

Polarisierte Teilchenstrahlen in Kreisbeschleunigern

Wolfgang Hillert

Elektronen-Stretcher Anlage

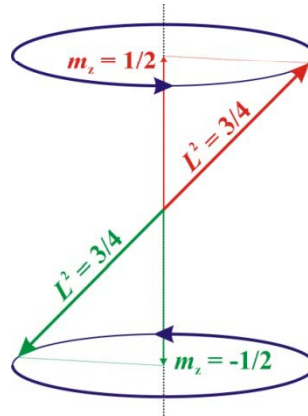


Physikalisches Institut der Universität Bonn

Polarisation

- **Spin $\frac{1}{2}$: Elektronen, Protonen, ...**

$$L = \frac{1}{2} \rightarrow m = \begin{cases} +\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{cases}$$

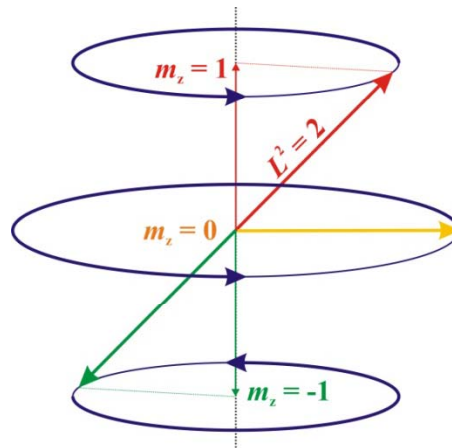


$$P = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}}$$

Vektorpolarisation

- **Spin 1: Deuteronen, ...**

$$L = 1 \rightarrow m = \begin{cases} +1 \\ 0 \\ -1 \end{cases}$$



zusätzlich:

$$P = 1 - \frac{3N_0}{N_{\uparrow} + N_0 + N_{\downarrow}}$$

Tensorpolarisation

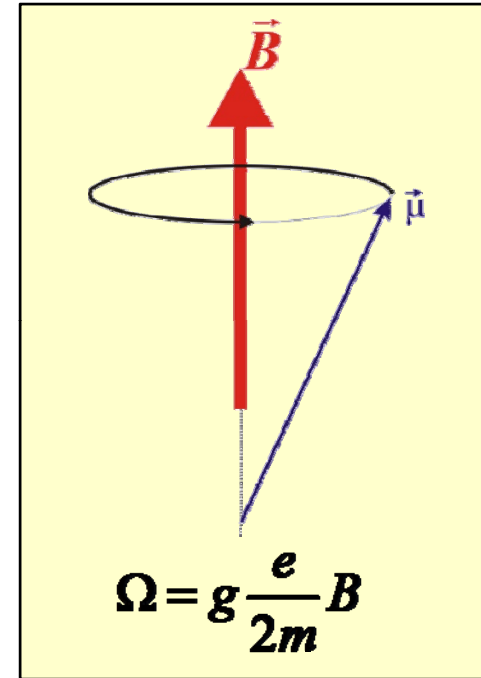
Spin-Präzession

Spin $\leftrightarrow$ Magnetisches Moment:

$$\vec{\mu} = g \frac{e}{2m} \cdot \vec{S}$$

Spinbewegung im B-Feld:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

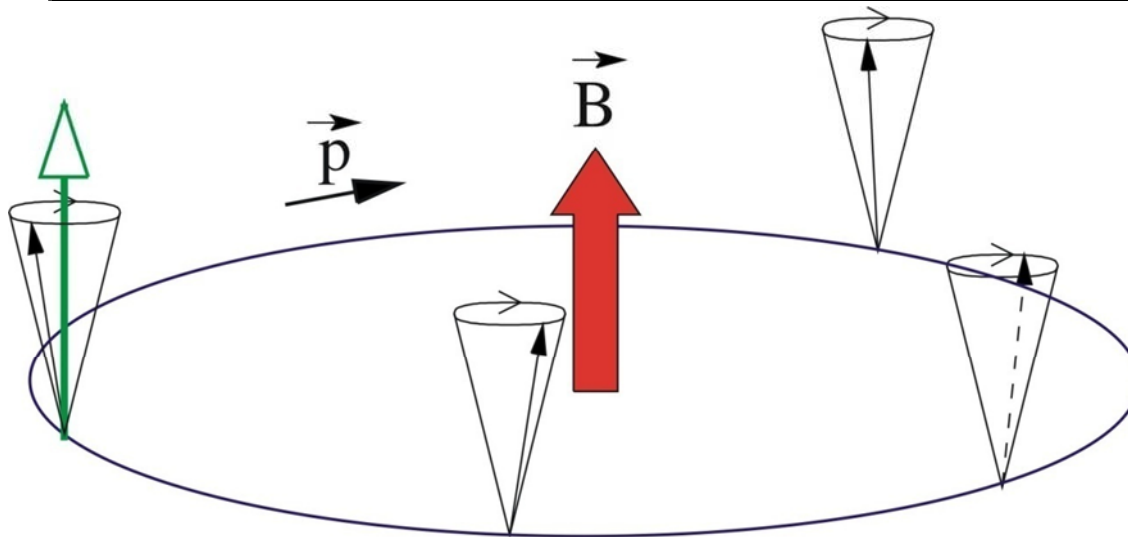


Landé-Faktor und gyromagnetische Anomalie:

- Elektronen: $a = \frac{1}{2} (g - 2) = 1,15967 \cdot 10^{-3}$
- Protonen: $a = \frac{1}{2} (g - 2) = 1,792843$
- Deuteronen: $a = \frac{1}{2} (g - 2) = -0,142987$

