

# Moderne Experimentalphysik III: Teilchenphysik

Sommersemester 2018

Thomas Müller, Roger Wolf

26. April 2018 – VL 3

Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



## 2. Experimentelle Methoden

---



# 2.1 Teilchenbeschleuniger

## Literatur:

- F. Hinterberger: Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik
- C. Berger: Elementarteilchenphysik

## Spezialvorlesungen:

- Rüdiger Schmidt: Physik und Technik der Beschleunigerphysik

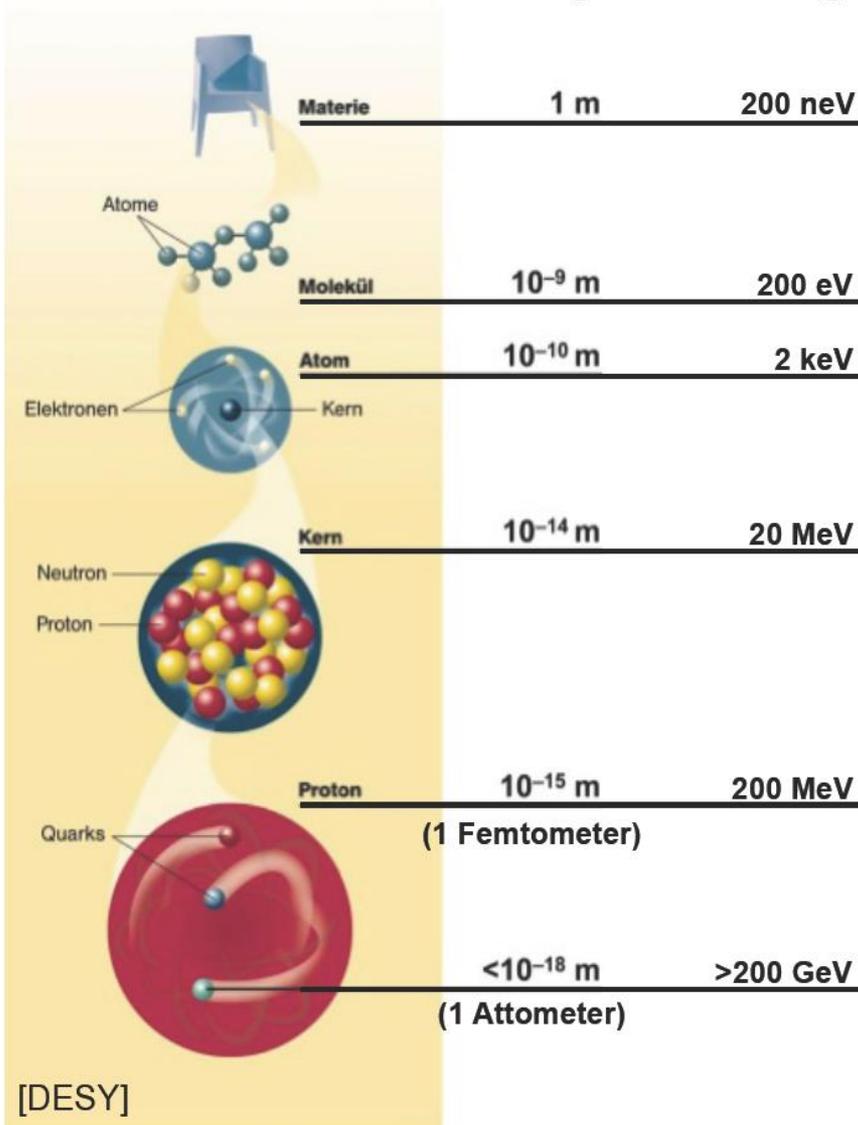
<http://rudi.home.cern.ch/rudi/lectures%20darmstadt/overview.htm>

- Anke-Susanne Müller: Vorlesungsreihe Beschleunigerphysik

<http://www-ttp.particle.uni-karlsruhe.de/~gkweb/dokuwiki/doku.php?id=de:events:lecture:collider06:main>

# 2.1.1 Einführung

Länge      Energie



[DESY]

- Beschleuniger als besonders leistungsstarke Mikroskope

- De-Broglie-Wellenlänge der Teilchenstrahlung

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar c}{pc} \longrightarrow \lambda [\text{fm}] \approx \frac{1.24}{p[\text{GeV}]}$$

- Zahlenbeispiele:

$$p = 1 \text{ GeV} \longrightarrow 1.24 \times 10^{-15} \text{ m}$$

$$p = 1 \text{ TeV} \longrightarrow 1.24 \times 10^{-18} \text{ m}$$

- Erzeugung massiver neuer Teilchen:  $E = mc^2$

- Schwerpunktsenergie der elementaren Kollision (z. B. Parton-Parton-Kollision) = maximale erzeugbare Teilchenmasse

# Grundprinzip

- Beschleunigung von geladenen stabilen Teilchen ( $e^-$ ,  $e^+$ ,  $p$ ,  $\bar{p}$ , Ionen) durch ein elektrisches Feld
- Magnetfeld dient zur Richtungsänderung (d.h. Strahlführung)

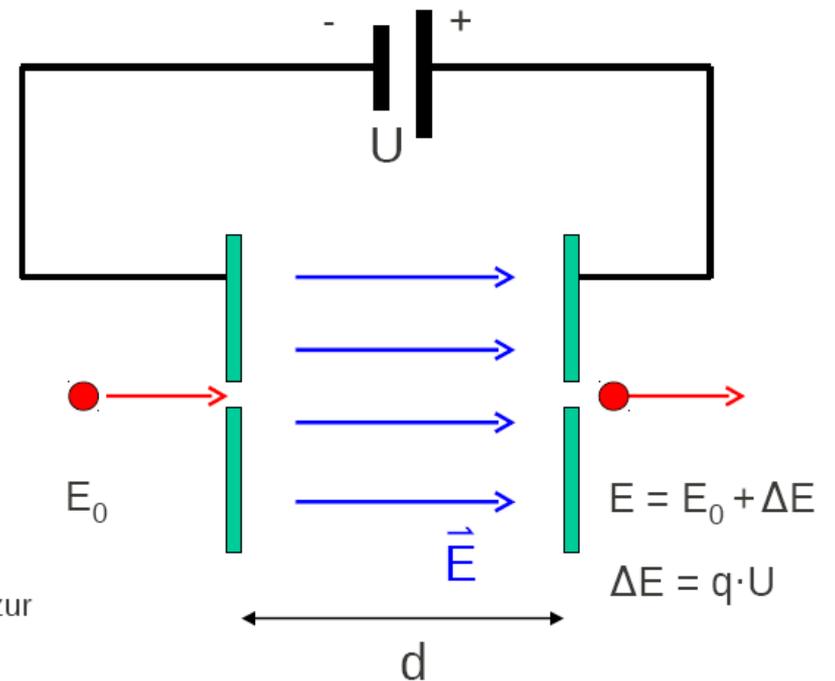
Lorentzkraft:

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

$$\begin{aligned} \Delta E &= -\int_{s_1}^{s_2} \vec{F}_L d\vec{s} = -\int_{s_1}^{s_2} q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) d\vec{s} \\ &= -\int_{s_1}^{s_2} q \vec{E} d\vec{s} = q \cdot U \end{aligned}$$

Die zur momentanen Richtung von  $v$  parallelen Komponente von  $E$  trägt zur Energieänderung bei

→  $\Delta E$  unabhängig von  $m$ ,  $E_0$ ,  $d$



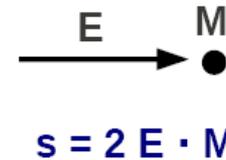
$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Ein Elektron gewinnt nach Durchlaufen einer Spannung von 1V die Energie 1eV

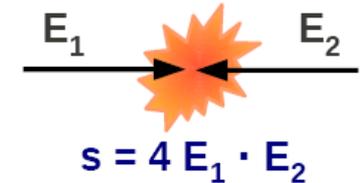
# Wichtige Kenngrößen

**Collider:** Erreichbare Schwerpunktsenergie  
 $\sqrt{s}$  viel größer als für Fixed Target Experimente

**Fixed Target:**



**Collider:**

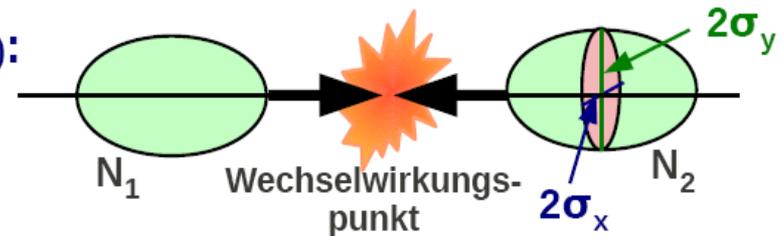


**Wechselwirkungsrate:**  $\frac{dN}{dt} = L \cdot \sigma$  *L: Instantane Luminosität ;  $\sigma$ : Wirkungsquerschnitt*

**Instantane Luminosität für Collider (2 Pakete):**

$$L = \frac{1}{4\pi} \frac{f \cdot N_1 \cdot N_2}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

*f: Frequenz*  
*Einheit von L:  $cm^{-2}s^{-1}$*   
*oft benutzt  $nb^{-1}s^{-1}$*

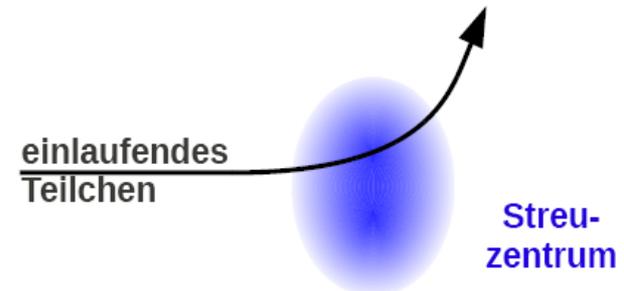


**Integrierte Luminosität:**  $L_{int} = \int L dt$  *Einheit von  $L_{int}$ :  $cm^{-2}$ , oft benutzt  $nb^{-1}$ ,  $pb^{-1}$ , ..*

**Wirkungsquerschnitt  $\sigma$ :**

Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass ein einlaufendes Teilchen am Streuzentrum gestreut wird

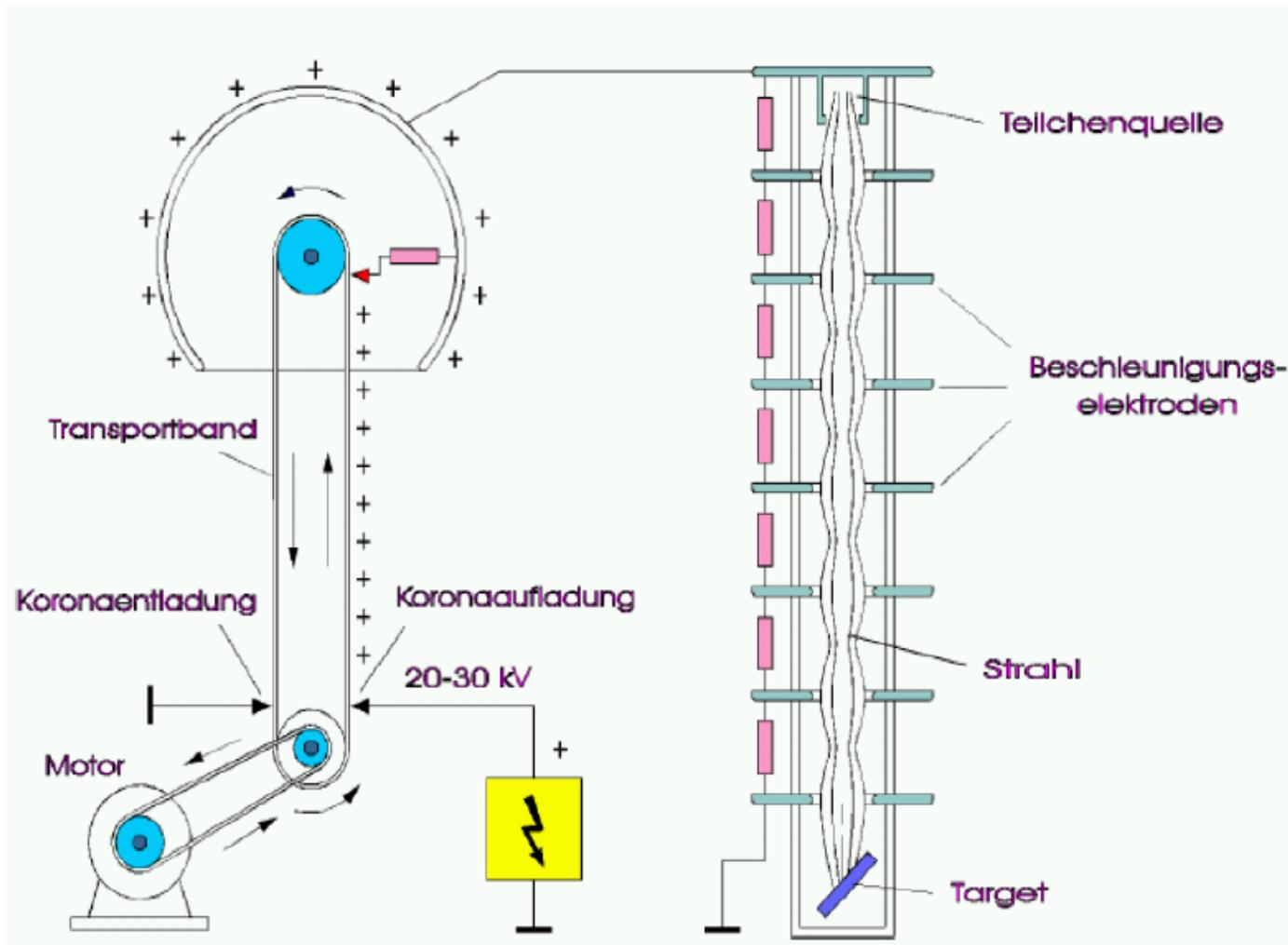
*Einheit: Ebene [ $cm^2$ ] ; 1 barn =  $10^{-24} cm^2$  ; 1nb =  $10^{-33} cm^2$*



