

Übersicht:

- Auswahl einiger elementarer Beschleunigertypen
- Funktionsweise eines Synchrotrons
- Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA
- polarisierte Elektronen an ELSA

Warum benötigt man Beschleuniger?

- Produktion von „neuen“ Teilchen (z.B. Mesonen, Baryonen und Leptonen)
→ Elementarteilchenphysik
- Detaillierte Untersuchung von Elementarteilchen (insbesondere Protonen)
→ Hadronphysik

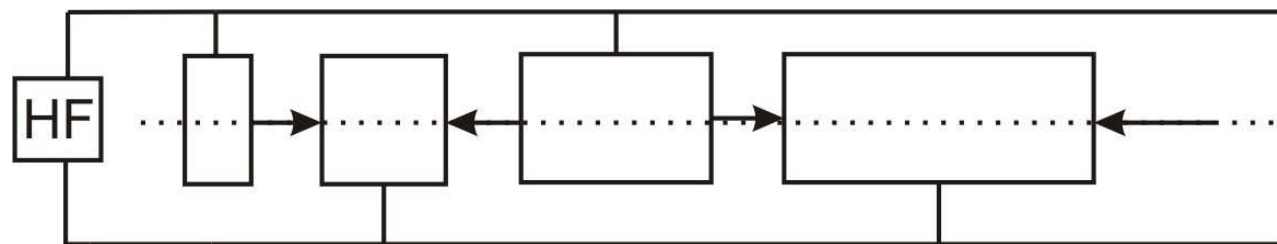
Abhängigkeit der Auflösung von der verwendeten Wellenlänge!

de Broglie: $\lambda = \frac{h}{p}$

Linearbeschleuniger

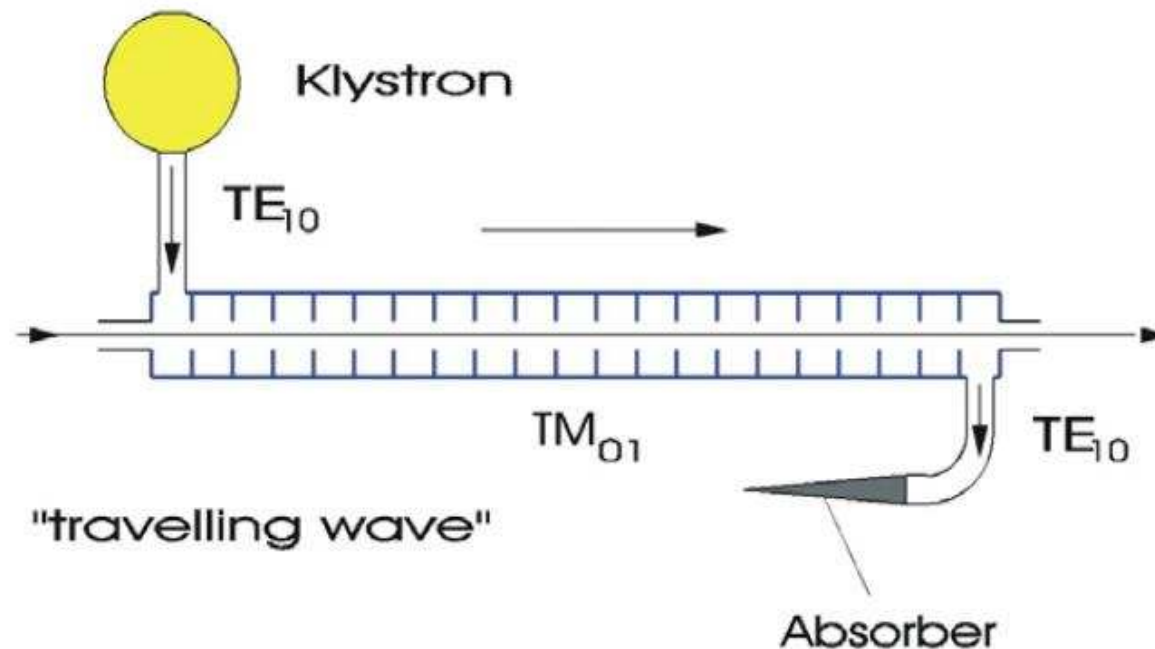
I) Wideröe – Struktur (1928)

- Hochfrequente Wechselspannung beschleunigt Teilchen in Röhrenanordnung
- Teilchen werden zwischen den Driftröhren beschleunigt
In den Driftröhren sind sie abgeschirmt → Umpolung der Spannung
- Länge der Driftröhre nimmt wegen ansteigender Geschwindigkeit der Teilchen zu
→ Beschleuniger wird bei hohen Energien viel zu lang!
- Wird daher nur bei $\beta = 0,005 - 0,05$ verwendet

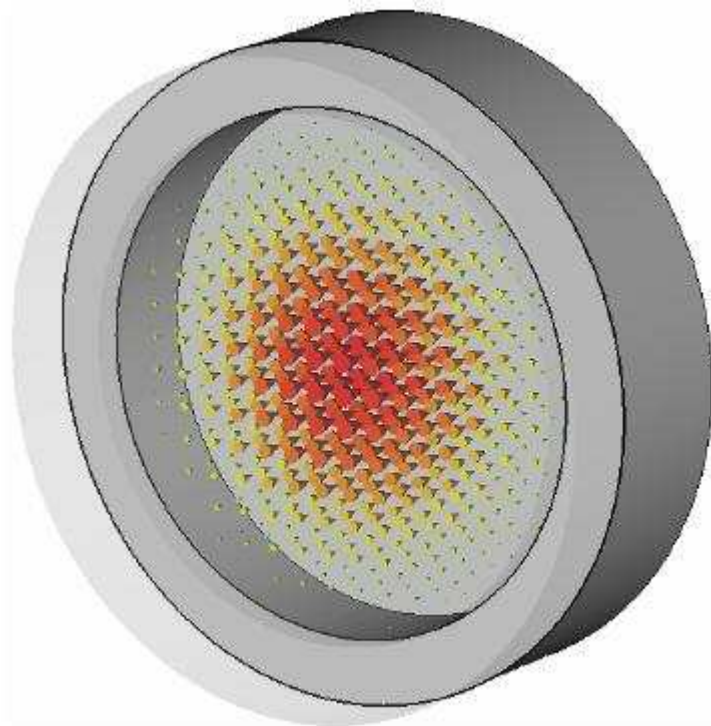


II) Hohlraumresonator: Wanderwellen-Struktur

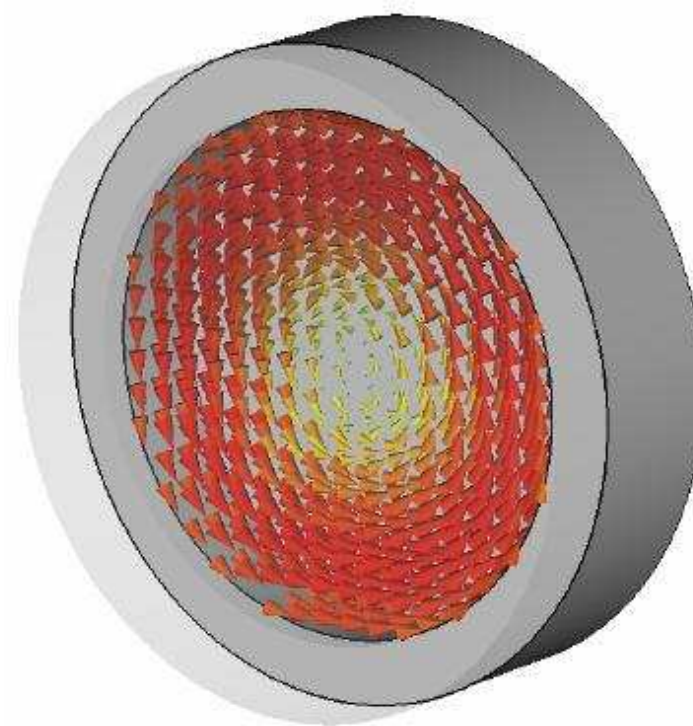
- Anregung der Fundamentalmode TM_{010} (LINAC ist rund)
- Hochfrequenz breitet sich mit $v_{ph} > c$ aus \rightarrow Irisblenden bewirken $v_{ph} \approx c$
- Elektronen haben beim Einschuss 50 keV \rightarrow bei 20 MeV ist $\beta = 0,9997$
- Pre-Buncher erforderlich (wie bei allem HF-Beschleunigern)



Fundamentalmode TM_{010} :



Elek. Feldverteilung



Mag. Feldverteilung

ELSA und andere Beschleunigertypen

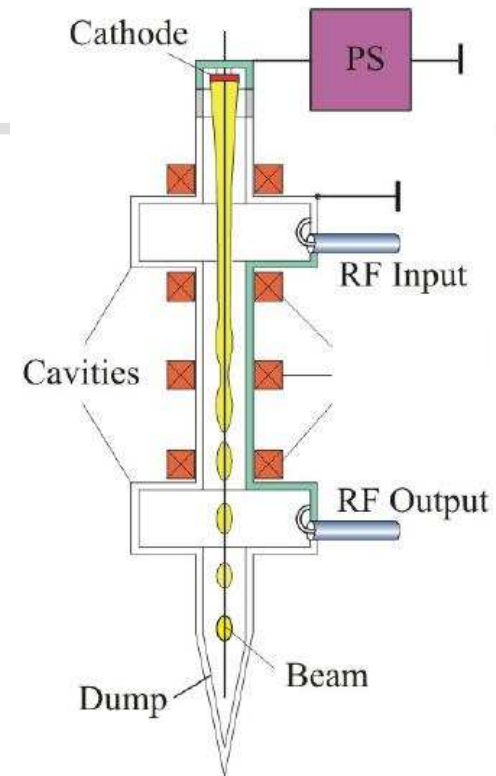
Beschleunigertypen: Linearbeschleuniger

Klystron:

- Anordnung von mehreren Hohlraumresonatoren zur Verstärkung eines Hochfrequenzsignals
- Signal wird auf einen Resonatortopf gegeben und moduliert einen Elektronenstrahl
- Wird beschleunigt und regt Schwingungsmode an → verstärkte Form des Ausgangssignals

