

# Beschleunigung geladener Teilchen *N. Blümer*

Prinzip und Ziele

Van-de-Graaff-B.

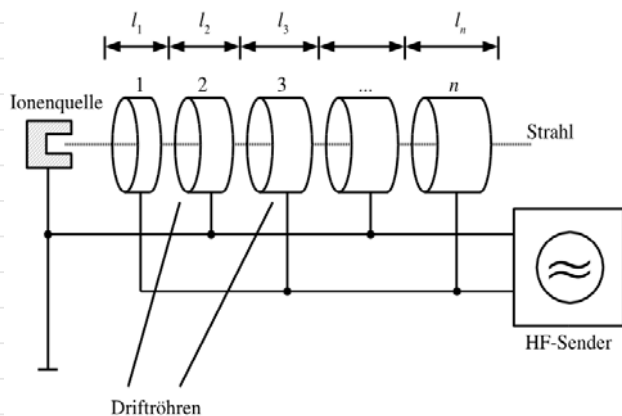
Linearbeschleuniger

Zyklotron

Mikrotron (MAMI)

Synchrotron

Speicherringe



## Prinzip und Ziele

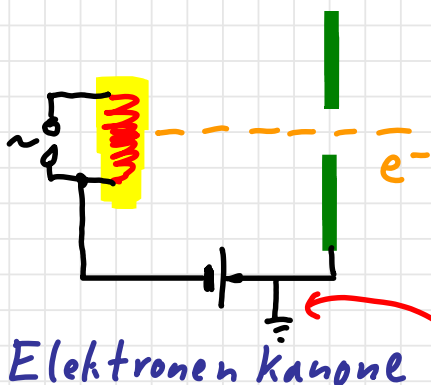
Teilchen mit Ladung  $q$  im elektromagnetischen Feld:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$\uparrow \vec{a}_B \perp \vec{v}$

Geschwindigkeitszuwachs  
nur durch  $E$ -Feld!

Anwendung:

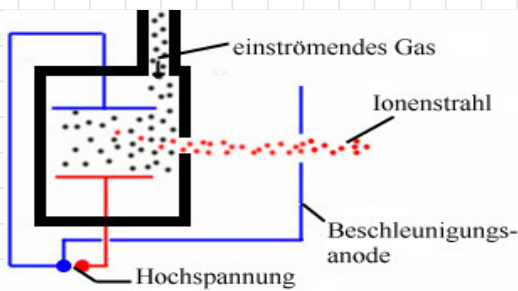


Geladene Teilchen werden bei  
niedriger Energie "erzeugt"  
(z. B. thermische Elektronen)  
und dann gerichtet im  $E$ -Feld  
beschleunigt  $\rightarrow$  Strahl

(dann Ablenkung  $\rightarrow$  z. B. Bildröhre)

**CT: wozu Erdung?**

# Welche Teilchen?

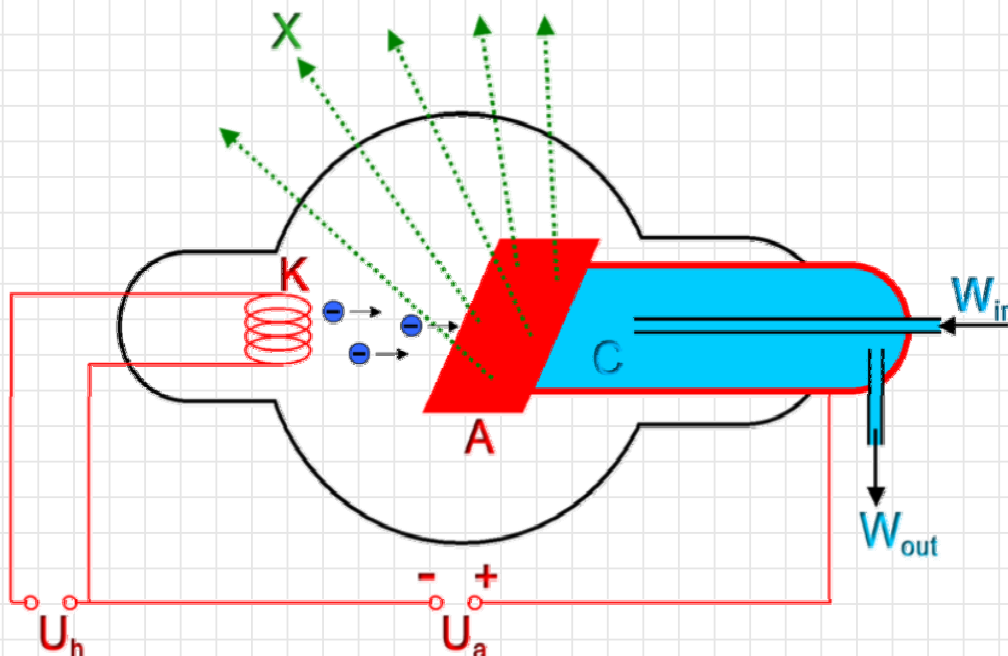


- Elektronen
- Protonen
- $\alpha$ -Teilchen (He-Kerne,  $2p+2n$ )
- Schwerionen
- Positronen, Antiprotonen ...

- Ziele:
- scharfer Strahl (kleiner Querschnitt)
  - viele Teilchen pro Zeit und Querschnitt (**Luminosität**)
  - scharfe Energieverteilung (**monochromatischer Strahl**)
  - hohe Energie

- für
- Abbildung (Bildröhre, Elektronenmikroskop)
  - Streuexperimente
  - Bestrahlung
  - Photonenquelle
  - Teilchenerzeugung (z.B. nach  $e^-e^+$ -Vernichtung)