## 2.1.2 Beschleunigertypen:

### 1. Van de Graaf

**1930:** R. J. van de Graaf baut den ersten Bandgenerator ( $U=1,5$  MV)

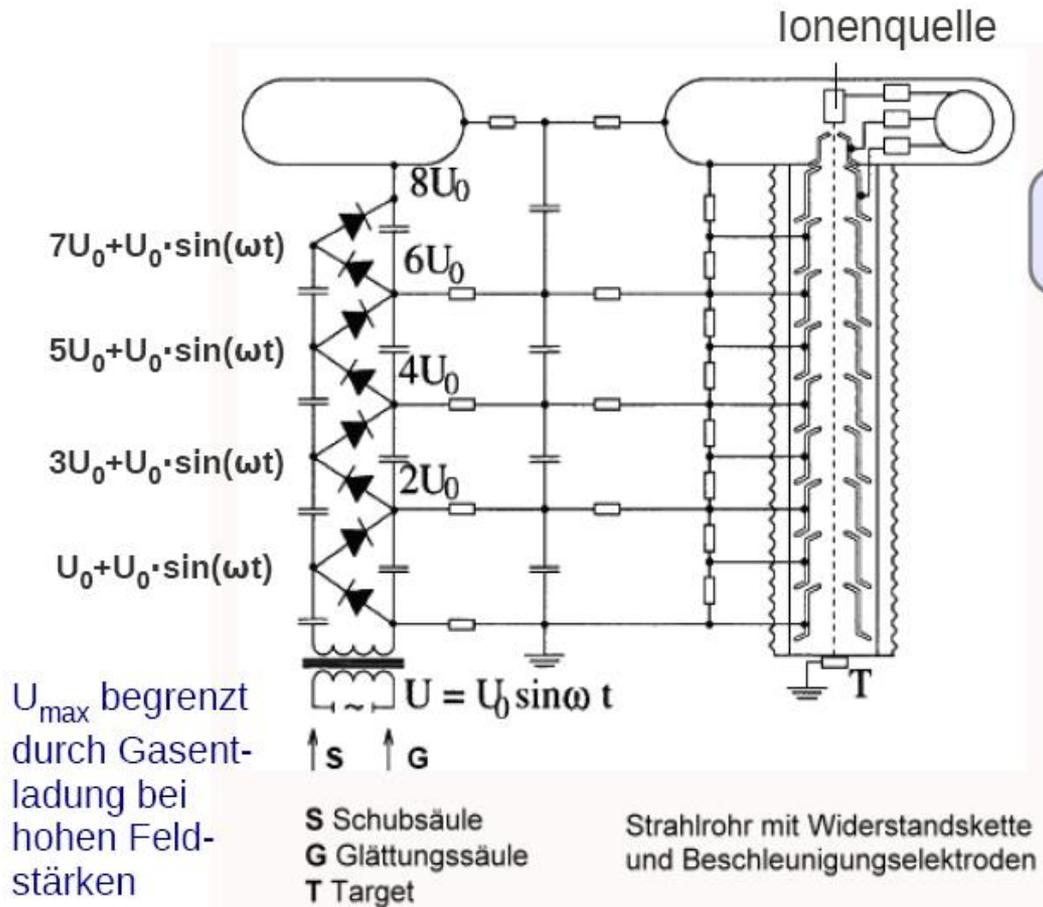


$$U_{\max} \sim 12 \text{ MV}$$

Moderne Tandem-Van de Graaff Generatoren erreichen bis zu 25 MV

# 2. Cockroft Walton

**1932:** Bau des ersten elektrostatischen Beschleunigers unter Verwendung eines Kaskadengenerators ( $U=800\text{kV}$ ) - *J.D.Cockcroft und E.T.S.Walton*



$U_{\max}$  begrenzt durch Gasentladung bei hohen Feldstärken

**Cockcroft-Walton-Beschleuniger am Fermilab**  
 (1. Vorbeschleuniger für das Tevatron)

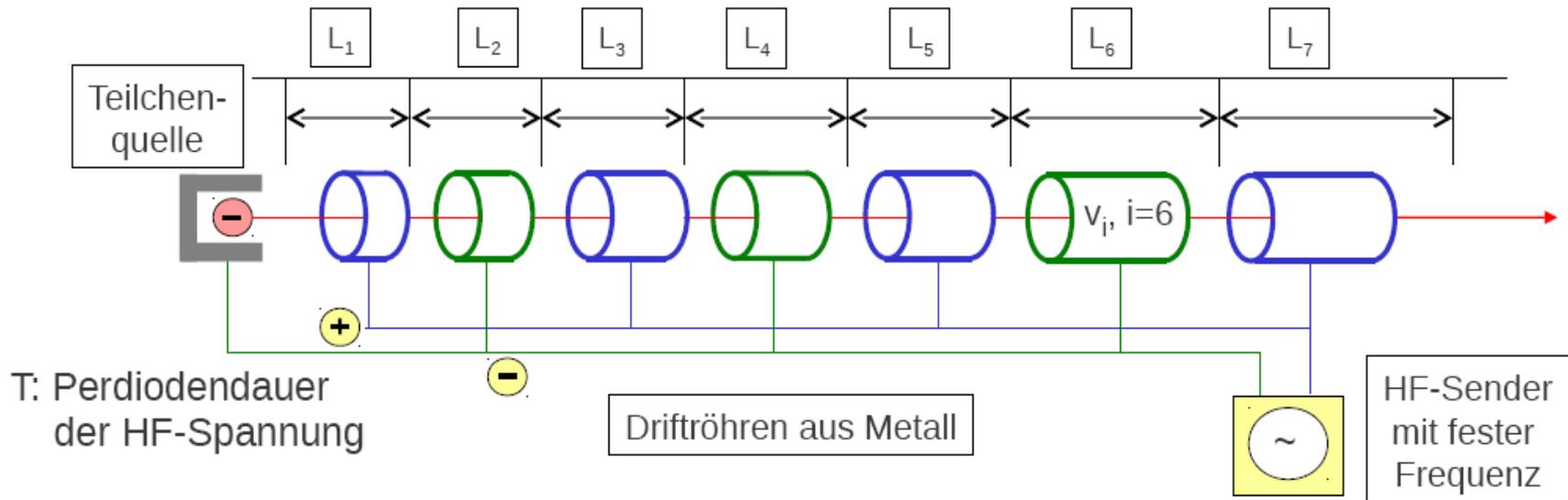
Beschleunigungsspannung: 750 keV



# 3. LINAC (Linear Accelerator)

**1924:** G. Ising schlägt Linearbeschleuniger mit hochfrequenter Wechselspannung vor

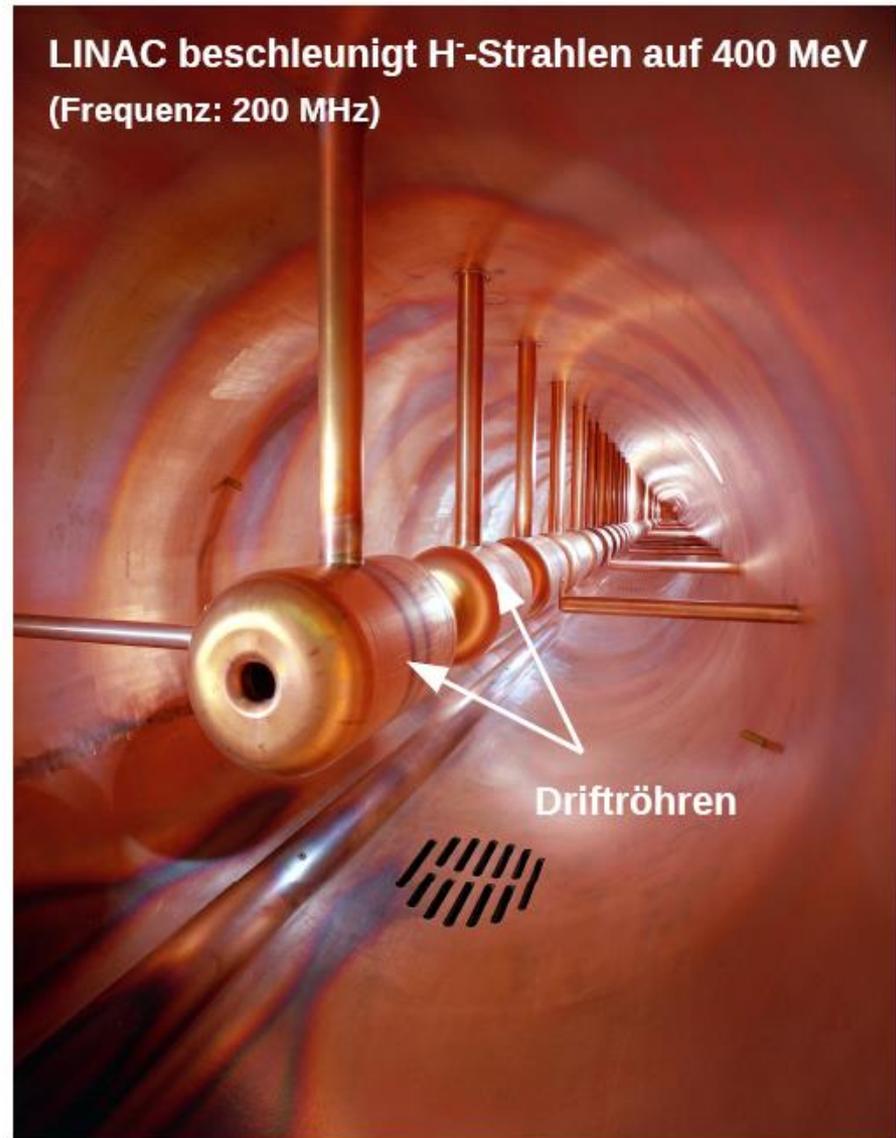
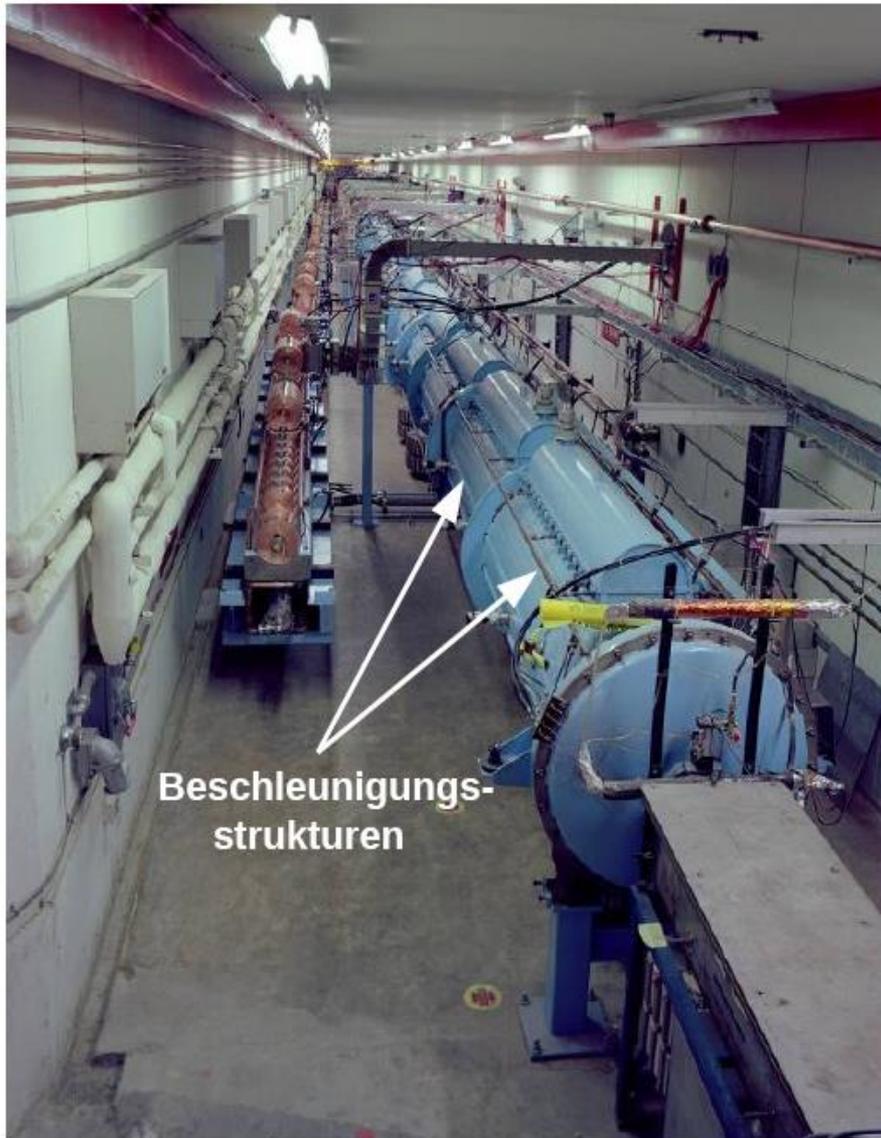
**1928:** R. Wideröe baut den ersten Linearbeschleuniger (Na<sup>+</sup>,K<sup>+</sup>-Ionen, U=25kV, E=50keV)



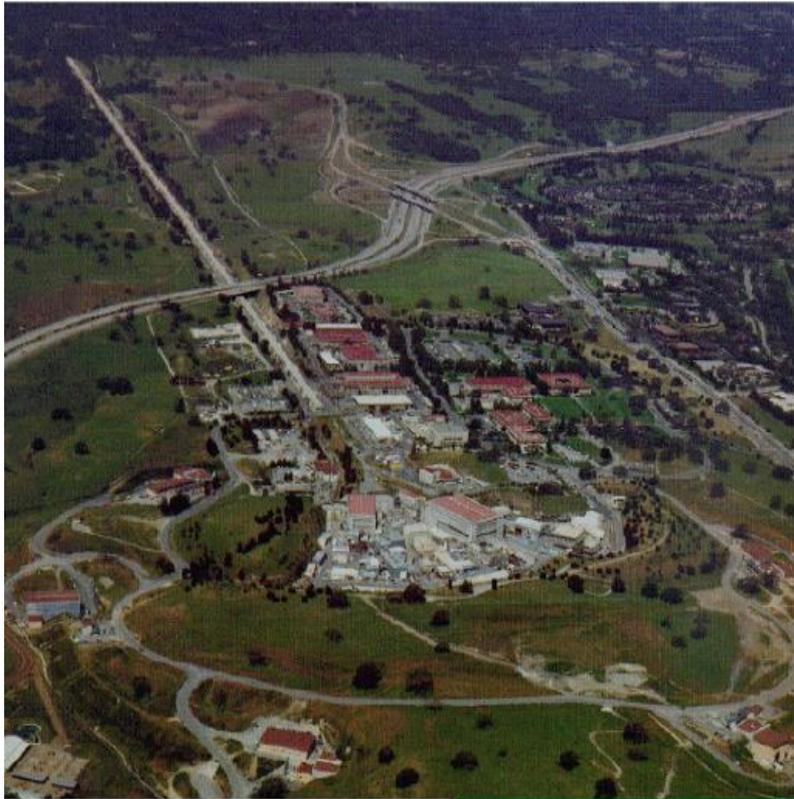
- Potential der Driftröhren beschleunigt Teilchen (zwischen den Driftröhren)
- Teilchen in den Driftröhren → Vorzeichen des Potentials kehrt sich um
- Gepulster Strahl (Pakete = Bunches)
- Geschwindigkeit der Teilchen steigt → Abstand zwischen zwei Röhren steigt

$$L_i = (T/2) \cdot v_i \quad (\text{für } v \approx c \text{ ist } L_i = \text{konst.})$$

