



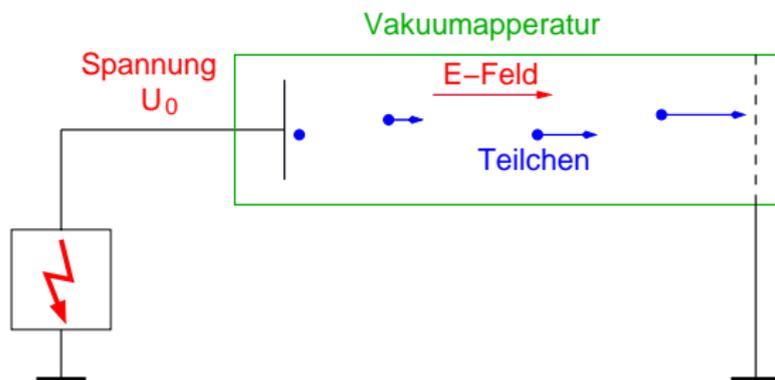
## Teilchenbeschleuniger

- Linearbeschleuniger
- Zyklotron
- Mikrotron
- Synchrotron
- Speicherringe

Stanford Linear Accelerator Center  
SLAC

# Linear Beschleuniger (LINAC)

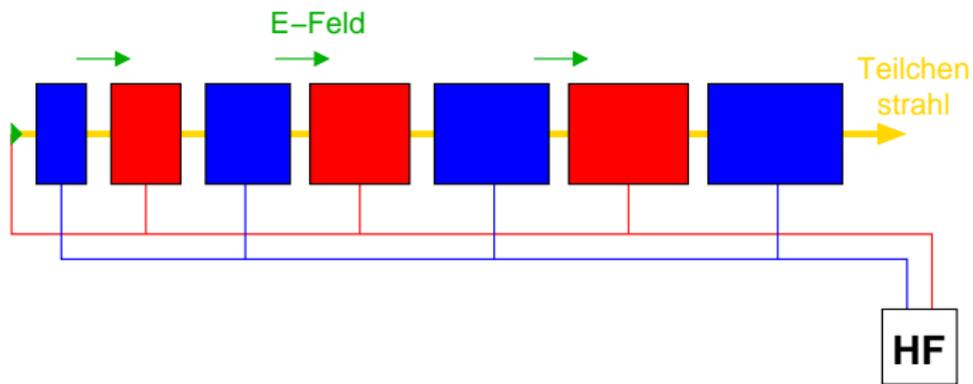
- Beschleunigung in einem Potential mit der Spannung  $U_0$  ist nur bis zu einigen  $10^6$  V möglich. Problem: Isolation, Überschlüge



- 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

$$U_0 \sin \phi_s$$

$\phi_s$  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)

