

# Physik der Teilchenbeschleuniger

Prof. Dr. Otmar Biebel

## Inhalt der Vorlesung:

- Einführung in die Teilchenbeschleuniger
- Teilchenbeschleunigeroptik
- Teilchenablenkung durch Magnete
- Teilchenbewegung im Kreisbeschleuniger
- Betatron-Oszillationen
- starke und schwache Fokussierung, Phasenfokussierung
- Luminosität, Strahlemittanz
- Liouville Theorem
- Strahlkühlung
- Synchrotronstrahlung
- Linear- vs. Kreisbeschleuniger
- Supraleitende Beschleuniger
- Korrektur nicht-perfekter Strahloptik

(Folien) im WWW

<http://www.physik.uni-muenchen.de/~biebel/beschleuniger>

Termin der Vorlesung: Donnerstags 10 - 13 Uhr, Seminarraum: 4/16

Beginn: 23. Oktober 2003

## Literatur zur Vorlesung

Eine kleine Auswahl:

- Wiedemann: Particle Accelerator Physics, Vol.1&2 (Springer),
- Conte, MacKay: Introduction to the Physics of Particle Accelerators (World Scientific),
- Wille: The Physics of Particle Accelerators (Oxford University Press),
- Hinterberger: Physik der Teilchenbeschleuniger (Springer),
- CERN Accelerator School: 5th General Accelerator Physics Course, CERN 94-01 Vol.1&2:  
[http://preprints.cern.ch/cgi-bin/setlink?base=cernrep&categ=Yellow\\_Report&id=94-01\\_v1](http://preprints.cern.ch/cgi-bin/setlink?base=cernrep&categ=Yellow_Report&id=94-01_v1),  
[http://preprints.cern.ch/cgi-bin/setlink?base=cernrep&categ=Yellow\\_Report&id=94-01\\_v2](http://preprints.cern.ch/cgi-bin/setlink?base=cernrep&categ=Yellow_Report&id=94-01_v2),
- [Wille: Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen (Teubner)]
- [Daniel: Beschleuniger (Teubner)]

## Geplante Themen der Vorlesung

1. Einleitung, Motivation
  - (a) Historie
  - (b) Übersicht von Konzepten
  - (c) Anwendungen
  - (d) Prinzipielle Aufbau eines Beschleunigers
2. Lineare Beschleuniger
  - (a) Prinzipien
  - (b) HF-Beschleuniger
3. Zirkulare/Kreis-Beschleuniger
  - (a) Betatron
  - (b) Schwache Fokussierung, adiabatische Dämpfung
  - (c) Microtron, Synchro-/Isochron-Zyklotron
  - (d) Synchrotron
4. Geladene Teilchen in elektromagnetischen Feldern
  - (a) Lorentzkraft
  - (b) Grundlagen zur Optik von Strahlen geladener Teilchen
  - (c) Multipolfeld-Entwicklung für Magnete
  - (d) Bewegungsgleichung der Teilchenstrahldynamik
  - (e) Generelle Lösungen der Bewegungsgleichung
5. Lineare Strahldynamik
  - (a) Matrizen-Formalismus
  - (b) Fokussierung in Ablenkmagneten
  - (c) Teilchenstrahlen und Phasenraum: Emittanz und Liouville-Theorem
  - (d) Betatron Funktion und Strahleinhüllende
  - (e) Weglänge und "Momentum compaction"

## 6. Periodische Fokussierungssysteme

(a) “Combined function” vs. “separated function”:

FODO-Struktur

(b) Betatron-Bewegung in periodischen Strukturen

(c) Strahldynamik in geschlossenen periodischen Strukturen

(d) Dispersion in periodischen Strukturen

(e) Beispiel eines Speicherring-Beschleunigers

## 7. Störungen in der Strahldynamik

(a) Quadrupol-Feldstörungen, Resonanzen,  
Stoppbänder

(b) Chromatische Effekte in Kreisbeschleunigern

## 8. Beschleunigung geladener Teilchen

(a) Longitudinale Teilchenbewegung

(b) Longitudinaler Phasenraum

## 9. Synchrotron-Strahlung

(a) Physikalische Grundlagen

(b) Kohärente Abstrahlung

(c) Wiggler und Undulatoren

## 10. Teilchstrahlparameter

(a) Allgemeine Parameter (Energie, Zeitstruktur,  
Strom, Dimensionen)

(b) Dämpfung, Dämpfungspartitionen

(c) Teilchenverteilung im Phasenraum

(d) Strahlemittanz und Wiggler-Magnete

## 11. Strahllebensdauer

(a) Beiträge zur Strahllebensdauer

## 12. Kollektive Phänomene

(a) Linear Raumladungseffekte

(b) Strahl-Strahl-Effekte

(c) Wake-Felder (Kielwasser-Effekte)

(d) Strahlinstabilitäten

13. Strahlemittanz

- (a) Strahlemittanz in Speicherringen
- (b) Optimale Emittanz

14. Strahlkühlung

- (a) Strahltemperatur
- (b) Stochastische Kühlung
- (c) Elektronkühlung
- (d) Ionisationskühlung
- (e) Laserkühlung

15. Existierende, zukünftige und alternative Beschleunigerkonzepte

- (a) LEP, Tevatron, PEP-II, KEKB
- (b) LHC
- (c) Linear-Collider: NLC, Tesla, Clic
- (d) Myon-Beschleuniger
- (e) Neutrino-“Beschleuniger”
- (f) Free-Elektron-Laser
- (g) Laser/Teilchenstrahl-Plasma-Beschleuniger

## Einleitung, Motivation

- Untersuchung der Struktur der Materie: Auflösungsvermögen

⇒ Auflösungsvermögen  $\Delta x \leftrightarrow$  Wellenlänge  $\lambda$ :

$$\Delta x \sim \lambda/2$$

- Materiewellenpostulat von de Broglie (1926):

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}$$

⇒ höhere Impulse  $p \rightarrow$  kleinere Strukturen

- Teilchenbeschleuniger liefern Teilchen mit hohen Impulsen  
(i.A. Teilchenenergie; Nicht-relativistisch aber unterschiedlich)

- Beschleunigergrundprinzip: Energiegewinn  $\Delta E$   
beim Durchlaufen eines elektrischen Potentials:

$$\Delta E = e \cdot \Delta U$$

- Höhere Spannungsdifferenz  $\Delta U \rightarrow$  höhere Energie
- Praktische Grenzen: z.B. elektr. Überschläge, Entladung
- Prinzip anwendbar: elektr. geladene Teilchen mit genügend langer Lebensdauer  
(relativistische Effekte  $\rightarrow$  Beschleunigung kurzlebiger Teilchen, z.B. Myonen)

## Zusammenhang mit anderen Fachgebieten

- Elektro- und Magnetostatik bzw. Elektro- und Magnetodynamik  
d.h. konkrete Lösungen der Maxwell Gleichungen),
- Supraleitung,
- Hochfrequenztechnik,
- (elektromagnetische) Matrizenoptik,
- Resonanztheorie,
- Hamiltonsche Theorie,
- Vielteilchentheorie,
- Chaostheorie.

Unzweifelhaft ist die Physik der Teilchenbeschleuniger vor allem

**angewandte** Elektro- und Magnetodynamik!

## Einsatzgebiete für Beschleuniger

- Kernphysik
  - Elektron-/Proton-Beschleuniger
  - Ionen-Beschleuniger/-Collider
  - Gleichstrom-Teilchenstrahlen (“Stretcher”)
- Hochenergiephysik
  - “Fixed target”-Beschleuniger
  - Speicherring-Beschleuniger/-Collider
  - Linear-Beschleuniger
- Energieerzeugung
  - Inertial Fusion
  - Kernbrennstoffbrüten
  - Fissionsreaktor
- Industrie
  - Radiographie mit Röntgenstrahlen
  - Ionen-Implantation
  - Isotopen-Herstellung/-Trennung
  - Material-Untersuchungen
  - Nahrungsmittel-Sterilisation
  - Elektronen-/Röntgenstrahl-Lithographie
- Synchrotron-Strahlung
  - Grundlegende Atom- und Molekülphysik
  - Festkörperphysik
  - Geowissenschaften
  - Materialwissenschaften
  - Chemie
  - Molekular- und Zell-Biologie
  - Oberflächen-/Grenzflächenphysik
- Kohärente Strahlung
  - Freie-Elektronen-Laser (FEL)
  - Mikroproben
  - Holographie
- Medizin
  - Radiotherapie
  - Digitale Subtraktions-Angiographie
  - minimal invasive Behandlungen mit abstimmbaren FELs

## Höchstenergie-Teilchenbeschleuniger

☐ **viele** Beschleuniger an Forschungslabors. Einige der höchstenergetischen sind:

**momentan laufend:** HERA, Tevatron

**bis vor Kurzem genutzt:** LEP, SLC

**in Bau:** LHC

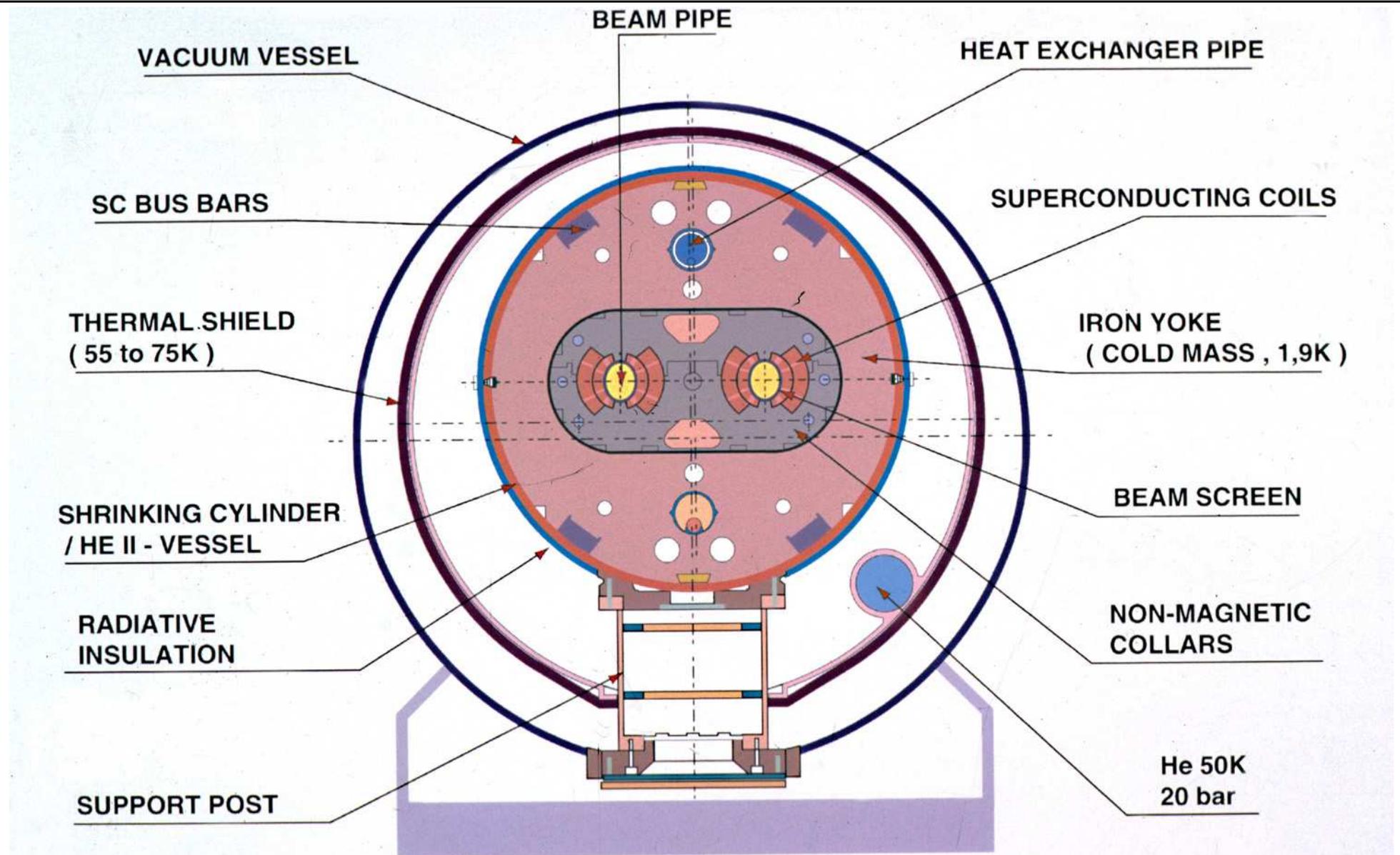
**in konkreter Planung:** NLC, Tesla







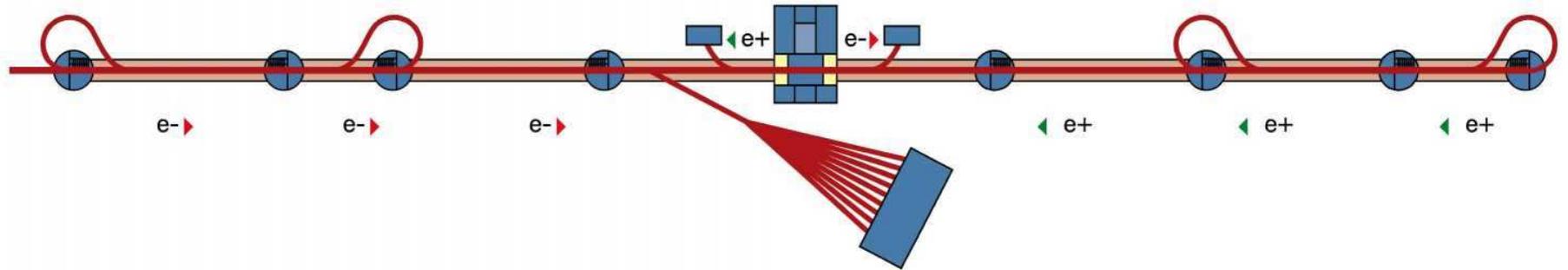




Cross Section of LHC Dipole

HE107

Aufsicht

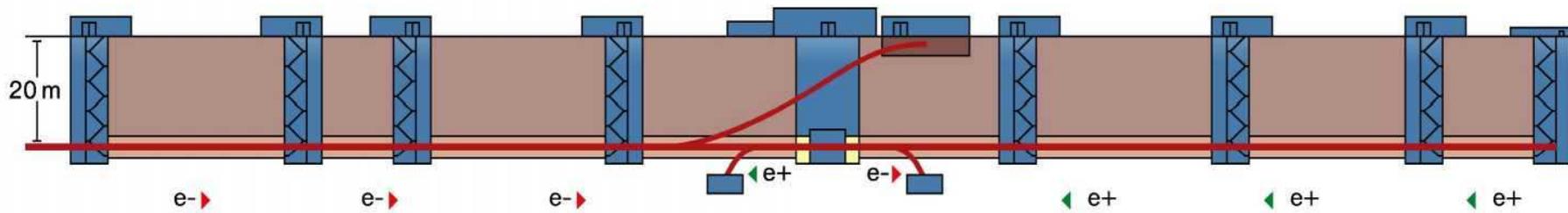


DESY Hamburg-Bahrenfeld

Ellerhoop

33 km

Westerhorn



Seitenansicht

Abbildung 6: Tesla-Beschleuniger (Elektron auf Positron)

## Historie

Die geschichtliche Entwicklung birgt drei Linien:

### 1. Gleichspannungsbeschleunigung

- Entdeckung der Teilchenstrahlung: **Kathodenstrahlen**, d.h. Elektronenstrahlen (Plücker 1858)
- . . . und **Kanalstrahlen** (Goldstein 1886): positive Ionenstrahlen
- atomphysikalische Untersuchungen:
  - Anregung von Luftmolekülen durch Kathodenstrahlen (Lenard 1894)
  - Anregung von Atomen durch Elektronbestrahlung: Franck-Hertz-Experiment (1913)
- Kernphysik: Spaltung von Lithium-Kernen durch Proton-Beschuss (Cockcroft und Walton 1932, u.a.)

### 2. *Resonante Beschleunigung*

### 3. *Strahlungstransformatoren*

Die erste Linie entsprang der “natürlichen Forschungsentwicklung”:

- ◇ Bedarf höherer Teilchenenergien und -impulse zur Klärung der Kernstruktur der Materie,
- ◇ v.a.: höher, als aus natürlichen radioaktiven Quellen.

Die zweite & dritte Linie:

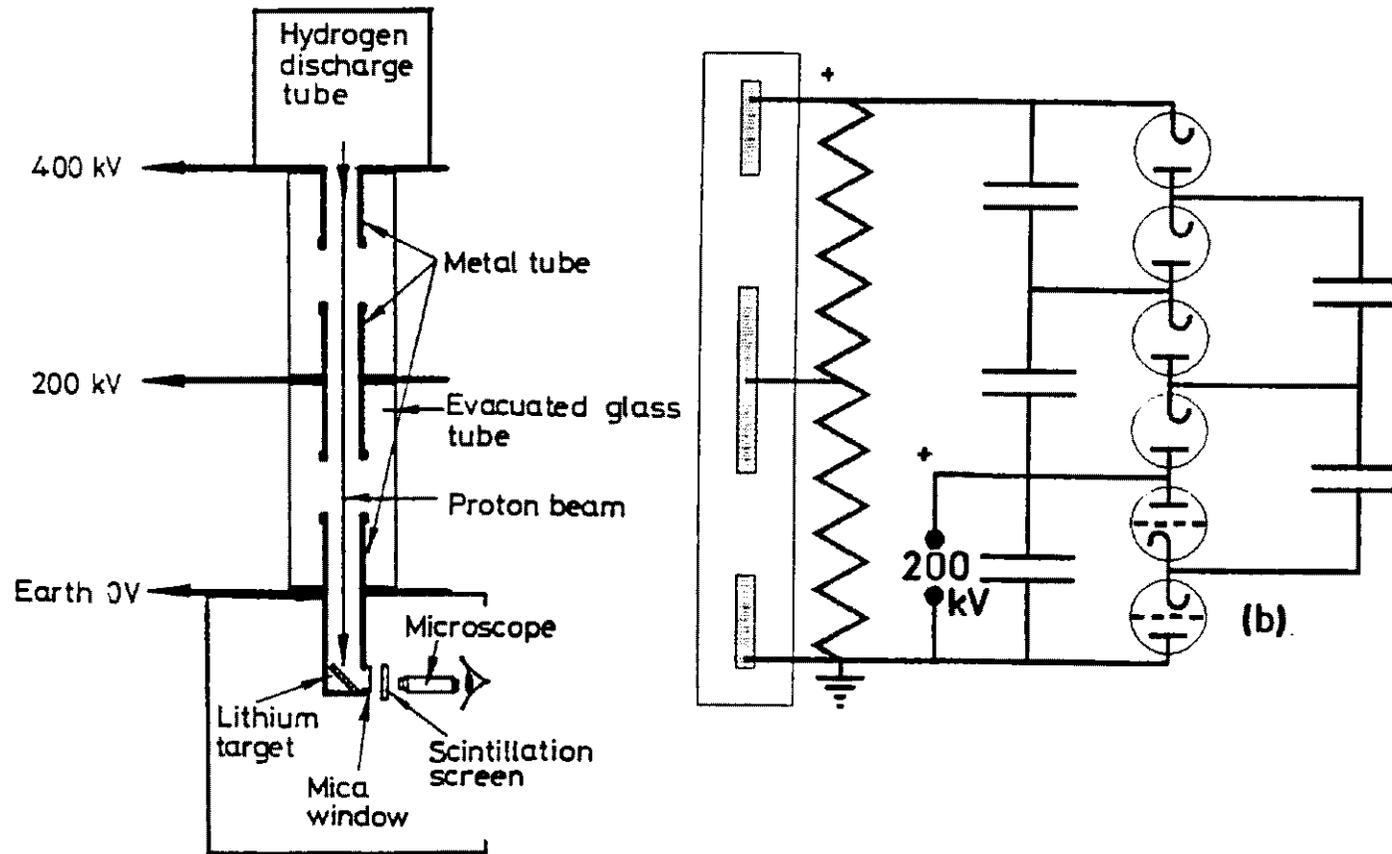
- ◇ anfangs eigenständige Beschleunigerentwicklungen,
- ◇ ersetzen erste Linie, nachdem dort praktikable Grenzen erreicht.