# LINAC als Vorbeschleuniger



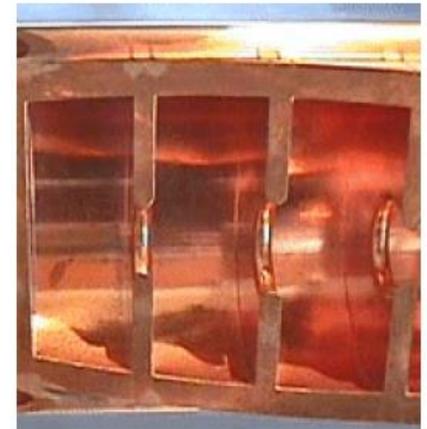
# SLAC – Stanford Linear Accelerator



Bisher größter Linearbeschleuniger

Länge: ca. 3 km

Energie ( $e^-$ ,  $e^+$ ):  $E = 46 \text{ GeV}$   
( $Z^0$ -Resonanz)



SLAC-Hohlleiter:

Material: Kupfer

$L = 3 \text{ m}$

Frequenz: 2,86 GHz

E-Gradient: 10 MeV/m

# Zukunftskonzepte für Linearbeschleuniger

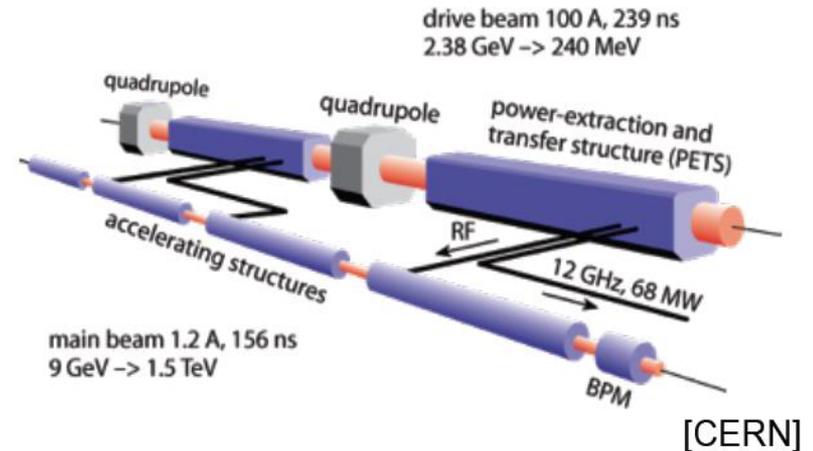
## ■ Zweistrahl-Beschleunigung

- Idee: konventioneller **Treiberstrahl** überträgt Energie an HF-Resonatoren, diese beschleunigen Hauptstrahl
- CLIC (Compact Linear Accelerator): 48-km-Linearbeschleuniger von Elektronen und Positronen bis zu 3 TeV am CERN

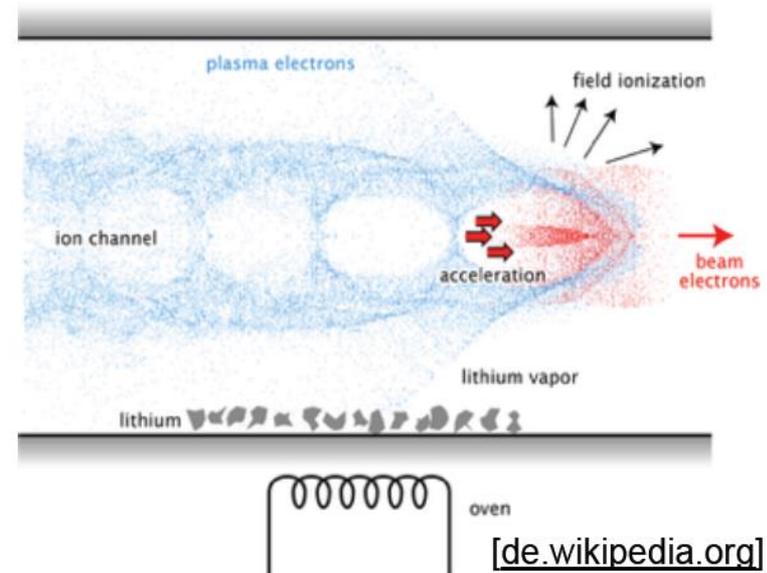
## ■ Plasma-Wakefield-Beschleunigung:

- Idee: Teilchenpaket (oder Laser) regt Welle in Plasma an, in deren „Kielwasser“ wird weiterer Teilchenstrahl beschleunigt
- Derzeit Erforschung der Grundlagen

### CLIC-Beschleunigungskonzept



### Plasma-Wakefield-Beschleunigung



# 4. Zyklotron

**1932:** Inbetriebnahme des ersten Zyklotrons (E. O. Lawrence und M. S. Livingston)

Lorentzkraft:  $\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$

Zentralkraft:  $\vec{F}_Z = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt} (m_0 \gamma \vec{v})$

Kreisbewegung:  $\vec{F}_L = -\vec{F}_Z$ ,  $\vec{F}_L \perp \vec{v} \rightarrow$   
 $|\vec{v}| = \text{konst.}, \frac{dv}{dt} = \omega^2 \cdot R$

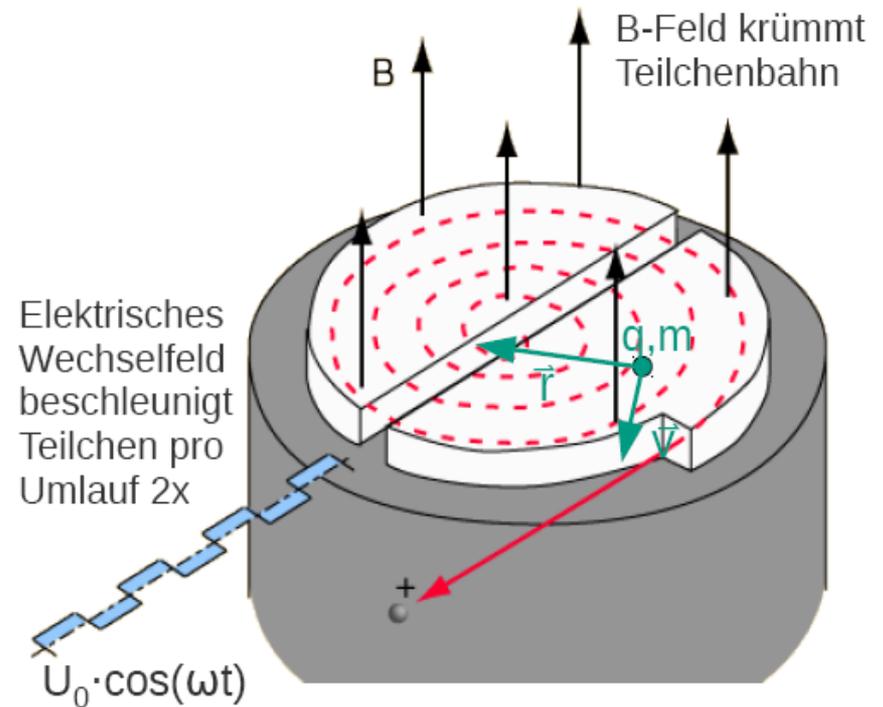
$$\Rightarrow F_Z = \gamma m_0 \frac{dv}{dt} = \gamma m_0 R \omega^2$$

$$= \gamma m_0 R \left( \frac{v}{R} \right) \omega \stackrel{!}{=} q \cdot v \cdot B$$

$$\Leftrightarrow \omega = \frac{qB}{\gamma m_0}$$

$v \ll c : \omega = \frac{qB}{m_0}$  *dh. unabhängig von v*

$v \approx c : \omega = \frac{v}{R} = \frac{qB}{\gamma m_0} \Leftrightarrow \boxed{R = \frac{P}{qB}}$

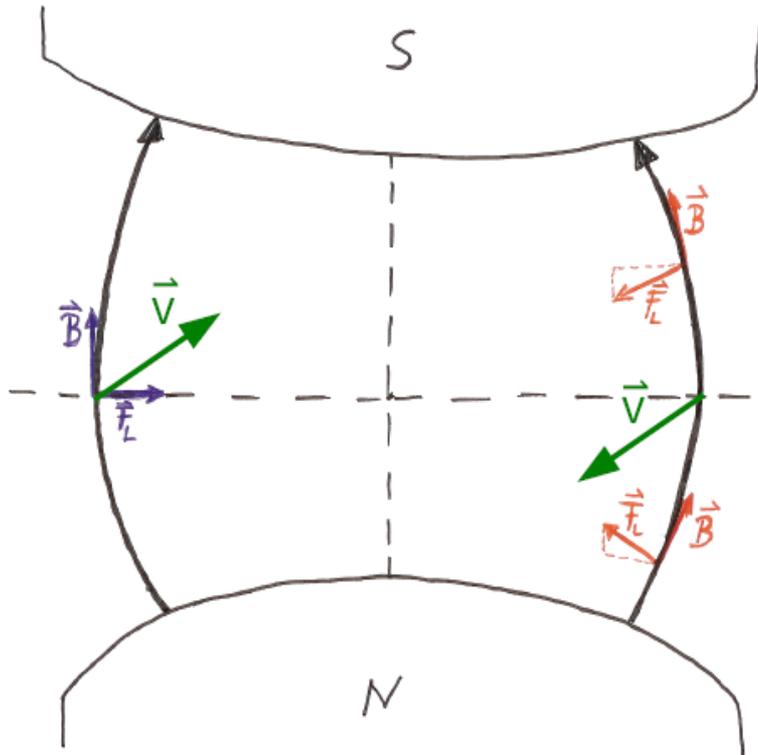


Endenergie des Teilchens begrenzt durch Größe des Magneten

$E_{p,\text{max}} = 22\text{MeV}$  (d=2,12m,  $N_{\text{Umlauf}} = 50$ )

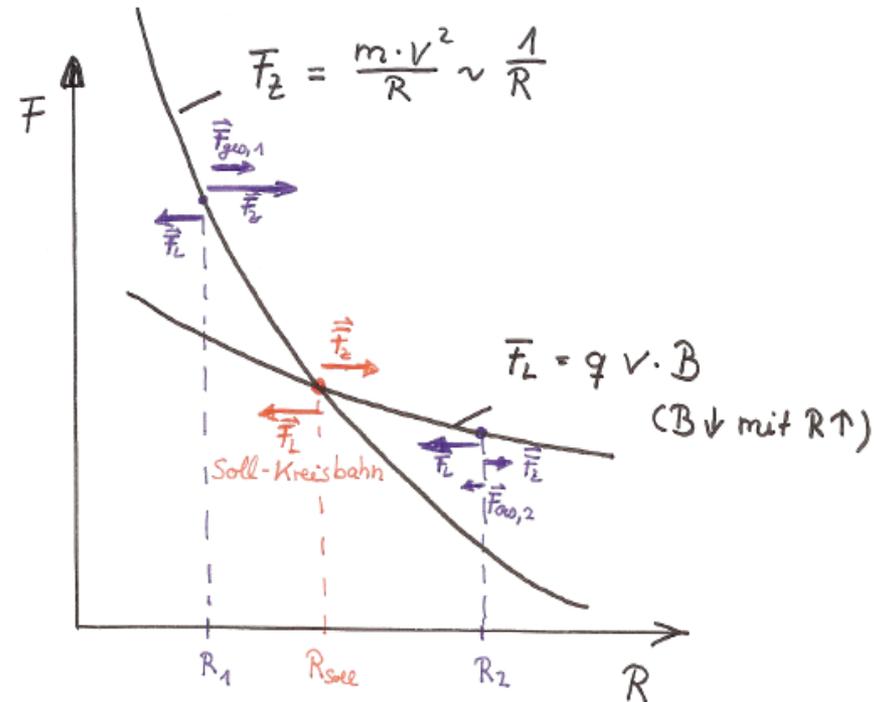
# Stabilitätsbedingung

## Axiale Stabilität



Teilchen, das axial zur Sollbahn verschoben ist, wird zur Sollbahn abgelenkt

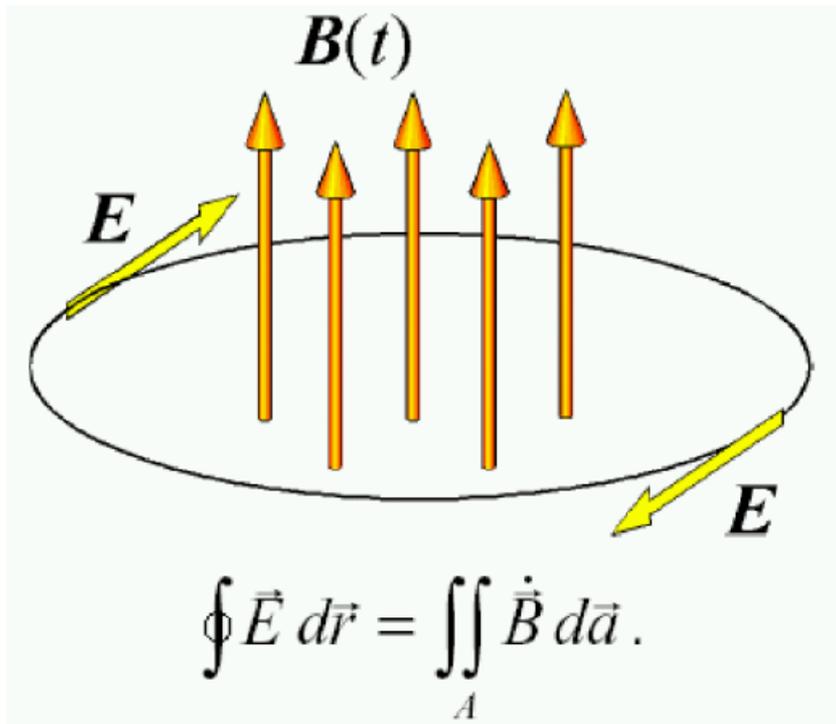
## Radiale Stabilität



Teilchen, das einen kleineren oder grösseren Radius als die Sollbahn hat, wird zur Sollbahn abgelenkt

# 5. Betatron

**1941:** Inbetriebnahme des ersten Betatrons (D. W. Kerst und R. Serber)



Faraday'sches Induktionsgesetz

Einmalige Beschleunigung während  $B_a$  hochgefahren wird  $\rightarrow$  gepulster Strahl

## Grundidee:

Beschleunigung durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld ( $\rightarrow$  el. Wirbelfeld)

Beschleunigendes Magnetfeld:

$$B_a(t) = B_{a,0} \cdot \cos(\omega t)$$

Führendes Magnetfeld:

(notwendig, da  $v$  zunimmt)

$$B_g(t) = B_{g,0} + 1/2 \cdot [B_a(t) - B_{a,0}]$$

$$\Delta B_g(t) = 1/2 \cdot \Delta B_a(t)$$

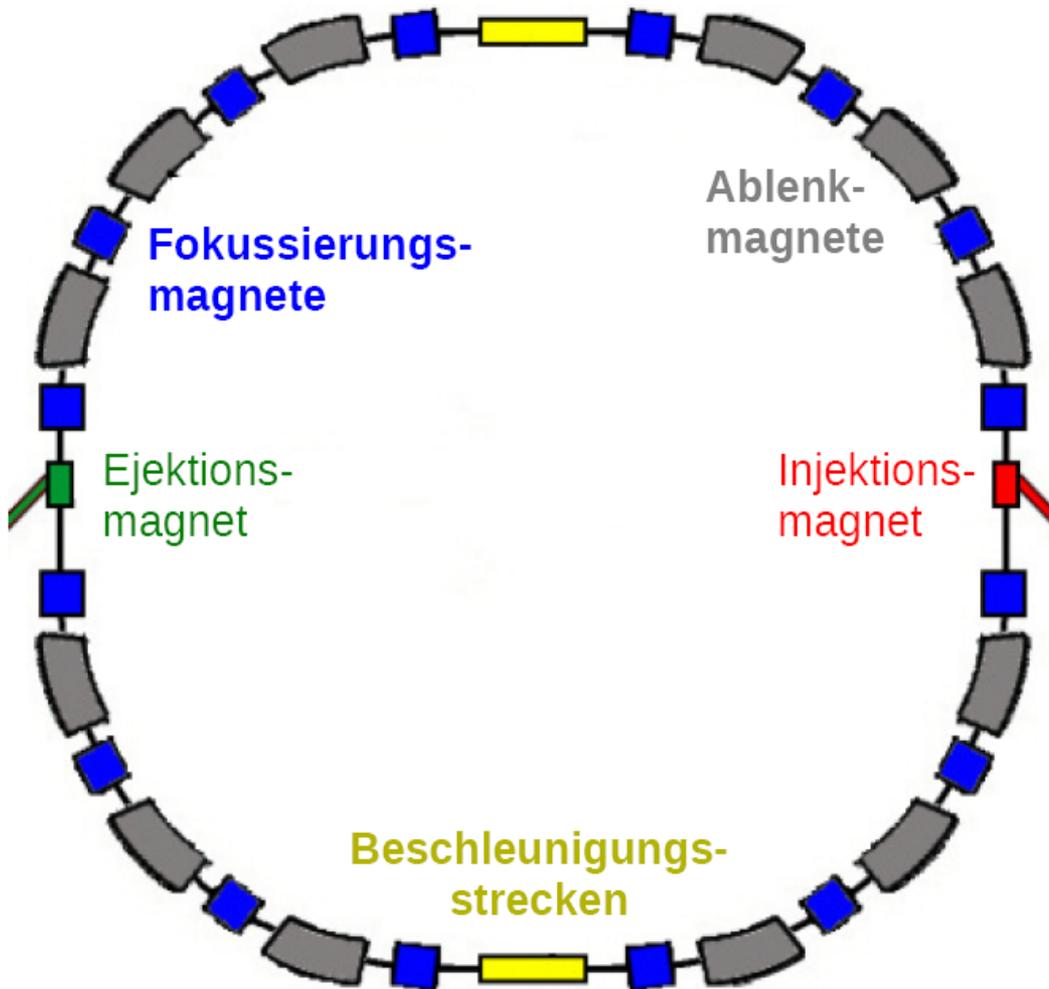
Wideröesche Betatronbedingung

$$E_{\max} = 500 \text{ MeV}$$

(begrenzt durch Stärke von  $B_a$ )

# 6. Synchrotron

**1946:** F. K. Goward und D. E. Barnes bauen das erste Elektronensynchrotron



Kreisbeschleuniger, bei dem die Teilchen viele Umläufe durchlaufen

→ hohe Energien erreichbar

- Beschleunigungsstrecken  
→ Energie erhöht sich  
→ B-Feld wird synchron zur Energie erhöht damit  $R \approx \text{konst.}$
- Speicherung über viele Stunden  
→ Fokussierungsmagnete

# Synchrotronstrahlung

QED: Jede beschleunigte Ladung strahlt Energie ab

Abgestrahlte Leistung:

$$P = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2 c^3}{(m_0 c^2)^4} \cdot E^2 \cdot B^2$$

Kreisbahn, dh.  $R = p / (q \cdot B) \approx E / (q \cdot B \cdot c) \rightarrow B \sim E / R$ :

$$P = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0} \frac{E^4 / (m_0 c^2)^4}{R^2}$$

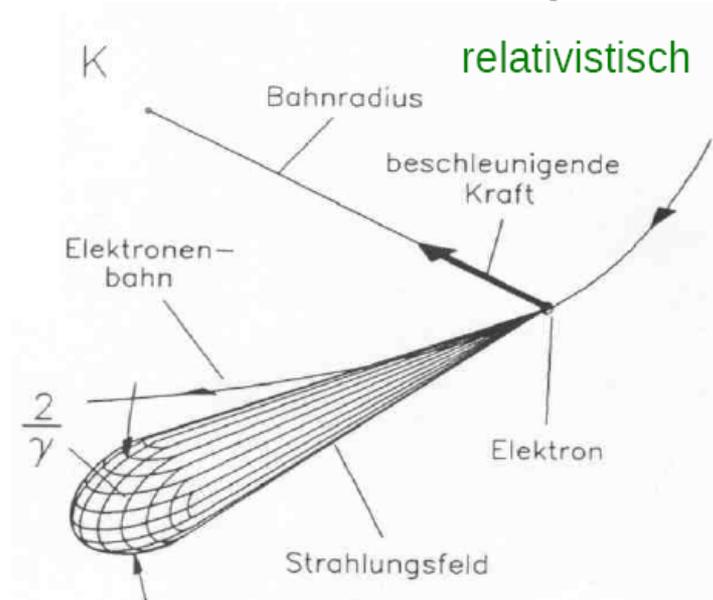
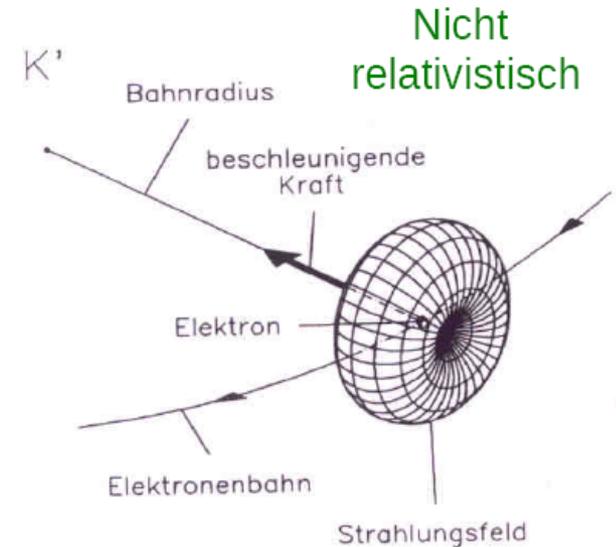
Abgestrahlte Energie pro Umlauf:

$$\Delta E = \frac{e^2}{3\epsilon_0} \frac{E^4 / (m_0 c^2)^4}{R}$$

$$m_p / m_e \approx 2000 \rightarrow \Delta E(p) \approx (1/2000)^4 \Delta E(e)$$

$$\text{LEP } (E_e = 100 \text{ GeV}) : \Delta E = 3,5 \text{ GeV}, P = 18 \text{ MW}$$

$$\text{LHC } (E_p = 7000 \text{ GeV}): \Delta E = 7 \text{ keV}, P = 7 \text{ kW}$$



# Gegenüberstellung Beschleunigertypen

## Speicherring

- + hohe Energien durch viele Umläufe
- + hohe Schwerpunktsenergie ( $s \sim E_a E_b$ )
- nur wenige Teilchensorten ( $e^\pm$ , p, p, Ionen)
- hohe Energie erfordert starke Ablenkmagnete / großen Radius
- Energieverlust durch Synchrotronstrahlung ( $e^\pm$ );  $\Delta E \sim E^4/R$

### Hauptausforderung:

- Ablenkmagnete
- Strahlführung (viele Umläufe)

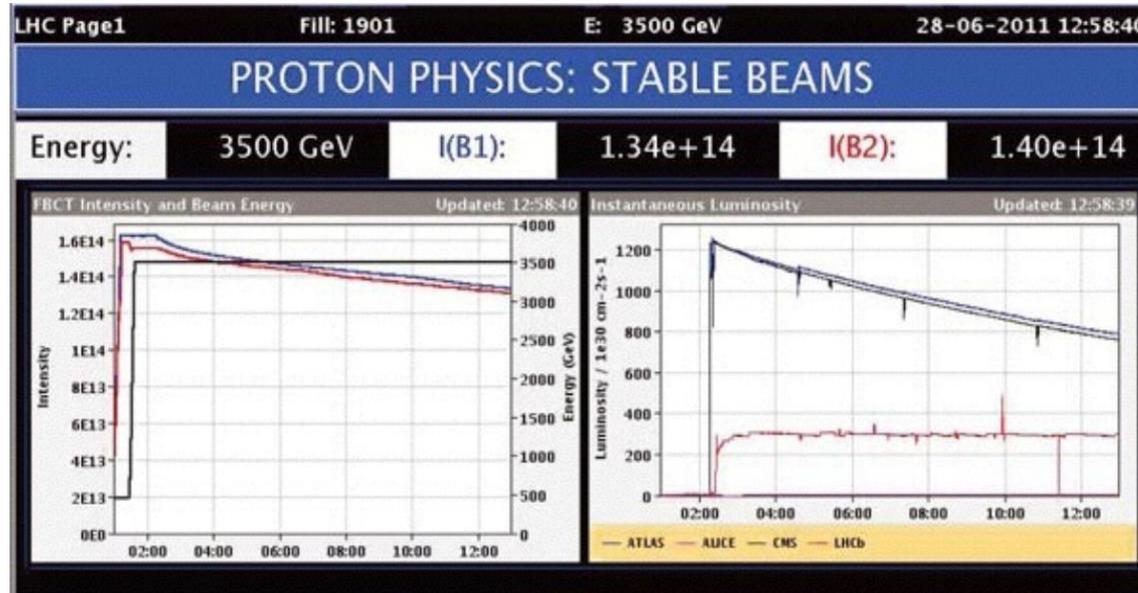
## Linearbeschleuniger

- ++ kein Energieverlust durch Synchrotronstrahlung
- + hohe Schwerpunktsenergie ( $s \sim E_a E_b$ )
- nur wenige Teilchensorten ( $e^\pm, p, p, \text{Ionen}$ )
- Teilchen gehen nach WW verloren
- geringe Luminosität → Fokussierung
- $E_{CM} \sim \text{Länge}$  → Länge groß; Feldgradient für Beschleunigung groß

### Hauptausforderung:

- Beschleunigerstrecken (Kavitäten)
- Finale Fokussierung

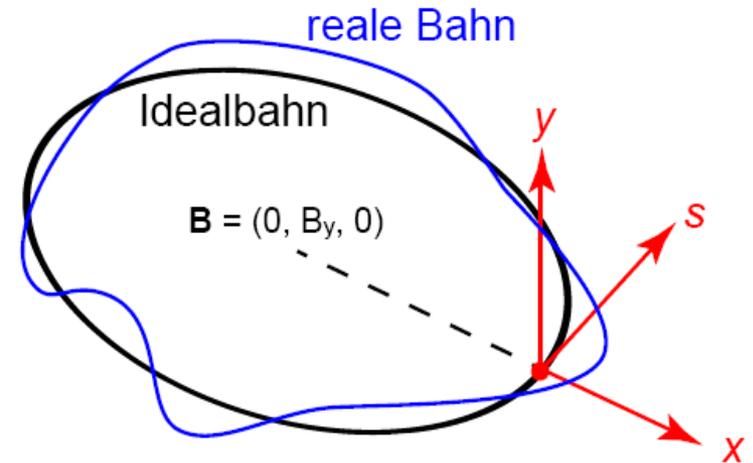
## 2.1.3 Strahldynamik (Ringbeschleuniger)



- Anforderung der Experimente an Collider: **Lumi, Lumi, Lumi!**
  - Typische Speicherzeit der Strahlen im LHC („Fill“): 12 Stunden
  - Zurückgelegte Strecke:  $12 \times 3600 \text{ Sekunden} \times 300000 \text{ km/s} = 86.6 \text{ AU!}$
  - Stabile Speicherung und gute Fokussierung → hohe integrierte Luminosität

# Strahloptik

- Ensemble von Teilchen, **nicht** jedes auf idealer Kreisbahn
  - (Mitbewegtes) Koordinatensystem: **Strahlrichtung s** und horizontale/vertikale **Abweichung von Idealbahn x/y**
  - Entwicklung der Teilchenbewegung für **kleine Abweichungen**



- Wirkung der **Lorentzkraft** auf Teilchen

- Inverser Biegeradius:  $\frac{1}{R(x, y, s)} = \frac{q}{p} B_y(x, y, s)$

- Strahldimension  $\ll$  Biegeradius  $\rightarrow$  Entwicklung von  $B_y$  in  $x$  (analog für  $y$ ):

$$\begin{aligned} \frac{q}{p} B_y(x, y, s) &= \frac{q}{p} B_y(0, y, s) + \frac{q}{p} \frac{\partial B_y(0, y, s)}{\partial x} \cdot x + \frac{1}{2} \frac{q}{p} \frac{\partial^2 B_y(0, y, s)}{\partial x^2} \cdot x^2 + \dots \\ &= \frac{1}{R} + kx + \frac{1}{2} mx^2 + \dots \end{aligned}$$

Dipol ( $B = \text{const}$ )
Quadrupol
Sextupol

## 2.1.4 Beschleunigerkomponenten

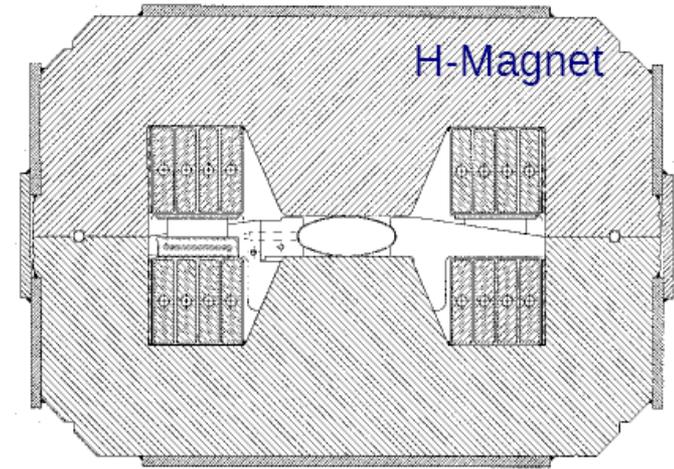
- Ablenkung und Fokussierung: **Magnetische Felder**
  - Synchrotron: variables Magnetfeld → Elektromagnete
  - Dipolmagnete: Ablenkung und schwache Fokussierung
  - Quadrupolmagnete: starke Fokussierung
  - Höhere Multipole (Sextupol, Oktupol usw.): Korrekturen
- Beschleunigung: **Hochfrequenz-Wechselspannung**
  - Klystrons: Erzeugung der HF-Wechselspannung
  - Hohlraumresonatoren: Übertragung auf Teilchenstrahl

