

Teilchenbeschleuniger

Unersetzbare Werkzeuge für die Forschung

C.P. Welsch

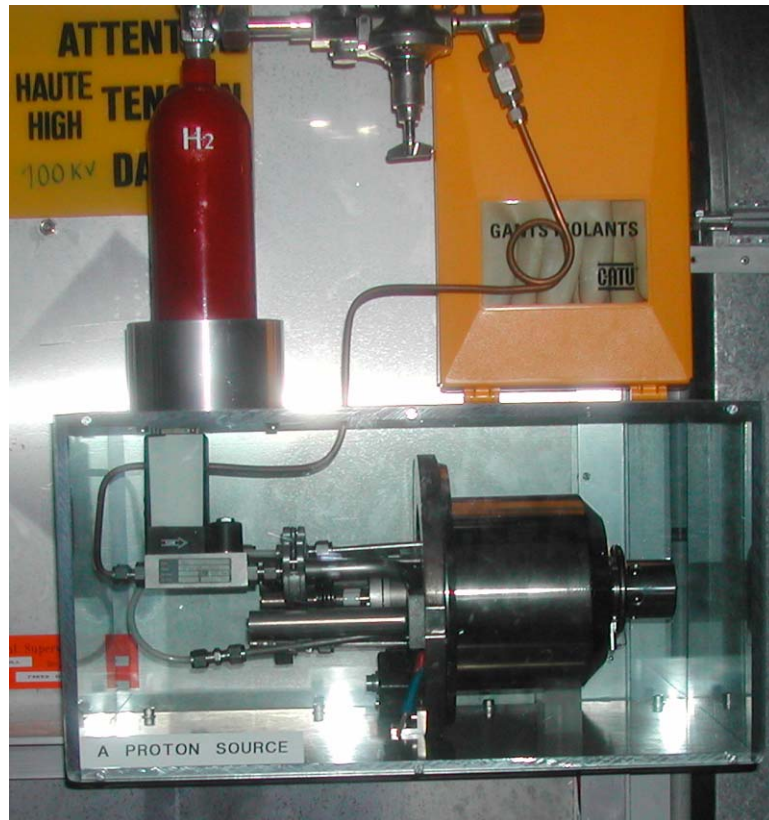
Anwendungsgebiete

- Hochenergiephysik
 - Hauptfokus dieser Woche
- Medizinische Anwendungen
- Lichtquellen
- Materialwissenschaften
- ...

Seminar
Dienstagabend

Wie kommt man...

von hier:

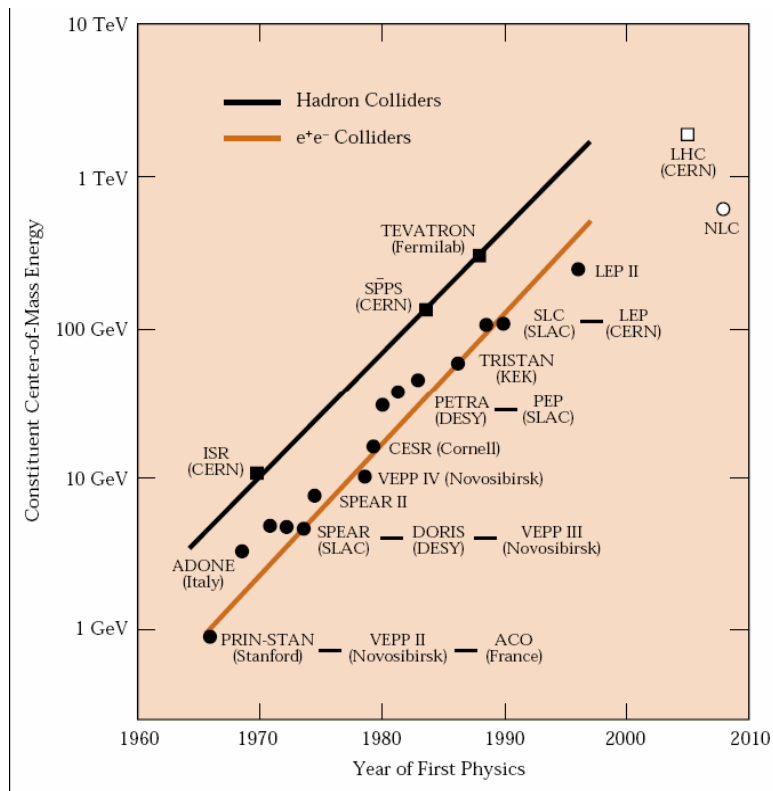


nach hier ?



Warum hohe Energien ?

- Teilchenbeschleuniger **unersetzbare Werkzeuge** um die Natur auf **immer kleineren Skalen** zu untersuchen
- Seit den 70ern kommen die meisten neuen Entdeckungen in der Teilchenphysik von **Collidern**



- Energiesteigerung um Faktor zehn alle 8 Jahre !
- Hadronen-Collider am Energielimit
- Leptonen-Collider für Präzisionsuntersuchungen
- **LHC** start 2008
- Konsens, dass ein Leptonen-Linac mit $E_{cm} > 500$ GeV die LHC Physik ergänzen/vervollständigen sollte

Offene Fragen im Tera-Bereich

Unentdeckte Prinzipien,
neue Symmetrien ?

Zusätzliche Raumdimensionen ?

Was ist die
dunkle Energie ?

Gibt es eine "Ur"-Kraft ?

Neue Teilchen ?

Was sagen uns Neutrinos ?

Was ist *dunkle Materie* ?

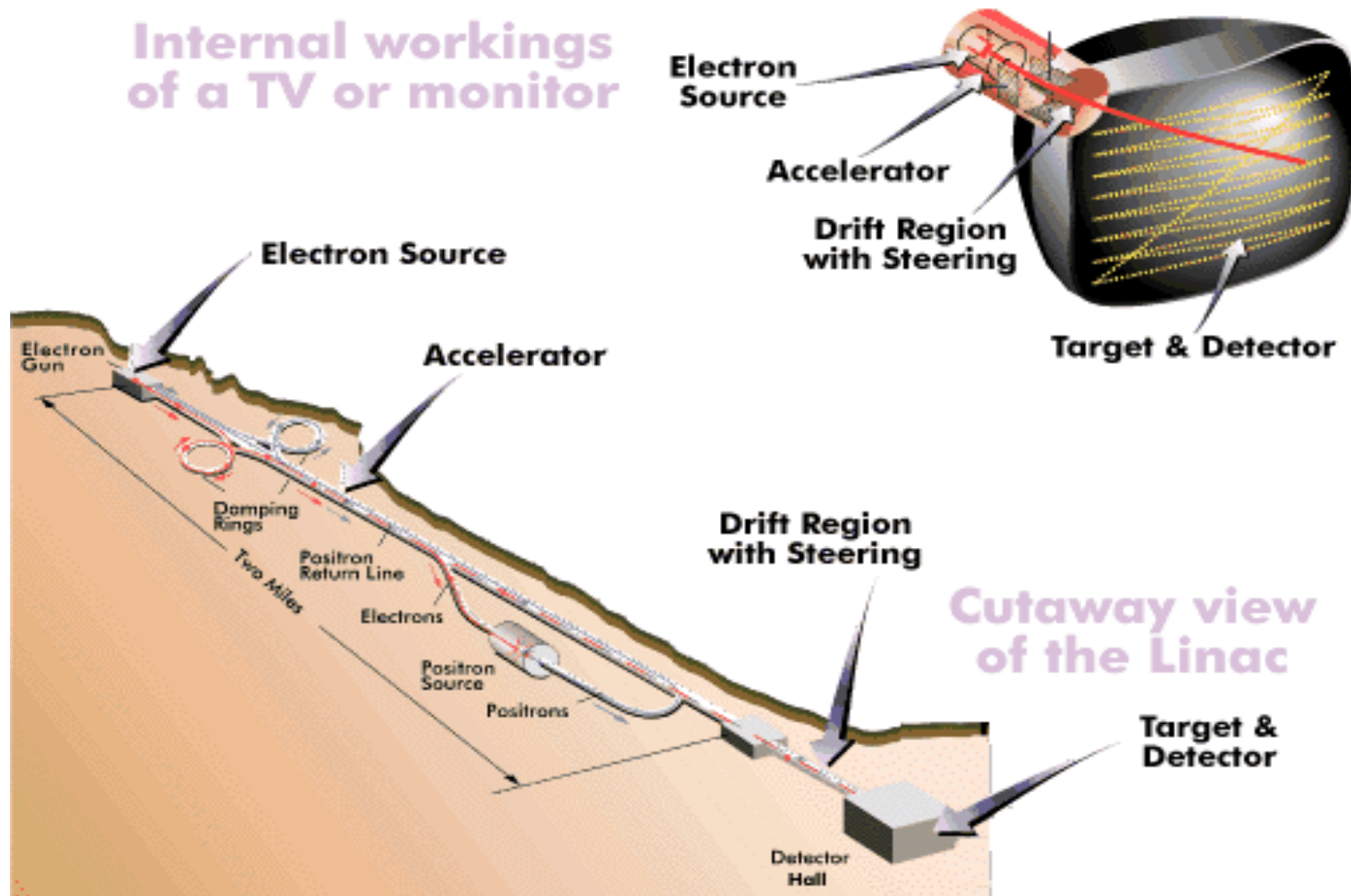
Wie begann das Universum ?

Was ist die Antimaterie ?

Wie beschleunigt man Teilchen ?!?

Kraft	Rel. Stärke	Reichweite [m]	Betroffene Teilchen
Gravitation			
Elektro- Magnetismus			
Starke Kraft	~ 1		
Schwache Kraft			

Aufbau eines Beschleunigers ?

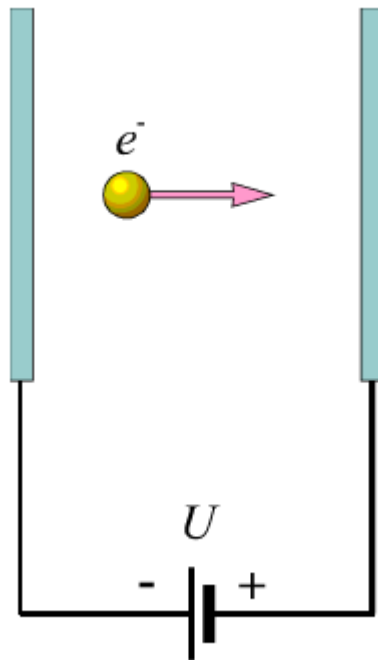


Strahlenergie

Definition von 1 eV:

$$E = eU = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\Leftrightarrow E = 1 \text{ eV}$$



Gebräuchliche Einheiten

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV},$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

Maxwell-Gleichungen
Spezielle Relativitätstheorie

Andere wichtige Einheiten

- Masse [eV/c^2]
 - $1 \text{ eV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-36} \text{ kg}$
 - Elektron = $0.511 \text{ MeV}/c^2$
 - Proton = $938 \text{ MeV}/c^2$
 - Carsten $\approx 4 \times 10^{37} \text{ eV}/c^2$
- Impuls [eV/c]
 - $1 \text{ eV}/c = 5.3 \times 10^{-28} \text{ kg m/s}$
 - Fußball bei 70 km/h
 $\approx 10 \text{ kg m/s} \approx 2 \times 10^{28} \text{ eV}/c$

Wird wirklich beschleunigt ?

- Energie 1 MeV => 1 GeV

$\beta=v/c$	0,95	0,99	0,999	0,999 999 9
$\gamma=m/m_0$	3	7	22	2000



Geschwindigkeit ändert sich kaum.
Eher: "*Massenvergrößerer*"

Beschleuniger-Vorzeit

- < 100 keV
 - **1895** Lenard: e⁻-Streuung an Gasen
 - **1913** Frank/Hertz: e⁻ Anregung durch e⁻ Beschuß
- Einige MeV (α Teilchen)
 - **1906** Rutherford beschießt Glimmerfolie
 - **1919** Rutherford induziert Kernreaktion (Stickstoff)

Hohe Spannung im Selbstbau

- *Wimshurst* Maschine
Erzeugung von Hochspannung
durch Influenz

Experimente im Eigenbau
zu dieser Zeit nicht
unüblich.

HOW TO MAKE A WIMSHURST MACHINE. 95

centre of the diameter of the semicircle. Two similar $\frac{1}{2}$ -in. holes are also to be put through the centres of the wider extremities of these standards, at 33 ins. up from the shoulders of the tenon. From

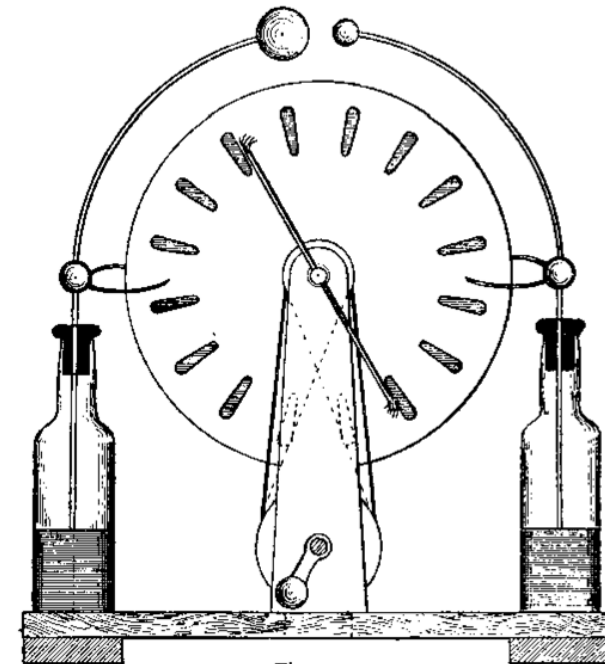


Fig. 1.

