



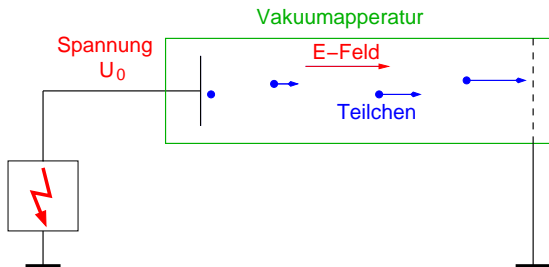
Teilchenbeschleuniger

- Linearbeschleuniger
- Zyklotron
- Mikrotron
- Synchrotron
- Speicherringe

Stanford Linear Accelerator Center
SLAC

Linear Beschleuniger (LINAC)

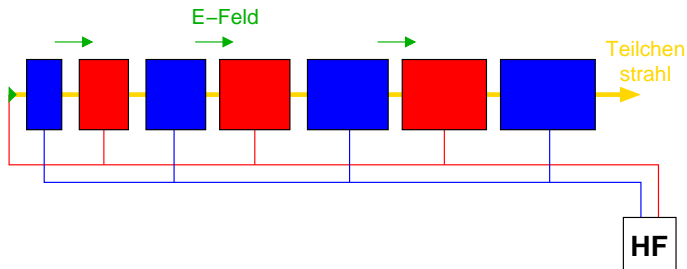
- Beschleunigung in einem Potential mit der Spannung U_0 ist nur bis zu einigen 10^6 V möglich. Problem: Isolation, Überschlüge



- 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)