# 1. Dipolmagnete

Synchrotron:  $B=B(E)$  → Verwendung von Spulen (u. nicht von Permanentmagneten)

## Normalleitend:

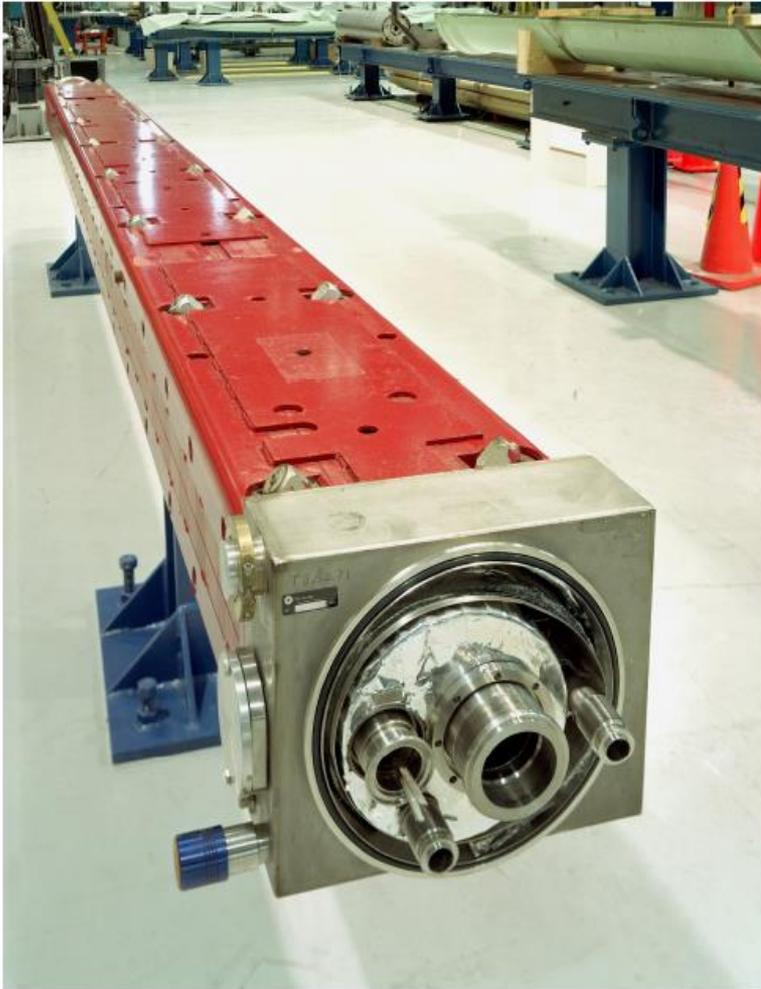
- Aufgebaut aus Eisen (Verbesserung der Homogenität des Feldes) und normalleitenden Spulen (meist wassergekühlte Kupferspulen)
- $B \leq 2\text{T}$  wegen Sättigungsmagnetisierung von Eisen ( $H_{\text{Fe}}$  steigt mit  $I$  →  $B_{\text{Spalt}}$  steigt kaum noch an wenn  $I$  ansteigt)



## Supraleitend:

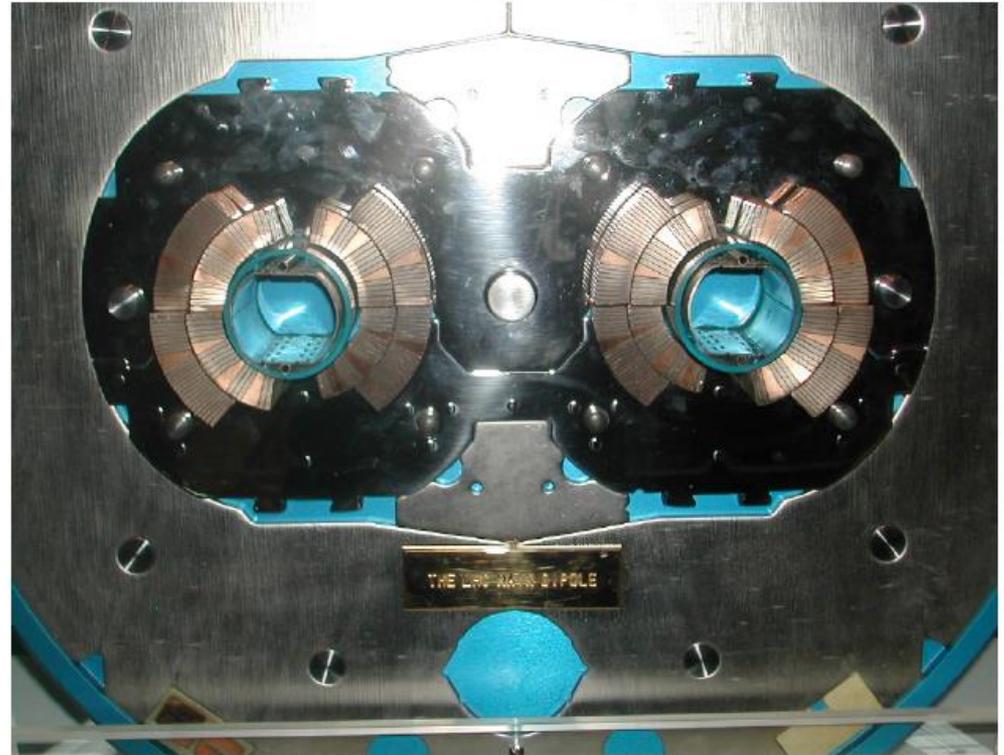
- Aufgebaut aus supraleitenden Spulen (meist aus NbTi, gekühlt mit fl. Helium)  
→ für  $T < T_c$  fließt Spulenstrom ohne Widerstand
- Feldverteilung ausschliesslich durch Stromdichteverteilung gegeben  
→ Homogenes Feld nur durch sehr genaue Spulenwicklung erreichbar
- Erreichbare Magnetfelder von  $B \leq 10\text{T}$

Tevatron: 774 Dipolmagnete



$B = 4,2T$  ;  $T = 4K$  ; NbTi

LHC: 1232 Dipolmagnete

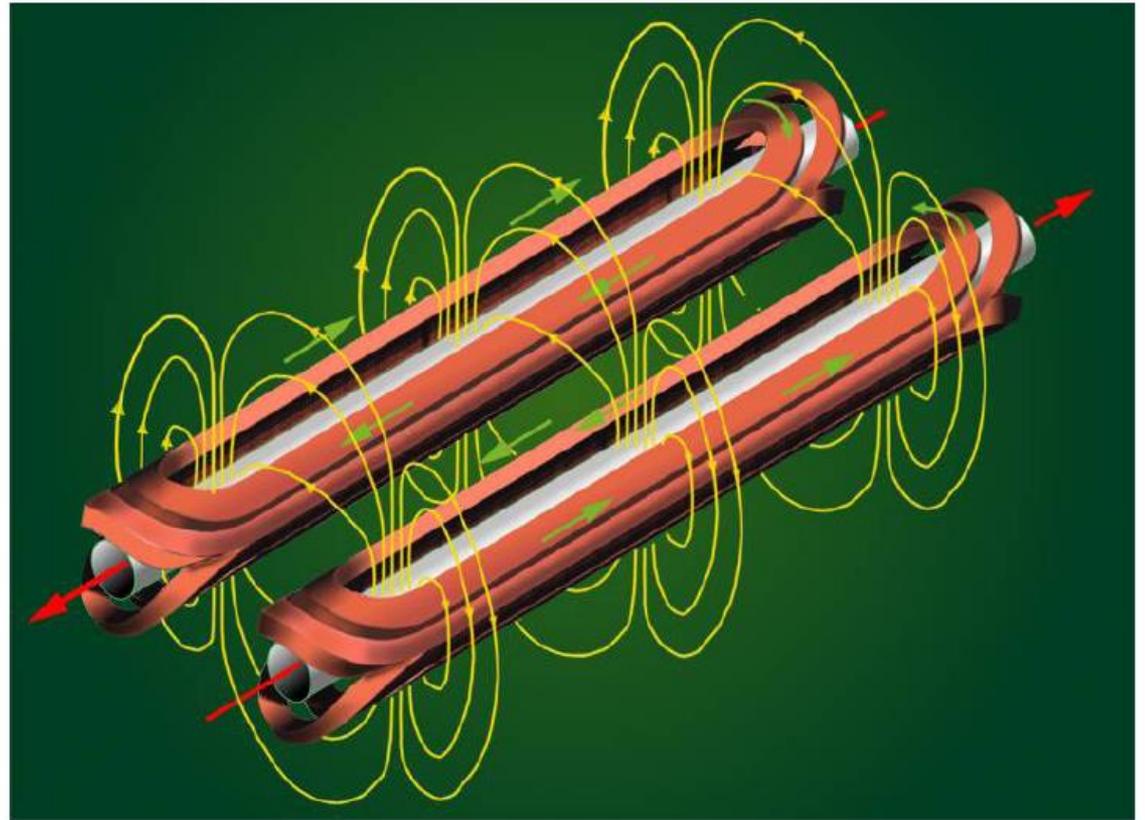
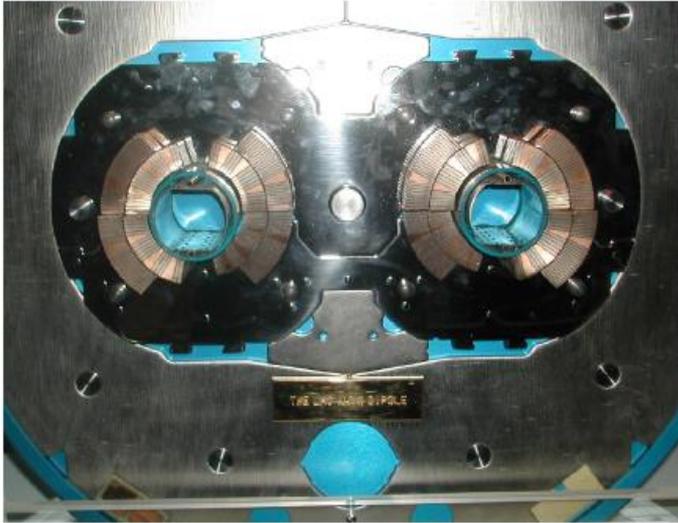


$B = 8,3T$  ;  $L = 15m$  ;  $T = 1,9K$  ; NbTi ; Gewicht = 35 t

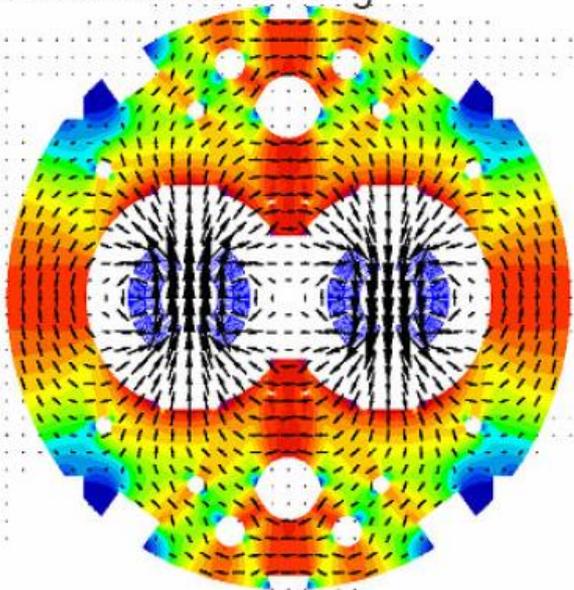
Tevatron: Proton-Antiproton → ein Strahlrohr

LHC : Proton-Proton → zwei Strahlröhren

# LHC-Dipolmagnete



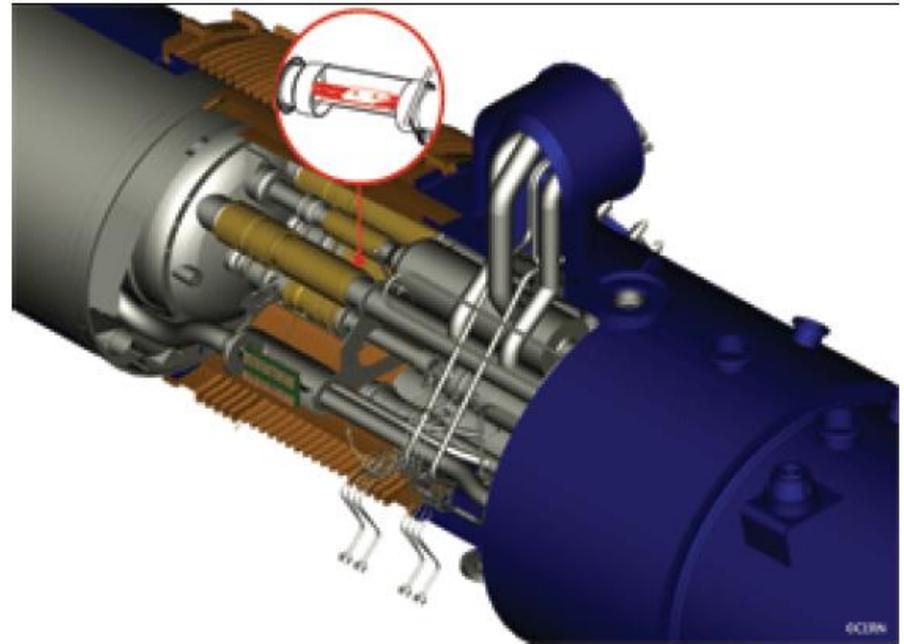
Feldlinienverteilung



Identische Teilchenstrahlen in entgegengesetzter Richtung unterwegs

→ Magnetfeldlinien müssen in entgegengesetzte Richtung zeigen

# Magnetverbindungen LHC



**Während LHC Inbetriebnahme (kein Strahl):**

Defekte Verbindung führte zur Überhitzung und zum Verdampfen von flüssigem Helium

