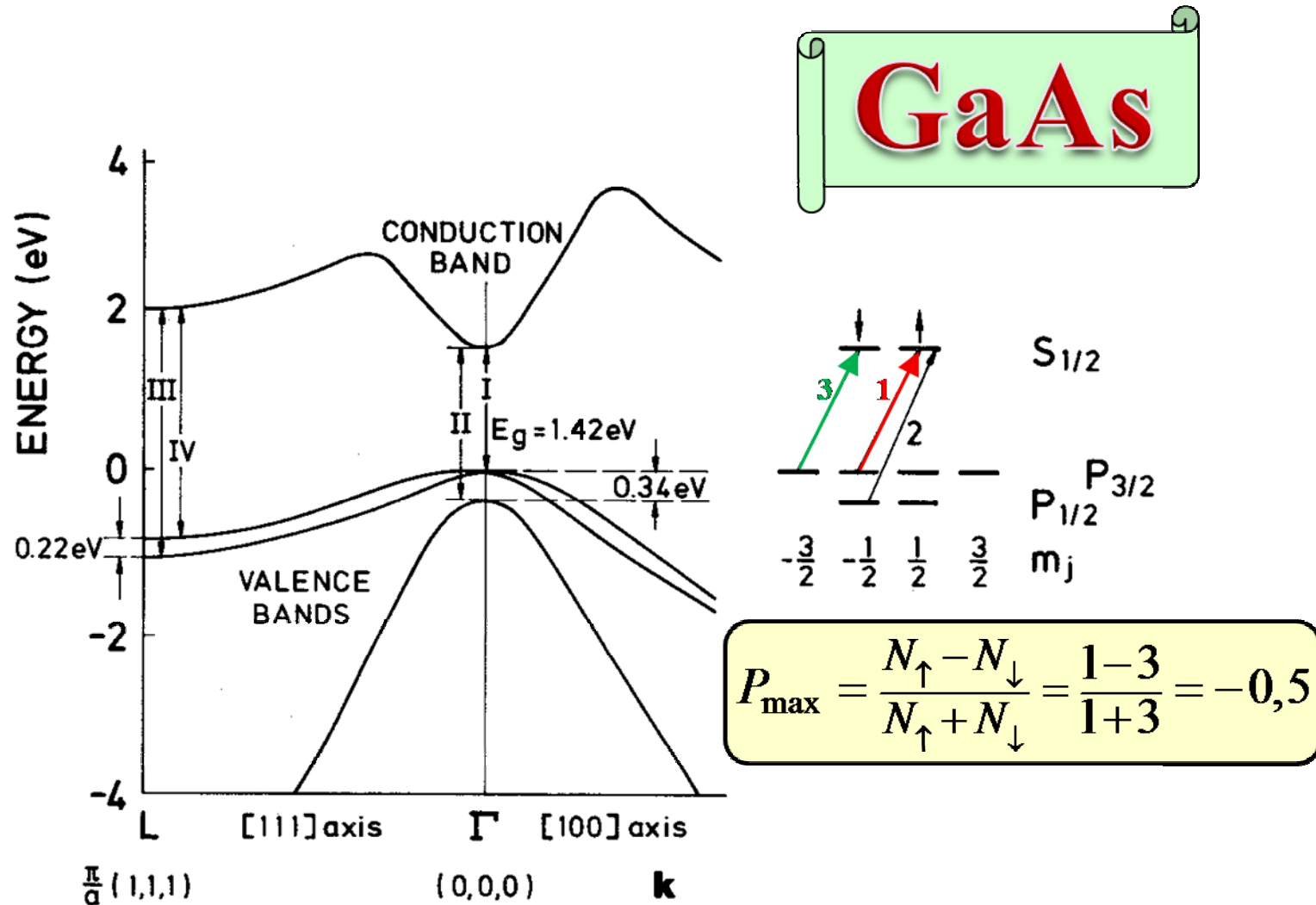
→

Doppelpolarisationsexperimente

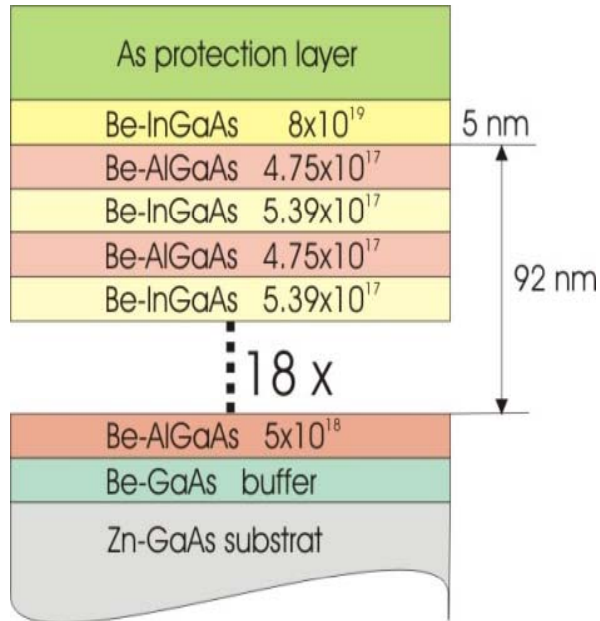
Elektronen-Stretcher-Anlage (ELSA)



Erzeugung polarisierter Elektronen

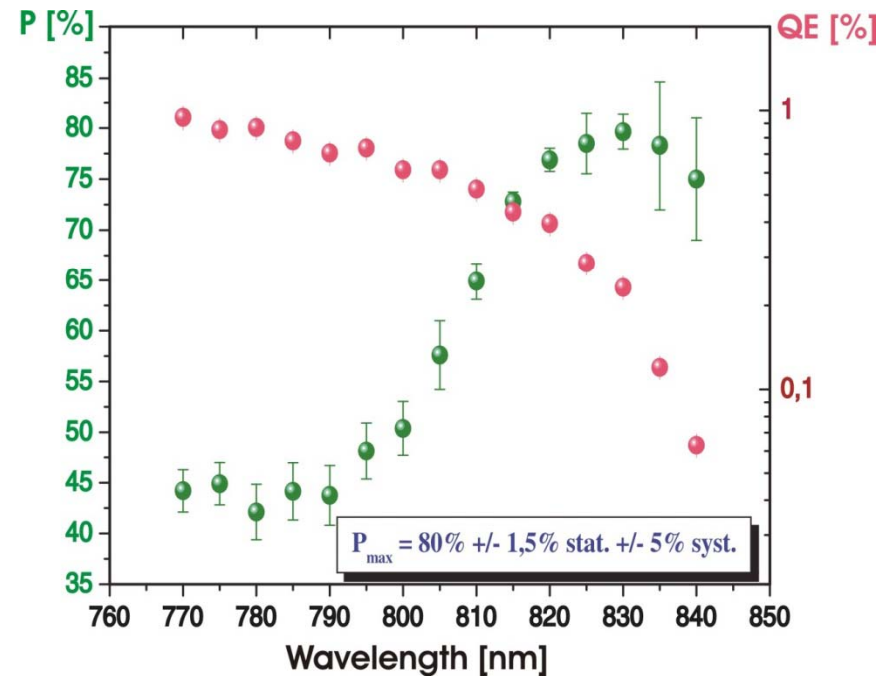


Erzeugung polarisierter Elektronen



Be-InGaAs/AlGaAs Superlattice

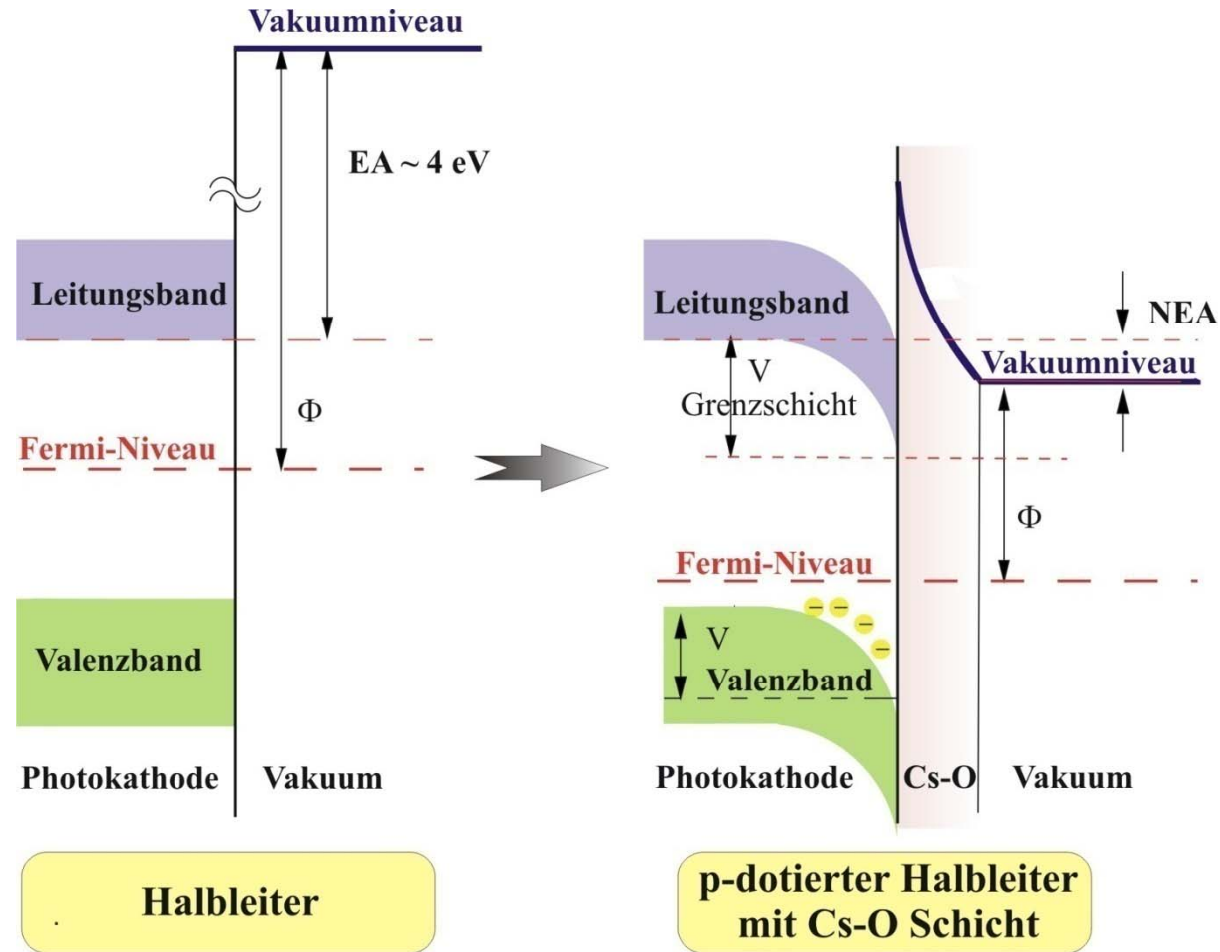
Polarisation



Aufhebung der Entartung:

- lokale Gitterverzerrung (strain)
- Mehrschicht-Strukturen (superlattice)