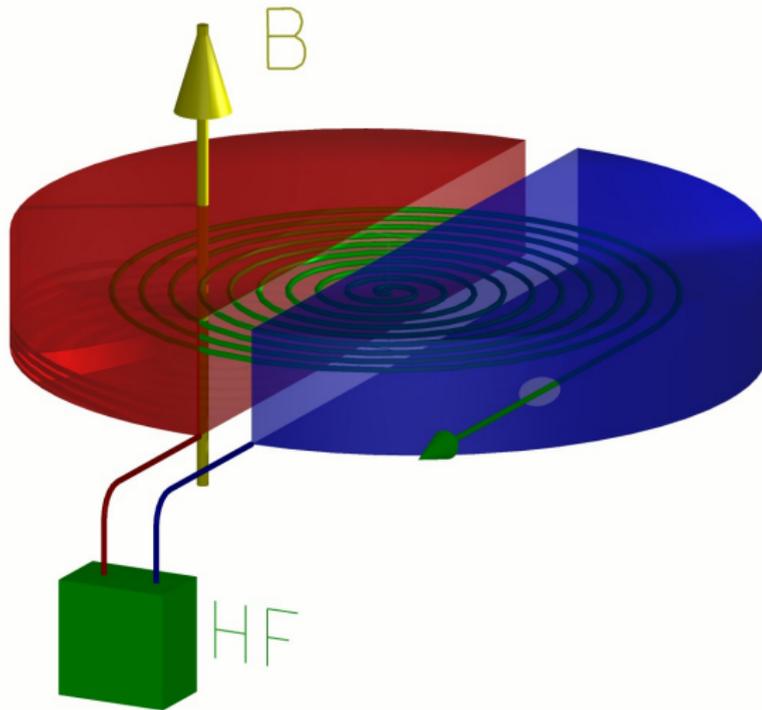
$$\omega_c = \frac{e}{m} B_z$$

- $\omega_c$  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

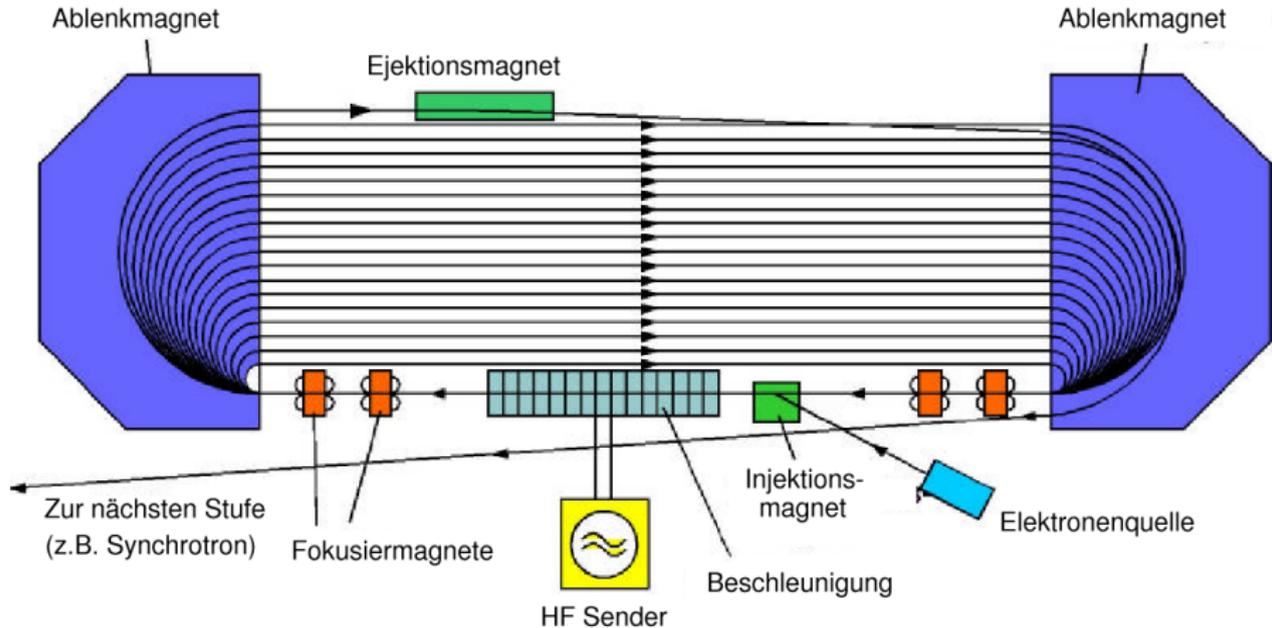
Lorentzkraft = Zentrifugalkraft

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

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

