



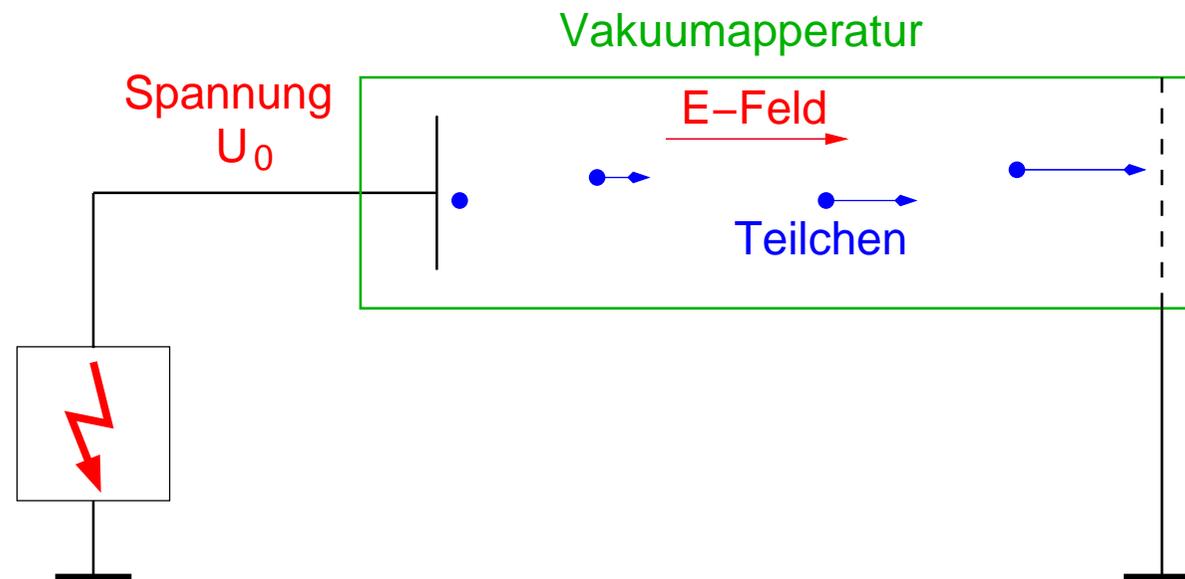
Teilchenbeschleuniger

- Linearbeschleuniger
- Zyklotron
- Mikrotron
- Synchrotron
- Speicherringe

Stanford Linear Accelerator Center
SLAC

Linear Beschleuniger (LINAC)

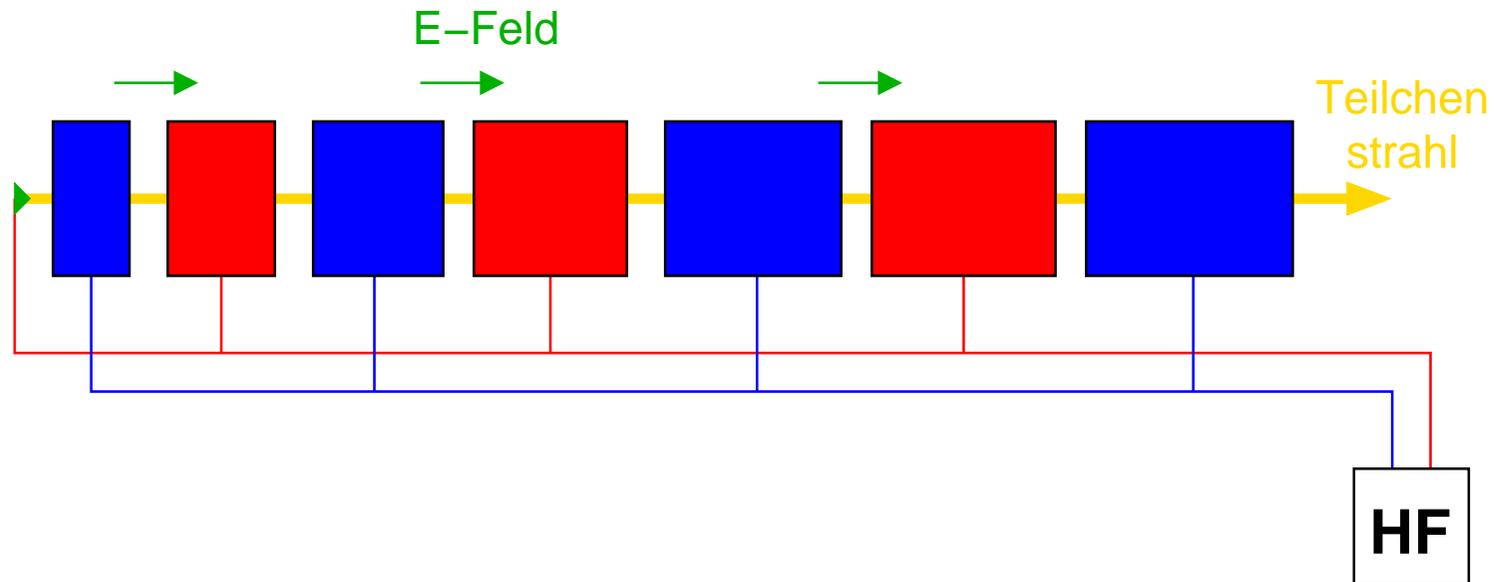
- Beschleunigung in einem Potential mit der Spannung U_0 ist nur bis zu einigen 10^6 V möglich. Problem: Isolation, Überschläge



- Anwendung zur Extraktion von Teilchen
- Entwicklung von Linear Beschleunigern (Linear Accelerator, LINAC) für höhere Energien

Linear Beschleuniger (LINAC)

- Entwicklung von Linear Beschleunigern (Linear Accelerator, LINAC)
- Aufbau eines einfachen LINAC



- Driftröhren, die mit den Polen eines Hochfrequenzsenders

$$U(t) = U_0 \sin \omega t$$

verbunden sind.