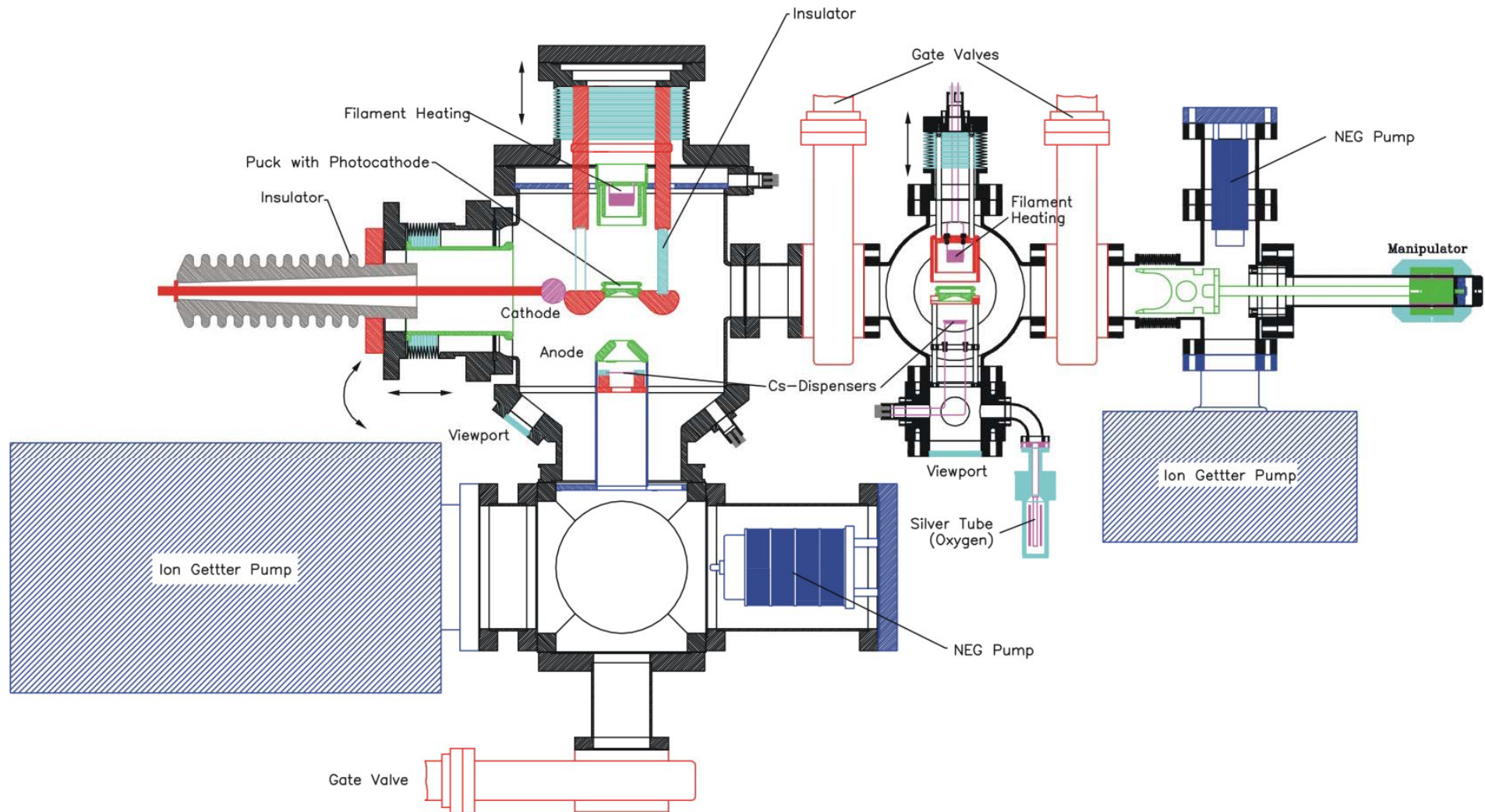
Erzeugung polarisierter Elektronen



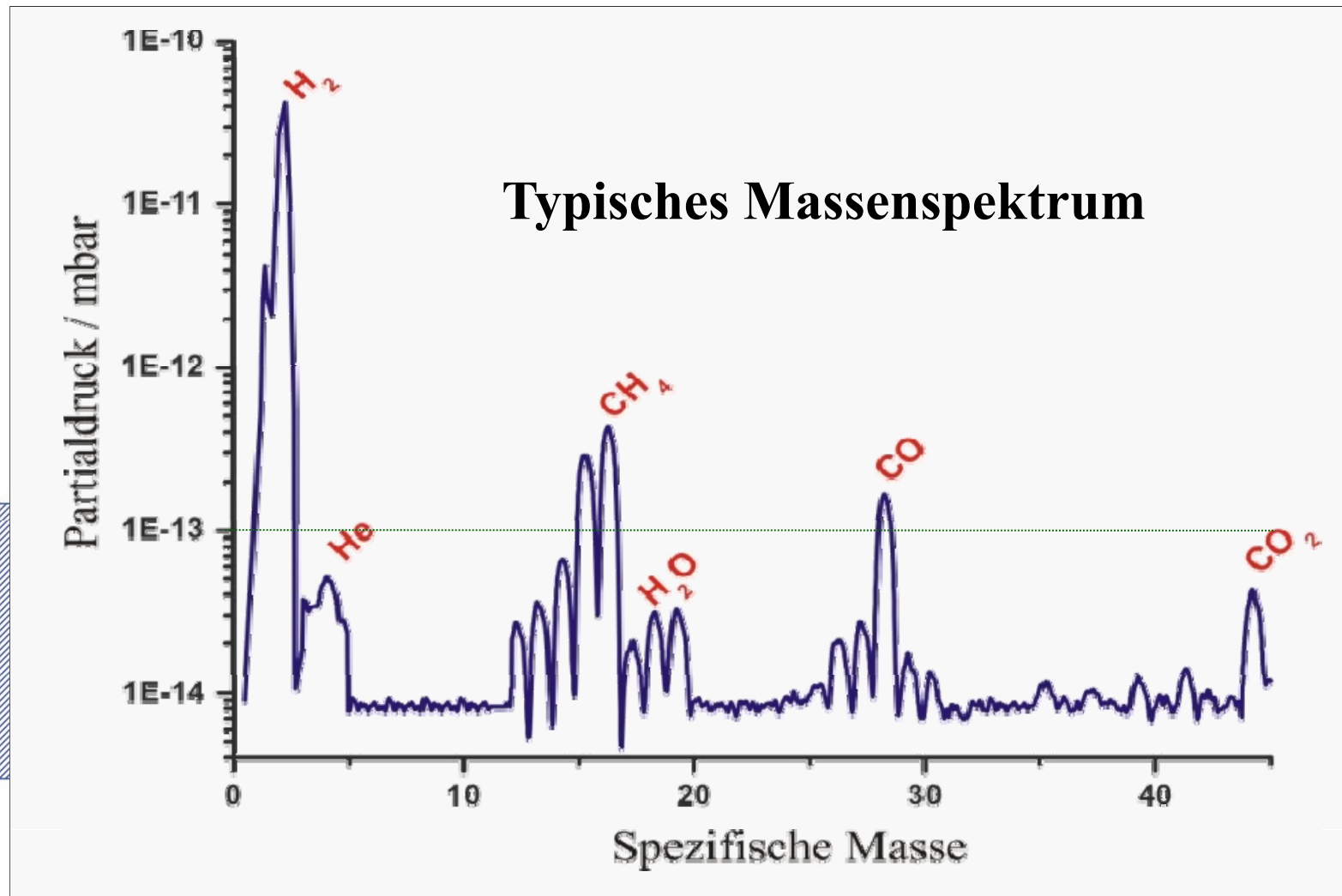
Reinigung und Bedampfung im extremen UHV

Lebensdauer 100 h \leftrightarrow $P(\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2) < 10^{-12}$ mbar

Elektronenquelle



Elektronenquelle



G Pump

Manipulator

Quelle polarisierter Elektronen



Betriebsparameter:

Strahlenergie: 48 keV

Strahlstrom: 100 mA

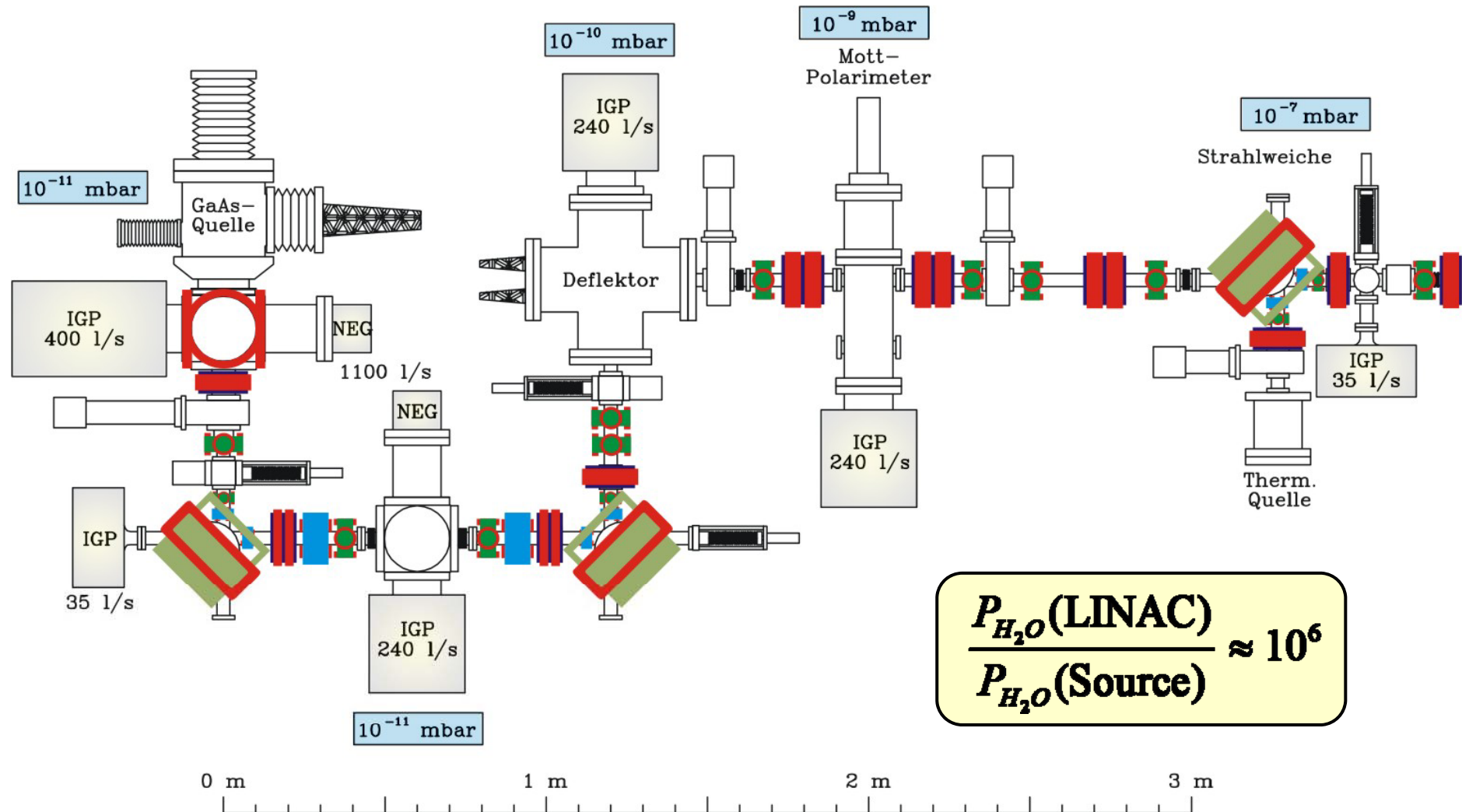
Wiederholrate: 50 Hz

Polarisation: $\approx 80\%$

Lebensdauer: > 3000 h

Kathode: Be-InGaAs/AlGaAs

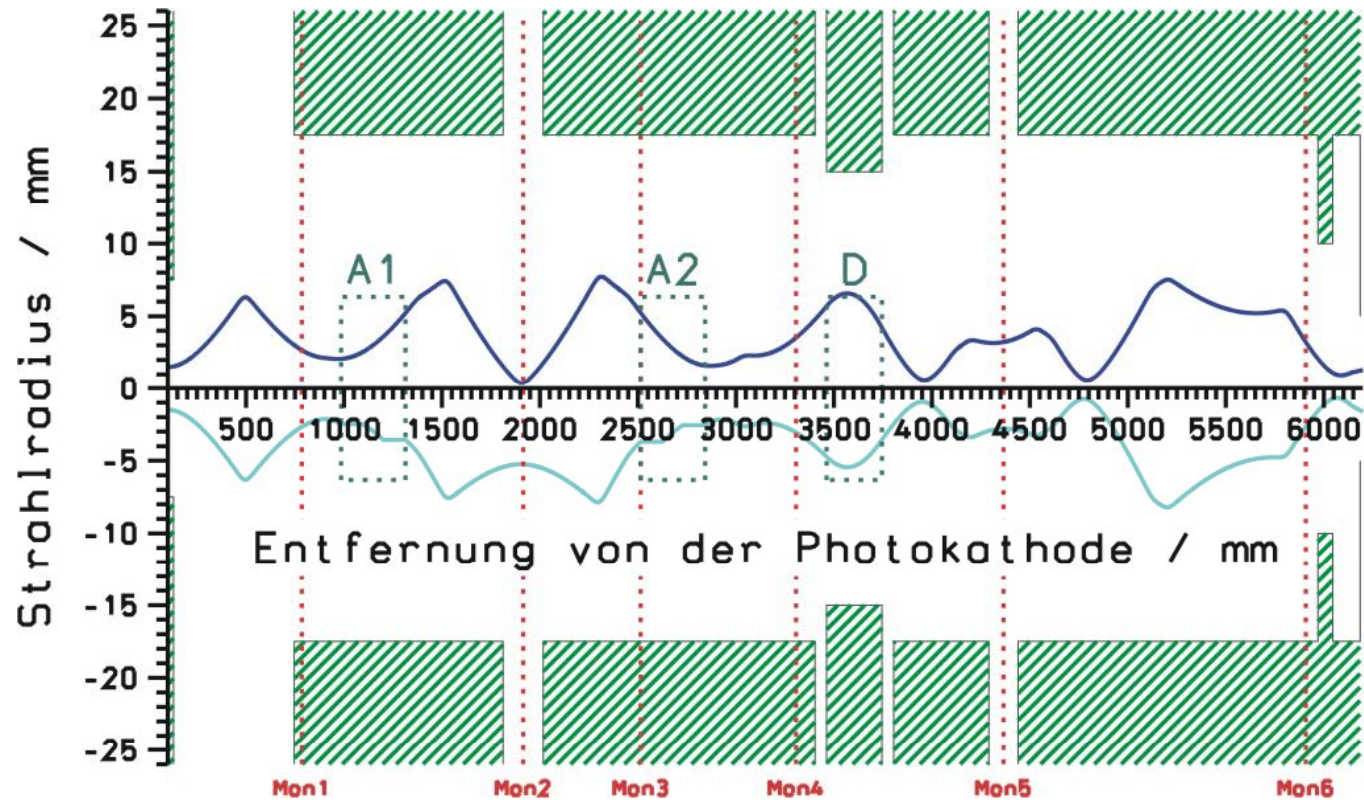
Strahlführung zum LINAC



$$\frac{P_{H_2O}(\text{LINAC})}{P_{H_2O}(\text{Source})} \approx 10^6$$

Strahltransport

Quelle



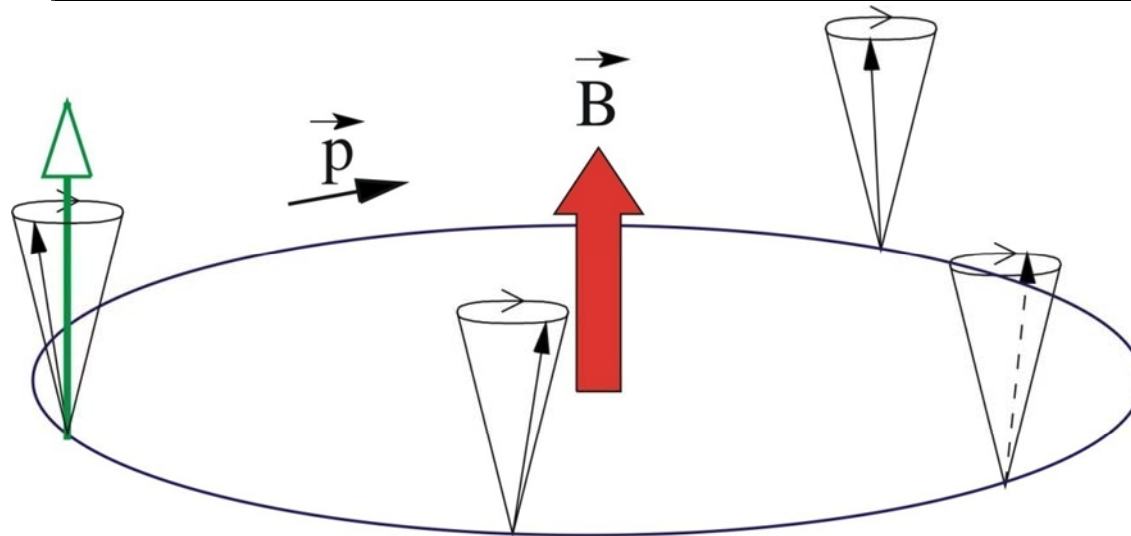
LINAC

$$\frac{d^2x}{ds^2} + \{k_x(s) + S(s) + T(s)\} \cdot x - \frac{\varepsilon_x^2}{x^3} - \frac{2\zeta}{x+y} = 0$$

$$\frac{d^2y}{ds^2} + \{k_y(s) + S(s) + T(s)\} \cdot y - \frac{\varepsilon_y^2}{y^3} - \frac{2\zeta}{x+y} = 0$$

Spin-Präzession

Spin-Arbeitspunkt: $Q_{sp} = \gamma a, \quad a = \frac{g-2}{2}$

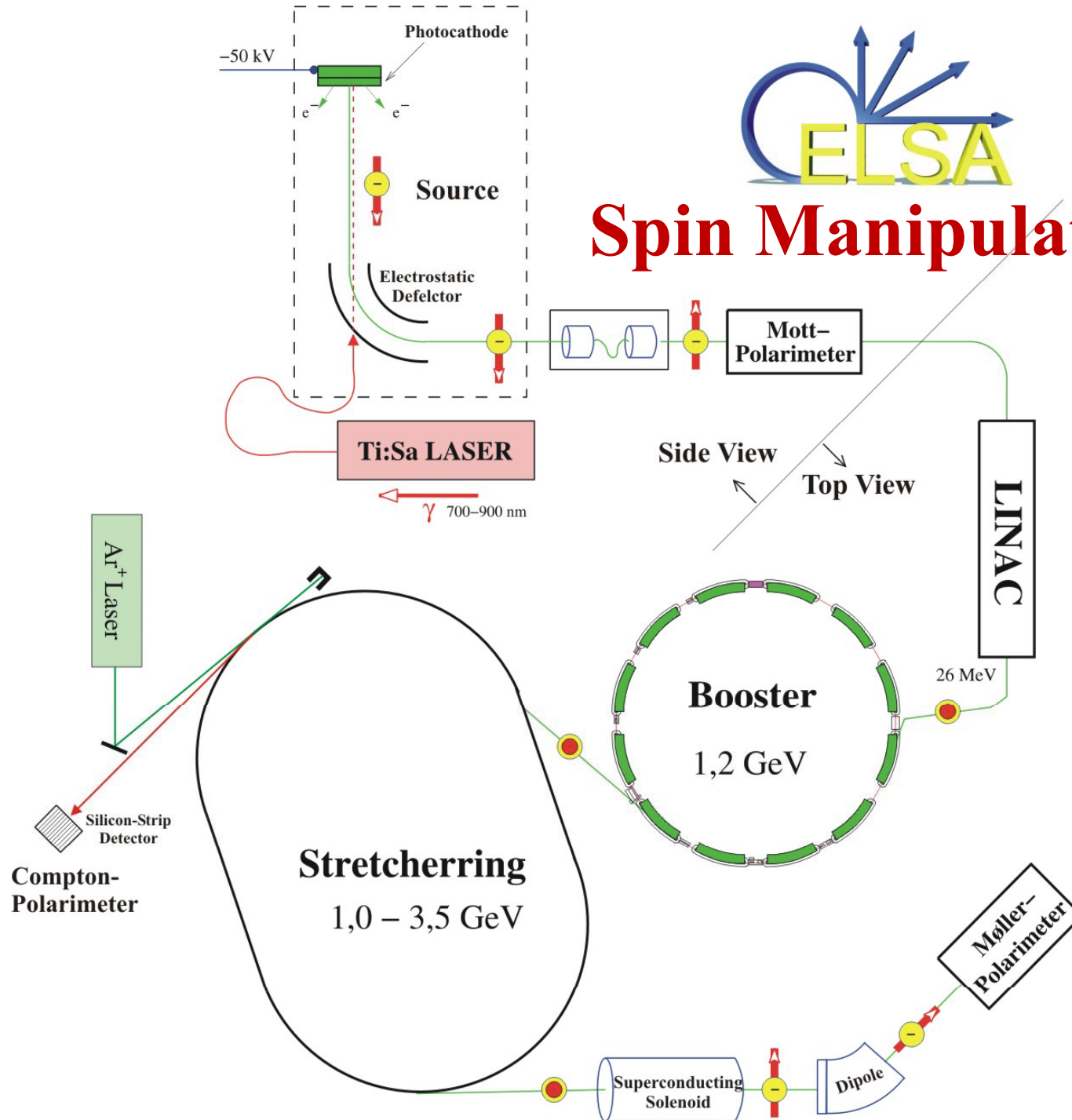


$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\Omega} \times \vec{S} \quad \vec{\Omega}^* = -\frac{e}{m_0} (1+a) \cdot \vec{B}$$