GULBERT PITMAN
Cecil Court, St. Martin's Lane, W.C.
1903

Geburt der Teilchenphysik

- 1919 Rutherford zerteilt Stickstoff
- 1927 Rutherford fordert Teilchenbeschleuniger
Studien werden begonnen

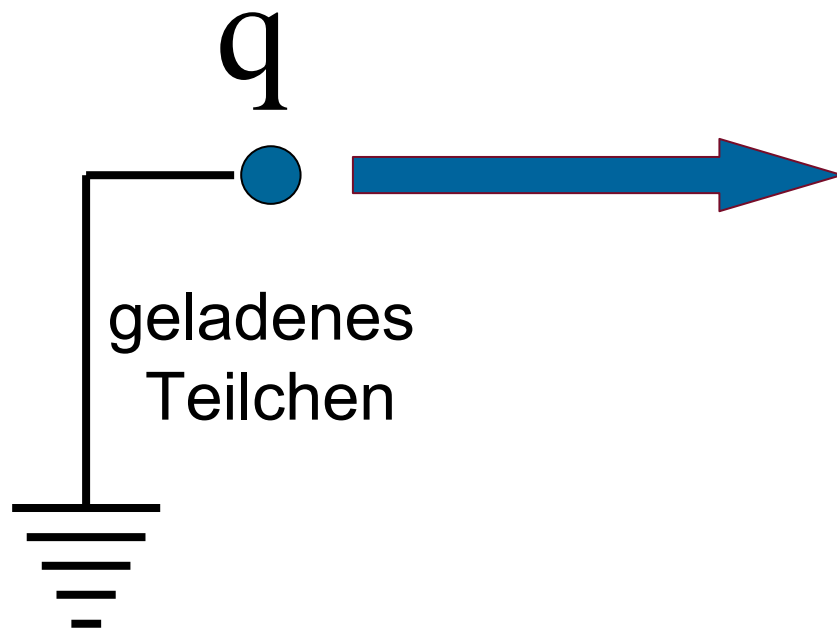
“Wie alles begann...”

1927: Lord Rutherford forderte einen “reichlichen Vorrat” an Projektilen mit höherer Energie, als es natürliche α und β -Teilchen bieten.

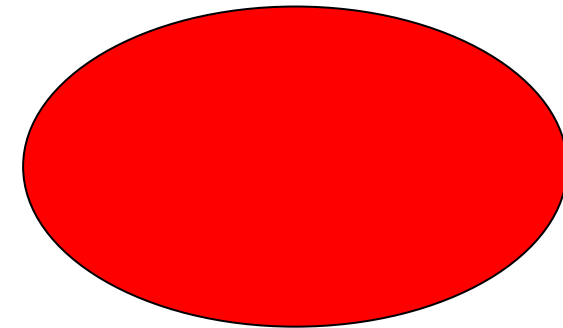
Bei der Eröffnung des *High Tension Laboratory* verlangte er:

What we require is an apparatus to give us a potential of the order of 10 million volts which can be safely accommodated in a reasonably sized room and operated by a few kilowatts of power. We require too an exhausted tube capable of withstanding this voltage. (...) I see no reason why such a requirement cannot be made practical.

DC Beschleuniger



Potential V



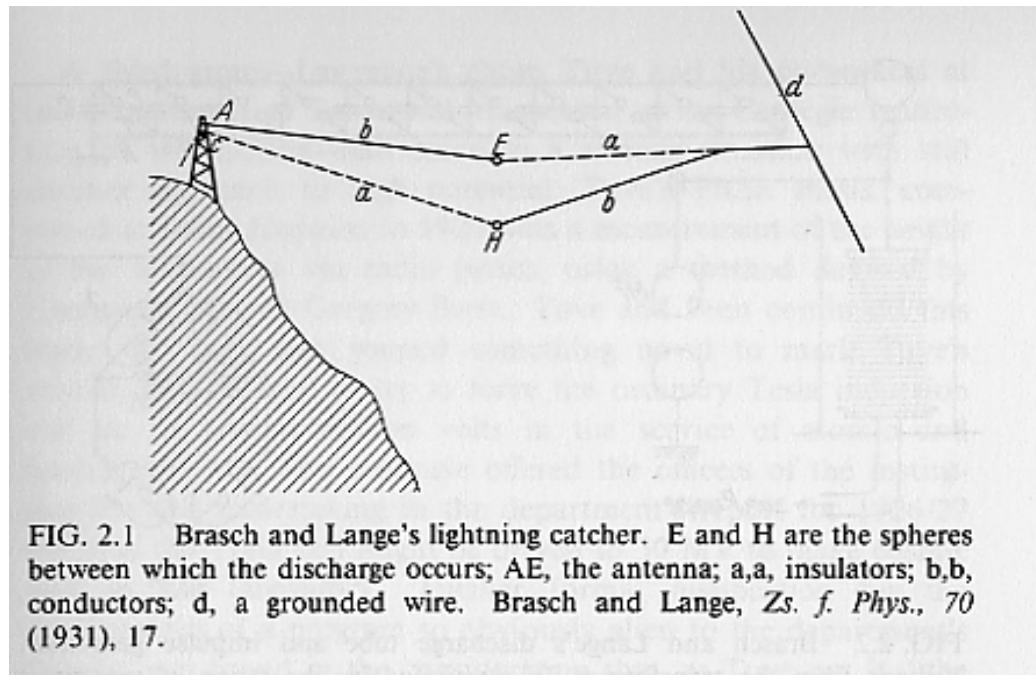
$$\text{Energiegewinn} = q \times V$$

Normalerweise: Beschleunigung **zum** Erdpotential

Gescheiterte Versuche

1928: Curt Urban, Arno Brasch und Fritz Lange gelang es, eine Spannung von 15 MV zu realisieren, indem sie Blitze in den Italienischen Alpen einfingen.

Die zwei Überlebenden des Experiments arbeiteten danach am Design einer Driftröhre, die derartigen Spannungen standhalten konnte.



Geburt der Teilchenphysik

- 1919 Rutherford zerteilt Stickstoff
- 1927 Rutherford fordert Teilchenbeschleuniger
Studien werden begonnen
- 1929 Cockcroft und Walton beginnen mit Hochspannungs-
Experimenten
- 1932 Der Nobelpreis: Cockcroft und Walton teilen Li !!!!

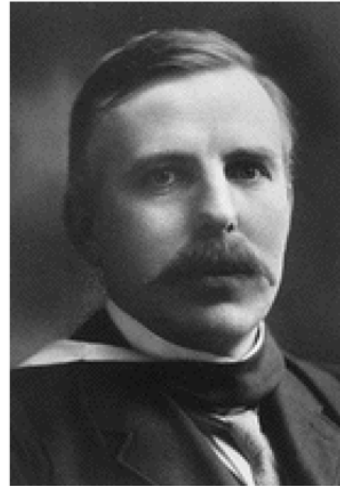
Walton, Rutherford, Cockcroft - 1932

Beginn der Beschleunigerphysik



Schlüsselfiguren

- Ernest Rutherford
- Sir John Douglas Cockcroft
- Ernest Thomas Sinton Walton



1951

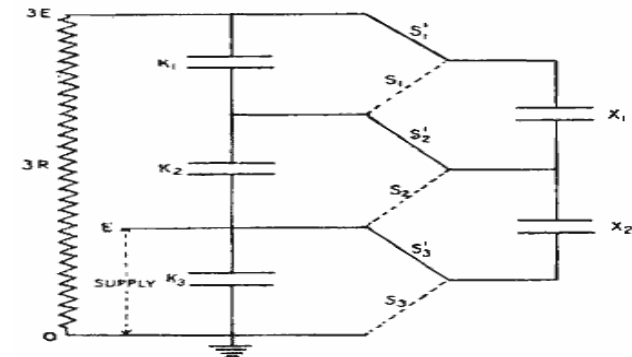


1951

Cockcroft-Walton Generator

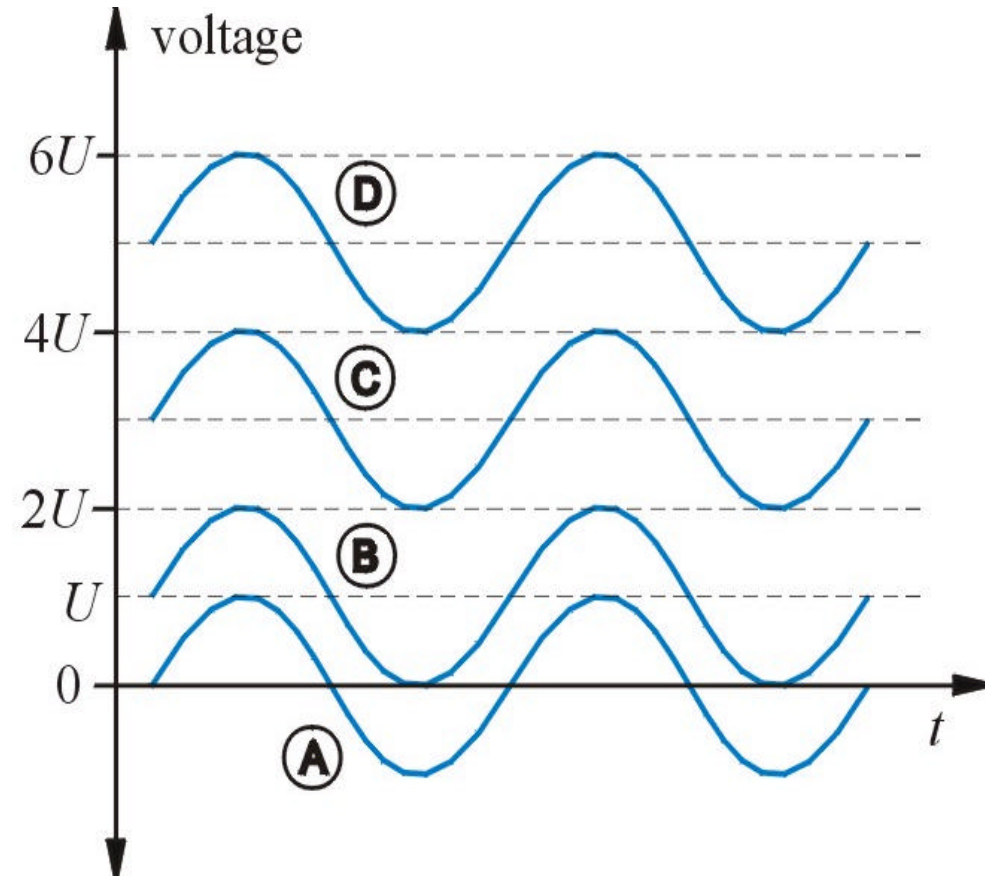
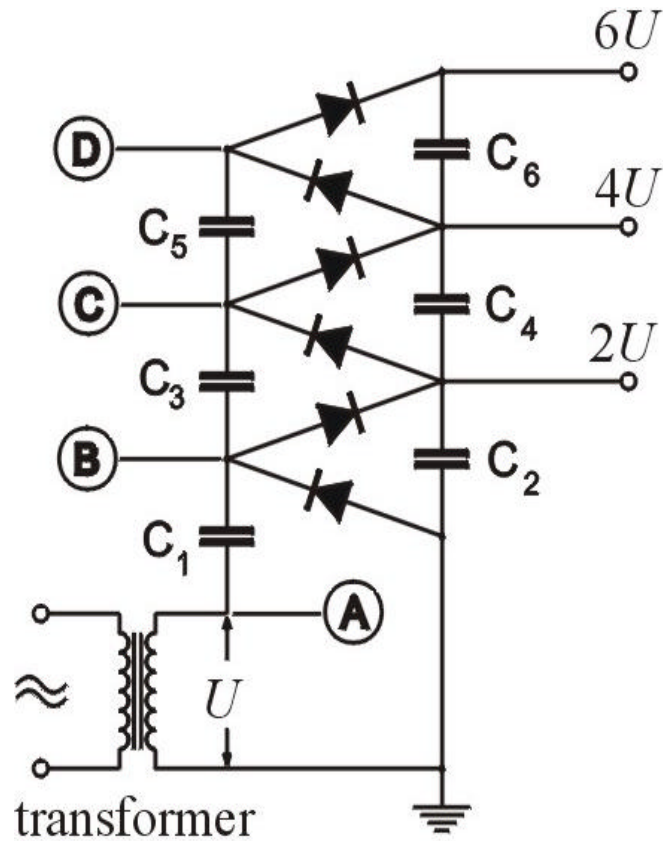