- Die Beschleunigung erfolgt immer im Spalt zwischen den Röhren

Linear Beschleuniger (LINAC)

- Energie nach der i -ten Stufe

$$E_i = \frac{1}{2}mv_i^2$$

- Abstand zwischen dem i -ten und dem $i + 1$ -ten Spalt

$$l_i = \frac{v_i \cdot \tau_{HF}}{2} = \frac{v_i}{2\nu_{HF}} = \frac{v_i \cdot \lambda_{HF}}{2c} = \beta_i \frac{\lambda_{HF}}{2}$$

Zeit $\tau_{HF}/2$ wird benötigt, um eine Driftstrecke zu durchlaufen

Linear Beschleuniger (LINAC)

- Feld $U(t)$ muß umgepolt werden, wenn die Teilchen gerade in der Driftröhre sind – Faradaykäfig
- Teilchen erfahren in jeder Driftstrecke eine Beschleunigung

$$U_0 \sin \phi_s$$

ϕ_s ist die Phase des Teilchens relativ zum Hochfrequenzfeld

- Erreichbare Gesamtenergie nach k Driftstrecken wird damit

$$E_k = kqU_0 \sin \phi_s$$

- Gesamtenergie hängt somit nicht mehr von der Spannung U_0 ab, sondern nur von der Zahl der Driftstrecken und somit von der Länge des LINAC
- Geschwindigkeit der Teilchen nimmt zu \Rightarrow Bei konstanter Frequenz muß die Länge der Driftstrecken größer werden
- Wenn $v \approx c$ bleibt v konstant und nur noch die Energie nimmt zu \Rightarrow Abstand kann konstant bleiben



- Moderne LINAC verwenden anstellen von Driftröhren Hohlleiterstrukturen
- Verwendung von supraleitenden Niob Modulen im ILC oder XFEL
- Felder $>25\text{MV/m}$ sind damit möglich
- Einsatz von Linearbeschleunigern als erste Stufe in Speicherringen, z.B. bei der ALS in Berkeley, Californien
- Linearbeschleuniger können beliebig lang werden. Problem: Kosten!
- Lösung: Beschleunigung auf einer Kreisbahn

Zyklotron

- Prinzip wurde von E.O. Lawrence 1930 vorgeschlagen.
- Teilchen bewegen sich in einem homogenen Magnetfeld \vec{B}
- Umlauffrequenz (Zyklotronfrequenz)