Spin-Präzession

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

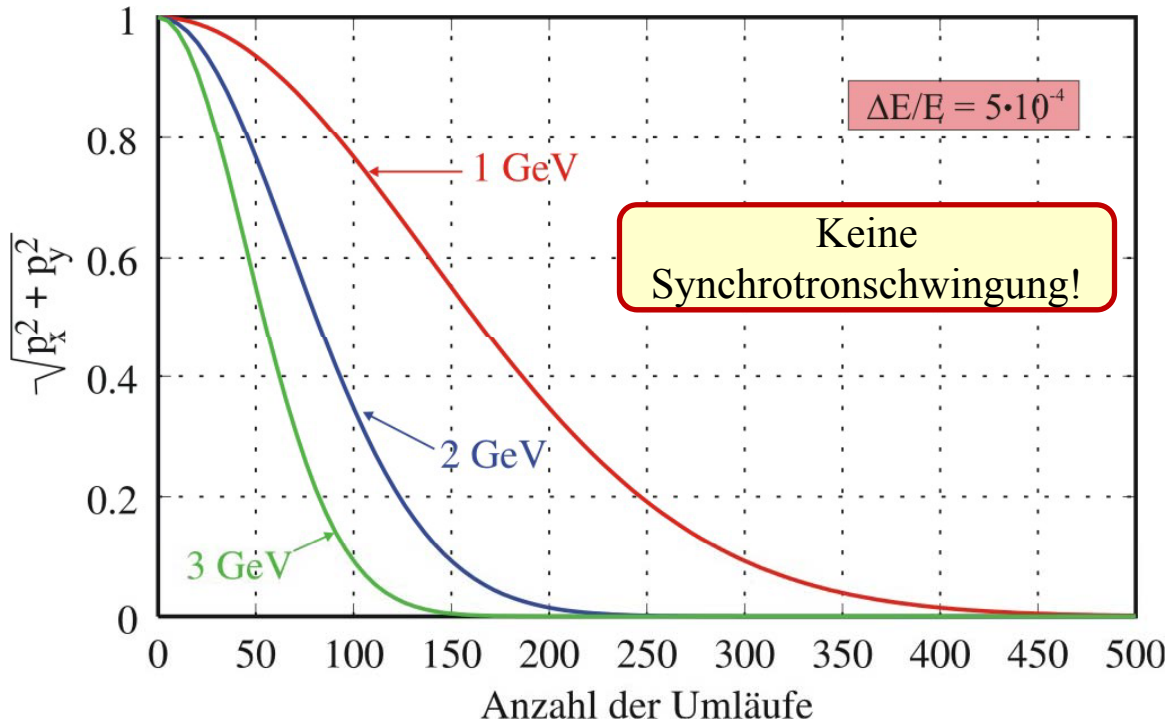


$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\Omega} \times \vec{S}$$

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

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

Spin-Präzession

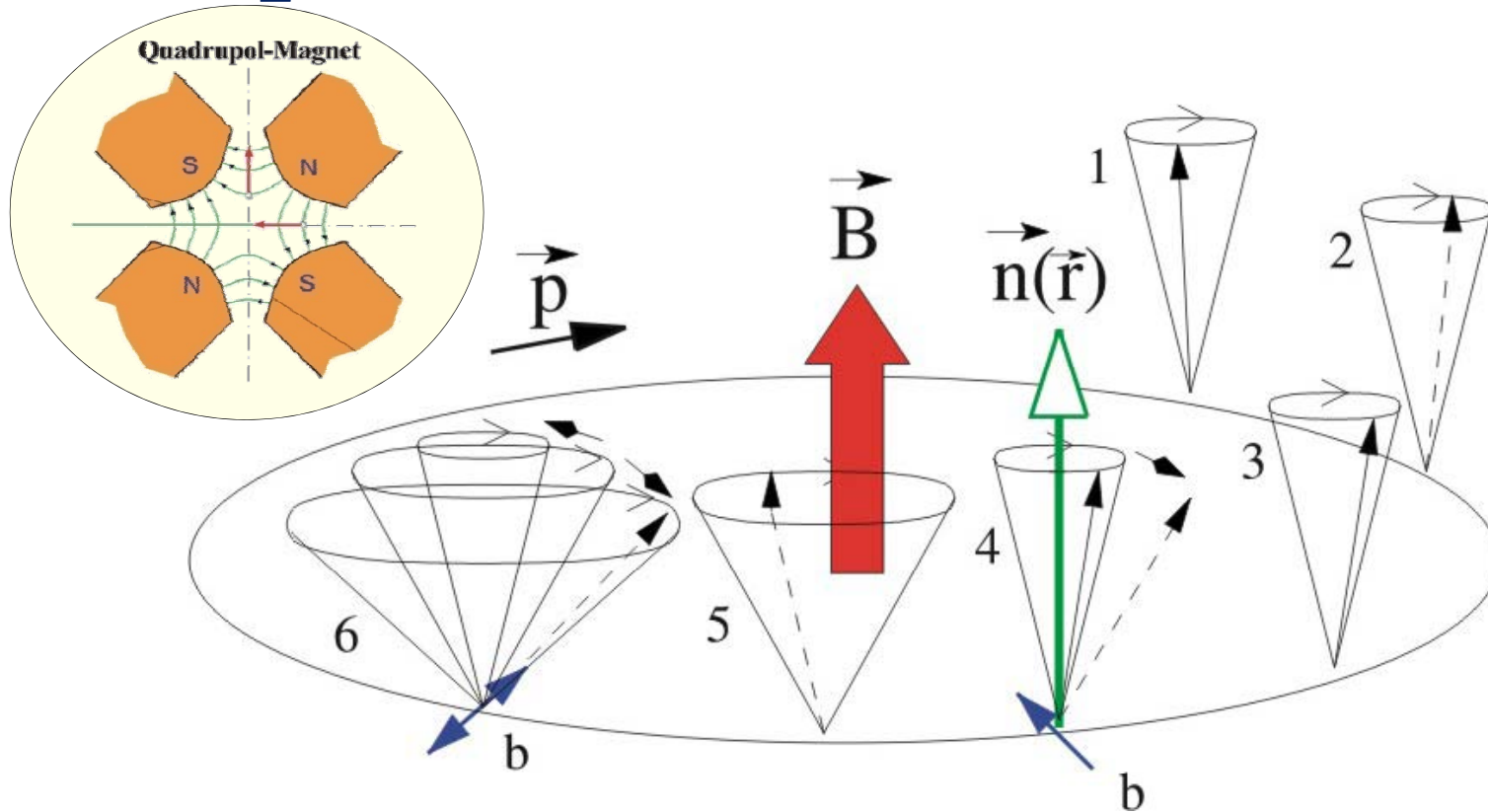