ISIS 665 kV

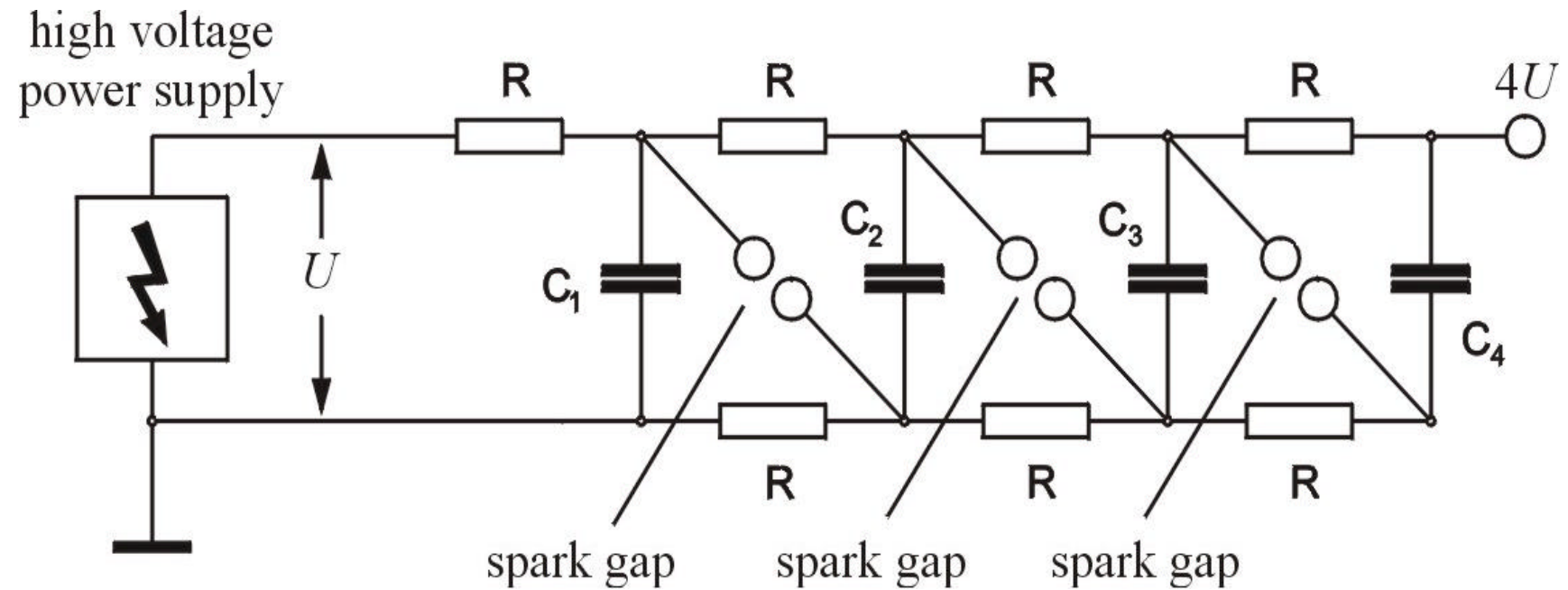


Greinacher 1921

Cockcroft-Walton Generator

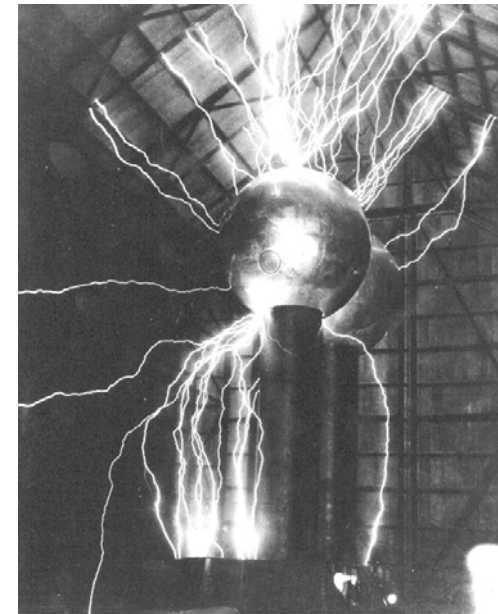
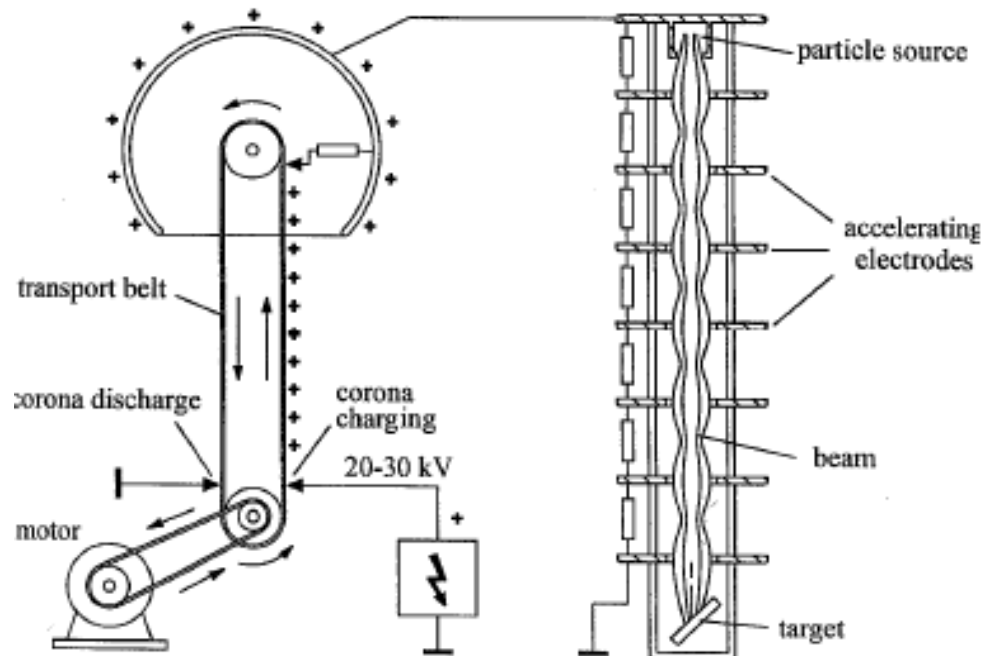


Marx-Generator



Gangbarer Weg

1930: Van de Graaff baut ersten 1.5 MV Beschleuniger



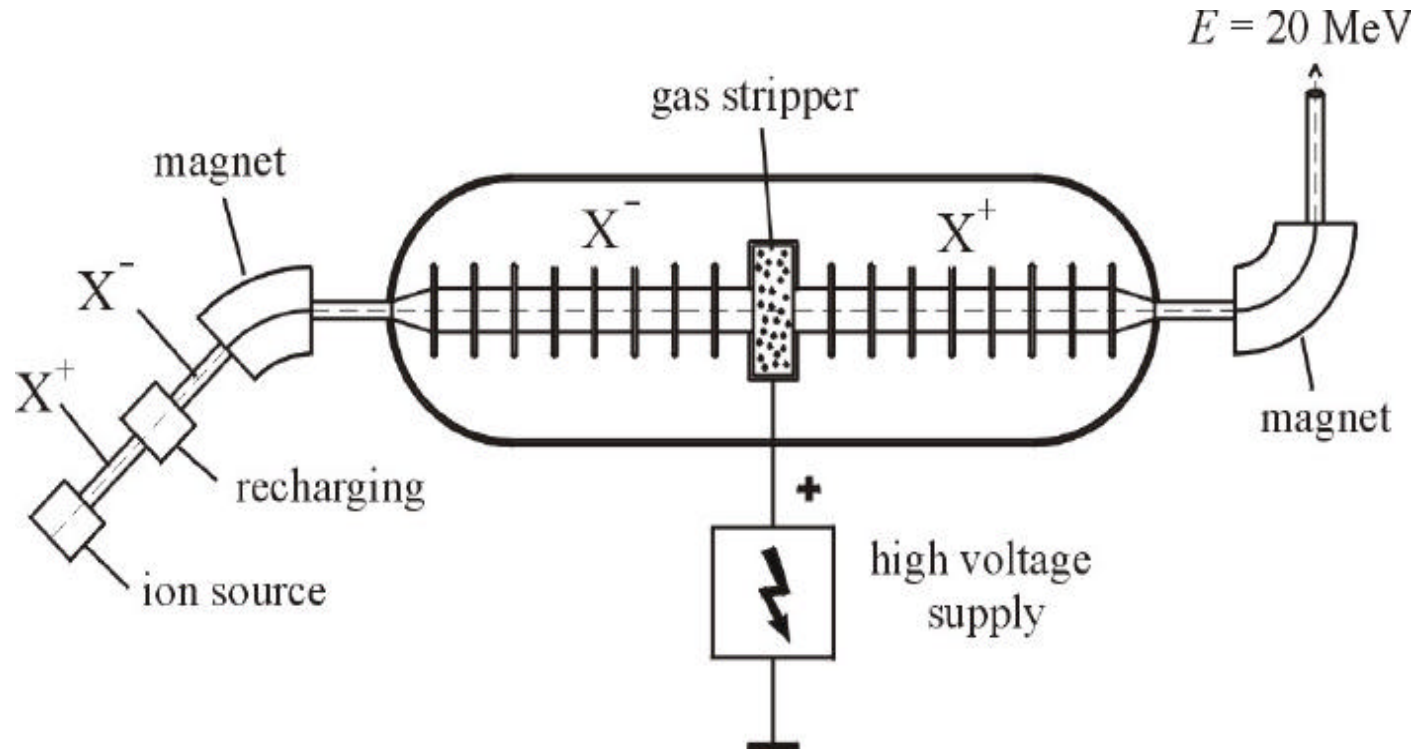
AT ROUND HILL SPARKING TO HANGAR (LONG EXPOSURE)
©MIT Museum. All rights reserved

➡ Bis zu 17.5 MV mit Isoliergas (1MPa SF₆)

5 MeV Van-de-Graaff @ HMI (Berlin)

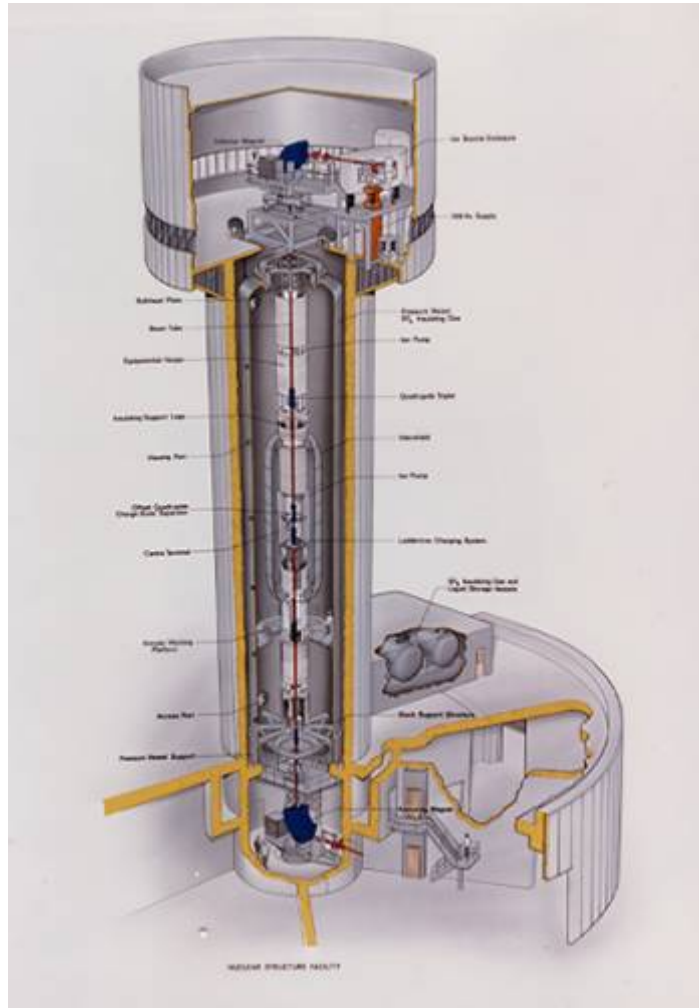


Höhere Energien: Tandem VdG



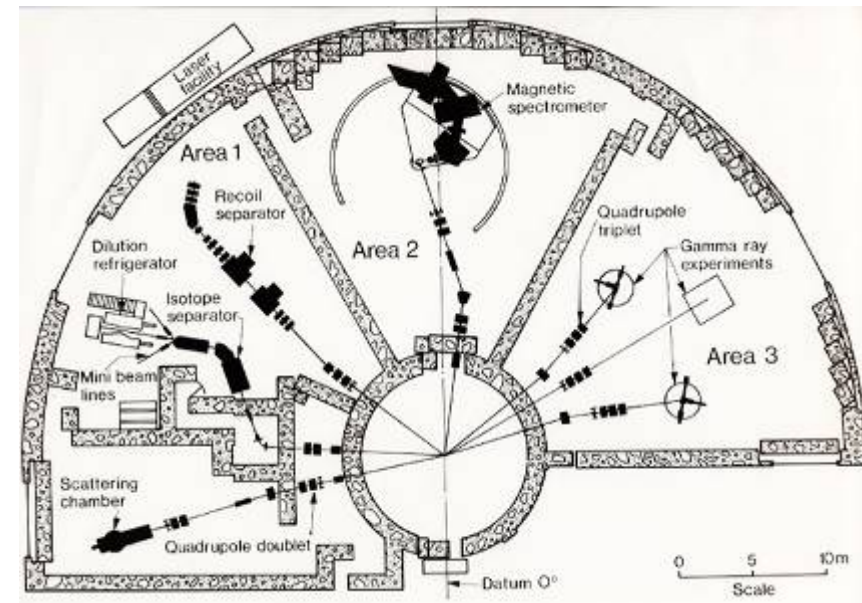
Energie: $[q(X^+) + 1] * V$ \Rightarrow C^{6+} 70 MeV

Daresbury Nuclear Structure Facility



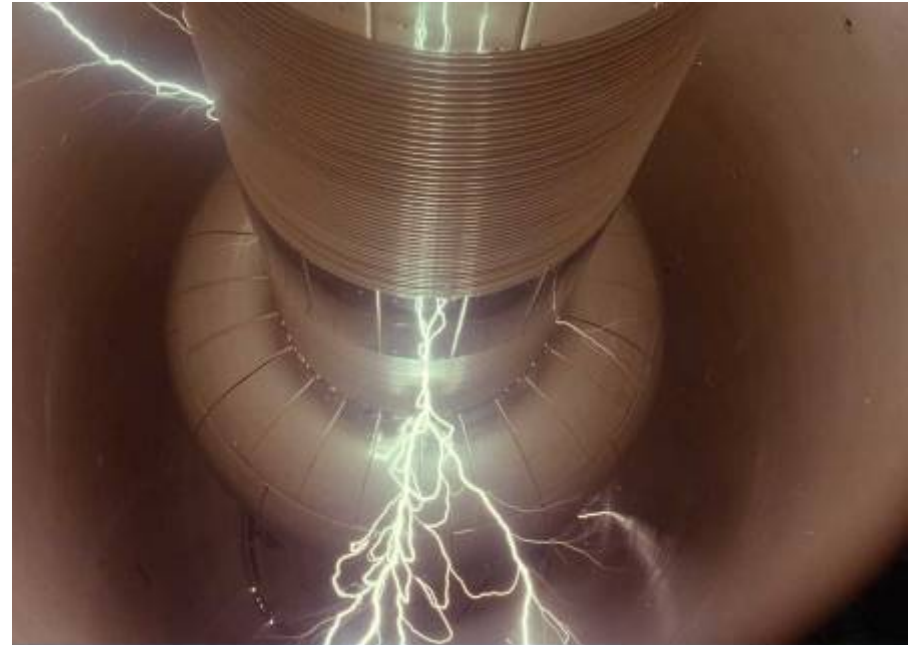
Van de Graaf

20+ MV



Letzte seiner Art.