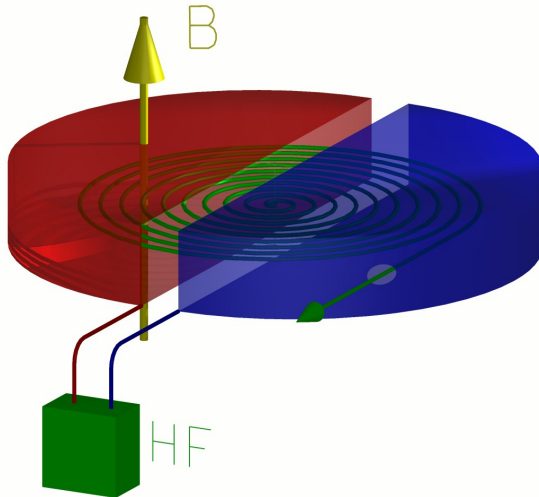
$$\omega_c = \frac{e}{m} B_z$$

- 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

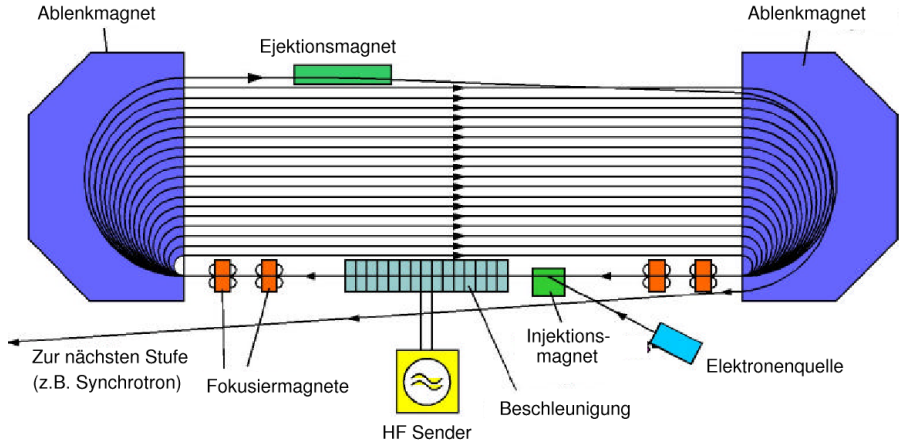
Lorentzkraft = Zentrifugalkraft

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

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

- 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

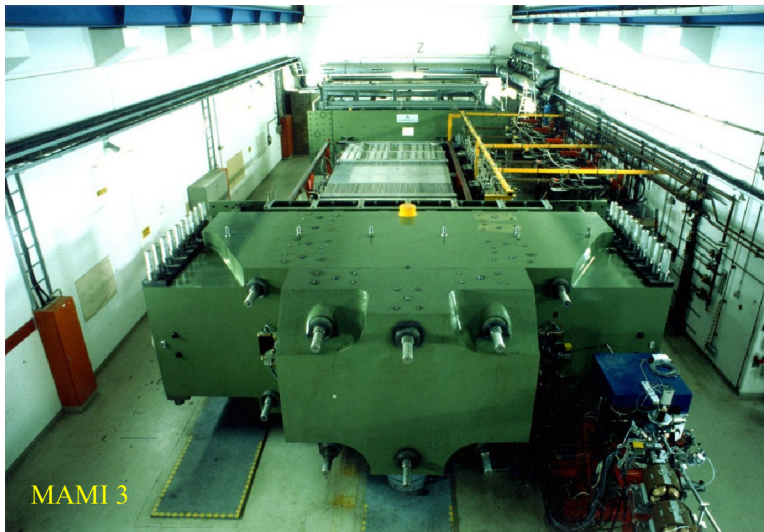
Mikrotron Prinzip



Kleines Mikrotron



Großes Mikrotron



MAMI 3

Synchrotron

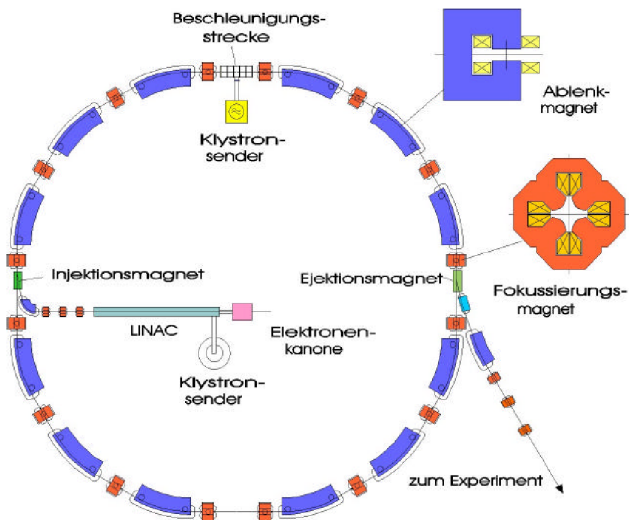
- Für relativistische Teilchen mit $v \approx c$ gilt für den Bahnradius in einem Magnetfeld

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

- 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

\Rightarrow Synchrotron

Aufbau eines Synchrotrons



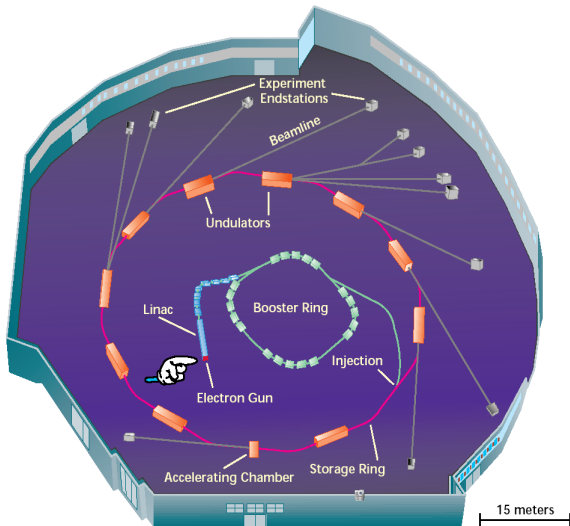
Speicherringe

- 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



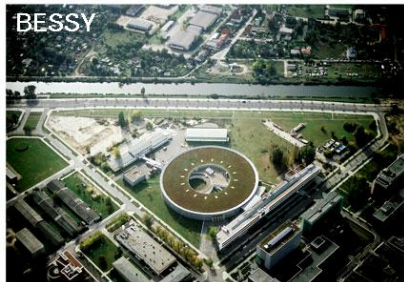
ALS



ESRF



BESSY



Speicherringe weltweit



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 fokusierender 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 fokusierender Quadrupol $k > 0$

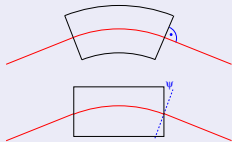
$$M_{QF} = \begin{pmatrix} \cosh \Omega & \frac{1}{\sqrt{k}} \sinh \Omega & 0 & 0 \\ \sqrt{k} \sinh \Omega & \cosh \Omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \Omega & \frac{1}{\sqrt{k}} \sin \Omega \\ 0 & 0 & -\sqrt{k} \sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix}$$

Dipolmagnet

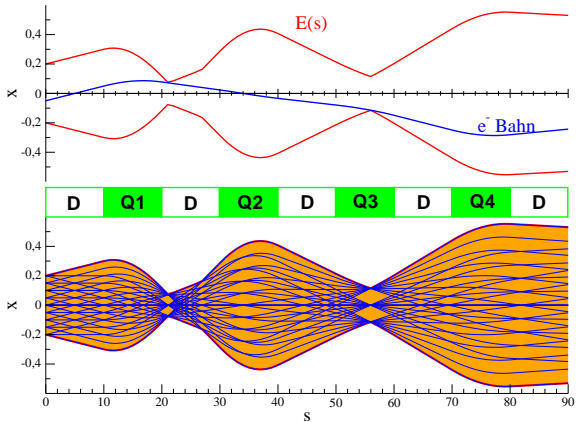
$$M_{\text{Dipol}} = \begin{pmatrix} \cos \frac{s}{R} & R \sin \frac{s}{R} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R} \sin \frac{s}{R} & \cos \frac{s}{R} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Kantenfokussierung

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



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.