- 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

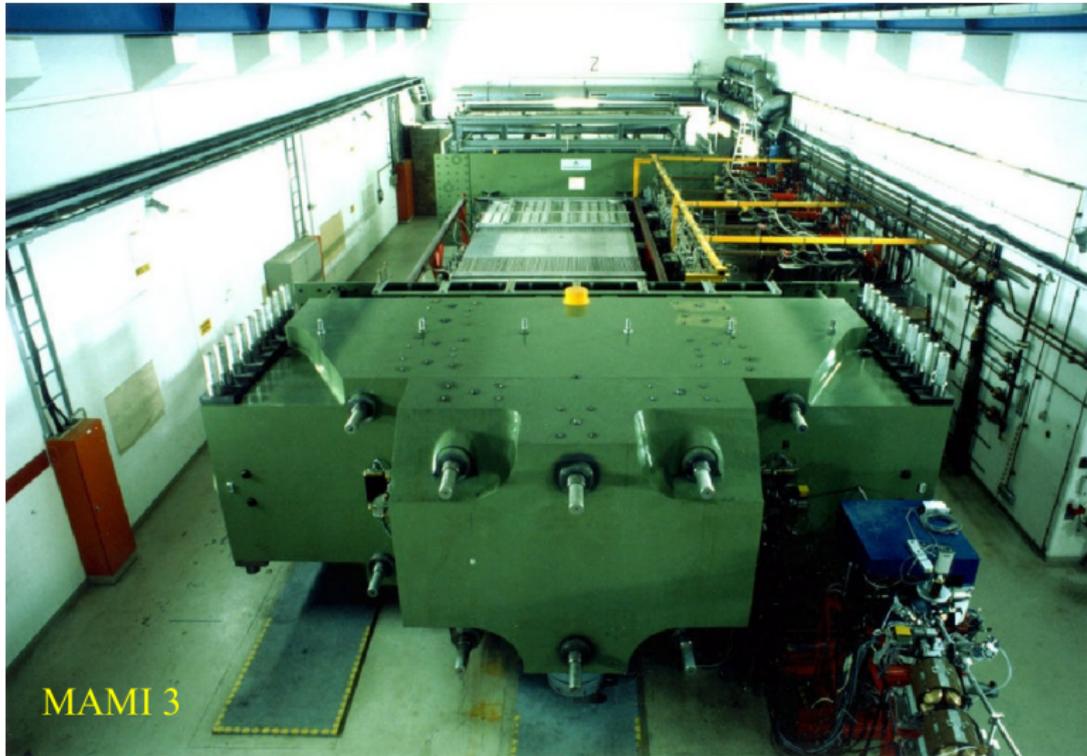
# Mikrotron Prinzip



# Kleines Mikrotron



# Großes Mikrotron



MAMI 3

# Synchrotron

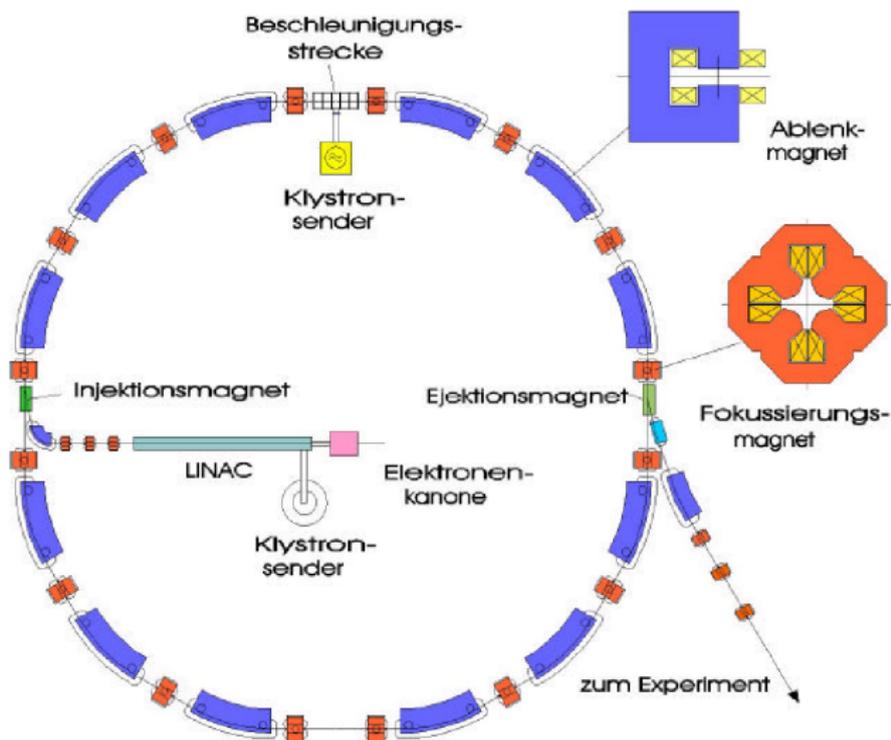
- Für relativistische Teilchen mit  $v \approx c$  gilt für den Bahnradius in einem Magnetfeld