Wirklich hohe Spannungen !



DC und HF Beschleuniger

DC Beschleuniger



HF Beschleuniger



Maxwell Gleichungen (im Vakuum)

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} &= \mu_0 \vec{J} & \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} &= 0 & \nabla \cdot \vec{E} &= \mu_0 c^2 \rho \end{aligned}$$

Warum nicht DC ?

1) DC ($\frac{\partial}{\partial t} \equiv 0$): $\nabla \times \vec{E} = 0$ wird gelöst durch $\vec{E} = -\nabla \Phi$

Limit: Für 1 MeV, benötigt man eine Spannung von 1 MV !

2) Kreisbeschleuniger: DC Betrieb unmöglich, da $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$

Zeitlich variierende Felder:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

Schlüsselfiguren

- Gustaf Ising
Schlug Hf-Konzept vor
 - * 1881
 - † 1960
- Rolf Wideröe
 - * 11.7.1902, Oslo, Norwegen.
 - † 1996.
- Ernest Orlando Lawrence
 - *: 8.8.1901, Süd-Dakota, USA
 - † : 27.8.1958

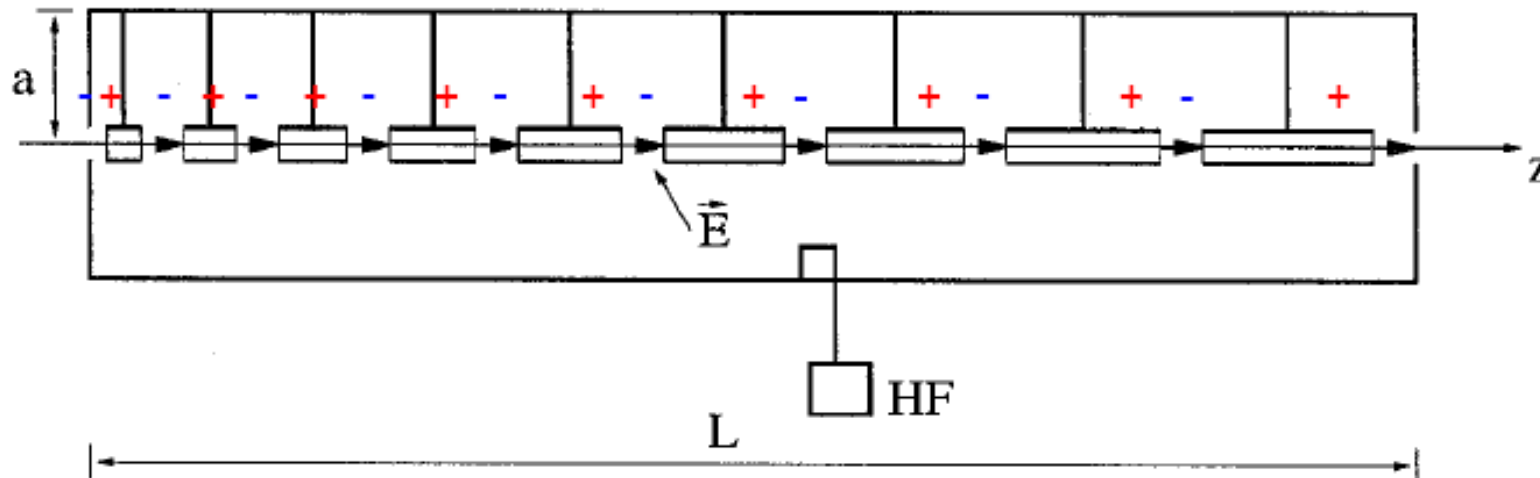


1939

Linearbeschleuniger

Ziel: Einige 10 GeV

- Problem: Nicht mit statischen Feldern erreichbar.
- Lösung:
 - Hf Beschleuniger,
 - Wiederverwenden der Spannung.



Alvarez-Linac: Funktionsprinzip

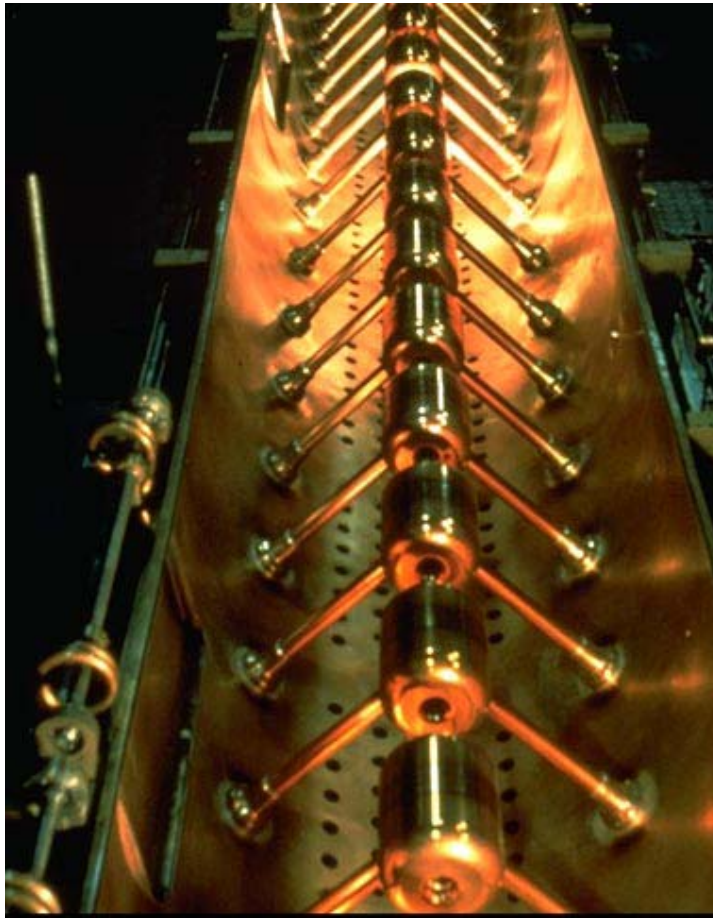
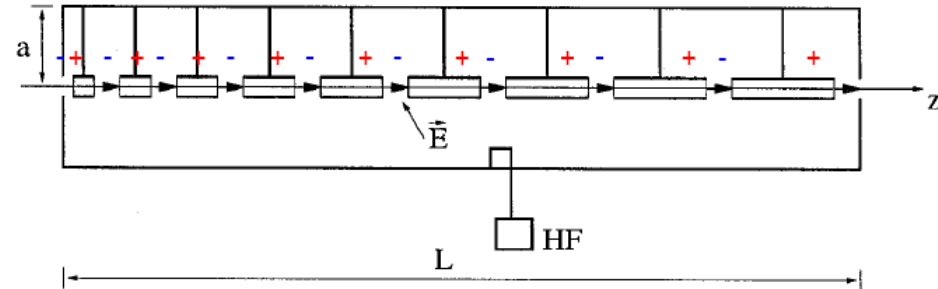


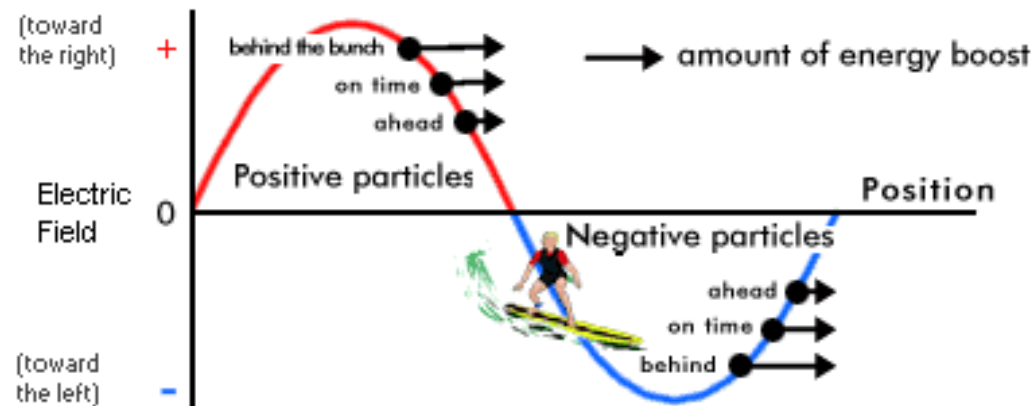
Photo: Old Linac1 at CERN.



- Beschleunigung zwischen den Driftröhren
- Länge ist Funktion der Teilchenenergie
- Warum Driftröhren ??

Linac: Phasenfokussierung

Warum bleiben die Teilchen in einem *Bunch* ?



- E. M. McMillan – V. Veksler (1945)
- Feld ist synchronisiert, so dass langsames Teilchen höheres Feld "sieht"

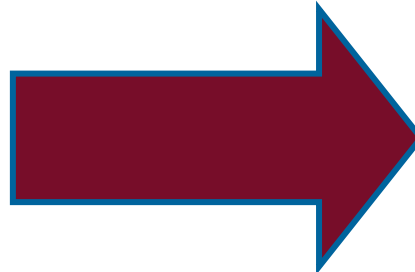
Problem: Fehlende Verbindung

Leistungsstarke
Ionenquellen

Hoher Strom
Kleine Emittanz

200 mA p
 $\epsilon = 1 \text{ mm mrad}$

Klassischer Transport
50% Verlust !

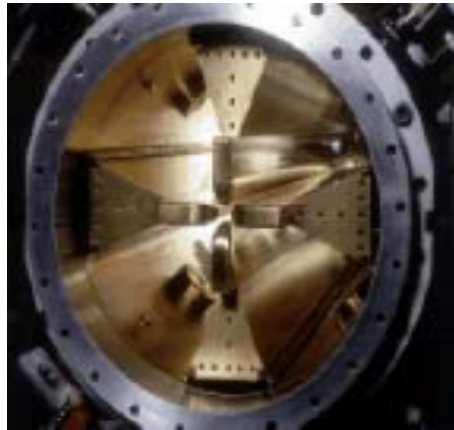


Rfq
< 10% Verlust !

Leistungsstarke
Beschleuniger

Hohe Energie
gute Effizienz
Teilchen-Pakete !

Der Radio-frequency Quadrupole



Geschichte des RFQs

- **1970** Kapchinskij und Teplyakov schlagen die Idee vor
- **1974** experimenteller Test am *Institute for High Energy Physics* in Protvino (UdSSR). Ein 148.5 MHz RFQ beschleunigte 100-KeV Protonen auf 620 KeV mit einer Effizienz von 50%.
- **1977** RFQ Konzept wird in der westlichen Welt publiziert. Grosses Interesse in Los Alamos National Laboratory (USA). RFQ Prinzip soll getestet werden. Beginn der Entwicklung von computer codes zum Rfq Design.
- **1979** Beginn des P.O.P. (Proof-of-principle) Experiments in Los Alamos . 425 MHz RFQ beschleunigt einen 100-keV Protonenstrahl auf 640 keV mit einer Effizienz von 90% - wie von den Simulationen vorhergesagt.
- **Heute** befinden sich Hunderts von RFQ Beschleunigern rund um die Welt im Einsatz.