$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\Omega} \times \vec{S}$$

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

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

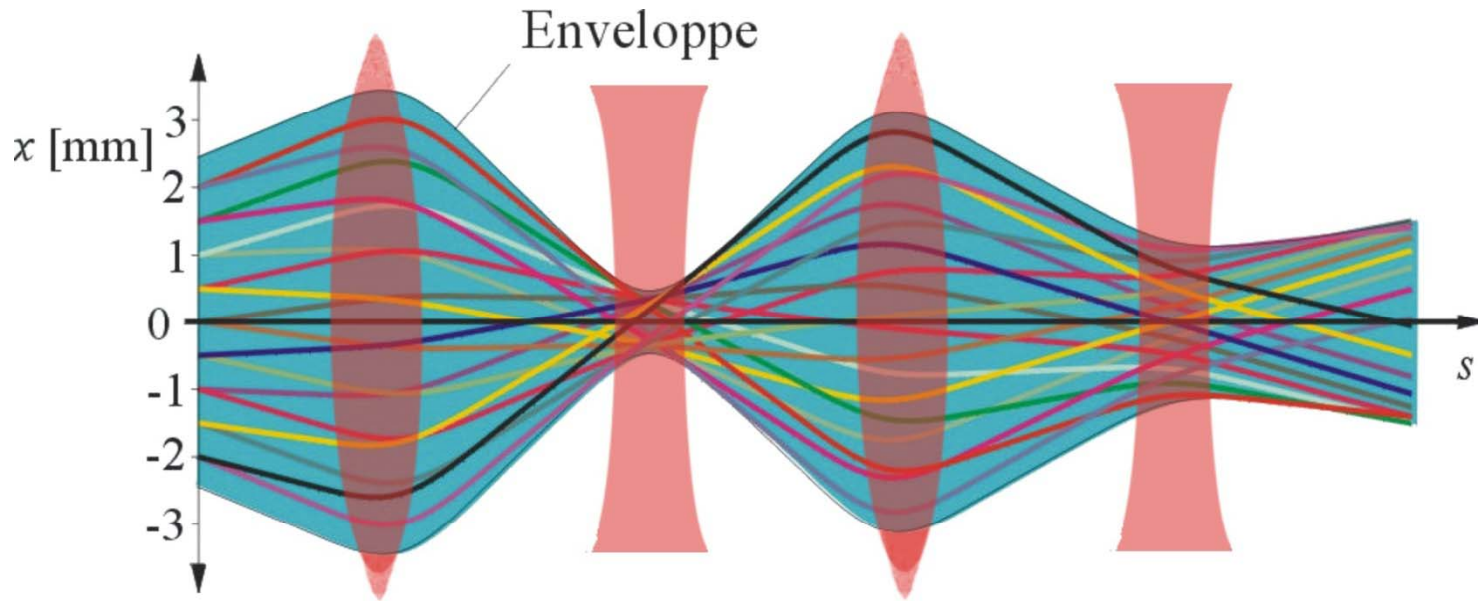
Depolarisierende Resonanzen



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

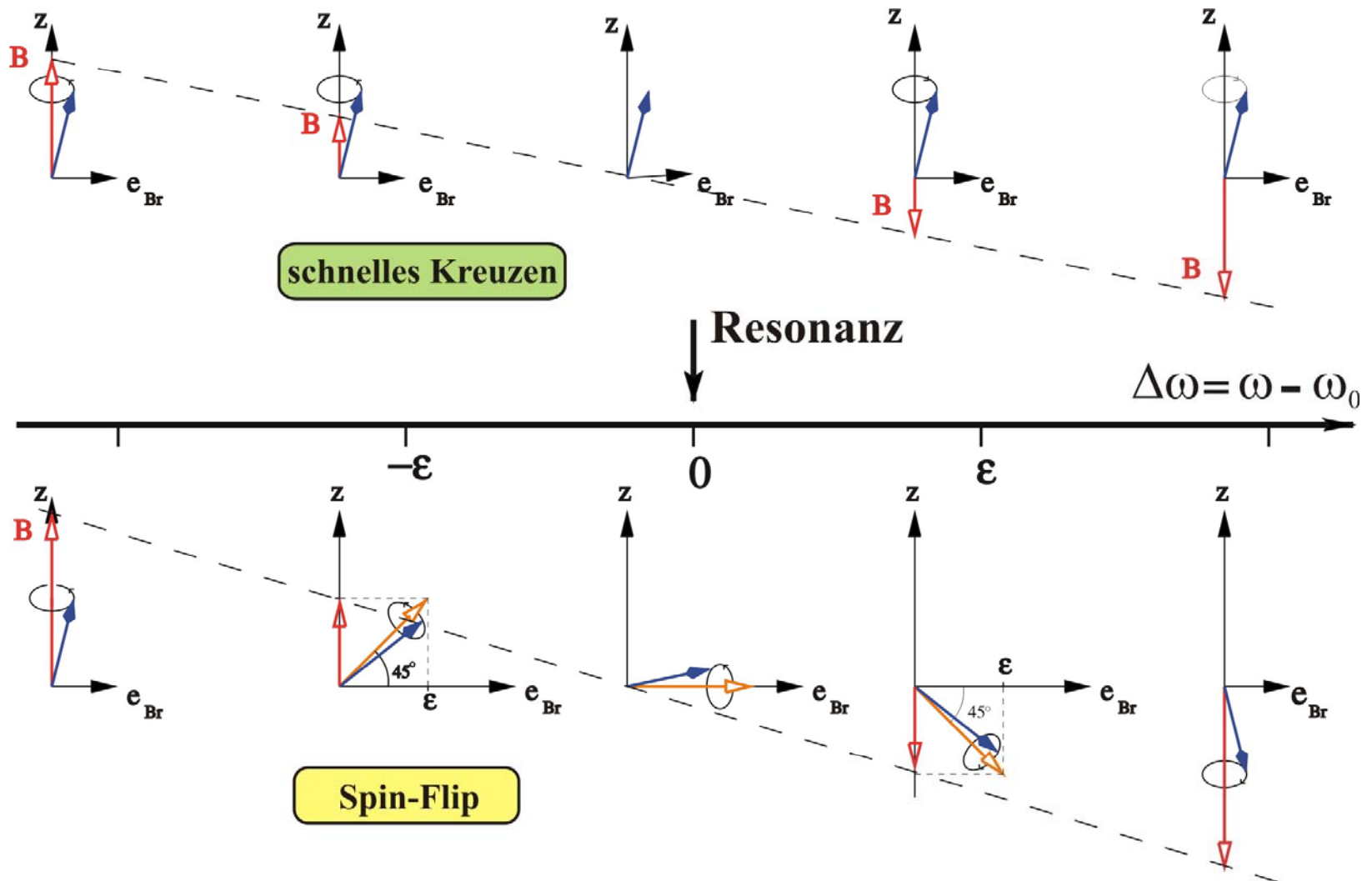


Starke Fokussierung: Betatronschwingungen!