**CT: Beispiel Photonenquelle?**

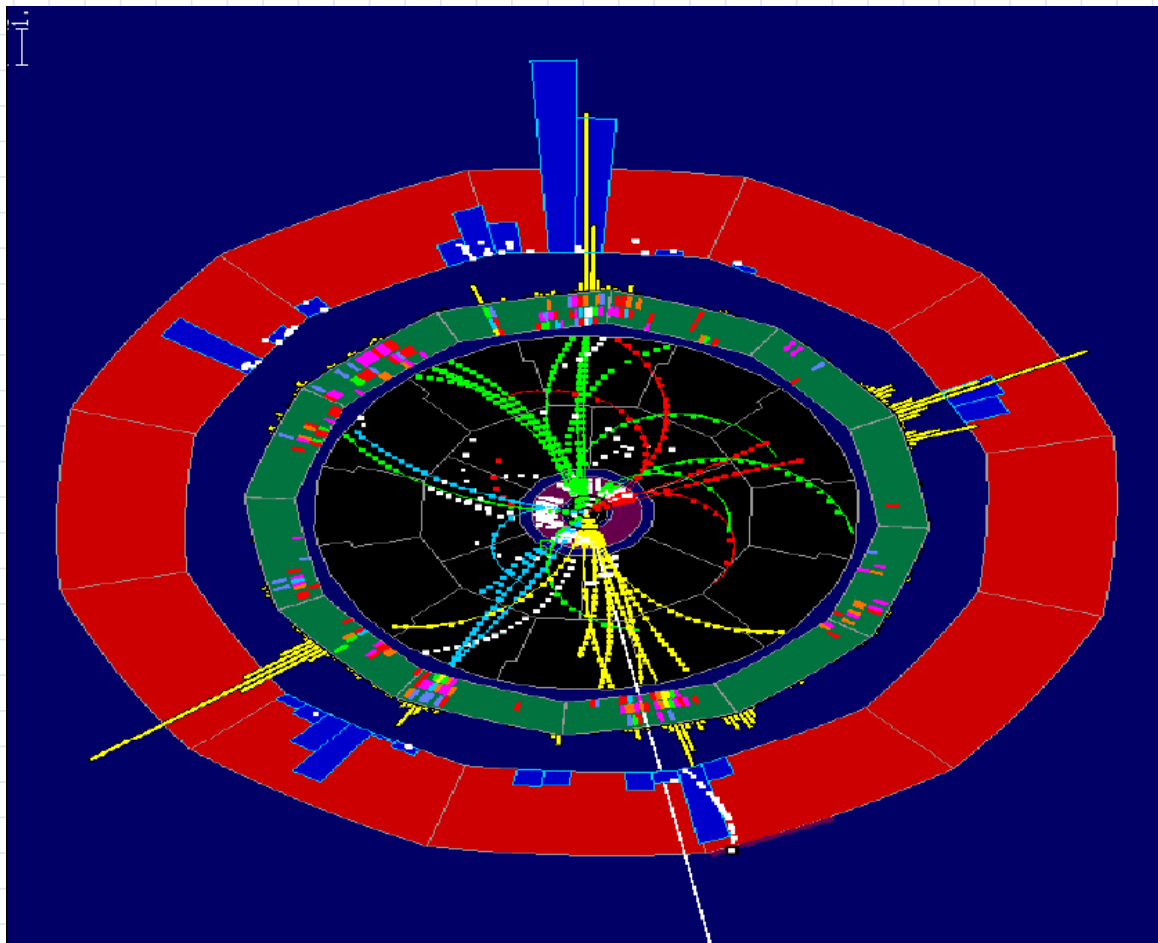


Prinzip  
Röntgenröhre

(Photonen aus  
Bremsstrahlung)

LEP-  
Events

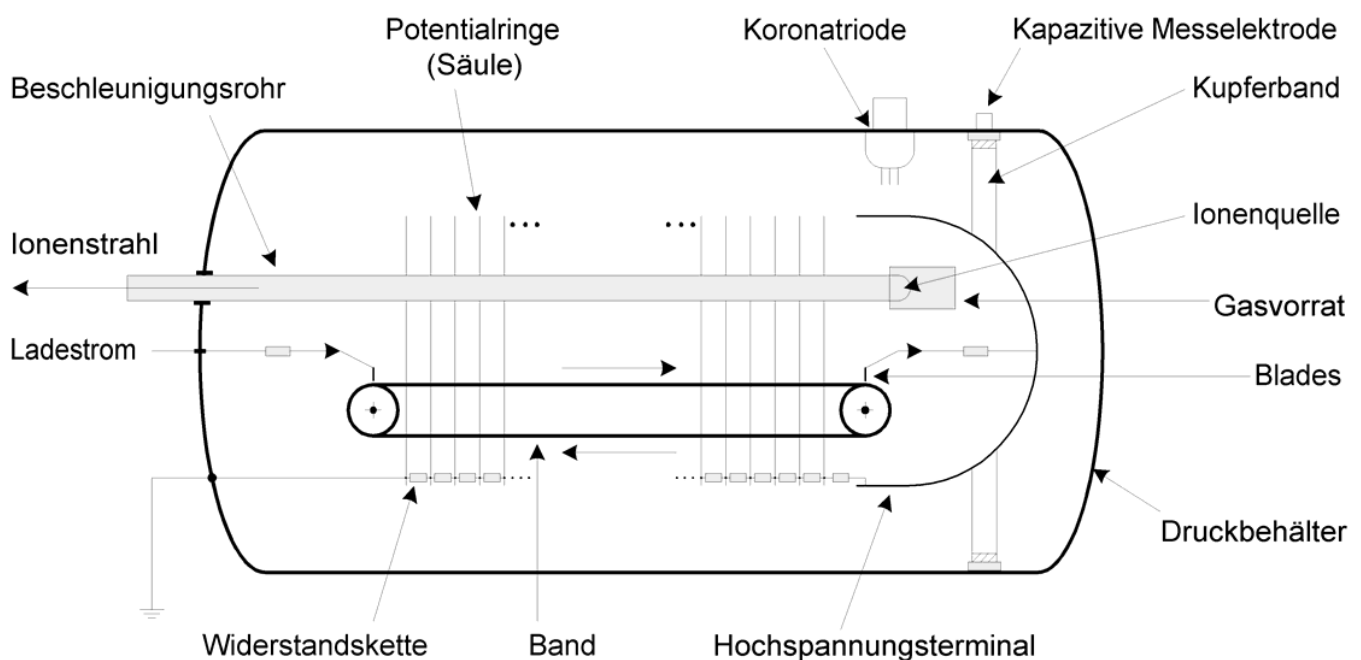




LEP  
ALEPH  
4-Jet-  
Ereignis

## Van-de-Graaff- und Tandembeschleuniger

**Idee:** möglichst hohe Beschleunigung in einem Schritt  
Energiegewinn)  $K_f \approx \Delta K = qV$  also hohe Spannung nötig!