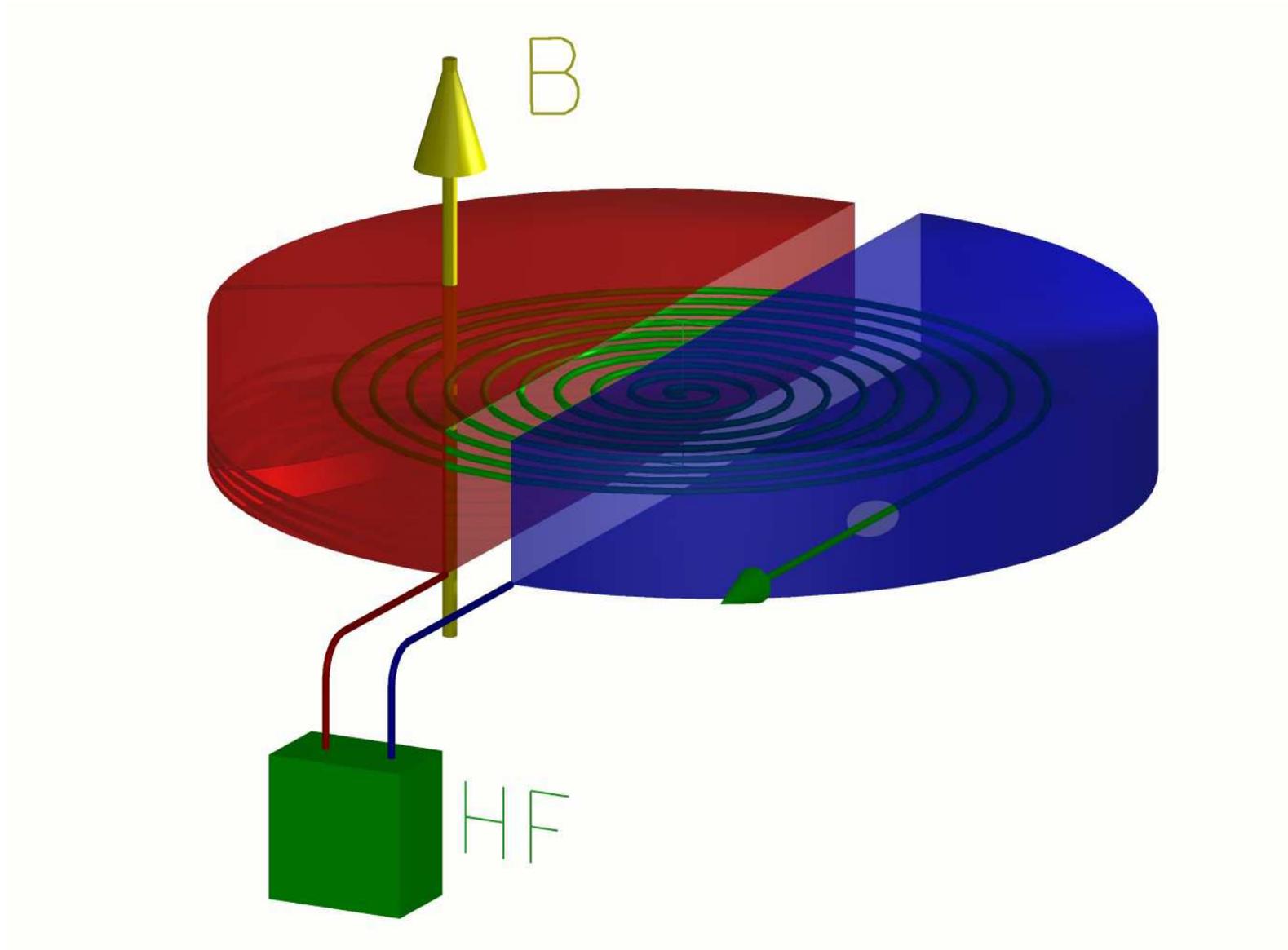
$$\omega_c = \frac{e}{m} B_z$$

- ω_c ist unabhängig von der Teilchengeschwindigkeit v , solange die Teilchen nicht relativistisch behandelt werden können ($v/c \leq 0.15$)
- Bei höheren Energien ändert sich die Masse m und die Frequenz des Hochfrequenzfeldes muß variiert werden.
- Beispiel für $U = 10\text{kV}$.

$$E_{kin} = e \cdot U = \frac{1}{2} m_e v_e^2 \Rightarrow v_e/c = 0.2!$$

- Elektronen müssen bereits bei 10 keV Energie relativistisch behandelt werden

Zyklotron Aufbau



Zyklotron



Zyklotron der
Uni Bonn

Mikrotron

- Beschleunigung mittels eines Linearbeschleunigers
- Umlenkung wie im Zyklotron in einem Ablenkmagneten
- Ablenkradius R im Magnetfeld B für relativistische Teilchen