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

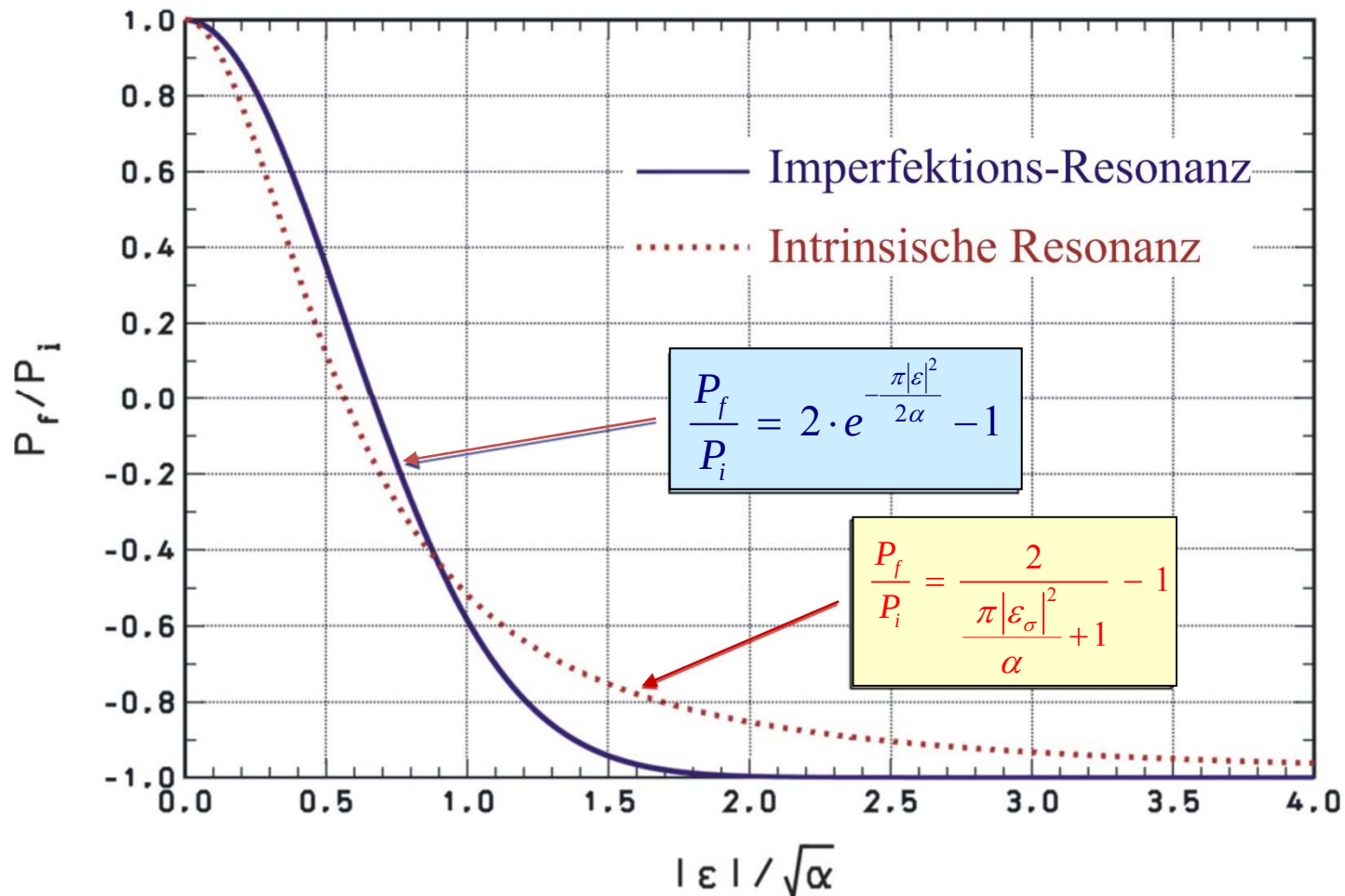
Intrinsische Resonanz: $\gamma \cdot a = n \cdot P \pm Q_z$, $n \in \mathbb{Z}$