**CT:** Wieso verlassen die Ladungsträger das Band?

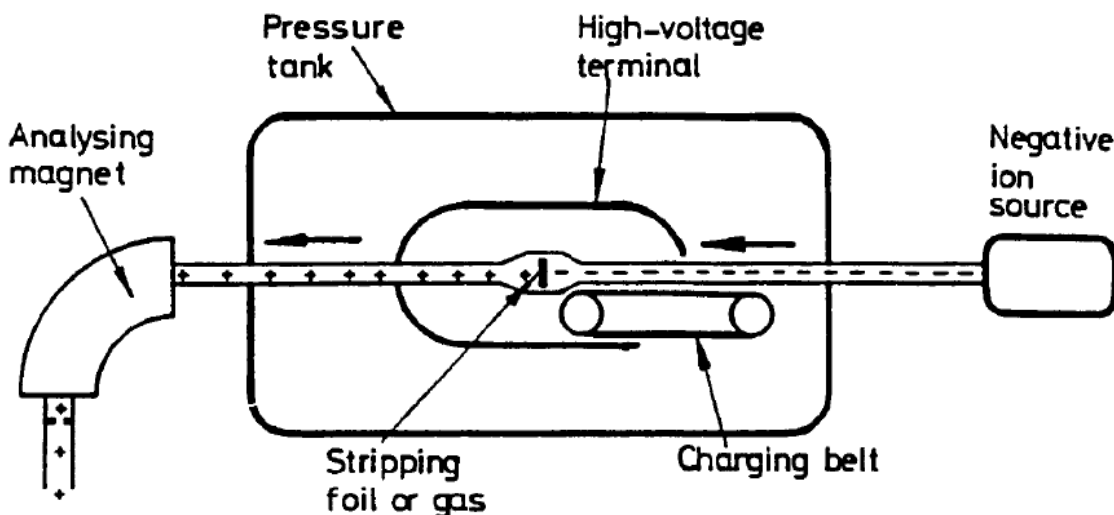


5 MV van de Graaff im Hahn-Meitner-Institut, Berlin

Erreichbare Spannung: ca. 20 MV  $\Rightarrow$   $K_{\max} \approx 20 \text{ MeV}$

Problem: Ionenquelle auf Ultra-Hochspannung  
 $\leadsto$  keine leitenden (Steuerungs-)Verbindungen nach außen

Lösung für Ionen: Tandem beschleuniger mit Umpolarisation

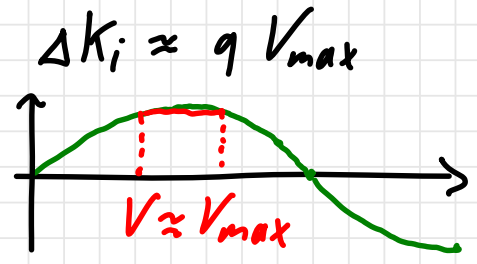
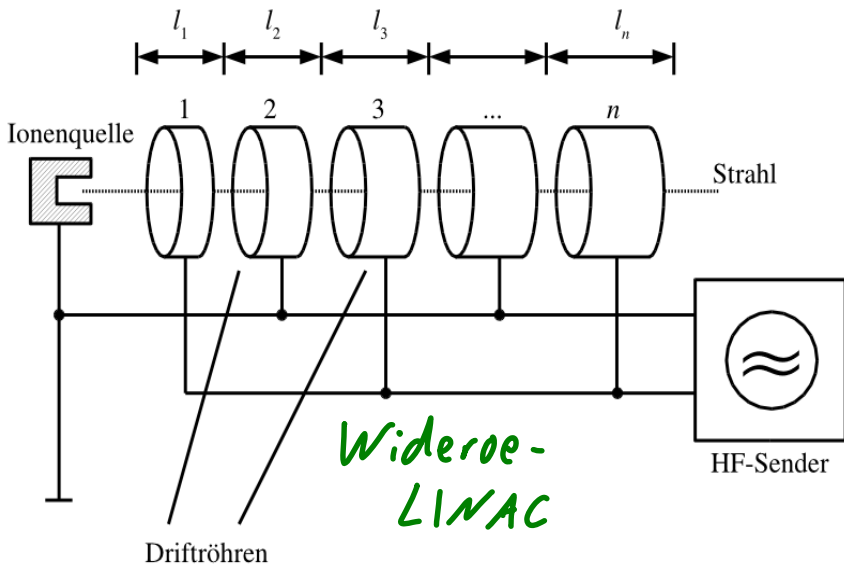


CT:  
 Wieso  
 kein  
 Tandem  
 für  
 Elektronen  
 ?



# (Hochfrequenz-) Linearbeschleuniger

Idee: nutze Beschleunigungsspannung mehrfach



$$K_f \approx n \cdot q \cdot V_{max}$$

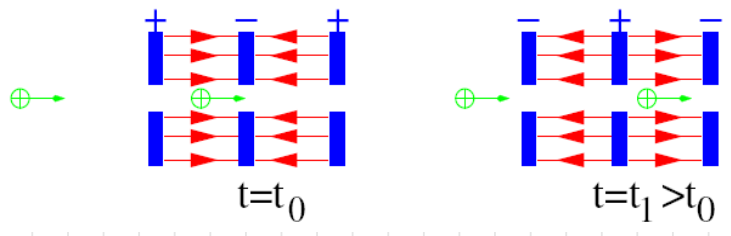
für  $v \ll c$ :

$$v_k \approx \sqrt{\frac{2q V_{max}}{m}} \sqrt{k}$$

⇒ Länge der k-ten Röhre

$$l_k = \sqrt{k} l_1$$

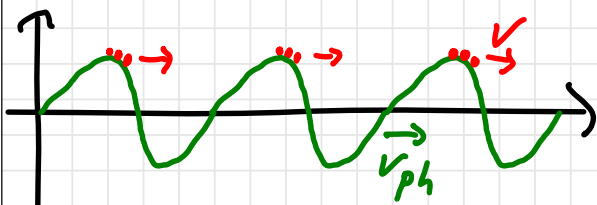
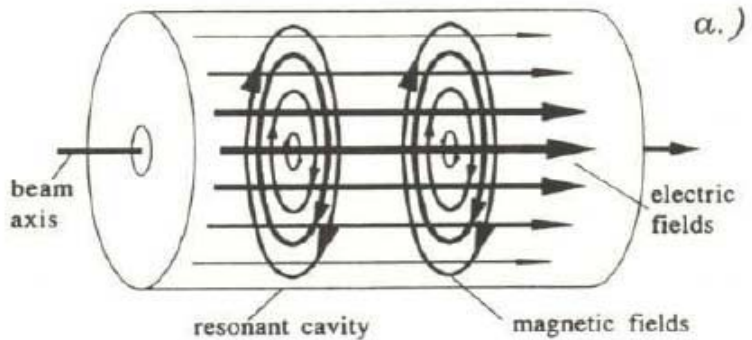
CT: relativistischer Fall?