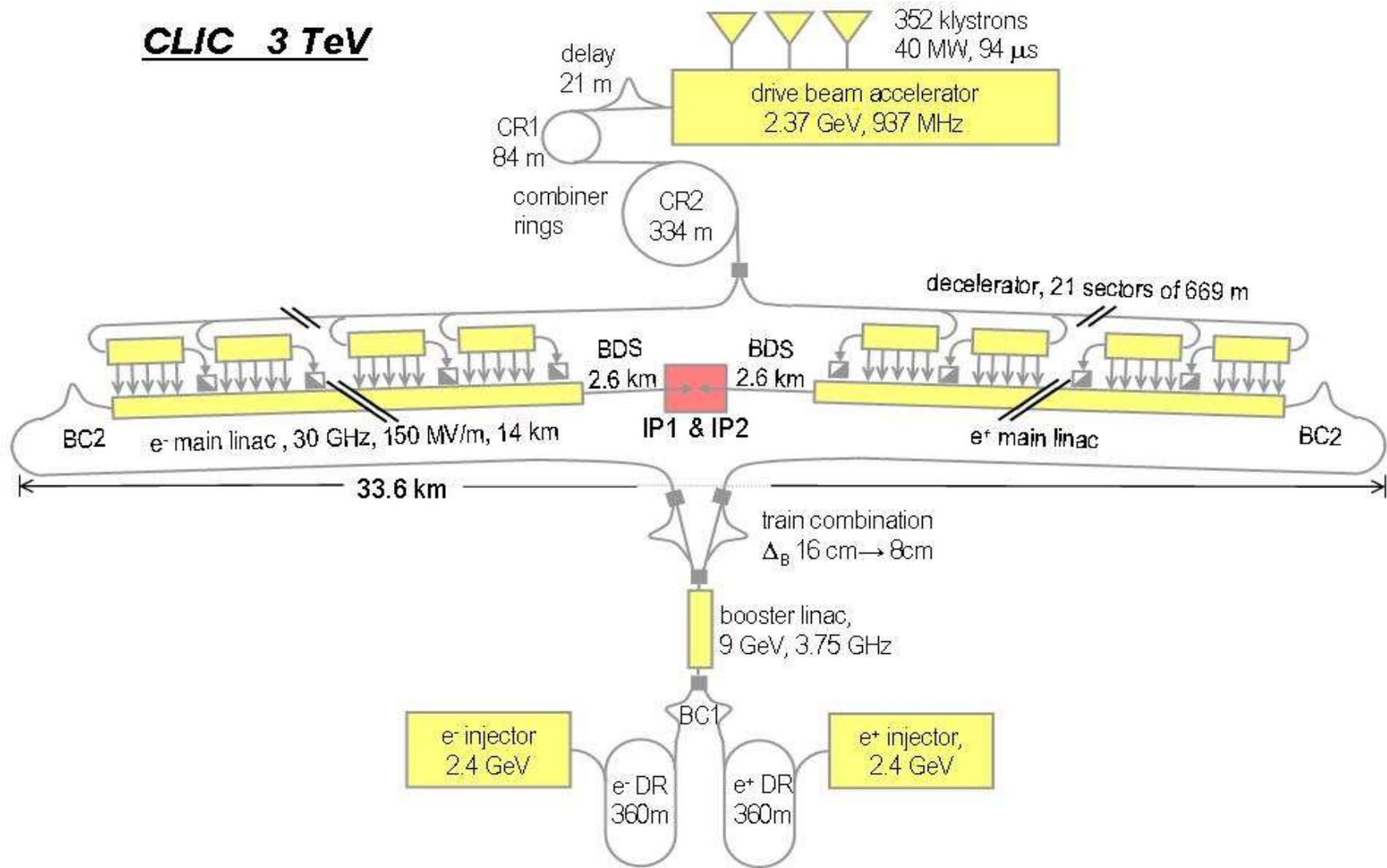
Zum Vergleich: **Stanford Linear Accelerator (SLAC)**

- Linearbeschleuniger für Elektronen / Positronen auf 50 GeV
- 280 Klystron mit je 65 MW Leistung



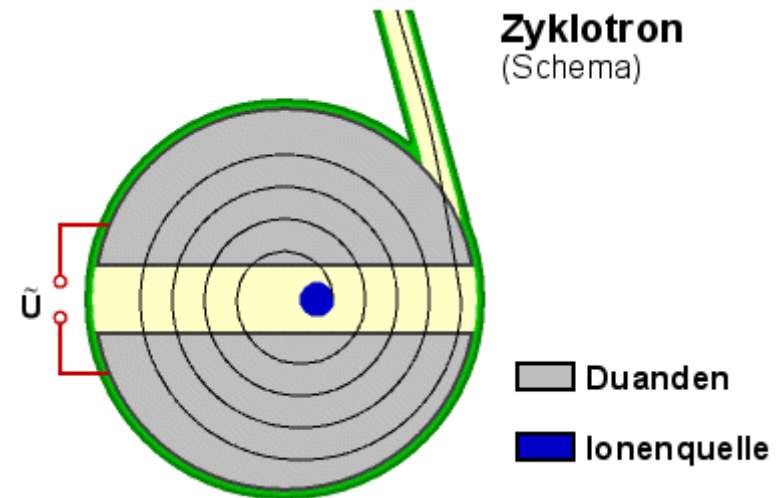
ELSA und andere Beschleunigertypen

Beschleunigertypen: Compact Linear Collider



Zyklotron (1932)

- Erstmals: Teilchen laufen auf Kreisbahnen und werden pro Umlauf zweimal beschleunigt
- Zwischen den Dosen wird hochfrequente Wechselspannung angelegt ($U = 400 \text{ kV}$)
- Anlage ist mit einem Magnetfeld durchsetzt
 - Teilchen gewinnen nur im Spalt Energie (ca. 50 Umläufe, bis 22 MeV für p)
 - Innerhalb der Dosen sind die Teilchen vom elek. Feld abgeschirmt



$$\omega = \frac{q}{\gamma m} B$$

Probleme: Bahnstabilität und Massenzunahme (!)

→ **Synchrozyklotron & Isochronzyklotron**

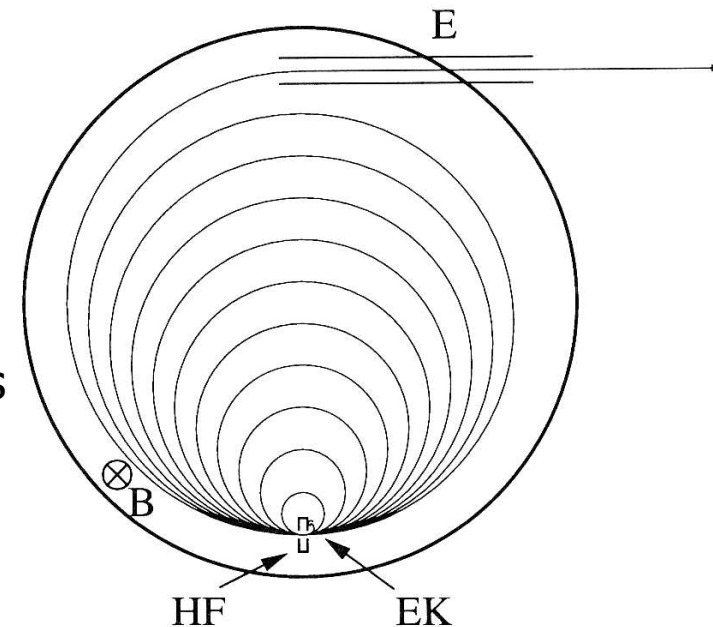
Beispiel „aus dem Haus“: **Bonner Isochron-Zyklotron (1970)**



Mikrotron (1945)

- Elektronen werden mit einem Magnetfeld auf einer Kreisbahn gehalten
- Beschleunigung mit Hohlraumresonator
→ Flugzeit ist immer ganzzahliges Vielfaches der HF-Periode

$$B = \text{const} , \omega = \text{const}$$



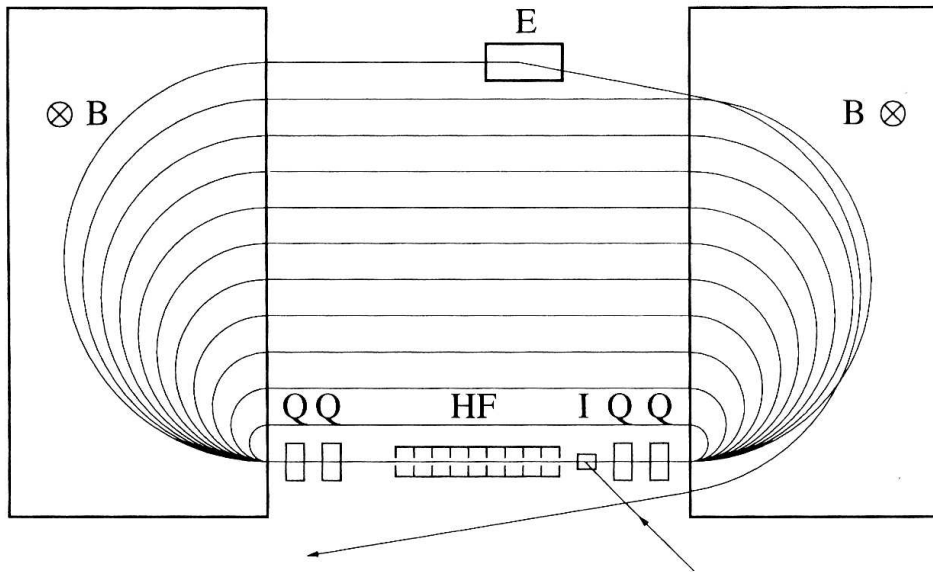
Theoretische Überlegungen:

Energiegewinn pro Umlauf: mind. Ruheenergie des Teilchen

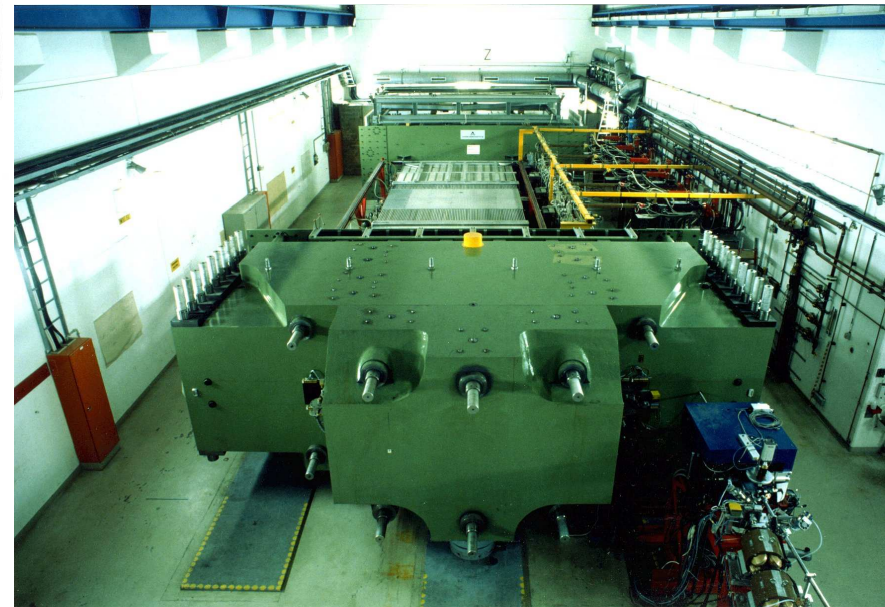
→ Daher werden nur Elektronen / Positronen verwendet

- Problem: kleines mag. Feld → Radius wird schnell sehr groß!