Resonanzkreuzung

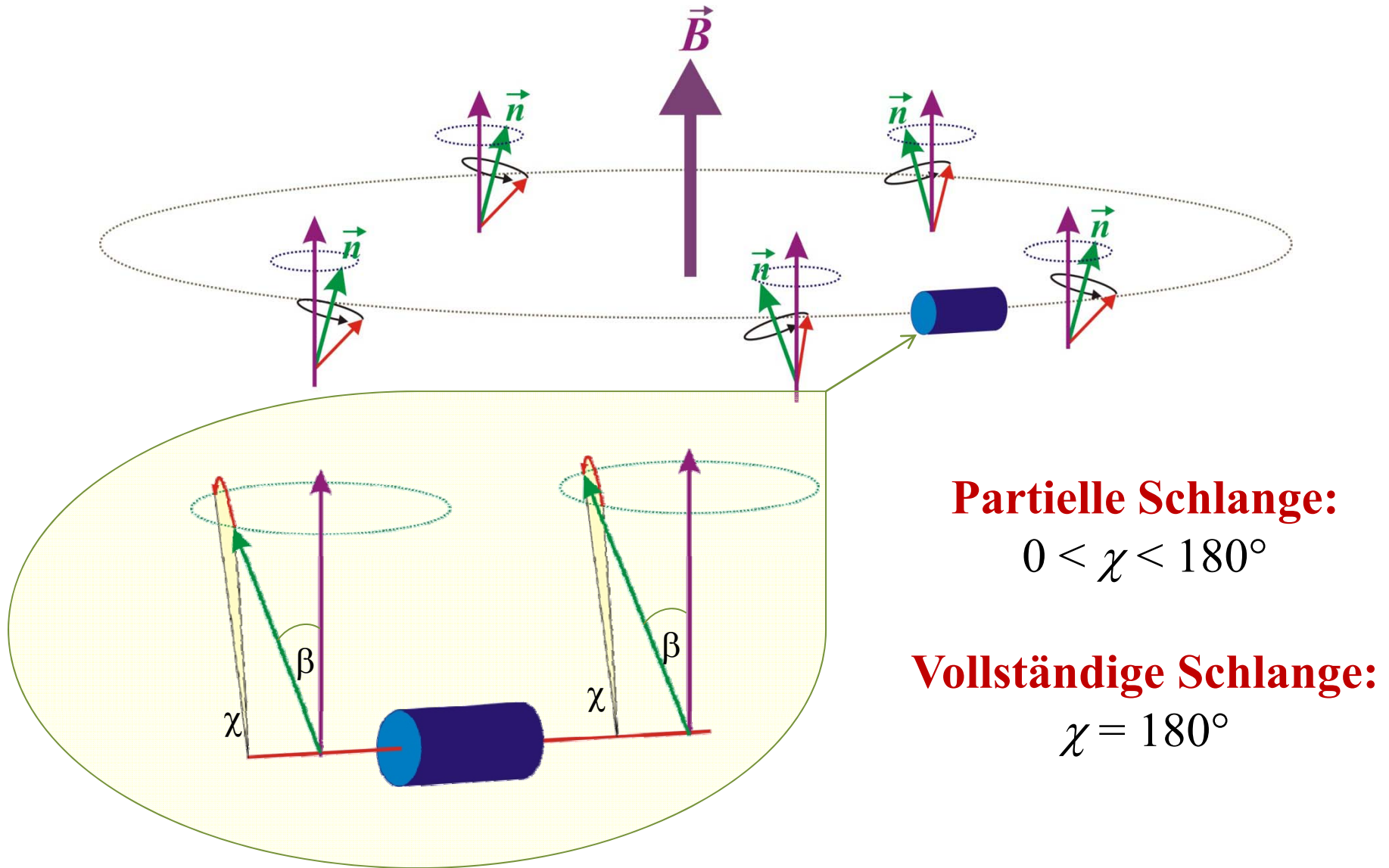


Resonanzkreuzung

Froissart-Stora-Formel

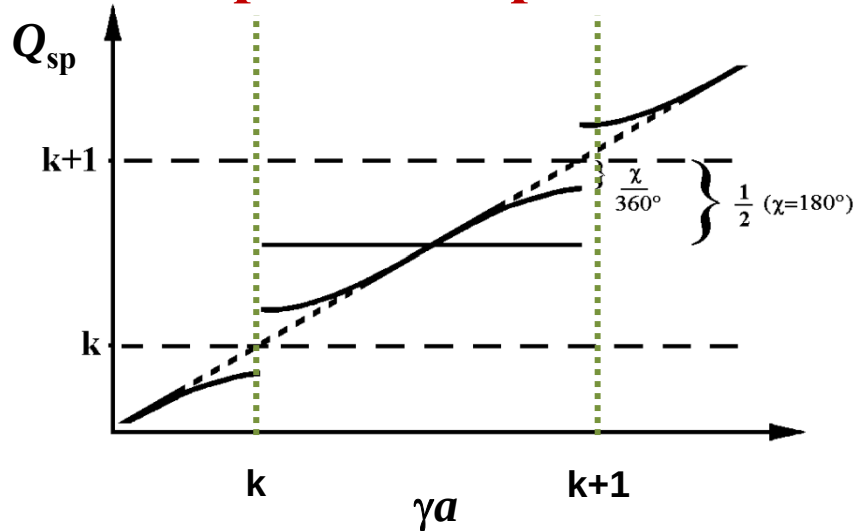


Sibirische Schlangen

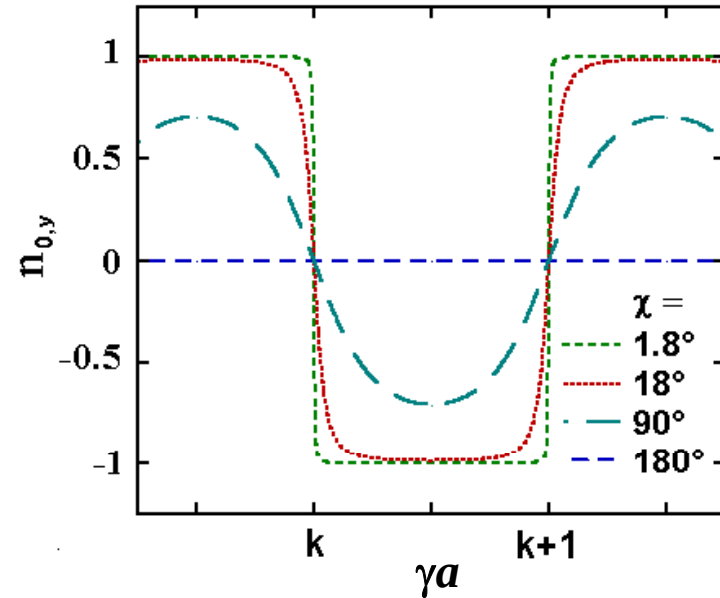


Sibirische Schlangen

Spinarbeitspunkt



Invariantes Spinfeld



Partielle Schlange:

- **Erhöhung der Resonanzstärke** um $|\varepsilon_x| = \chi/2\pi$
- adiabatische Kreuzung von Imperfektionsresonanzen falls $\chi \gg 2\pi|\varepsilon_r| + \sqrt{8\pi\alpha}$

Vollständige Schlange:

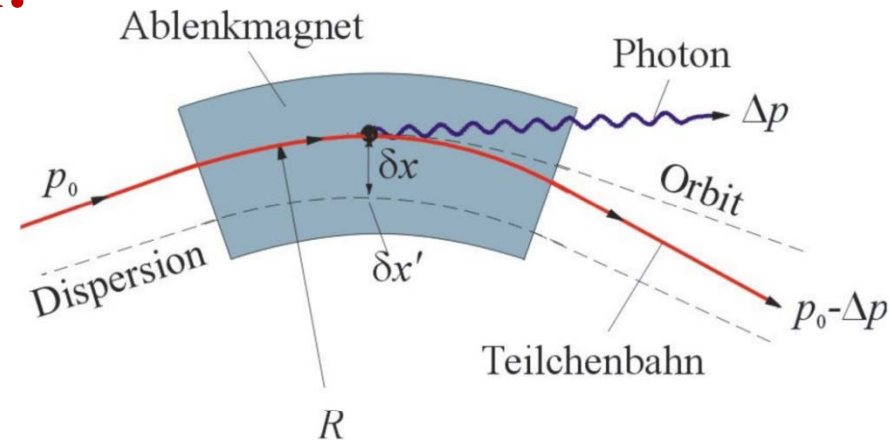
- **inv. Spinachse liegt in Beschleunigerebene**
- **Schlangenresonanzen:** $\frac{1}{2} = Q_{sp} = k \pm l \cdot Q_x \pm m \cdot Q_z$

Aber:

Synchrotronstrahlung

Abstrahlung von γ -Quanten:

- **Störung der Bahn**
(Rückstoß, Dispersion)
 - **Spin-Flip** möglich
- **Spindiffusion!**



Sokolov-Tenov-Effekt:

- **Selbstpolarisation** des Strahls: $P = P_{ST} \cdot \{1 - e^{-t/\tau}\}$ $P_{ST} = 92.4\%$
- **Zeitkonstante** des P-Aufbaus: $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_+} + \frac{1}{\tau_-}$ $\tau_+ = \frac{5\sqrt{3}}{8} \frac{2\pi}{r_e c \lambda_c} \cdot \frac{R^3}{\gamma^5}$
- **Gleichgewichtspolarisation:** $P_\infty = P_{ST} \cdot \frac{\tau_-}{\tau_+ + \tau_-}$