möglichst kurze Driftröhre  $\leadsto$  hohe Frequenzen  $\leadsto$  Dipolstrahlung

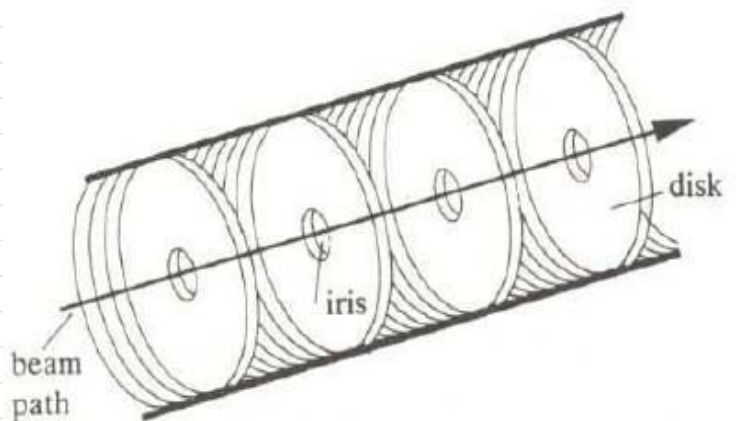
besser (bei  $v \approx c$ ):  
geschlossene Wellenleiter

Ladungen „surfen“  
auf Wellenfront

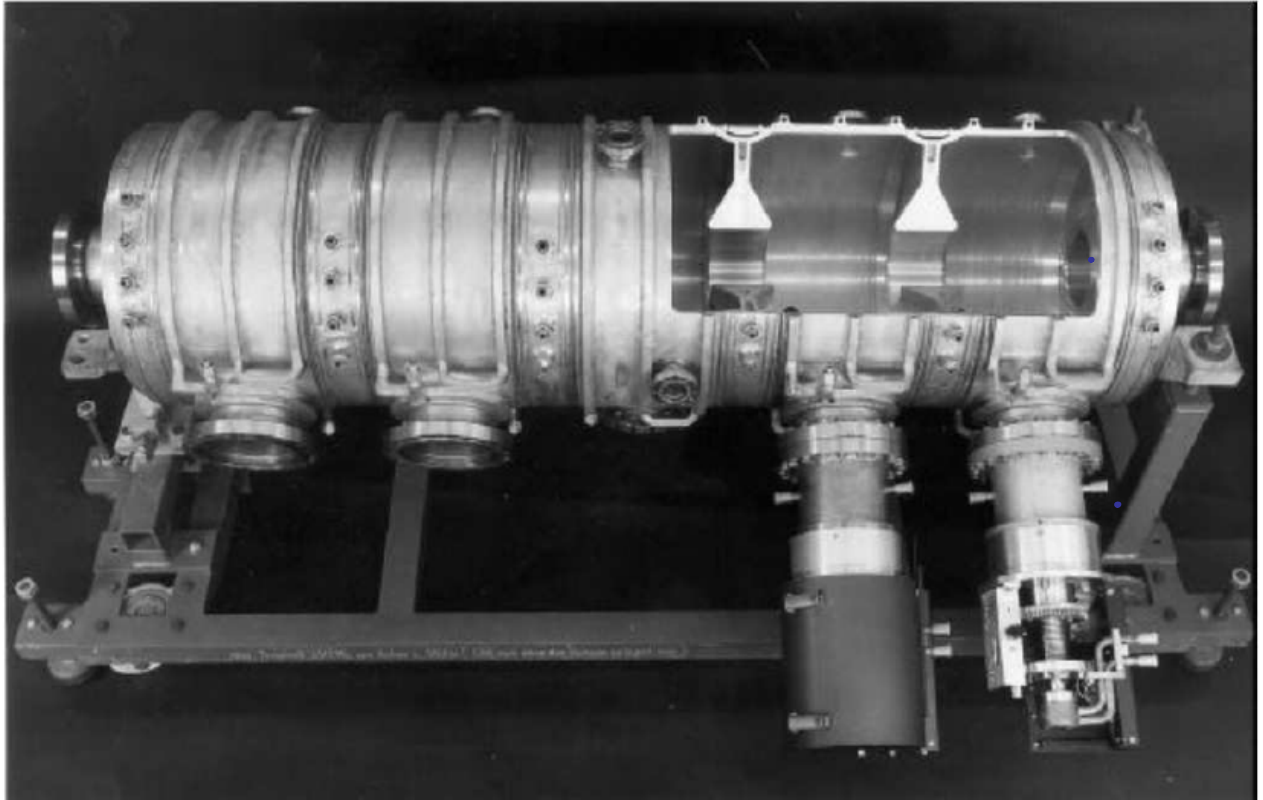


Problem: in einfachem  
Zylinder ist  $v_{ph} > c$

Lösung: Verzögerungs-  
scheiben



typ. mehrzellige Cavity: (PETRA- $e^+e^-$ -Beschleuniger,  $2 \times 23$  GeV, DESY)