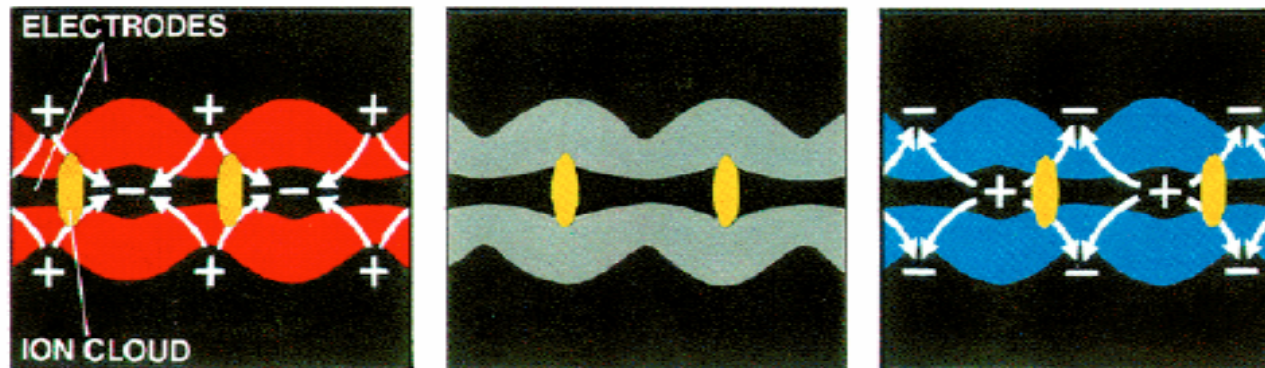
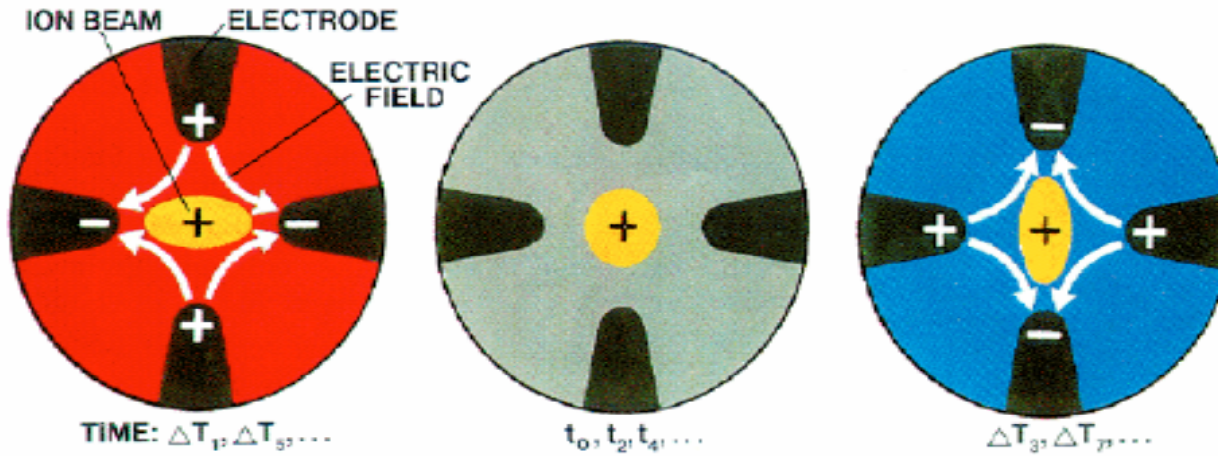
Drei Ziele

- Fokussieren
 - Paketisieren
 - Beschleunigen
- } eines dc Ionenstrahls mit hoher Effizienz.

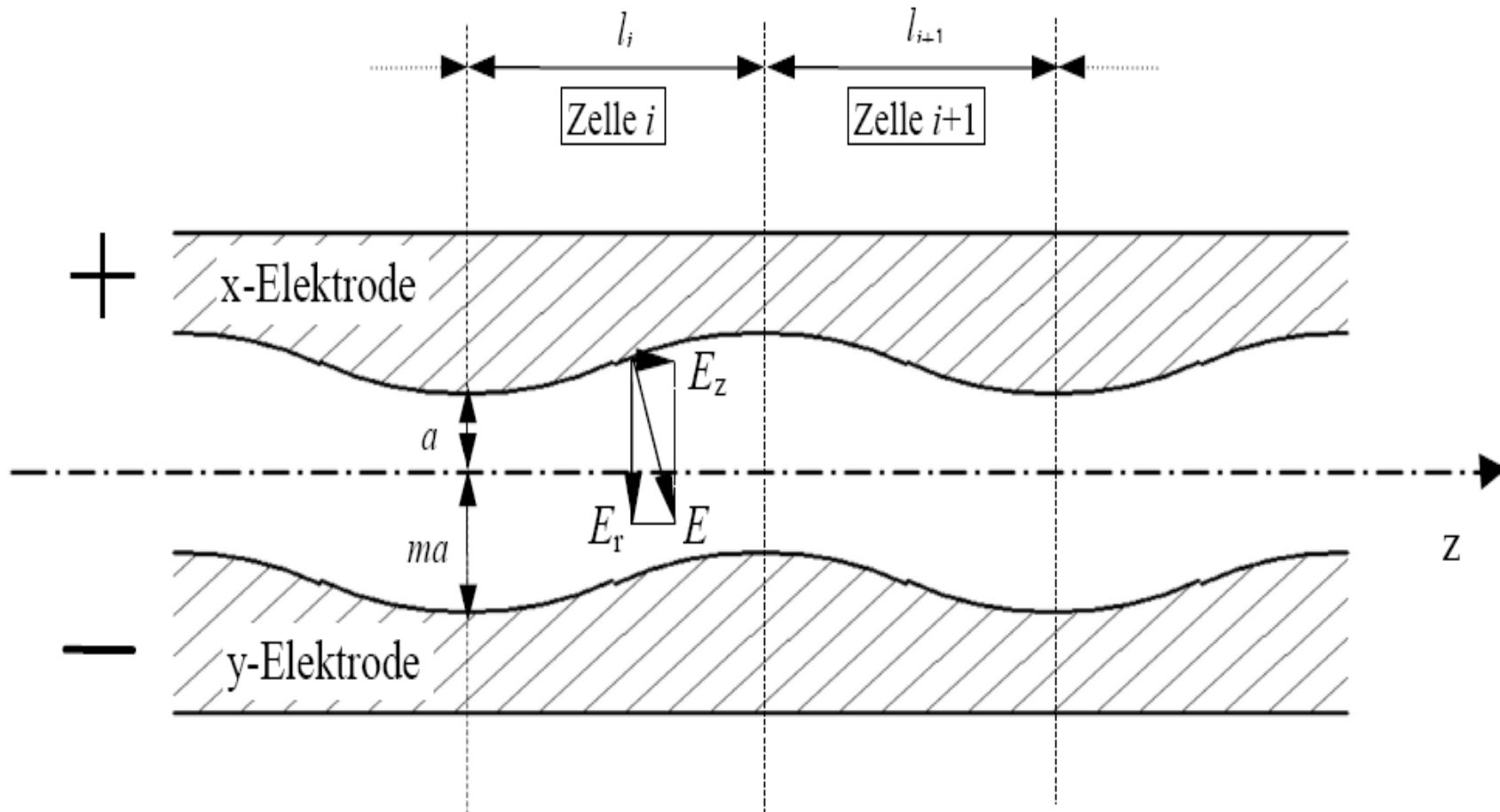
!!! Unbedingt die Emittanz erhalten !!!

Alle drei Ziele werden direkt durch das **HF-Feld** realisiert.

Der Rfq



Beschleunigung in einem Rfq



Strahldynamik in einem Rfq

Fokussierstärke B :

$$B = \left(\frac{q}{m_0} \right) \left(\frac{V}{a} \right) \left(\frac{1}{f^2} \right) \left(\frac{1}{a} \right) \left(\frac{I_0(ka) + I_0(mka)}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)} \right)$$

ionen spezies Überschlagns- Grenze Transversale Feldstörung aufgrund der Modulation der Elektroden (=1, falls unmoduliert)

Beschleunigungseffizienz $E_0 T$:

$$E_0 T = \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)} \cdot V \frac{2}{\beta \lambda} \frac{\pi}{4}$$

Anteil des Feldes in der longitudinalen Zellen-Richtung (=0, falls unmoduliert) Zellenlänge

...verknüpft durch

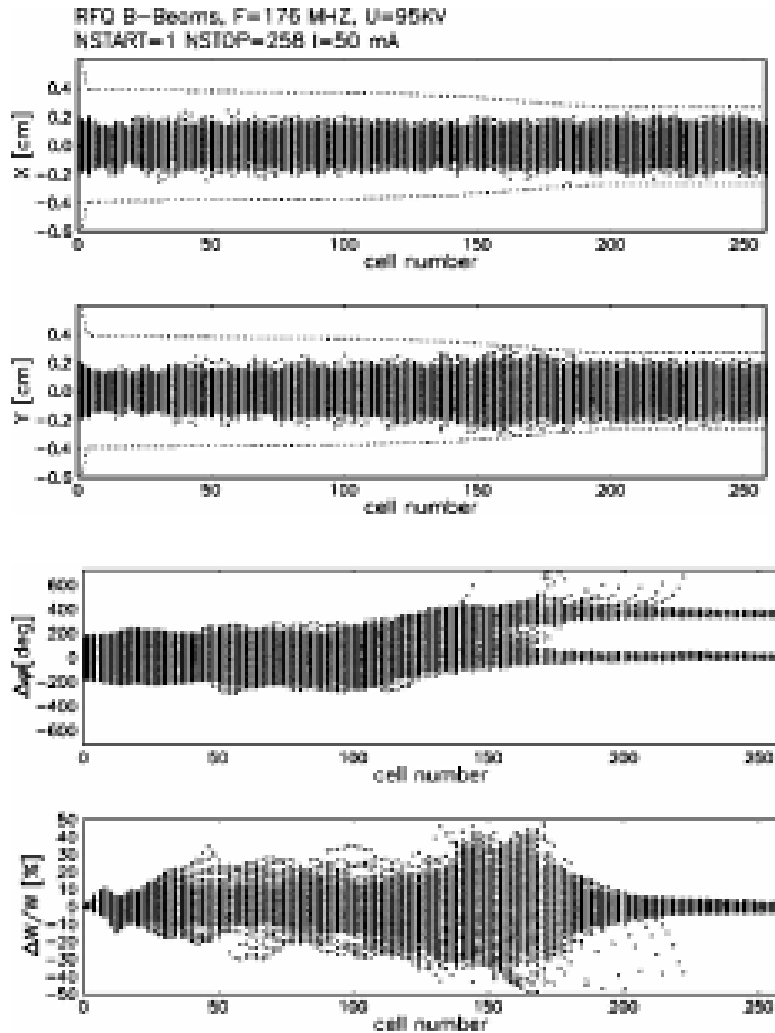
$$\left(\frac{I_0(ka) + I_0(mka)}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)} \right) + \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)} \right) \cdot I_0(ka) = 1$$

Fokussierstärke

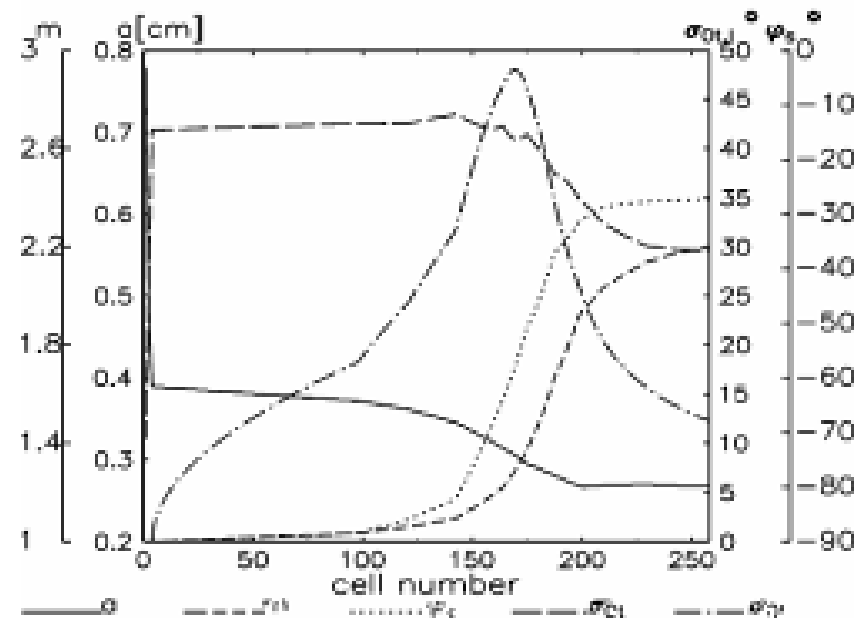
Beschleunigungseffizienz

a=bore radius, β, γ =relativistic parameters, c=speed of light, f= rf frequency,
 I_0 = zero order Bessel function, k=wave number, λ =wavelength, m=electrode
 modulation, m_0 =rest mass, q=charge, r=average transverse beam dimension,
 r_0 =average bore radius, V=vane voltage

Gesamt-Design



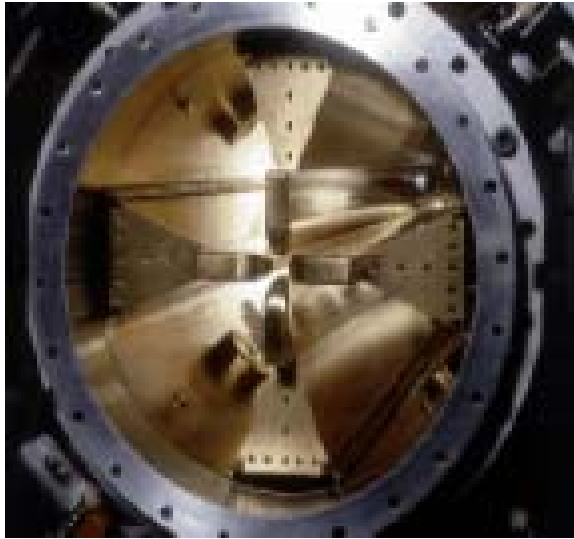
RFQ B-Beams, F=176 MHz, U=95KV



Einsatzgebiete

- Hochenergiebeschleuniger - Injektor
- Ionenimplanter / Materialbehandlung
- Medizinbeschleuniger
- "exotische Anwendungen": de Beers