→ Reparatur und Installation eines neuen Sicherheitssystems

**Seit März 2010:** pp-Kollisionen bei  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  (2010+2011)  
bei  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  (2012)

## 2. Quadrupolmagnete

### ■ Magnetisches Quadrupolfeld:

- Feld verschwindet auf Strahlachse, wächst linear in x (und y)
- Feld abhängig von **Gradient der Feldstärke**

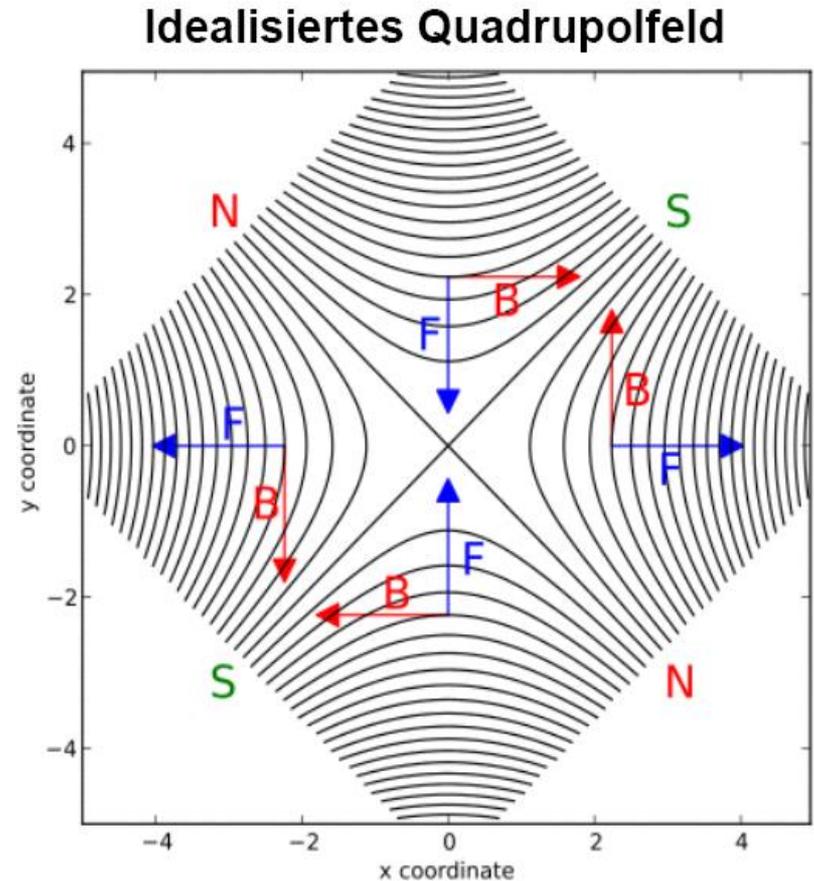
$$B_x(y) = \frac{\partial B_x}{\partial y} y \equiv gy$$

$$B_y(x) = \frac{\partial B_y}{\partial x} x \equiv gx$$

(LHC Main Quadrupole:  $g = 223 \text{ T/m}$ )

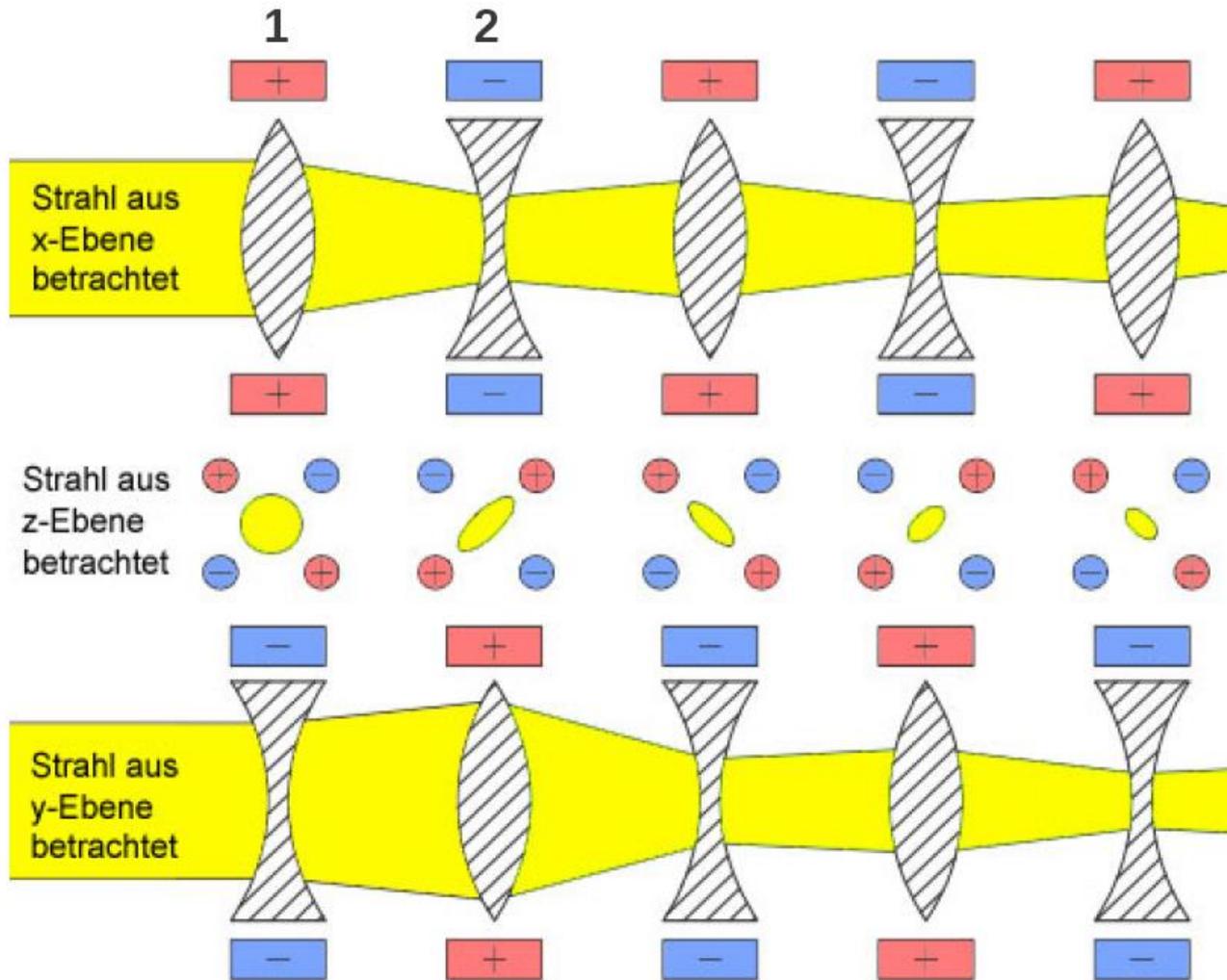
### ■ Effekt auf Teilchenstrahlen

- **Fokussierung** in eine, **Defokussierung** in die andere Richtung
- Beispiel rechts: vertikale Fokussierung, horizontale Defokussierung



[en.wikipedia.org]

# Quadrupol-Fokussierung



Betrachte nur Linse 1+2

Brennweite F für Linsen-System:

$$1/F = 1/f_1 + 1/f_2 - d/(f_1 f_2)$$

Für  $f_1 = -f_2 = f$

x-Ebene:

$$1/F = 1/f - 1/f + d/f^2 = d/f^2 > 0$$

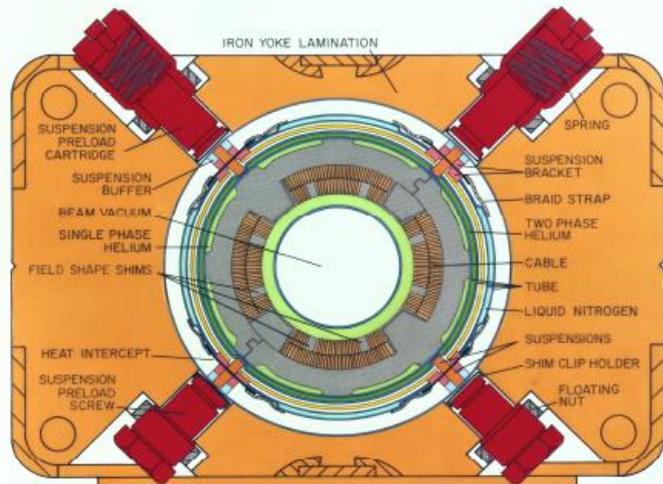
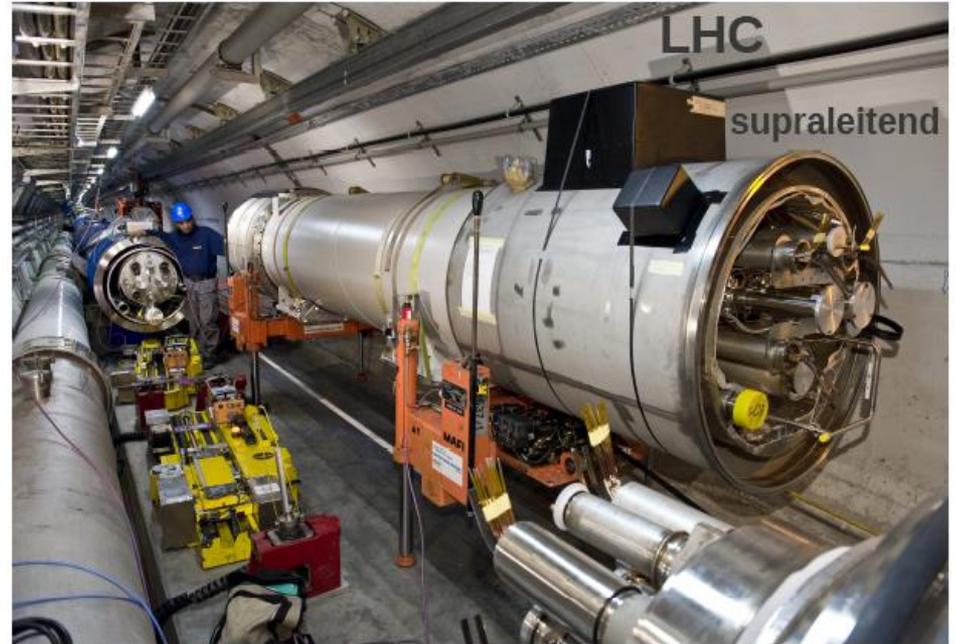
→ fokussierend

y-Ebene:

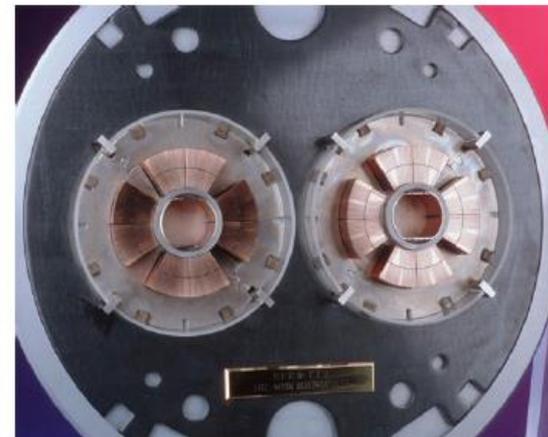
$$1/F = -1/f + 1/f + d/f^2 = d/f^2 > 0$$

→ fokussierend

**Durch Beschleunigung wird Strahl schmaler**



Tevatron  
supraleitend



# 3. Hohlraumresonatoren

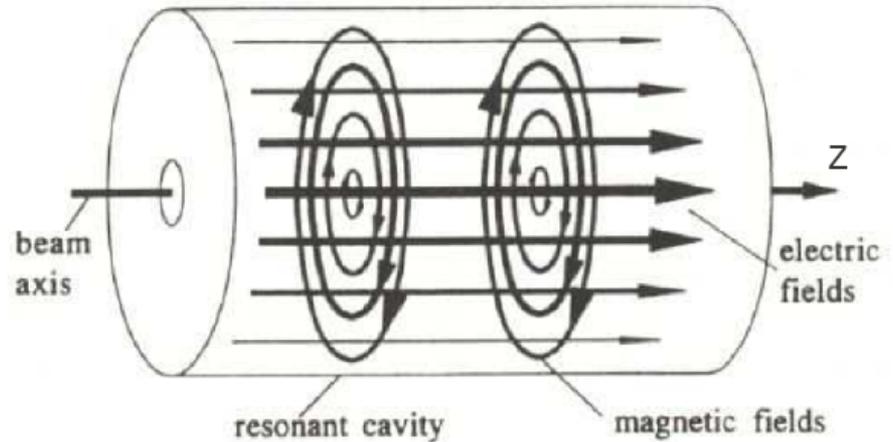
Erzeugung hoher Feldgradienten mit Hilfe von Hohlleitern (dh. Wanderwelle) und Resonatoren (dh. stehende Welle); Hochfrequenzsysteme

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} = 0$$

Analog für H

Lösung:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cdot e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$$



EM-Welle:  $E_z = 0$ ,  $H_z \neq 0$

TM-Welle:  $E_z \neq 0$ ,  $H_z = 0$

Nur TM-Moden zur Teilchenbeschleunigung geeignet (meist  $TM_{01}$ )

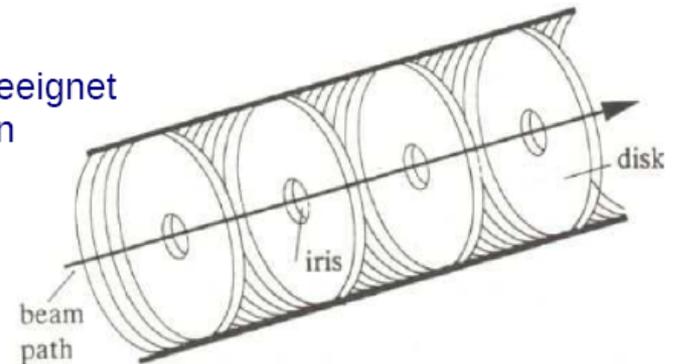
Hohlleiter:

$$v_{ph} = \omega/k_z > c > v_{Teilchen} \leq c$$

(dh. ohne Blenden ungeeignet zur Beschleunigung von Teilchen)

→ Einbau von Blenden ( $v_{ph} \leq c$ )