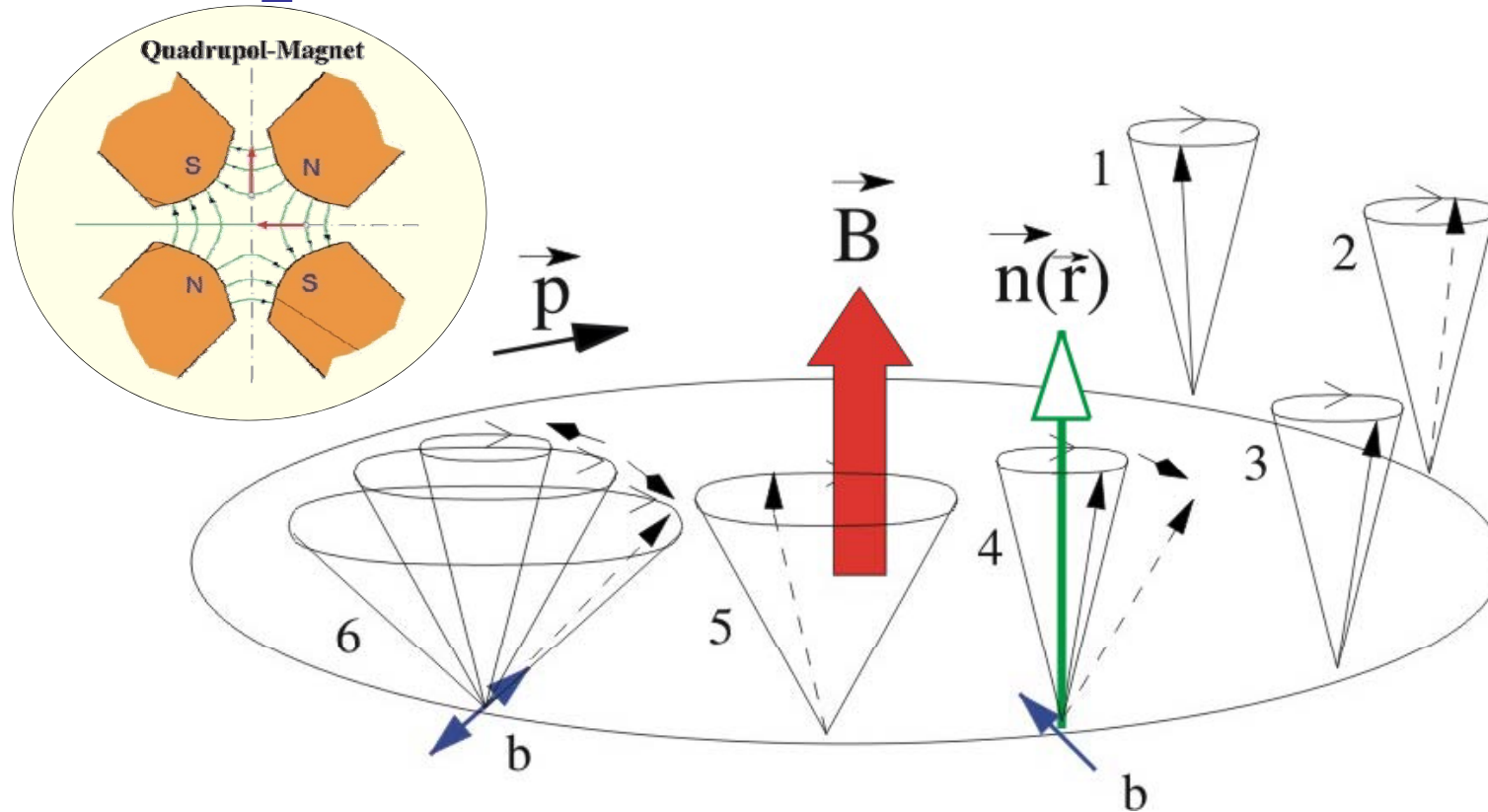
$$\vec{\Omega}_{BMT} = -\frac{e}{m_0 \gamma} \left\{ (1+a\gamma) \cdot \vec{B}_\perp + (1+a) \cdot \vec{B}_\parallel \right\}$$



Spin Manipulation



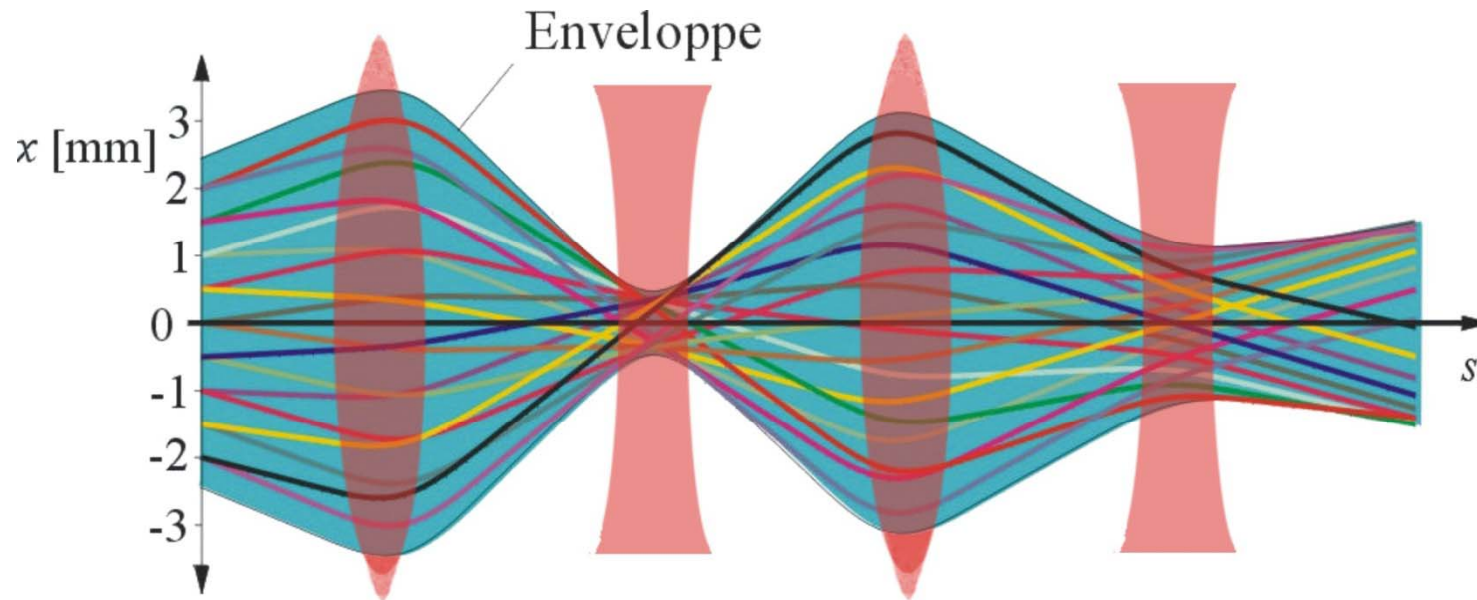
Depolarisierende Resonanzen



Imperfektions-Resonanz: $\gamma \cdot a = n, \quad n \in \mathbb{Z}$

Intrinsische Resonanz: $\gamma \cdot a = n \cdot P \pm Q_z, \quad n \in \mathbb{Z}$

Depolarisierende Resonanzen



Starke Fokussierung: Betatronschnwingungen!

Imperfektions-Resonanz: $\gamma \cdot a = n, \quad n \in \mathbb{Z}$

Intrinsische Resonanz: $\gamma \cdot a = n \cdot P \pm Q_z, \quad n \in \mathbb{Z}$

Imperfektions-Resonanzen

Kreuzungsgeschwindigkeit begrenzt, daher

Reduktion der Resonanzstärke nötig:

- Präzise **Justierung** aller Magnete ($\Delta z \approx 0.1 \text{ mm}$)
- Korrektur von **Feldfehlern**
- **Strahlzentrierung** in den Quadrupol-Magneten
- Berücksichtigung **dynamischer Effekte**