Linearbeschleuniger-Galerie



Rfq

~ 50 keV – 7 MeV

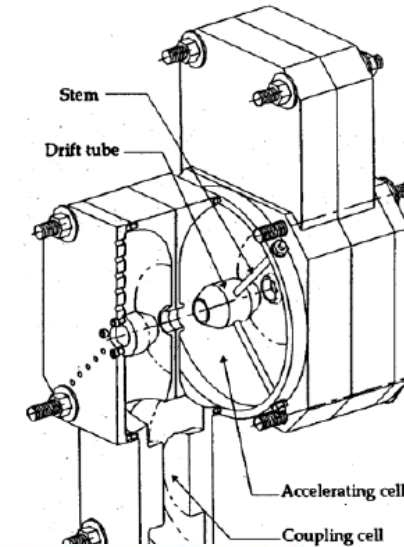
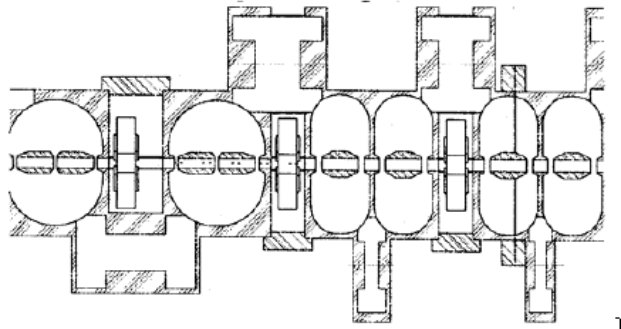


DTL

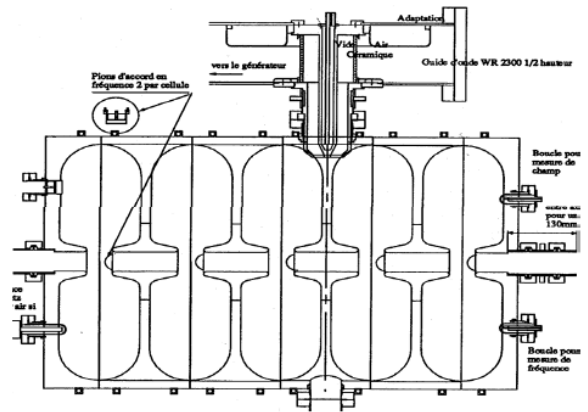
~ 5 – 100 MeV

Gekoppelte Kavitäten

- CCDTL 5-100 MeV



- CCL ~80 MeV – 2 GeV

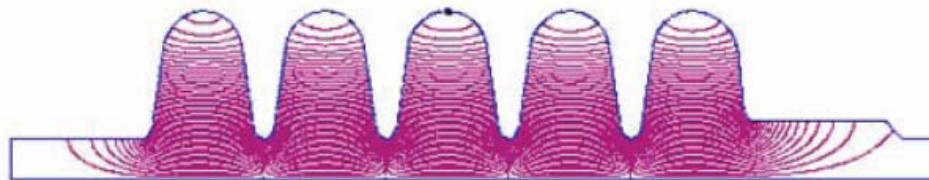


Supraleitende Strukturen

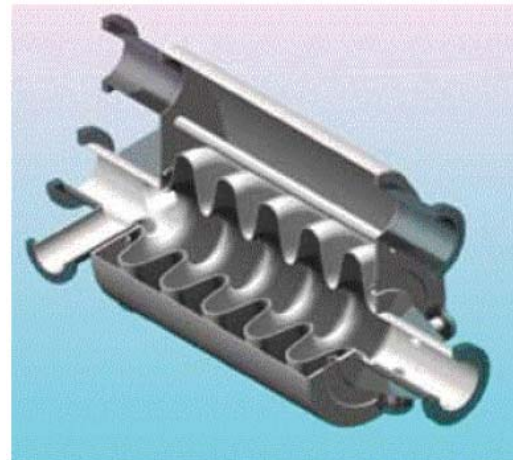
- Spoke cavity: $\sim 20 - 100$ MeV



- Elliptical ~ 100 MeV – 2 GeV

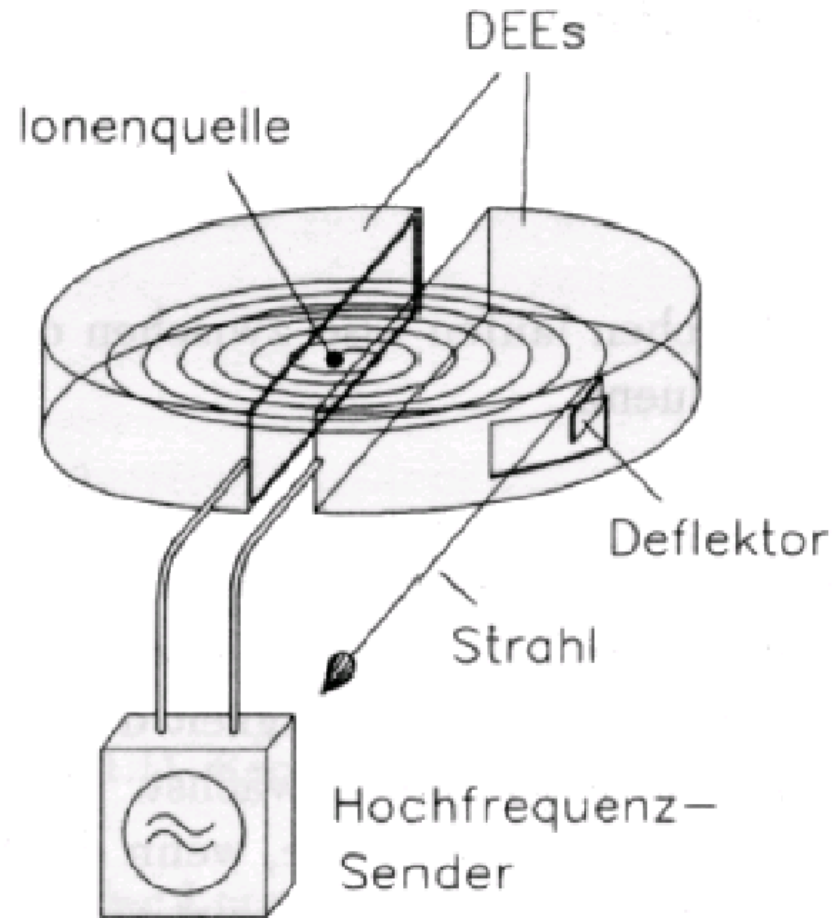


➔ R. Eichhorn, Mittwoch.