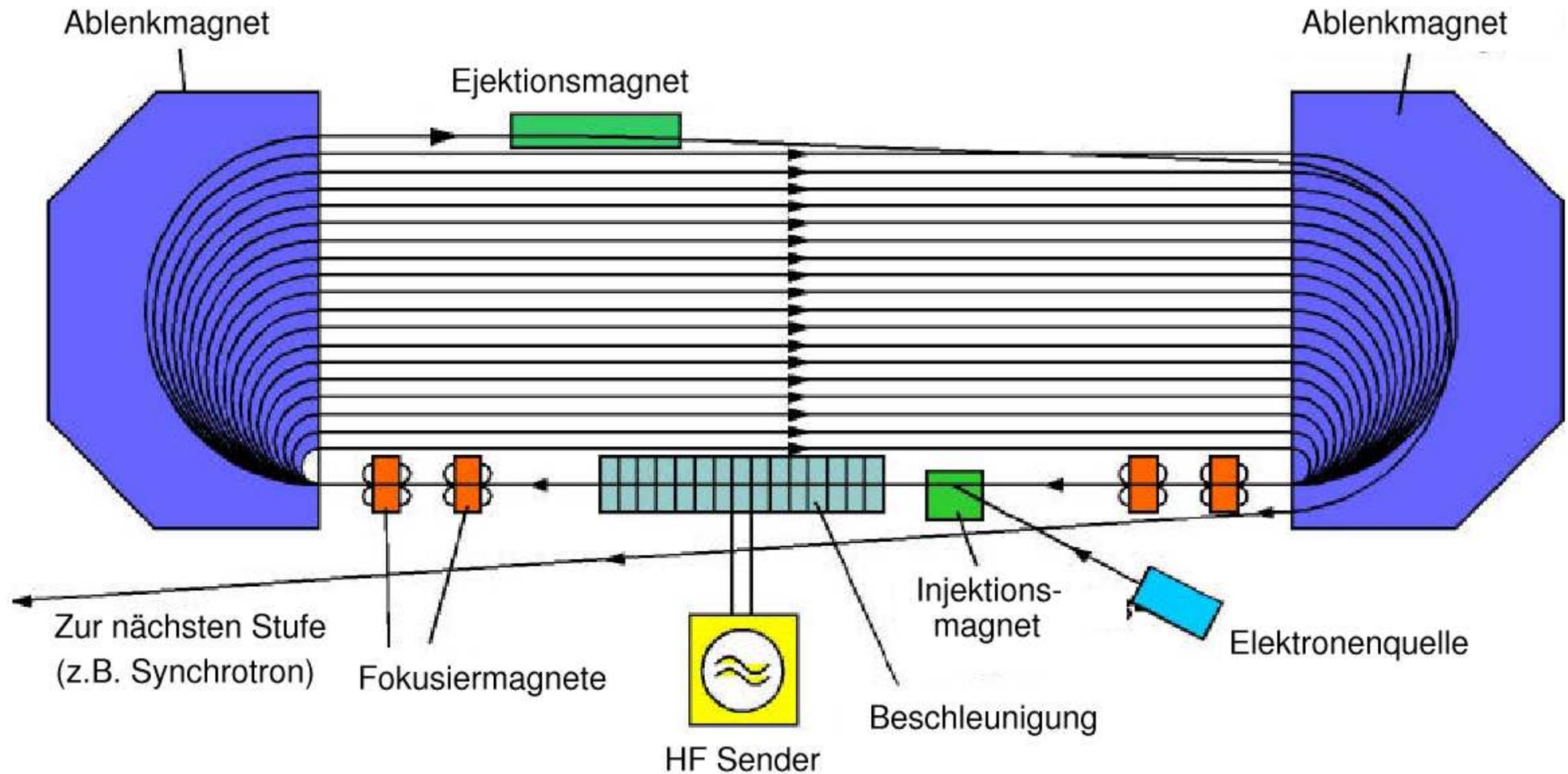
Lorentzkraft = Zentrifugalkraft

$$evB = m \frac{v^2}{R}$$

$$\Rightarrow R = \frac{mv}{eB} = \frac{v mc^2}{ec^2 B} = \frac{v}{ec^2 B} E$$

- Beschleunigung muß so erfolgen, daß die Elektronen bei jedem Umlauf genau in Phase mit dem Hochfrequenzfeld sind
- Energien bis einige 100 MeV können erreicht werden.
- Einsatz zum Beispiel am Speicherring BESSY II als ersten Beschleuniger

Mikrotron Prinzip



Kleines Mikrotron



Großes Mikrotron



MAMI 3

Synchrotron

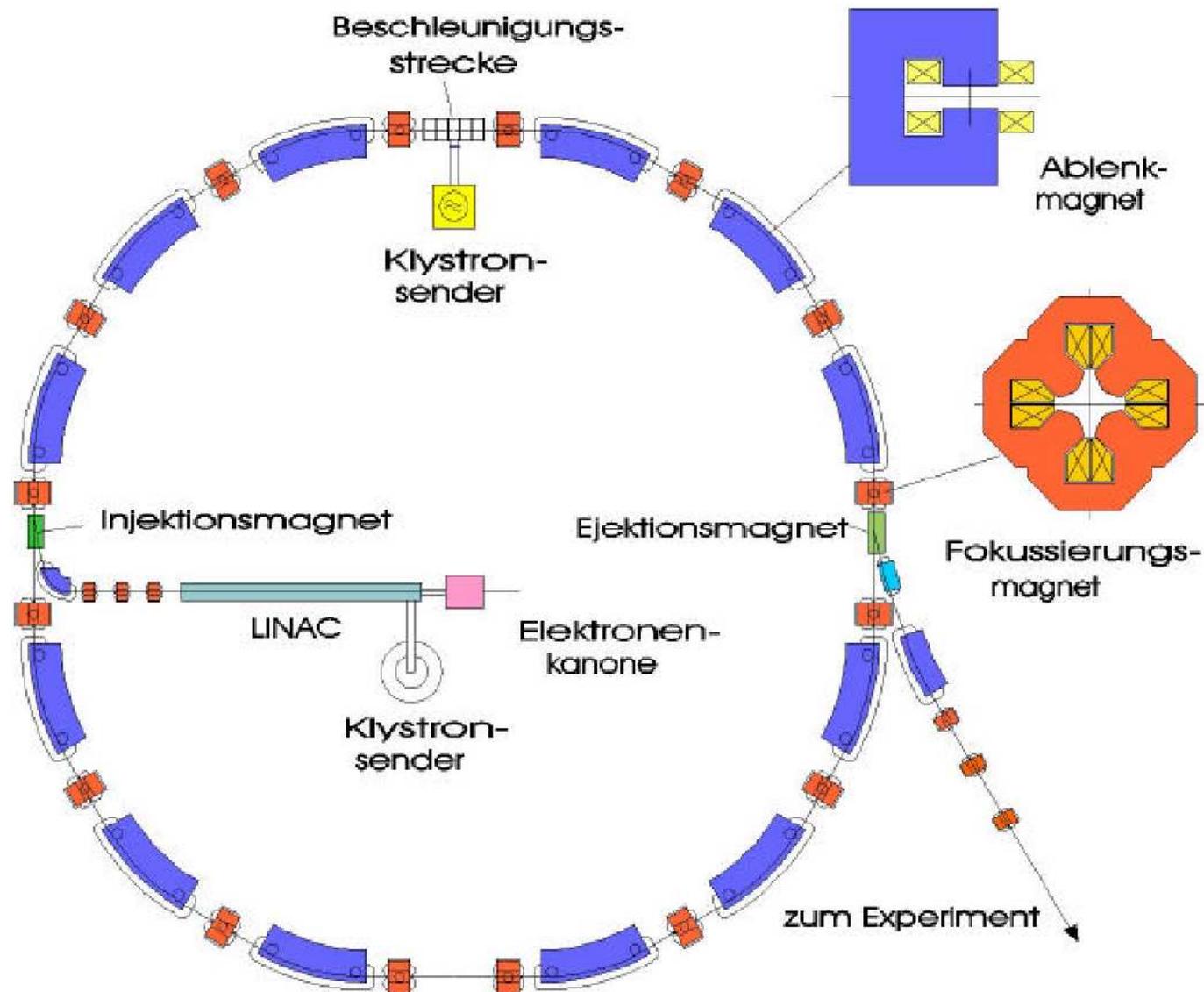
- Für relativistische Teilchen mit $v \approx c$ gilt für den Bahnradius in einem Magnetfeld

$$R = \frac{E}{ecB}$$

- Für $E > 1$ GeV und $B = 5$ T wächst der Radius R auf einige Meter an
- Technisch sehr aufwendig!
- Lösung:
 - Bewegung auf einer Teilchenbahn mit festem Radius R
 - Ablenkung in einzelnen, schmalen Ablenkmagneten
 - $E/B = \text{const.} \Rightarrow E$ und B müssen synchron hochgefahren werden