SLAC-Struktur



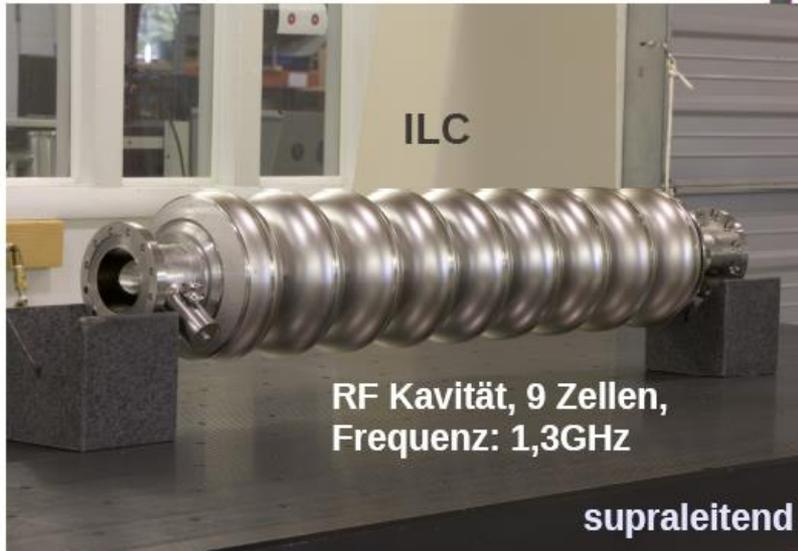
Hohlraumresonator:

E.g. Alvarezstruktur Serie gekoppelter Einzelresonatoren;  $L_{Driftröhre} = \beta c / f$  (FNAL: LINAC)

## Normalleitende Hohlraumresonatoren



**HERA: Klystrongenerator**  
(Mehrkreis-klystron, hohe Leistung, 3m lang)

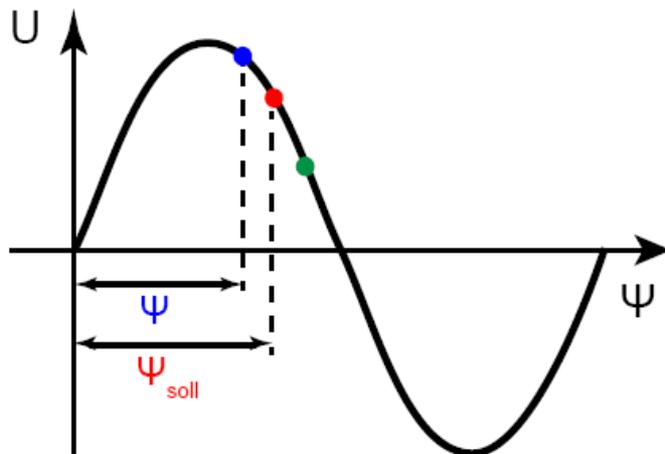
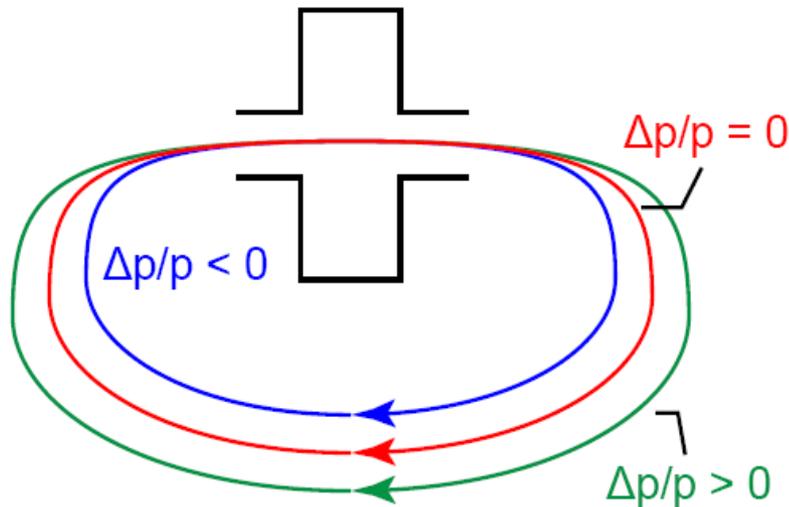


**RF Kavität, 9 Zellen,  
Frequenz: 1,3GHz**

**supraleitend**

# Phasenfokussierung

Hohlraumresonator



- Ziel: **feste Phase** des Strahls bezüglich HF-Spannung
- Annahme  $v = c \rightarrow$  betrachte nur Impulsabweichungen  $\Delta p/p$
- $\Delta p/p < 0$ : innerhalb der Sollbahn  
 $\rightarrow$  **zu frühe** Ankunft  
 $\rightarrow$  stärkere Beschleunigung
- $\Delta p/p > 0$ : außerhalb der Sollbahn  
 $\rightarrow$  **zu späte** Ankunft  
 $\rightarrow$  schwächere Beschleunigung
- Konsequenz: **Synchrotron-schwingung** um Sollphase

## 2.1.5 Moderne Teilchenbeschleuniger

Beschleuniger	Datennahme	Typ, Teilchen	Strahlenergie (GeV)
LEP (CERN)	1989–2000	Speicherring, e	45–104.6
KEKB (KEK)	1999–2010	Speicherring, e	e <sup>-</sup> e <sup>+</sup>
PEP-II (SLAC)	1999–2008	Speicherring, e	e <sup>-</sup> e <sup>+</sup>
Super-KEKB (KEK)	2018	Speicherring, e	e <sup>-</sup> e <sup>+</sup>
ILC (in Planung)	?	Linearbeschleuniger, e <sup>+</sup>	250–500

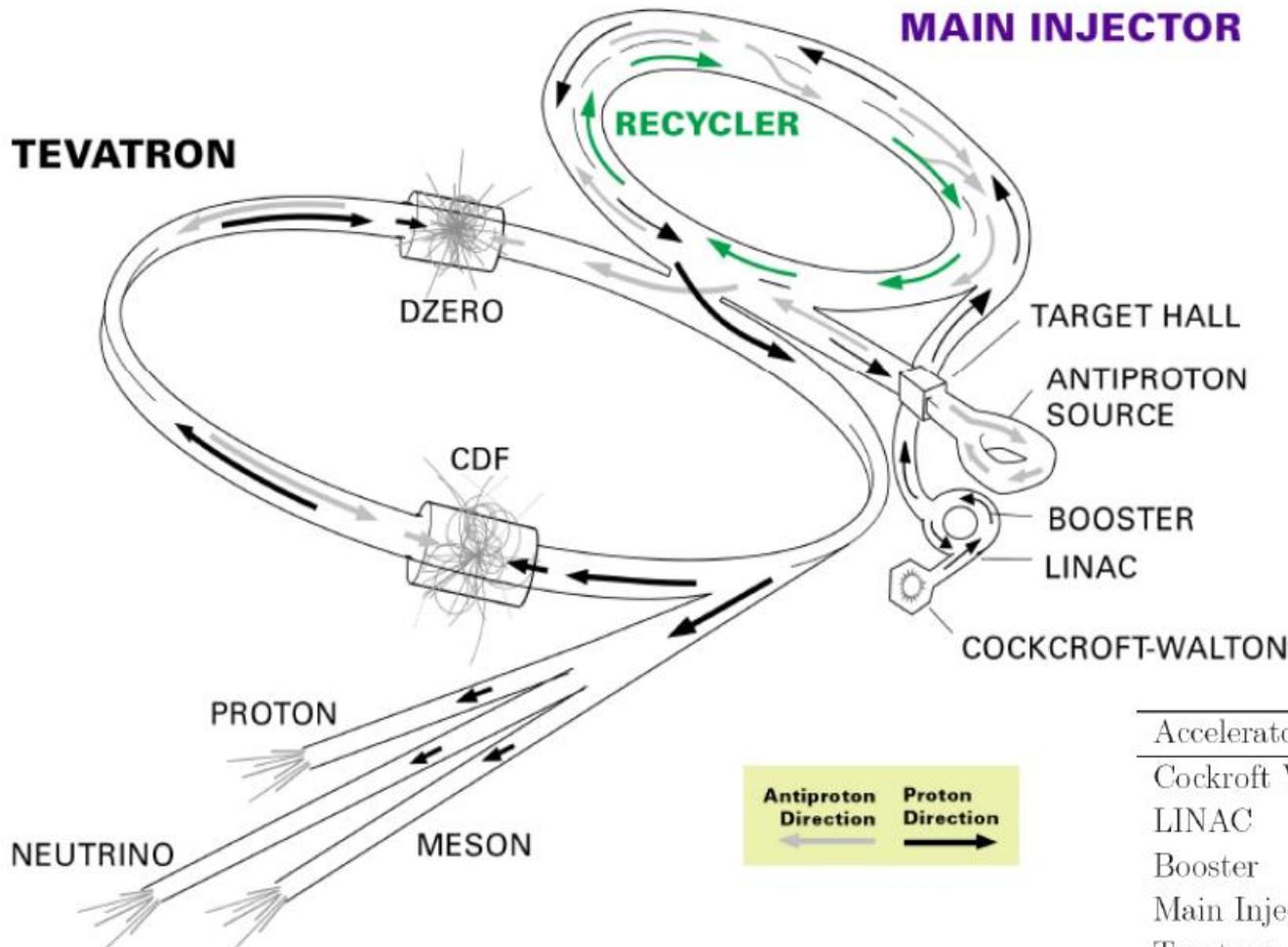
Beschleuniger	Datennahme	Typ, Teilchen	Strahlenergie (GeV)
HERA (DESY)	1992–2007	Speicherring, e	e <sup>±</sup> p: 920
Tevatron (Fermilab)	1987–2011	Speicherring, p $\bar{p}$	900–980
LHC Run I (CERN)	2009–2013	Speicherring, pp und Schwerionen	2010/2011: 3500 2012/2013: 4000
LHC Run II (CERN)	ab 2015	Speicherring, pp und Schwerionen	6500–7000

# Luminositäten

	peak $\mathcal{L}$ ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$L_{\text{in}}$ ( $\text{fb}^{-1}$ )
LEP II	$1 \cdot 10^{32}$	3
KEKB / Belle	$2 \cdot 10^{34}$	710
Tevatron Run-II	$4 \cdot 10^{32}$	12
LHC Run-I (2010–2012)	$7.7 \cdot 10^{33}$	25
LHC Run-II (since 2015)	$2 \cdot 10^{34}$	92

# Beschleunigersysteme

## Tevatron: Proton-Antiproton-Speicherring



Strahlenergie:

$$E = 980 \text{ GeV}$$

Geschwindigkeit:

$$v = 0.999999 \cdot c$$

Ringlänge:

$$L = 6.28 \text{ km}$$

Umlaufzeit:

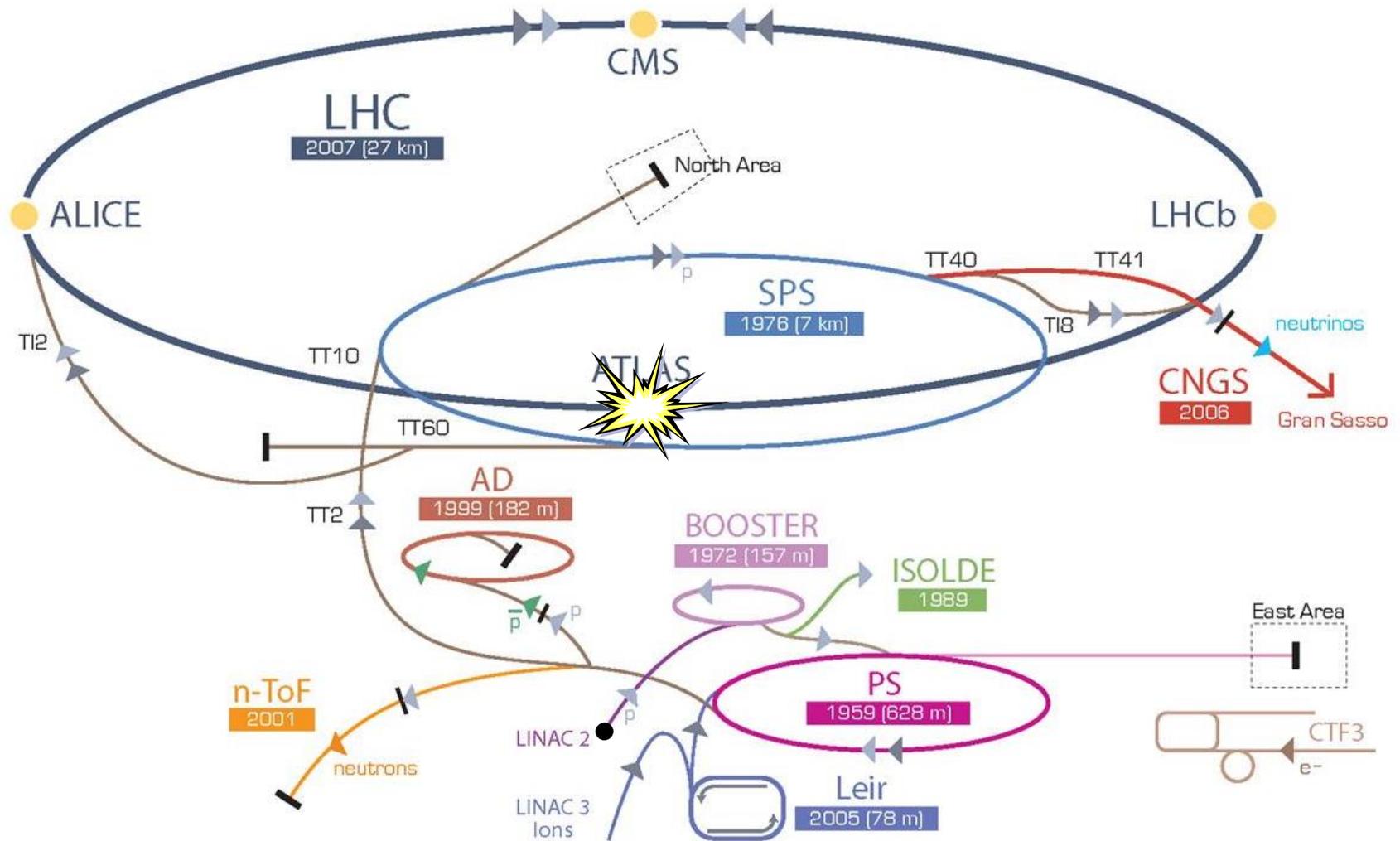
$$T = 20.95 \mu\text{s}$$

Speicherzeit:

$$\Delta t_{\text{sp}} = 10 \text{ bis } 20 \text{ h}$$

Accelerator	Final beam energy [GeV]
Cockroft Walton	$0.75 \times 10^{-3}$
LINAC	0.4
Booster	8
Main Injector	150
Tevatron	980

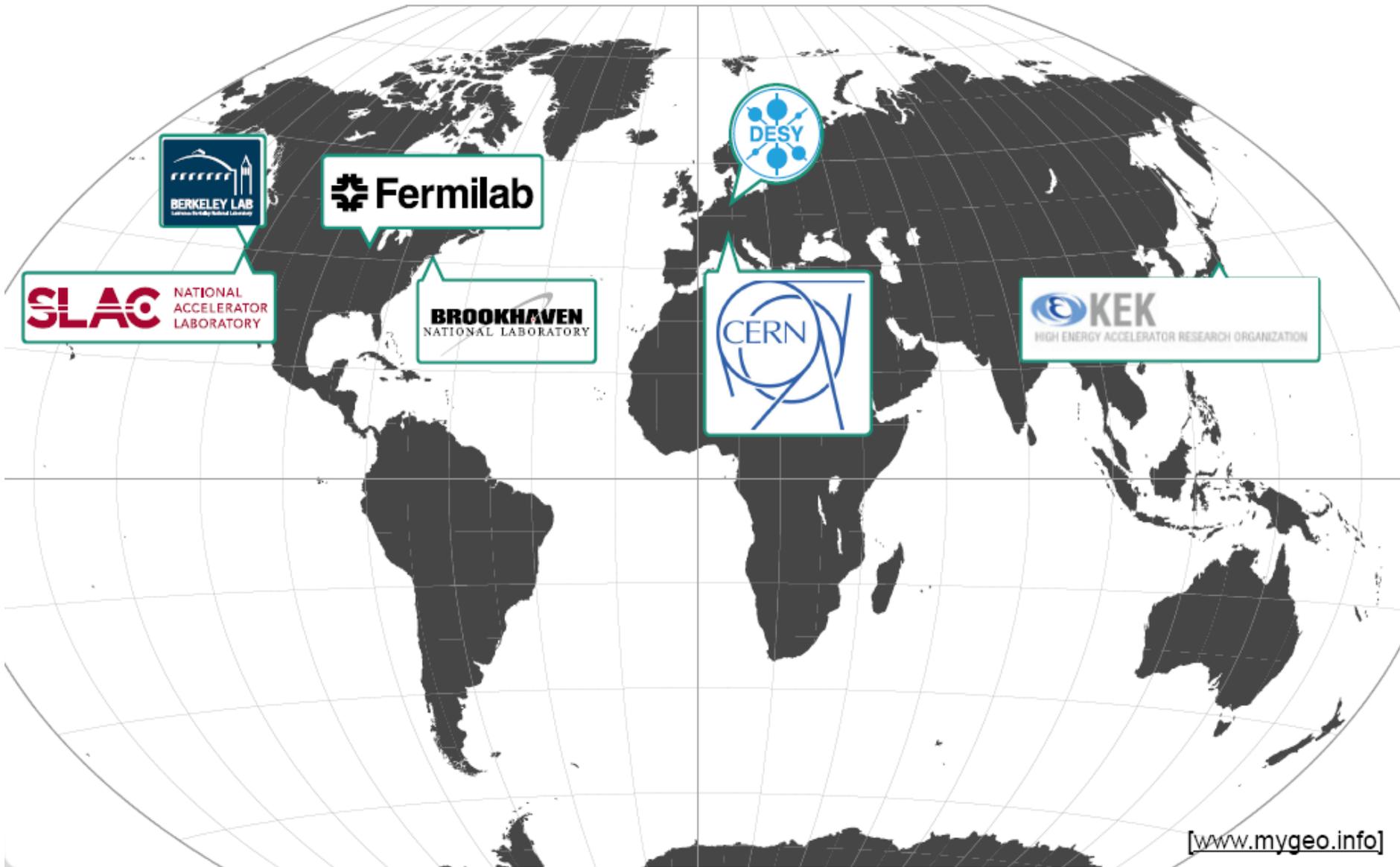
# Der CERN Beschleunigerkomplex



# Kontrollräume



# Beschleunigerlabors weltweit

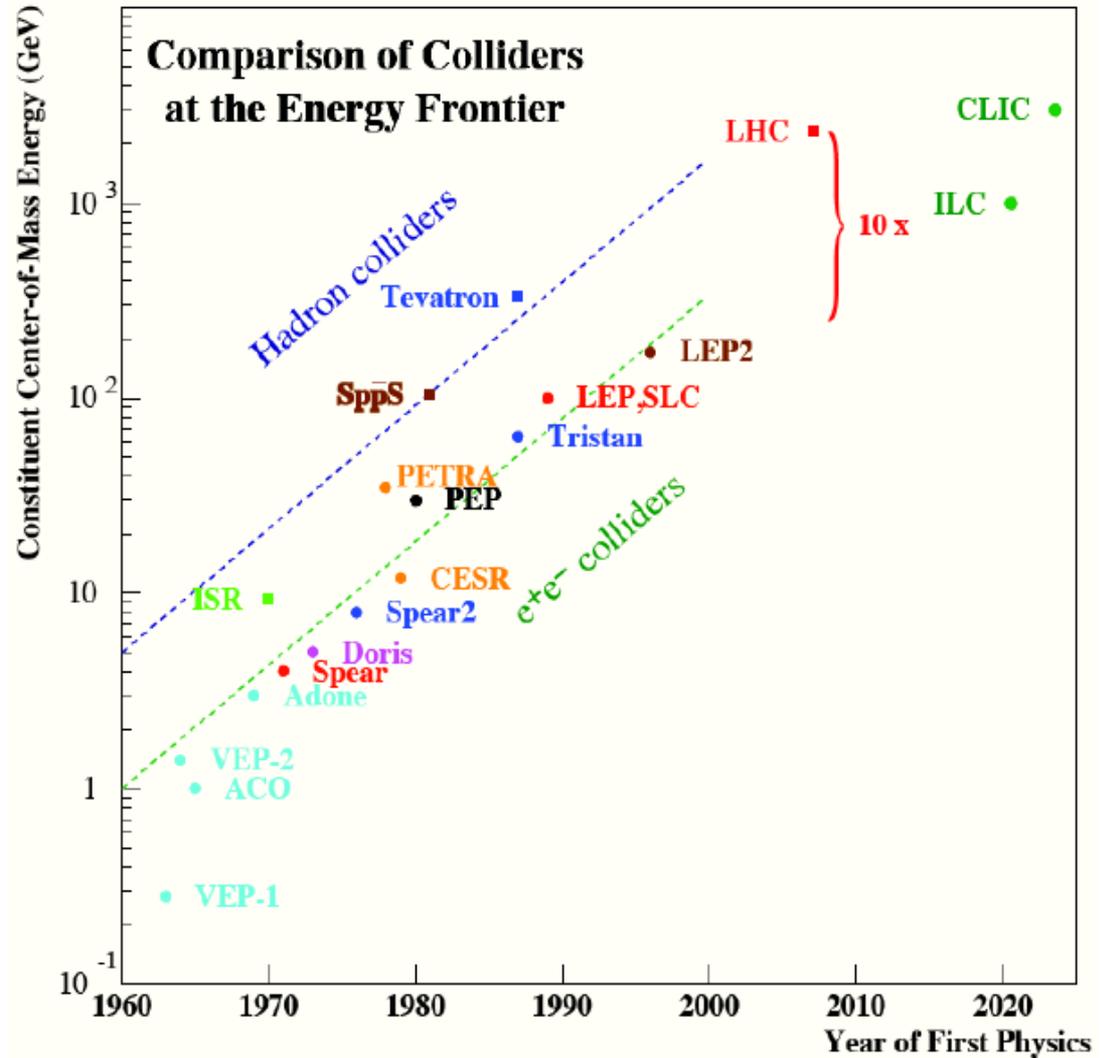
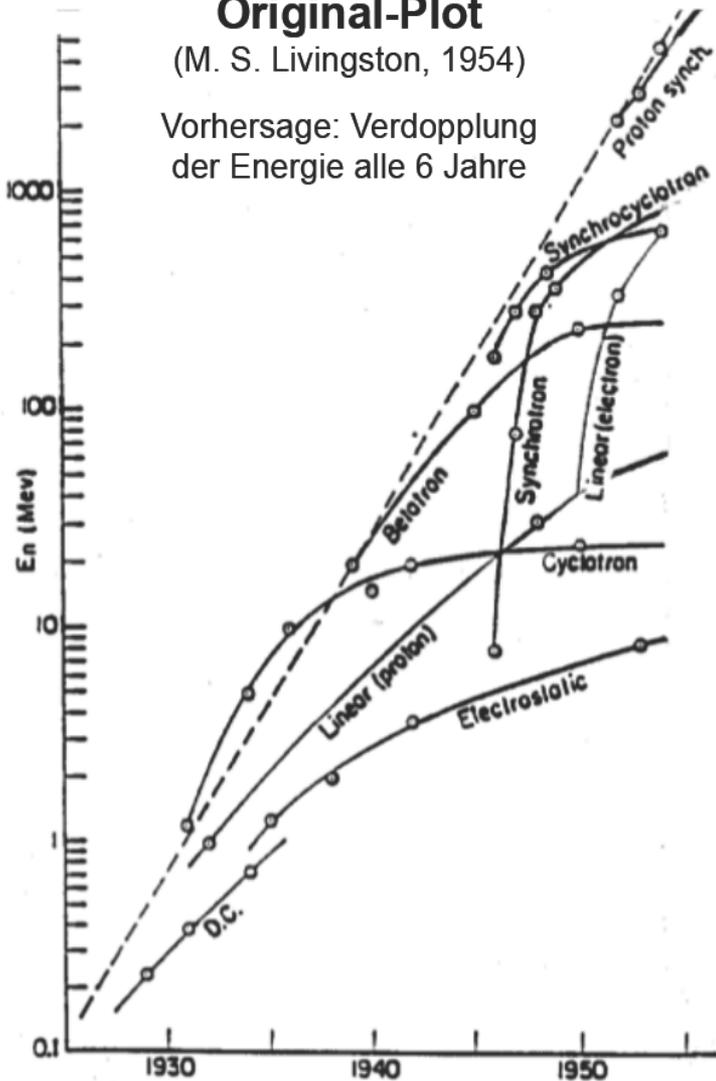


# 2.1.6 Ausblick

## Original-Plot

(M. S. Livingston, 1954)

Vorhersage: Verdopplung der Energie alle 6 Jahre



Die Entwicklung der Leistung: Livingston-Plot

# $e^+ e^-$ Collider

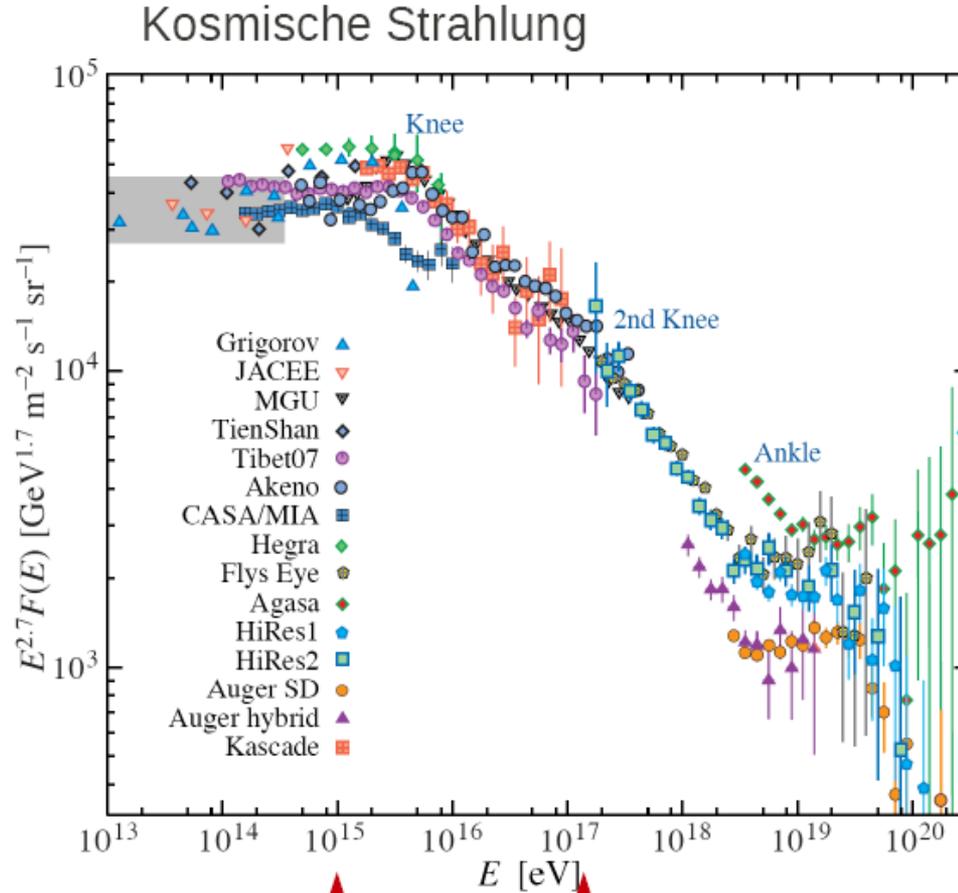
Accelerator (Lab)	Operation	Type: Particles	Beam Energy (GeV)
LEP (CERN)	1989–2000	Storage ring: $e^+ e^-$	45–104.6
SLC (SLAC)	1989–1998	Linear accelerator: $e^+ e^-$	50
KEKB (KEK)	1999–2010	Storage ring: $e^+ e^-$	$e^-$ : 8.0, $e^+$ : 3.5
PEP-II (SLAC)	1999–2008	Storage ring: $e^+ e^-$	$e^-$ : 9.0, $e^+$ : 3.1
Super-KEKB (KEK)	since 2017	Storage ring: $e^+ e^-$	$e^-$ : 7.0, $e^+$ : 4.0
ILC (Japan?)	?	Linear accelerator: $e^+ e^-$	250–500
CEPC (China)	??	Storage ring: $e^+ e^-$	120
CLIC (?)	???	Linear accelerator: $e^+ e^-$	1500
FCC-ee (CERN)	???	Storage ring: $e^+ e^-$	45–175

Further at lower energies: VEPP (Novosibirsk), BEPC (Beijing), DAΦNE (Frascati), CESR (Cornell)

# Hadron Collider

Accelerator (Lab)	Operation	Type: Particles	Beam Energy (GeV)
HERA (DESY)	1992–2007	Storage ring: $e^\pm p$	$e^\pm$ : 30, $p$ : 920
Tevatron (Fermilab)	1987–2011	Storage ring: $p\bar{p}$	900–980
RHIC (BNL)	since 2000	Storage ring: $pp$ , heavy ions	100/proton
LHC Run-I (CERN)	2009–2012	Storage ring: $pp$ , heavy ions	2010/11: 3500 2012: 4000 (2510/proton)
LHC Run-II (CERN)	since 2015	Storage ring: $pp$ , heavy ions	6500 (2760/proton)
HL-LHC (CERN)	2026–2035	Storage ring: $pp$ , heavy ions	7000
FCC-hh (CERN)	???	Storage ring: $pp$	50 000

# Beschleunigte Teilchen aus dem All



Tevatron

LHC

~ 1k Teilchen  
pro Jahr und  $\text{cm}^2$