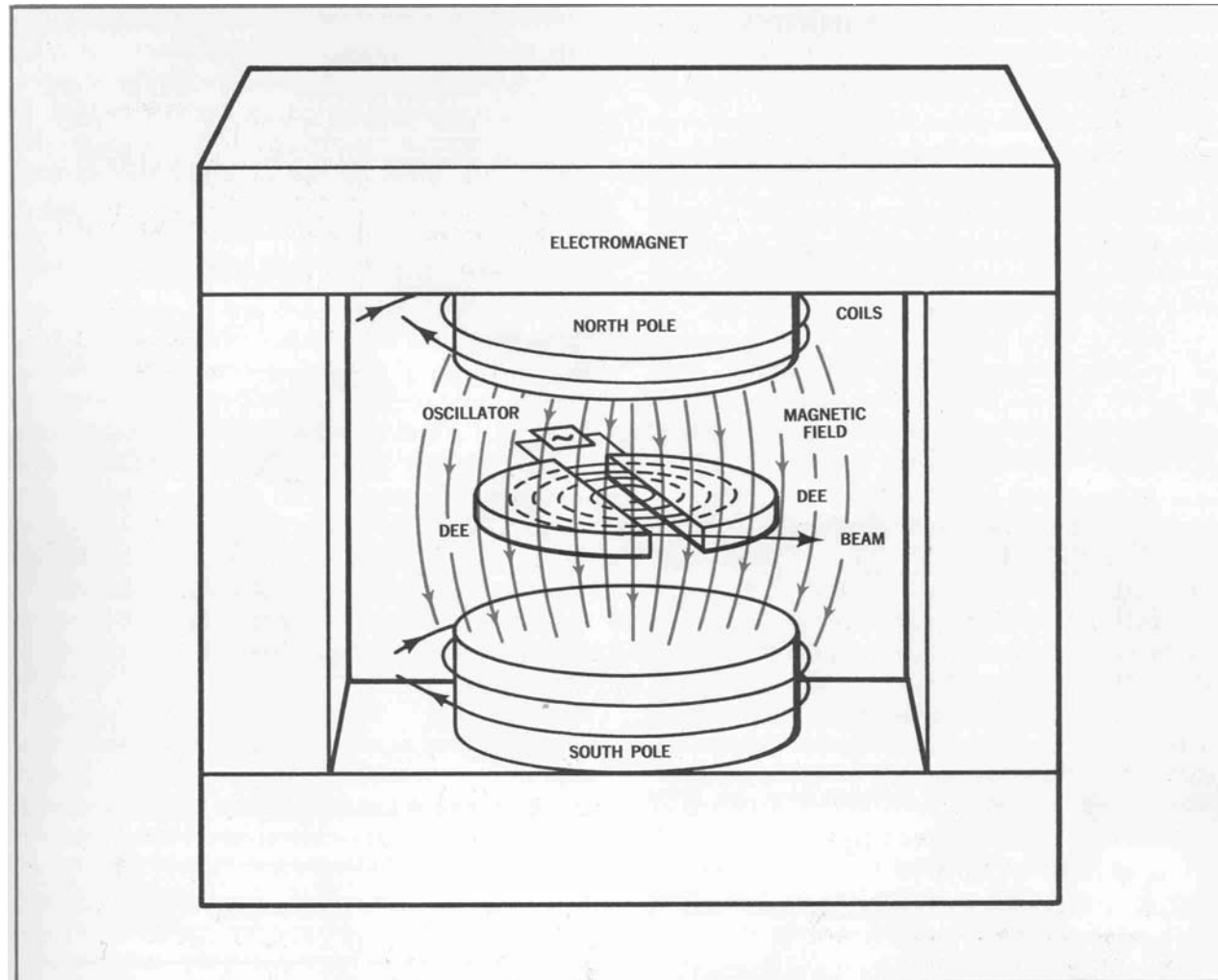


Das Zyklotron

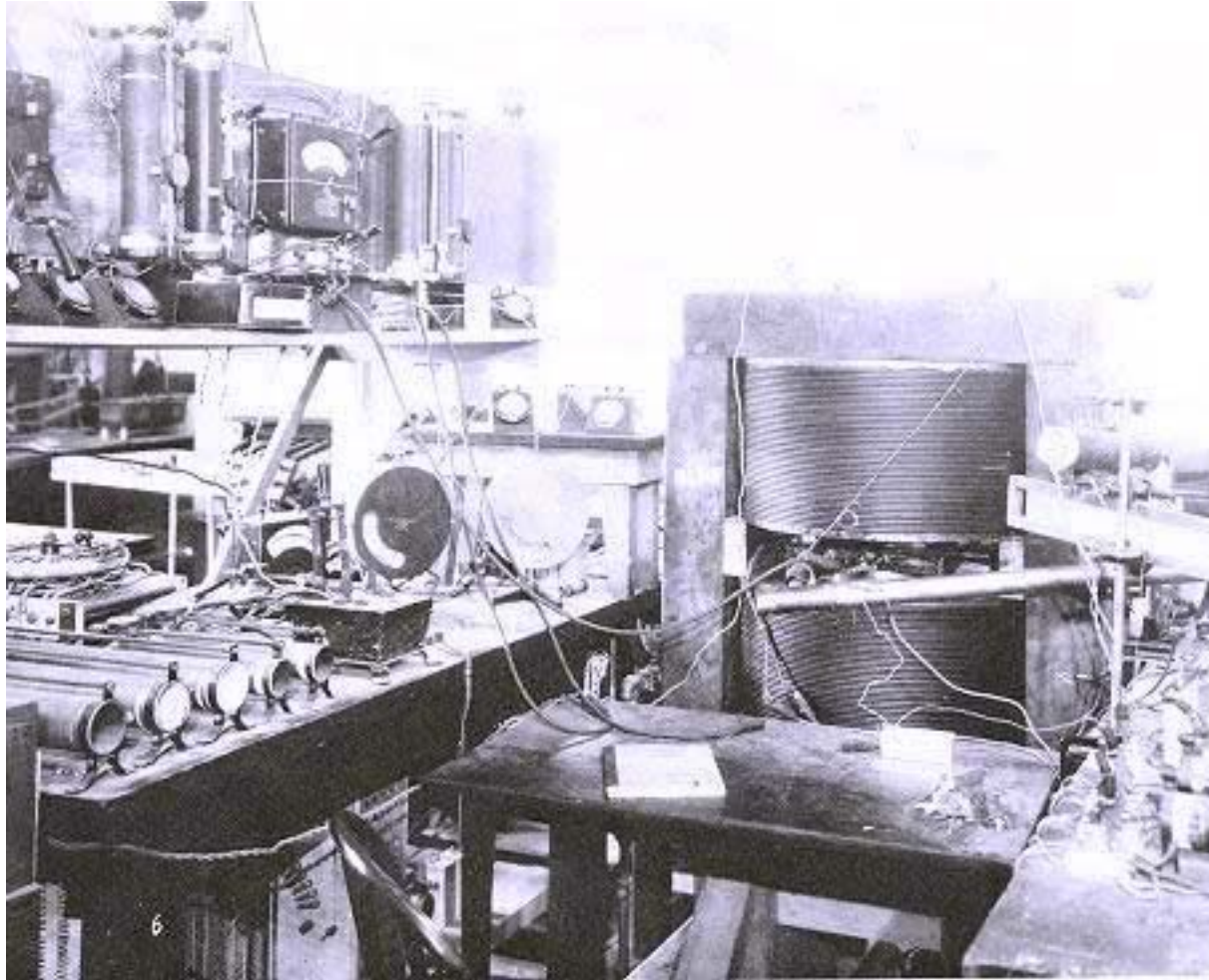
Grundprinzip I



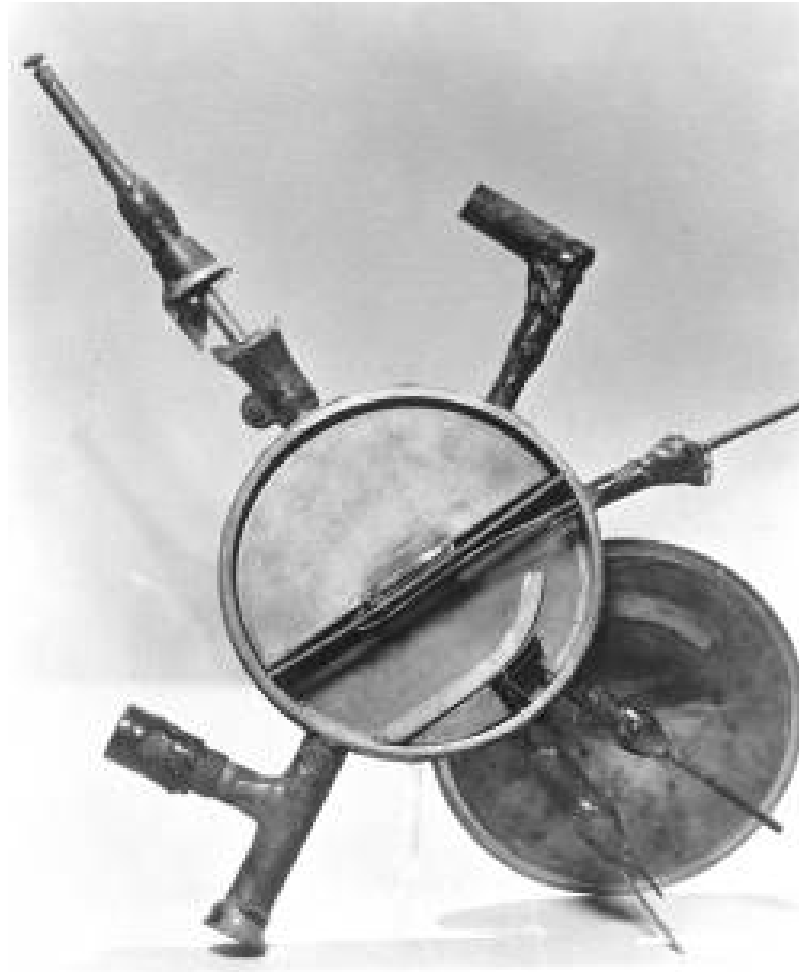
Grundprinzip II



Lawrence (1932)



Original



1939

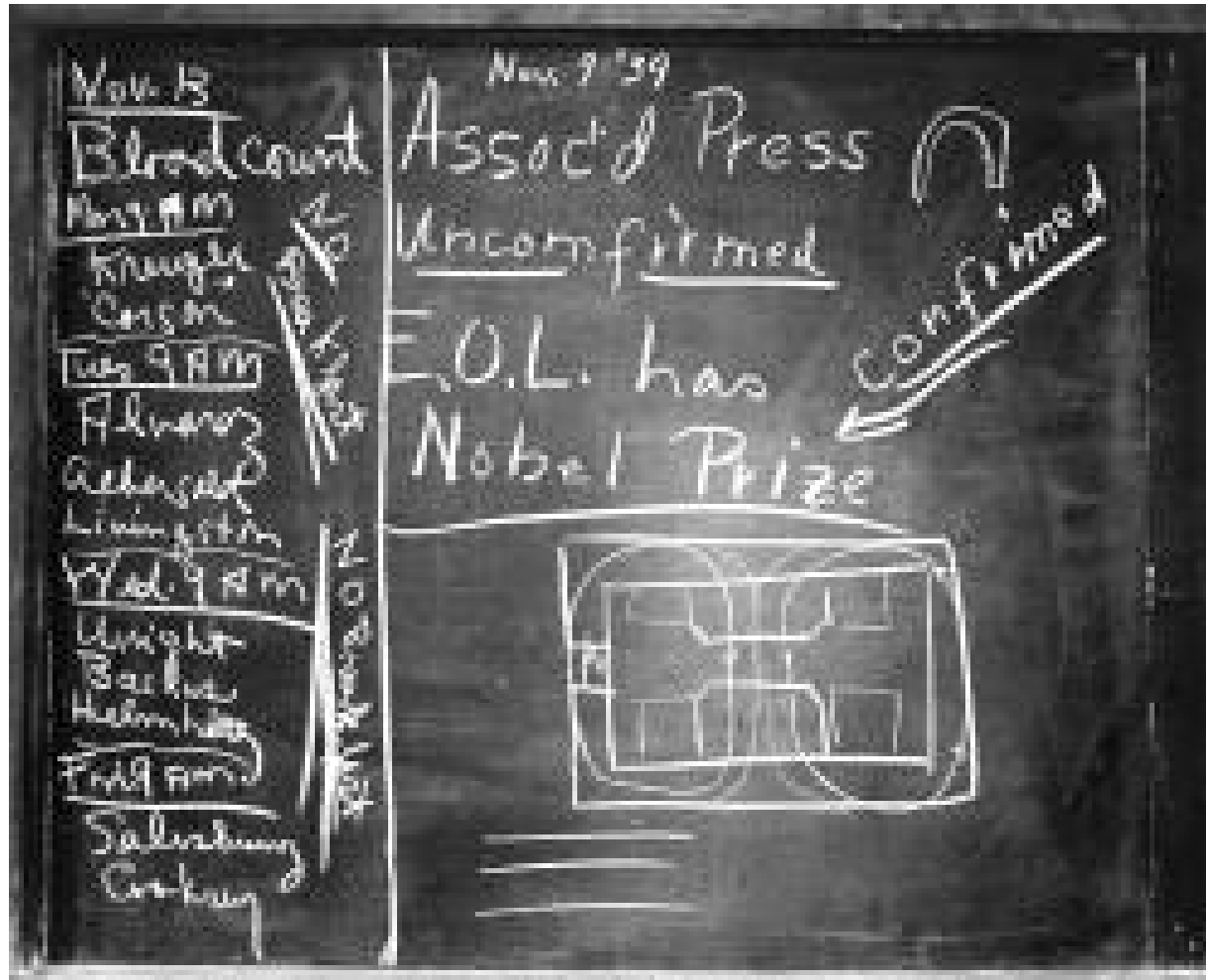


Berkley's 60'' Zyklotron-Magnet

In der Presse...



9.11.1939



Die „Harmonischen“

Beschreibt das Verhältnis

$$h = \frac{f_{Rf}}{f_{Rev}}$$

Viele Zyklotrons können mit unterschiedlichen "h"s betrieben werden.

Der „K“ Faktor

Gibt Information über die maximale Energie des Zyklotrons

$$E[\text{MeV}] = K \cdot (Q / A)^2$$

Beispiel: $K_{\text{MSU}} = 500$, C^{6+}

➔ $E_{\text{Max}} = 500 \cdot (6 / 12)^2 = 125 \text{ MeV}$

Problem: $\gamma = \text{const.}$

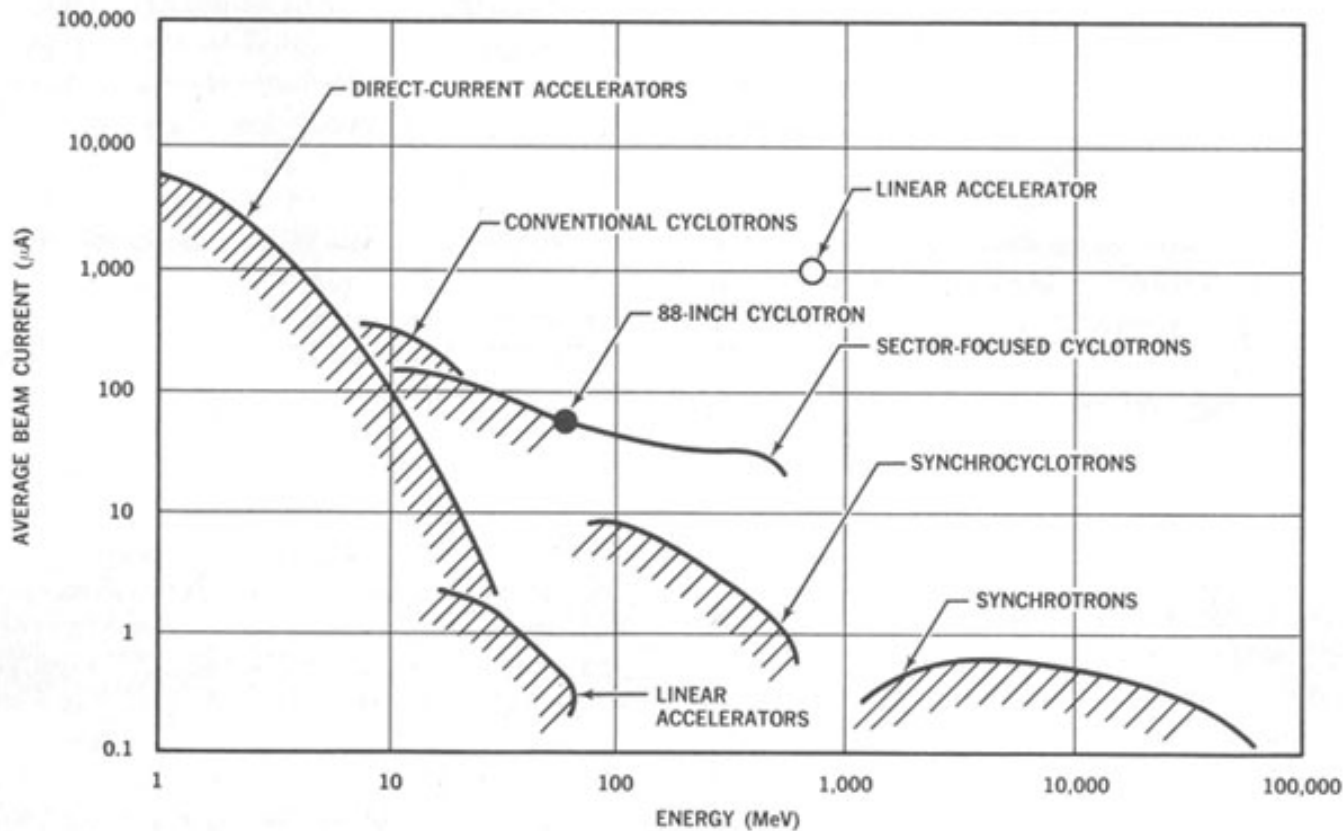
Zwei Möglichkeiten:

(1) Änderung der Hf-Frequenz („*Synchro-cyclotron*“)

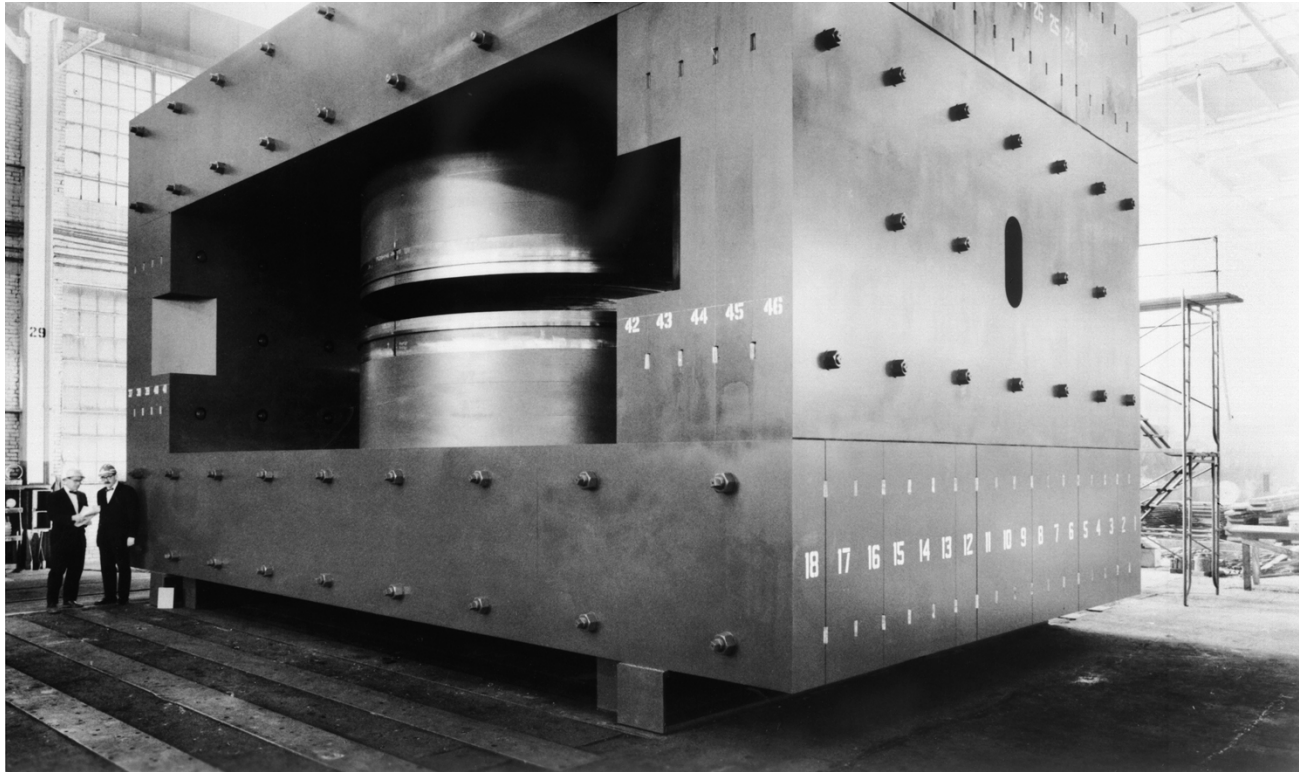
(2) Anpassung des radialen Magnetfelds („*Iso-cyclotron*“)