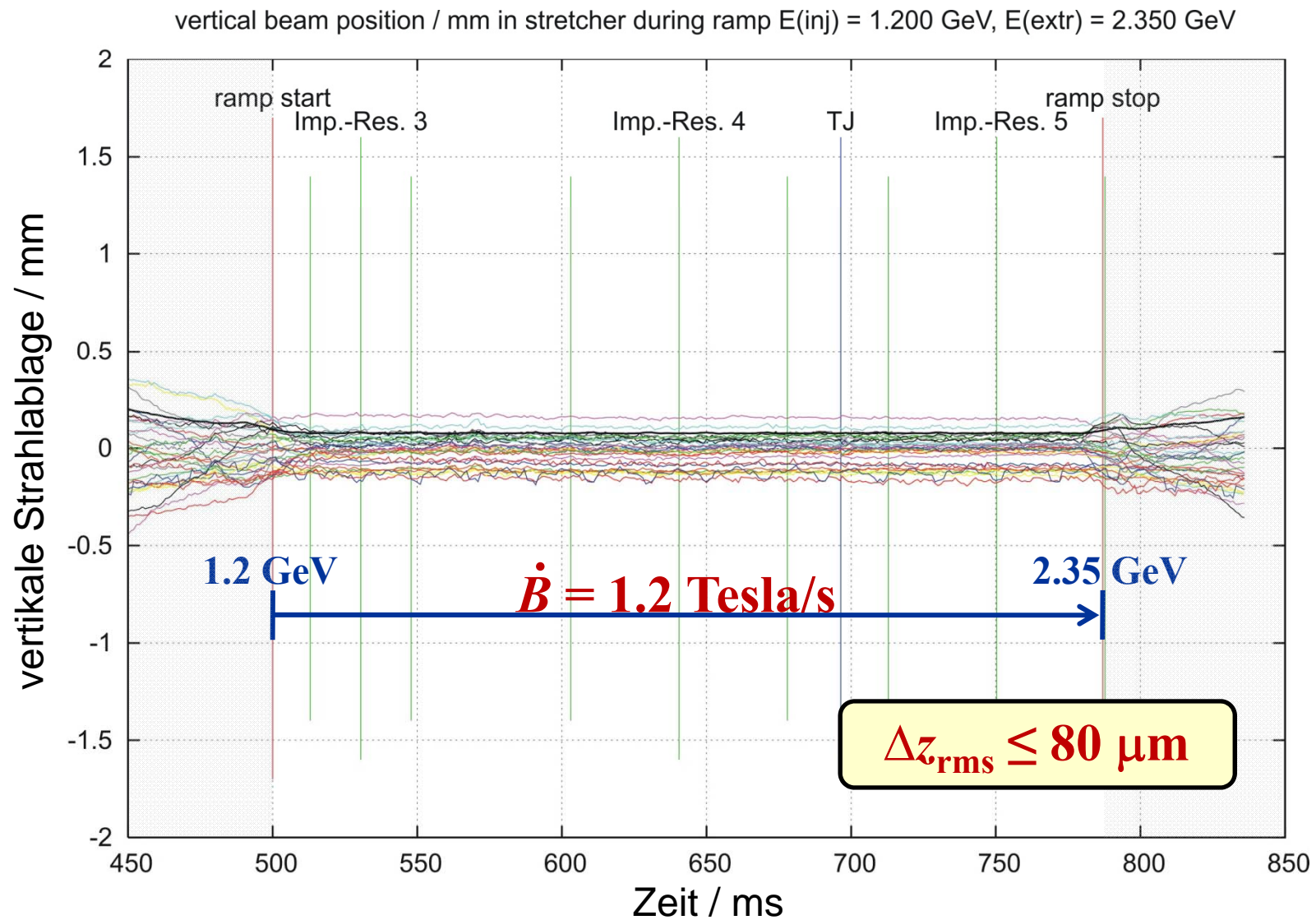
Korrektur der Gleichgewichtsbahn



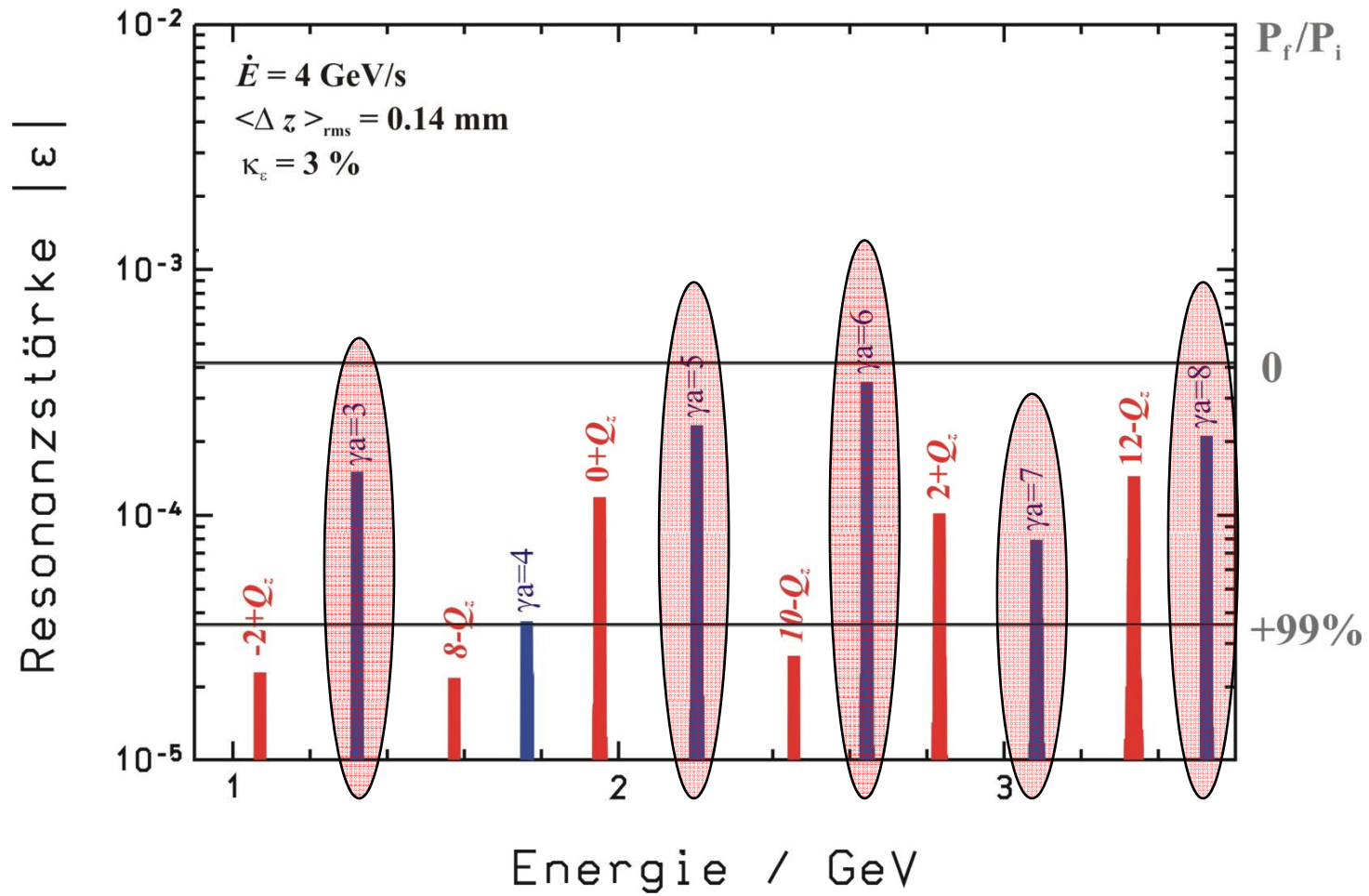
32 Positionsmonitore für 32 Quadrupol-Magnete
40 Korrektur-Magnete

- Messung der Strahllage jede Millisekunde
- Berechnung der Korrekturströme
- Generierung einer Stromrampe für jeden Korrektor

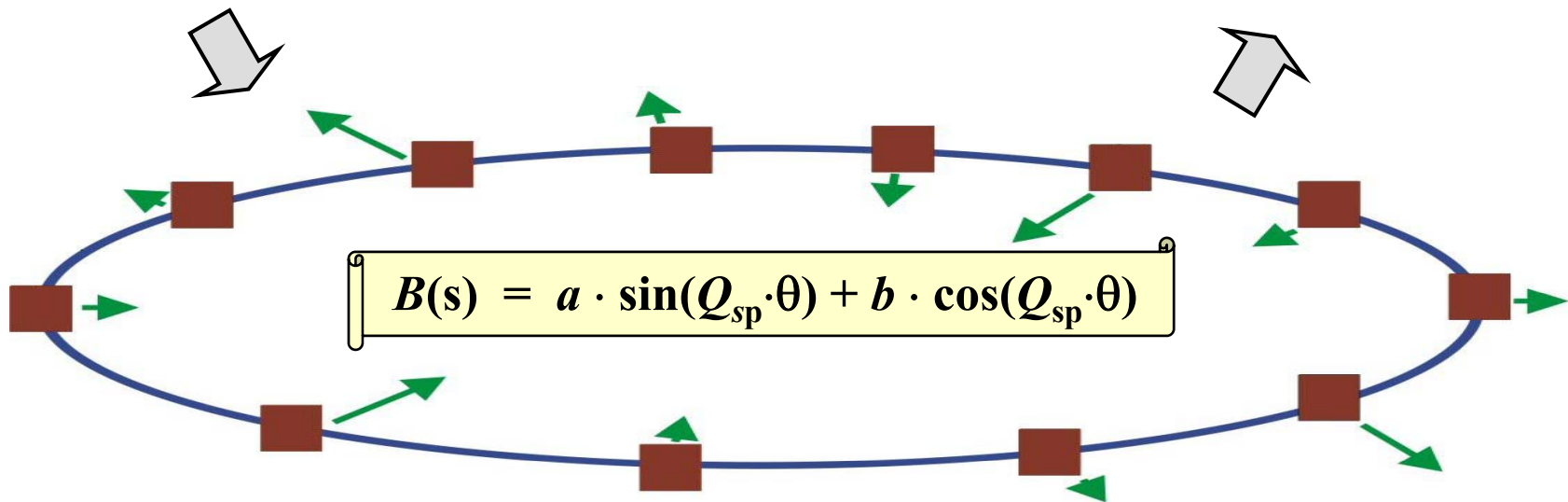
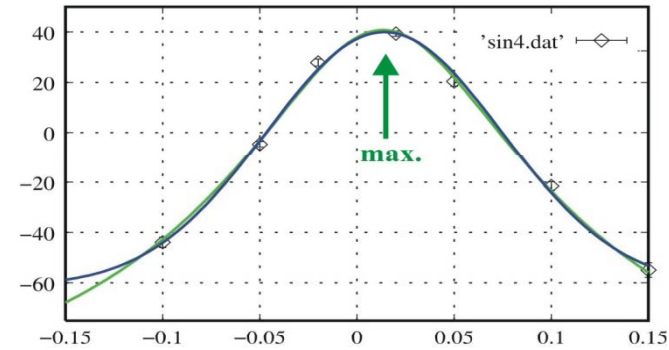
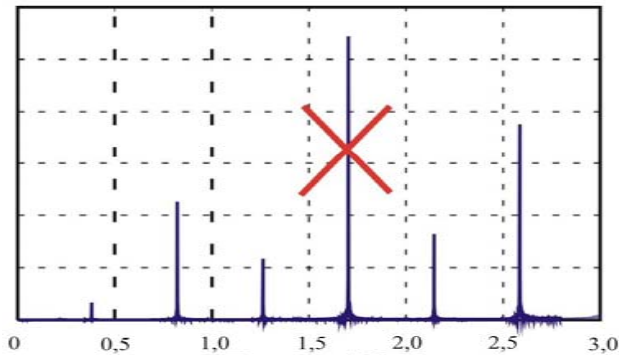
Orbit-Korrektur auf der Rampe