Rennbahn-Mikrotron



Beispiel: **Mainzer Mikrotron (MAMI)**



Synchrotron (1947)

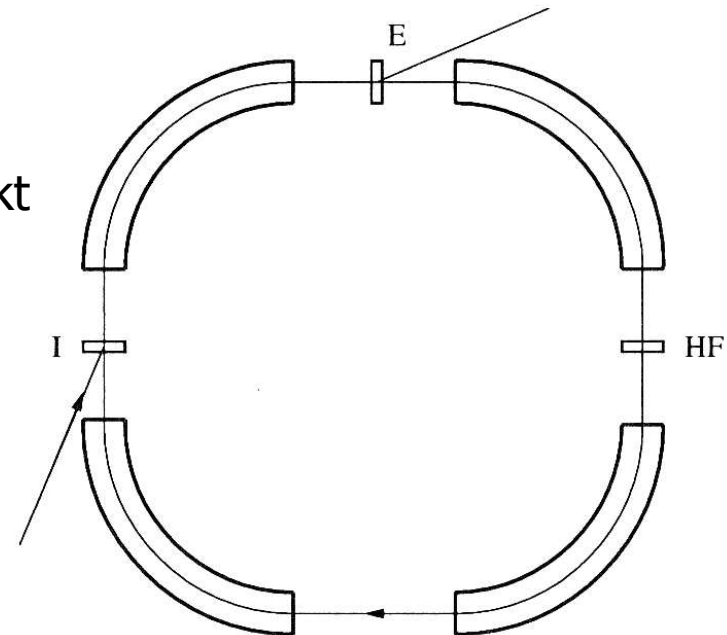
- Magnetfeld wird auf eine Ringzone beschränkt
→ Fokussierung notwendig
→ B-Feld muss hochgefahren werden
- Problem: Betatron-Schwingungen
(transversale Schwingungen des Strahls)

Hill'sche Differentialgleichung:

$$x''(s) + \left(\frac{1}{R(s)^2} - k(s) \right) x(s) = \frac{1}{R(s)} \frac{\Delta p}{p}$$

$$z''(s) + k(s)z(s) = 0$$

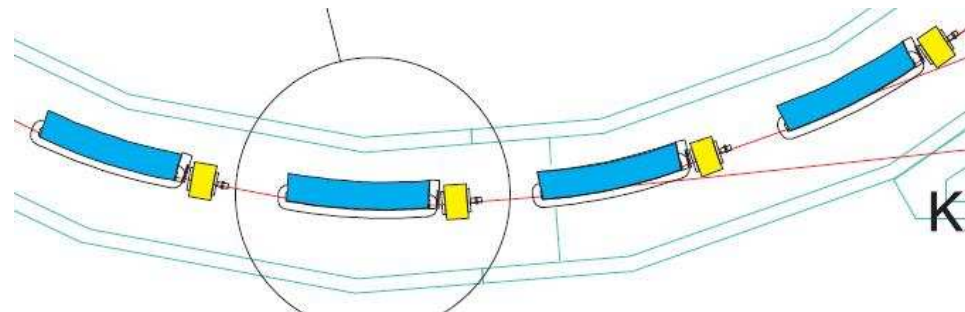
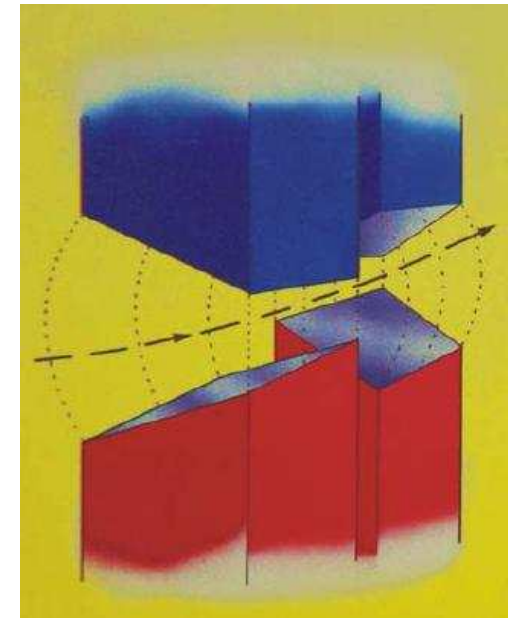
- erste Generation: „Constant-Gradient-Synchrotron“
→ nur schwache Fokussierung (nach außen abfallendes Magnetfeld)
→ Betatron-Schwingung sehr langwellig / Amplitude wird sehr groß



Verbesserte Version: „**Alternating-Gradient-Synchrotron**“

(stark fokussierendes Synchrotron) [Courant, Snyder]

- „Combined-Function“:
Fokussierung durch Dipole mit alternierenden
sehr starken Feldindizes
(siehe 2,5 GeV – Synchrotron)
- „Seperated-Function“
Strahlführung durch Dipolmagnete
Fokussierung durch Quadrupolmagnete
(siehe ELSA)

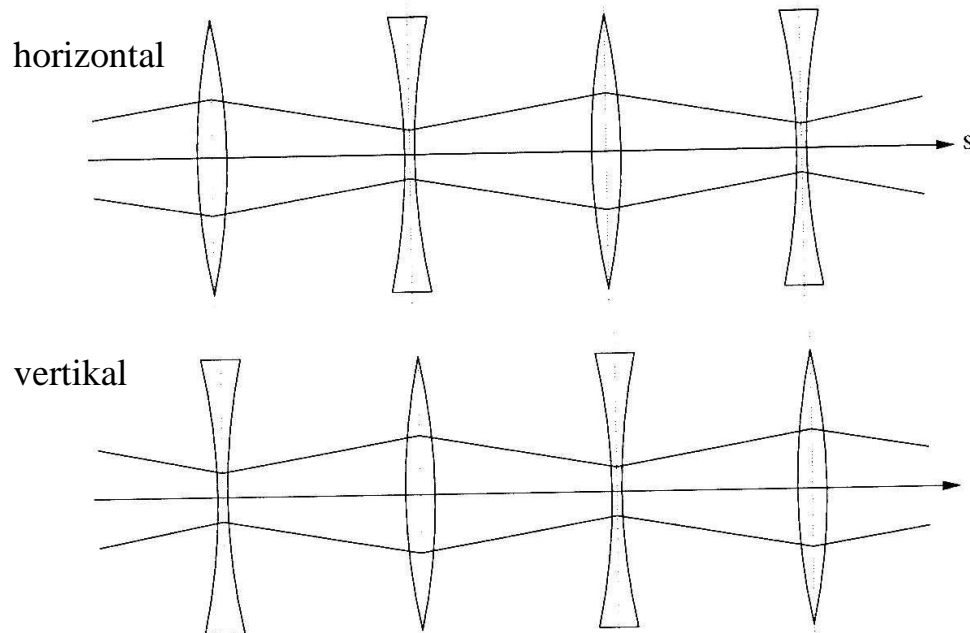


Was bedeutet „starke Fokussierung“?

- Kombination einer Sammel- und einer Zerstreulinse kann bei geeignetem Abstand fokussierend wirken
- Linsen müssen dabei gleichen, aber entgegengesetzten Brechungsindex haben

Beispiel: **FODO-Struktur**

(Fokussierung – Driftstrecke – Defokussierung – Driftstrecke)

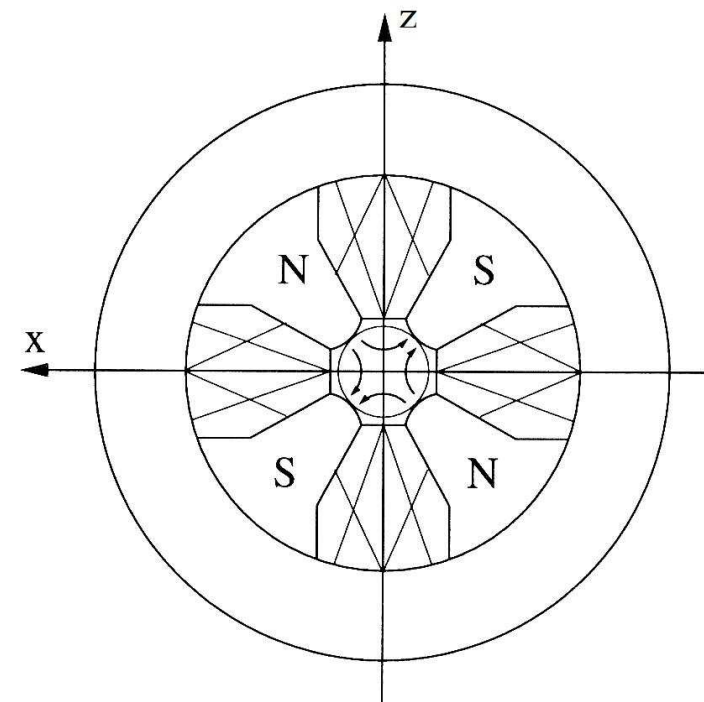
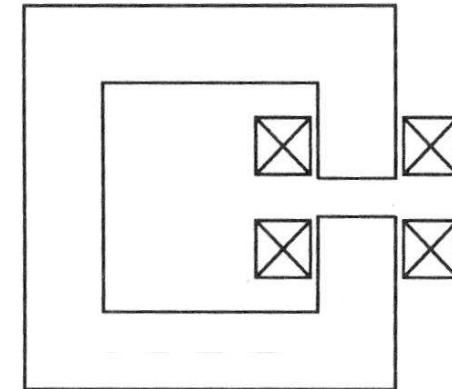


$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} = \frac{d}{f_1^2}$$

Regelmäßiger und vor allem kontrollierbarer Verlauf der Strahlenveloppen

Magnetoptische Elemente:

- Strahlführung: **Dipole**
(Homogenes Magnetfeld senkrecht zur Strahlrichtung)
- Strahlfokussierung: **Quadrupole**
Quadrupole sind in einer Richtung fokussierend,
in die andere Richtung defokussierend
→ Anordnung muss alternierend sein!
- Korrektur der „Chromazität“: **Sextupole**
→ Quadrupole: Energieabhängige Fokussierung
des Strahls



Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA

Kurze historische Zusammenfassung:

1952: W. Paul nimmt Ruf nach Bonn an

→ sein Vorschlag: Bau eines stark fokussierenden Synchrotrons mit 100 MeV

1958: 500 MeV-Synchrotron nimmt Betrieb auf

1963: Idee eines 2,5 GeV-Synchrotrons

1967: Inbetriebnahme des 2,5 GeV-Synchrotrons

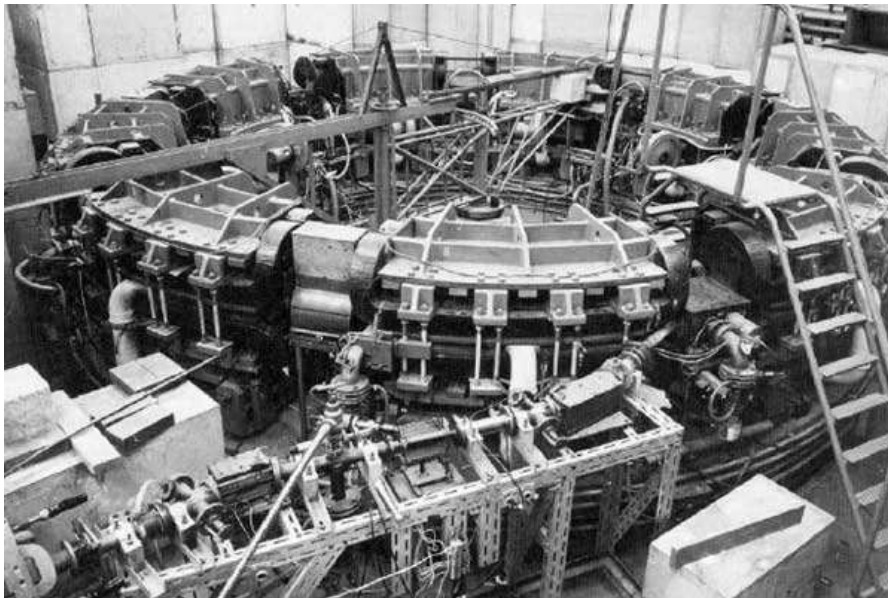
1979: Vorschlag eines Stretcher-Rings (besseres Tastverhältnis)