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

- 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



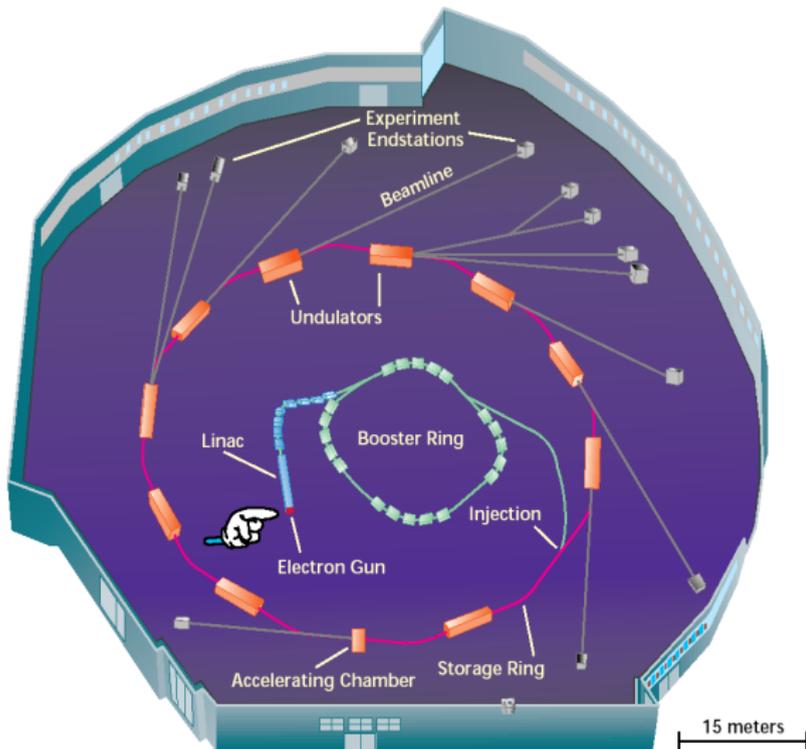
# Speicherringe

- 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.

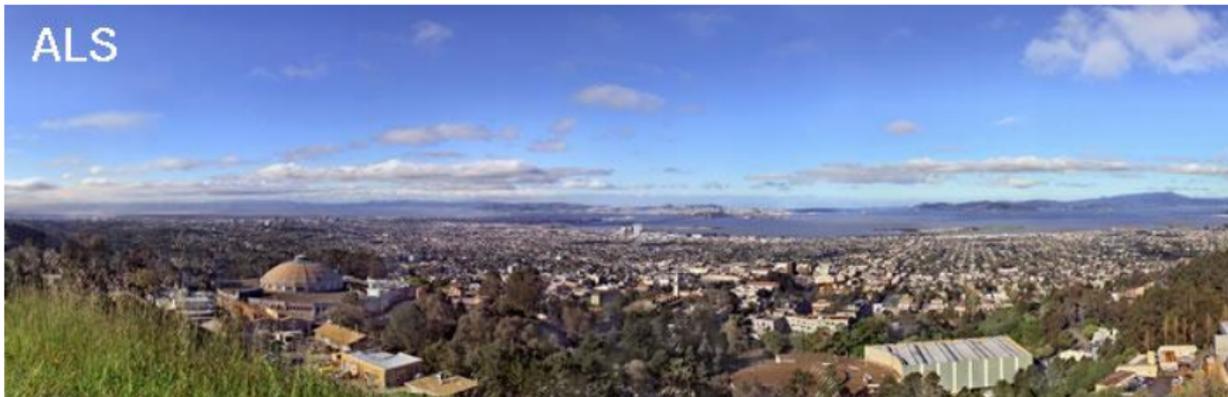
# Speicherringe

- Parameter eines typischen Speicherringes
    - Lebensdauer  $\tau$ : 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