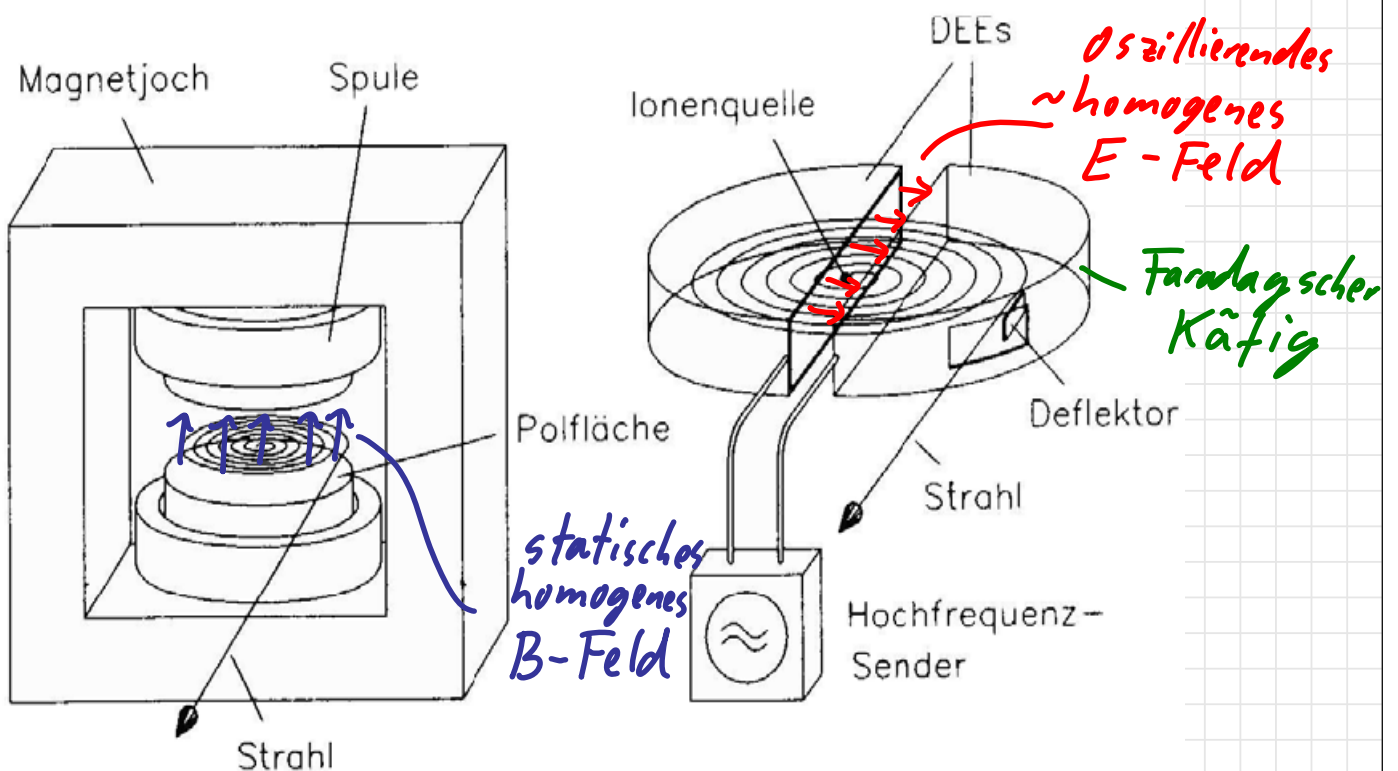


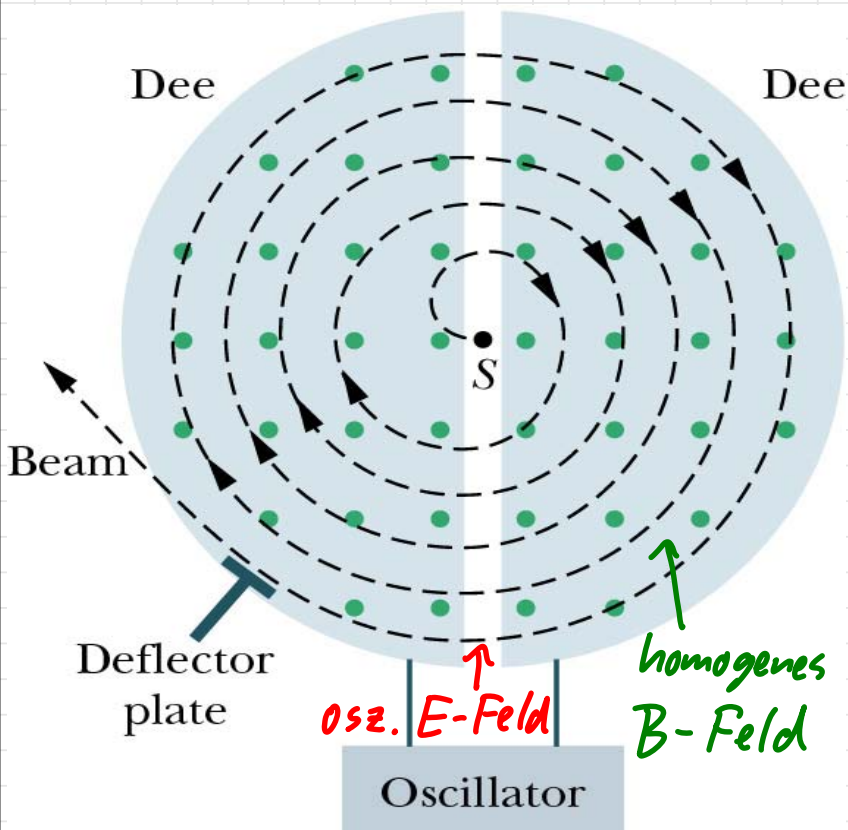
NB:  $\vec{E}$ -Felder parallel zu Metalloberflächen  $\rightarrow$  ohmsche Verluste  $\rightarrow$  Kühlung erforderlich

Linearbeschleuniger: lang + „verschwenderisch“

## Zyklotron

Idee: rolle Bahn auf!





CT: wieso Kupfer?

CT: wie müsste Bahnkurve (HR 29-15) korrekt aussehen?

Bahn innerhalb der Dees ( $\vec{E}=0$ ) ist Kreisbahn mit (nichtrelativistischer Grenzfall, d.h.  $v \ll c$ )

Radius:  $F = \frac{mv^2}{r} = qvB \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$

$$r_n = \frac{\sqrt{2nqVm}}{qB} \propto \sqrt{n}$$

Dynamik:  $\omega = \frac{qB}{m} \Leftrightarrow T = \frac{2\pi m}{qB}$

Frequenz + Umlaufzeit unabhängig von  $k, v$

$\Rightarrow$  Teilchen in Phase beschleunigt!

$$K_n = K_0 + nqV \quad \text{mit } K_0 \sim 0 \Rightarrow K_n = nqV$$

$$v_n = \sqrt{\frac{2K_n}{m}} = \sqrt{\frac{2nqV}{m}} \propto \sqrt{n}$$

Demnach bei hinreichend großem Radius bzw. großem  $B$  bei gegebener Spannung im Prinzip beliebige Energie!?