⇒ Synchrotron

Aufbau eines Synchrotrons



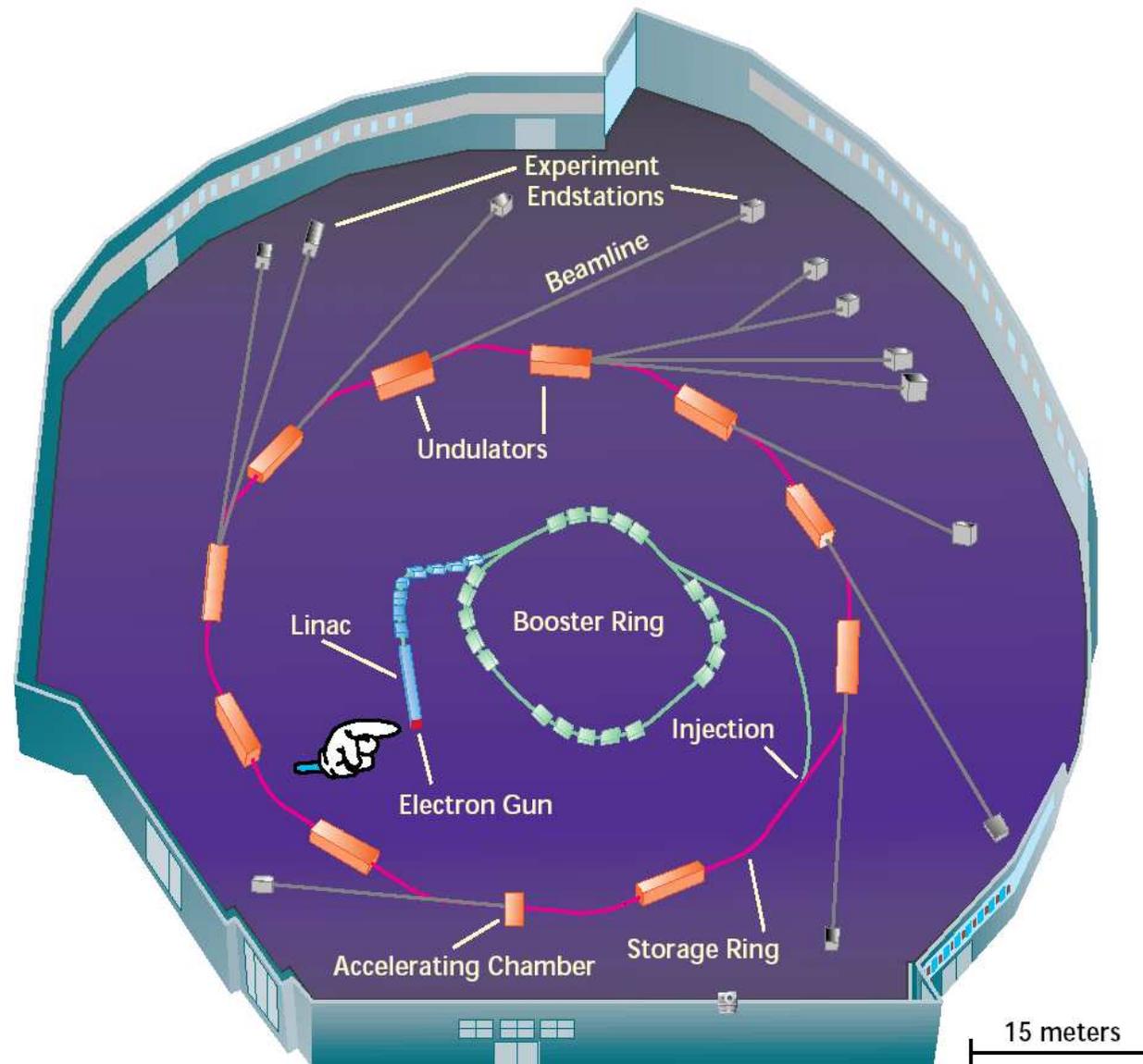
Speicherringe

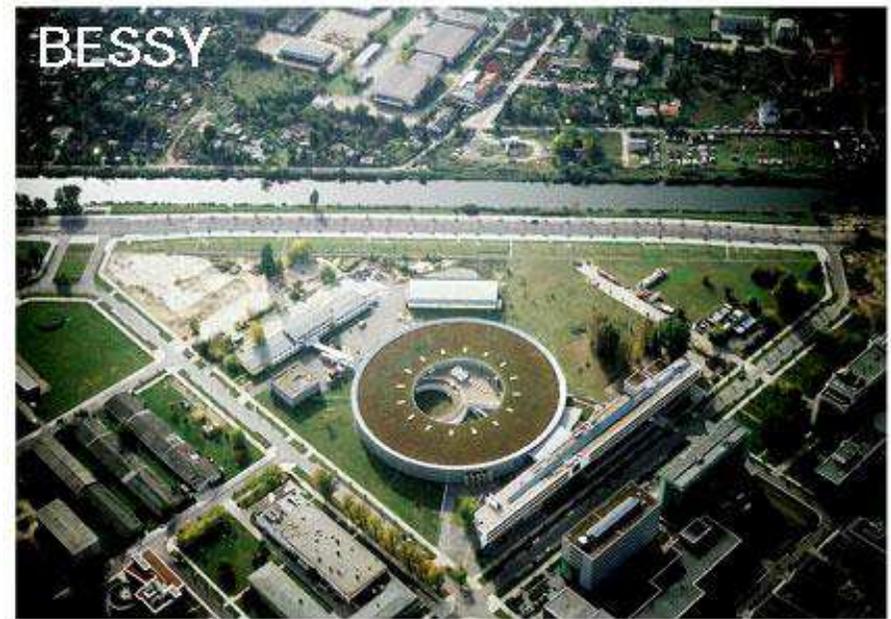
- Moderne Synchrotronstrahlungsquellen sind als Speicherringe ausgelegt.
- Synchrotron kann nicht bei $E = 0$ starten, da dann auch $B = 0$ gelten müsste. Entsprechende Magnete lassen sich nicht bauen.
 - **LINAC** oder **Microtron** als Vorbeschleuniger
 - **Synchrotron** um Elektronen auf die gewünschte Energie E zu beschleunigen
 - **Speicherring**, um die Elektronen auf der konstanten Ringenergie E zu halten.