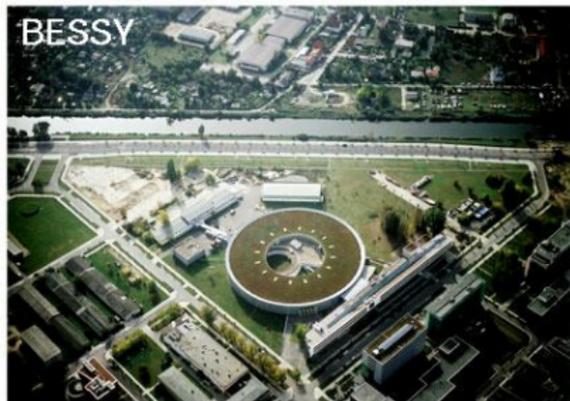
ALS



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 Trajektorien. Diese ist durch

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

beschrieben.

$\epsilon$       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  $\pi$  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  $\sigma$  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	$\frac{1}{R} = \frac{e}{p} B_{z0}$	Strahlablenkung
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  $k > 0$ 

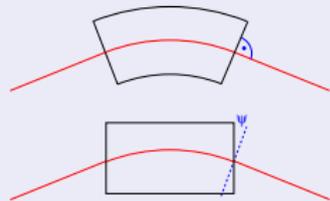
$$M_{QF} = \begin{pmatrix} \cosh \Omega & \frac{1}{\sqrt{k}} \sinh \Omega & 0 & 0 \\ \sqrt{k} \sinh \Omega & \cosh \Omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \Omega & \frac{1}{\sqrt{k}} \sin \Omega \\ 0 & 0 & -\sqrt{k} \sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix}$$

## Dipolmagnet

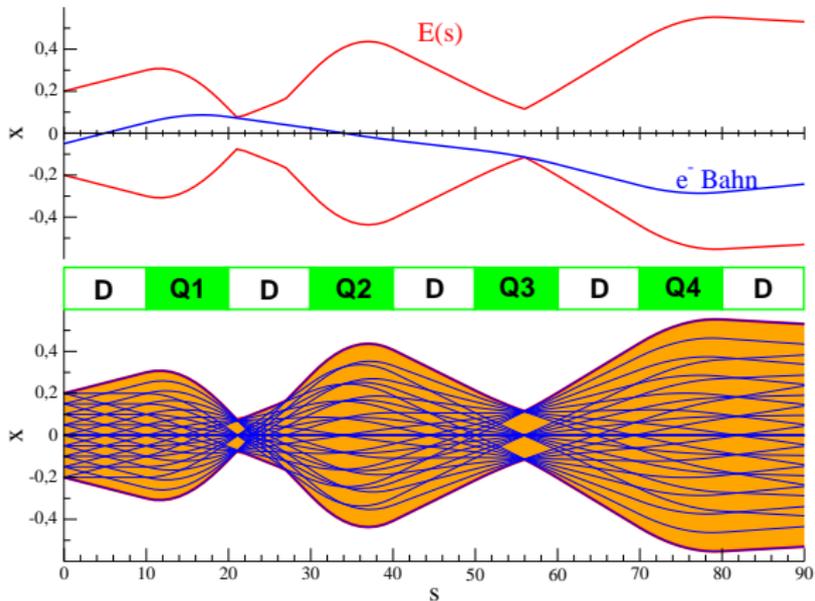
$$M_{\text{Dipol}} = \begin{pmatrix} \cos \frac{s}{R} & R \sin \frac{s}{R} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R} \sin \frac{s}{R} & \cos \frac{s}{R} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

## 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.