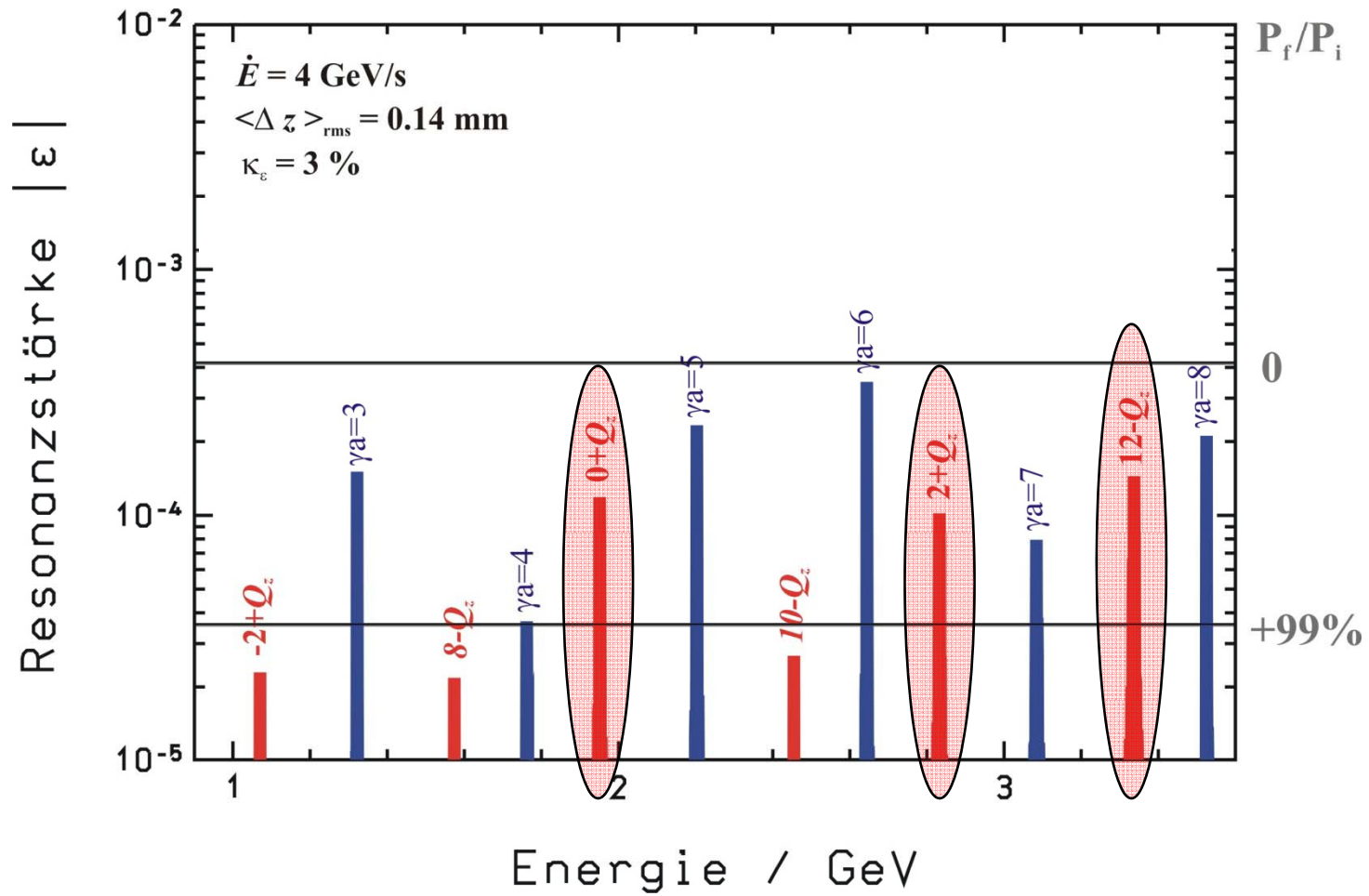
Resonanzstärken



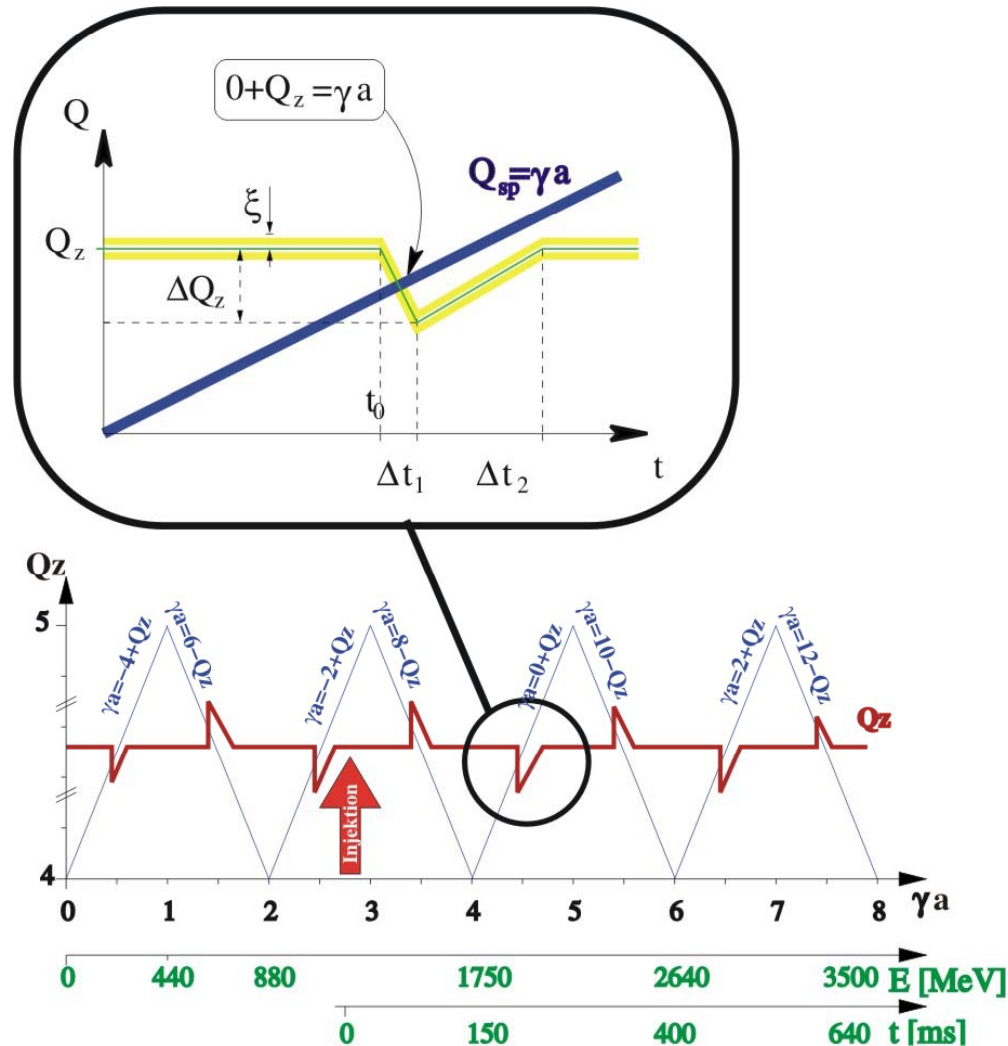
Harmonischen Korrektur (Imperfektions-Resonanzen)



Resonanzstärken



„Arbeitspunktspringen“ (Intrinsische Resonanzen)



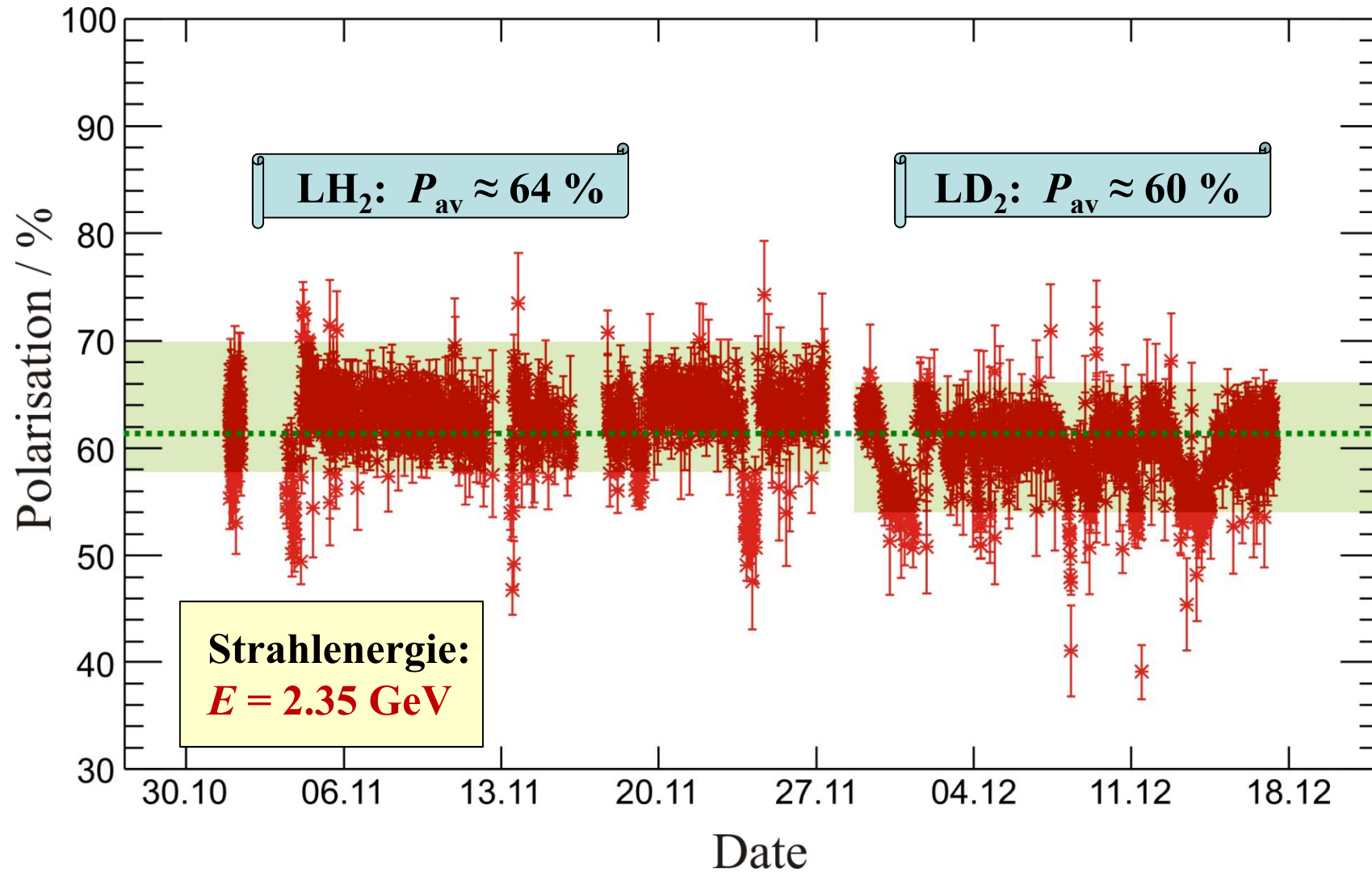
Sprungquadrupol



Panofsky-Typ Quadrupol mit
Ferrit-Joch

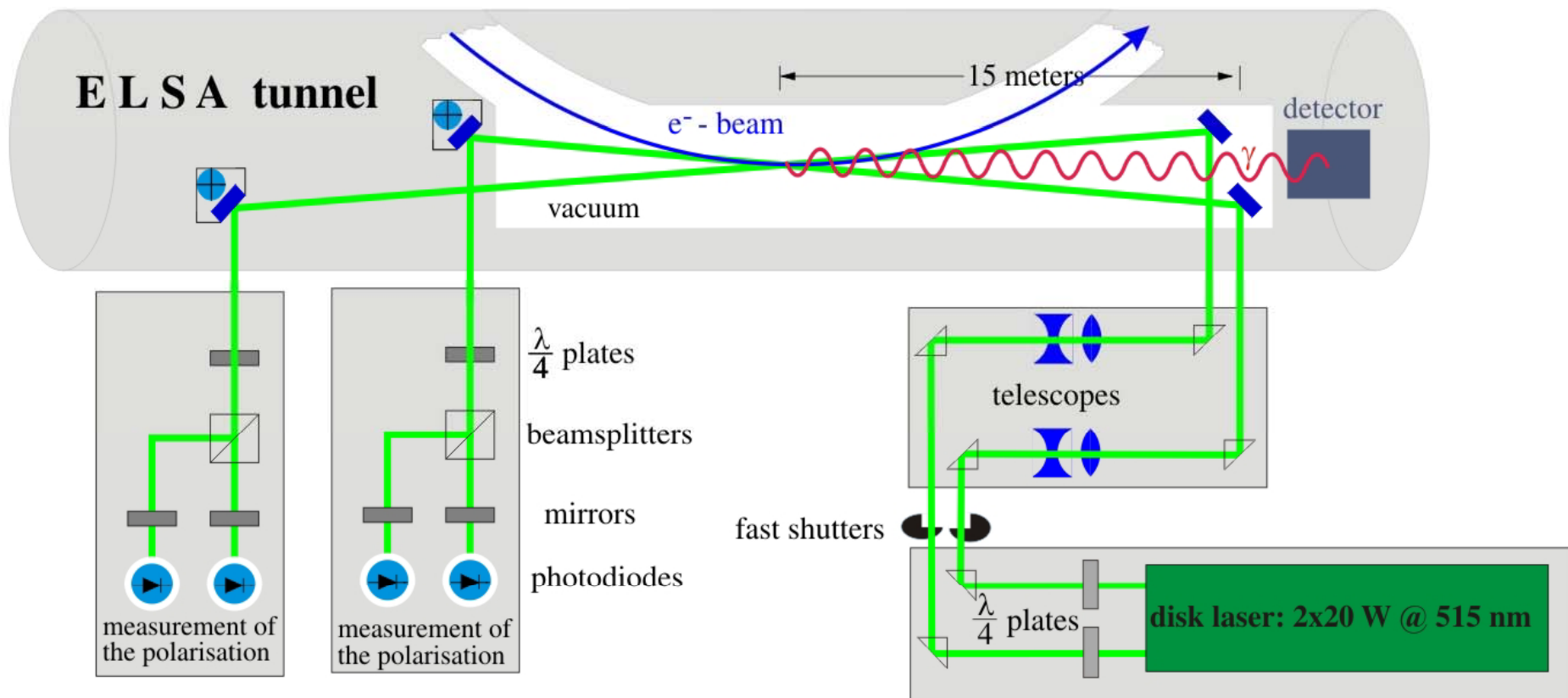
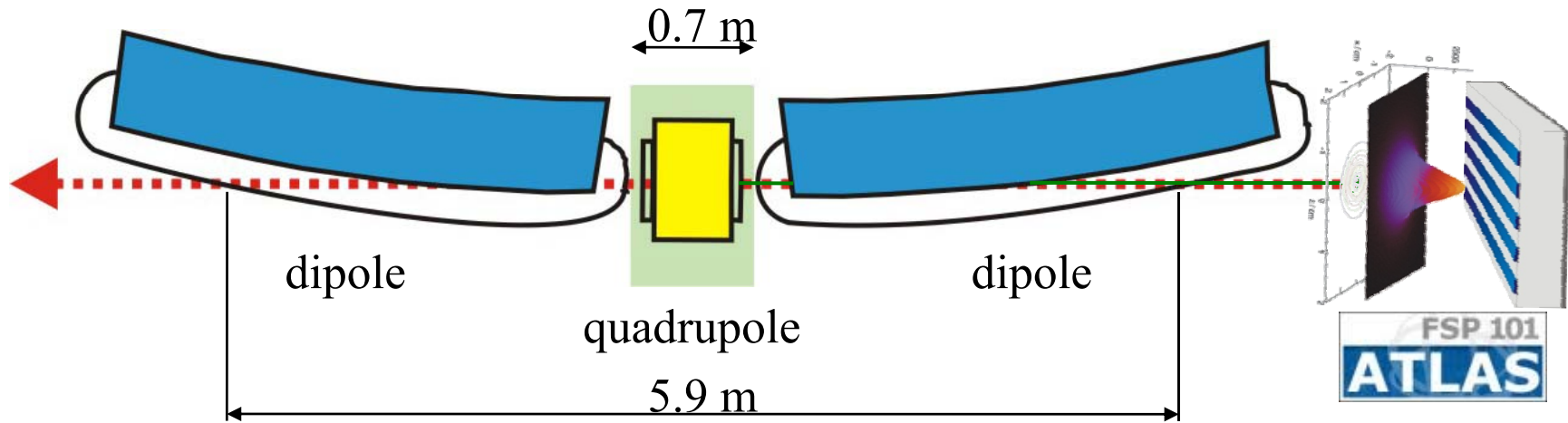
Vakuumkammer:	AL ₂ O ₃ Keramik mit 10 μm Titanbeschichtung
Widerstand:	(4,298 ± 0.001) mΩ (DC)
Induktivität:	(9,0 ± 0,1) μH (DC)
max. Pulsstrom:	500 A
max. Feldgradient:	(1,1241 ± 0,005) T/m
steigende Flanke:	4 - 14 μs
fallende Flanke:	4 - 20 ms