1987: Inbetriebnahme des neuen Stretcher-Rings ELSA

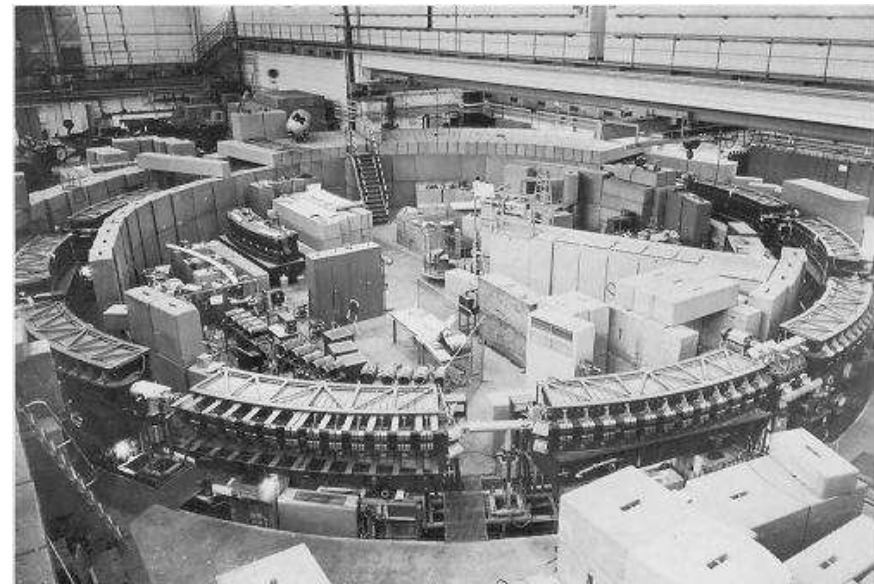
1994: Nachbeschleuniger-Modus erstmals erprobt

(neues Kontrollsystem war erforderlich)

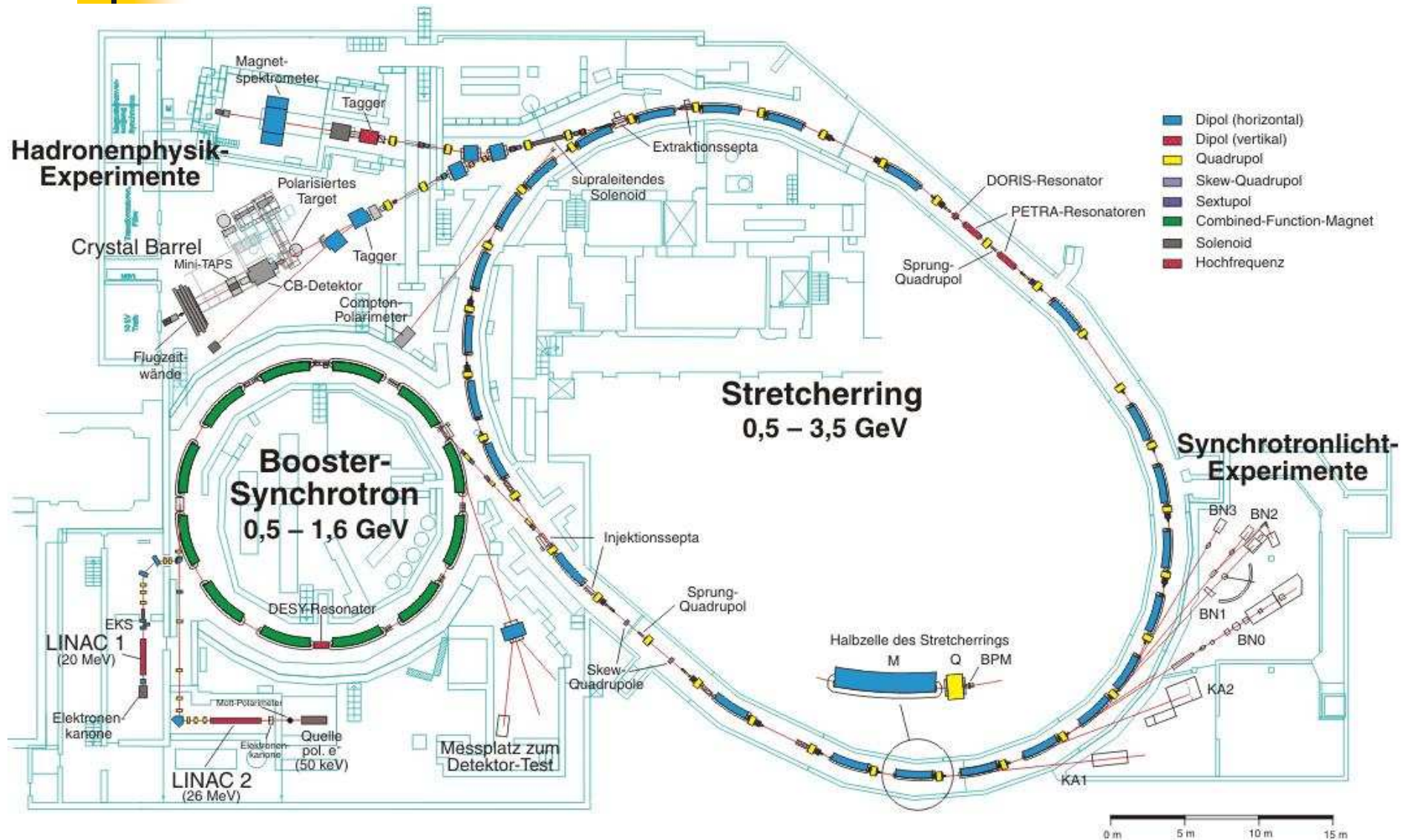
500 MeV-Synchrotron (1958-1984):



2,5 GeV-Synchrotron (1967- heute):

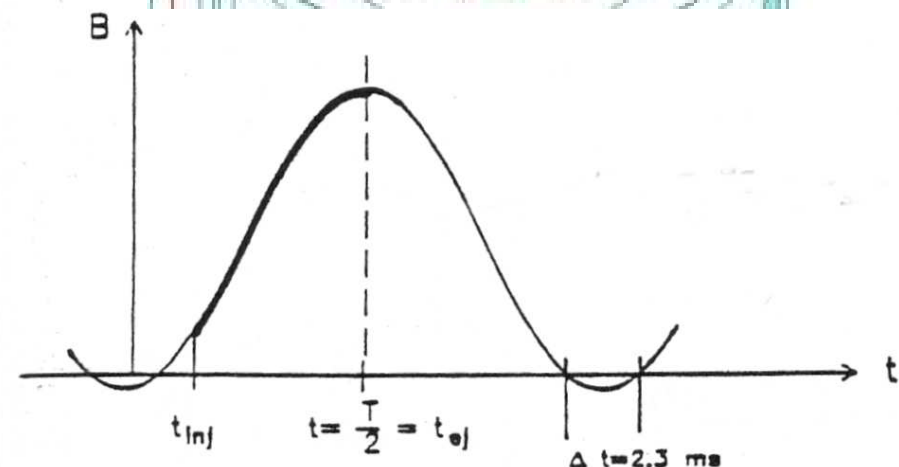


ELSA: Überblick



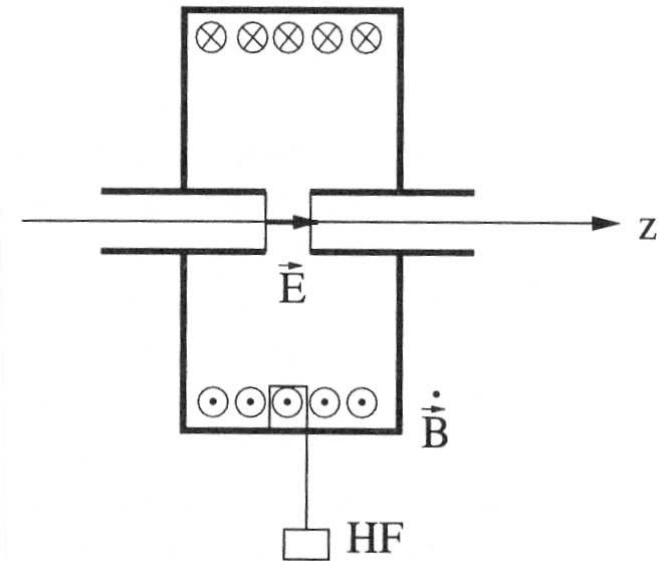
Das 2,5 GeV - Synchrotron

- Anordnung von 12 Dipolen
→ starke Fokussierung wegen alternierendem Feldindex
- Stromversorgung der Dipole ist netzsynchron, d.h. $f = 50$ Hz
- zusätzlich wird Gleichstrom verwendet
→ Beschleunigung während der halben Periodenzeit
- Nulldurchgang definiert Timing der gesamten Anlage
- Aufbau als Schwingkreis
→ Externe Kondensatoren

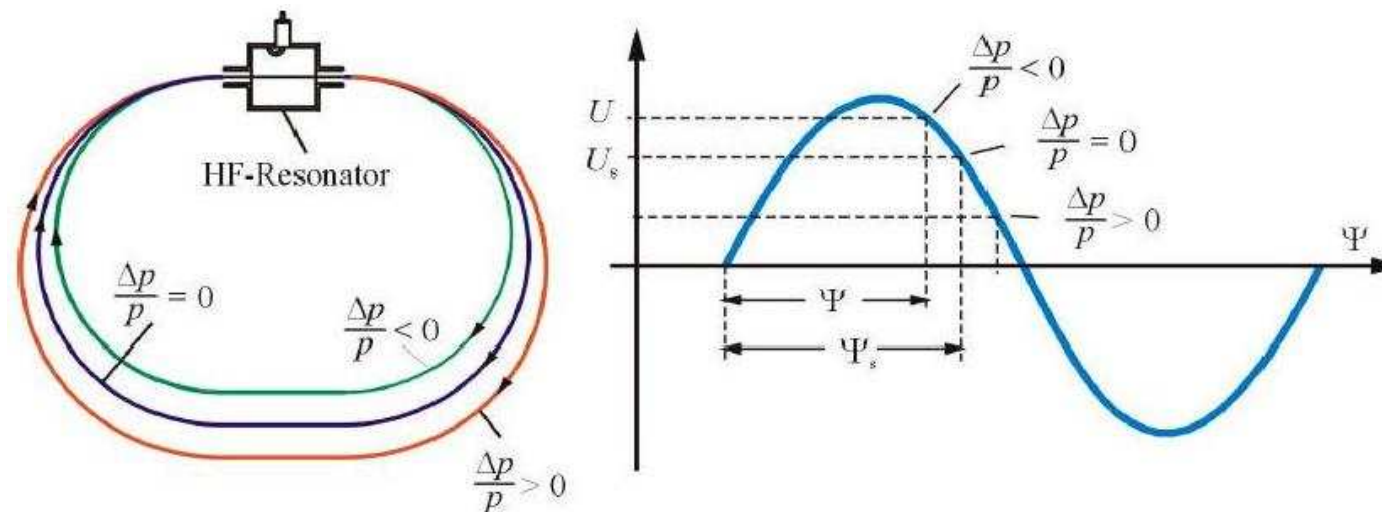


Cavity: Beschleunigung mit stehenden Wellen

- Resonator mit drei Zellen
 - Hochfrequenz mit 500 MHz
 - entspricht 60 cm Wellenlänge
- Resonanzfrequenz ist sensitiv auf die Größe des Hohlraumresonators
 - Wasserkühlung notwendig
 - Abstimmstempel