Tabelle 1: Hauptlinie der Beschleunigerentwicklung

1894	Lenard: Elektronstreuung an Gasmolekülen	Gasentladungsrohr <100 keV Elektronen
1913	Franck und Hertz: Anregung von Atomorbitalen durch Elektronenbeschuss	
1906	Rutherford: Streuung von $\alpha$ -Teilchen an Folien	natürliche radioaktive Quellen
1919	Rutherford: Nuklearreaktion induziert mit $\alpha$ -Teilchen	MeV-Energien für Kernstruktur-Untersuchungen vermutet
1928	Gurney und Gamov sagen Tunneleffekt für Kernreaktionen voraus	500 keV Energie könnten genügen
1928	Cockcroft&Walton entwerfen, ermutigt durch Rutherford, einen 800 kV Generator	
1932	Generator erreicht 700 kV, Cockcroft&Walton spalten Lithium-Kern mit 400 keV Protonen	

## Cockcroft-Walton-Beschleuniger

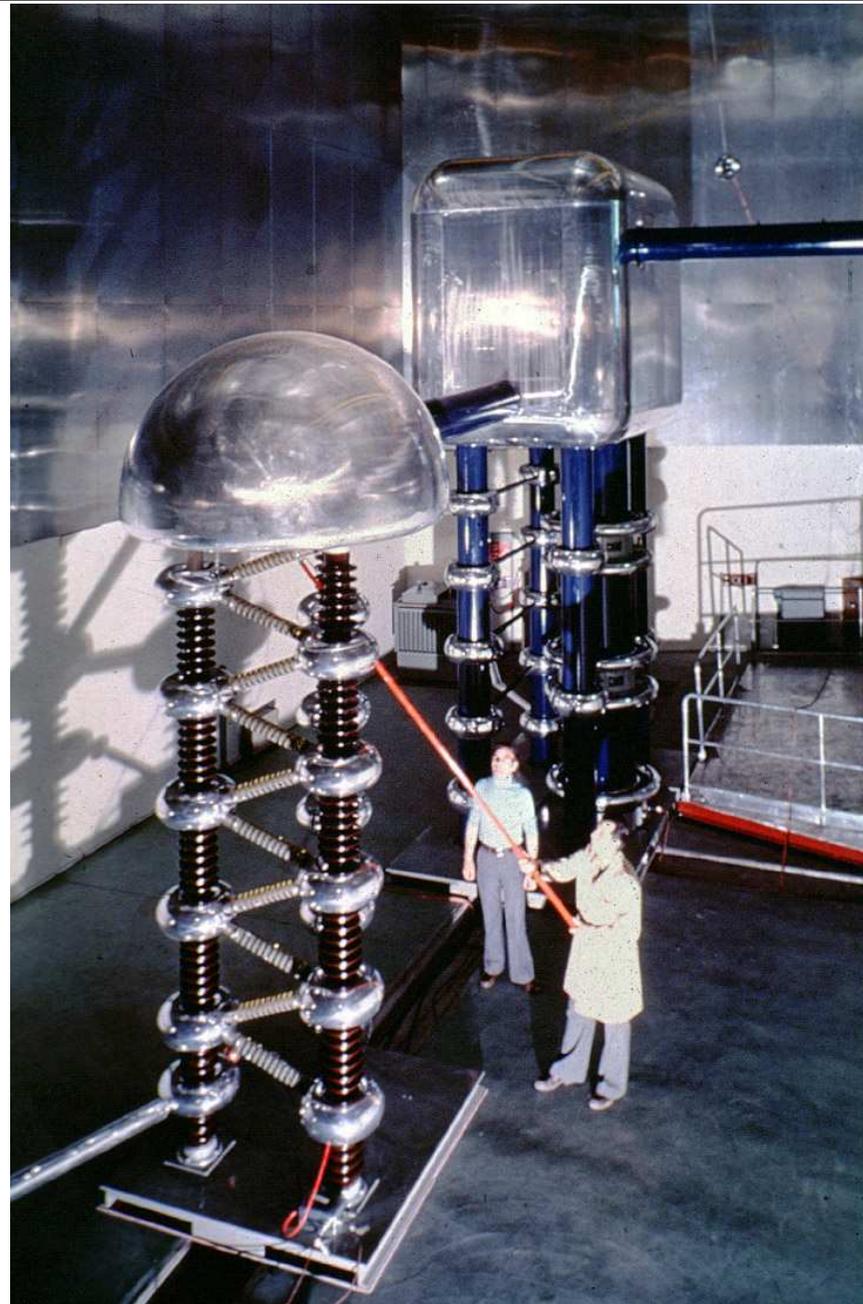
Skizze der Originalapparatur von Cockcroft&Walton:



- ▷ Protonen aus Entladungsrrohr (oberes Ende),
- ▷ Quelle auf 400 kV Potential,
- ▷ Protonen im Vakuumrohr beschleunigt . . .
- ▷ . . . auf Lithium-Target (Erdpotential, unteres Ende),
- ▷ Szintillationsschirm&Mikroskop: Beobachtung der Spaltprodukte auf  ${}^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$

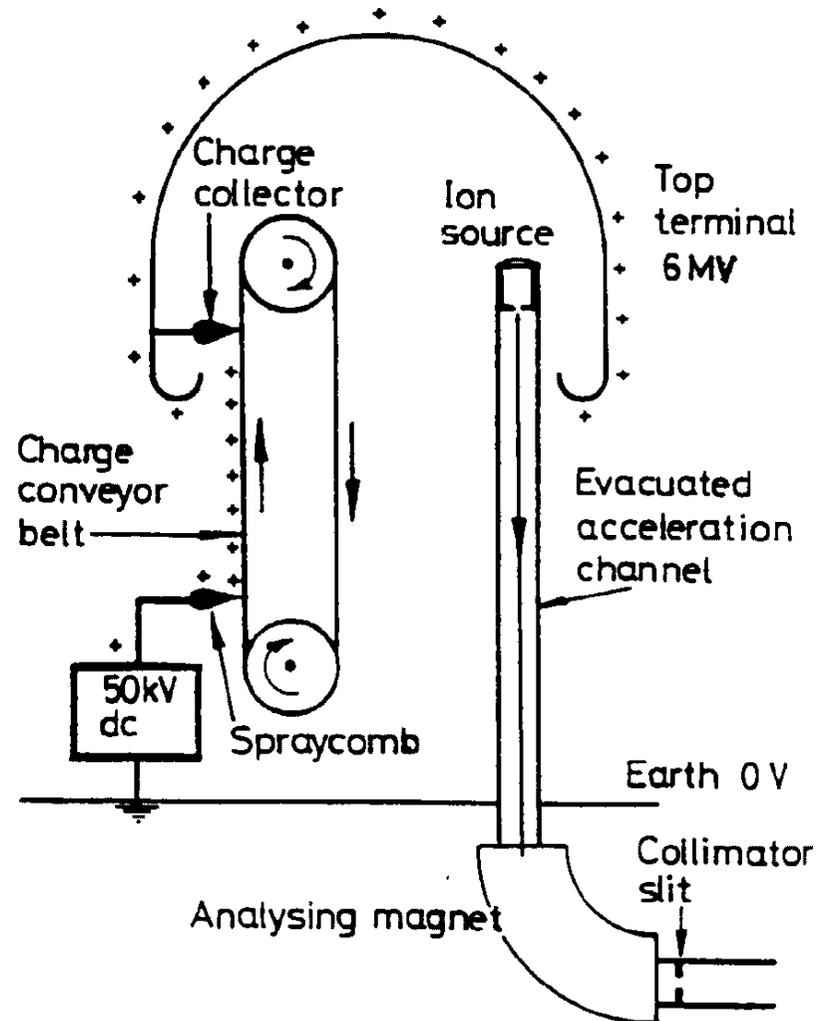
Cockcroft-Walton-Generator (auch: -Kaskade):