Polarisation Nov. / Dez. 2008

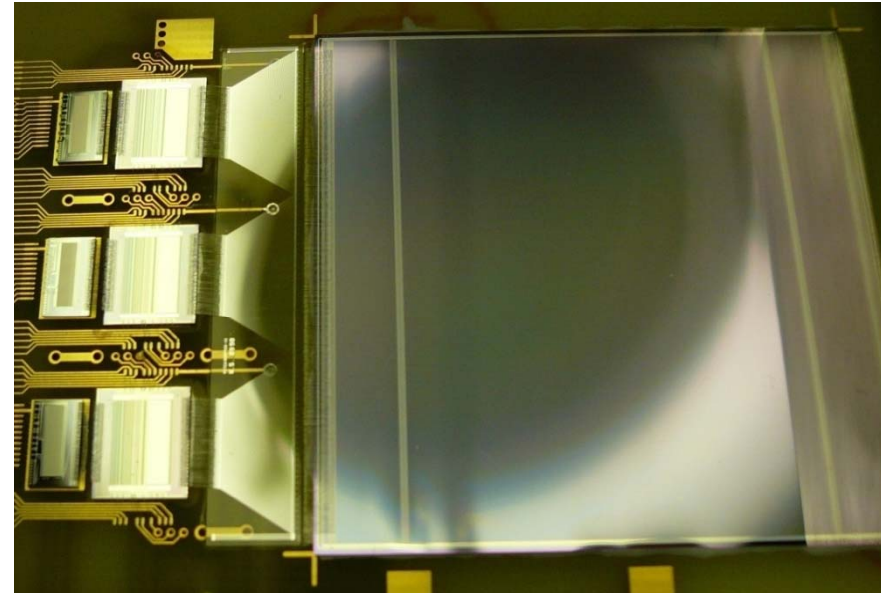
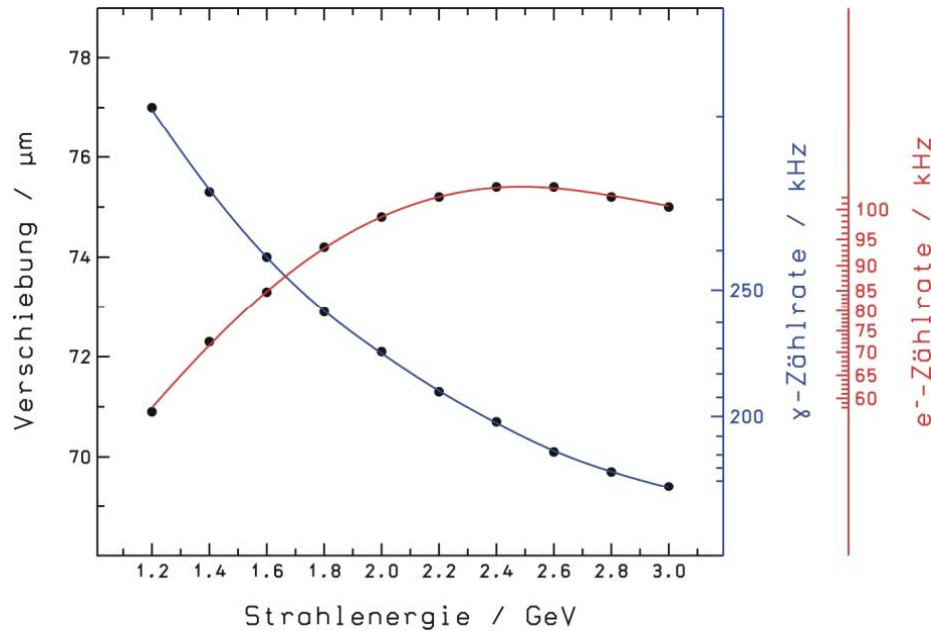


Aktuelles und Zukünftiges

- interne **Polarimetrie**
- (• höherer und geringerer **Strahlstrom**)
- neuer **Messplatz für Detektor-Tests**
- polarisierte Elektronen für die GSI: **ENC@FAIR**

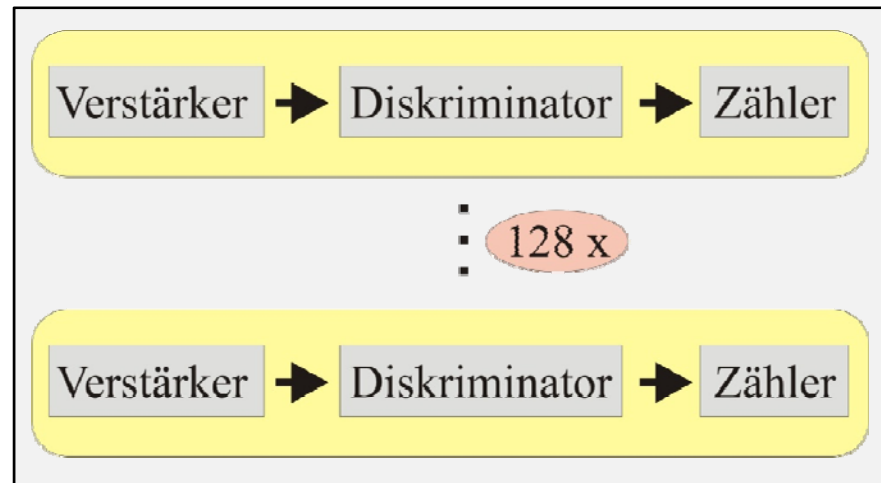


Compton-Detektor

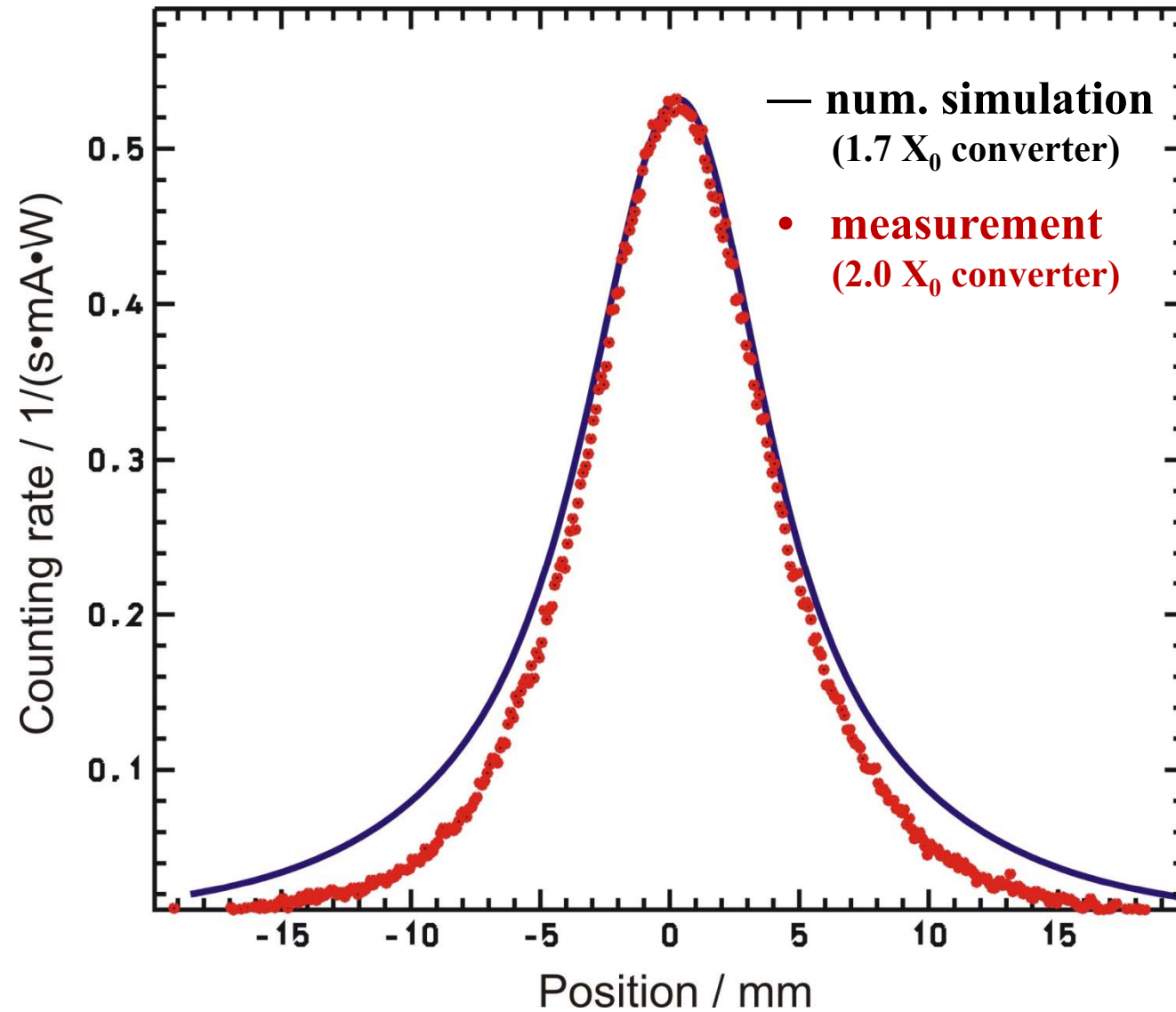


Silizium-Streifendetektor:

- 768 Kanäle
- 50 μm Streifenabstand
- LVDS Technologie
- FPGA / USB Auslese



Intensitätsverteilung



Messplatz für Detektortests

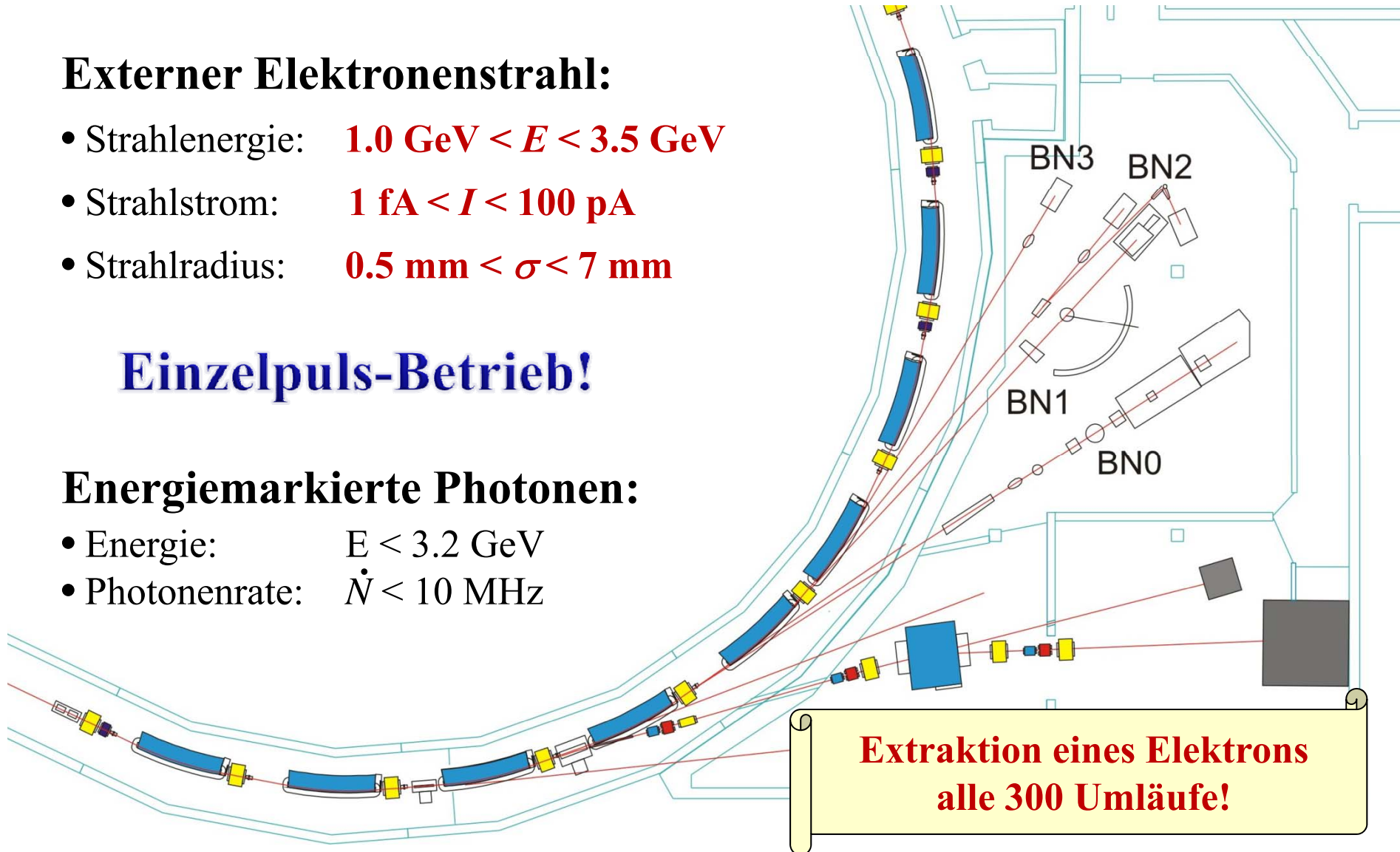
Externer Elektronenstrahl:

- Strahlenergie: $1.0 \text{ GeV} < E < 3.5 \text{ GeV}$
- Strahlstrom: $1 \text{ fA} < I < 100 \text{ pA}$
- Strahlradius: $0.5 \text{ mm} < \sigma < 7 \text{ mm}$

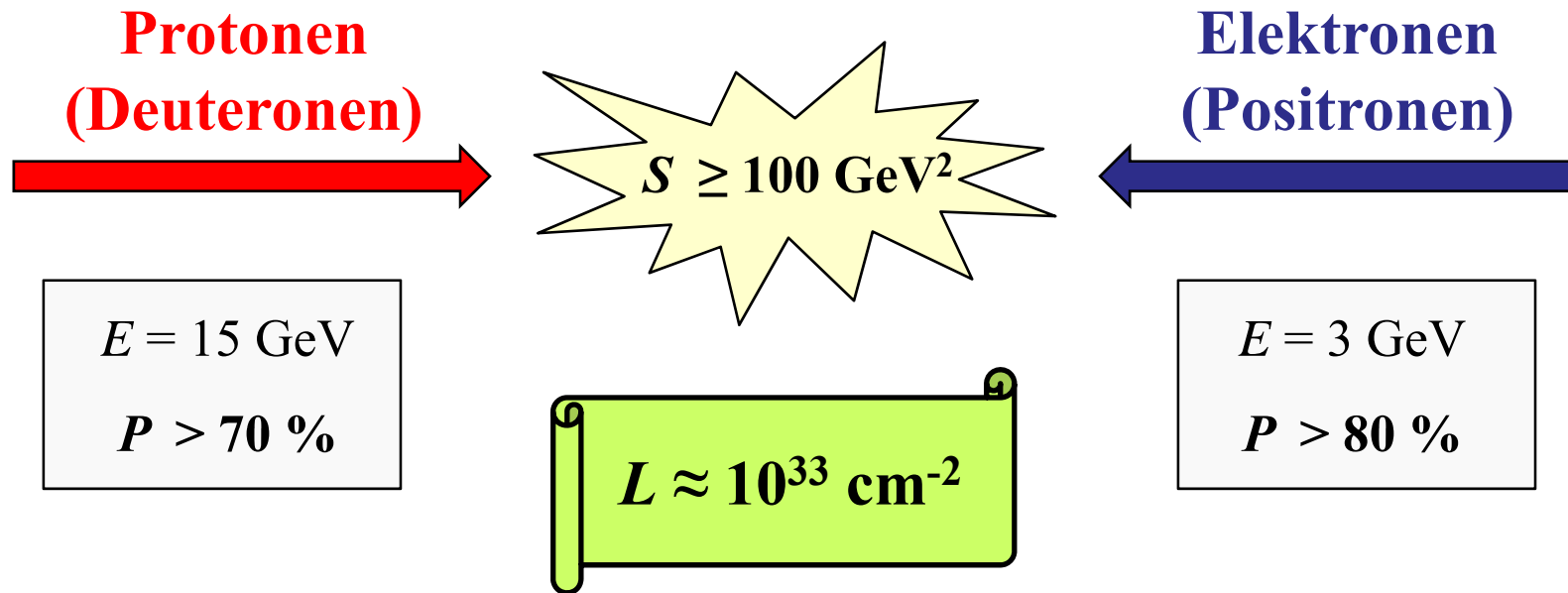
Einzelpuls-Betrieb!

Energiemarkierte Photonen:

- Energie: $E < 3.2 \text{ GeV}$
- Photonenrate: $\dot{N} < 10 \text{ MHz}$

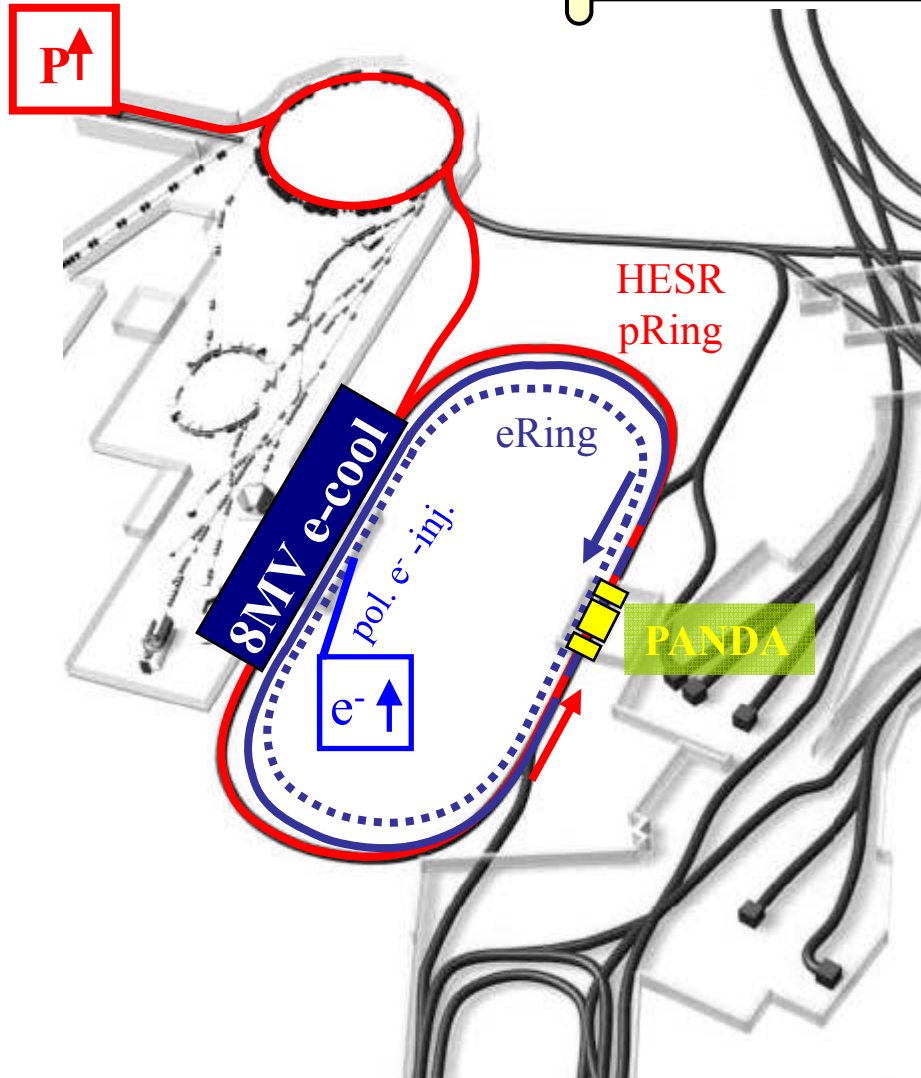


Elektronen-Nukleonen-Kollider



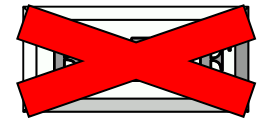
* ENC@FAIR: Sommer 2008

ENC@FAIR



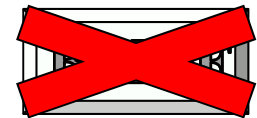
Hochenergie-Speicherring HESR:

- $R = 30$ m, $L = 576$ m
- $E = 15$ GeV (Protonen)
- $h = 100$, $n_p = 3,6 \cdot 10^{10}$
- $\varepsilon_n = 2$ mm mrad
- $P > 70$ %



Elektronen-Speicherring:

- $R \approx 25$ m, $L = 577.1$ m
- $E = 3.3$ GeV ($Q_{sp} \approx 7.5$)
- $h = 200$, $I_e = 4$ A
- $\varepsilon_n = 2$ mm mrad
- $P > 80$ %



ENC-Konsortium

K. Aulenbacher, A. Jankowiak,
W. Hillert, A. Lehrach, T. Weiss

Zusammenfassung

- **Routine-Betrieb mit polarisierten Elektronen:**
 - gepulster Photoinjektor mit $I = 100 \text{ mA}$, $P = 80\%$
 - Beschleunigung auf $E \leq 3.2 \text{ GeV}$ mit $P_{\text{Exp}} \geq 50\%$
- **Polarimetrie und Diagnose: Compton-Polarimeter**
- **Messplatz für Detektoren: $100 \text{ pA} > I > 1 \text{ fA}$**
- **ENC@FAIR: polarisierte Elektronen bei der GSI?!**

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!

In Betrieb

Im Aufbau