$$\omega_Z = \frac{e}{\gamma m_0} B_Z(r) = \text{const.}$$

Durchschnittlicher Strahlstrom



Synchro-Zyklotron

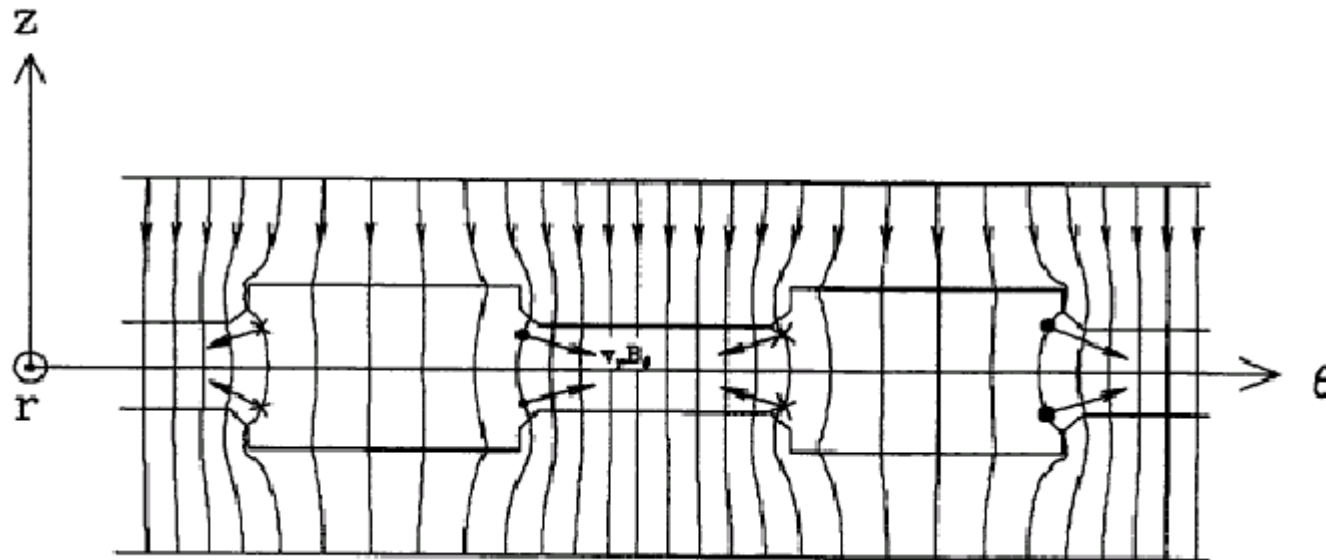


Synchro-zyklotron des NASA Langley Research Center.
3000 t (!) Eisen als Herz des 600 MeV p^+ Beschleunigers.

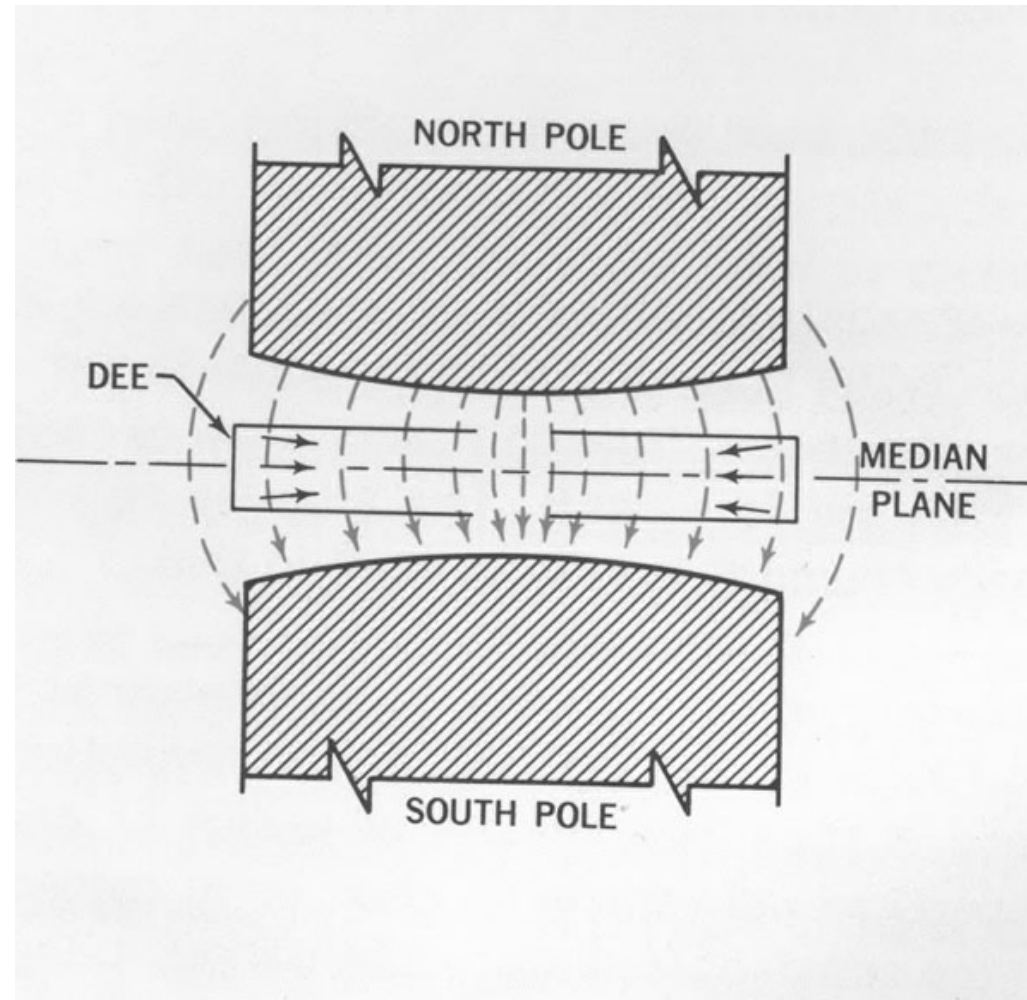
Iso-Zyklotron

Problem: Inhomogenes Magnetfeld führt zu Instabilitäten !

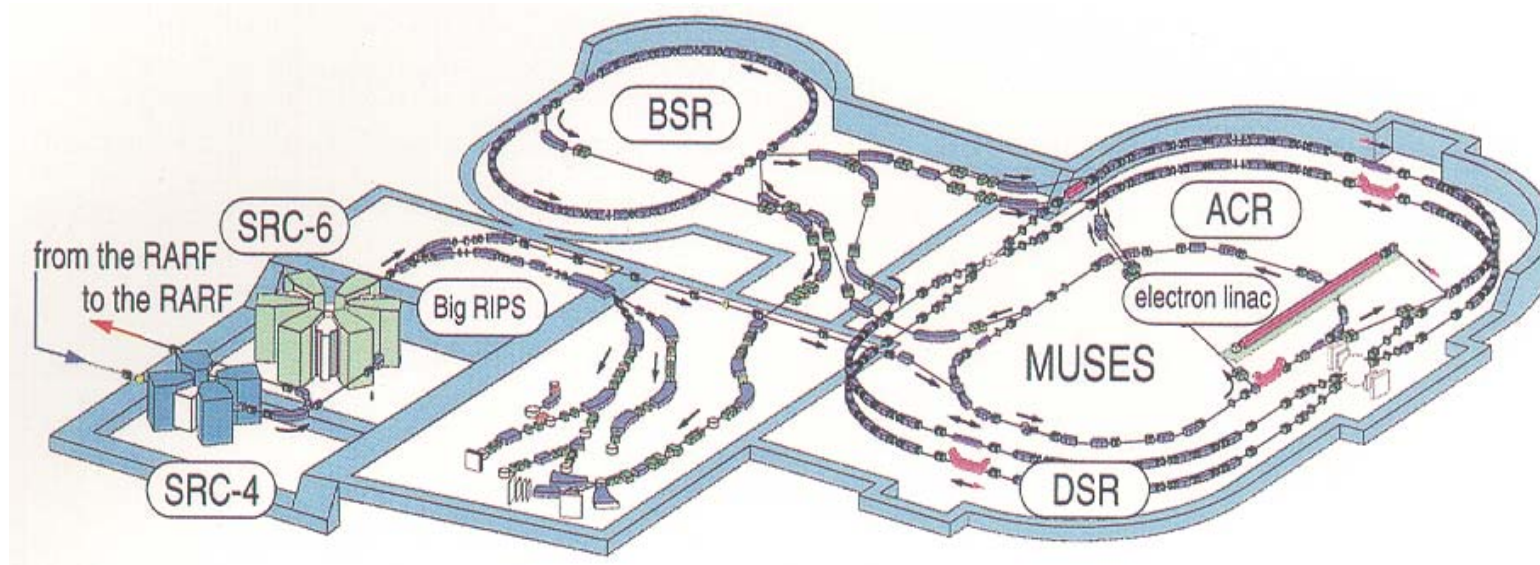
Lösung: Kontenfokussierung.



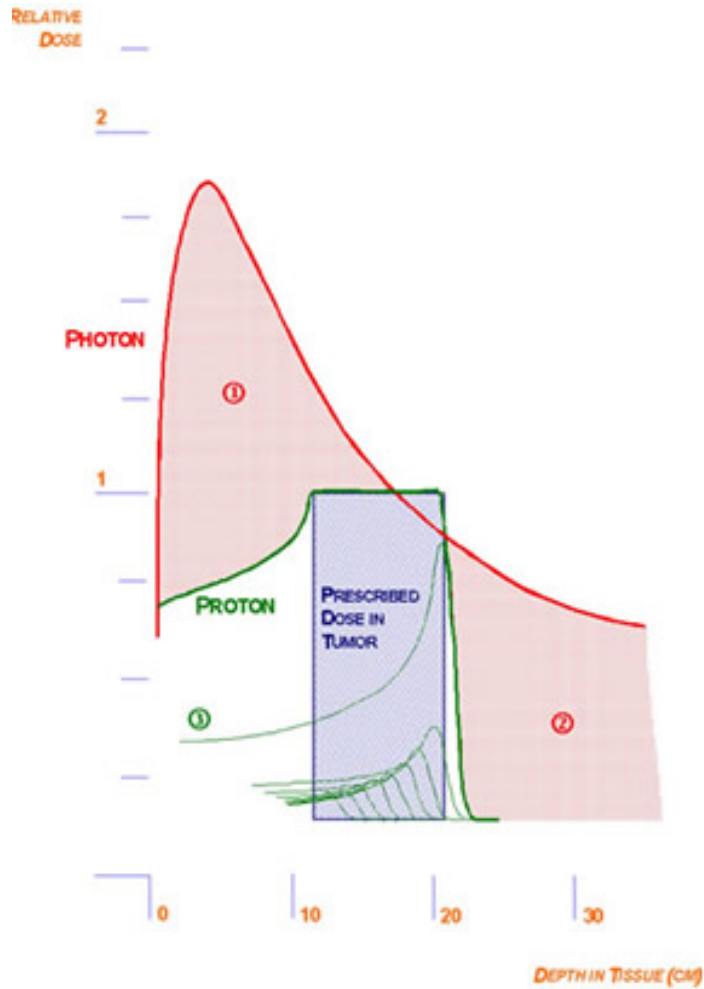
Vertikale Strahlfokussierung



Einsatzgebiete: RIKEN



Einsatzgebiete: Protonentherapie



Synchrotrons

- Grundlagen: R. Eichhorn, Mittwoch
- LHC und LHC Injektorkette: E. Jensen (Donnerstag)
O. Brüning (Donnerstag)
- Detektoren - CMS: D. Barney (Donnerstag)
C. Lippmann (Freitag)
- Anwendungen: K. Wille (Dienstag)

Zusammenfassung

- Beschleuniger vielfältige Instrumente für Grundlagen- und angewandte Forschung.
- Nur einige *Beispiele abgedeckt*. Außerdem noch Betatron, Mikrotron, Laserbeschleunigung, Synchrotron-strahlungsquellen, FELs, RIB Einrichtungen, etc...

Wenn "Heyday", dann **jetzt** !

Nun aber...

- Warum Hochenergiephysik ?

Größerer Rahmen:

- Kosmologie - C. Stegmann
- Standardmodell - G. Hiller