- ▷ Design für 800 kV
- ▷ erreichte Maximalspannung  $\sim 700$  kV (wg. HV-Entladungen)
- ▷ Heute als Eingangsbeschleuniger genutzt (hohe Strahlströme)



## van de Graaff-Generator

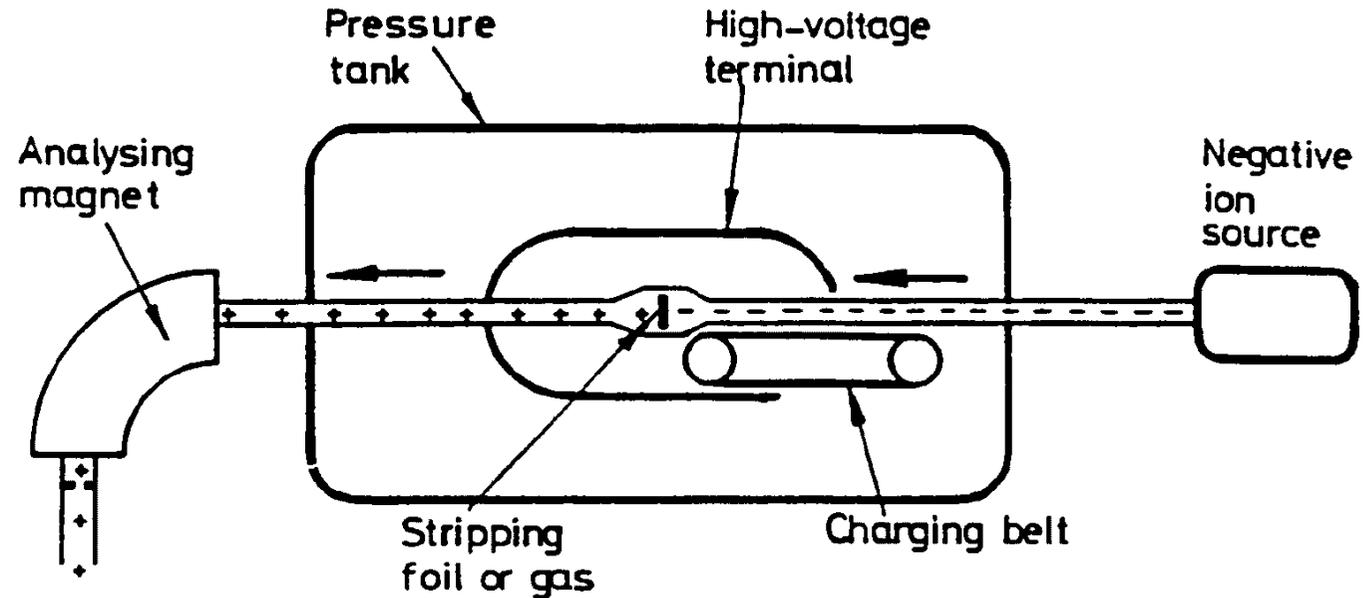
- ▷ Van de Graaff: elektrostatischen Generator (um 1932),
- ▷ Spannung von 1.5 MV,
- ▷ ab 1932 in (kern-)physikalischen Untersuchungen,
- ▷ Höhere Spannungen: van de Graaff-Generator in einem Drucktank (Gas mit hoher Durchschlagsfeldstärke, z.B. Schwefelhexafluorid SF<sub>6</sub>, bei Drücken von 9-10 bar)



## Tandem-van de Graaff-Beschleuniger

Weiterentwicklung: Tandem-Beschleuniger

- ▷ zunächst negativ geladene Ionen beschleunigt,
- ▷ im Zentrum positiv umgeladen (z.B. durch dünne (Stripper-)Folie),
- ▷ erneut volles elektrost. Potential zur Beschleunigung



Van de Graaff-Generatoren und Tandem-Beschleuniger:

- + Teilchenstrahlen mit sehr stabiler Energie,
- + sehr geringe Energiestreuung,
- jedoch geringere Strahlströme als Cockcroft-Walton-Kaskaden.



## Zweite Entwicklungslinie

- 1924 Ising schlägt zeitlich variierende Felder zwischen Driftröhren vor: Das Grundprinzip der *resonanten Beschleunigung*, mit dem Energien oberhalb der höchsten Spannung im System erreicht werden können.
- 1928 Wideröe demonstriert Isings Prinzip mit einem 1 MHz und 25 kV Oszillator bei der Erzeugung von 50 keV Kaliumionen.
- 1928 Lawrence erfindet, inspiriert durch Wideröe und Ising, das Zyklotron.
- 1931 Livingston demonstriert das Zyklotron durch Beschleunigung von Wasserstoffionen auf 80 keV.
- 1932 Lawrence erzeugt mit seinem Zyklotron Protonen mit 1.25 MeV und spaltet damit Atome nur wenige Wochen nach Cockcroft und Walton.

Unterschied zwischen Gleichspannungs- und resonanten Beschleunigern:

- Felder statisch (d.h. konservativ) oder
- Felder zeitabhängig (d.h. nicht-konservativ)

Materiefreie Maxwell-Gleichung für elektrisches Feld:

$$\vec{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial}{\partial t}\vec{A} \quad (*)$$

wobei

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$$

$\nabla\phi \hat{=}$  statische Felder in Cockcroft-Walton- und van de Graaff-Beschleunigern.

Teilchen gewinnt gemäß Potentialdifferenz Energie auf Weg von (1) nach (2).

Nach Rückkehr zu (1) aber zurück auf Anfangspotential, d.h. kein Energiegewinn auf geschlossenen Wegen!

(Mit Stokesschem Satz:

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_a \nabla \times \vec{E} \cdot d\vec{a} = \int_a \nabla \times (\nabla\phi) \cdot d\vec{a} = \int_a \text{rot grad } \phi \cdot d\vec{a} = 0 )$$

- Zeitabhängige Felder in (\*):

$$\partial \vec{A} / \partial t$$

- mit  $\vec{B}$  → Faradaysches Gesetz:

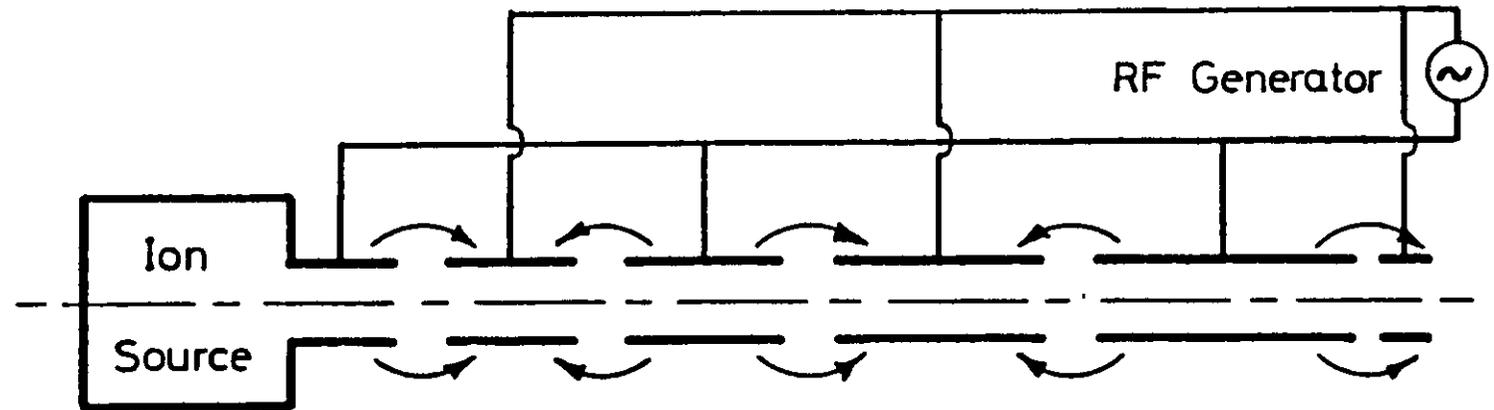
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}$$

⇒ Magnetfeldänderungen ↔ elektrisches Feld

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{2. \text{ Linie: } } \vec{B} = \text{const. \& } \vec{E}(t) \leftrightarrow \text{Beschleunigung (Ising)} \\ \mathbf{3. \text{ Linie: } } \partial \vec{B} / \partial t \equiv \dot{\vec{B}} = -\text{rot} \vec{E} \leftrightarrow \text{Beschleunigung (Betatron)} \end{array} \right.$$

## Isings und Wideröes Linearbeschleuniger

- ▷ lineare Kette von leitenden Driftröhren,
- ▷ an Hochfrequenz angeschlossen,
- ▷ Teilchen entlang Längsachse,



- ▷ Hochfrequenz synchron zum Teilchenflug:  
Teilchen zwischen Driftröhren, wenn beschleunigendes  $\vec{E}$ -Feld, sonst im feldfreien Raum einer Driftröhre
- ▷ Driftröhrenlänge wächst mit Teilchengeschwindigkeit

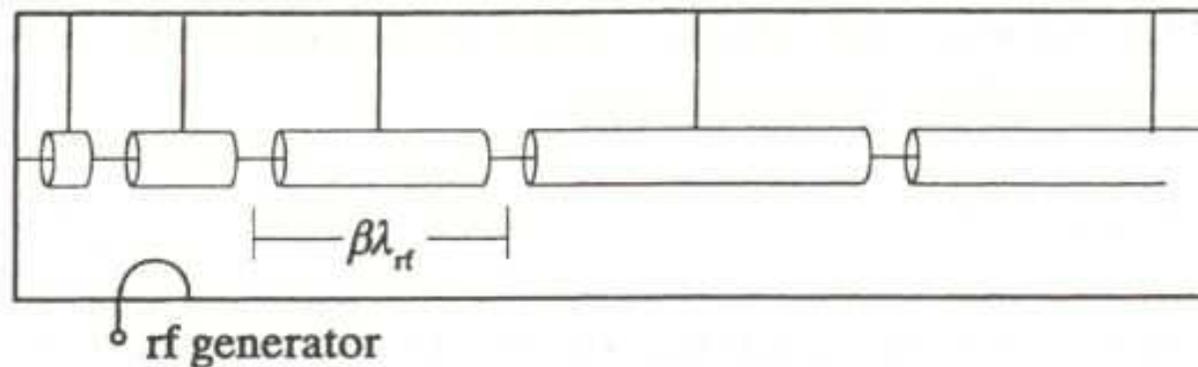
Wideröe hat 1928 den ersten funktionierende Beschleuniger nach Isings Vorschlag gebaut.

Offene Wideröe-Struktur:

- bei niedrigen Frequenzen → unhandlichen Driftröhlängen,
- bei hohen Frequenzen → starke HF-Leistungsverluste.

⇒ Alvarez-Struktur:

- Driftröhren in einer Struktur eingeschlossen,
- bilden Resonator für die eingekoppelte HF (Cavity).



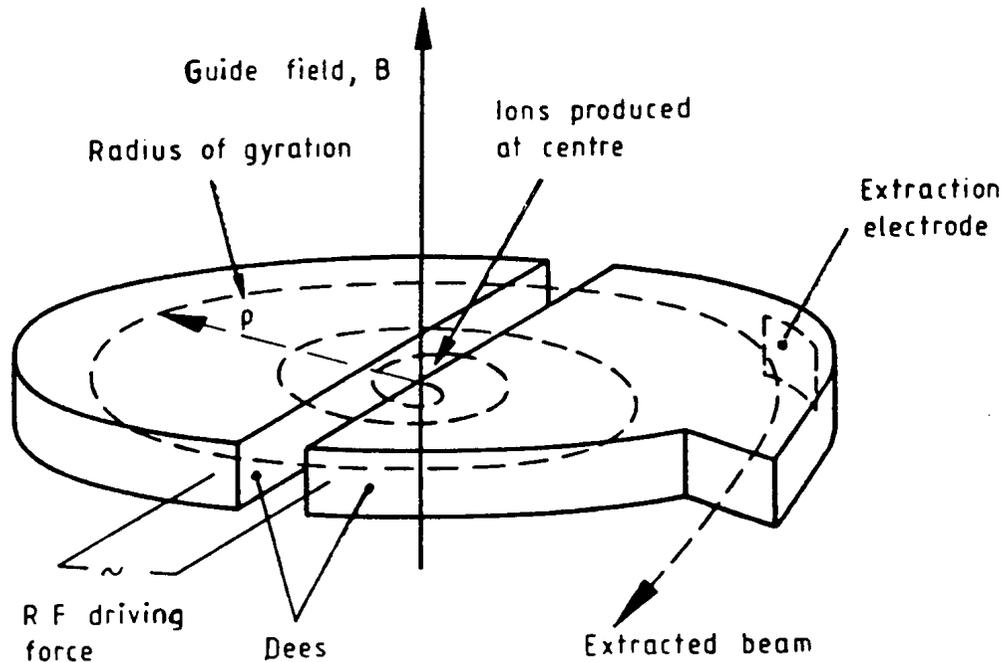
**Fig. 2.6.** Alvarez linac structure (schematic)

→ Heutige Hochenergiebeschleuniger (kreisförmig oder linear) nutzen dieses Prinzip!  
(HF-Frequenzen bis in den GHz-Bereich)

## Zyklotrons

Linearbeschleunigerstruktur (engl. Linear Accelerator, kurz Linac) technisch schwierig

→ Entwicklung einfacher realisierbarer Zyklotrons mit konstanter Frequenz durch Lawrence 1929 :

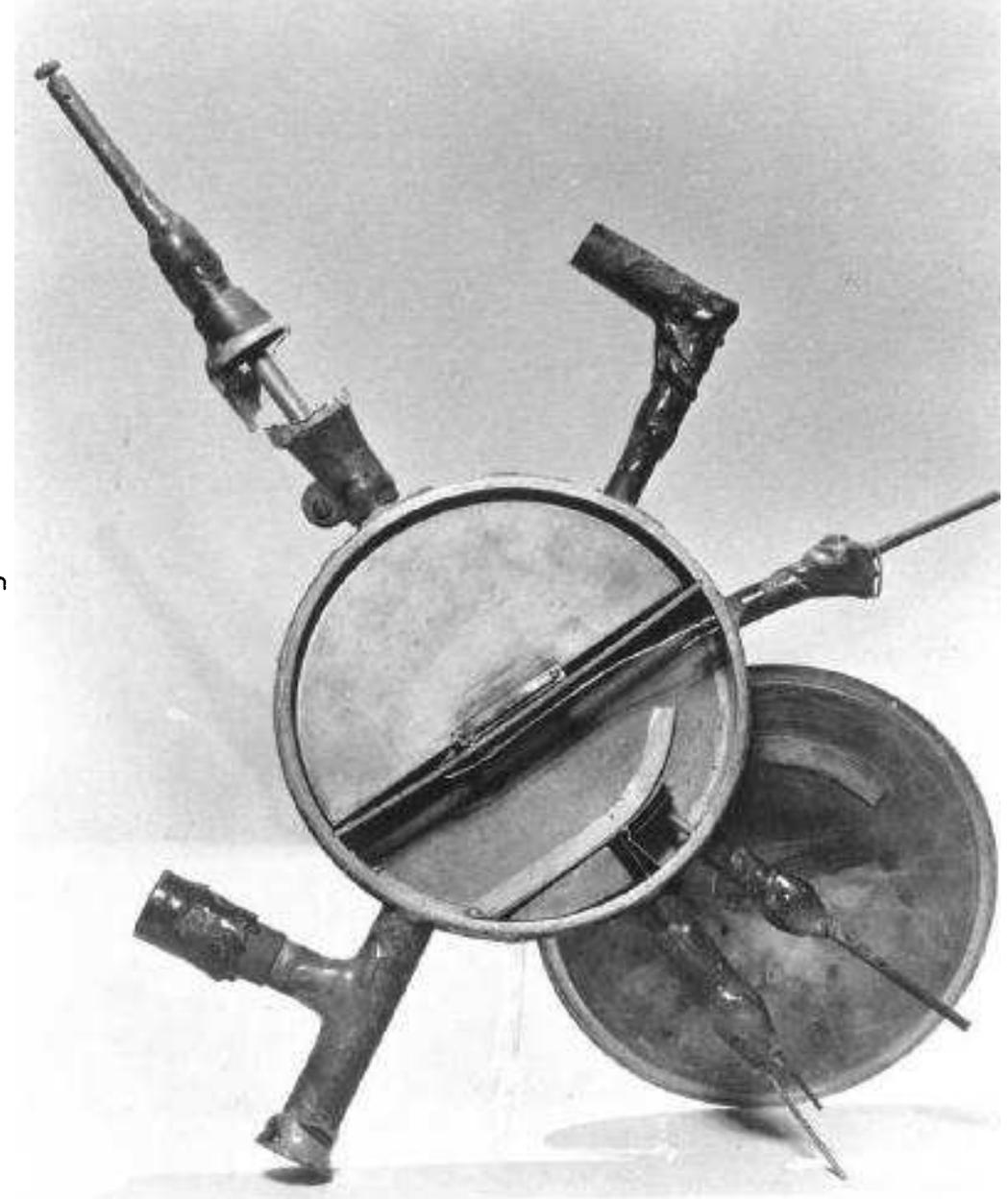
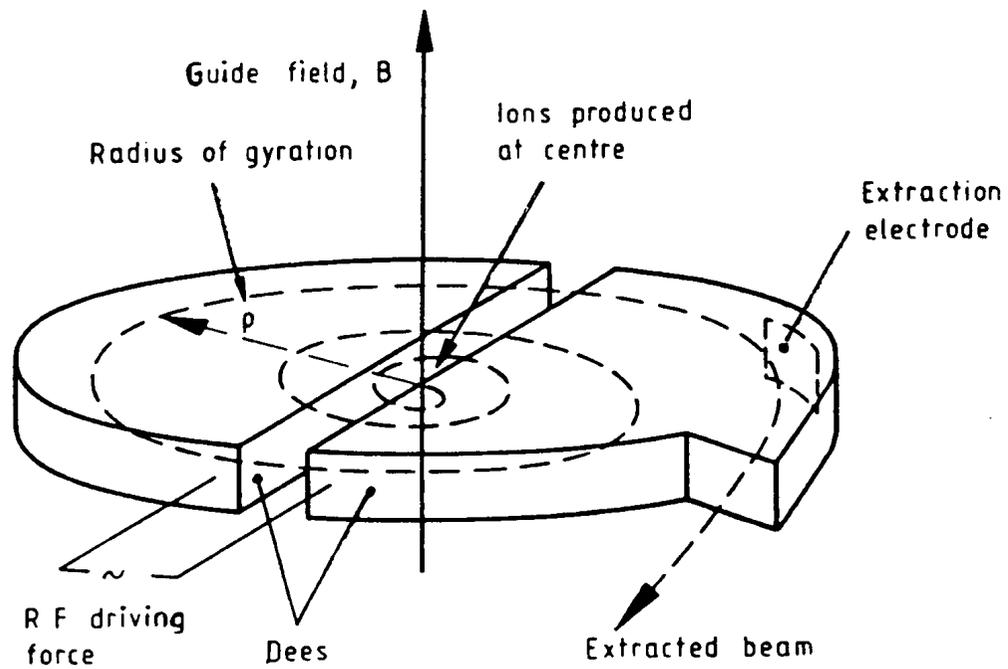


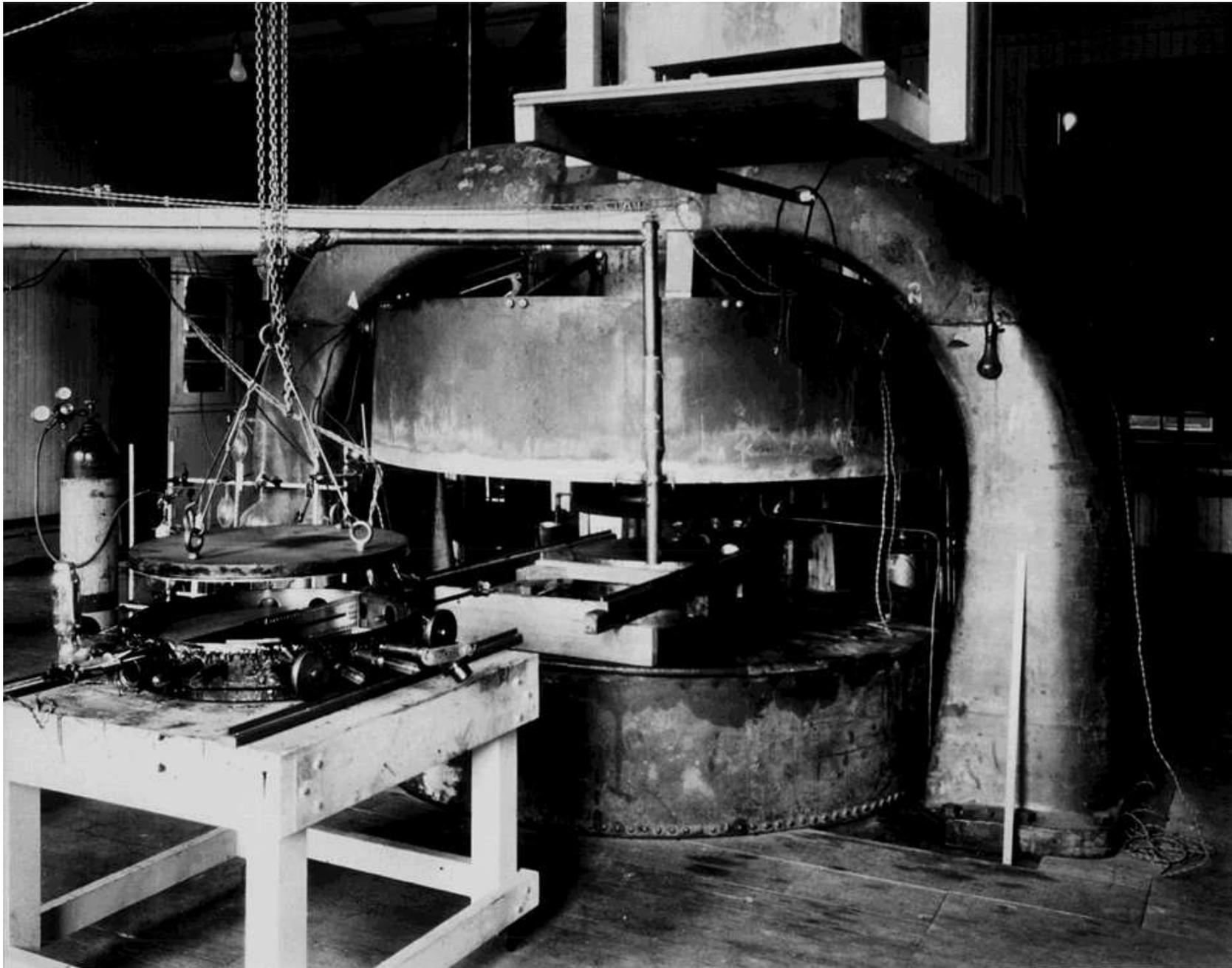
- Livingston: 80 keV Wasserstoff-Ionenstrahl-Zyklotron (1931)
- Lawrence: 1.25 MeV Protonen-Zyklotron (1932, s. Abb.)
- 1939: 20 MeV Protonen aus  $\varnothing$  160 cm Zyklotron (Uni of California)  
( $\approx 2 \times$  höchste Energie aus  $\alpha$ -Zerfall)

- Relativistische Effekte limitierten maximale Energie,

⇒ Synchro- und Isochron-Zyklotrons (variable Frequenz bzw. Magnetfeld)

- heutigen Kreisbeschleuniger: Synchrotron-Prinzip (s.u.)





## Dritte Entwicklungslinie

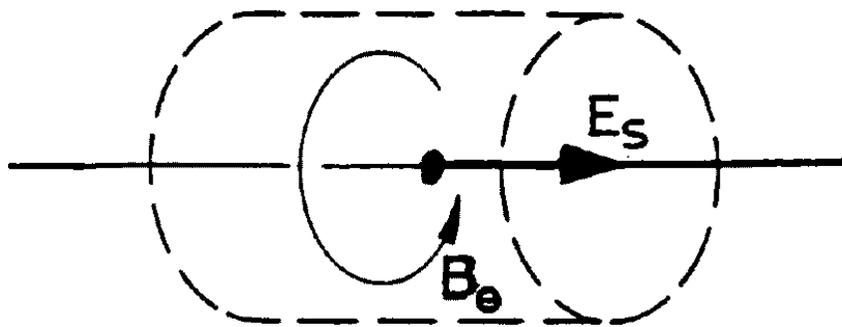
- 1923 Wideröe entwirft & skizziert als Student in seinem Laborbuch das Betatron mit der "1:2"-Regel und fügt 2 Jahre später die radiale Stabilitätsbedingung hinzu (aber er veröffentlicht nicht!),
- 1927 in Aachen baut Wideröe ein Betatronmodell, das nicht funktioniert; Er wendet sich daraufhin Linearbeschleunigern zu,
- 1940 Kerst erfindet das Betatron neu und baut ein lauffähiges 2.2 MeV Elektron-Betatron,
- 1950 Kerst baut das weltgrößte Elektron-Betatron (300 MeV).

Zwei Anwendungsmöglichkeiten des Faradayschen Gesetzes

$$\nabla \times \vec{E} = \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} = \dot{\vec{B}}$$

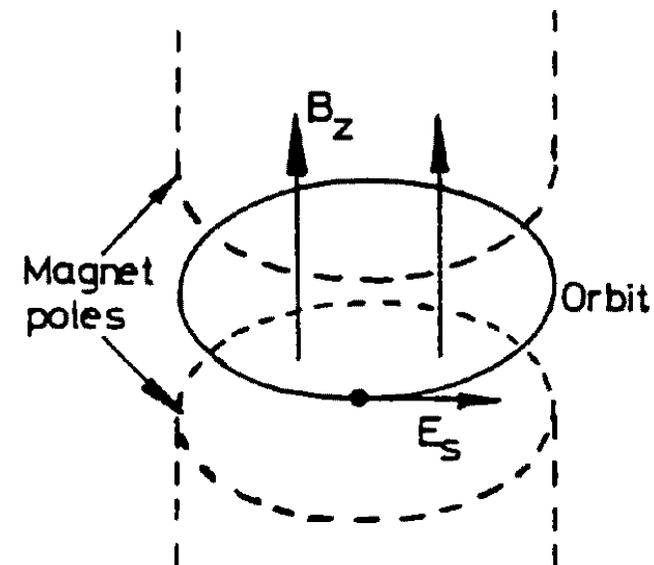
wurden angesprochen (s. Folie 1.27):

- Linearbeschleunigung in Cavities (Ising)



- zirkulares, zeitlich variierendes  $\vec{B}$ -Feld  
→ axiales, beschleunigendes  $\vec{E}$ -Feld

- Zirkularbeschleunigung (Betatron)



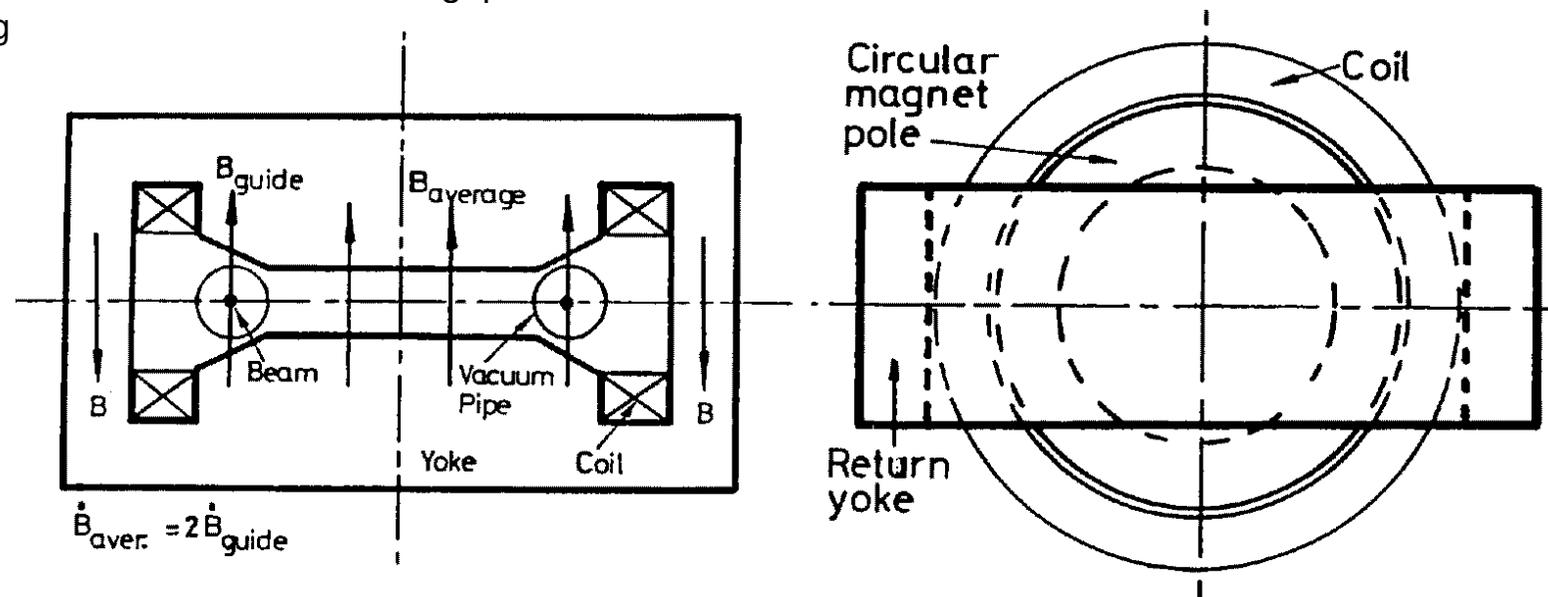
- axiales, zeitlich variierendes  $\vec{B}$ -Feld  
→ zirkulares, beschleunigendes  $\vec{E}$ -Feld

Wideröes Vorschlag: Zirkulare Beschleunigung durch "Strahlungstransformator" bzw. Betatron

## Betatron

Prinzip:

- Teilchenstrom  $\hat{=}$  Sekundärspule in Transformator
- Stabiler Orbit des Teilchenstroms durch angepasste  $\vec{B}$ -Feldzunahme  
→ 1:2-Bedingung



- + Unabhängigkeit von relativistischen Effekten  
→ geeignet für Elektronenbeschleunigung
- + Einfaches, robustes, kostengünstiges Beschleunigungsprinzip  
→ z.B. Einsatz in Krankenhäusern)

- + Fokussierung und Synchronisation der Strahlenergie allein durch Geometrie des Magneten bestimmt
- *Betatron-Oszillationen* der Teilchen um Soll-Orbit große Amplituden!

## Synchrotron-Beschleuniger

Bis 1940 wurden drei Beschleunigungsmechanismen vorgeführt:

- DC-Beschleunigung — HV-Überschläge&Entladungen
- Resonante Beschleunigung — Synchronität zwischen HF & relativist. Teilchen
- Betatron-Mechanismus — Betatron-Oszillationsamplitude

Alle besitzen bestimmte Vorzüge, aber auch Limitierungen in der erreichbaren Energie.

**1944** McMillan und Veksler entdecken das Prinzip der **Phasenstabilität** zwischen Teilchen und HF

**1944** Veksler erfindet das **Synchrotron** ( $R = \text{const.}$ ,  $\vec{B}(t)$ ) mit **schwacher Fokussierung**

(auch: "constant-gradient" Fokussierung)

**1950** Christofilos schlägt die **starke Fokussierung** vor

(auch: "alternating-gradient" (AG) Fokussierung, 1952 von Courant, Livingston, Snyder erstmals veröffentlicht)

Konzept:

- ▷ fokussierende und defokussierende Linsen im Abstand  $d$
- ▷ Brennweiten  $f \equiv f_F = -f_D$

⇒ Gesamtbrennweite  $F$ :

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_F} + \frac{1}{f_D} - \frac{d}{f_F \cdot f_D} = \frac{d}{f^2} \longrightarrow F = f^2/d > 0!$$

### Beispiele für Synchrotrons mit schwacher Fokussierung

1952 Cosmotron 3 GeV Protonen

1949 Elektronen

1955 Bevatron  $\approx 6$  GeV Protonen ( $\rightarrow$  Entdeckung des Antiprotons, ca. 10000 t Fe)

### Beispiele für Synchrotrons mit starker Fokussierung

1954 Cornell 1.1 GeV Elektronen

1954 AG-Synchrotron 1.1 GeV Elektronen (Cornell Uni)

1959 CERN PS (Proton Synchrotron) 26 GeV Protonen (ca. 3600 t Fe)

1972 CERN ISR (Proton-Proton-Collider  $2 \times 26$  GeV)

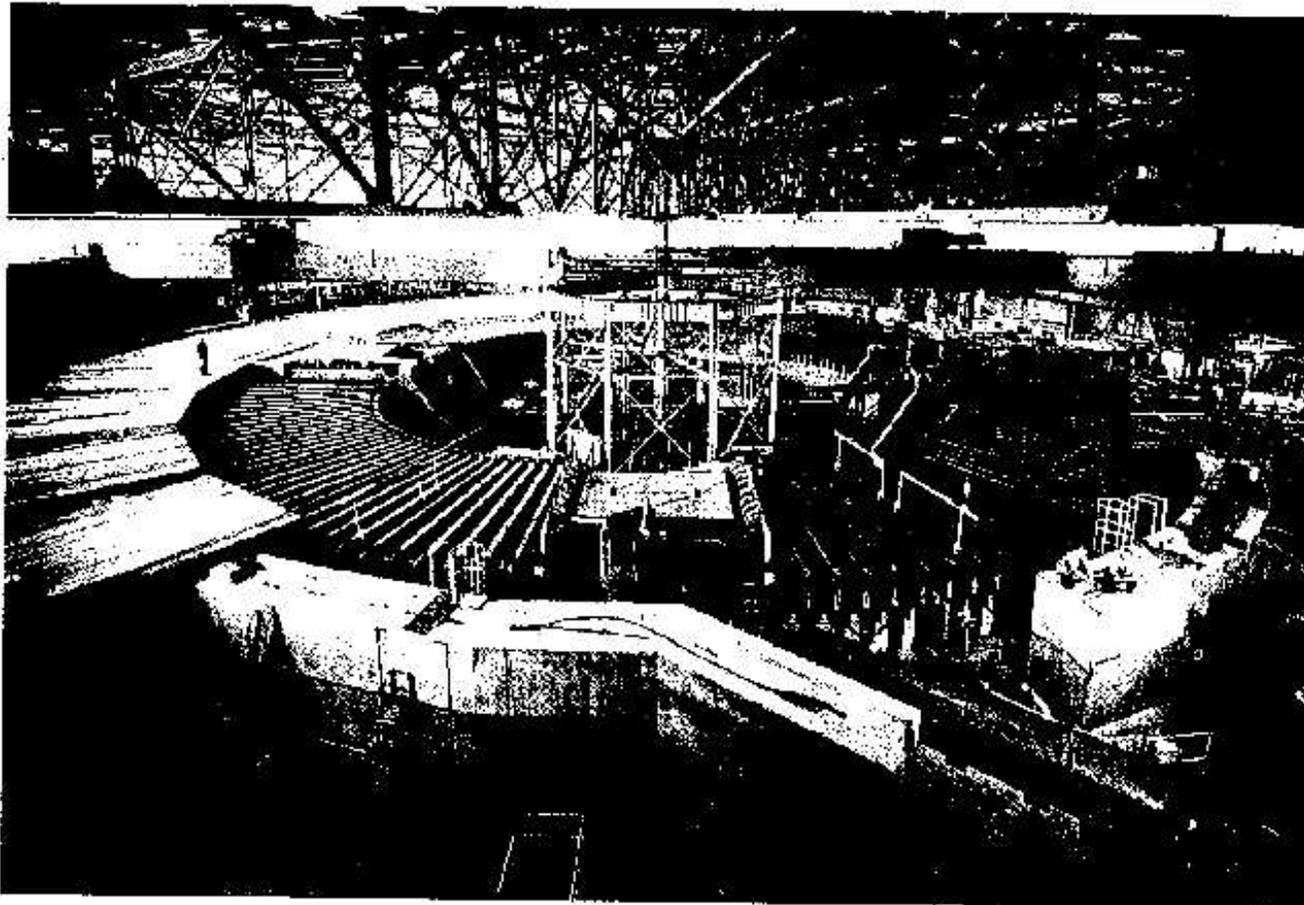
1981 CERN SPS (Proton-Antiproton-Collider bis  $2 \times 450$  GeV)

1987 FNAL Tevatron (Proton-Antiproton-Collider bis  $2 \times 900$  GeV)

1989 CERN LEP (Elektron-Positron-Collider bis  $2 \times 104$  GeV)

2002 FNAL Tevatron (Proton-Antiproton-Collider bis  $2 \times 1000$  GeV)

2007 CERN LHC (Proton-Proton-Collider bis  $2 \times 7000$  GeV)



**4.9** Das Bevatron, ein 6 GeV-Beschleuniger, wurde 1954 am Lawrence Berkeley-Laboratorium in Betrieb genommen. Mit diesem Beschleuniger wurde 1955 das Antiproton entdeckt; er war 1989 immer noch in Betrieb.

weitere (wichtige) Entwicklungen:

- Klystron-HF-Leistungsquelle → bis zu GHz, (Hansen und Gebrüder Varian, 1937)
- Stochastische Kühlung → Akkumulation von Antiprotonen, (van de Meer, 1972)
- Supraleitung für Magnete → höhere (Proton-)Strahlenergie, z.B. Tevatron, HERA
- Supraleitung für Cavities → größere (Elektron-)Beschleunigungsgradienten, z.B. LEP
- “Geographical Transition” → Beschleuniger auch unter Grundbesitz, der nicht zum Labor gehört, z.B. HERA, LEP
- Radiofrequenz-Quadrupol-Beschleuniger (RFQ) (Kapchinsky und Teplyakov, 1970)

## Livingston-Diagramm

- geht auf Livingston zurück,
- $\approx$  exponentielle Zunahme der Beschleunigerenergie mit der Zeit,
- getrennte, aber  $\approx$  parallele Entwicklungslinien für Proton- und Elektron-Beschleuniger,
- belegt erfolgreichen und kontinuierlichen Fortschritt in der Beschleuniger-Technik,
- Energie-“Sättigung” für heutige Zeit angedeutet.

⇒ Neue Beschleunigertechniken harren ihrer Entwicklung!

- Myon-Beschleuniger,
- Plasma-Beschleuniger,
- Laser-Beschleuniger,
- “Drive-beam”-Beschleuniger,
- ...

(NB: Neue Techniken zielen meist auf Steigerung der Beschleunigungs-Gradienten)

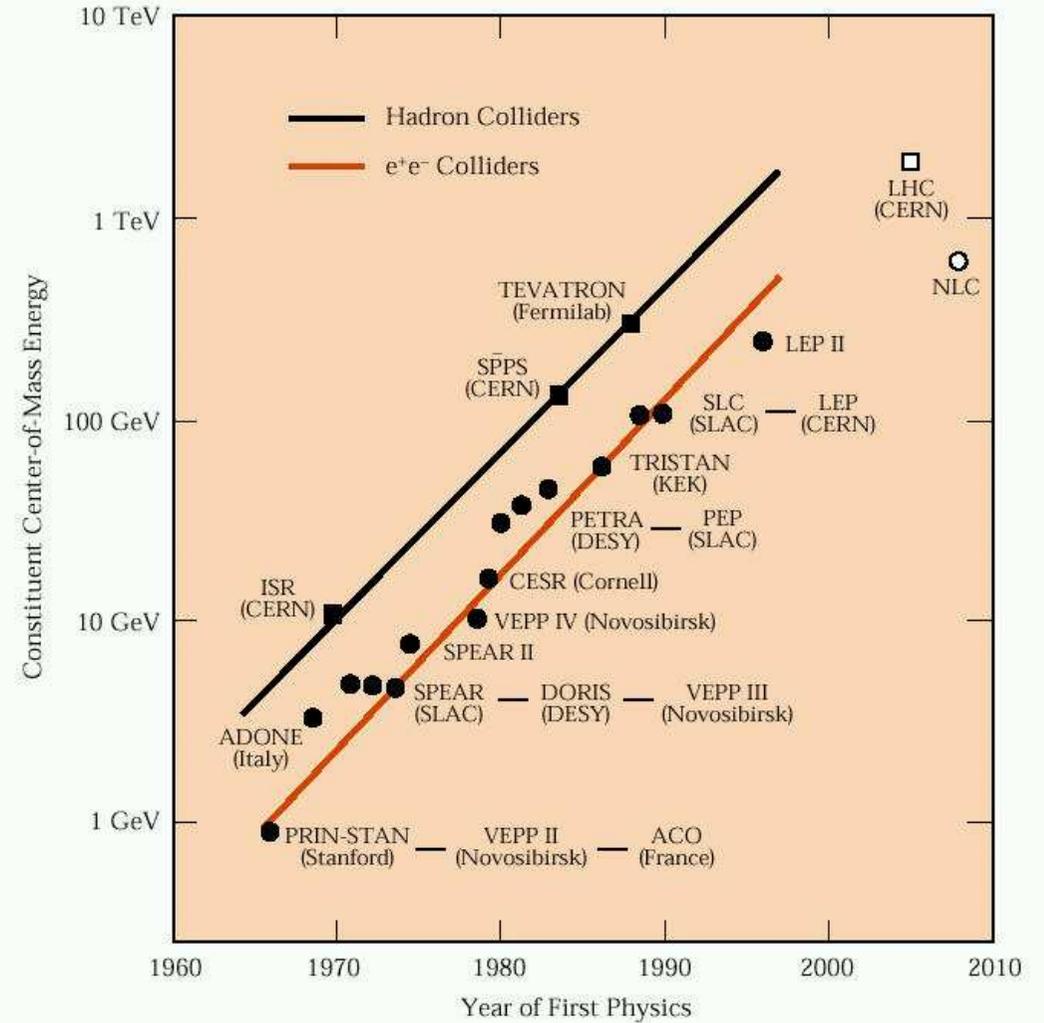
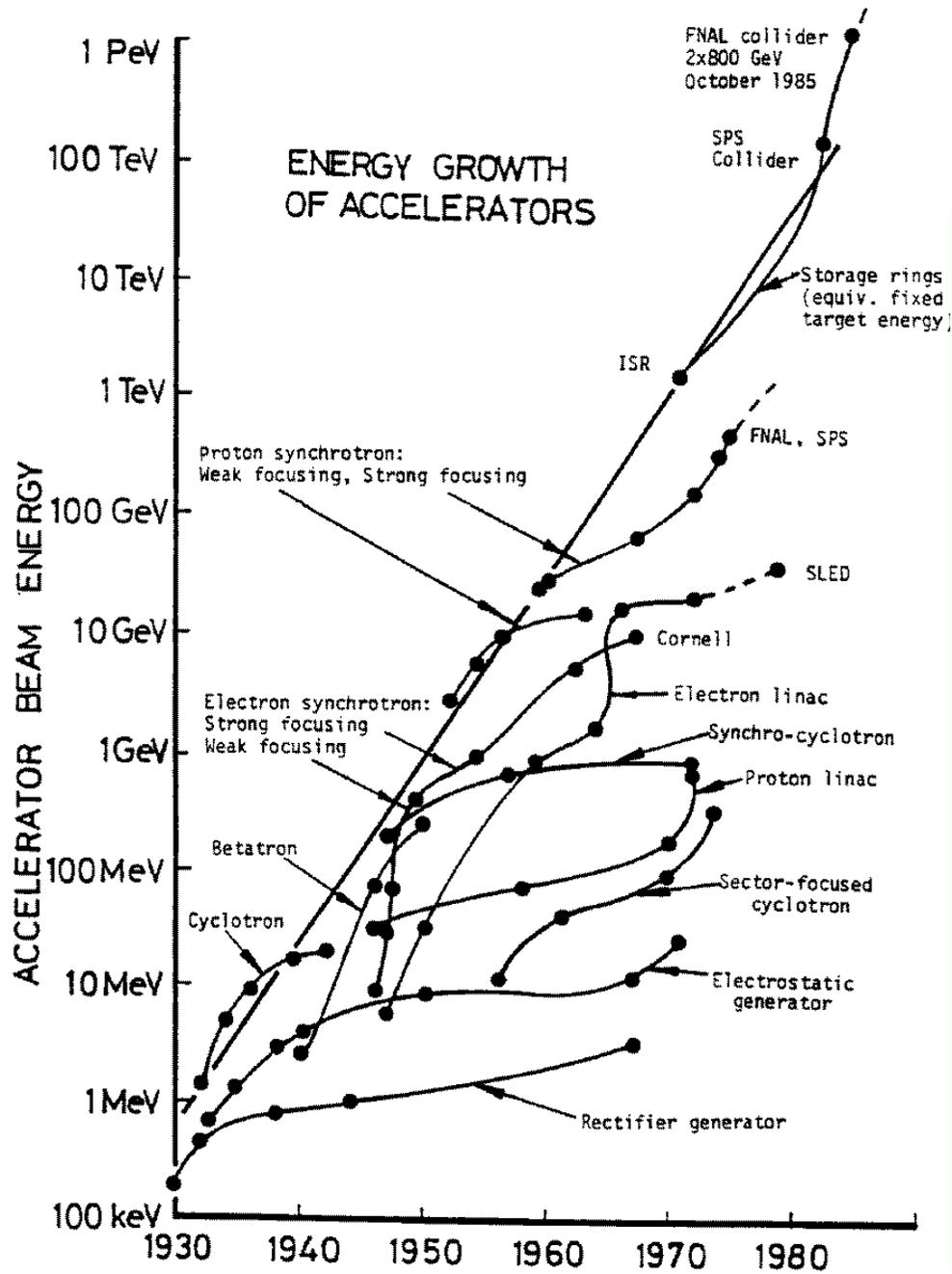


Abbildung 12: Livingston-Diagramm

## Elemente eines Beschleunigers

Grob umfasst ein Beschleuniger folgende Komponenten:

- Teilchenquelle
- Vorbeschleunigerstufe (häufig mit Teilchenquelle kombiniert)
- Injektor in (nächste) (Vor-)Beschleunigerstufe
- Ejektor aus (Vor-)Beschleuniger (für fixed-target Betrieb)

Höchstenergie-Beschleuniger benutzen meist mehrere ( $> 2$ ) Vorbeschleunigerstufen, z.B. für LEP: 4 Vorbeschleuniger + Hauptbeschleuniger