Kompensationsmethoden

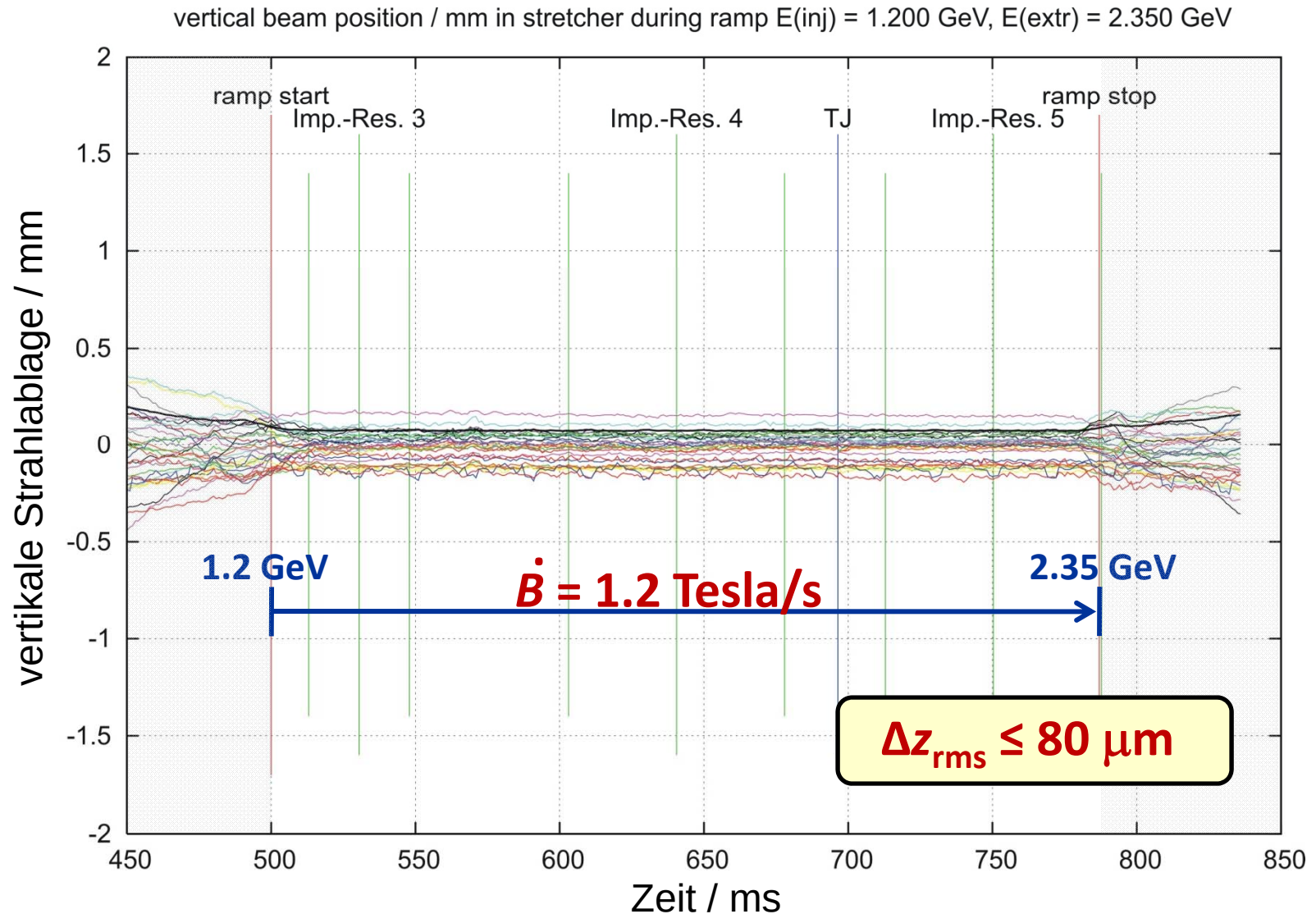
Imperfektionsresonanzen:

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

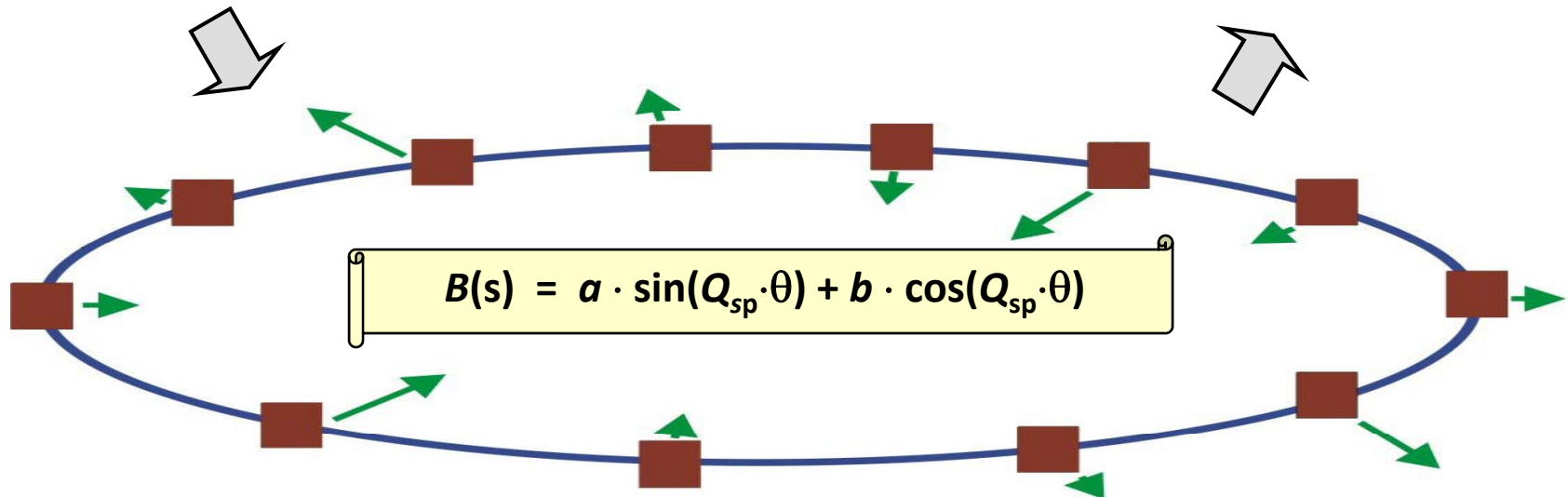
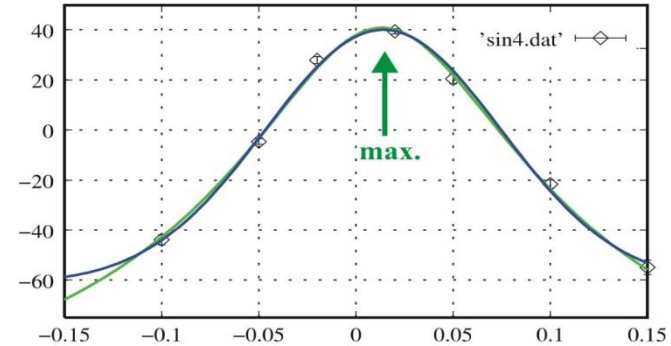
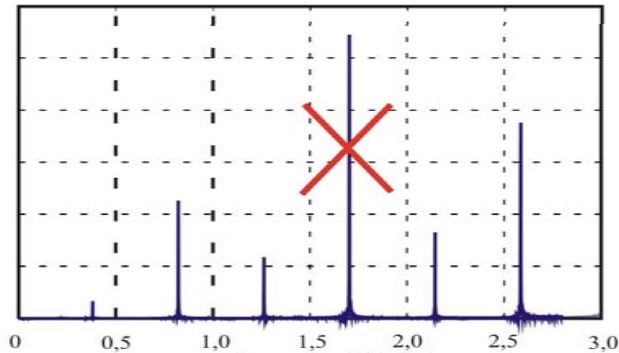
Intrinsische Resonanzen:

- Erhöhung der **Kreuzungsgeschwindigkeit**
- Verkleinerung der vertikalen **Emittanz**

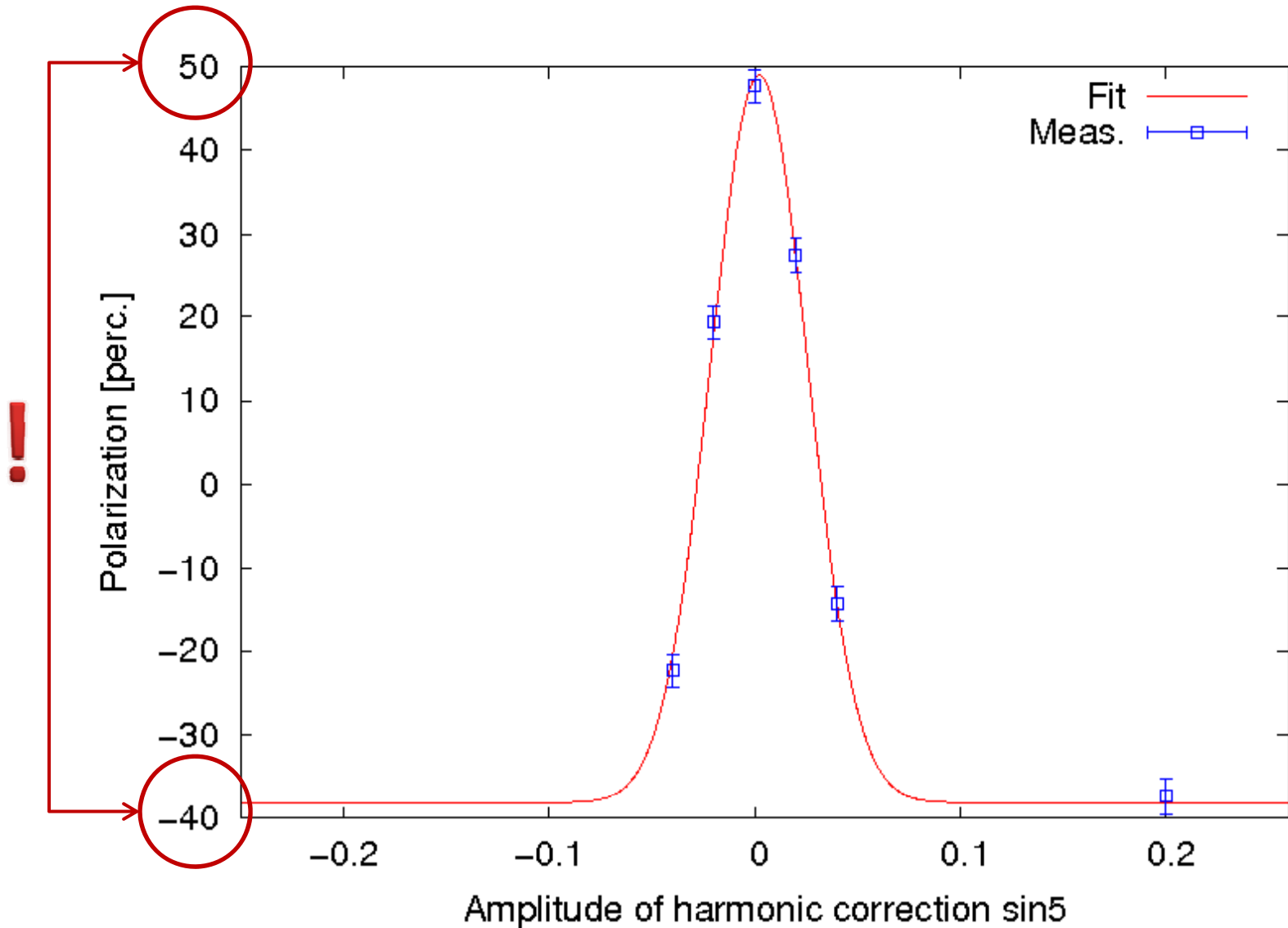
Orbit-Korrektur auf der Rampe



Harmonischen Korrektur (Imperfektions-Resonanzen)

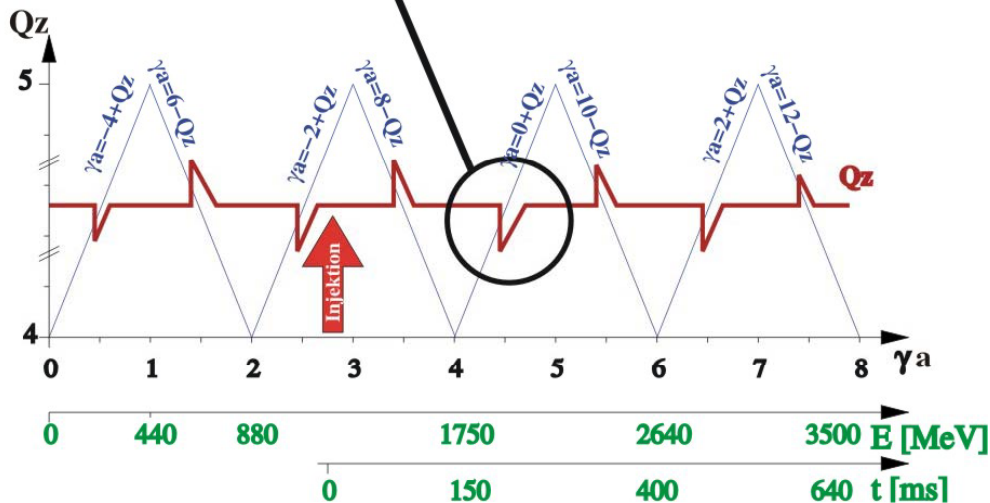
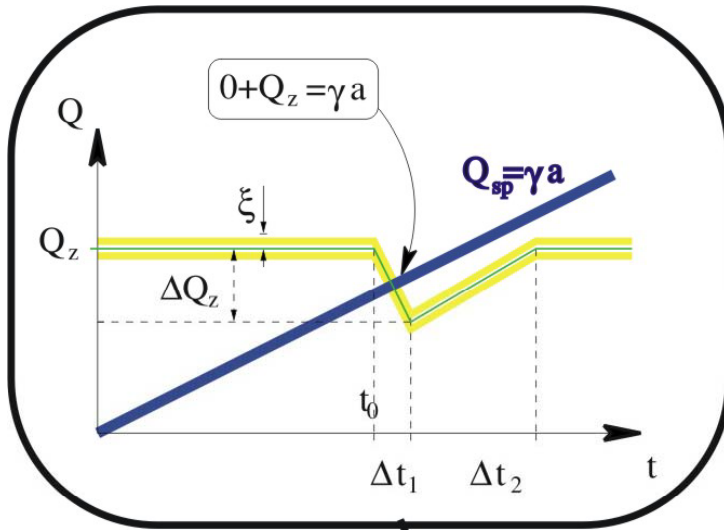