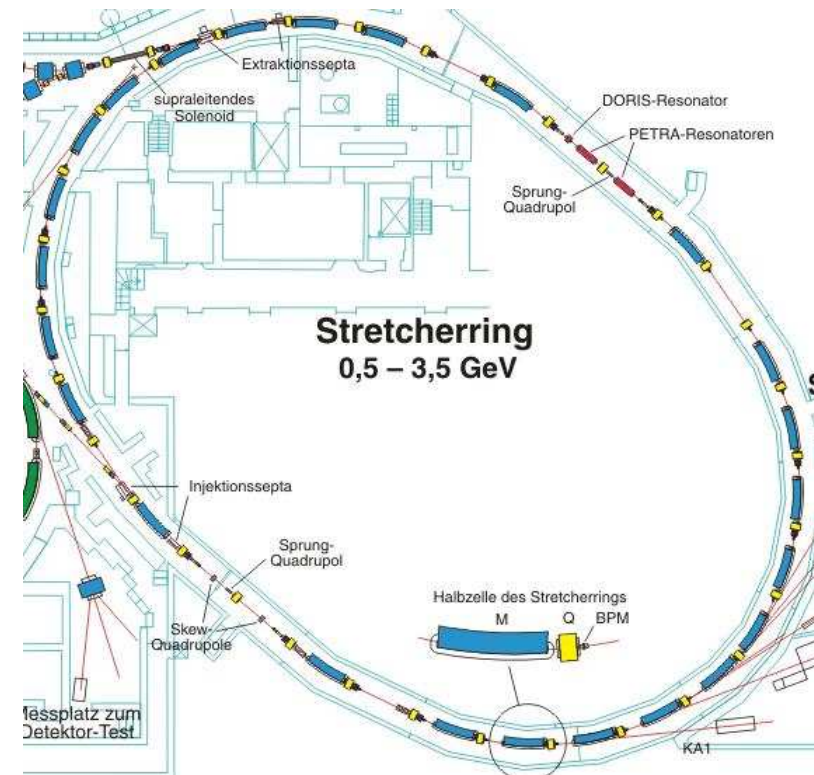
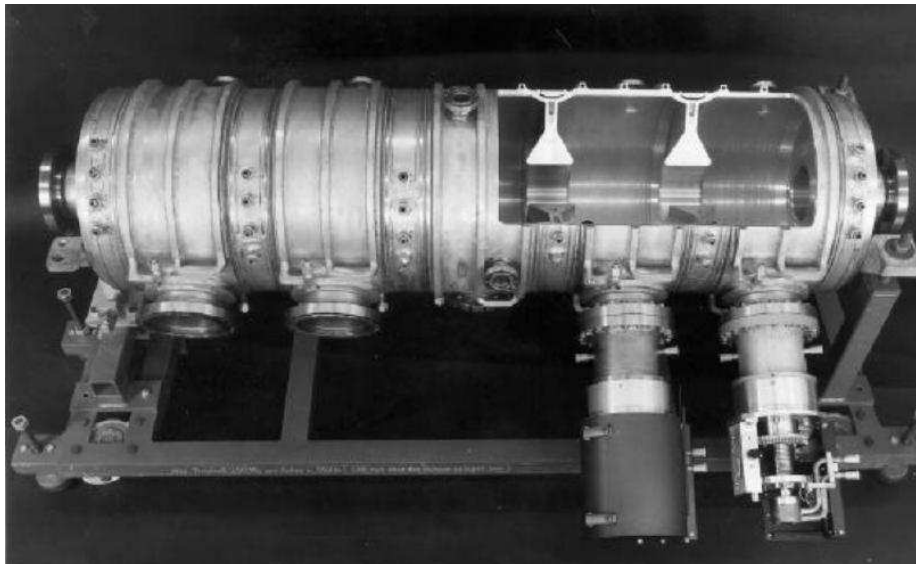


- longitudinales elektrisches Feld ist sinusförmig
→ Elektronen reiten auf der Welle und werden beschleunigt
- phasenoptimales Sollteilchen liegt auf der abfallenden Seite der Welle
- weichen die Teilchen von der optimalen Phase ab, führen sie Schwingungen um die Sollphase aus → **Synchrotronschwingung**
- solange die Schwingung nicht zu stark, werden sie stabil beschleunigt
→ **Phasenfokussierung** (verhindert longitudinales Auslaufen)
- da $\beta \approx 1$, ist die Phase „eingefroren“ (besonders im Synchrotron und ELSA)

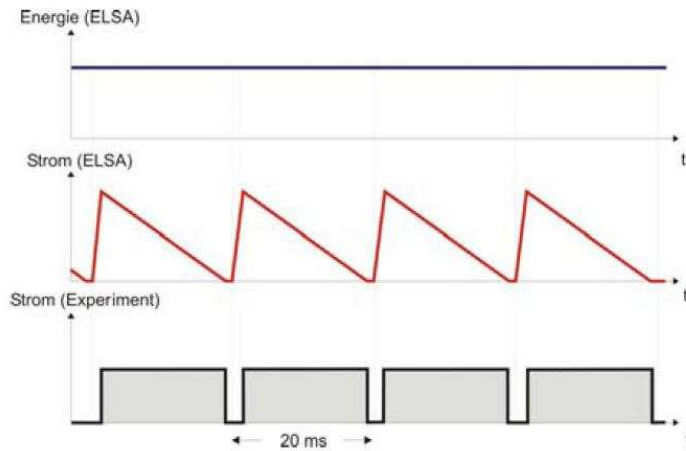


Hauptring von ELSA:

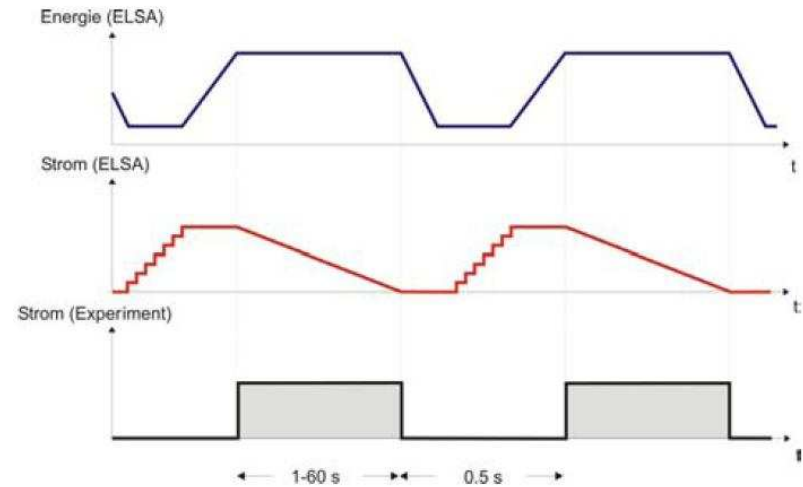
- 16 Zellen mit FODO-Struktur
„Separated-function“-Aufbau
- Zwei fünfzellige PETRA-Resonatoren



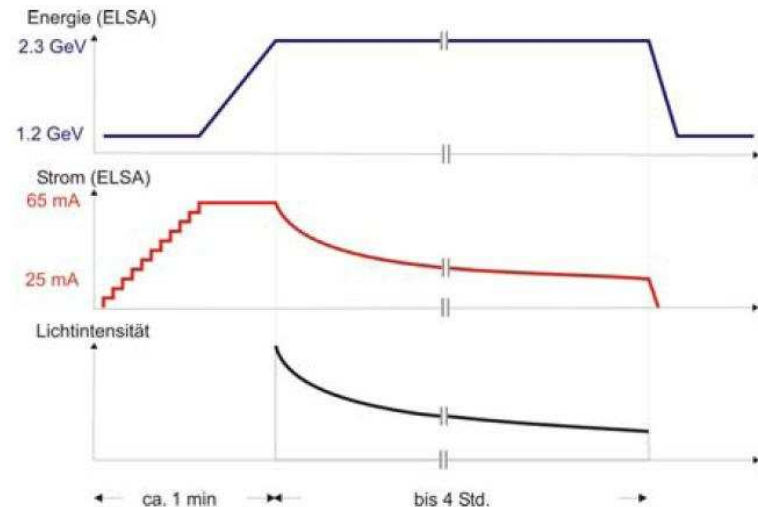
Drei Betriebsmodi:



Stretcher-Mode



Booster-Mode

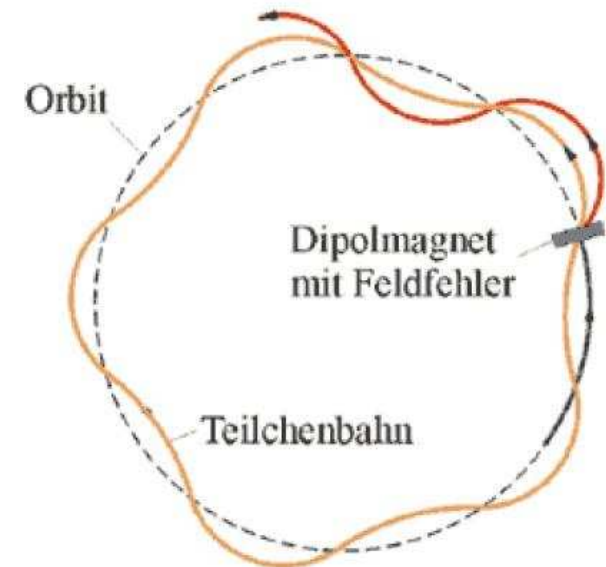


Synchrotronlicht-Mode

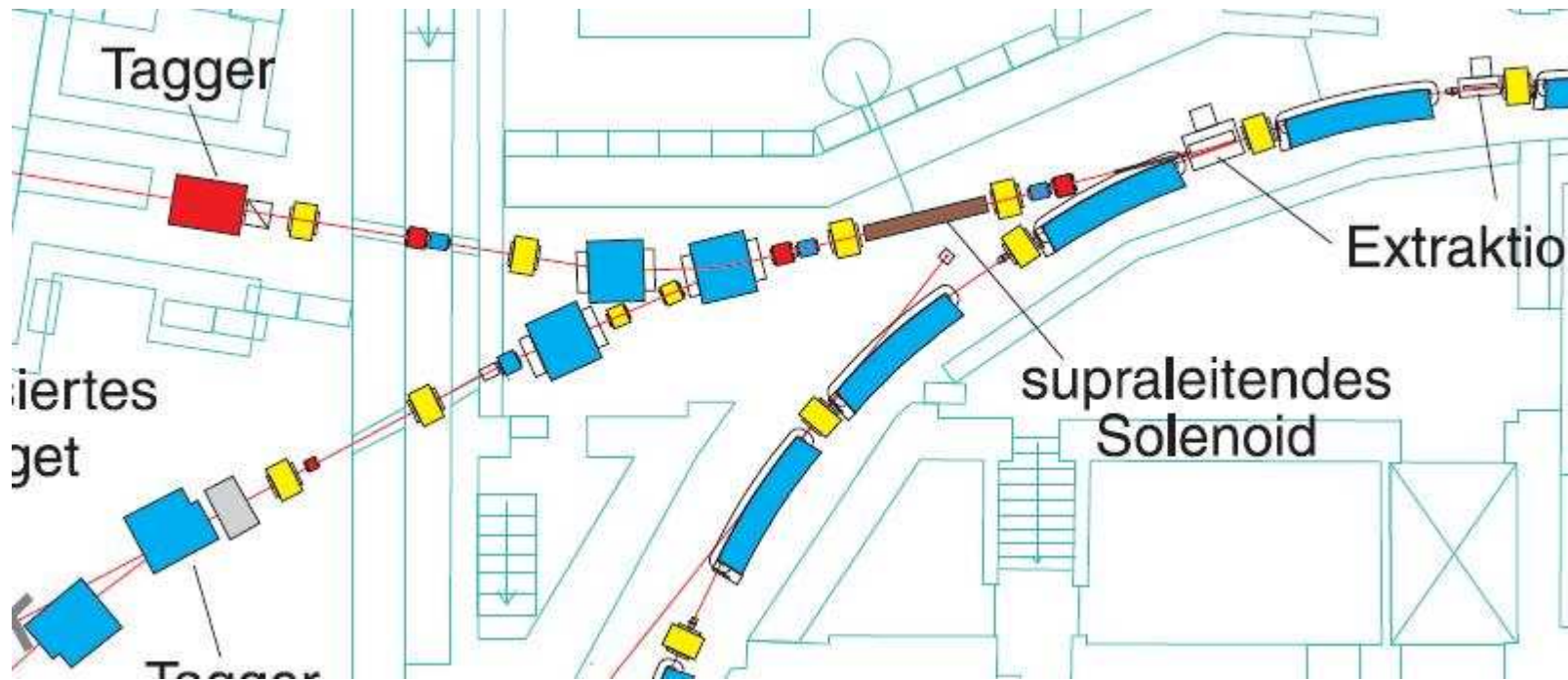
ELSA-Extraktion: „Resonanzextraktion“

$$x_c(s) \propto \frac{1}{\sin(Q\pi)}$$

- Arbeitspunkt von ELSA: $Q_x = 4,64$, $Q_z = 4,43$
- verschiebe den horizontalen Arbeitspunkt auf eine drittelzahlige Resonanz
 - Zusatzquadrupole im Ring
 - Horizontale Betatron-Amplitude wird größer
- Anregung der Resonanz durch Sextupole
- Extraktion mit zwei Septa (versorgt mit Gleichstrom)
 - Stehen in einem Maximum der Betatronfunktion
 - „schälen“ den Strahl langsam aus der Maschine
 - Kontinuierlicher Strahl ans Experiment
- nach Entleerung der Maschine schiebe Arbeitspunkt schnellstmöglich wieder zurück

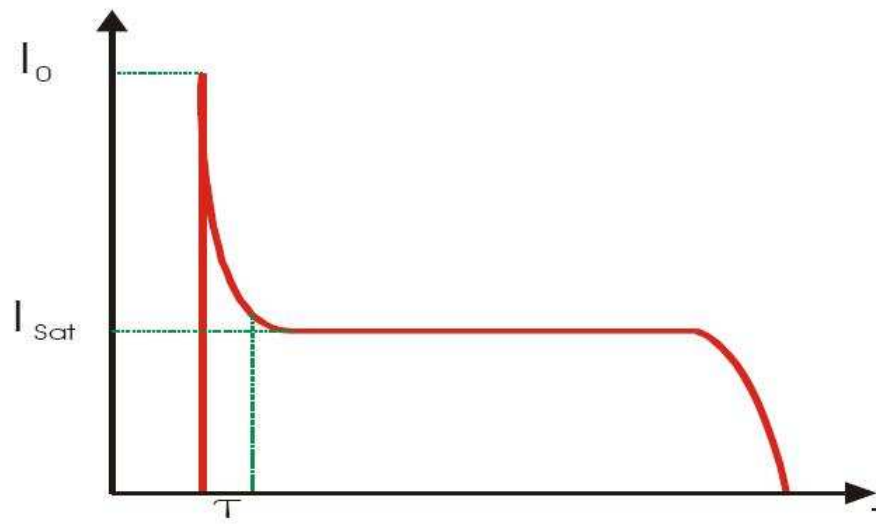


Externe Strahlführung:



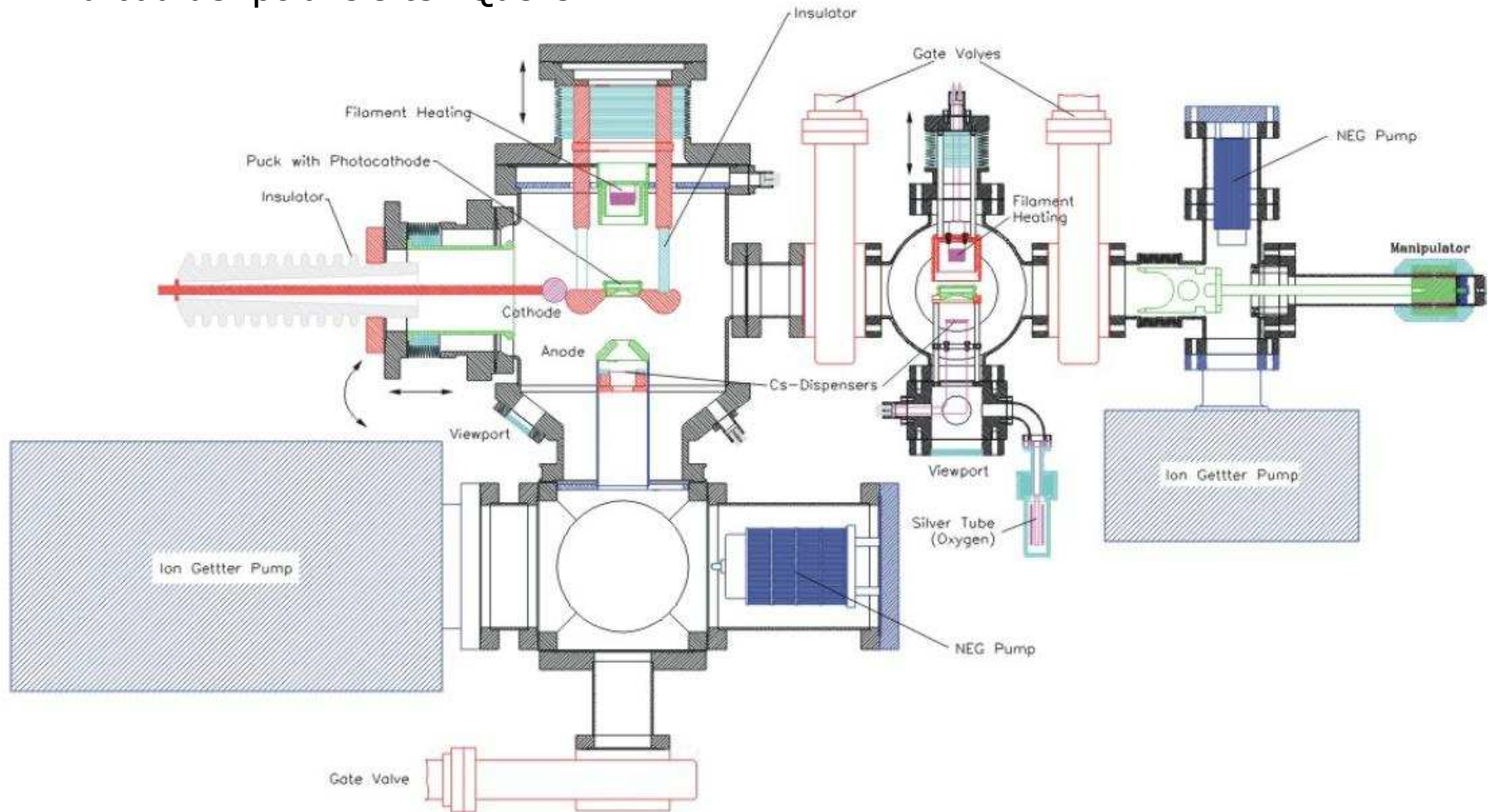
Quelle polarisierter Elektronen

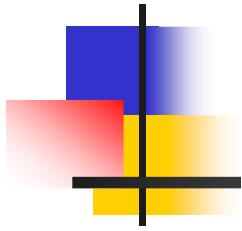
- Ausgangspunkt: Laser mit 820 nm Wellenlänge (linear polarisiert)
- $\lambda/4$ – Pockelszelle liefert zirkulare Polarisation
- wird auf einen GaAs-Kristall gelenkt und löst per Photoeffekt Elektronen aus
 - diese sind longitudinal polarisiert (in Strahlrichtung)
 - Betrieb in Ladungsbegrenzung (gleichbleibender Strom)
- elek.-statischer Deflektor dreht den Spin in transversale Richtung