- Im Speicherring wird den Teilchen die Energie wieder zugeführt, die sie bei einem Umlauf verlieren.

Speicherringe

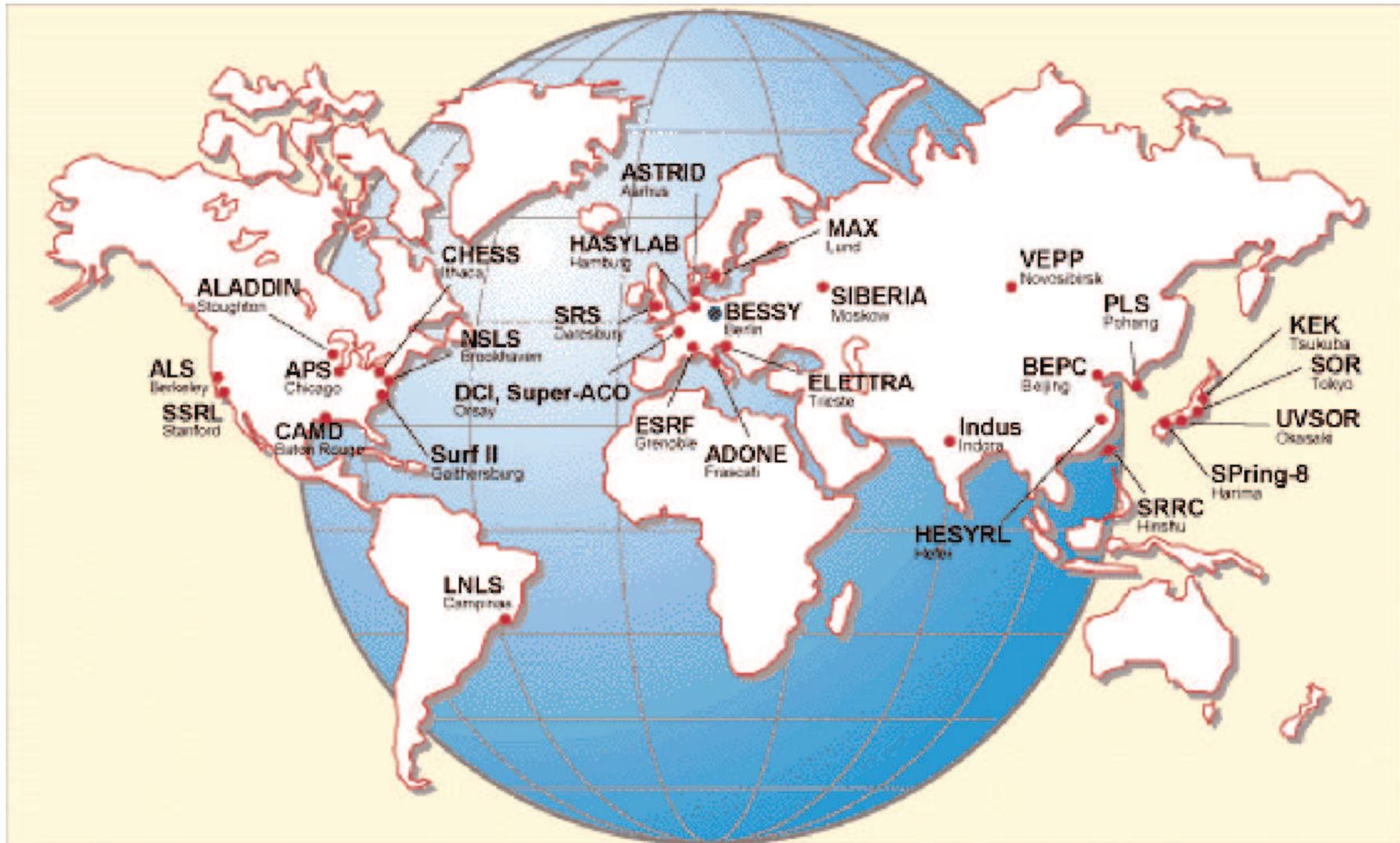
- Parameter eines typischen Speicherringes
 - Lebensdauer τ : einiger Stunden
 - Ringstrom I : 100-400 mA
 - $I \times \tau$: 1-4 Ah
 - Abnahme des Ringstromes I durch Stöße mit dem Restgas
- ⇒ Ultra-Hochvakuum (UHV) Bedingungen: $10^{-9} - 10^{-10}$ mbar Druck
- Kein gleichmäßiger Strom, Elektronen treten in **Bunchen** auf.