Beispiel: $\gamma a = 5$

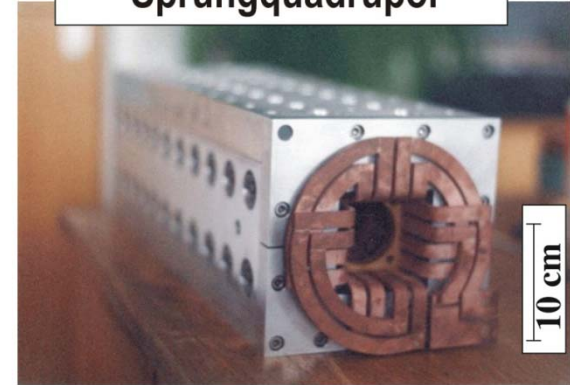


„Arbeitspunktspringen“

(Intrinsische Resonanzen)



Sprungquadrupol

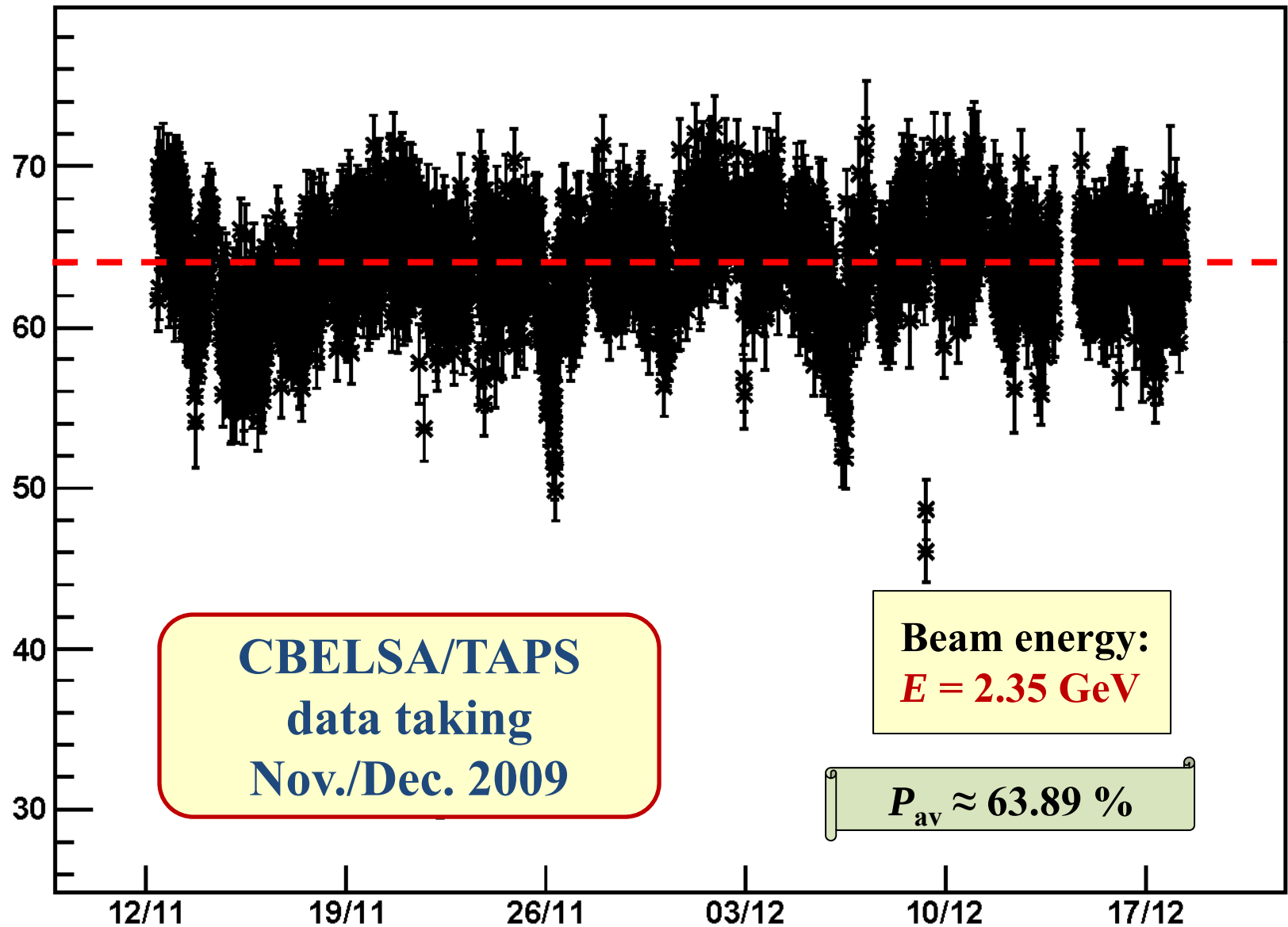


Panofsky-Typ Quadrupol mit
Ferrit-Joch

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 @ 2350MeV, 12.11.2009, 10:54 - 18.12.2009, 8:49



Zusammenfassung

Spinbewegung in Kreisbeschleunigern:

- Invariante Spinachse / Spinfeld
- Depolarisierende Spin-Resonanzen
- Synchrotronstrahlung → Spindiffusion, Selbstpolarisation!

Kompensationsmethoden:

- Sibirische Schlangen / Spinrotatoren
- CO und Harmonischen Korrektur
- ε_v klein und Arbeitspunktspringen