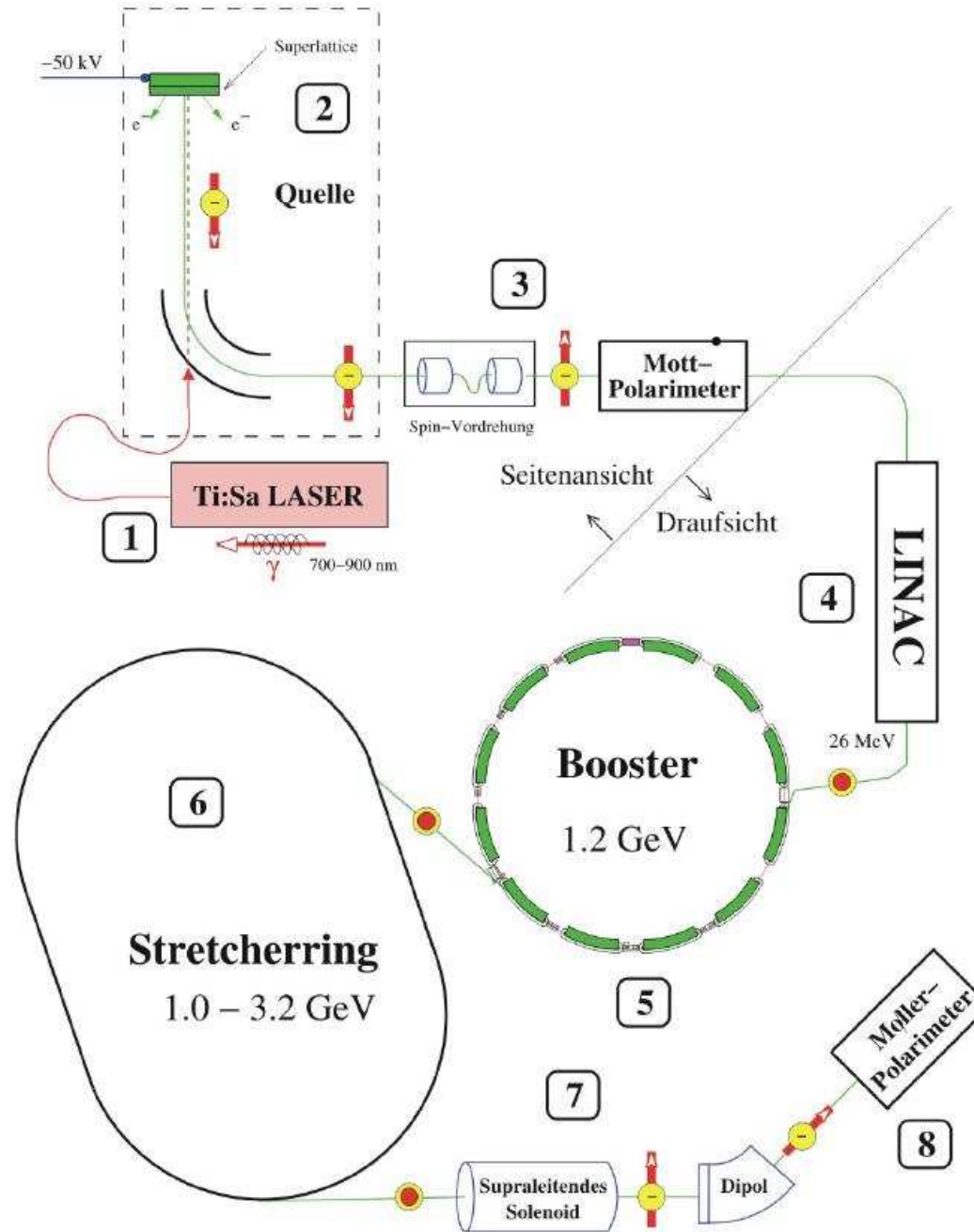
Polarisierte Elektronen an ELSA

Aufbau der polarisierten Quelle:



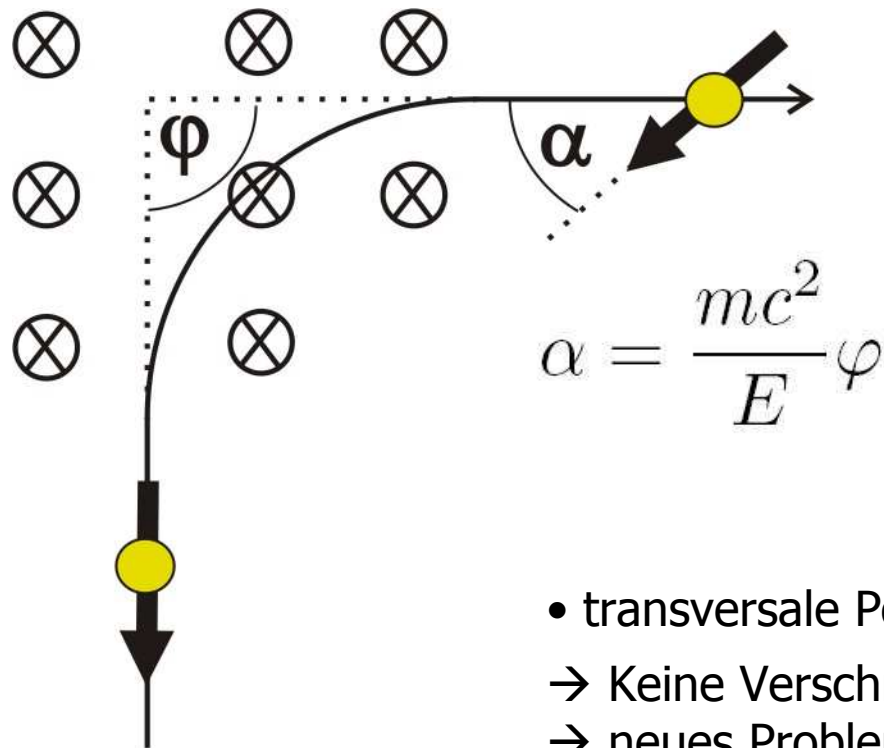


ELSA und andere Beschleunigertypen



Warum transversale Polarisation?

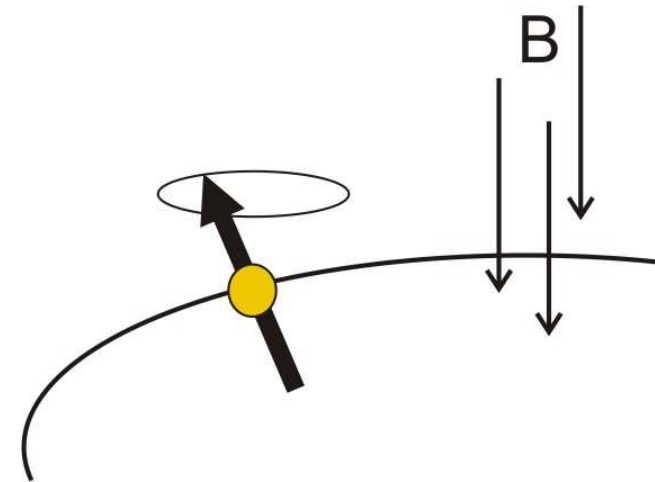
- longitudinale Polarisation: → ein großes Problem: nur teilweise Spinmitführung
→ Polarisation durch Dipolfelder verschmiert



- transversale Polarisation:
→ Keine Verschmierung aufgrund der Dipolfelder
→ neues Problem: **Spinpräzession & Resonanzen**

Spinpräzession:

- Polarisation der Elektronen nicht perfekt
→ Spin nicht parallel zum Magnetfeld
- Spin präzediert um das Magnetfeld



Abschwächung der Polarisation:

- schon im LINAC treten die ersten depolarisierenden Effekte auf
→ Fokussierspulen verursachen Larmor-Präzession
→ können durch doppelte Spulen vor der Injektion wieder kompensiert werden
- viel größeres Problem: Resonanzen während der Beschleunigung

Depolarisierende Resonanzen:

- tauchen bei bestimmten Energien während der Beschleunigung auf
- Grund: Horizontale Magnetfelder lösen die Resonanzen aus
 - bei Quadrupolen und „combined function“-Magneten
 - wirken auf Elektronen, falls sich diese nicht auf der Sollbahn bewegen

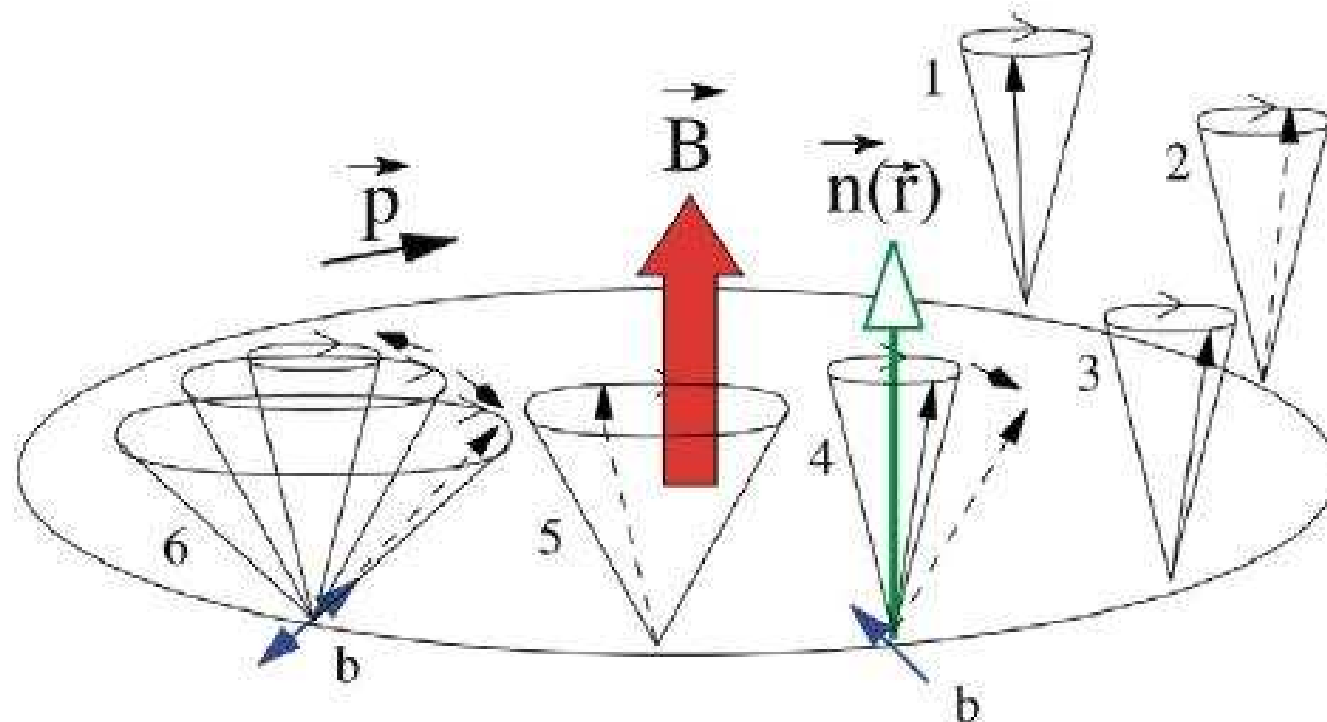
Imperfektionsresonanzen: verursacht durch vertikalen Strahlversatz oder „schiefe“ Quadrupole

Intrinsische Resonanzen: verursacht durch endliche vertikale Strahlbreite

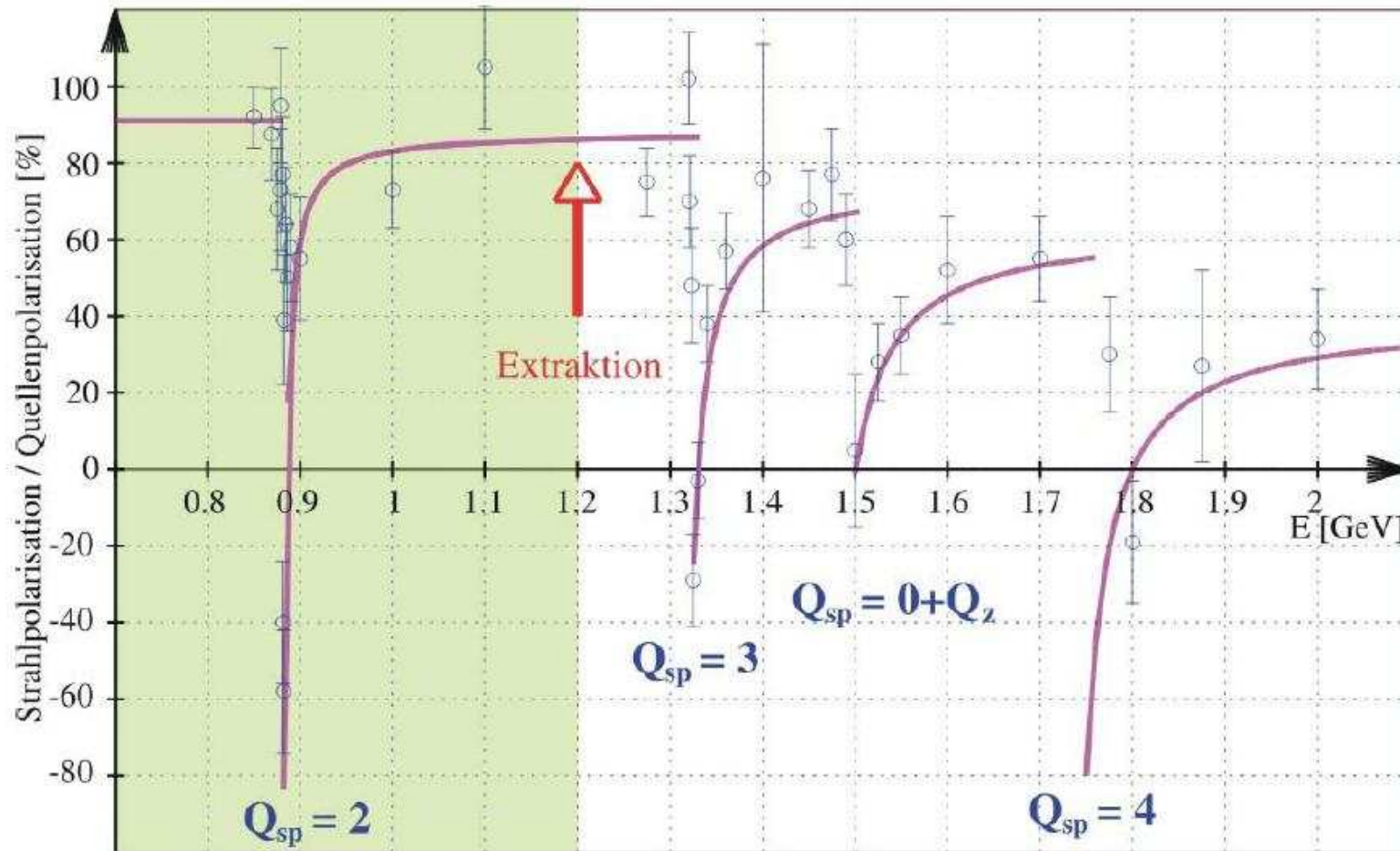
Praktisch:

im Synchrotron unterhalb von $E = 1,32$ GeV nur eine schwache depol. Resonanz

→ Wähle daher $E = 1,2$ GeV als Einschussenergie für ELSA



Spinpräzession durch horizontale Felder

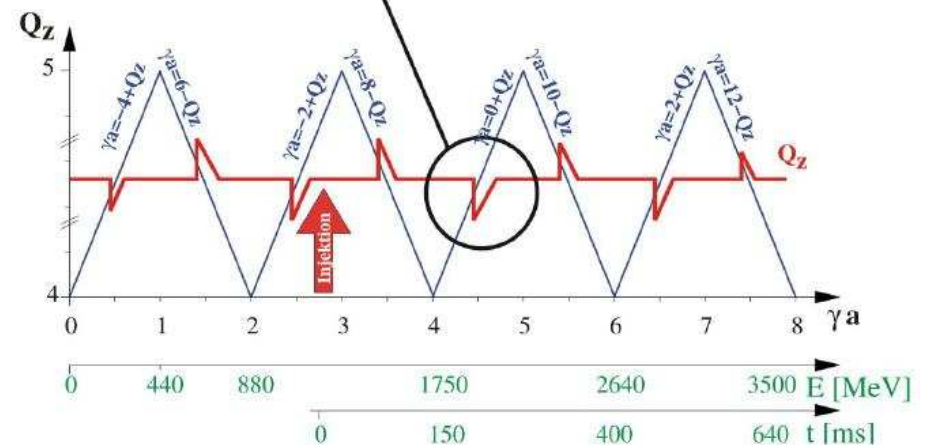
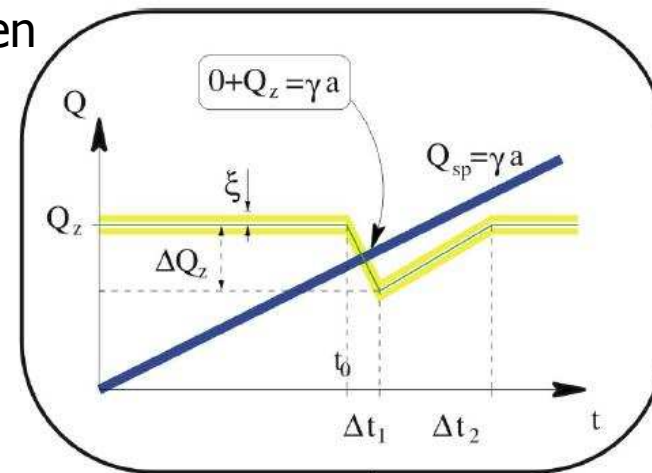


Polarisation im Synchrotron

Drei Methoden zur Unterdrückung der Resonanzen in ELSA:

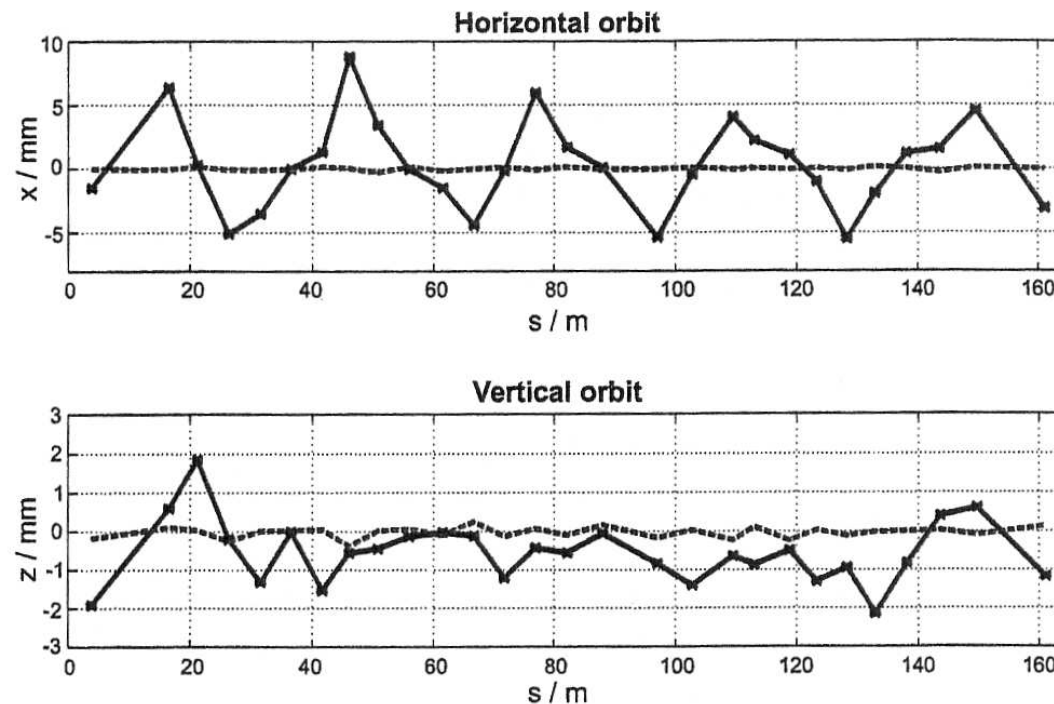
Method 1: Tune Jumps

- Zwei gepulste „tune jump“-Quadrupole ändern schnell den Arbeitspunkt Q_z
In sehr kurzer Zeit → schnelles Überqueren
- muss bis zu fünfmal pro Rampzyklus geschehen



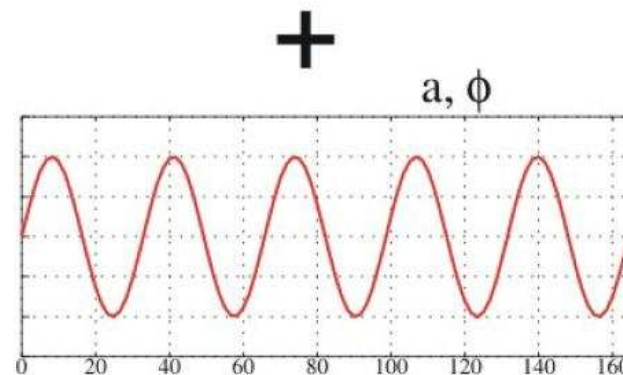
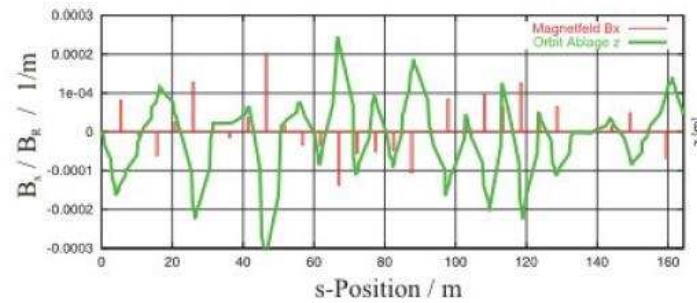
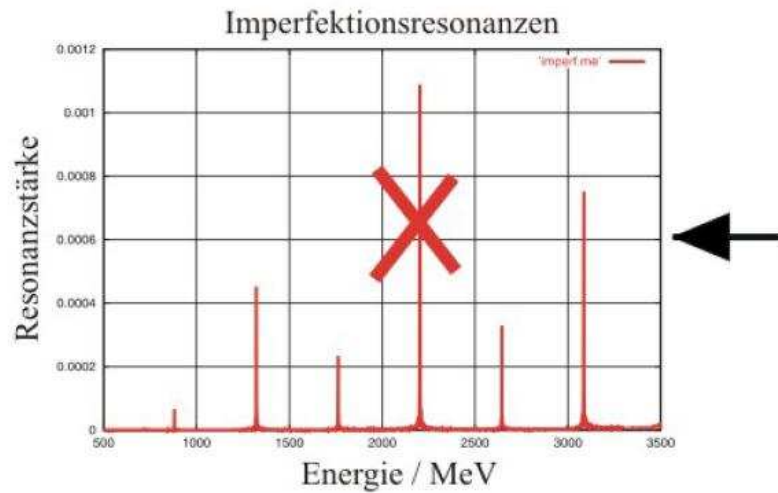
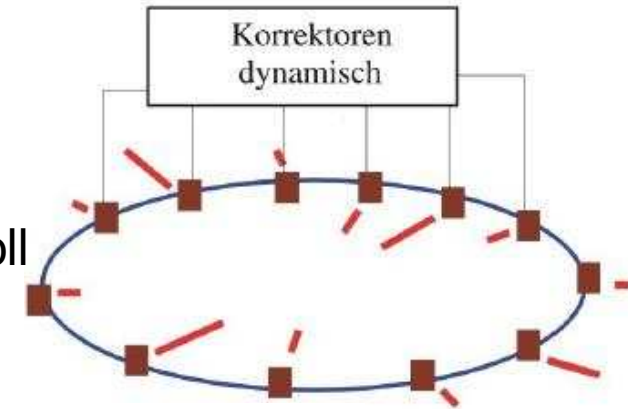
Methode 2: „Closed Orbit“ - Korrektur

- System zur Lageoptimierung des Strahls
- 28 Lagemonitore im Ring messen transversalen Strahlversatz
→ 19 horizontale und 21 vertikale Korrekturmagnete



Method 3: Harmonische Korrektur

- zusätzliches Magnetfeld entlang des Rings
- immer dann, wenn eine Resonanz gekreuzt werden soll



Erreichte Polarisation:

