

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_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 λ :

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

- 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 ΔE
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

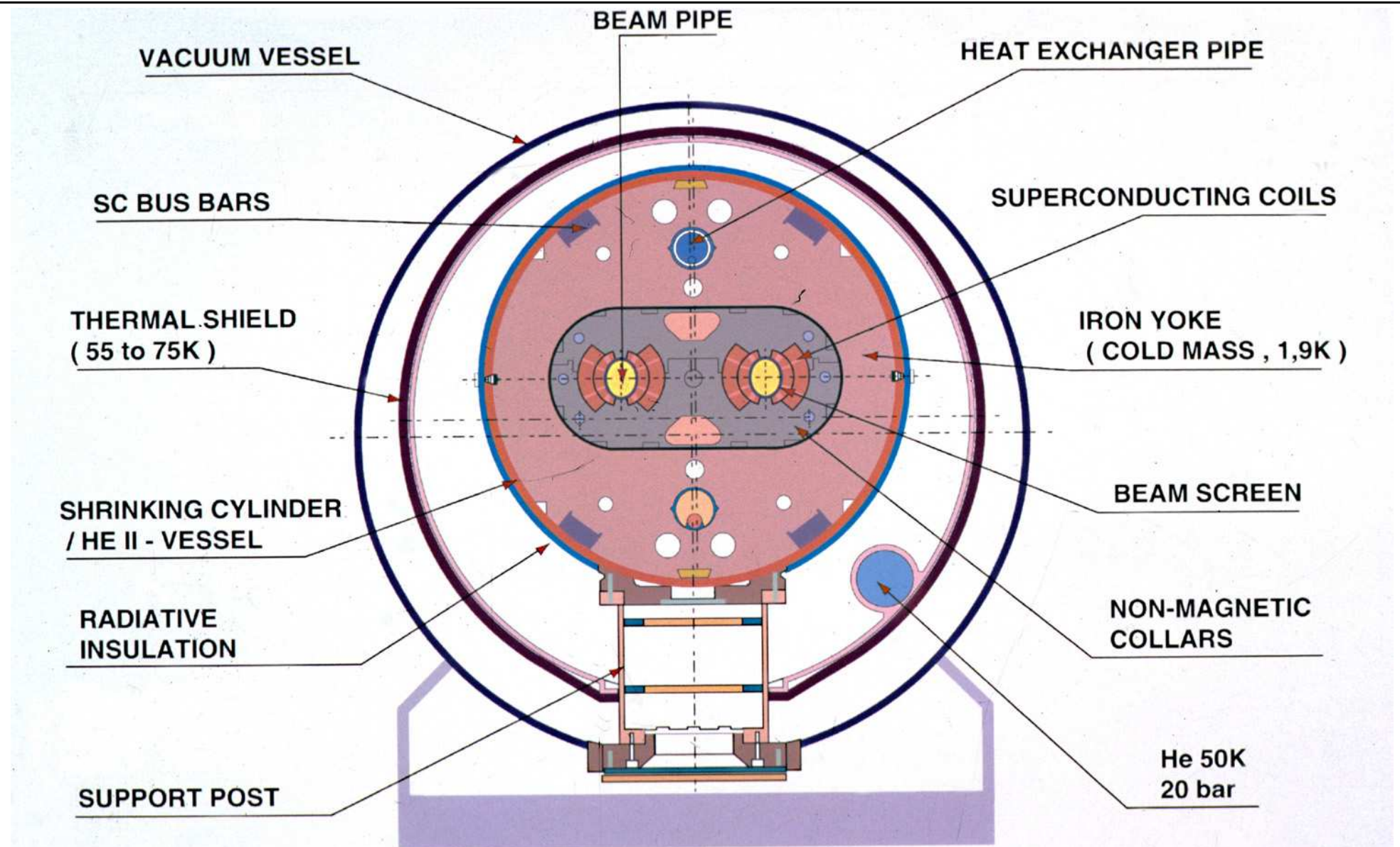
in konkreter Planung: NLC, Tesla







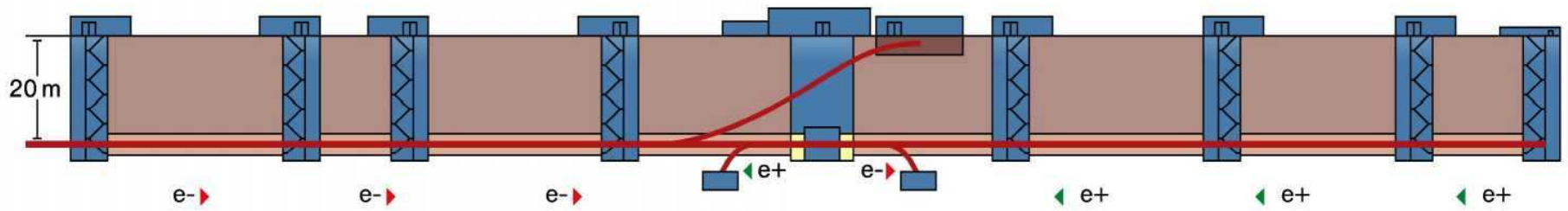
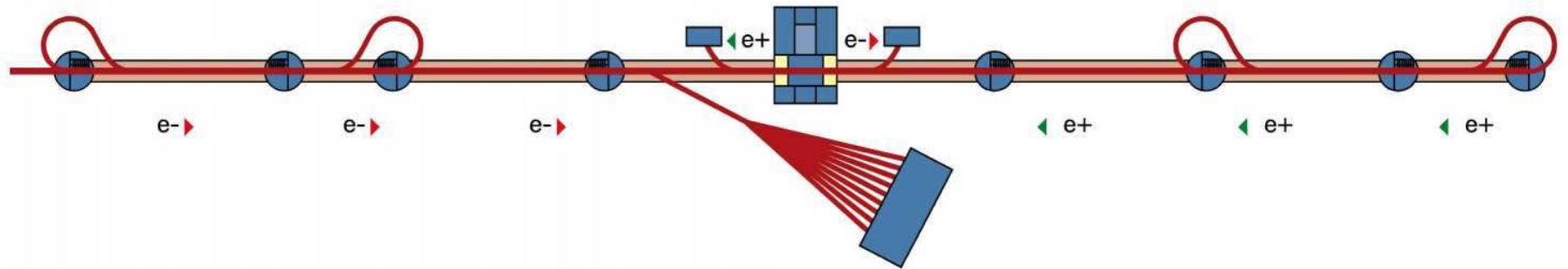




Cross Section of LHC Dipole

HE107

Aufsicht



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:

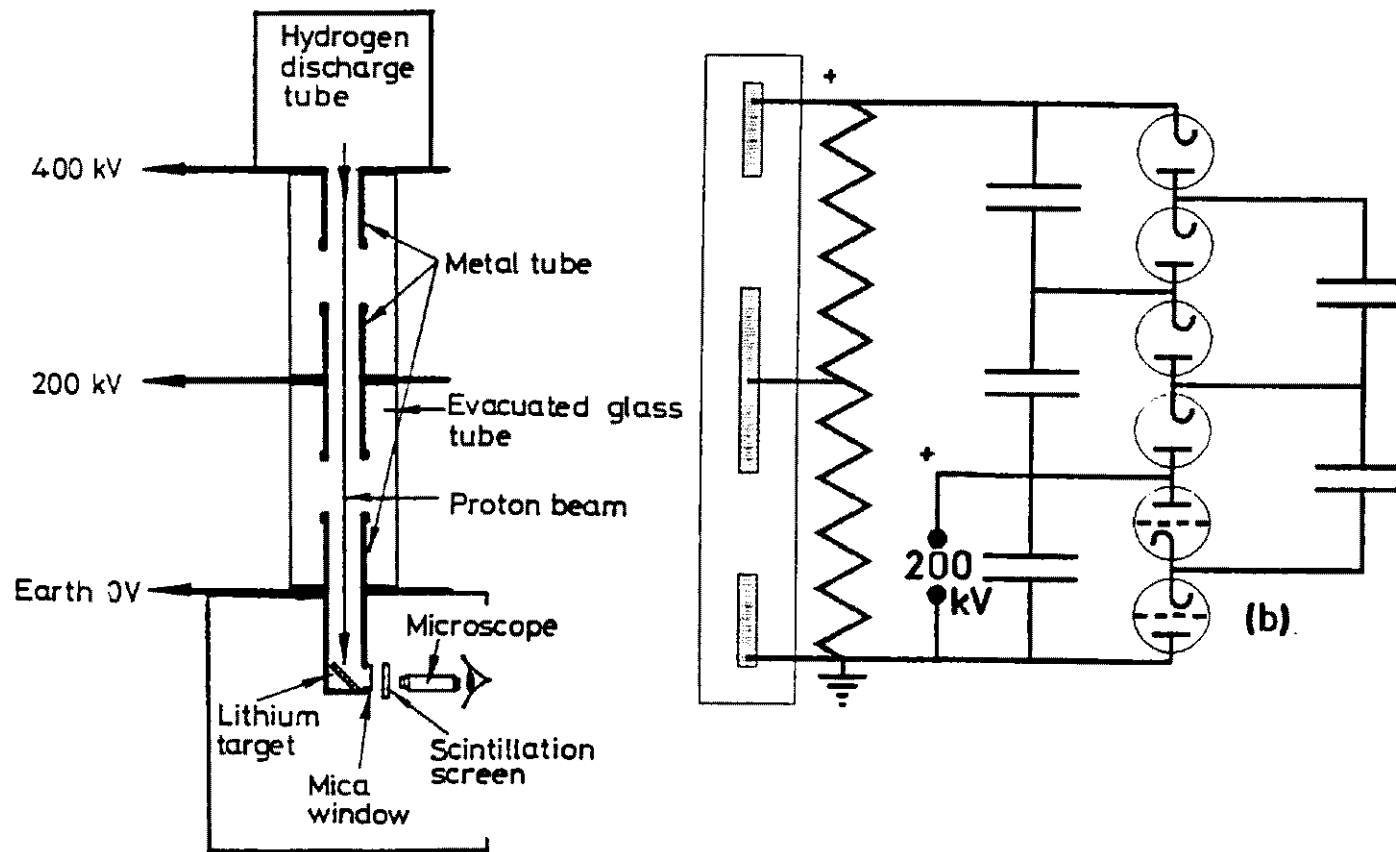
- ◇ anfangs eigenständige Beschleunigerentwicklungen,
- ◇ ersetzen erste Linie, nachdem dort praktikable Grenzen erreicht.

Tabelle 1: Hauptlinie der Beschleunigerentwicklung

1894	Lenard: Elektronstreuung an Gasmolekülen	Gasentladungsröhre < 100 keV Elektronen
1913	Franck und Hertz: Anregung von Atomorbitalen durch Elektronenbeschuss	
1906	Rutherford: Streuung von α -Teilchen an Folien	natürliche radioaktive Quellen
1919	Rutherford: Nuklearreaktion induziert mit α -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

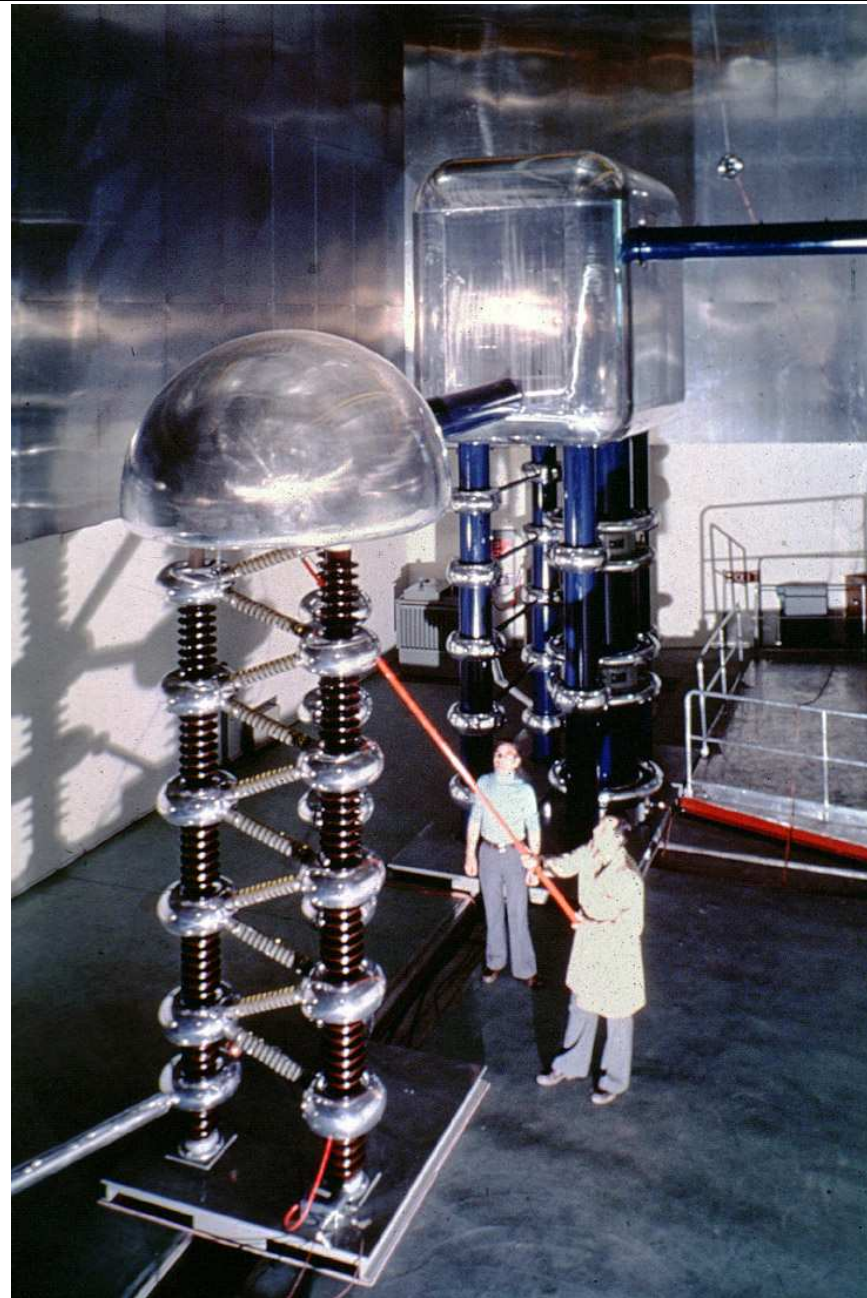
Skizze der Originalapparatur von Cockcroft&Walton:



- ▷ 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 ${}^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$

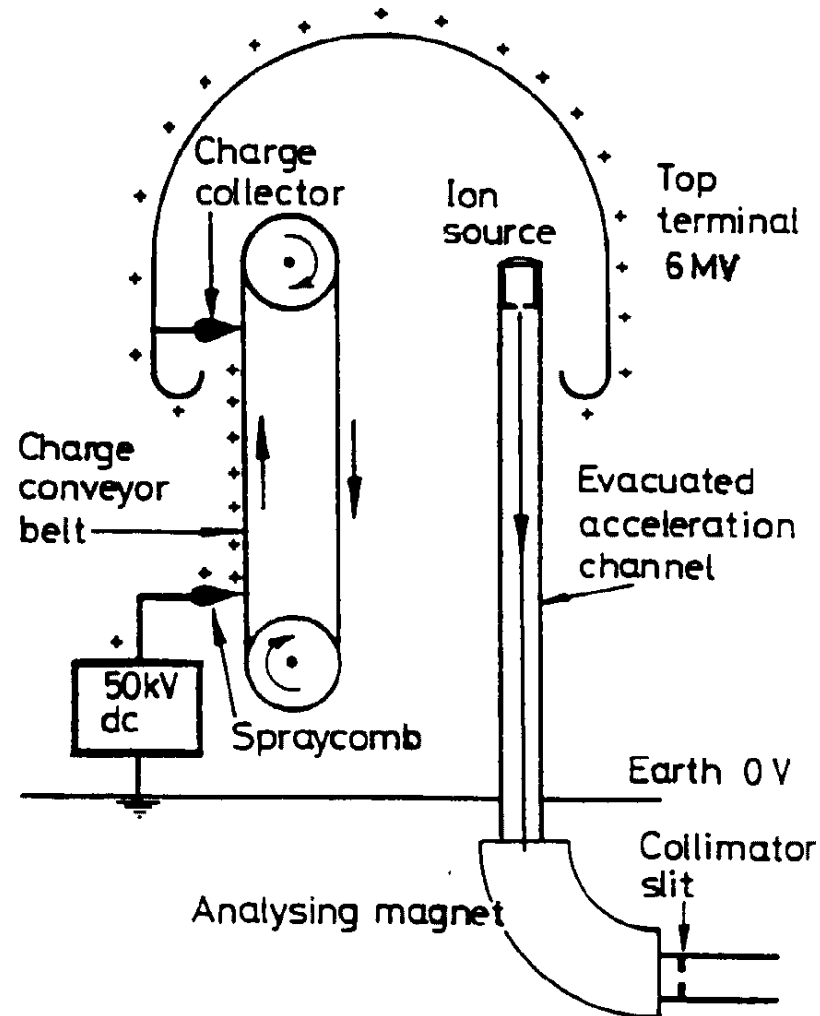
Cockcroft-Walton-Generator (auch: -Kaskade):

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



van de Graaff-Generator

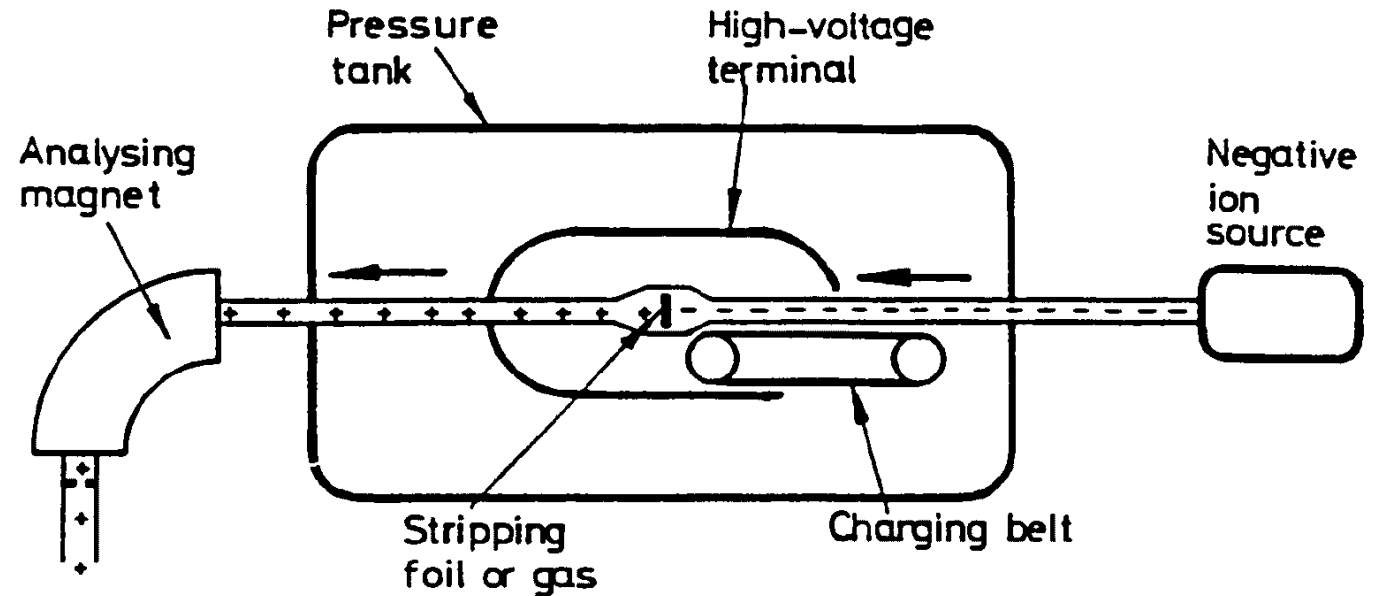
- ▷ Van de Graaff: elektrostatischen Generator (um 1932),
- ▷ Spannung von 1.5 MV,
- ▷ ab 1932 in (kern-)physikalischen Untersuchungen,
- ▷ Höhere Spannungen: van de Graaff-Generator in einem Drucktank (Gas mit hoher Durchschlagsfeldstärke, z.B. Schwefelhexafluorid SF₆, bei Drücken von 9-10 bar)



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 elektrostatisches 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 Wiederöe 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:

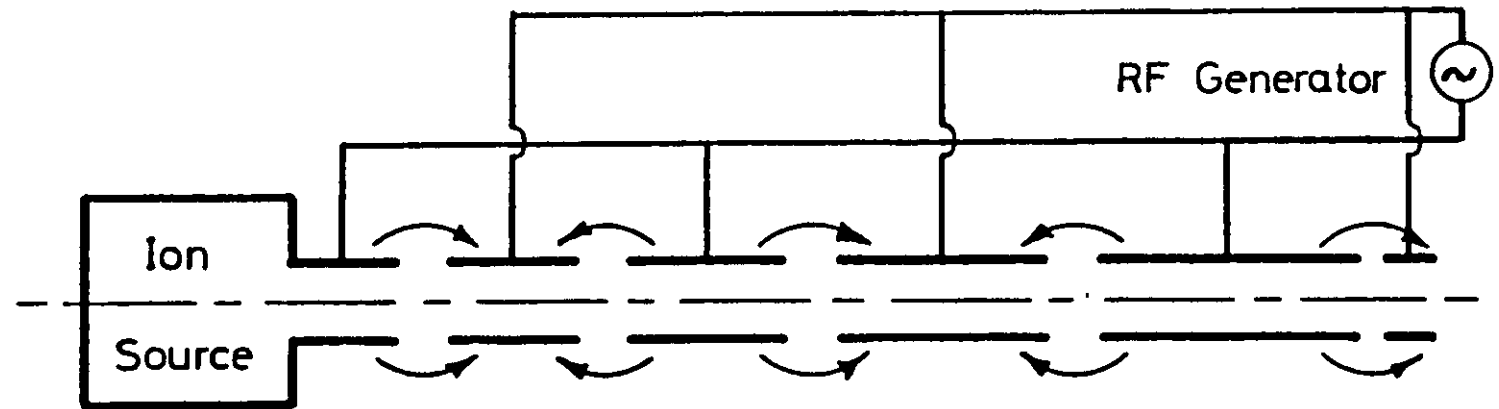
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}$$

⇒ 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-Leistungsverlusten.

⇒ Alvarez-Struktur:

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

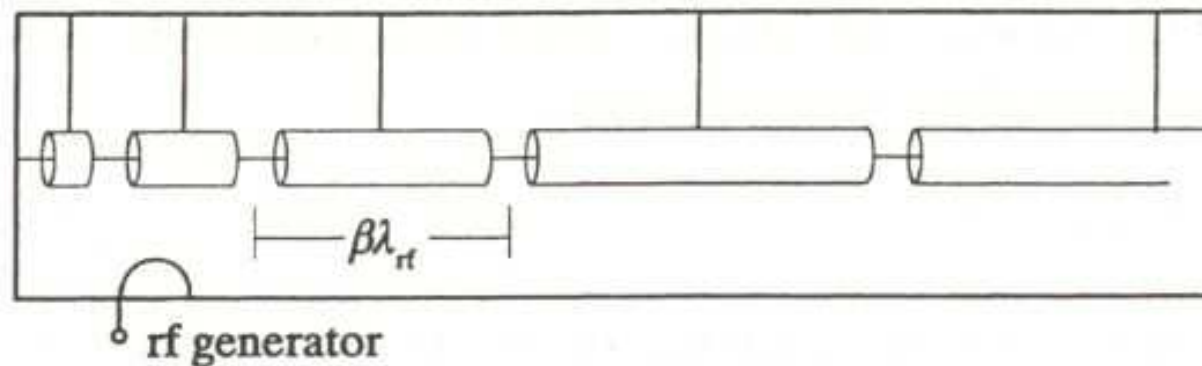


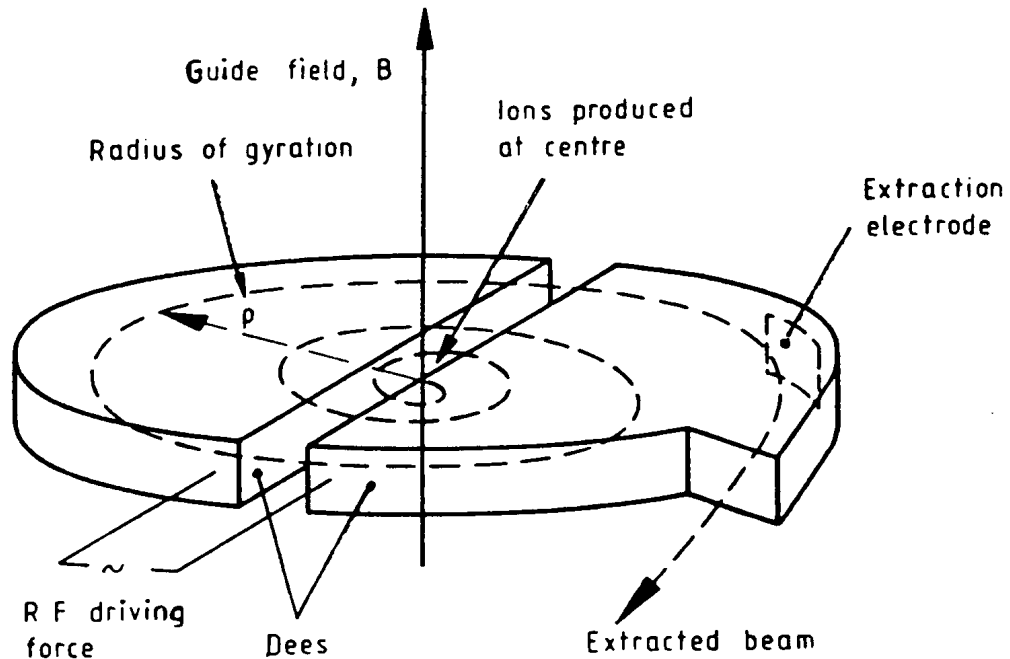
Fig. 2.6. Alvarez linac structure (schematic)

→ 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 :

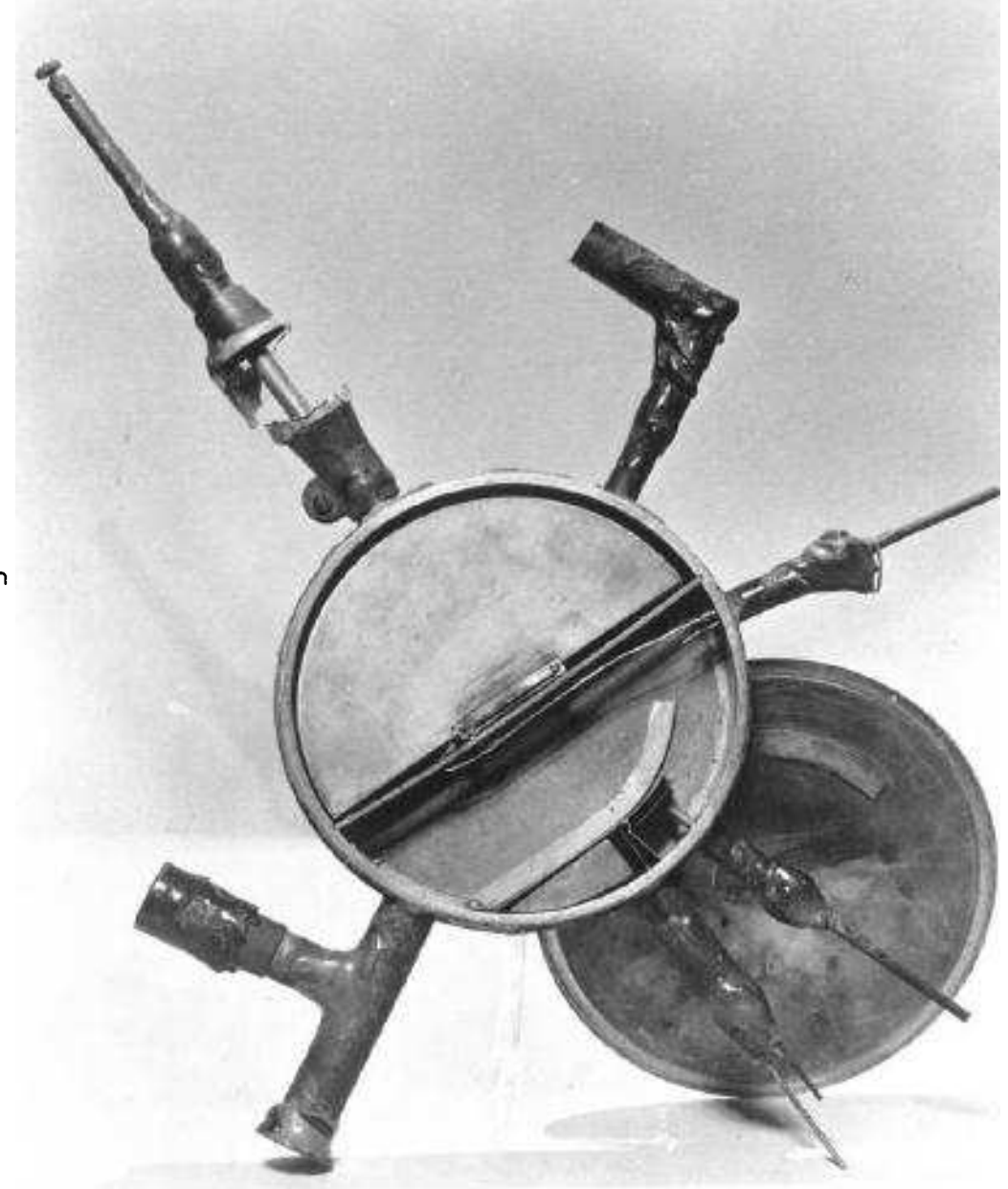
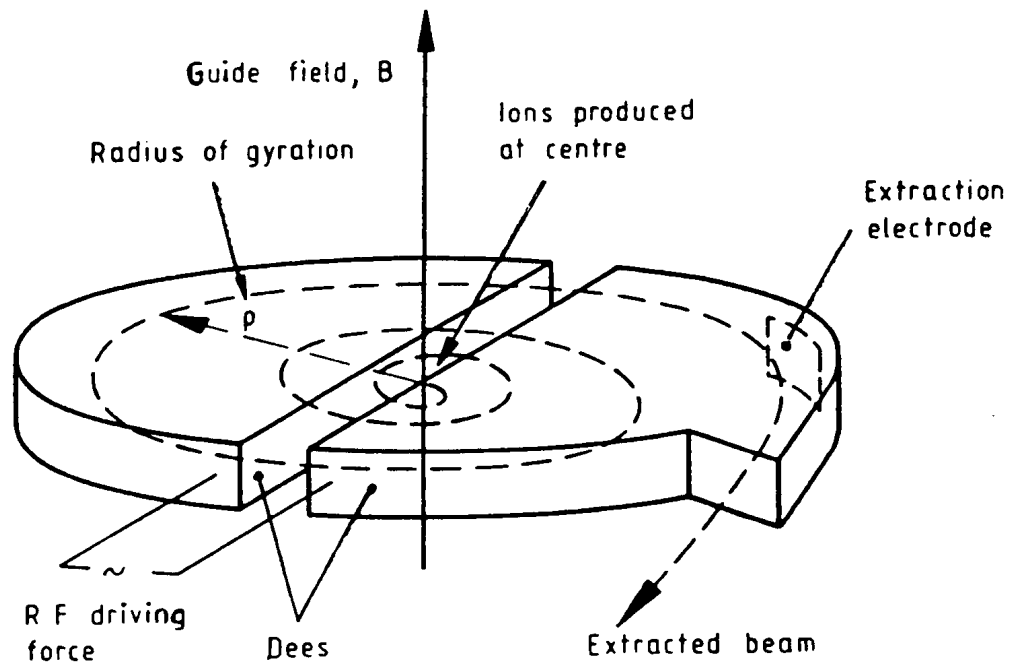


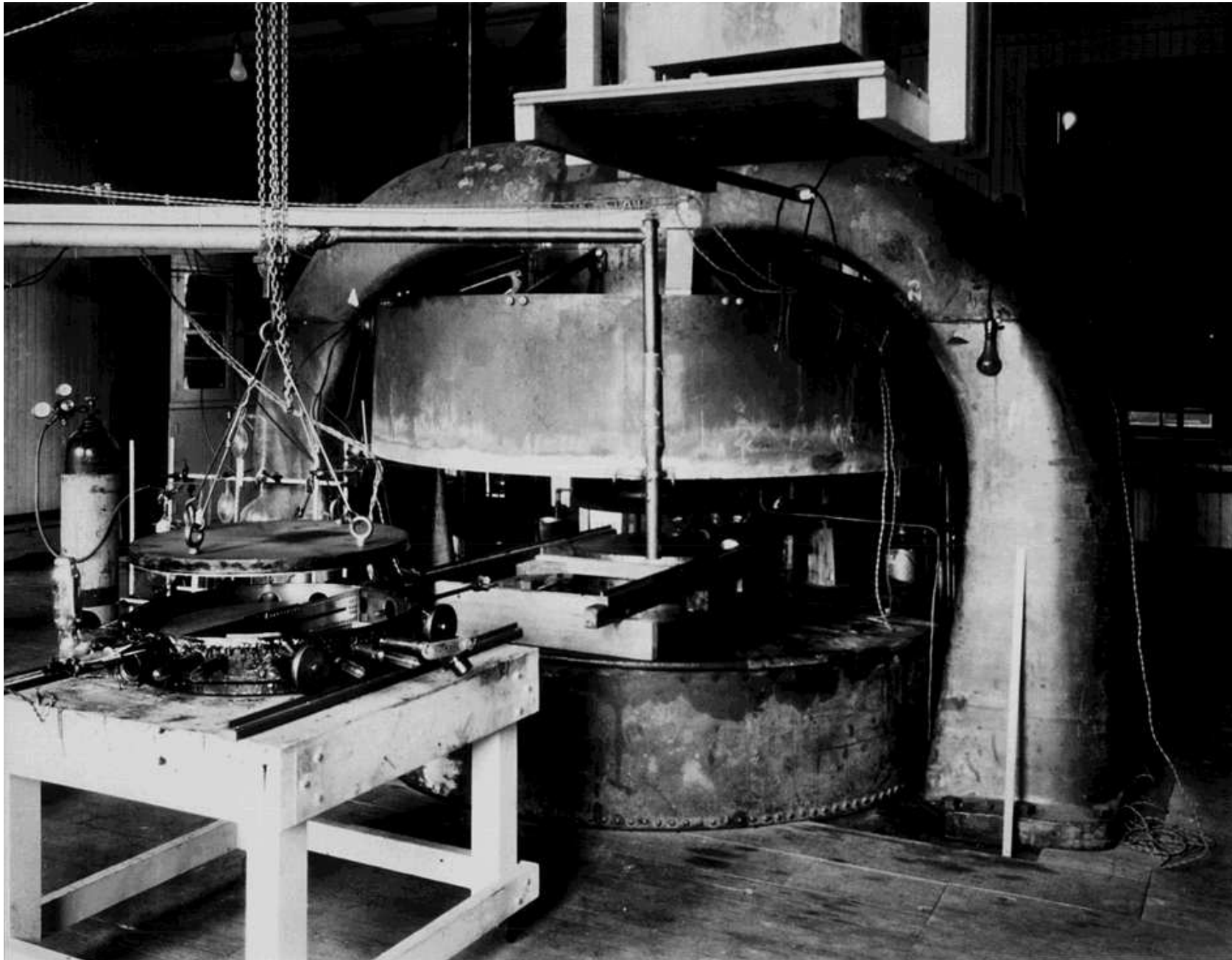
- Livingston: 80 keV Wasserstoff-Ionenstrahl-Zyklotron (1931)
- Lawrence: 1.25 MeV Protonen-Zyklotron (1932, s. Abb.)
- 1939: 20 MeV Protonen aus \varnothing 160 cm Zyklotron (Uni of California)
($\approx 2 \times$ höchste Energie aus α -Zerfall)

- Relativistische Effekte limitierten maximale Energie,

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

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





Dritte Entwicklungslinie

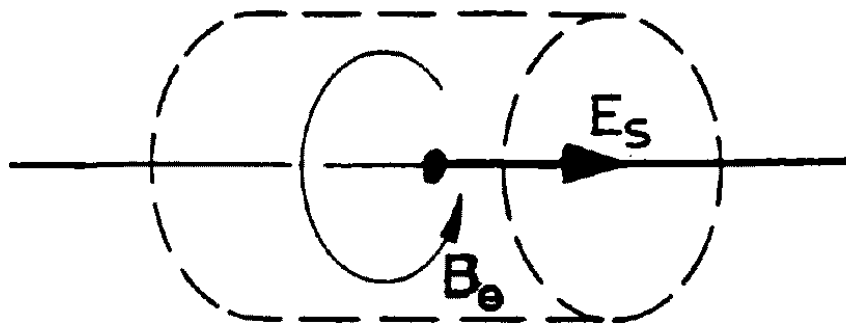
- 1923 Wideröe entwirft & skizziert als Student in seinem Laborbuch das Betatron mit der "1:2"-Regel und fügt 2 Jahre später die radiale Stabilitätsbedingung hinzu (aber er veröffentlicht nicht!),
- 1927 in Aachen baut Wideröe ein Betatronmodell, das nicht funktioniert; Er wendet sich daraufhin Linearbeschleunigern 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

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

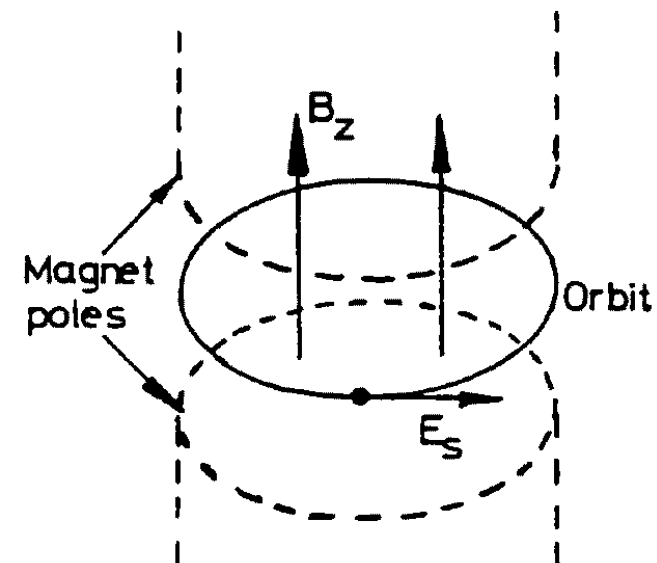
wurden angesprochen (s. Folie 1.27):

- Linearbeschleunigung in Cavities (Ising)



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

- Zirkularbeschleunigung (Betatron)



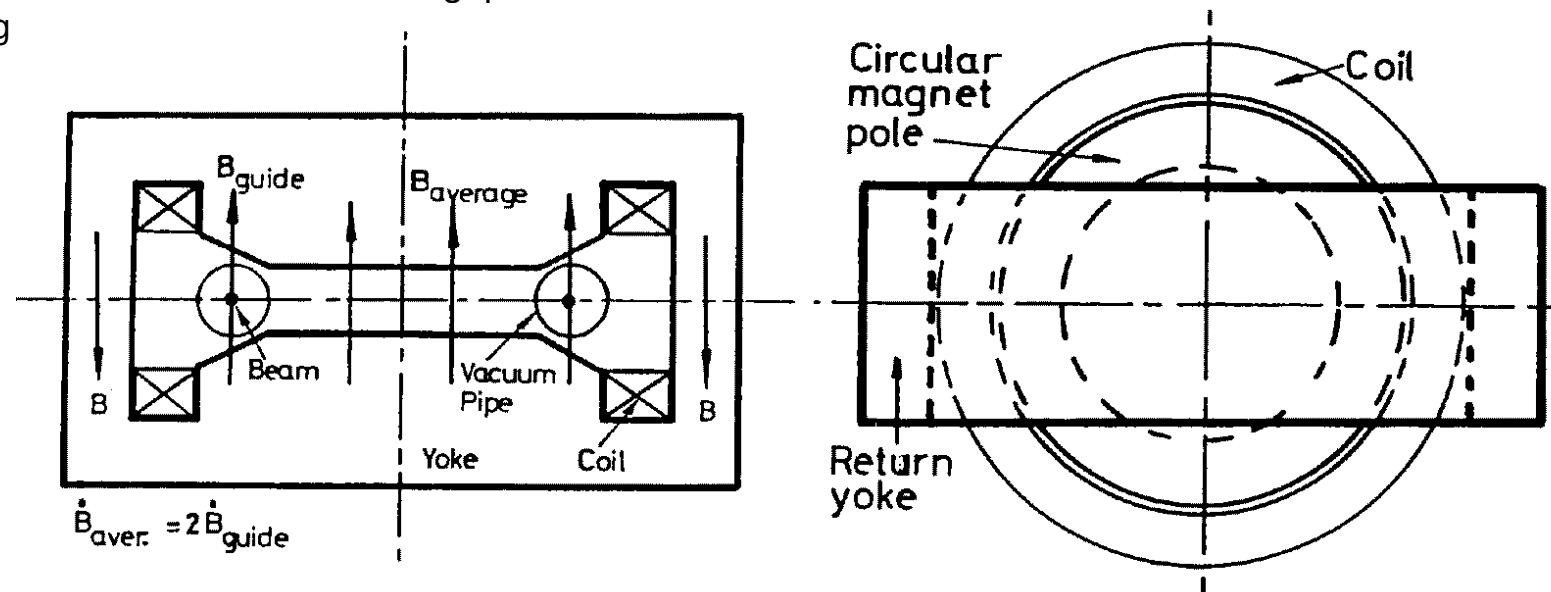
- axiales, zeitlich variierendes \vec{B} -Feld
→ zirkulares, beschleunigendes \vec{E} -Feld

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 :

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

Beispiele für Synchrotrons mit schwacher Fokussierung

1952 Cosmotron 3 GeV Protonen

1949 Elektronen

1955 Bevatron ≈ 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 2×26 GeV)

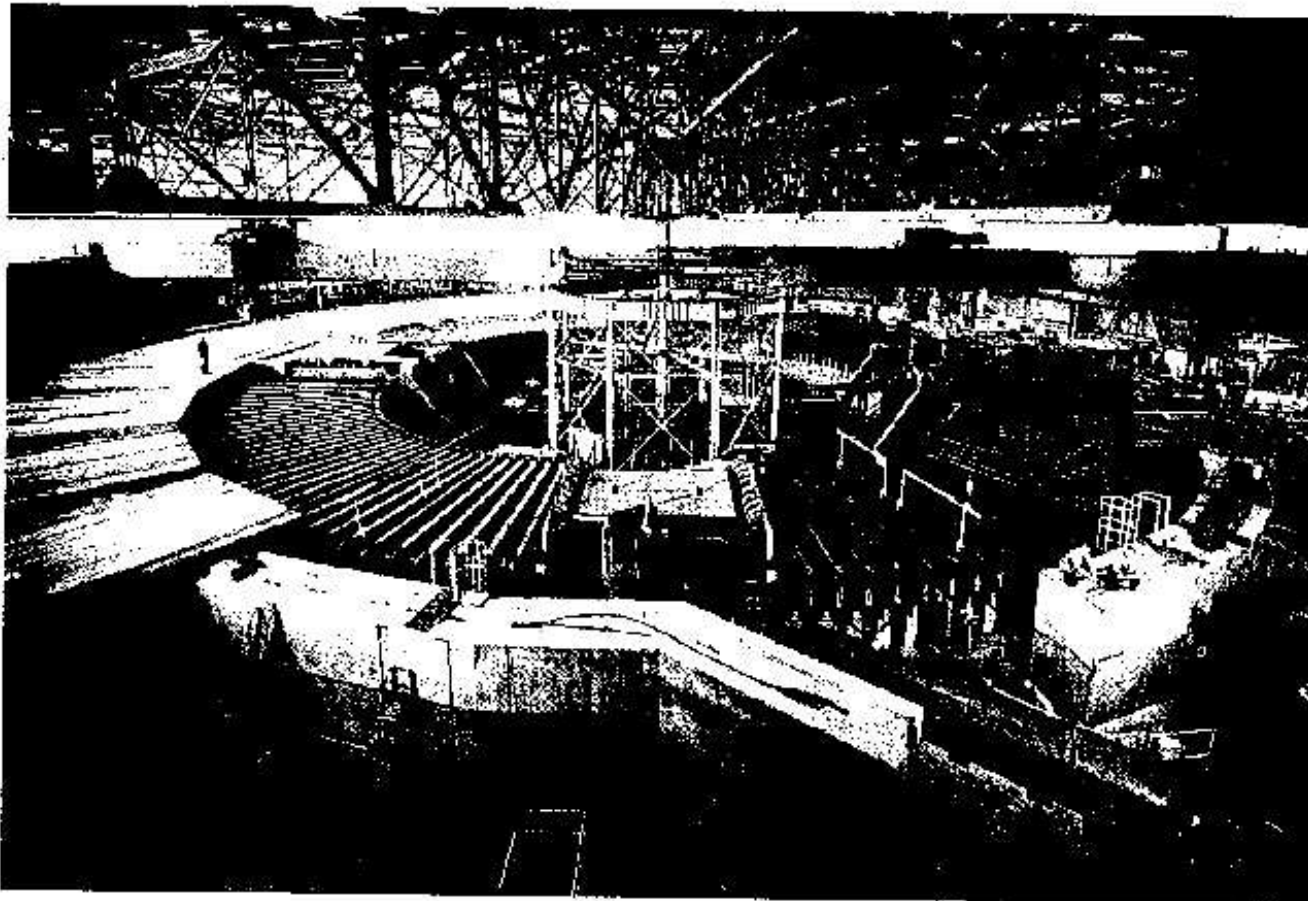
1981 CERN SPS (Proton-Antiproton-Collider bis 2×450 GeV)

1987 FNAL Tevatron (Proton-Antiproton-Collider bis 2×900 GeV)

1989 CERN LEP (Elektron-Positron-Collider bis 2×104 GeV)

2002 FNAL Tevatron (Proton-Antiproton-Collider bis 2×1000 GeV)

2007 CERN LHC (Proton-Proton-Collider bis 2×7000 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)

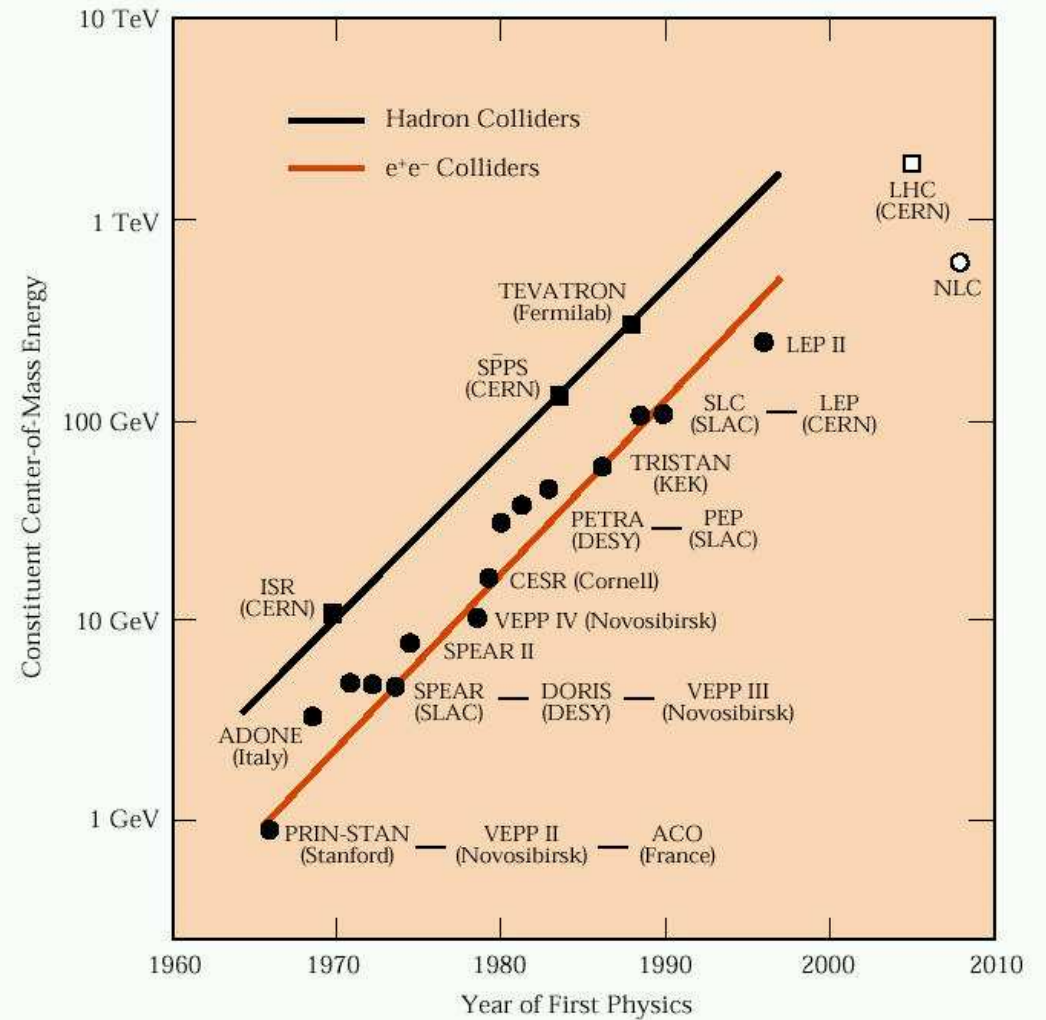
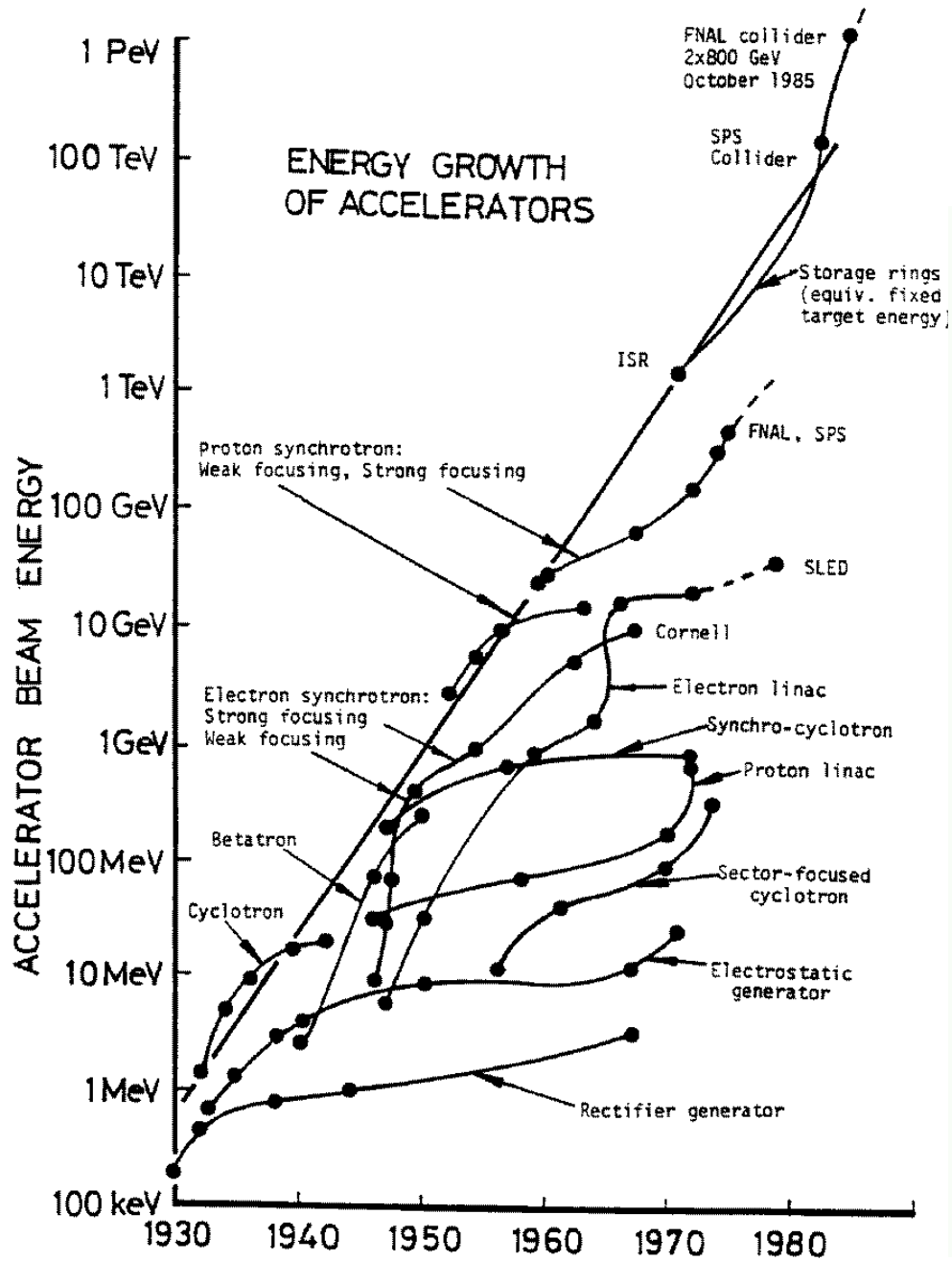


Abbildung 12: Livingston-Diagramm

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