Aufbau eines modernen Speicherrings





Speicherringe weltweit



www.lightsources.org

Geladene Teilchen in Magnetfeldern

Sollbahn

Wichtig ist die Bewegung im Speicherring, relativ zur Sollbahn s . Die Abweichungen von dieser Sollbahn in x und z Richtung kann mit einem handlichen Matrixformalismus beschrieben werden

Emittanz

- Eine wichtige Größe ist die Einhüllende $E(s)$ einer Vielzahl von Trajekturen. Diese ist durch

$$E(s) = \sqrt{\epsilon\beta(s)}$$

beschrieben.

ϵ Emittanz

$\beta(s)$ Betafunktion oder Amplitudenfunktion

Emittanz

Bahngleichung

- Die Bahngleichung ist gegeben durch

$$x(s) = \sqrt{\epsilon\beta(s)} \cos(\Psi(s) + \phi) \quad \text{mit} \quad \Psi(s) = \int_0^s \frac{d\sigma}{\beta(\sigma)}$$

- Die Abweichung $x(s)$ wird durch eine Schwingung beschrieben (Betatronschwingung)
- Die Strahlführung muß so designed werden, daß nach einem oder mehreren Umläufen ein Elektron wieder in sich selber zurückgeführt wird !

Typische Magnetstrukturen

Emittanz

- Die Emittanz ist über den gesamten Speicherring konstant.
- Emittanz entspricht bis auf einen Faktor π der Fläche A der Ellipse im Phasenraum (x, x') .

$$A = \pi \cdot \epsilon$$

Strahlquerschnitt

Die Elektronenverteilung im Strahl kann gut durch eine Gaussverteilung mit der Standardabweichung σ beschrieben werden.

$$\epsilon = \frac{\sigma^2(s)}{\beta(s)}$$

Die Emittanz ist zusammen mit der Betafunktion ein Maß für den Strahlquerschnitt im Speicherring.

Typische Magnetstrukturen

FEL

Ein FEL zeichnet sich durch eine sehr kleine Emittanz des Elektronenstrahls aus

Magnetfelder

- Die gesamte Strahlführung in Synchrotrons erfolgt über magnetische Felder. Die wichtigsten Felder sind dabei
- Elektrische Felder können zur Ablenkung hochrelativistischer, geladener Strahlen nicht genutzt werden

Multipol	Definition	Wirkung
Dipol	$\frac{1}{R} = \frac{e}{p} B_{z0}$	Strahlableitung
Quadrupol	$k = \frac{e}{p} \frac{dB_z}{dx}$	Strahlfokussierung
Sextupol	$m = \frac{e}{p} \frac{d^2 B_z}{dx^2}$	Kompensation Chromatizität
Oktupol	$o = \frac{e}{p} \frac{d^3 B_z}{dx^3}$	Feldfehlerkompensation

$$\frac{1}{R(x, z, s)} = \frac{e}{p} B_z(x) = \frac{1}{R} + k \cdot x + \frac{1}{2!} m \cdot x^2 + \frac{1}{3!} o \cdot x^3 + \dots$$

Bahn Matrizen - Feldfreier Raum

Transformation durch eine Magnetstruktur

$$\vec{X}' = M \cdot \vec{X}, \quad X = \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \end{pmatrix}$$

Mehrfache Anwendung auf Anfangsvektor X_0 liefert die Teilchenbahn durch komplexe magnetische Strukturen.

Driftstrecke:

$$M_{Drift} = \begin{pmatrix} 1 & s & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

horizontal fokussierender Quadrupol $k < 0$

$$M_{QF} = \begin{pmatrix} \cos \Omega & \frac{1}{\sqrt{|k|}} \sin \Omega & 0 & 0 \\ -\sqrt{|k|} \sin \Omega & \cos \Omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cosh \Omega & \frac{1}{\sqrt{|k|}} \sinh \Omega \\ 0 & 0 & -\sqrt{|k|} \sinh \Omega & \cosh \Omega \end{pmatrix}$$

$$\Omega = \sqrt{|k|} s$$

vertikal fokussierender Quadrupol $k > 0$

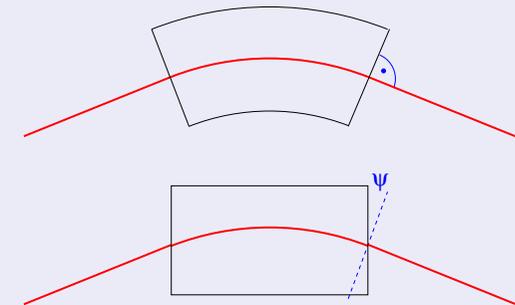
$$M_{QF} = \begin{pmatrix} \cosh \Omega & \frac{1}{\sqrt{k}} \sinh \Omega & 0 & 0 \\ \sqrt{k} \sinh \Omega & \cosh \Omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \Omega & \frac{1}{\sqrt{k}} \sin \Omega \\ 0 & 0 & -\sqrt{k} \sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix}$$

Dipolmagnet

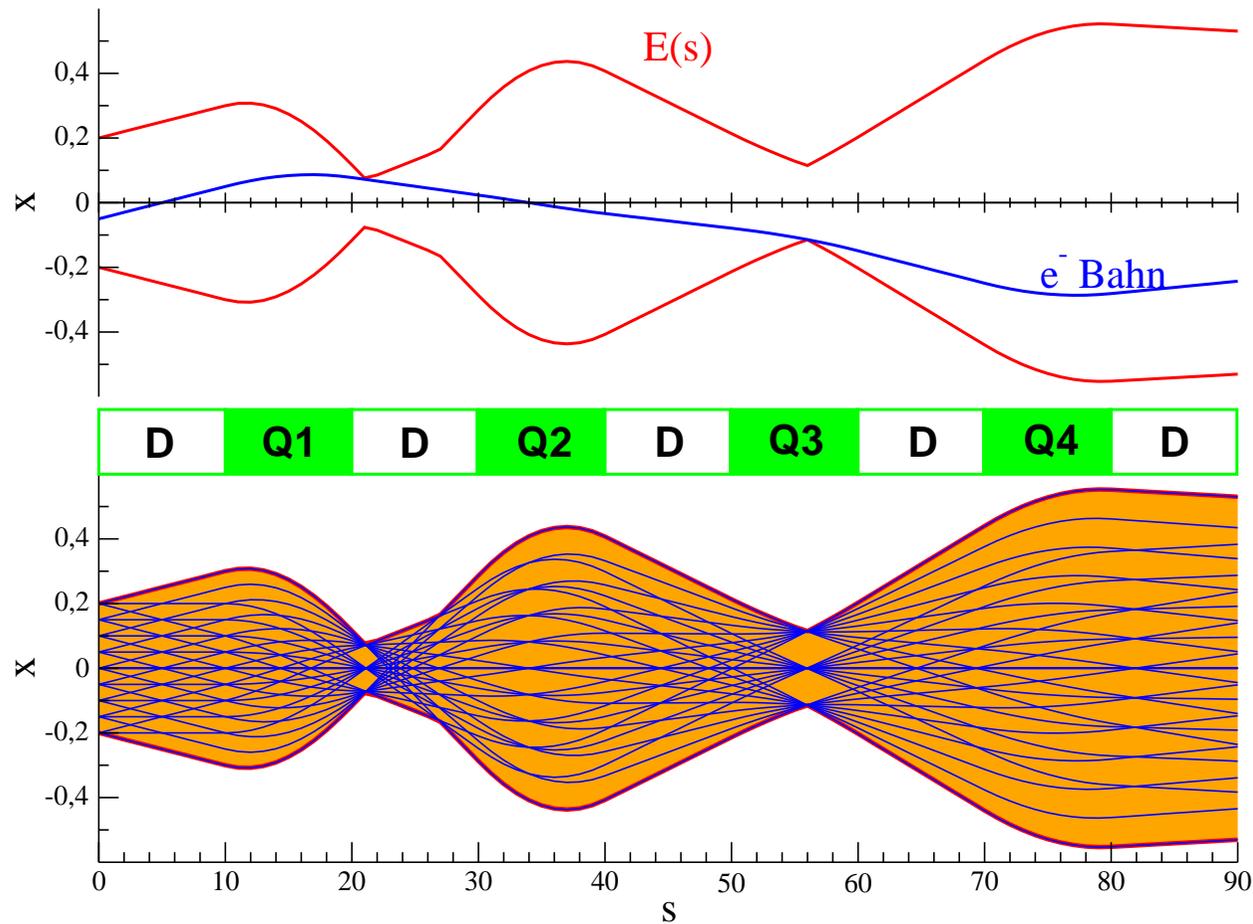
$$M_{Dipol} = \begin{pmatrix} \cos \frac{s}{R} & R \sin \frac{s}{R} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R} \sin \frac{s}{R} & \cos \frac{s}{R} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Kantenfokussierung

$$M_{Kante} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tan \psi}{R} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\tan \psi}{R} & 1 \end{pmatrix}$$



Teilchenbahnen



Q_n Quadrupolmagnet
D Driftstrecke

1. Generation

Speicherringe, die für die Hochenergiephysik gebaut worden sind und dann parasitär für Experimente mit SR verwendet worden sind.

Großer Elektronenstrahldurchmesser = Große Emittanz

2. Generation

Speicherringe, die dediziert zur Erzeugung von SR an Ablenkmagneten gebaut worden sind

mittlere Emittanz

3. Generation

Speicherringe für Synchrotronstrahlung mit langen geraden Segmenten zum Einbau von Insertion Devices

kleine Emittanz

4. Generation (?)

Freier Elektronen Laser (FEL)

Hier ist die Zuordnung etwas umstritten, da FEL's Quellen mit vollkommen neuen Eigenschaften sind.

Take Home Message – Beschleuniger

- Teilchenbeschleuniger werden als Linear- und Kreisbeschleuniger realisiert
- Elektronen erreichen einfach relativistische Geschwindigkeiten
- Moderne Ringbeschleuniger basieren auf dem Prinzip des Synchrotrons
- Nutzung von Magnetstrukturen um die Teilchen auf der Kreisbahn zu halten
- Dedizierte Synchrotronspeicherringe zur Produktion von Röntgenstrahlung
- Emittanz: Phasenraumvolumen des Strahls beschreibt die Qualität des Elektronenstrahls