**Problem:** relativistisch gilt:  $T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi m_0}{qB} \gamma$

Falls  $\gamma \neq 1$ : Teilchen geraten i.A. außer Phase.

$$\gamma = \frac{E}{m_0 c^2} \quad \text{wichtige Ruheenergien: } e^-, e^+: E_0 = 511 \text{ keV}$$

$$p, \bar{p}: E_0 = 938 \text{ MeV}$$

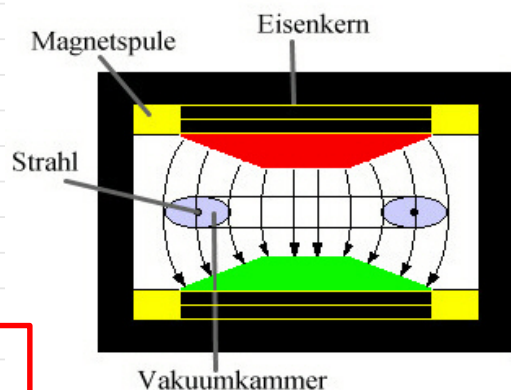
(vdG mit 20 MV  $\rightarrow$  ultrarelativistische  $e^-$ :  $\gamma \approx 40$ )

## Zyklotrone für relativistische Teilchen

Synchrozyklotron: Nur je 1 Teilchenpaket, Frequenz wird mit jedem Umlauf reduziert - wird nicht mehr gebaut

isochrones Zyklotron: B-Feld nimmt nach außen zu

Betatron: keine Elektroden, E-Feld induktiv aus steigendem B-Feld, kreisförmige Bahn



CT (schwierig): Zyklotron für ultrarelativistische Teilchen mit konst. hom.  $B$  und konst  $w$ ?



# Mikrotron

Trick: wähle  $qV = E_0 \Rightarrow T_k = k \frac{2\pi m_0}{9B}$  mit  $k \in \mathbb{N}$

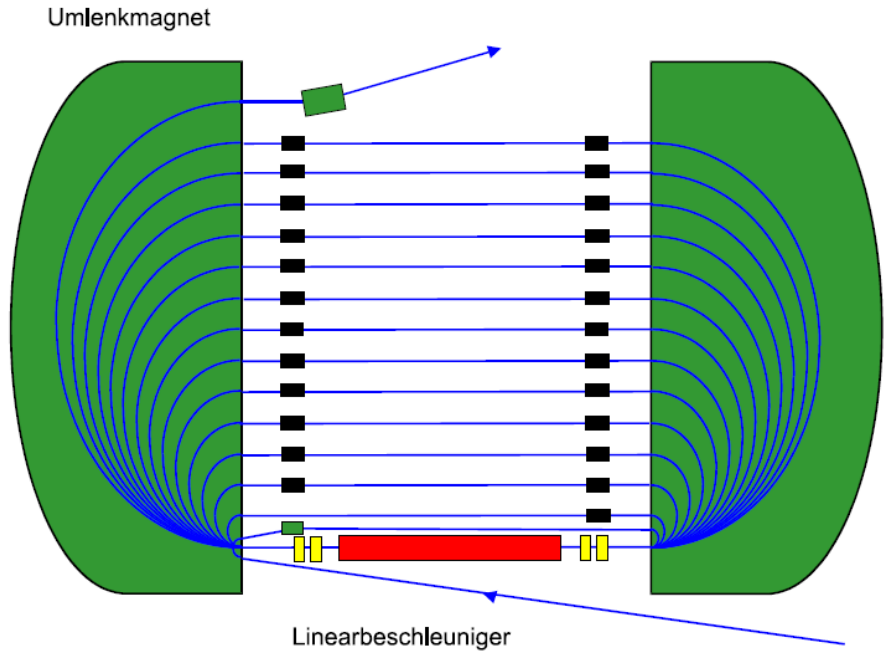
$$E_k = k E_0$$

Nach jedem vollen Umlauf alle Pakete in Phase!

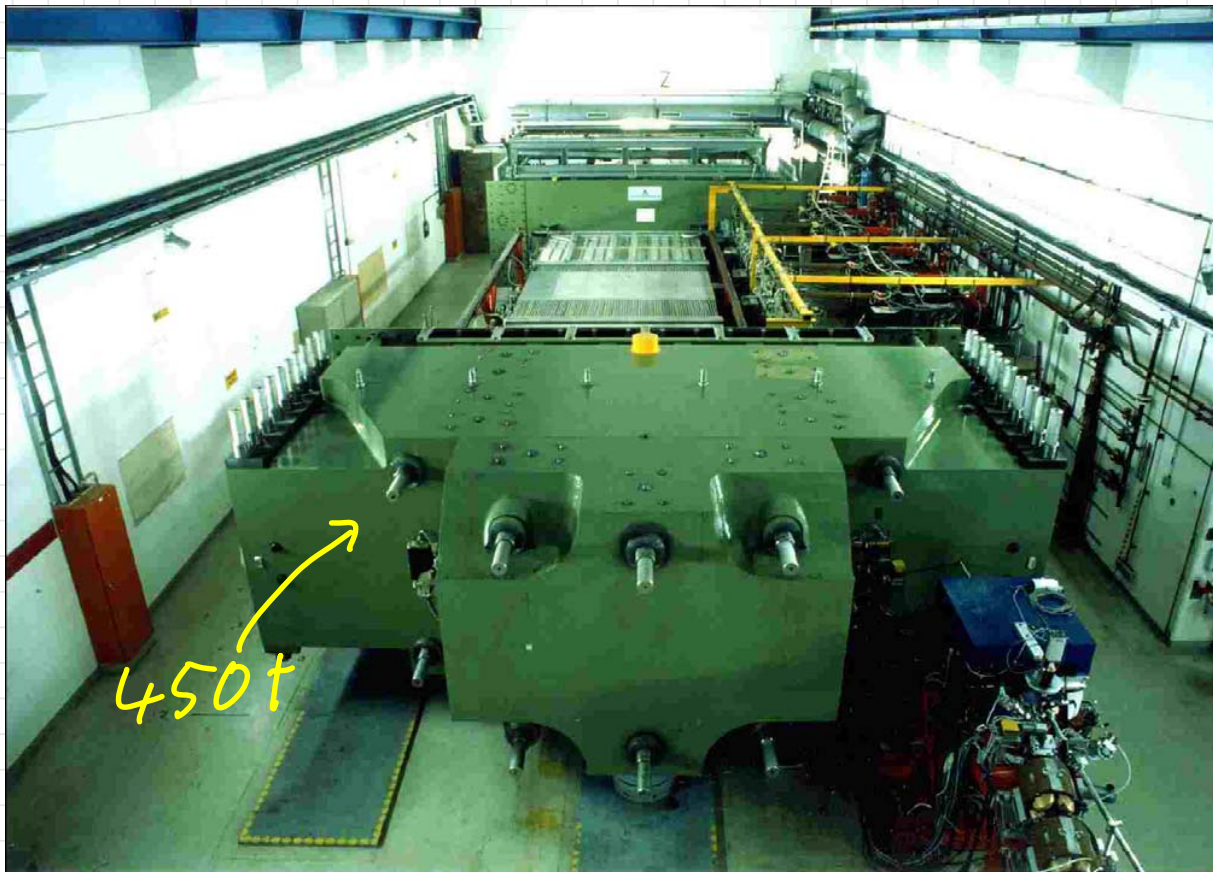
Modifikation:

Ersetze Elektroden (Dees) durch 1 Linearbeschleuniger (lokale Felder)

Rennbahn-Mikrotron



MAMI B - weltgrösstes (Rennbahn-) Mikrotron  
 $\leadsto e^-$  auf 855 MeV

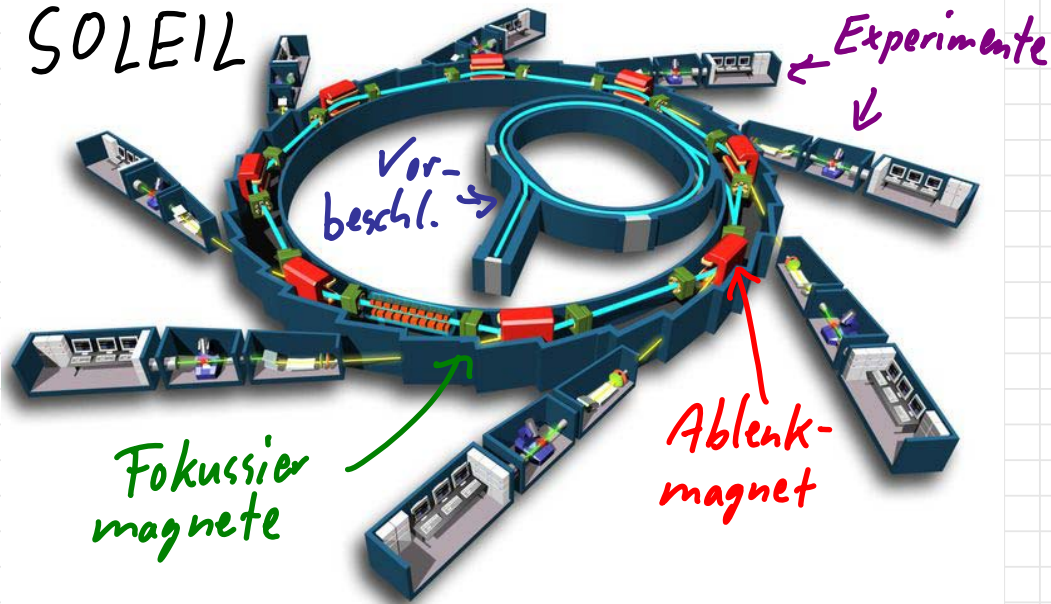


# Synchrotron

hohe Energien  $\rightarrow$  große Krümmungsradien,  $v \approx c$

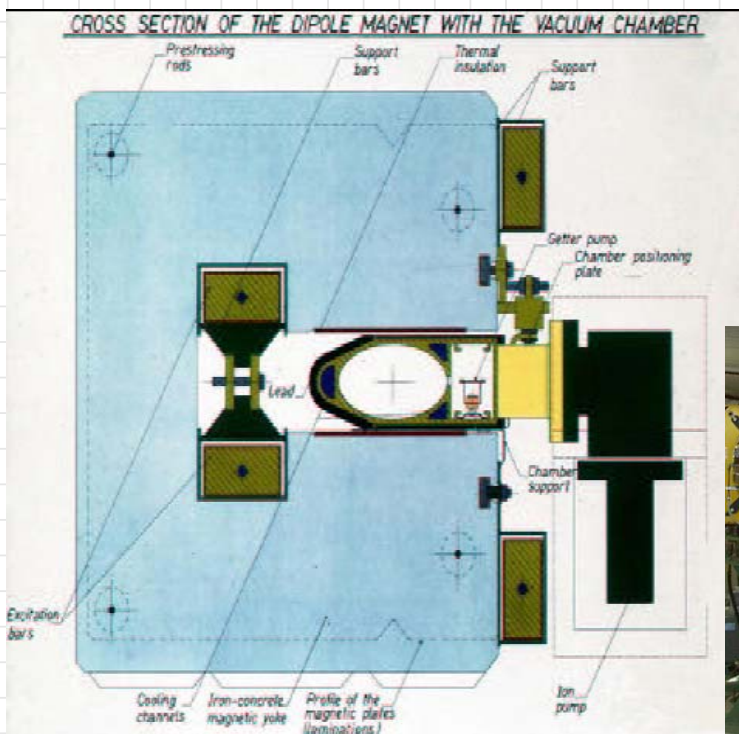
$\Rightarrow$  effizienter: B-Feld nur im Strahlbereich, wird synchron mit Teilchenenergie erhöht

## SOLEIL



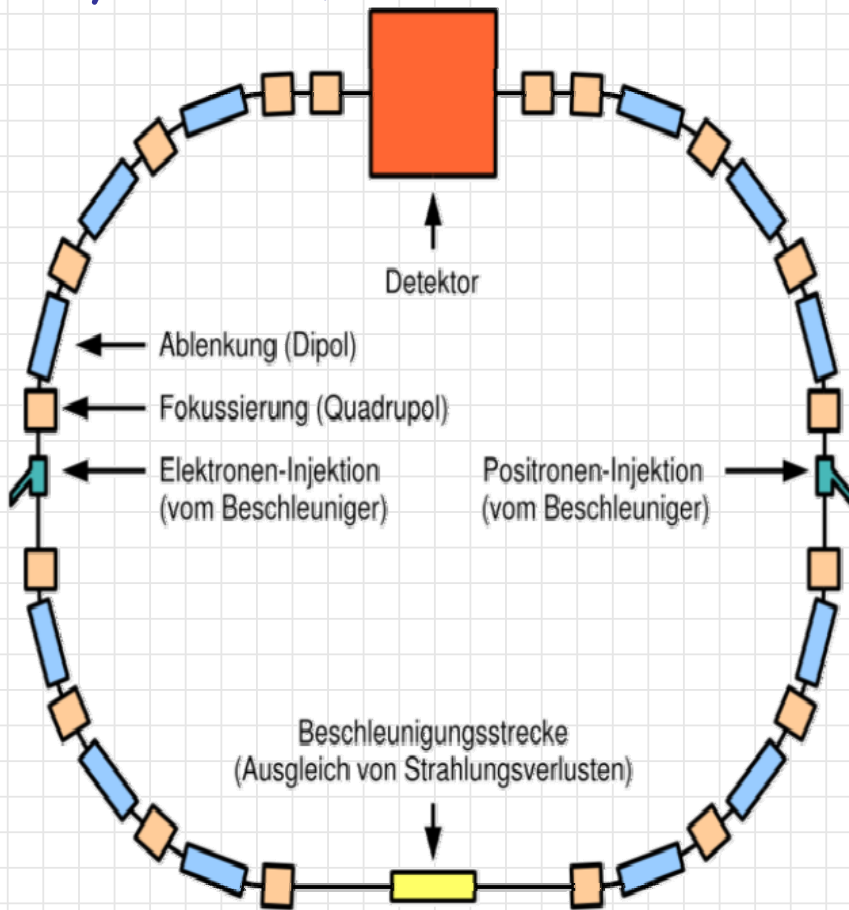
Ablenk-einheit im Synchrotron / Speicherring: Dipol-Magnet

in modernen Beschl.:  
supraleitende Spulen





# Speicherring Prinzip



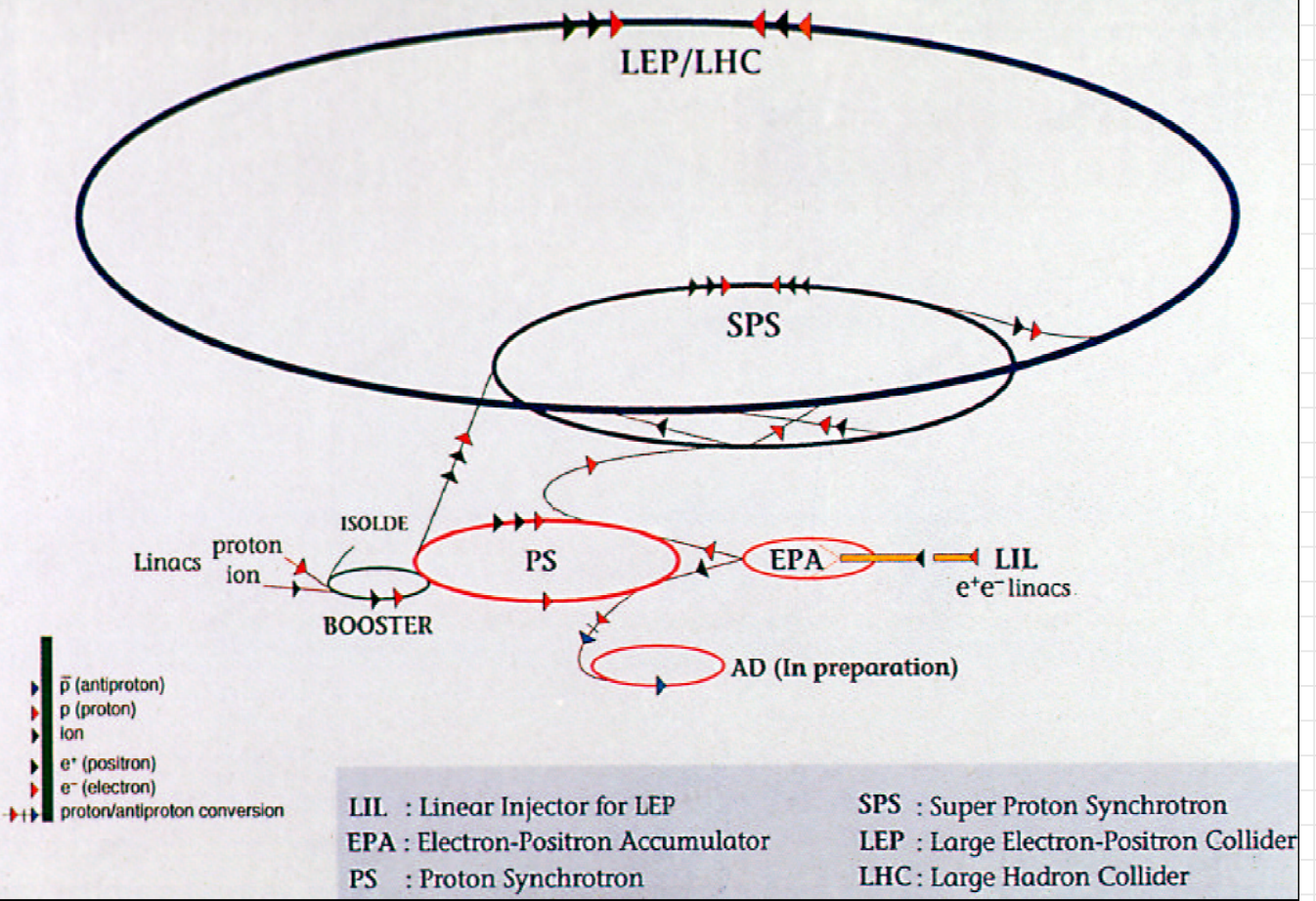
CT: Wieso beide Stoßpartner beschleunigen (Collider)?

# CERN mit LEP/LHC





# CERN's Chain of Accelerators



# Hadron-Elektron-Collider HERA (DESY Hamburg)

