



Kapitel 03:

Die Haupttypen der Teilchenbeschleuniger



Inhalt

- Die elektrostatischen oder direkten Beschleuniger
- Betatron
- LINAC
- Zyklotron
- Synchrozyklotron – Festfrequenzzyklotron = Isochronzyklotron
- Synchrotron
- Prinzip der Phasenstabilität
- Allgemeine Diskussion zum Prinzip der Phasenstabilität
- Speicherring
- Parameter einiger typischen Beschleuniger
- Meilensteine in der Beschleunigerphysik



Die elektrostatischen oder direkten Beschleuniger (Ausnahme: Tandem)

- Elektronen und positiven Ionen (meist H^+ oder D^+)
- evakuierte (Glas-)Röhre (Länge: ca. 10 cm bis einige m), an jedem Ende Elektroden
 - Eine Elektrode liegt auf Erdpotential und stellt das Target dar
 - die andere Elektrode wird auf sehr hohe positive oder negative Spannung gelegt.
- Ionen- oder Elektronenquelle (Kathode) innerhalb des Beschleunigungsrohres, integriert im Hochspannungsteil.
- Kinetische Energie, mit welcher die Teilchen das Target treffen = angelegte Spannung zwischen den Elektroden mal Ladung der Teilchen
- Tandem: auch e^+ und negative Ionen



Charakteristika direkter Beschleuniger

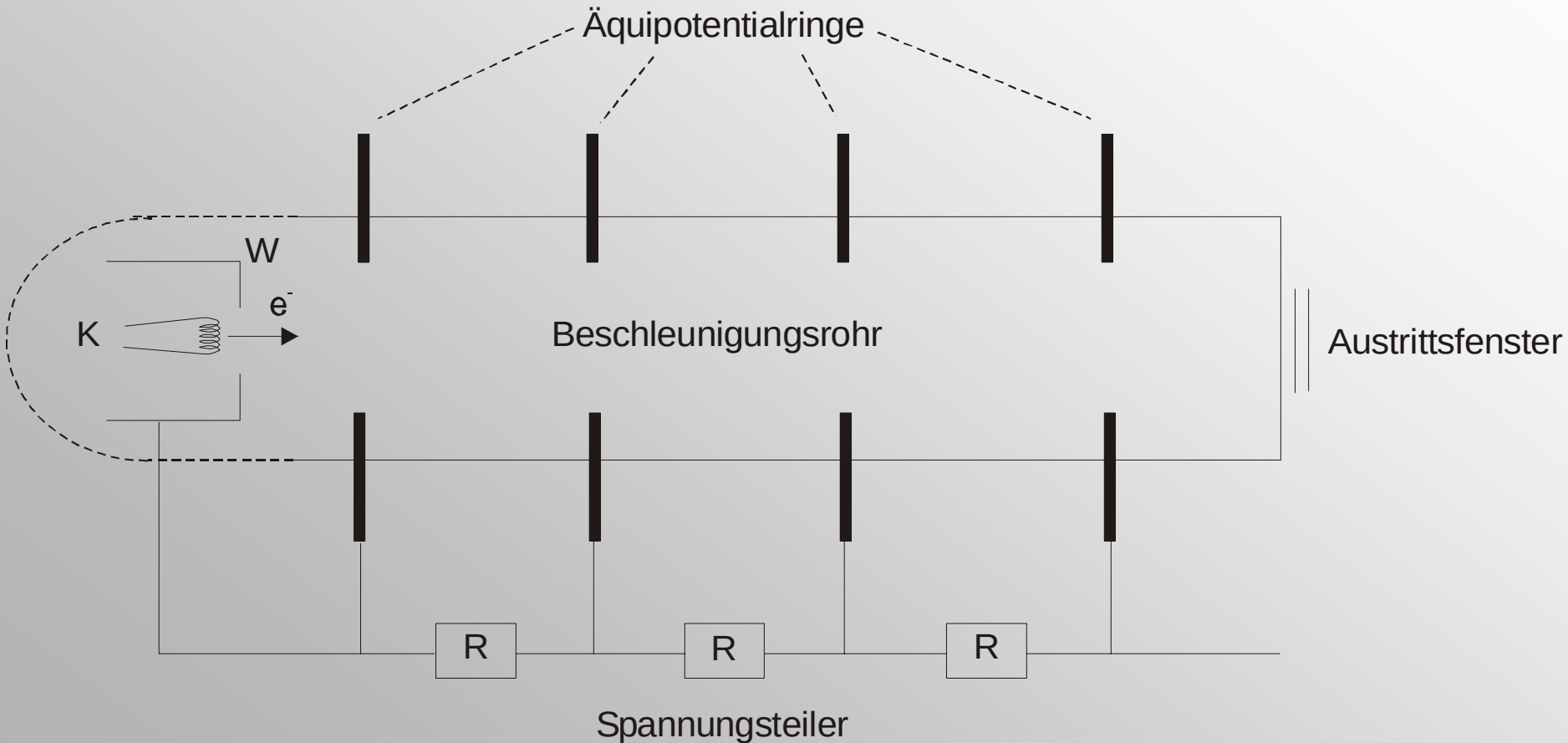
- Ziel: möglichst hohe Spannung
- Spannung limitiert durch die Entladung innerhalb und außerhalb der Beschleunigungsrohre (Überschläge)
 - Entladung immer zwischen HV-Elektrode und Erdpotential
 - Längs des Beschleunigungsrohres (innen und außen)
 - Zur Kammer-/Tankwand, wenn in einem Tank
- → langes Rohr führt zu grossen Dimensionen!
- → Abstand zwischen Rohr und Wand groß
- Maximalspannung einige MV, Energie einige MeV
- Wenn Beschleuniger in einem Tank (Inertes Gas (SF₆) Druck: 10 - 15 atm) → Spannung bis ~ 10 MV.



Vorteile direkter Beschleuniger

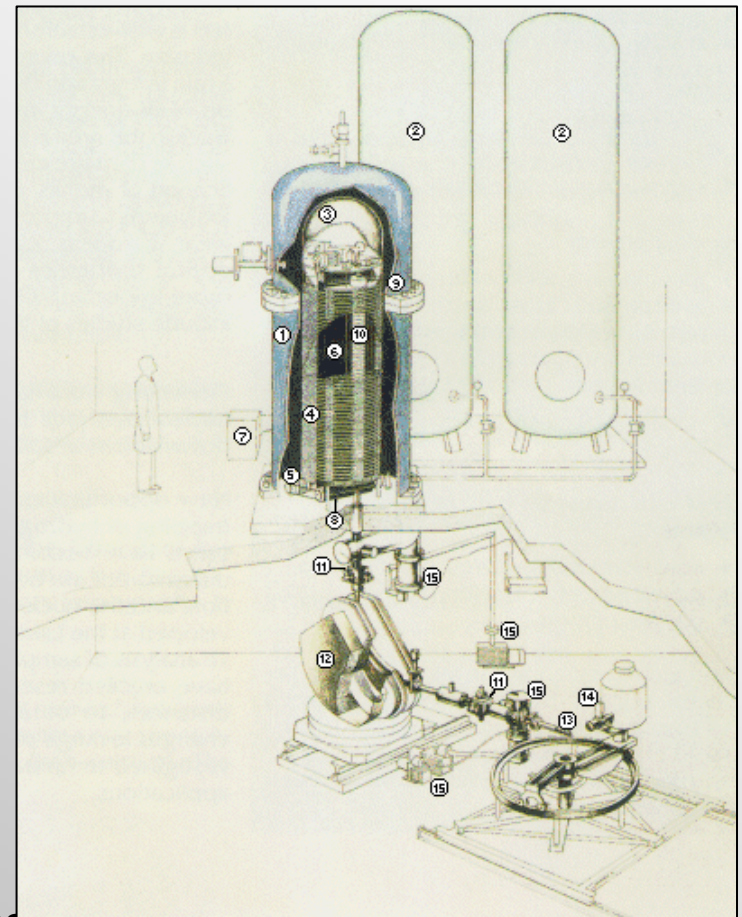
- Hohe Stromstärke
- Gute Gleichstromcharakteristik (DC Strahl)
- Hohe Energiestabilität (besser als 0,1 %)
- Gute Strahlkollimation

Schematische Darstellung eines direkten Beschleunigers



2,5 MV Electrostatic Accelerator Helsinki / Finland

1. Accelerator tank
2. Storage tanks for insulating gas
3. High-voltage terminal
4. Equipotential rings
5. Driving motor for the charging belt
6. Charging belt
7. Charging voltage supply
8. Charging comb
9. Ion source
10. Accelerating tube
11. Slits
12. Magnetic analyzer
13. Target
14. Ge(Li) radiation detector
15. Turbomolecular and fore-vacuum pumps





25URC Pelletron

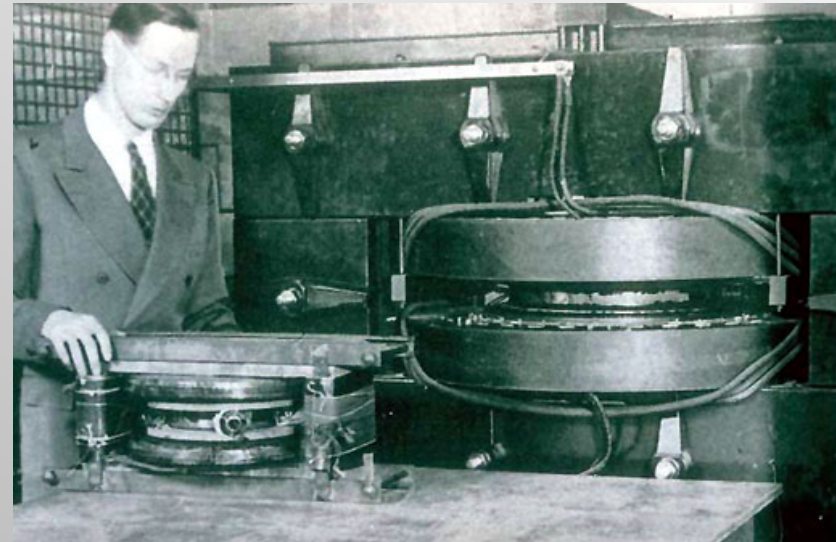
*Oak Ridge
National
Laboratory-
HRIBF*



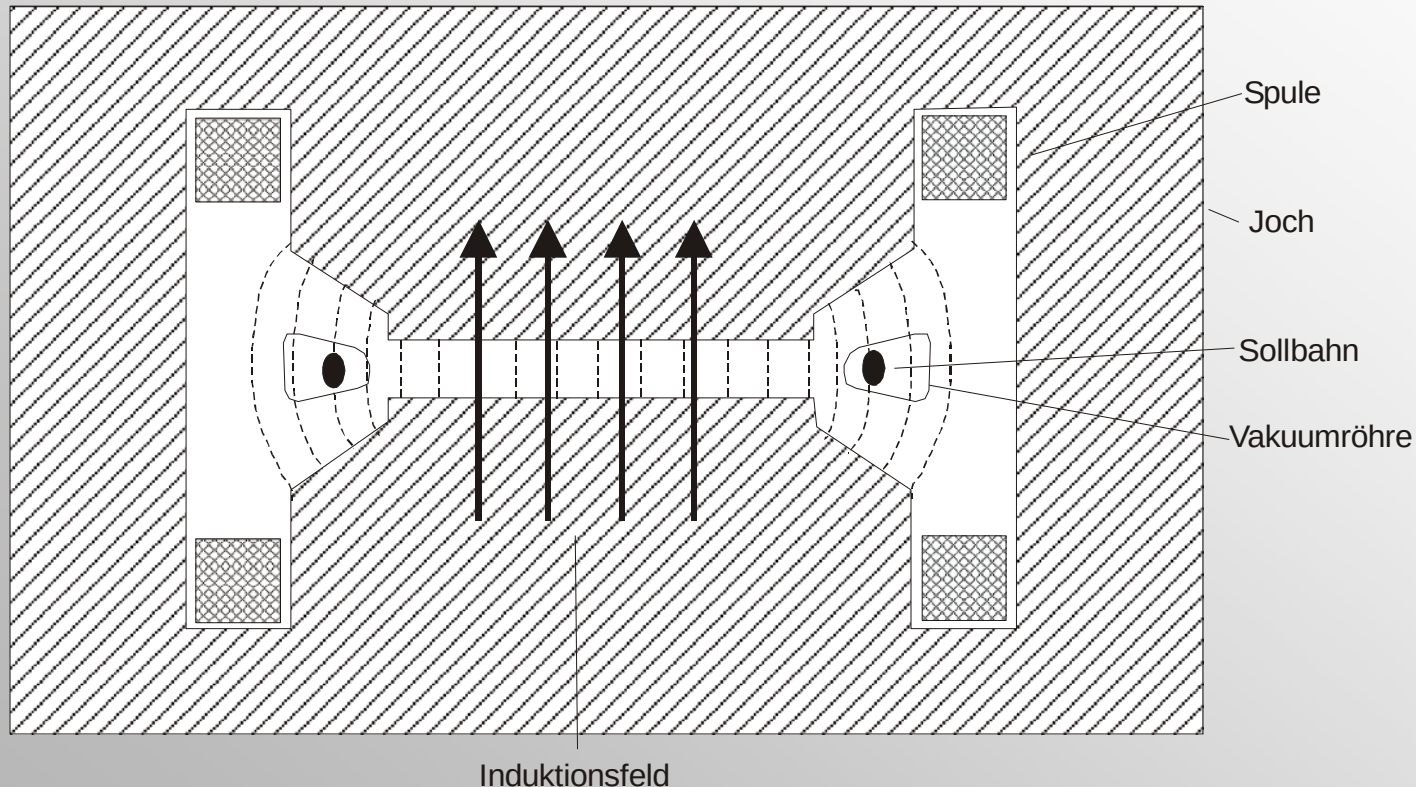


Betatron

- Erdacht 1922 von Wideröe, wollte damit 1926 promovieren, wurde abgelehnt, baute daher einen „geradeaus“-Beschleuniger (Wideröe Linac)
- 1935 erstes funktionstüchtiges Betatron von Max Steenbeck, allerdings unter Geheimhaltung
- **1940 Donald William Kerst, Universität of Illinois, gebaut**
 - Elektronenenergie 2,3 MeV
- 1942 verbessertes Betatron: ca. 10-fache Energie
- Ein Betatron zählt zur Gruppe der **periodischen Beschleuniger**



Schematische Darstellung des Betatrons



Das zeitlich veränderliche Magnetfeld erzeugt in Richtung des umlaufenden Elektronenstrahls ein elektrisches Feld. Dieses elektrische Feld beschleunigt die Elektronen.



Funktion eines Betatrons

- Um den Strahl auf einer **Kreisbahn** zu halten, muss das **Magnetfeld einen bestimmten radialen Verlauf** haben. Dieser Verlauf wird durch **besondere Formgebung der Pole** erreicht und bewirkt eine **Strahlfokussierung** um die ideale Bahn.
- In diesem fokussierenden Feld **führen die Teilchen in der Bahnebene sowie senkrecht zur Bahn Schwingungen aus, die man als Betatronschwingungen bezeichnet.**
- Nach Erreichen der **Endenergie** werden die **Elektronen durch elektrische oder magnetische Felder aus dem Betatron gelenkt.**

Bestandteile und Funktion

- **Magnetjoch**, dessen Pole ein nach außen hin abfallendes Feld erzeugen
- **Magnetfeld durch Strom** (Frequenz 50 – 200 Hz)
- Beschleunigung während $\frac{1}{4}$ Schwingung ($I=0$ bis $I_{\max}$)
- **Toroidale Vakuumkammer**



Aufgabe des Magnetfeldes

- Der **magnetische Fluss** innerhalb des Beschleunigungsrohres **ändert sich mit der Zeit** und **induziert ein elektrisches Feld**, dessen Feldlinien Kreise bilden, welche orthogonal zum Symmetriezentrum ausgerichtet sind
- ($\text{rot} E = -dB/dt$).

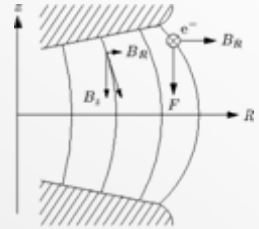
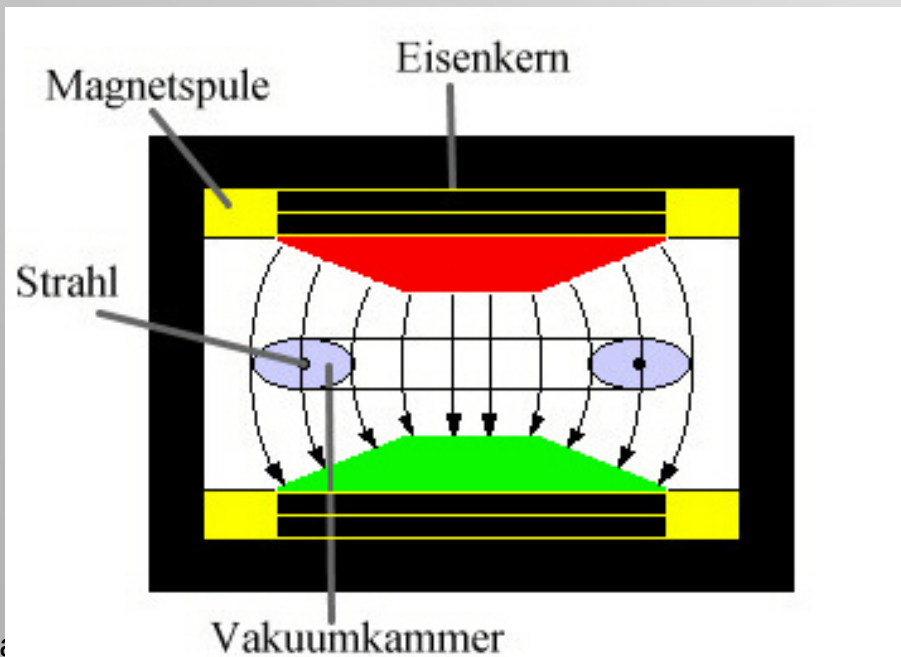


Abb. 2.10: Axiale Stabilitätsbedingung

- Einer dieser Kreise wird als „**Sollkreis**“ oder „**Sollbahn**“ des Beschleunigers bezeichnet. Das **elektrische Feld beschleunigt die Elektronen**.
- Das in der Vakuumkammer vorhandene **magnetische Feld übt eine zum Zentrum gerichtete Lorentzkraft** auf die Elektronen aus und **hält sie damit auf einer Kreisbahn**.

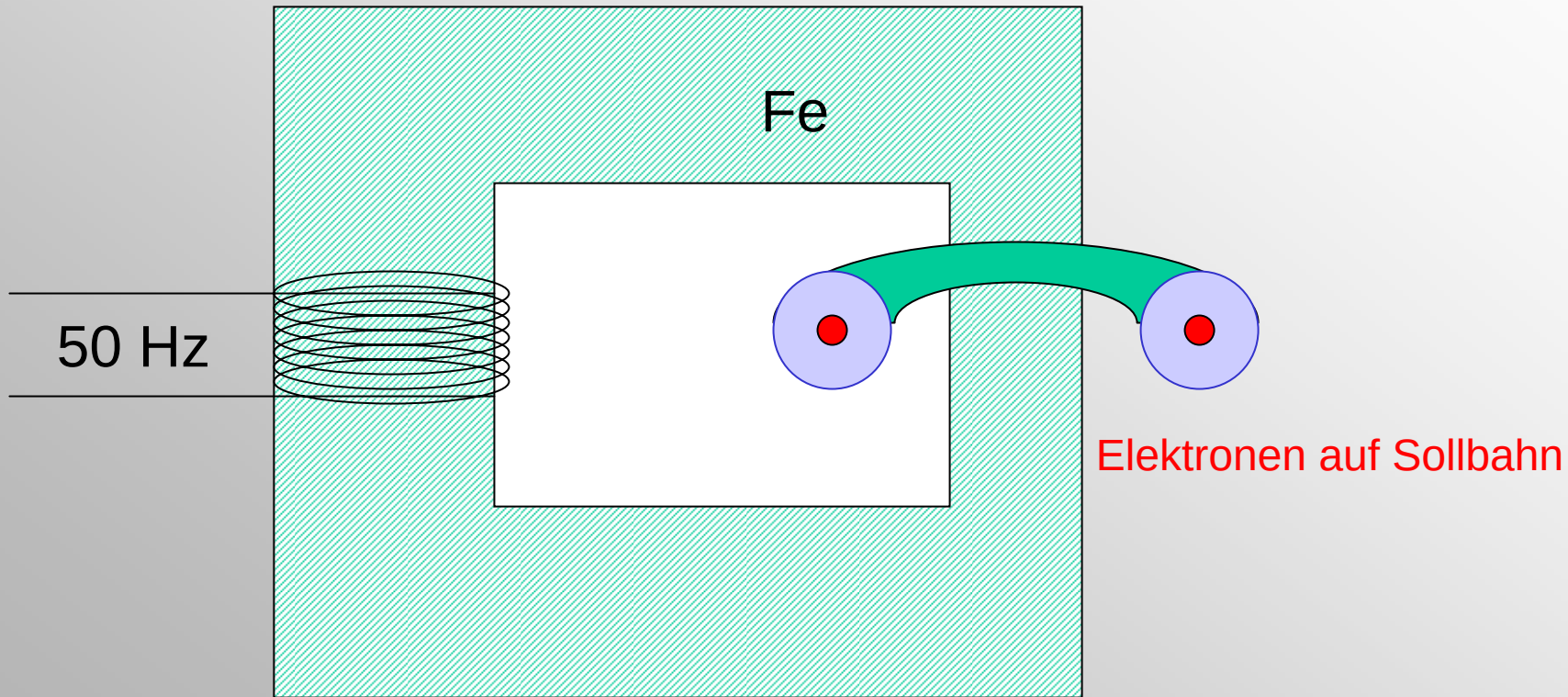
Analogie Betatron - Transformator

- Primärstrom ist jener Wechselstrom, welcher das magnetische Feld aufrecht hält
- Sekundärstrom bilden die Elektronen, welche in der Vakuumkammer beschleunigt werden

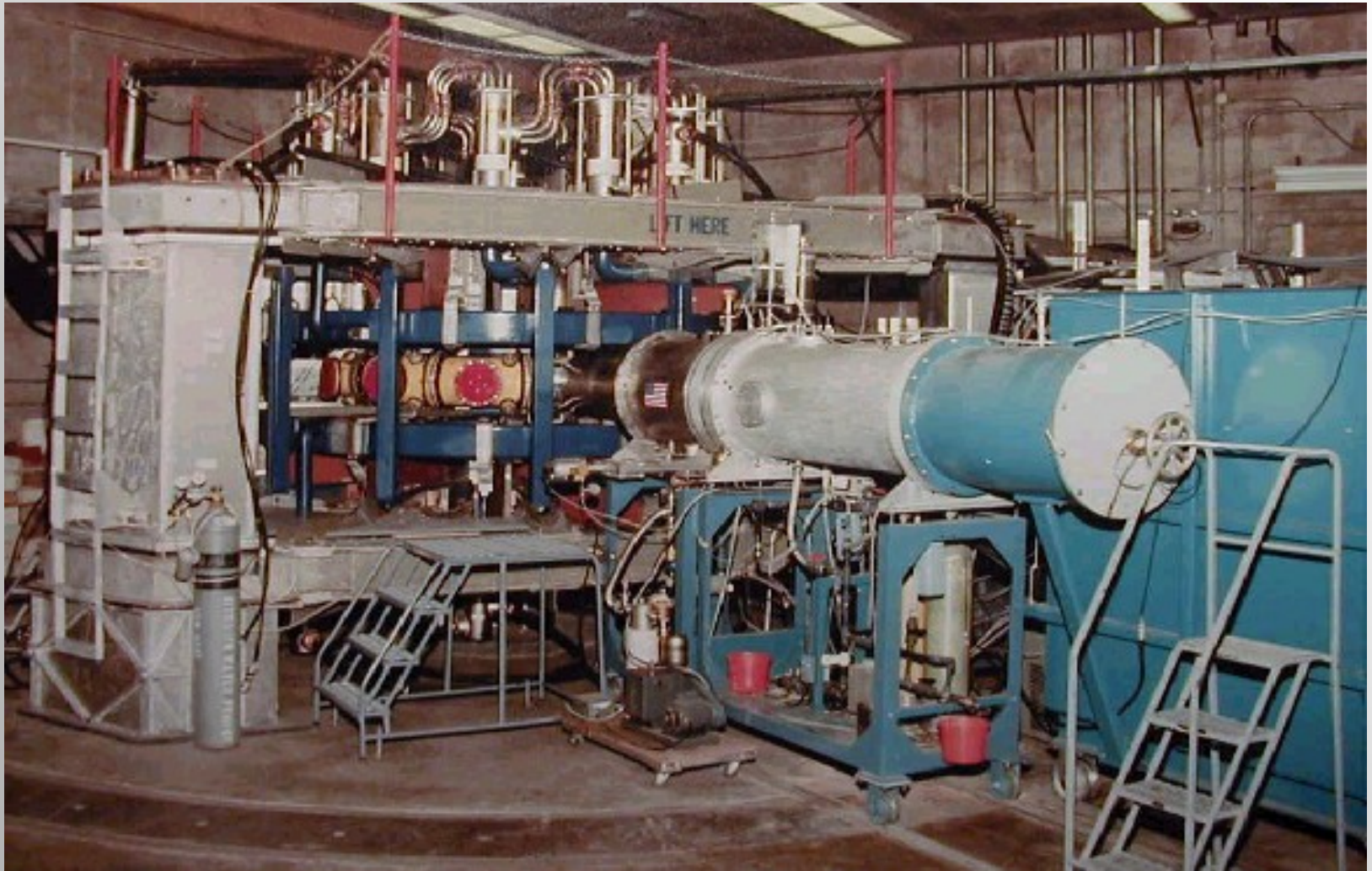


Elektronenstrahl = "Sekundärwindung"

Betatron als Transformator



Betatron





Betatron – Relation

Wideröe – Bedingung = $\frac{1}{2}$ -Bedingung

- Magnetische Feld hat 2 Funktionen:
 - Führungsfeld
 - Feld zur Beschleunigung der Teilchen
- Zusammenhang zwischen dem Führungsfeld am Sollkreis und dem Mittelwert des Feldes innerhalb des Sollkreises (engl.: Betatron - Relation, deut.: Wideröe – Bedingung, tw. auch $\frac{1}{2}$ -Bedingung).
- → Ableitung dieser Bedingung:

1/2-Bedingung

- Maxwell: $\text{rot} E = -\partial B / \partial t \Leftrightarrow \oint E ds = -\int (\partial B / \partial t) dA = -d\Phi / dt$

- magnetischer Fluss:

$$\Phi = \pi r^2 \bar{B}$$

$$2\pi r E = -\frac{d\Phi}{dt}$$

- Linienintegral über das elektrische Feld

$$F_t = -eE = -\frac{dp}{dt}$$



- Tangentialkomponente:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{e}{2\pi r} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{2} e r \frac{d\bar{B}}{dt}$$



- r ist gegeben durch (Kap. 2):

$$|q| v B = p \frac{v}{r} \rightarrow r = \frac{p}{|q| B}$$

$$p = e r B$$

- B als Induktionsfeld am Sollkreis
- differenzieren nach der Zeit t

$$\frac{dp}{dt} = e r \frac{dB}{dt}$$

- Vergleicht man

$$\frac{dp}{dt} = \frac{e}{2\pi r} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{2} e r \frac{d\bar{B}}{dt} \quad \text{und}$$

$$\frac{dp}{dt} = e r \frac{dB}{dt}$$

- $\rightarrow \frac{dB}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d\bar{B}}{dt}$

- Integration:

$$B(t) = \frac{1}{2} \bar{B}(t) + \text{const.}$$

1/2-Bedingung

- Führungsfeld muss 1/2 so gross wie mittleres eingeschlossenes Feld sein.



Interpretation

- Induziertes Feld ist Wechselfeld → Feld kann die Elektronen nur in jenem Teil der Halbwelle beschleunigen, in dem das Feld richtig gepolt ist
- Elektronen werden nur die Hälfte (oder weniger als die Hälfte) der Periode über durch den angelegten Wechselstrom beschleunigt
- Betatrons mit derselben Frequenz, wie jene des Wechselstroms gepulst
- Injektion der Elektronen wenn das magnetische Feld nahe Null ist
- Hauptparameter definiert durch Dimension und Feld $p = erB$

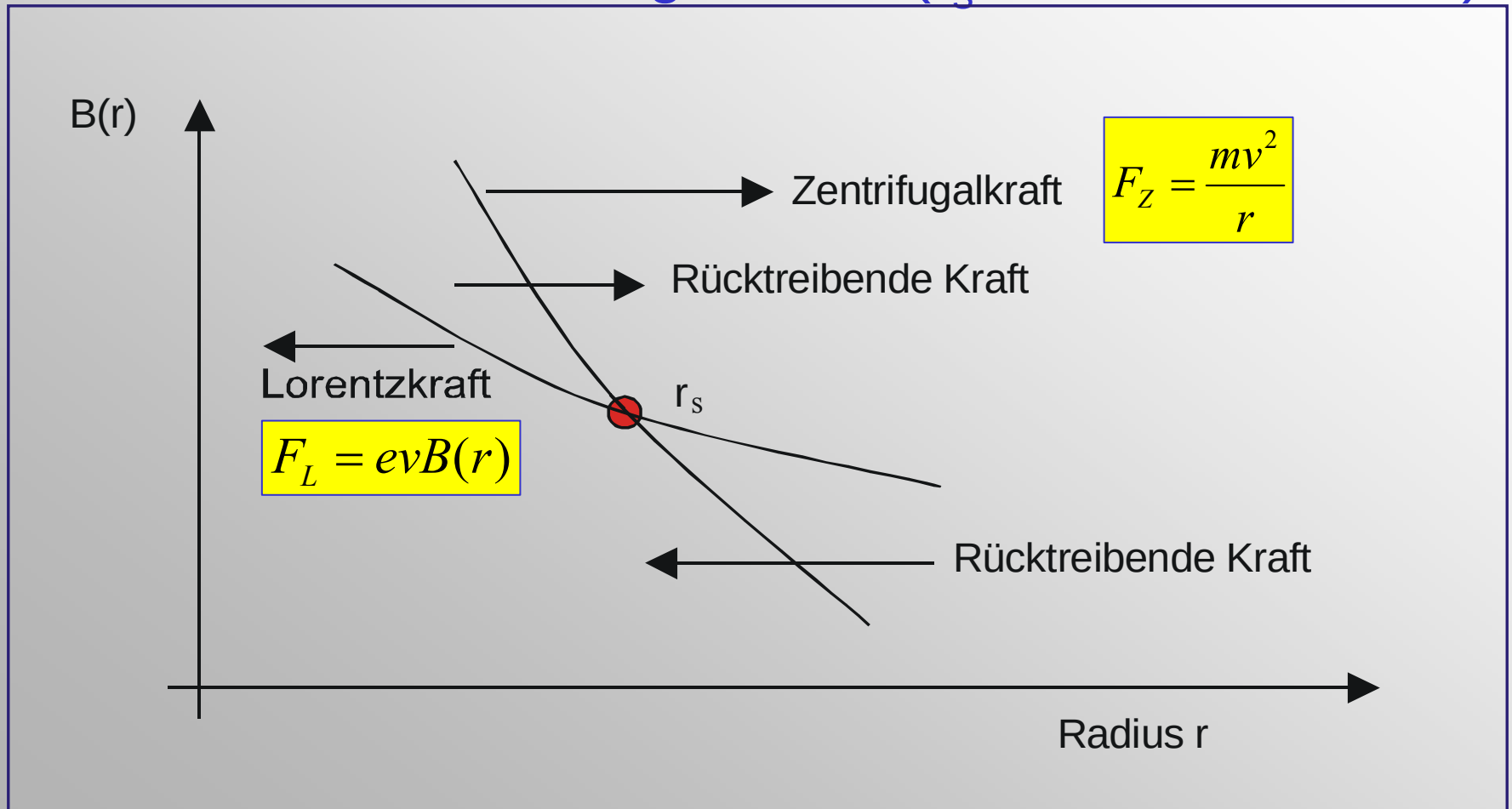


Verwendung / Einsatz

- Bei Maximum des magnetischen Feldes → Elektronen auf ein Target abgelenkt und abgebremst (Bremsstrahlung).
- Prinzipiell: Energien 5 - 300 MeV
- < Energie → elektrostatische Beschleuniger
- > Energie: hohen Kosten der Eisenjoche → andere Formen von Beschleunigern
- Einsatz des Betatrons (Energien < 20 MeV) Medizin (Strahlentherapie) und Industrie (Strukturanalyse und die Durchleuchtung von Metallen und Legierungen)



Fokussierende Wirkung in radialer Richtung durch ein radial nach außen abfallendes Magnetfeld, (r_s ist der Sollradius)



Abweichungen von Sollbahn

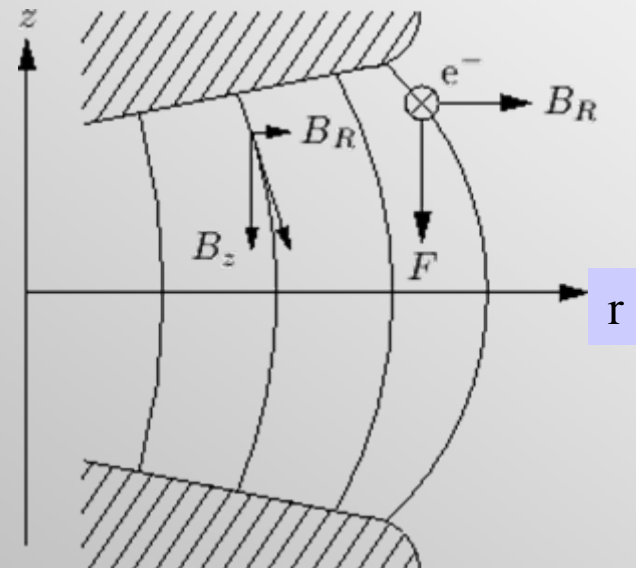
- Weichen die Teilchen radial **nach außen** ab, so wirkt die **Lorentzkraft rücktreibend**, weichen die Teilchen **nach innen** ab, so wirkt die **Zentrifugalkraft** als eine **nach außen** treibende Kraft.
 - Wenn $r < r_s$ dann $F_Z > F_L$
 - Wenn $r > r_s$ dann $F_Z < F_L$
- Um dies zu realisieren, muss das Magnetfeld wie folgt beschaffen sein: $B(r) \propto r^{-n}$ mit $n < 1$
- B-Feld muss langsamer als Zentrifugalkraft mit r abfallen, daher langsamer als $1/r$.

Axiale Stabilitätsbedingung

- Durch die Krümmung der Magnetfeldlinien nach außen ergibt sich ein Gradient ($B_r=0$ bei $z=0$).
- Es wird eine rücktreibende Kraft in vertikaler Richtung zu $z = z_0$ erzeugt. Die vertikale Stabilität im Betatron wird dann durch $B(r) \propto r^{-n}$ mit $n > 0$ gewährleistet.

- Stabilität hor. & vert.:

$$B(r) \propto r^{-n} \quad \text{mit} \quad 0 < n < 1$$





Linearbeschleuniger

(LINAC = Linear Accelerator)

- 1925 von Schweden Ising vorgeschlagen
- 1928 von Rolf Wideröe experimentell verifiziert





Aus der Geschichte, ...

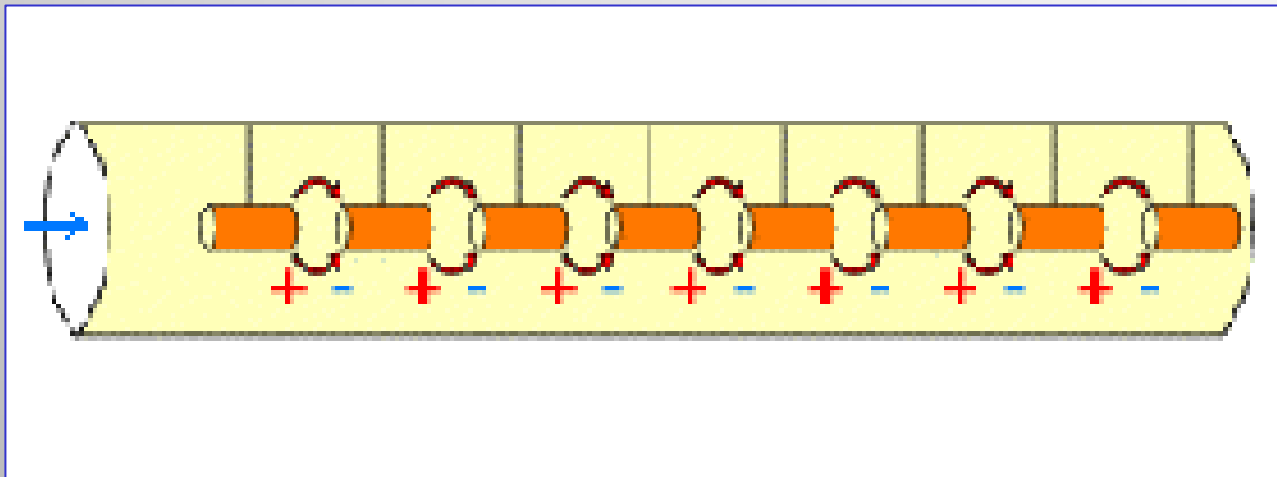
- R. Wideröe (1928), D.H. Sloan und E.O. Lawrence (1931)
- einer Reihe von **zylindrischen Röhren**, welche mit einem Hochfrequenzoszillator verbunden sind
- Die Verbindung zwischen den Elektroden und der Spannungsversorgung wird so gewählt, dass **aufeinanderfolgende Elektroden entgegengesetzte Polaritäten aufweisen**
- **Teilchenstrahl** wird entlang der Achse **im Inneren der Vakuumkammer** eingeschossen.



LINAC

- Beschleunigt geladenen Teilchen mit Hilfe von elektrischen Wechselfeldern
- Entlang einer in erster Näherung geradlinigen Bahn
- Beschleunigendes elektrisches Feld bewegt sich mit den Teilchen in dieselbe Richtung
- Elektromagnetisches Felder Frequenzen zwischen 10 und einigen 1000 MHz
- Hohlraumresonatoren oder Wellenleiter besonderer Konstruktion
- Form der Konstruktion ist Ausbreitung der Hochfrequenzfelder ausschlaggebend

Schematische Darstellung eines LINACs





Mechanismus der Beschleunigung

- Im Inneren der zylinderförmigen Elektroden ist das Feld immer Null
- In den Spalten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Elektroden wechselt das elektrische Feld mit der Frequenz des Generators
- Länge der zylinderförmigen Elektrode wird so gewählt, dass ein Teilchen, welches im ersten Spalt das für die Beschleunigung richtige Feld (richtige Polarität) „sieht“ auch im zweiten Spalt wiederum die richtige Polarität sieht.
- Jeder Hohlzylinder wird in einer bestimmten Zeitspanne passiert (Zeitspanne = halben bzw. ganze Periode des HF Generators).



Teilchen – Spalt - Feld

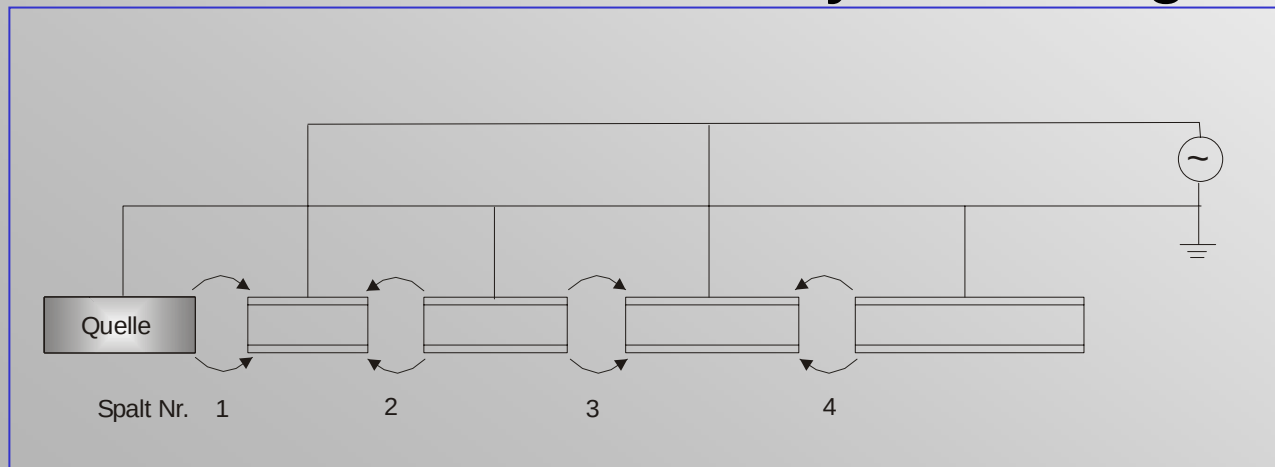
- → Teilchen „sieht“ das elektrische Feld in jedem Spalt in der gleichen Phase, wie im ersten Spalt und wird daher bei jeder Passage eines Spaltes **beschleunigt**
- Das Teilchen **erhöht damit seine Energie um qU** wenn **U** die Spannung im Spalt im Moment des Passierens des Teilchens ist

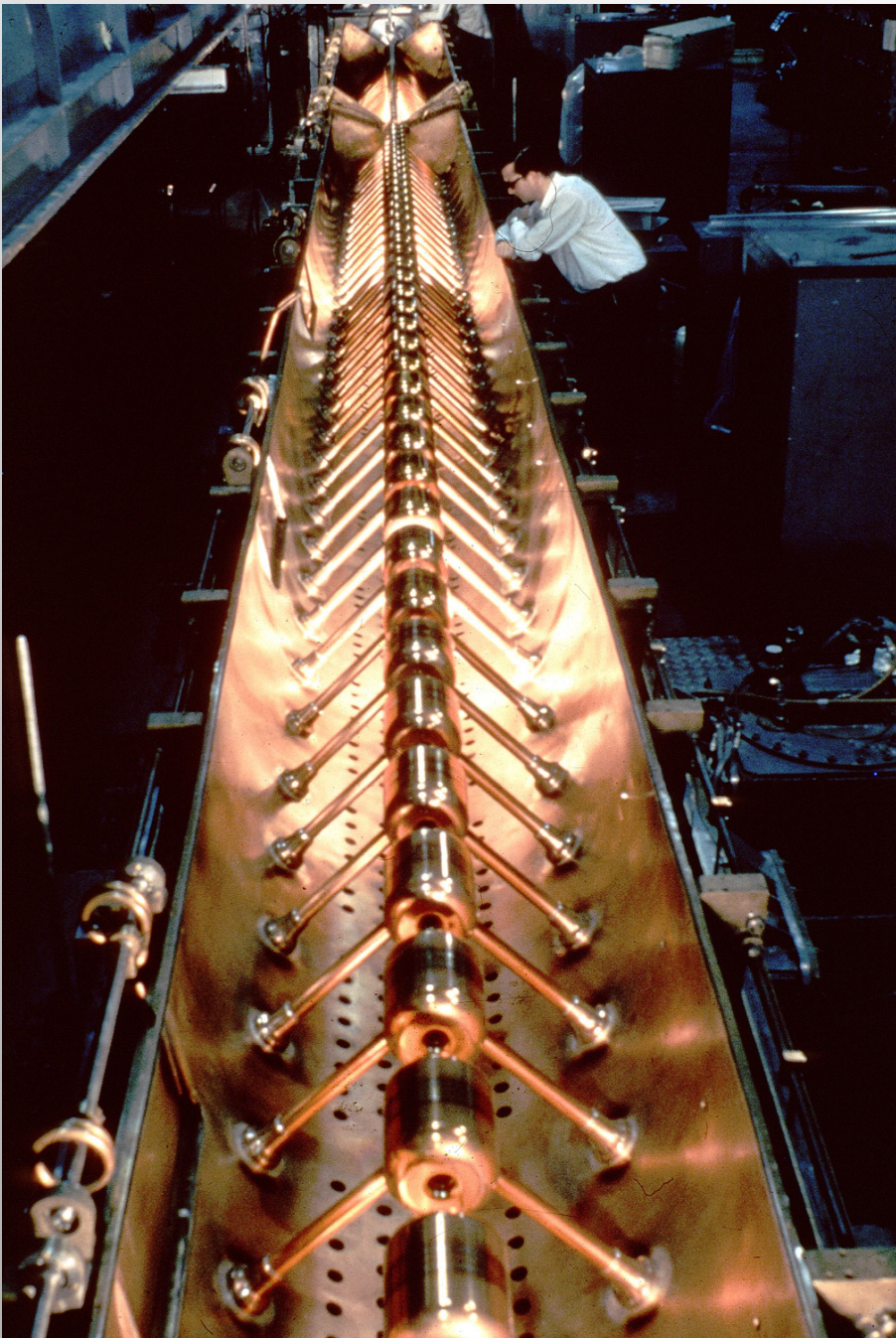
Länge der Zylinder

Länge = $v \frac{T}{2}$ mit T Periode und v Geschwindigkeit im jeweiligen Zylinder

- Geschwindigkeit nimmt von Zylinder zu Zylinder zu, → Zylinderlänge muss zunehmen
- Relativistischen Fall $v \rightarrow c$: Zylinderlänge:

$$c \frac{T}{2}$$





CERN LINAC1



Konstruktion eines LINACs

- Wenn Geschwindigkeit der Teilchen groß → Gesamtlänge der Maschine groß oder die Frequenz hoch. Typisch für Protonen ~200 MHz
- Kurze Baulänge bedingt hohe Frequenz
- Aber: große Energieverluste
- Ausweg: Hohlraumresonatoren – stehende Welle
- Oder: elektromagnetische Welle in der Beschleunigerstruktur „wandern“ zu lassen
- Falls das elektrische Feld am jeweiligen Aufenthaltsort des zu beschleunigenden Teilchens im Mittel die Richtung der Teilchenbewegung hat und bestimmte Phasenbeziehungen eingehalten werden, kann von der Wanderwelle Energie auf das Teilchen übertragen werden.

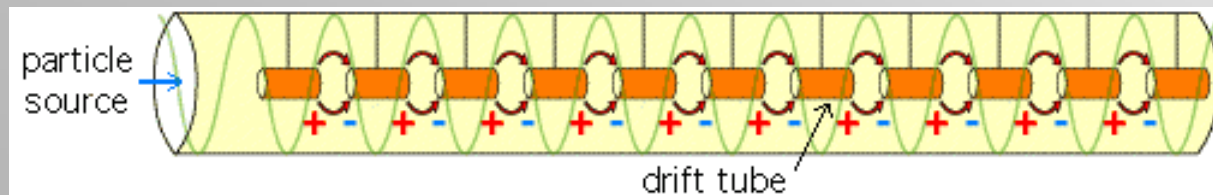


Zwei Klassen von LINACs

- LINAC mit **diskontinuierlicher** Beschleunigung
 - „Drift tube“ Linac – Beschleunigung nur zwischen Röhren
- LINAC mit **kontinuierlicher** Beschleunigung
 - Wanderwellen Linac – Teilchen „sieht“ immer Beschleunigungsfeld.

Diskontinuierliche Beschleunigung

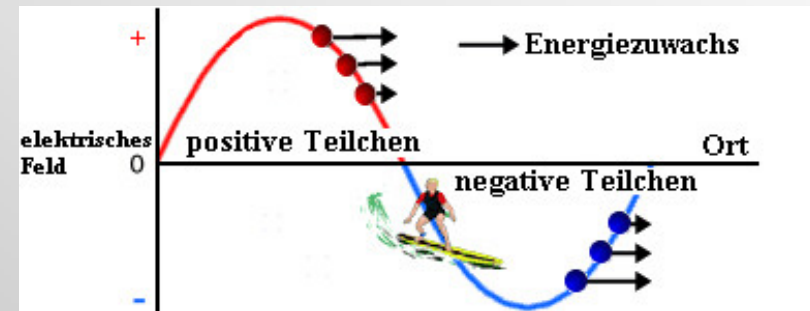
- Folge von zylindrischen Elektroden („drift tubes“)
- Beschleunigung findet nur im Spalt zwischen den Zylindern statt
- Verwendung: für die Beschleunigung von Protonen und schweren Teilchen (da Teilchengeschwindigkeit $v \ll c$).



Kontinuierliche Beschleunigung

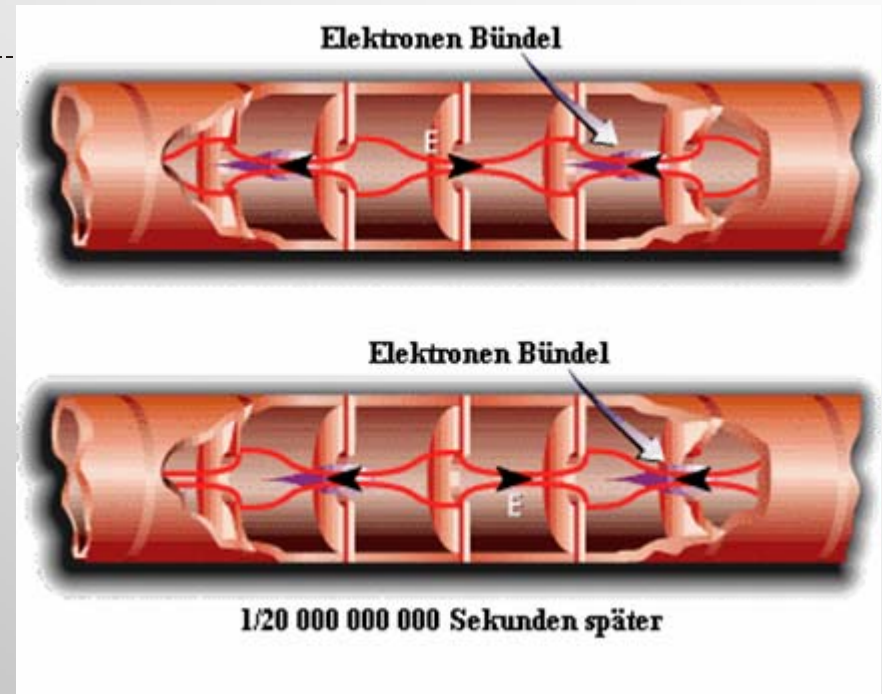
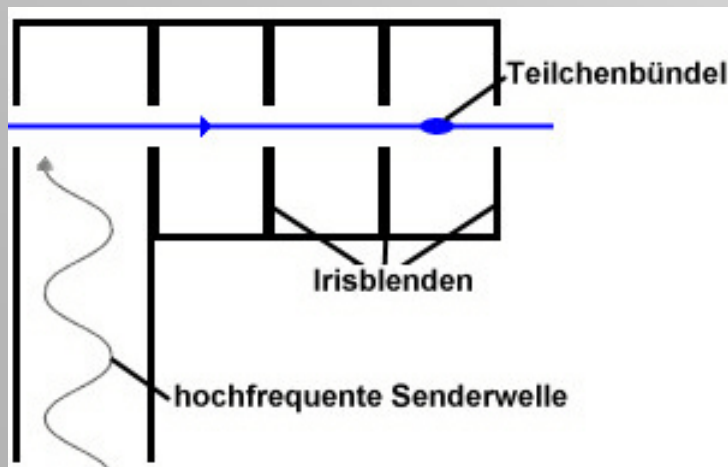
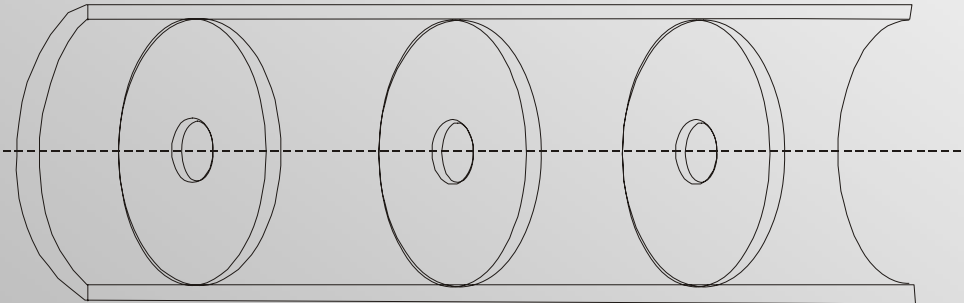
- Spezielle Wellenleiter, um elektromagnetische Wellen gleichzeitig mit den zu beschleunigenden Teilchen durch die Maschine wandern zu lassen.

- Verwendung: Elektronen



- Elektronen erreichen sehr schnell $\sim c$, Welle breitet sich mit $\sim c$ aus, „einfache“ Geometrie.

Wanderwellen-LINAC (engl: iris-loaded wafeguide, dt. auch "Runzelröhre")





LINAC Strukturen in anderen Beschleunigern

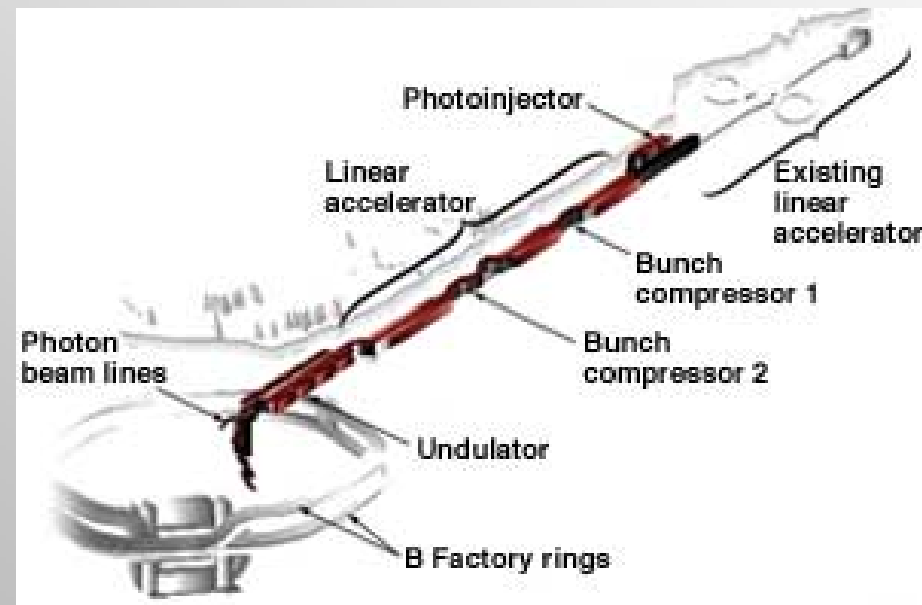
In Kreisbeschleunigern werden kurze Beschleunigungsstrecken benötigt, die aus einigen Kammern bestehen, man nennt sie *Kavitäten*.

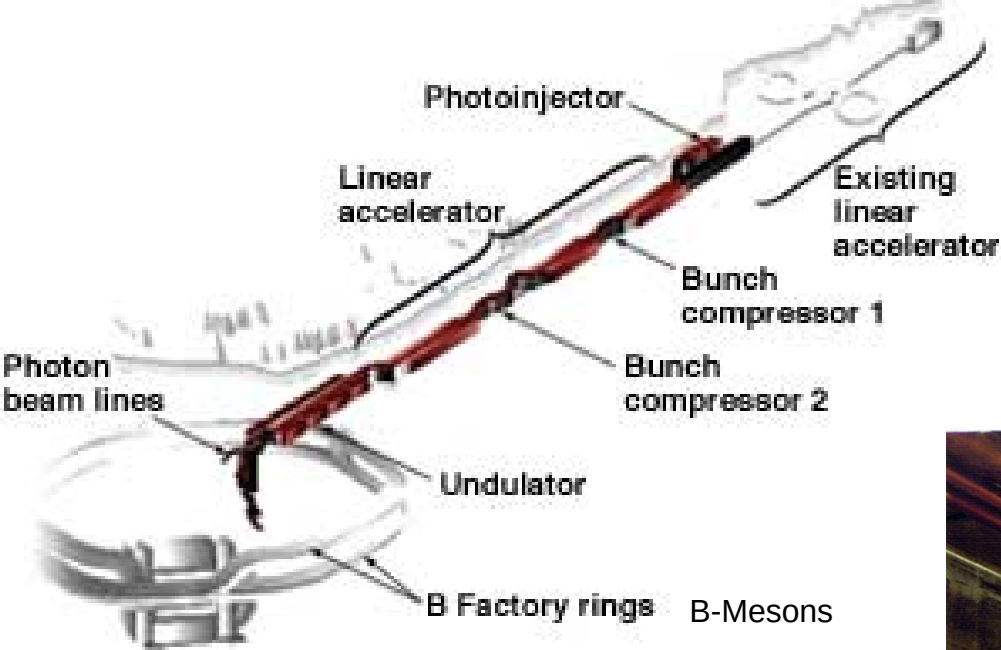
Prinzip ähnlich Linac



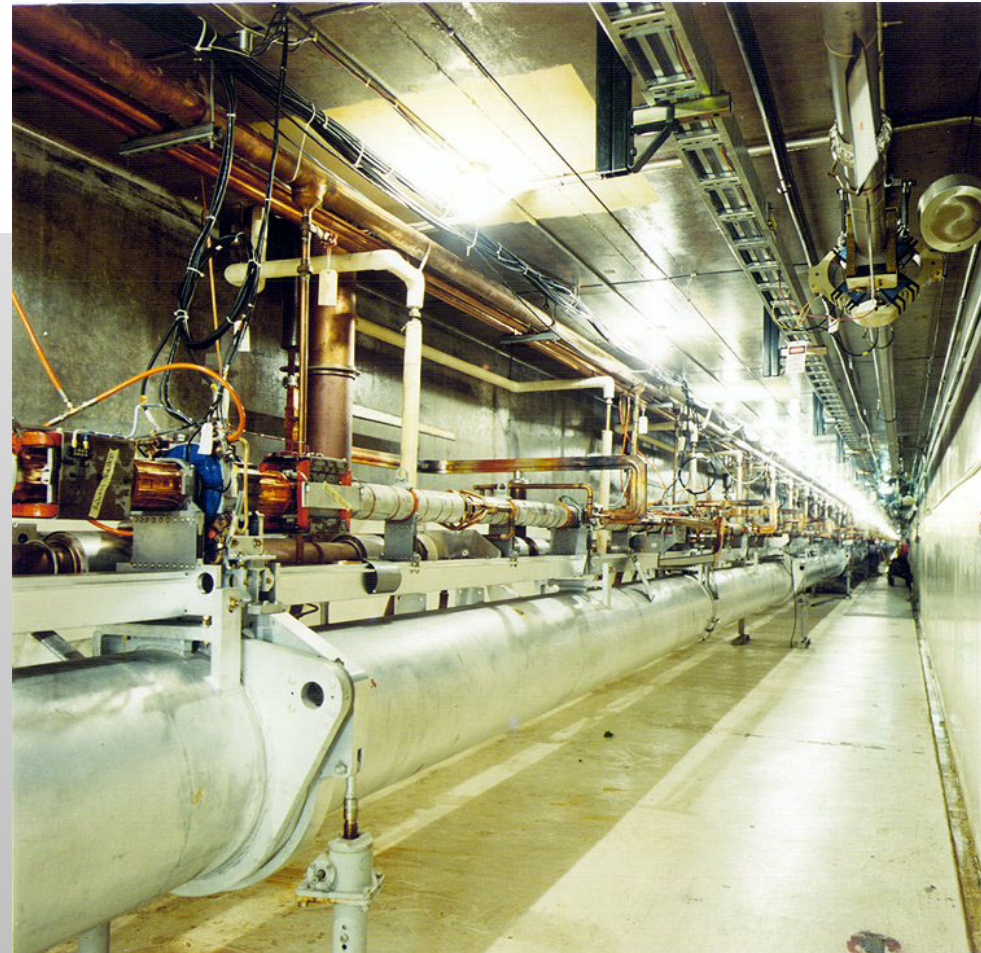
Beispiel LINAC

- Mehrzahl mit Energien $< 200 \text{ MeV}$
- Dient als Zusatz- (Injektor-) Maschinen für große Beschleuniger (Synchrotrons)
- Aber auch für die Beschleunigung von Elektronen bis zu mehreren GeV
 - Beispiel: Stanford Linearbeschleuniger: 20 GeV und etwa 10.000 ft (= ca. 3.048 m)





Stanford LINAC



ACC_01

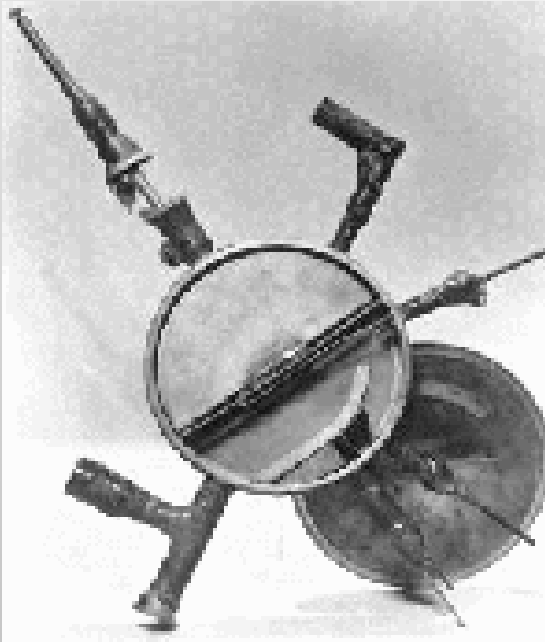
PEP-II Accelerator at Slac

Brookhaven 200 MeV



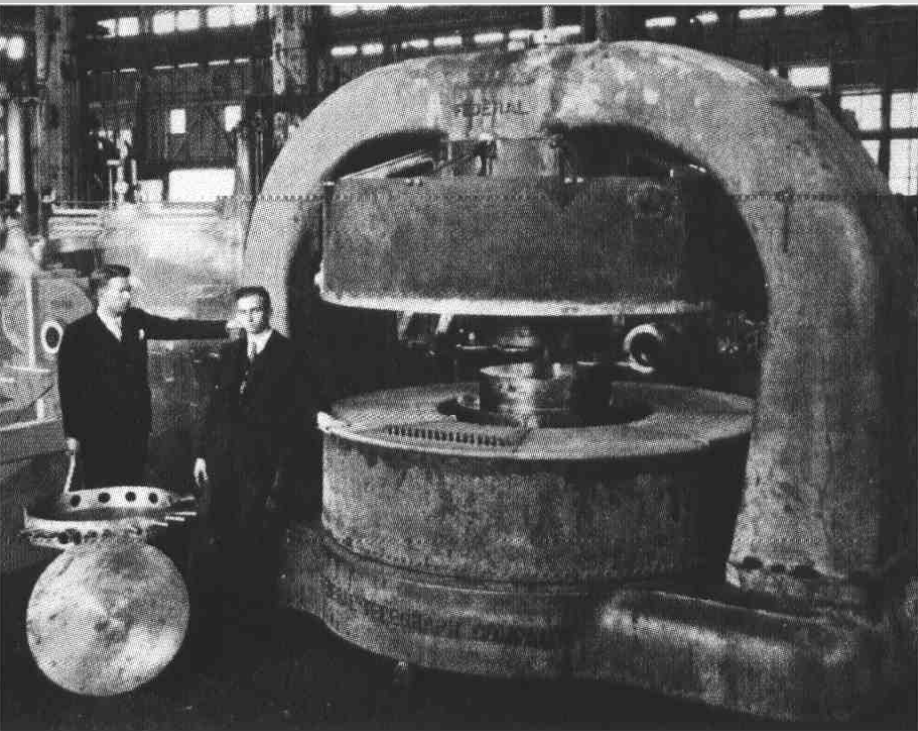


9 cm Zyklotron



Zyklotron

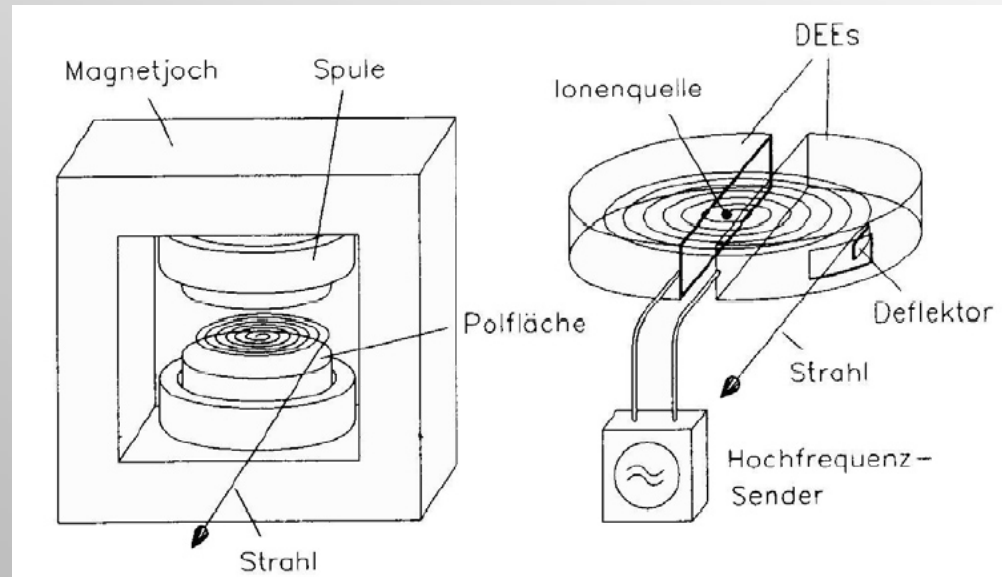
- 1930 E.O. Lawrence theoretisch
- 1931 gemeinsam mit M.S. Livingston experimentell
- Universität von Kalifornien Berkeley



27 inch Zyklotron; Protonen
Energie 80 keV

Prinzip

- Homogenes vertikales Magnetfeld senkrecht zur Ausbreitungsrichtung
- Teilchen werden durch ein Hochfrequenzfeld (Frequenz 10 - 30 MHz) beschleunigt.
- Bewegung entlang einer spiralförmigen Bahn aufgrund des konstanten Magnetfelds.
- Vakuumkammer, z.B. flacher, hohler Halbzylinder ("Dee")



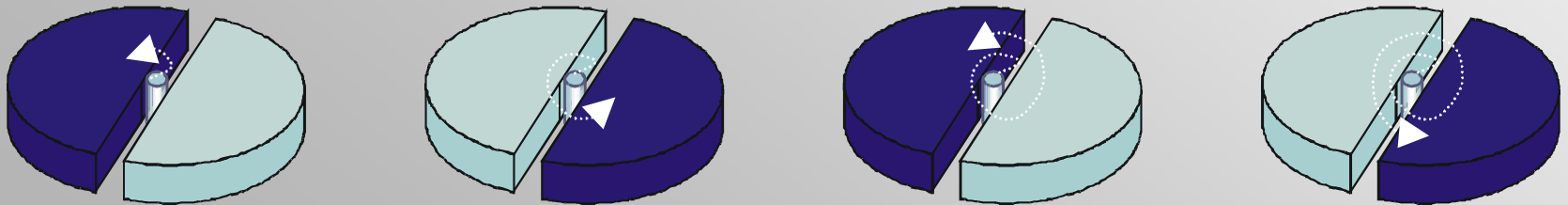


Funktionsprinzip

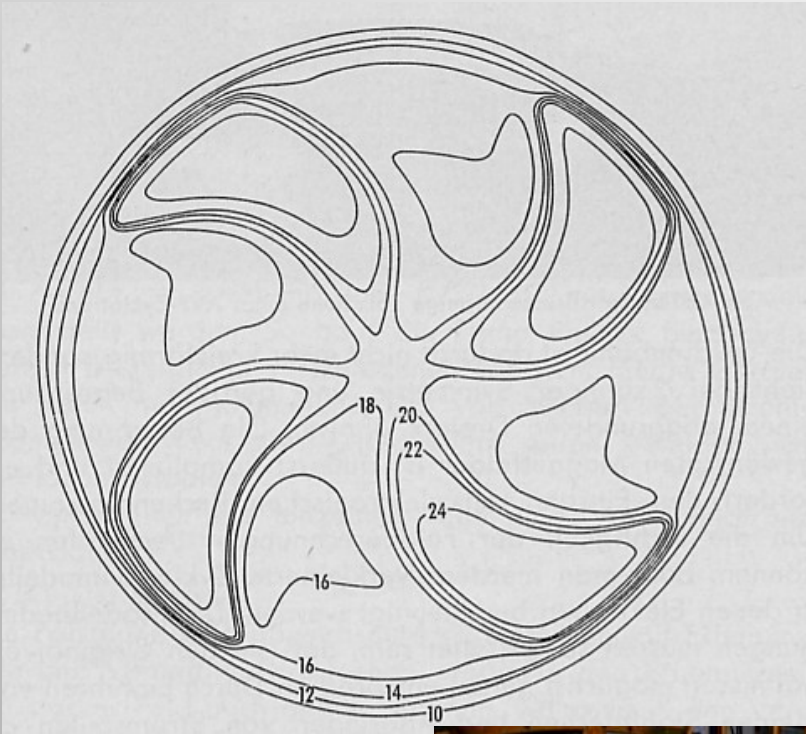
- Hochspannungs-Hochfrequenzfeld an Dees angelegt
- im Spalt zwischen den „Dees“ ergibt sich ein elektrisches Wechselfeld
- Innere der „Dees“ aber elektrisch feldfrei
- Senkrechtes Magnetfeld die ganze Bahnebene bedeckend → große Magnete
- konstantes, homogenes B-Feld
- Ablenkung der Teilchen entlang einer kreisförmigen Bahn.
- Ionenquelle, Ionen mit geringer Geschwindigkeit
- zum ersten „Dee“ beschleunigt -> Energiegewinn

Was passiert im „Dee“?

- Im „Dee“: senkrecht magnetisches Feld zwingt Teilchen auf kreisförmige Bahn
- Ende des Halbkreises tritt das Teilchen aus dem „Dee“ aus
- umgepoltes elektrisches Feld beschleunigt
- energiereichere Teilchen folgt im darauffolgenden „Dee“ einem Halbkreis größeren Radius, u.s.w...

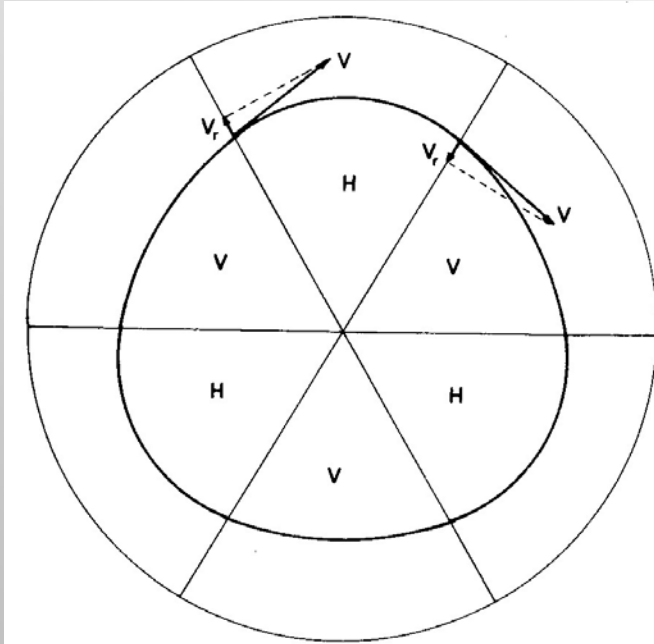


Dee in anderer Formgebung



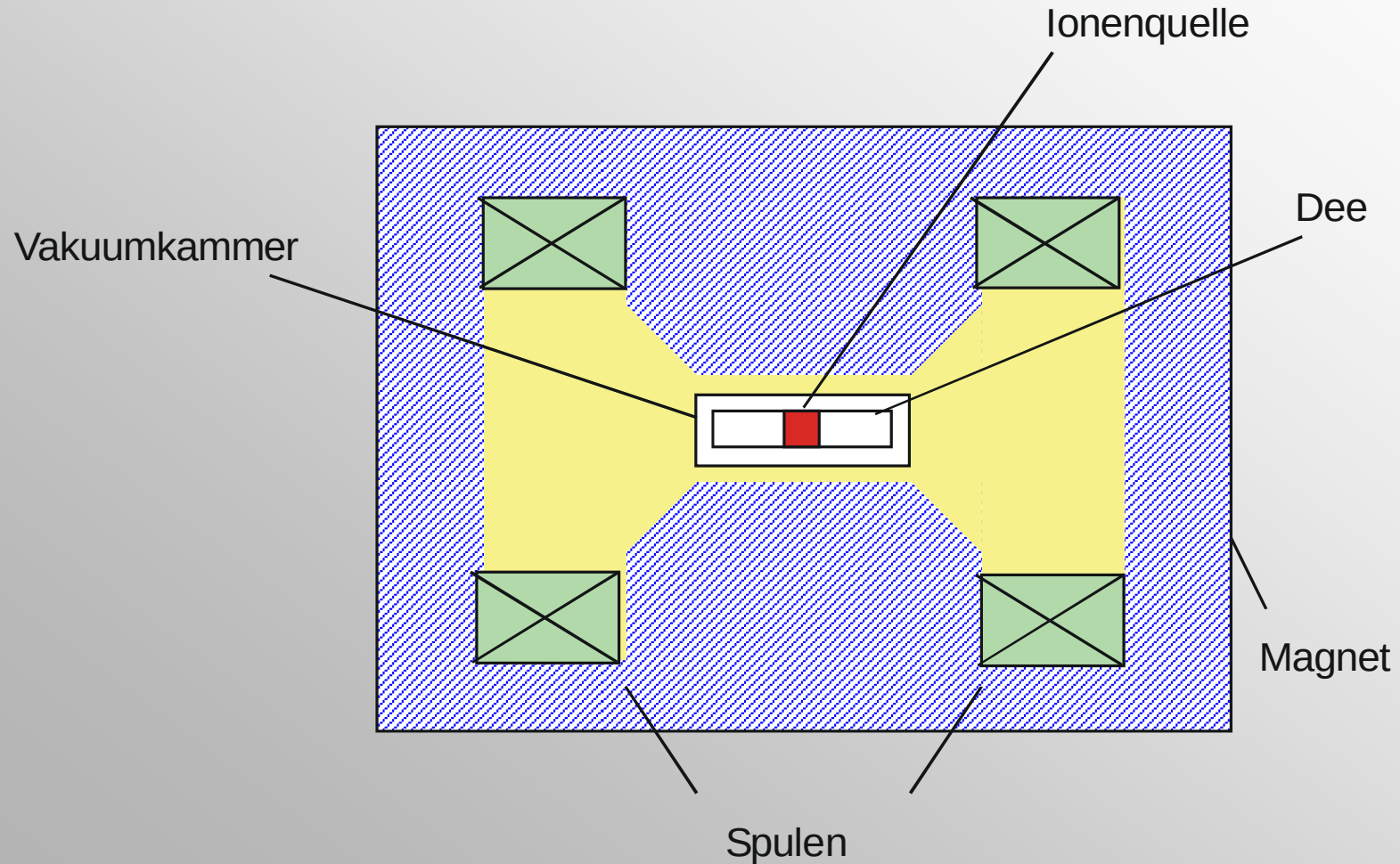
AGOR, Zyklotron zur Untersuchung von Umweltproben,
Durchmesser 2m, 35 Tonnen
CNRS = Centre National de la Recherche Scientifique

Hills and Valleys

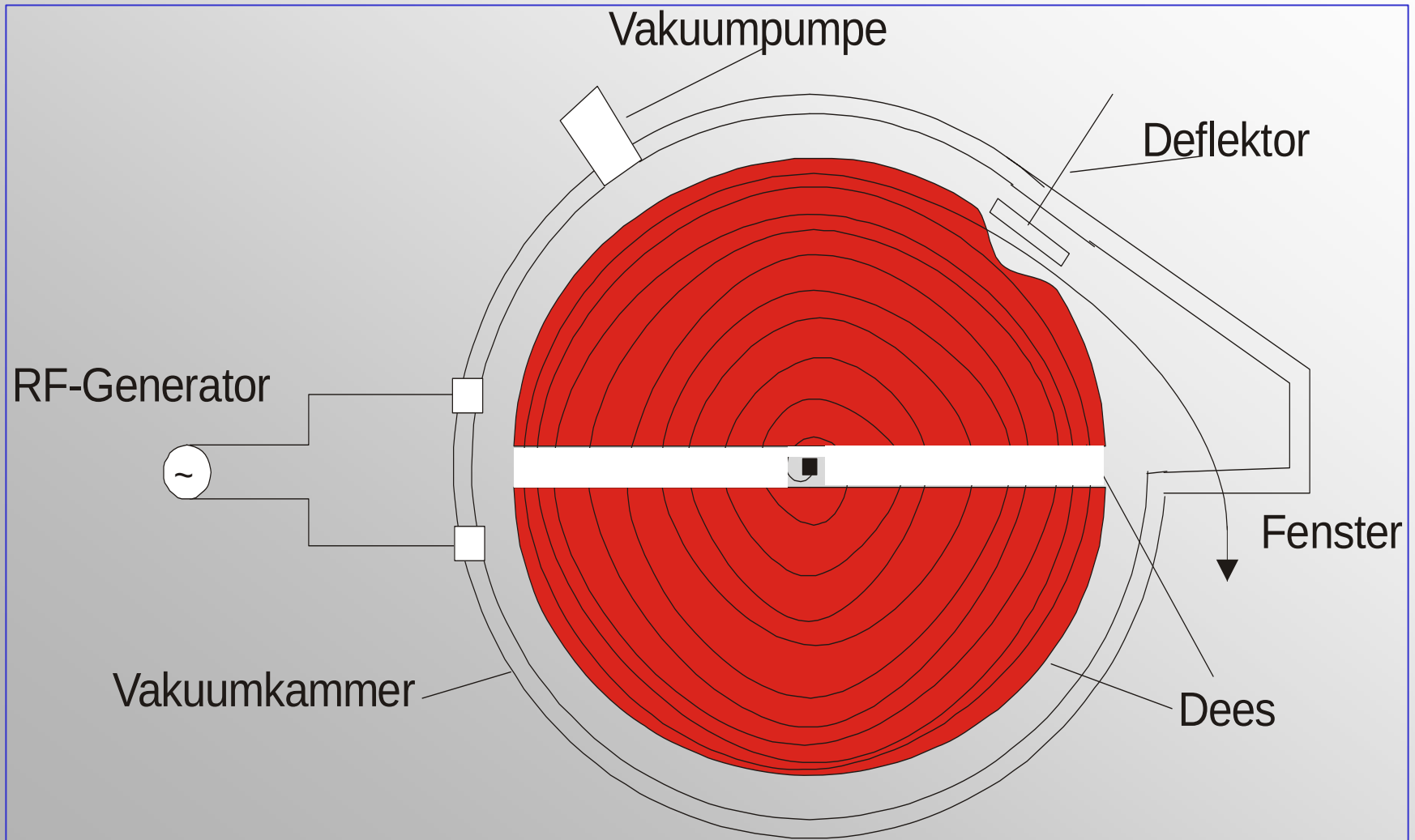


Teilchenbahn eines in azimuthaler Richtung variierenden Feldes eines Zyklotrons. Die radiale Komponente der Geschwindigkeit v_r ist an der Grenze zwischen Bergen und Tälern (Hills and Valleys) dargestellt

Schematische Darstellung Zyklotron

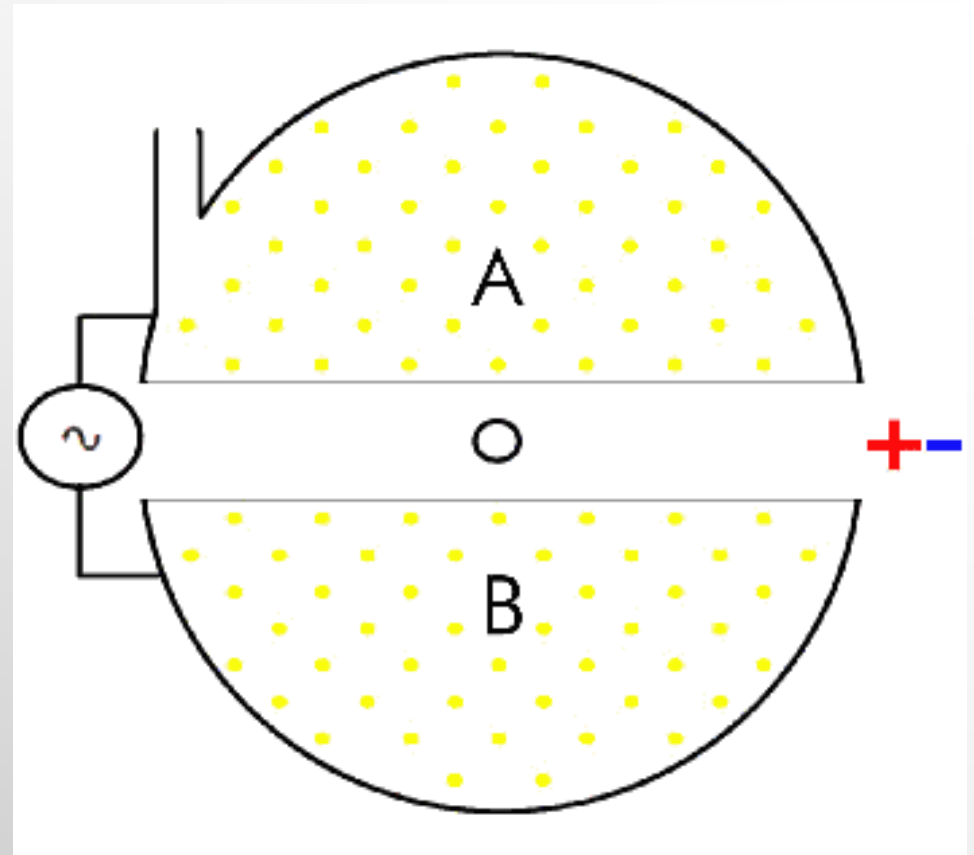
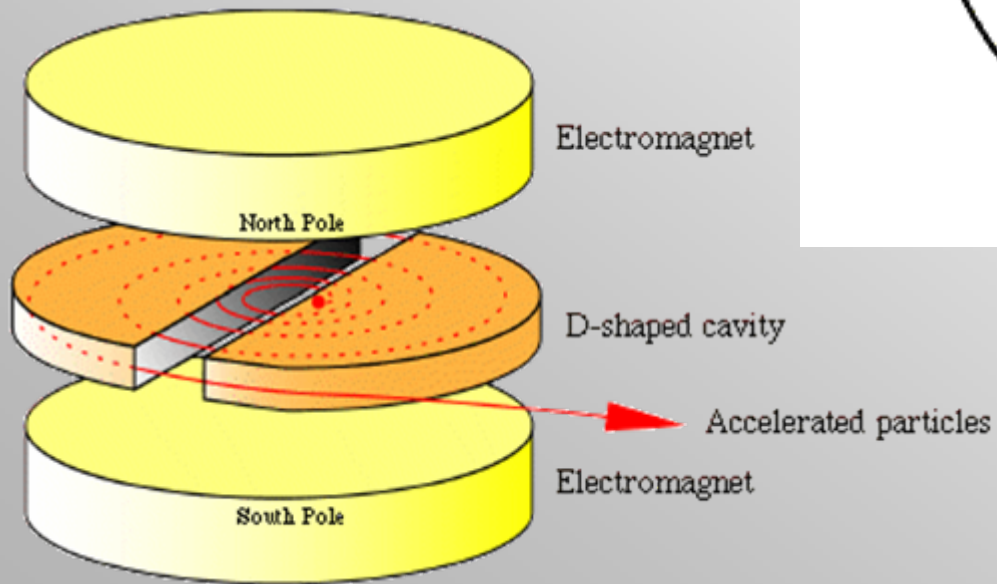


Querschnitt





- Die zum Durchlauf eines „Dees“ benötigte Zeit muss konstant sein.
- Die Kreisfrequenz des RF-Generators wird so gewählt, dass die Durchgangszeit durch einen Halbzylinder gleich der halben Periode des felderzeugenden Oszillators ist. Dadurch kann das elektrische Feld immer mit derselben Phase auf das zu beschleunigende Teilchen wirken.
- Die Ionen gewinnen bei jedem Durchgang durch den Spalt und damit durch das elektrische Feld den gleichen Energiebetrag.



Ableitung Zyklotronfrequenz

- Die Zeit τ , die das Teilchen benötigt, um einen Halbkreis vom Radius r mit konstanter Geschwindigkeit v zu durchlaufen, ist gegeben durch:

$$r = \frac{p}{|q| B} = \frac{mv}{|q| B} = \frac{m}{|q| B} \frac{\pi r}{\tau} \quad \tau = \frac{\pi r}{v} \quad \tau = \frac{\pi m}{|q| B}$$

- Die Periode der felderzeugenden Hochfrequenz muss der Teilchenumlaufzeit entsprechen.

$$\frac{\pi}{\omega_e}$$

- Zyklotronfrequenz:

$$\omega_e = \frac{|q| B}{m}$$



Zyklotronfrequenz

- klassischen, nicht relativistischen Fall $m \cong m_0$
- τ konstant

$$\omega_e = \frac{|q|B}{m_0}$$

- Zyklotron-Frequenz oder „nicht relativistische magnetische Resonanzfrequenz“
- Im klassischen Fall ist die Geschwindigkeit auf einige % von c beschränkt ($\gamma \sim 1$!! da $m = m_0 \gamma$)
- → keine Beschleunigung von Elektronen



- Falls jedoch die kinetische Energie der Teilchen steigt und diese einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag bezüglich der relativistischen Energie liefert, nimmt auch die Masse und die Durchgangszeit zu.
- Das Teilchen verspätet sich daher gegenüber dem elektrischen Feld immer mehr, bis es schließlich im Spalt des Gegenfeldes abgebremst wird.
- Für ein Standard-Zyklotron ist die Energie daher für Protonen auf ca. 30 MeV beschränkt.
- Strahlen hoher Intensität (mA quasi kontinuierlich)
- Geringeren Wartungsarbeiten
- Homogenität und Kompaktheit



Radius eines Zyklotrons

$$r = \frac{mv_f}{|q| B} = \frac{\sqrt{(2mT_f)}}{|q| B}$$

f ... Final

T_f ... größte kinetische Energie im Zyklotron

B - Feld in der Größenordnung von 1 T

(= 1 Wb/m²);

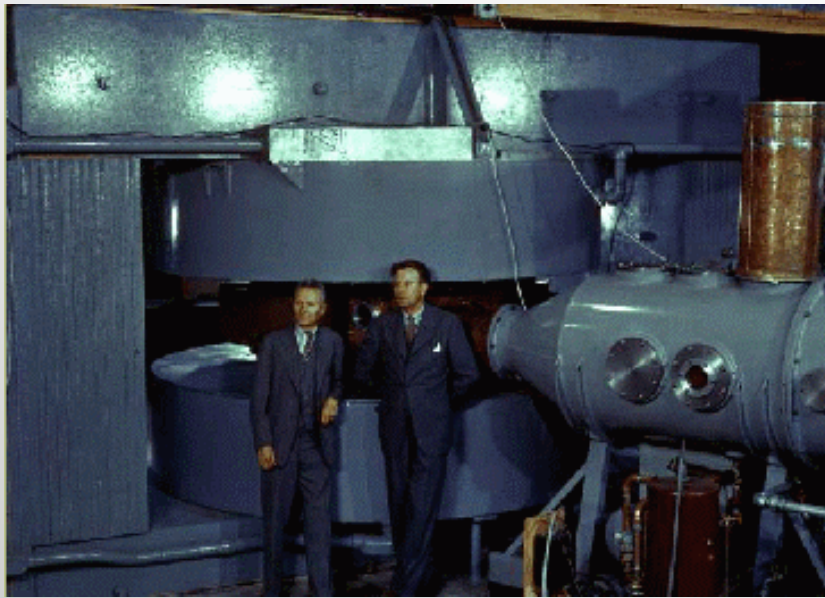
1 Wb = (1 Weber) = 10⁴ G (Gauss)

→ Radius für Protonen bei 10 MeV

$$r = 0,45m$$

→ für Deuteronen bei 20 MeV.

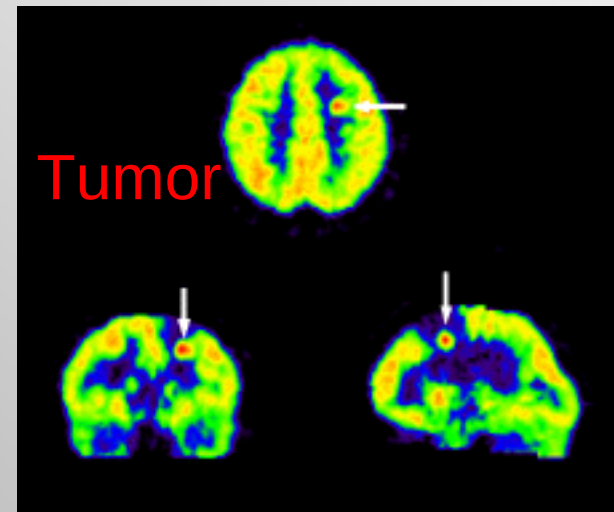
$$r = 0,9m$$



NAC – Süd Afrika

Medizinische Anwendungen

- Zur Erzeugung von protonreichen (beta+ aktiven) Radionukliden in der Nuklearmedizin für PET = Positron Emission Tomographie.
- Isotopenanreicherung in Tumorzellen -> Detektion mit PET scanner





Das Synchrozyklotron

- Russische Physiker **Vladimir Veksler** und amerikanische Physiker **Edwin McMillan**
- Synchronisation der Hochfrequenz mit Umlaufzeiten der Teilchen.
- → Synchrozyklotron



Synchrozyklotron oder Frequenzmoduliertes Zyklotron

- Relativistische Massenzunahme → führt zu Energiebegrenzung des klassischen Zyklotrons .
- Wegen Massenzunahme wird Teilchen schwerer → Bahn mit größerem Radius – aber nicht schneller! Daher nimmt die Umlauffrequenz ab.
- Wesentlicher Unterschied zum Isochron Zyklotron ist die **Modulation der Frequenz des HF-Generators**
- Während Beschleunigung der Teilchen wird HF an Umlauffrequenz angepasst.

- Zyklotrongleichung muss immer erfüllt sein:

$$\omega_e = \frac{|q|B}{m}$$



- → nicht alle Teilchen, welche die Ionenquelle verlassen, werden beschleunigt
- Nur solche Teilchen die im idealem Zeitintervall passend zur HF Modulation emittiert werden.
- Die Änderung von m und die durch die Modulation bedingte Änderung von ω_e gehorchen immer der Grundgleichung für die Zyklotronfrequenz
- Im Synchrozyklotron: Teilchen nicht wie in einem Zyklotron über den gesamten Bahnbereich gleichmäßig verteilt
- Strahl hat ausgeprägte Paketstruktur: Paketabstand $>$ Zeit für gesamte Beschleunigung eines Teilchens (bei Zyklotron Paketabstand = Umlaufzeit!)



Charakteristika eines Synchrozyklotrons

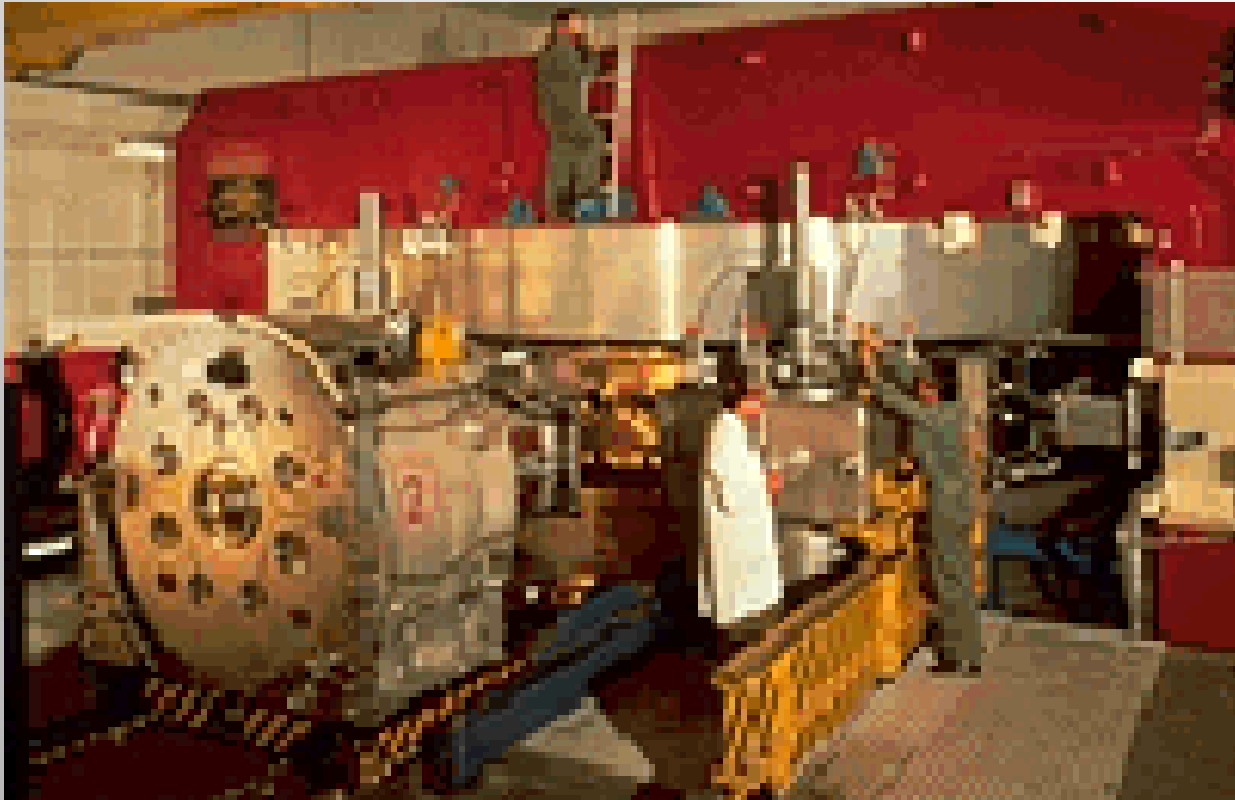
- „Pakete“ werden beschleunigt (Modulationsfrequenz $\simeq 100$ Hz)
- Gepulster Strahl
- Im Vergleich zum Zyklotron: stark reduzierte mittleren Strahlintensität wegen Pulsstruktur
- Gegenüber dem Zyklotron: größere Anzahl von Umläufen (ca. 10.000 gegenüber 10 - 100)
- Engere Spiralbahn, welche durch eine niedrigere Beschleunigungsspannung von ca. 10 kV (gegenüber 100 kV beim Zyklotron) realisiert wird



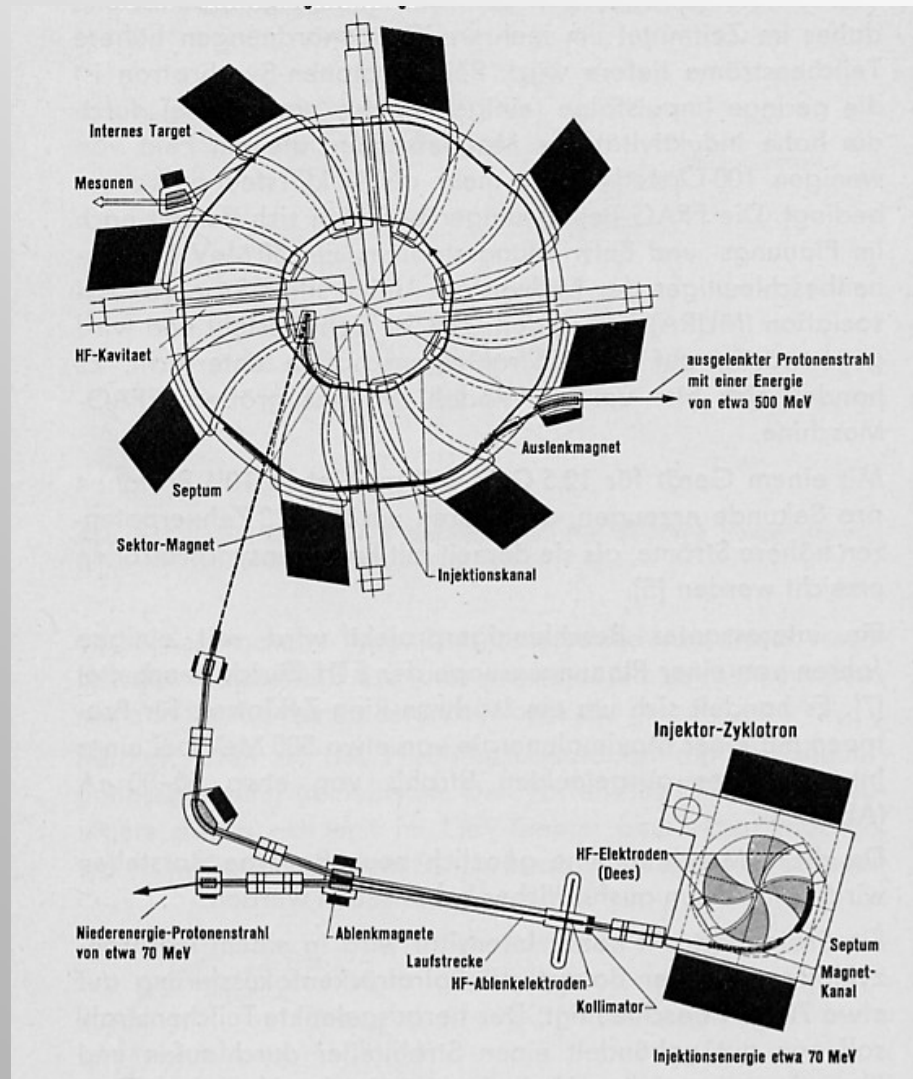
Grösse von Synchrozyklotrons

- Energie Limit von Synchrozyklotrons durch die Kosten und Grösse der Magnete begrenzt.
- Quasi DC Magnetfelder auf sehr großem Raum -> hohe gespeicherte Energie!
- BSP:
 - Univ. Ca / Berkeley: 730 MeV Protonen-Synchrozyklotron
 - CERN / Genf: 600 MeV Synchrozyklotron
- Zyklotrone sind für die Beschleunigung von Elektronen prinzipiell nicht geeignet.

600 MeV Synchrozyklotron, 1957, CERN

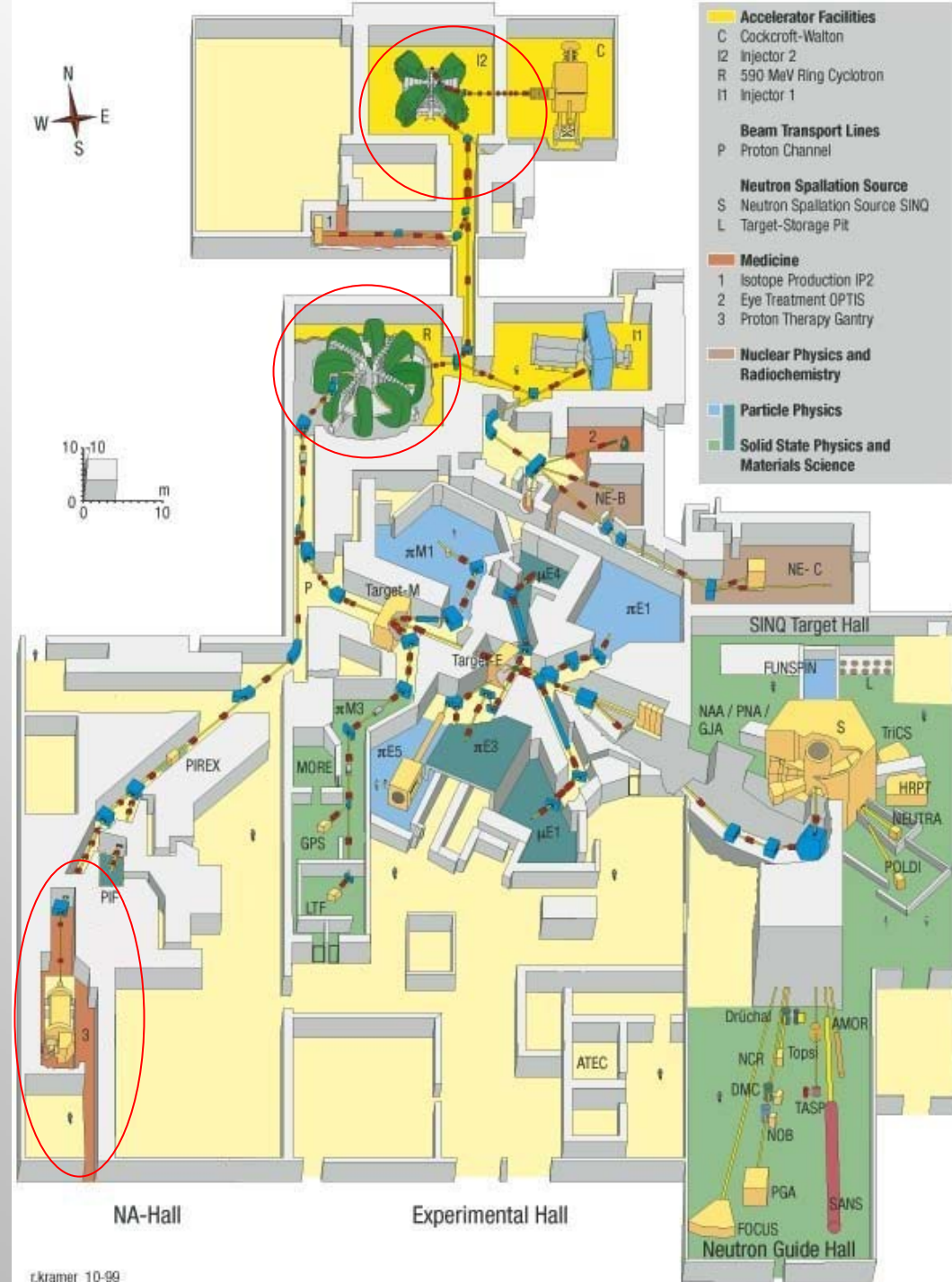


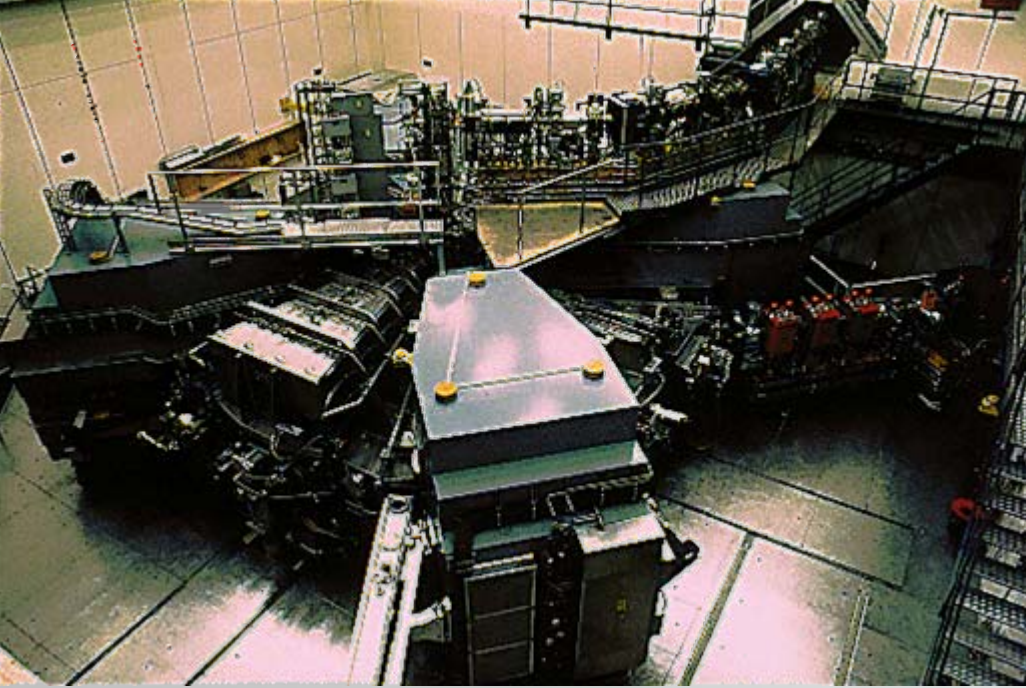
PSI: 590 MeV Zyklotron, Injektor (rechts unten: 70 MeV)





PSI, Proton Accelerators and Experimental Facilities





PSI Injektor

Charakteristik

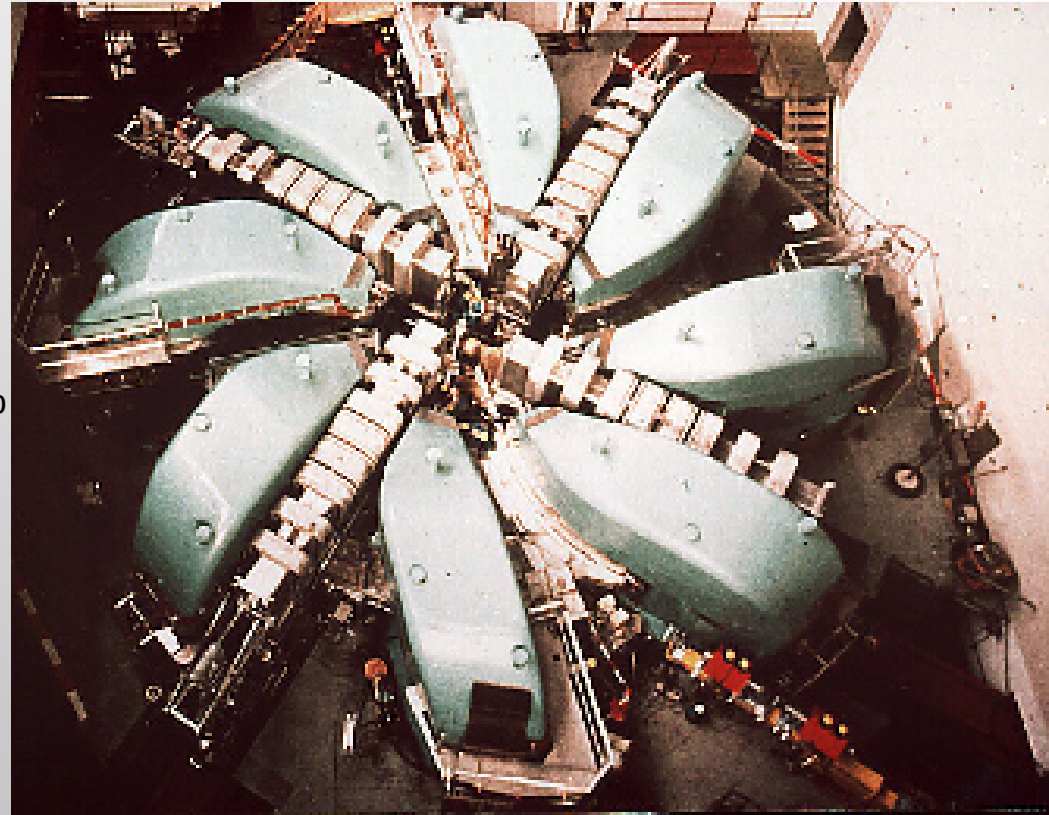
- Injektionsenergie 870 keV
- Extraktionsenergie 72 MeV
- Energieaufweitung (FWHM) ca. 0.2 %
- Strahlemittanz ca. 2π mm x mrad
- Strahlstrom 1.85 mA DC
- Beschleunigerfrequenz 50.63 MHz
- Zeit zwischen den Pulsen 19.75 ns
- Paket Weite ca. 0.3 ns

- 72 MeV Protonen
- Ring Zyklotron
- 4 Sektormagneten
- Extrem geringe Injektionsenergie 870 keV.
- Gespeist von einem Cockcroft-Walton Prä-Injektor

PSI Hauptbeschleuniger

Charakteristik

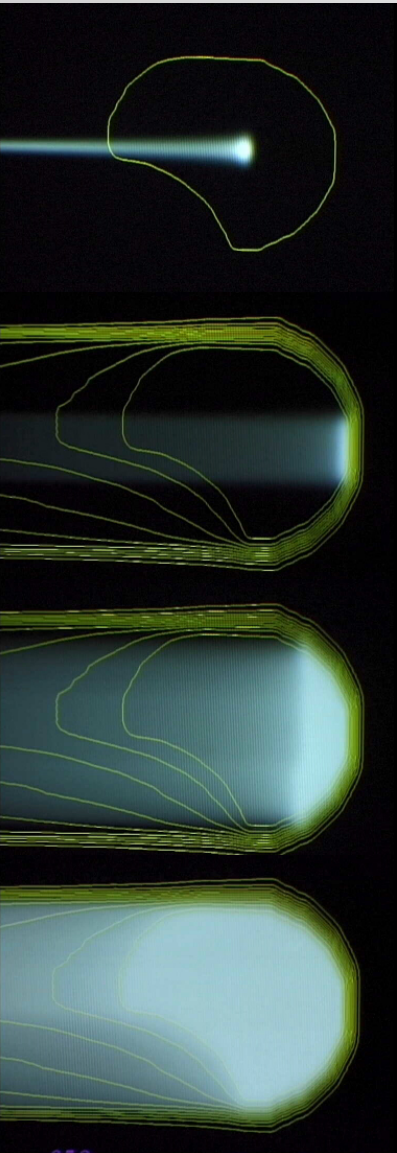
- Injektionsenergie 72 MeV
- Extraktionsenergie 590 MeV
- Extraktionsimpuls 1.2 GeV/c
- Energieaufstreuung (FWHM) ca. 0.2 %
- Strahlemittanz ca. $2 \pi \text{ mm} \times \text{mrad}$
- Strahlstrom 1.6 mA DC
- Beschleunigerfrequenz 50.63 MHz
- Zeit zwischen den Pulsen 19.75 ns
- Bunch Weite ca. 0.3 ns
- Extraktionsverlust ca. 0.03 %



- 1974 bewilligt
- Proton beam (1.6mA Protonen Strahl) of 590 MeV
- Optimal für die Produktion von pi-Mesonen.

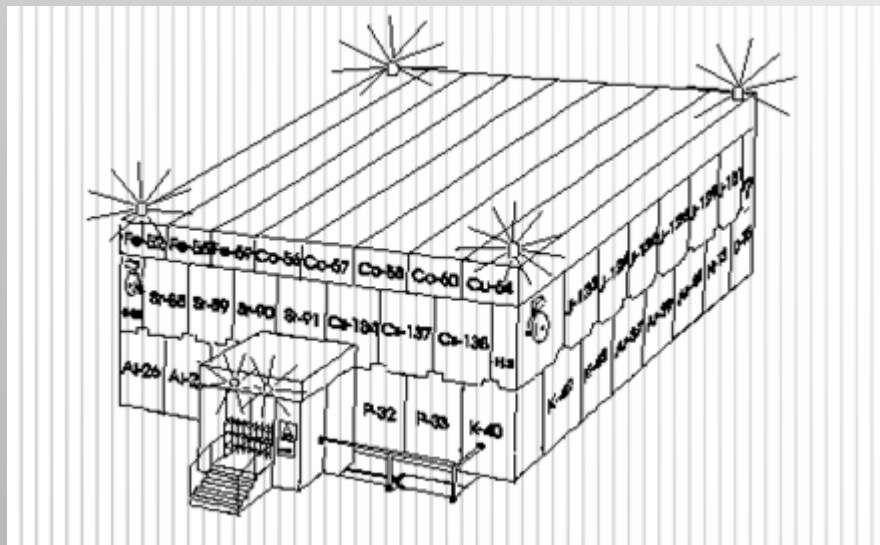


PSI: Medizinische Anwendung Protonentherapie

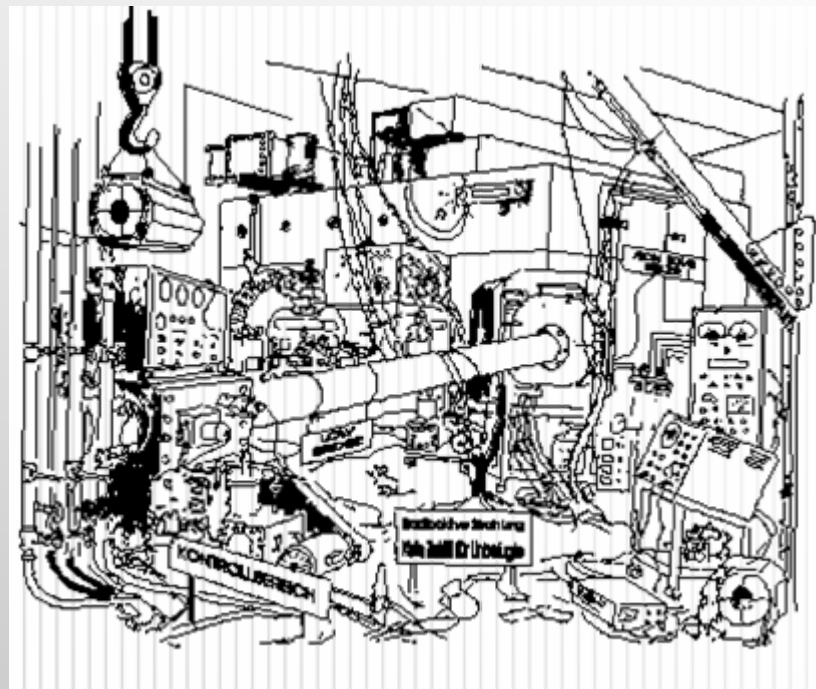


Seit Dezember 1996

Beschleuniger aus der Sicht des ...

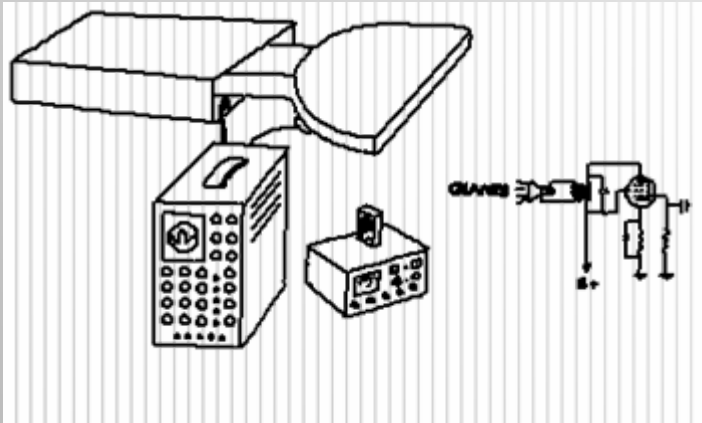


Strahlenschutzbeauftragten

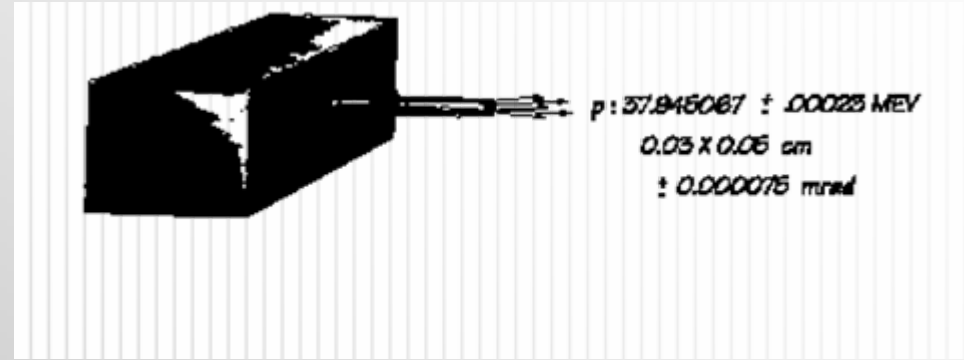


Besuchers

Beschleuniger aus der Sicht des ...

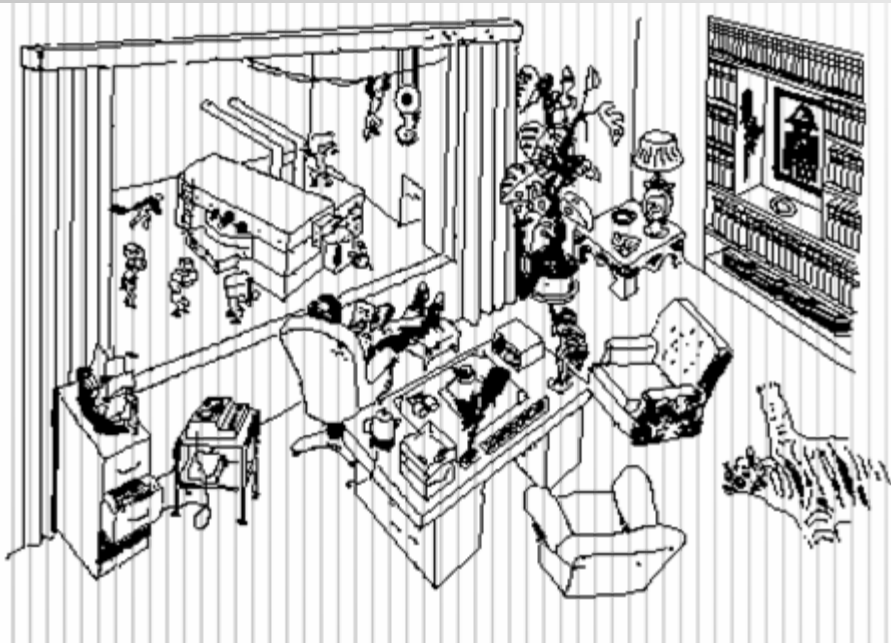


Elektroingenieurs

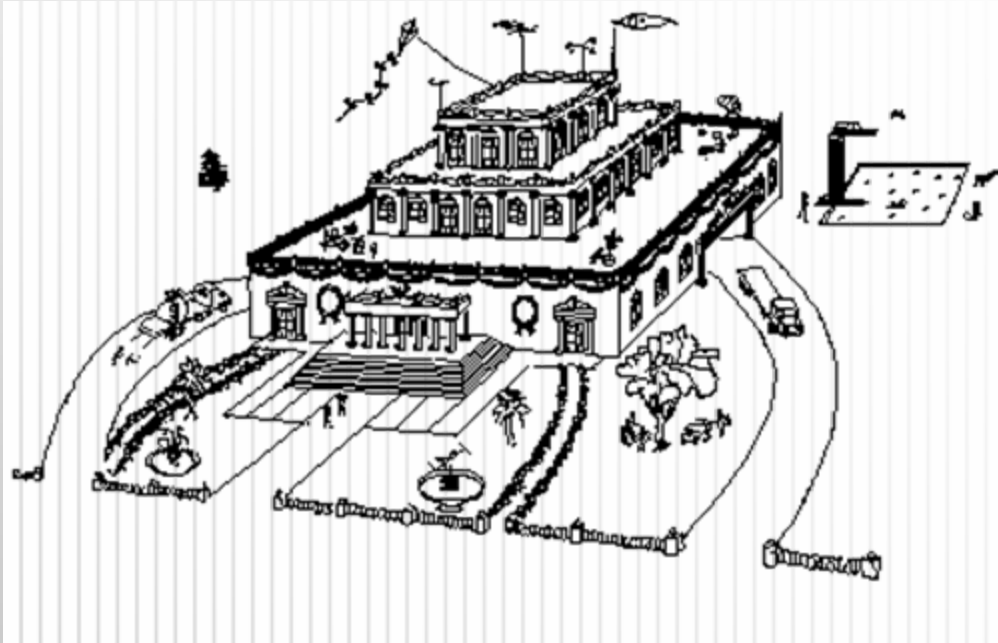


Experimentalphysikers

Beschleuniger aus der Sicht des ...



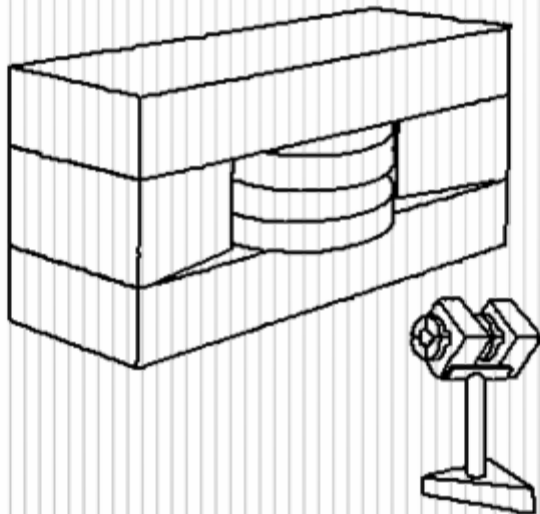
Institutsvorstandes



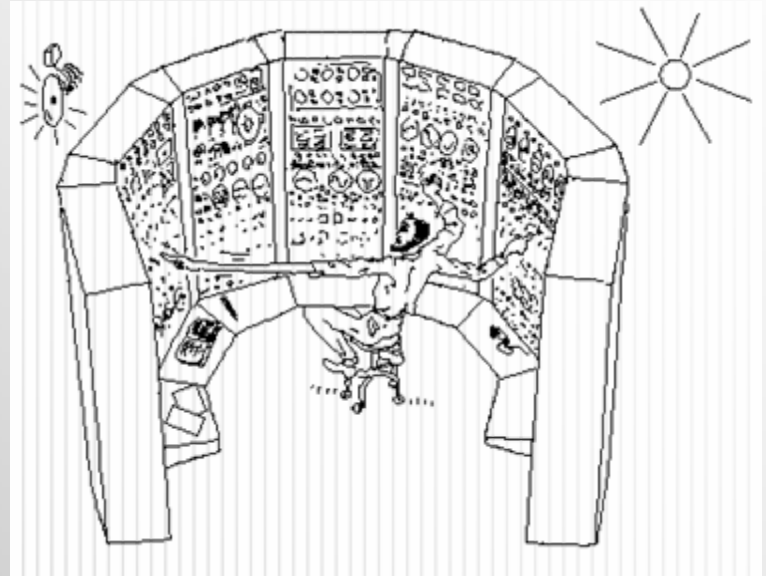
Landesregierung



Beschleuniger aus der Sicht des ...



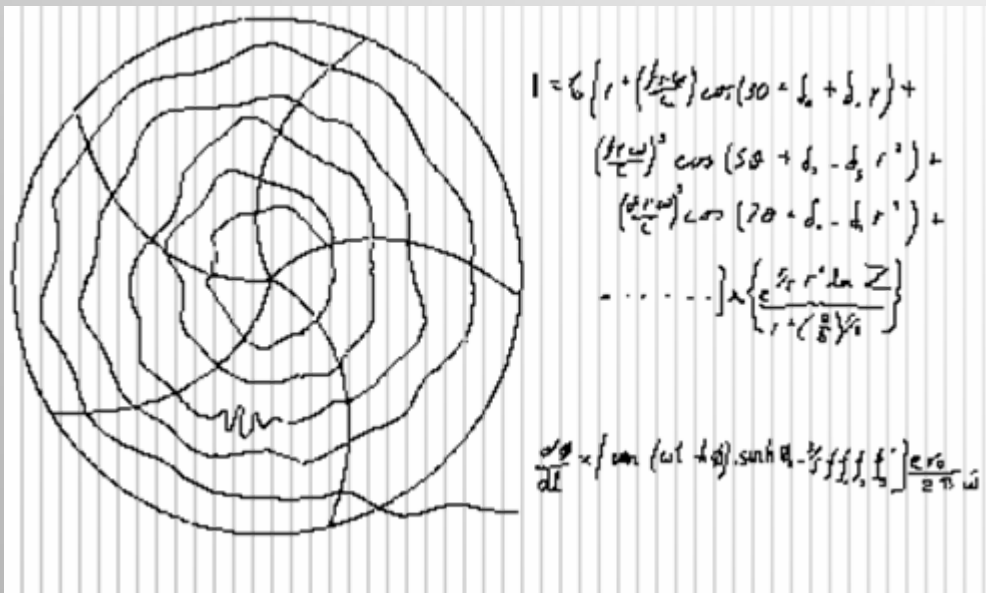
Maschinenbauers



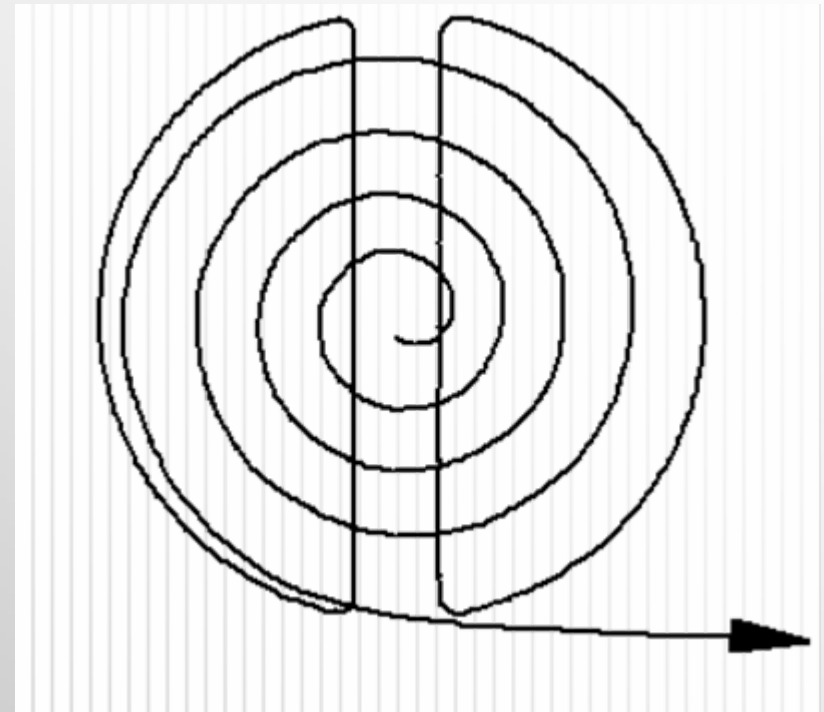
Operators



Beschleuniger aus der Sicht des ...



Theoretischen Physikers

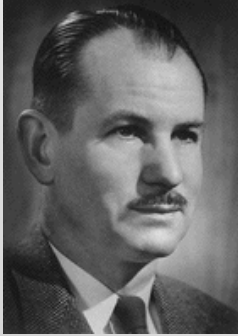


Studenten



Kapitel 3

- Die elektrostatischen oder direkten Beschleuniger
- Betatron
- LINAC
- Zyklotron
- Synchrozyklotron – Festfrequenzzyklotron = Isochronzyklotron
- Synchrotron
- Prinzip der Phasenstabilität
- Allgemeine Diskussion zum Prinzip der Phasenstabilität
- Speicherring
- Parameter einiger typischen Beschleuniger
- Meilensteine in der Beschleunigerphysik



Edwin Mattison McMillan

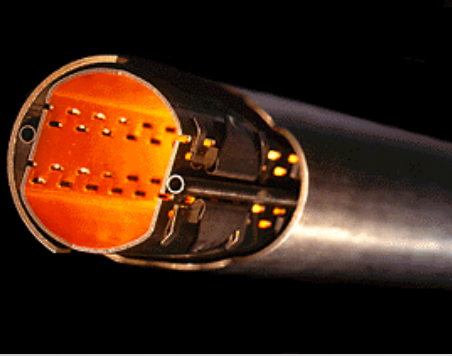
3.6 Synchrotron

- **Warum?** → höhere Teilchenenergien wurden benötigt, die nicht mehr mit einem Zyklotron zu erreichen waren
- **1945 Edwin Mattison McMillan** an der Universität von Kalifornien und von **Vladimir Iosifovich Veksler** in der Sowjetunion (**gleichzeitig / parallel**)
- **1945 Edwin Mattison McMillan**: Bau des ersten **320 MeV-Elektronen Synchrotron** an der Universität von Kalifornien
- Ab den 50-iger Jahren: „Boom“
- Zur Zeit mehr als 40 Großbeschleuniger weltweit



Charakteristika

- Hochfrequente elektrische Wechselfelder zur Beschleunigung
- Kreisförmige Bahn mit fixem Radius
- Magnetisches Feld wirkt nur entlang dieser kreisförmigen Bahn und nicht innerhalb des Kreises
- **Kosten** der Magnete: proportional zum Kreisradius eines Synchrotrons
 - Vergleich **Kosten** eines Magneten eines Zyklotrons: etwa mit der **dritten Potenz des Radius** (Feldvolumen).



Bauteile eines Synchrotrons

- **Vakuumkammer:** Torus (Fahrradschlauch), ähnlich dem Betatron (Durchmesser 10cm)
- **Hochfrequentes elektrische Wechselfeld:** an einer Stelle des Beschleunigerringes
 - Hier wird in einem **Hohlraumresonator**, welchen die Teilchen durchlaufen, mittels stehender elektromagnetischer Wellen Hochspannung erzeugt und Energie übertragen.
- **Magnete** (Dipol, Quadrupol, ...)





Synchrotronfrequenz

- Die Kreisfrequenz ω_e der Hochfrequenz muss so gewählt werden, dass die zugehörige Periode $\tau = \frac{2\pi}{\omega_e}$ gleich der Zeit ist, die ein Teilchen für einen Umlauf benötigt
- Da diese Zeit allerdings mit steigender Energie abnimmt, muss die Frequenz moduliert werden (ω_e steigend).
- Die Kreisfrequenz wird gegen den Grenzwert $\frac{c}{r}$ tendieren, wenn die Geschwindigkeit sich der Vakuumlichtgeschwindigkeit nähert.

Kreisbahn

- Teilchenpakete sollen sich trotz Energiezunahme auf Kreisbahn fortbewegen
- → Änderung des Magnetfeldes proportional zur Impulszunahme ($r = \text{fix}$)

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \Leftrightarrow r = \frac{p}{|q|B}$$

- Wenn Teilchen in Kavität phasenrichtig beschleunigt wird:

$$\omega_e = k \frac{v}{r}$$

- Umlauffrequenz: $\frac{v}{r}$

- Wellenzahl k (harmonische Nummer, entspricht Anzahl möglicher Pakete im Ring ($f_{\text{RF}} = k \cdot f_{\text{Umlauf}}$):

Kreisfrequenz

Bekannt:

$$\omega_e = k \frac{v}{r}$$

$$|q| v B = p \frac{v}{r}$$

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$E = E_0 + T = mc^2 = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma E_0$$

$$\omega_e = \frac{k|q|B}{m} = \frac{k|q|BE_0}{m_0 E}$$

Mit:

$$p = mv = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} v$$

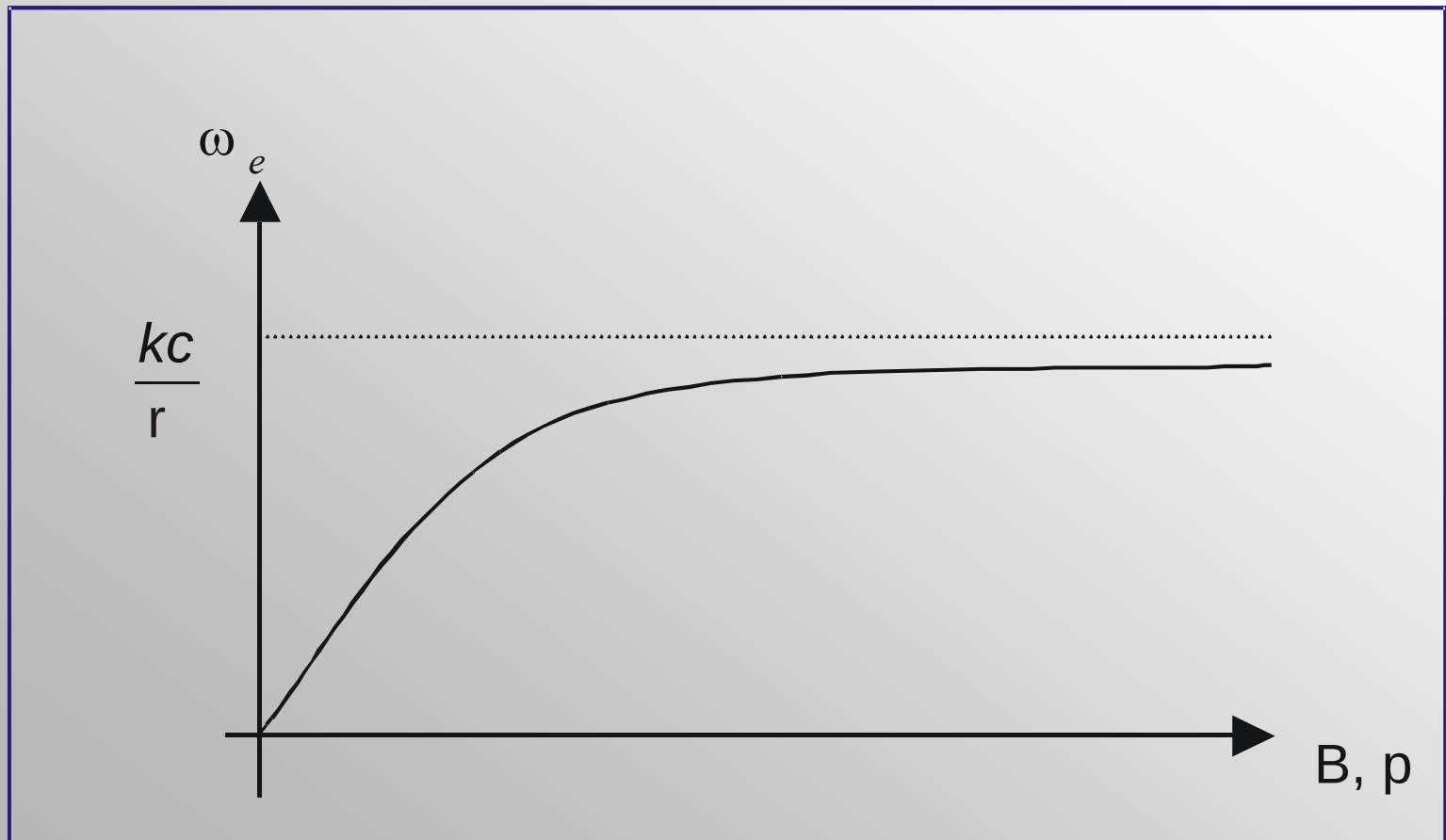
$$|q| v B = p \frac{v}{r}$$

Beziehung zwischen B-Feld und
Kreisfrequenz!

$$\omega_e = \frac{k|q|B}{m_0 \left[1 + (cqB \frac{r}{E_0})^2 \right]^{1/2}}$$



Kreisfrequenz als Funktion des magnetischen Feldes des Synchrotrons



Funktionsprinzip

- B variiert während der Beschleunigung **proportional zum Impulsgewinn** der beschleunigten Teilchen (Beschleunigungszyklus).
- Die Beschleunigungsfrequenz wird entsprechend der Bedingung:

$$\omega_e = \frac{k|q|B}{m_0 \left[1 + (cqB r / E_0)^2 \right]^{1/2}}$$

erhöht.

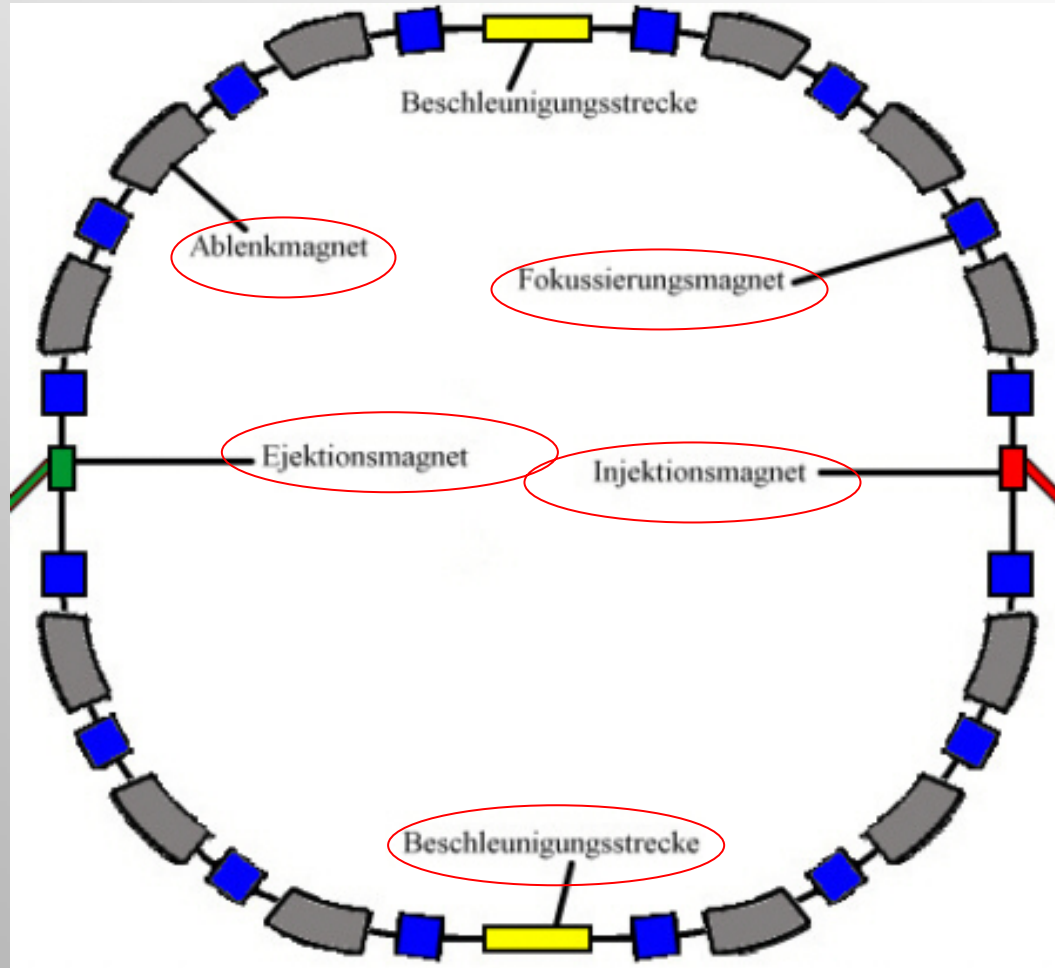
- Die Teilchen folgen während des Beschleunigungsvorganges nur dann dem gleichen Orbit (und sind stabil), wenn die Spannung der HF-Kavität mit der richtigen Phase d.h. beschleunigend wirkt.



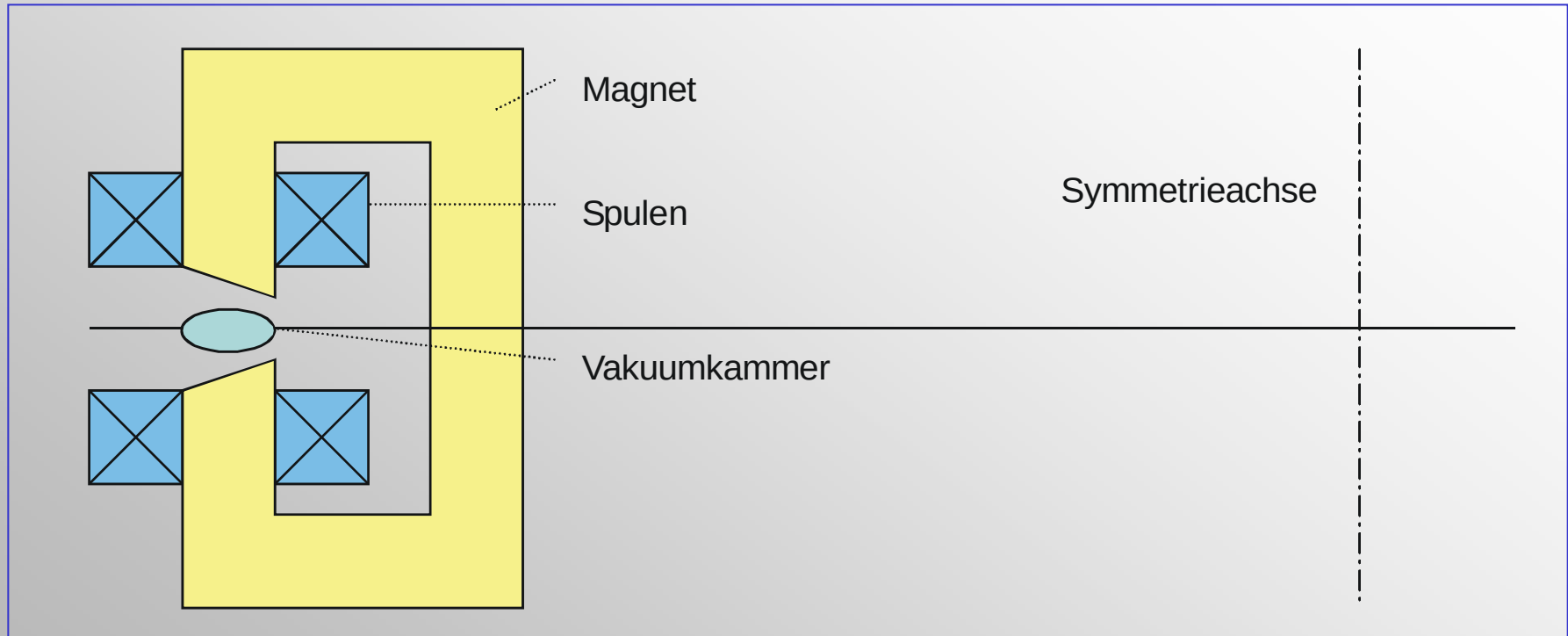
Pulsbetrieb / Vorbeschleunigung

- Nur jene Teilchen, welche den richtigen Wert des elektrischen Feldes in der Kavität vorfinden, werden auf die maximale Energie beschleunigt.
- Die Maschine arbeitet daher gepulst, wobei die Pulsfrequenz jene des magnetischen Feldes ist.
- Der Strahl hat gepulste Struktur ($\sim$ Hz Bereich) es treten „Paketen“ auf (Anzahl der Pakete = k mit $\omega_{\text{HF}} = k\omega_{\text{Umlauf}}$).
- Um eine zu starke Modulation der Hochfrequenz während der Beschleunigung zu vermeiden, werden die Teilchen durch einen zusätzlichen Beschleuniger (meist ein elektrostatischer Beschleuniger oder LINAC), der als „Injektor“ bezeichnet wird, auf einige MeV vorbeschleunigt.
- Alternativ mehrere Synchrotrons hintereinander

Synchrotron Hauptkomponenten

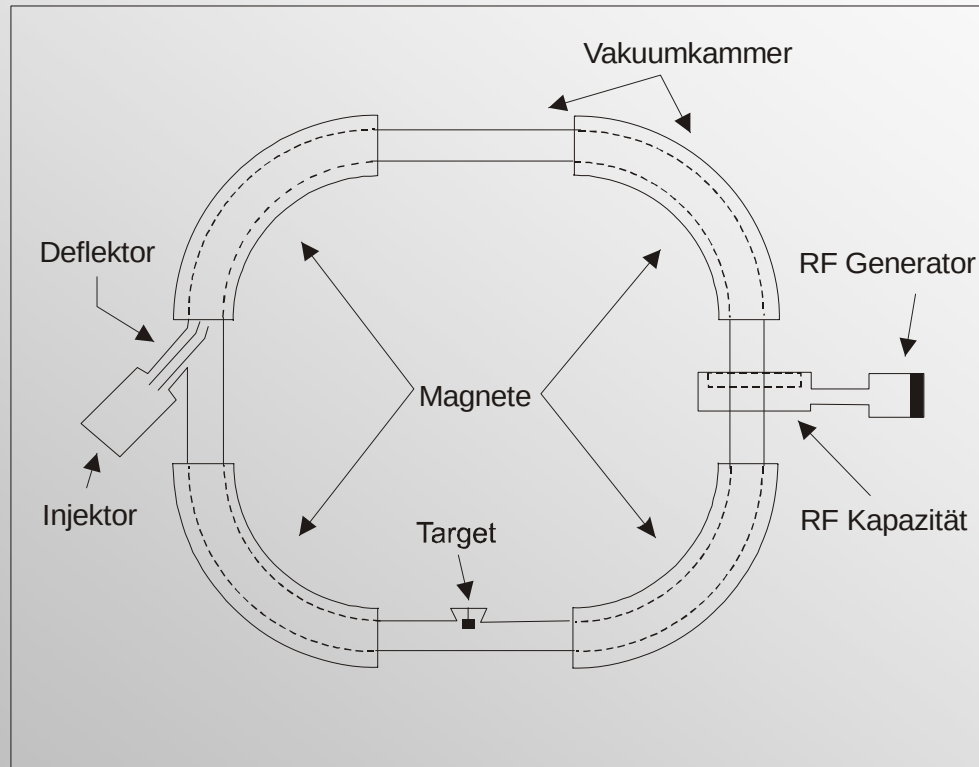


Querschnitt „combined function“ Magnet



- Magnet: zwei ringförmigen Polstücken + vertikales eisernes Joch → Querschnitt C-förmig, andere Bauform H-förmig.
- Magnetspulen mit einem niederfrequenten Wechselstrom oder mit sägezahnförmigen Strom gespeist. Damit können die Teilchen beschleunigt werden, wenn gleichzeitig das magnetische Feld B ansteigt.

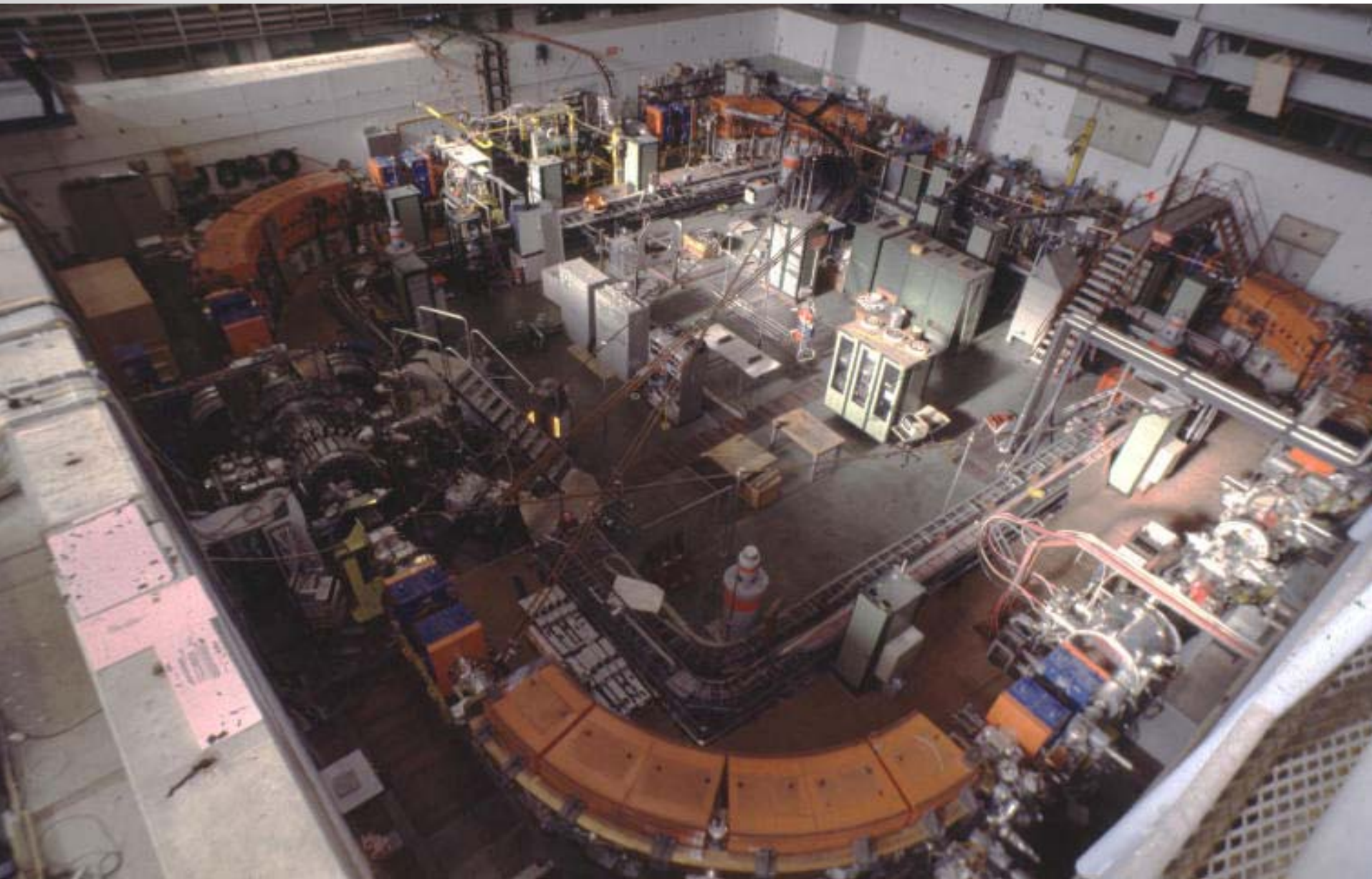
Synchrotron Schematisch



- **Vakuumkammern hat im allgemeinen eine nicht ringförmige Struktur**
 - auch gerade Stücke die magnetisch feldfrei sind.
 - geraden Segmente beinhalten vielfach die **Injektions und Extraktionselemente**, die **RF-Kavität**, interne **Target**, **Anschlüsse für Vakuumsystem**, **Strahldiagnostik**.

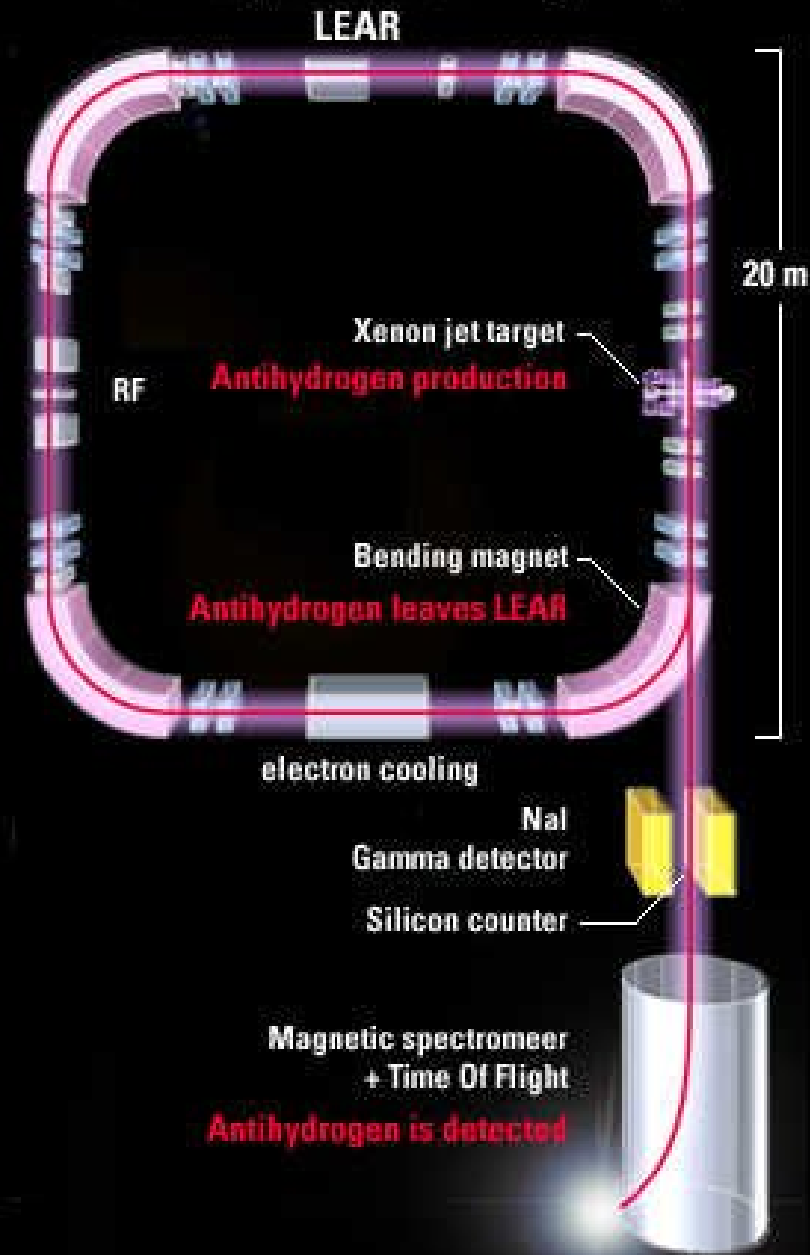


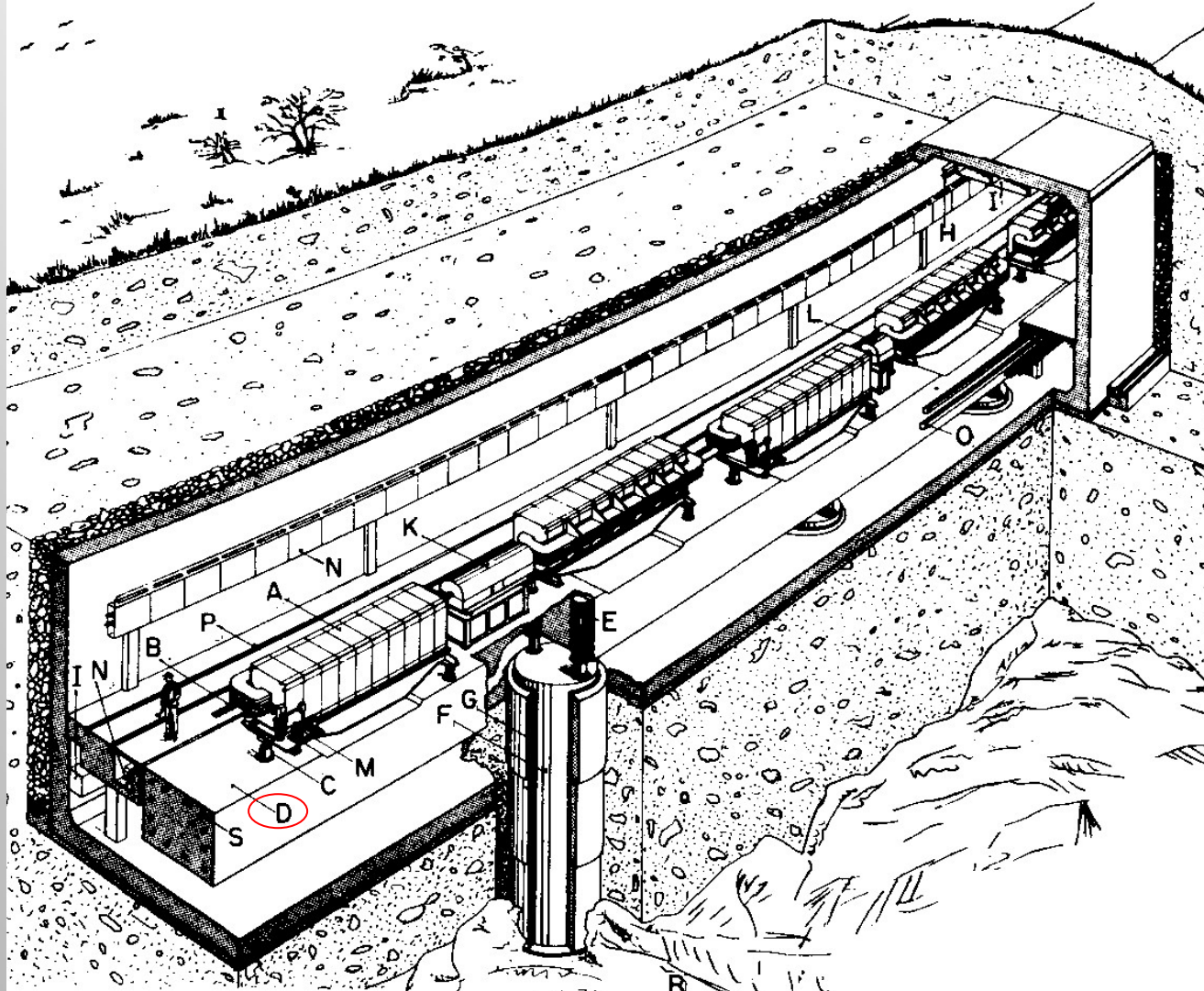
LEAR, 1996



LEAR, Low Energy Antiproton Ring, 1982

- Zur Erzeugung niederenergetischer Antiprotonen
- Im LEAR können Antiprotonen, welche im AA – Ring erzeugt wurden von etwa 3.5 GeV auf etwa 100 MeV **verlangsamt** werden.
- → Einzige Möglichkeit die Symmetrie von Materie und Antimaterie direkt zu testen.
- Langsame Antiprotonen können in "traps" „gefangen“ werden, wo ihre Eigenschaften (**Masse, magnetische Eigenschaften, ...**) direkt mit jenen von Protonen verglichen werden können
- LEAR geschlossen 1996
- → Neues Projekt: Antiproton Decelerator (**AD**)

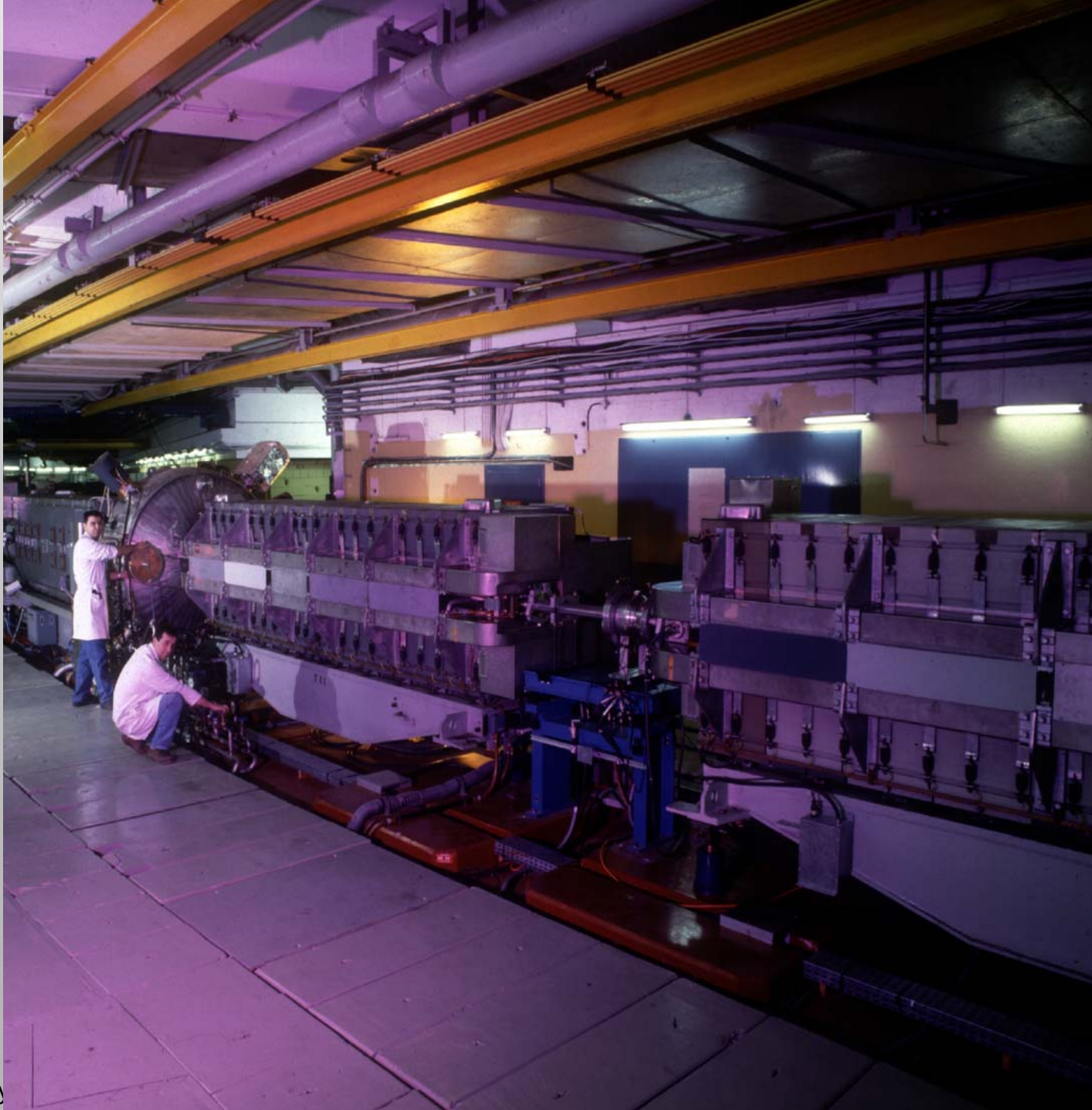




A Magnet, B, Vakuumkammer, C Justierspindel, **D Betonring**, E elastische Auflager, F Betonsäulen gelagert direkt am Gestein, G Bitumenschichte, H 2t Kran, I Ventilation, K HF Kavität, L magnetische Linse, M Vakuum Pumpe, N elektrische Kabel, O Wasserkühlung für die Magnete, P Schienen, Q Untergrund, R Gestein, S temperaturregulierende Wasserpumpen



CERN PS Ring (Proton Synchrotron)

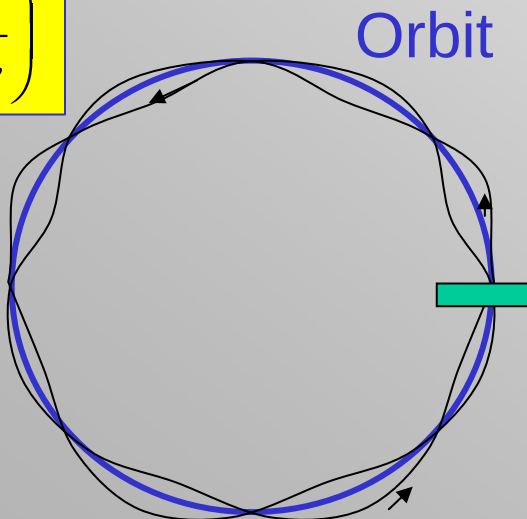


Betatronschwingung

- Eine grundlegende Eigenschaft **aller** Kreisbeschleuniger sind die Schwingungen um die Soll-Lage, die sogenannte **Betatronschwingung**. Beim Betatron ist sie für $0 < n < 1$ vorhanden, wobei gilt:

$$B(r) \propto \left(\frac{1}{r}\right)^n$$

$$\omega_{\text{Betatron}} < \omega_{\text{Umlauffrequenz}}$$



Dipolmagnet mit Feldfehler

n... Feldindex

Betatronschwingung um eine kreissymmetrische Sollbahn (gepunktet) in einem schwach fokussierenden Beschleuniger



- Radiale und vertikale Schwingung sind voneinander entkoppelt.
- Weniger als 1 Schwingung pro Umlauf deshalb große Amplitude und Vakuumkammer.

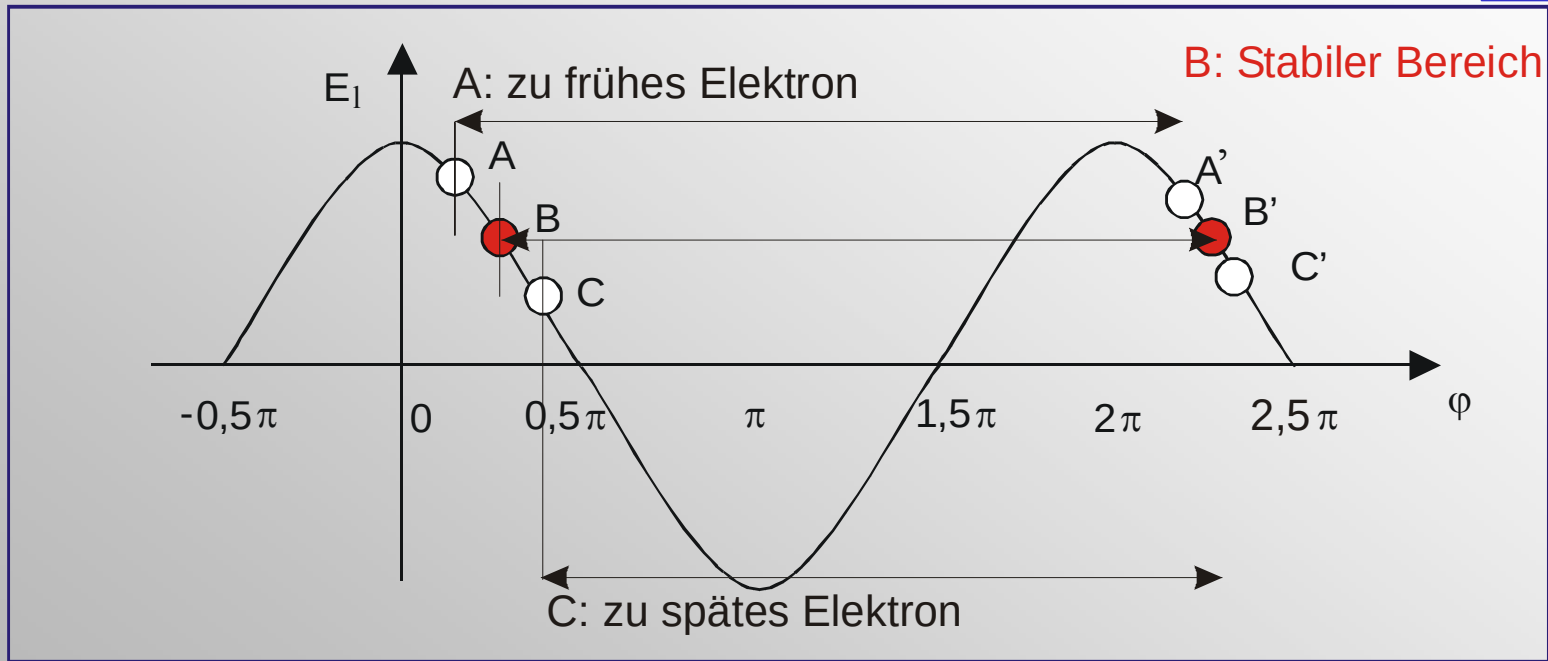


Phasenverschiebung

- Verschiedene Teilchen, die nicht auf ihrer (transversalen) Sollbahn fliegen, legen unterschiedliche Weglängen zurück, was eine longitudinale Phasenverschiebung bezüglich ω_{HF} und damit eine Energieverschmierung zur Folge hat
- Um dem entgegenzuwirken, erfolgt die Beschleunigung nicht beim maximum der HF-Hochspannung, sondern im steigenden oder fallenden Bereich wodurch eine stabile Schwingung um die **Sollphase** erzeugt wird

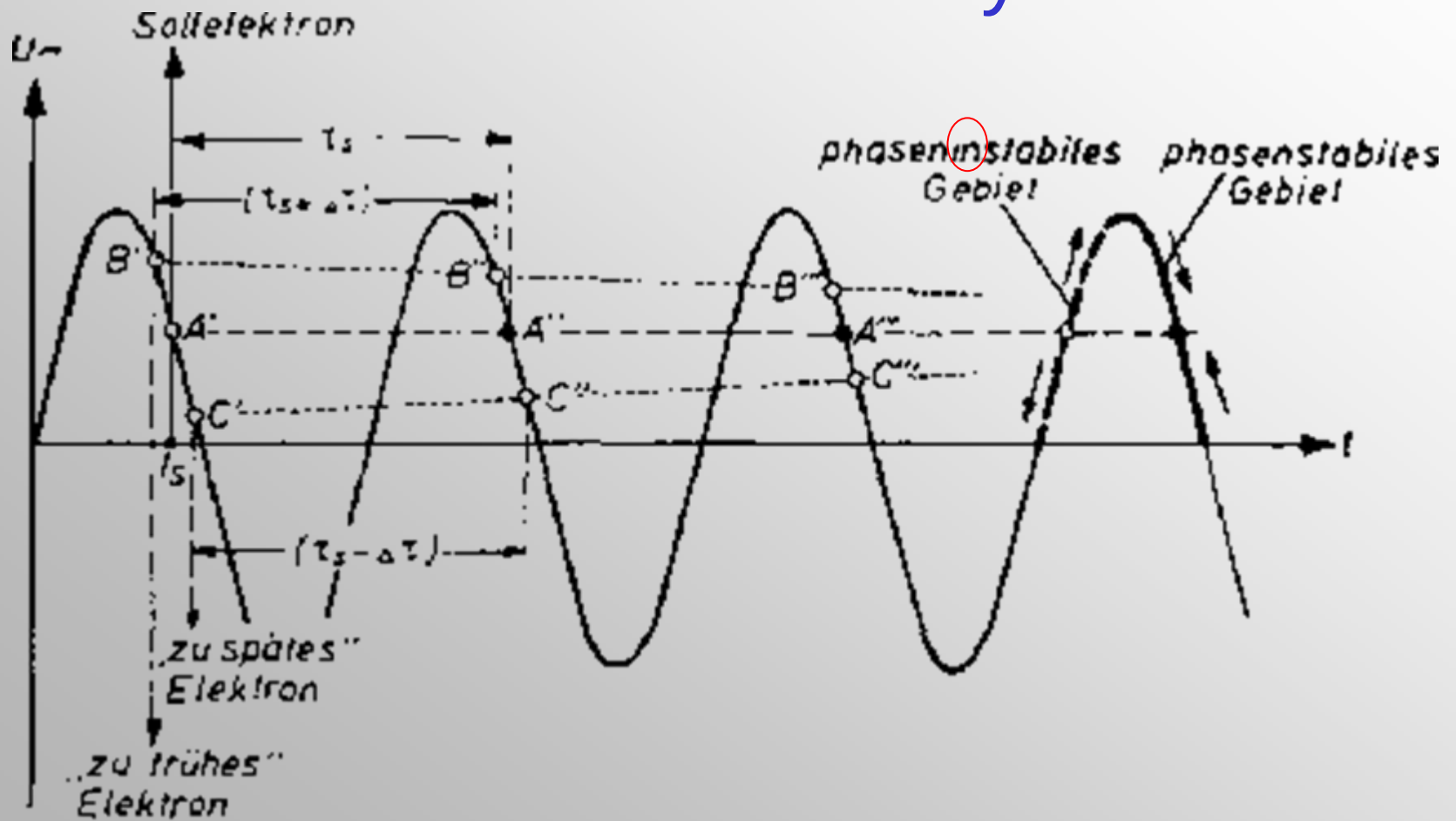


Bündelung der Elektronen durch die HF-Welle. Beschleunigungsspannung als Funktion des Phasenwinkels φ



- Kommt ein Teilchen mit zu kleiner Kreisbahn zu früh, sieht es ein höheres Feld. Dadurch erhält es mehr Energiezuwachs, der Radius wächst und die Umlaufzeit erhöht sich im Vergleich zu Teilchen auf der Sollbahn.
- Ein Teilchen auf einer zu großen Kreisbahn legt einen längeren Weg zurück und kommt zu spät. Deshalb sieht es ein niedrigeres Feld, erhält weniger Energiezuwachs und Radius und die Umlaufzeit werden kleiner. **Für ELEKTRONEN weil $v=c$! Für p abhängig von Energie.**

Phasendiagramm eines Synchrotrons





Ökonomie

- Synchrotron = einzige ökonomisch vertretbare Maschine für die Beschleunigung von Teilchen zu sehr hohen Energien
 - Ausnahme: Elektronen-LINAC
 - Für Beschleuniger über 1 GeV wird die Konstruktion und der Betrieb sehr komplex, sodass praktisch jeder Beschleuniger einer **Sonderanfertigung** für individuelle Fragestellungen und Lösungsmöglichkeiten entspricht.

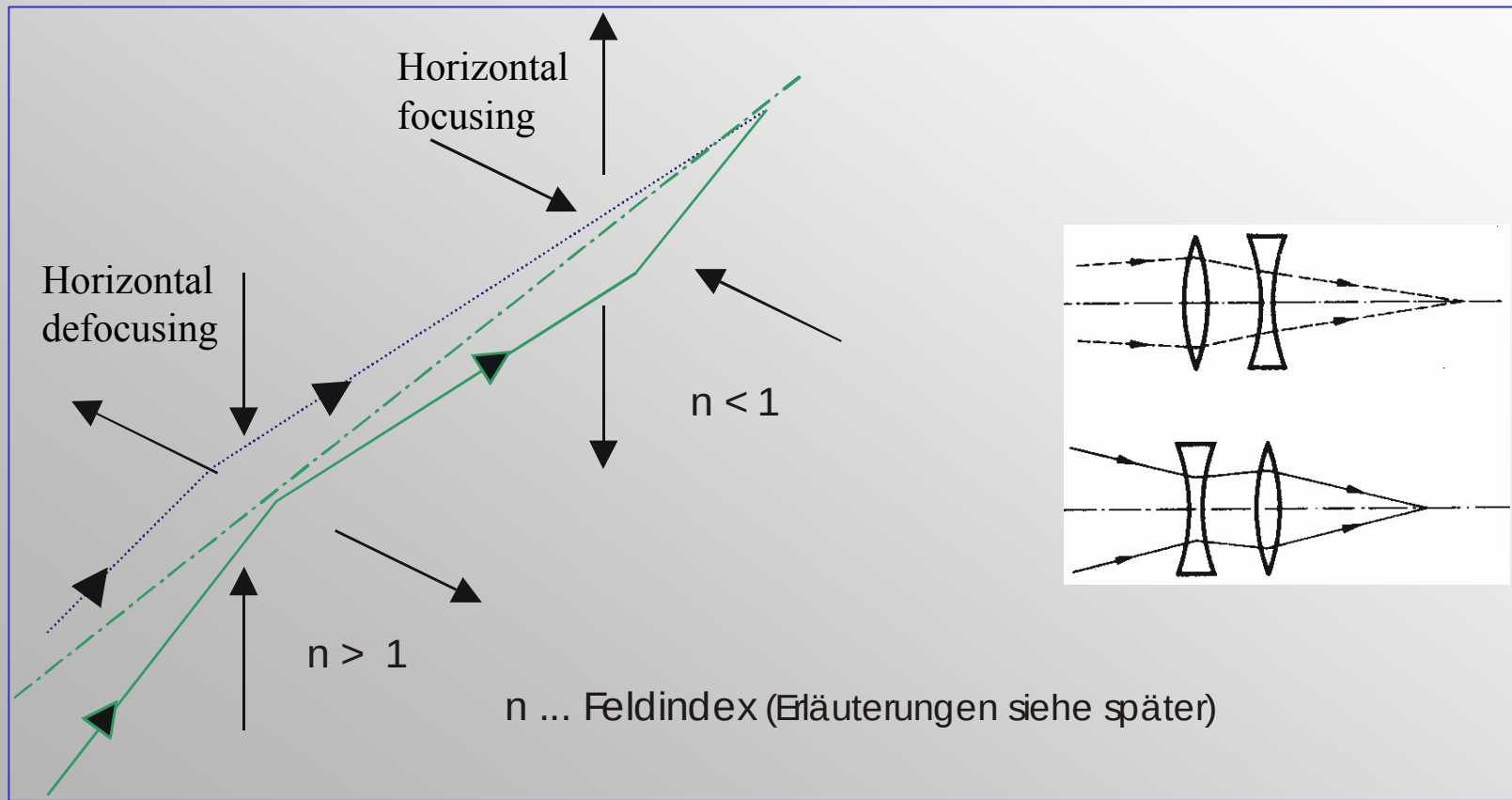


Unterklassen der Synchrotrone

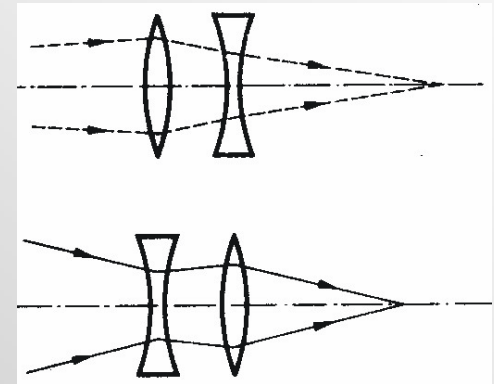
Synchrotrone können nach ihren Funktionsprinzipien in mehrere Unterklassen unterteilt werden:

- Synchrotrone mit „konstantem Feldgradienten“ oder „schwach fokussierende“ Synchrotrone
- „alternating gradient“ oder „stark fokussierende“ Synchrotrone mit Unterklassen
 - „Combined Function“ d.h. Ablenk und Fokussiermagnete in einem Stück
 - „Separated Function“ d.h. Ablenkmagneten und Quadrupolmagneten (Pol: $xz = \text{const}$) separiert -> mehr Flexibilität.

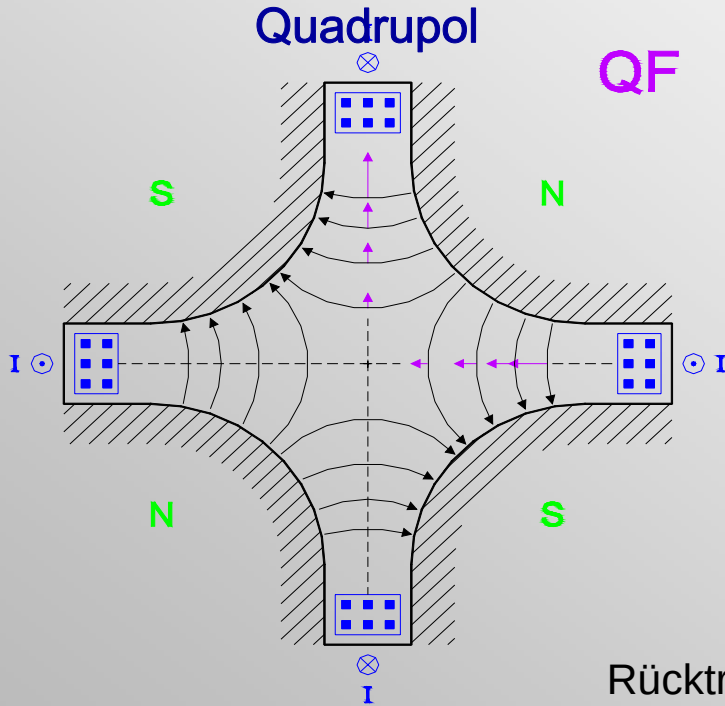
Kraftwirkung auf Teilchenstrahl in einem alternating gradient = stark fokussierenden System



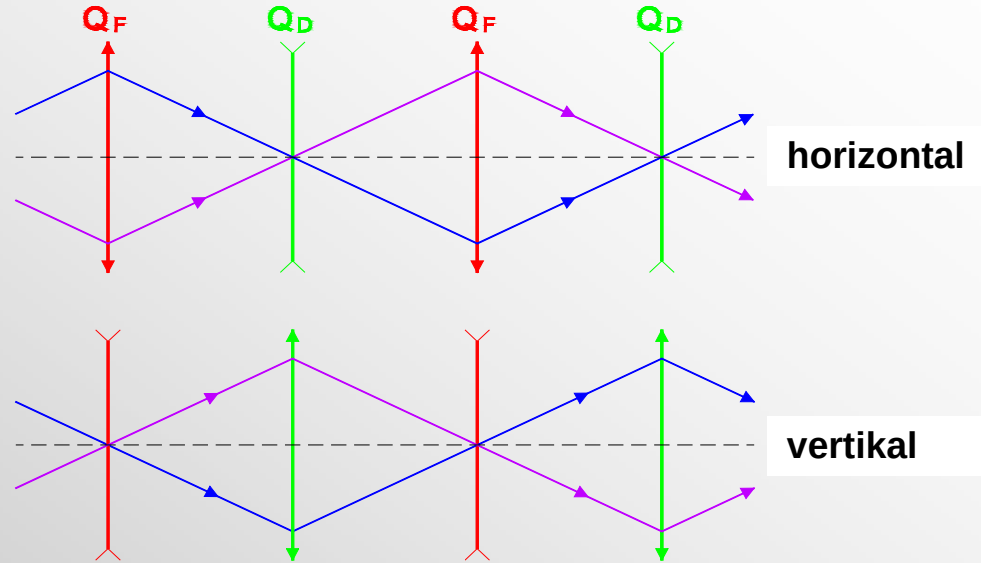
rechts: optisches Analogon



Quadrupol – fokussiert die Teilchen



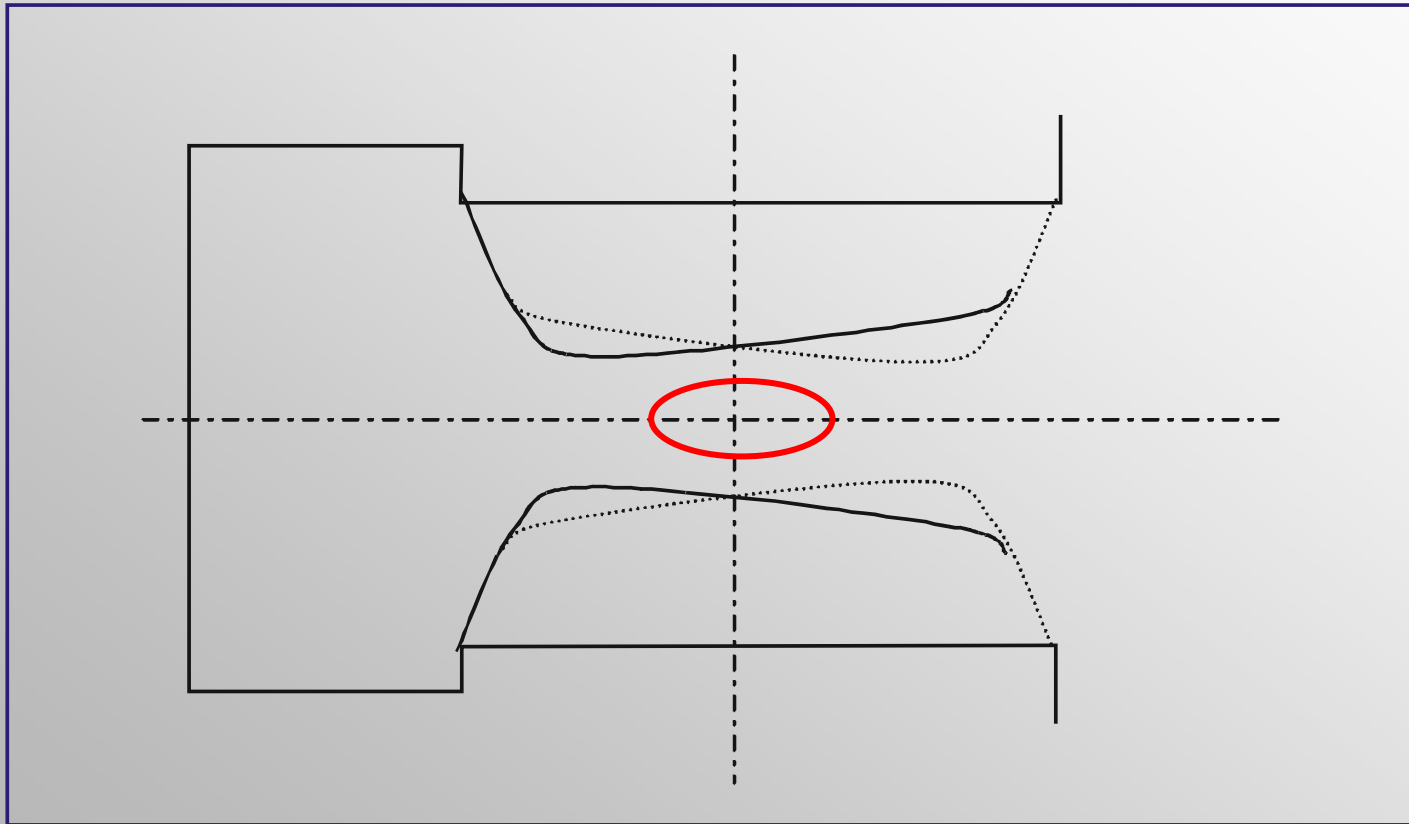
“Alternating gradient” Fokussierung



Rücktreibende Kraft prop. Auslenkung: $F_x = \pm G \cdot x$, $-F_z = \pm G \cdot z$

- Optische Linsen fokussieren sowohl **horizontal** als auch **vertikal**.
- Magnetische Linsen (“**Quadrupole**”) fokussieren in einer, aber defokussieren in der anderen Ebene.
- Mit **alternierenden Gradienten** (QF, QD, QF, QD,...) kann man den Strahl auf einige cm (mm) Strahldurchmesser bündeln.
- Teilchen schwingen um die Sollbahn „Betatronschwingungen“.

Polprofil in einem stark fokussierenden combined function Synchrotron



Die gepunktete Linie zeigt das Profil des nächsten
Polschuhes



3.7 Das Prinzip der Phasenstabilität

- Das Prinzip der beschriebenen Beschleuniger (Linearbeschleuniger, Zyklotron, Synchrozyklotron, Synchrotron) – man kann sie auch „Synchronbeschleuniger“ nennen – besteht im **wiederholten Energiegewinn**
- relativ geringe Energie wird sehr oft an das Teilchenpaket übertragen (Ausnahme Linac)
- Die **Beschleunigung** wird dabei **von** einem **elektrischen Wechselfeld erzeugt**, welches an einer ganz bestimmten Stelle der Teilchenbahn lokalisiert ist
 - (z. B. Spalt zwischen den „Dees“ im Synchrozyklotron, Kavität im Synchrotron, ...).



Sollteilchen = synchrones Teilchen

- Teilchen, welches die richtigen Anfangsbedingungen erfüllt, und daher beim ersten Queren des Beschleunigungsspalt es den richtigen Energiebetrag gewinnt, → bei jedem weiteren Queren des Spaltes immer wieder ein Feld gleicher Richtung und gleichen Betrages vorfindet
- = „synchrones Teilchen“ oder „Sollteilchen“
- Es wird im Laufe des Beschleunigungsprozesses durch phasenrichtige Beschleunigung bei jedem Spaltdurchgang mit dem gewünschten Energiegewinn beschleunigt



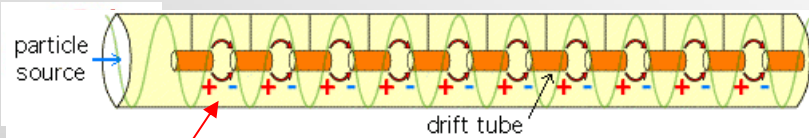
- Synchronisation zwischen der Bewegung des Teilchens und dem beschleunigenden elektrischen Feld
 - Teilchenpaket durchläuft Beschleunigungsstrecke (z.B. Spalt oftmals)
 - Ist die Zahl der Durchquerungen wie beim Zyklotron klein, so wird der exakten Synchronisation ein geringerer Stellenwert zugeordnet
- Praxis: nur eine geringe Zahl von Teilchen erfüllt die exakten Bedingungen für die Sollbahn → Warum?
 - Einschussprozess dauert endliche Zeit
 - Einschuss und Beschleunigung unterliegen statistischen Schwankungen
 - Imperfektionen in der Maschine und in den Regelsystemen.
 - → alle Teilchen haben gering unterschiedliche Phasenlage



- leicht differierende Phasen
 - Wunsch: am Ende des Beschleunigungsvorganges sollen alle Teilchen die gleich Energie aufweisen
- → daher muss in Summe des Energiegewinns / Energieverlustes über alle Durchgängen kompensiert werden
- Wie transversal (Fokussiermagnete) benötigt man auch longitudinal einen Mechanismus der stabilisierend wirkt.



- V.I. Veksler (1944/45) und 1945 E.M. McMillan
theoretische Entdeckung des Prinzips der
„Phasenstabilität“
- → Suche nach einer praktische Konstruktion
- Phase des betrachteten Teilchens unterschiedlich
zur Phase des Sollteilchens
- Phase bei jedem weiteren Durchgängen geändert,
so, dass sie gegen jene des Sollteilchens tendiert
- Unter der Wirkung dieser „Rückstellkraft“ wird die
Phase eines typischen Teilchens um das Sollteilchen
oszillieren, und die von beiden Teilchen gewonnene
Energie (bei vielen Umläufen) wird im Mittel gleich
sein



Spezialfall LINAC

„Phase“ eines Teilchens (Ort / Geschwindigkeit relativ zum Durchgang durch den Beschleunigungsspalt)

- Bewegung eines vom Sollteilchen abweichenden Teilchens im Linearbeschleuniger mit zylindrischen Elektroden
- Für den LINAC definieren wir die Phase relativ zum **Durchgang** durch einen bestimmten Spalt durch die Formel:

$$\varphi = \omega_e t - n\pi$$

mit n = Anzahl der bereits passierten Spalten

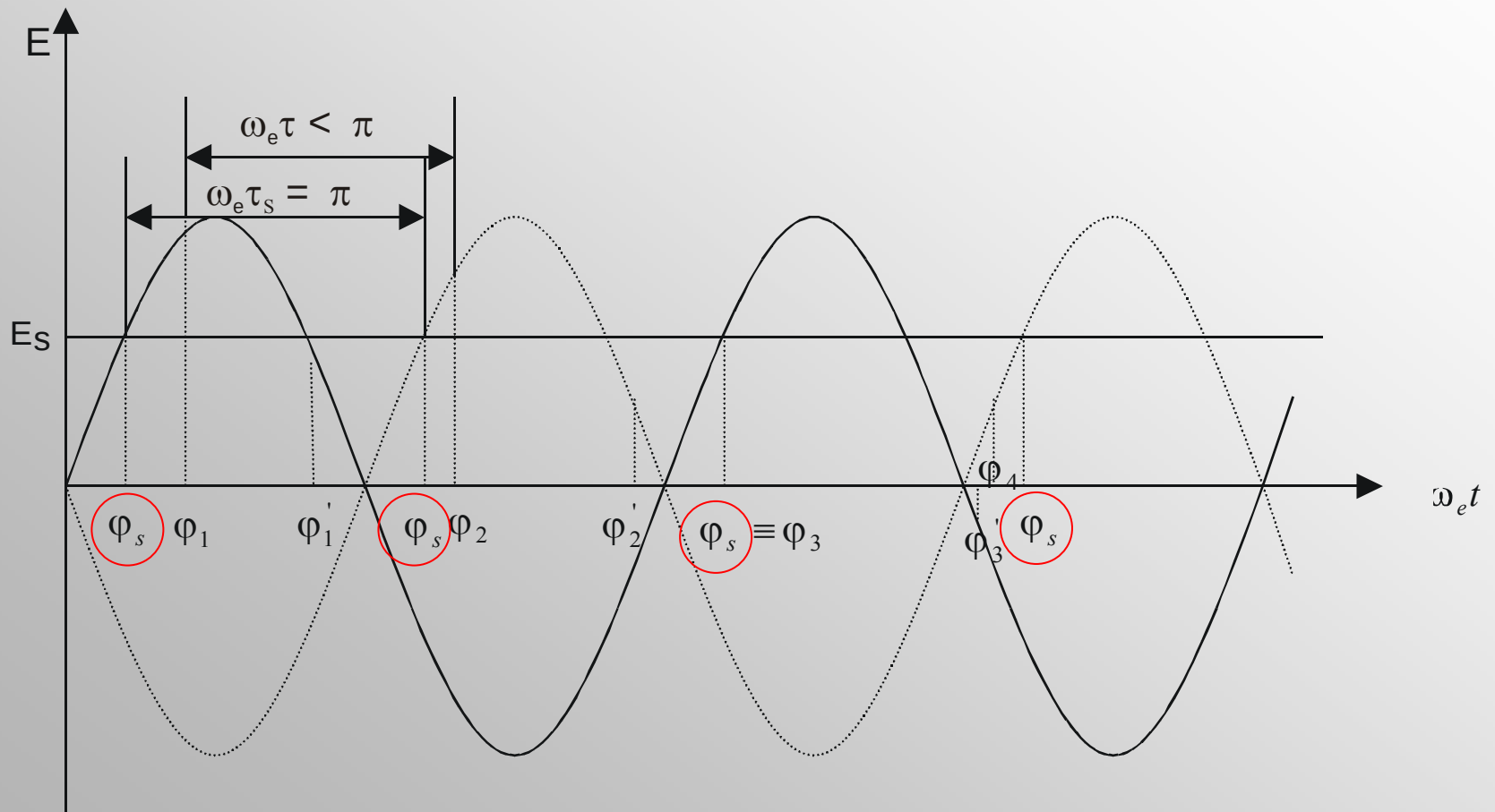


- Weiters soll der Nullpunkt der Zeit so gewählt werden, dass für den ersten Spalt ($n=0$) gilt:

$$0 \leq \varphi \leq \pi$$

- **Frage:** Wie muss φ für das Idealteilchen gewählt werden während der Querung des beschleunigenden Feldes (z.B. Spalt) ?

Zeitliches Verhalten des elektrischen Feldes der geraden (ausgezogen) und ungeraden (punktiert) Spalten eines typischen Teilchens im LINAC





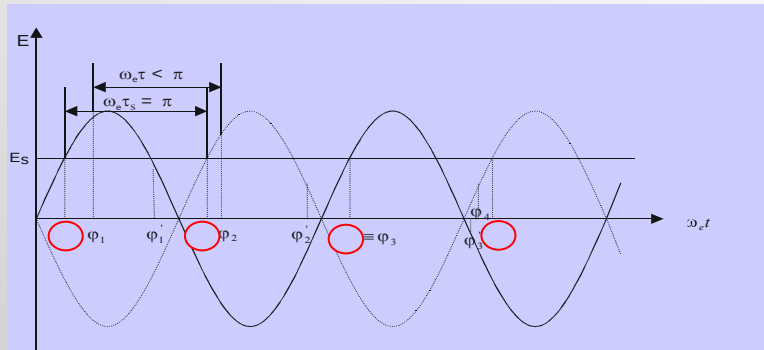
Verlauf des beschleunigenden Feldes im ersten Spalt als Funktion von $\omega_e t$.

- beschleunigendes Feld für alle Spalten mit ungerader Zahl
- Feld für Spalten mit gerader Zahl ist umgekehrt gepolt (strichpunktierte Line)
- φ_s = Phase des Sollteilchens = jene Phase, bei welcher das Teilchen bei allen Durchgängen die gleiche Beschleunigung erfährt
- E_s = Energie des Sollteilchens
- Die Synchron- oder Sollphase ist per Definition für alle Durchgänge gleich
- Für anderen Teilchen, welche der Sollphase "vor-" oder "nach- laufen" wird die Phase kleiner oder größer



Änderung der Teilchenphase

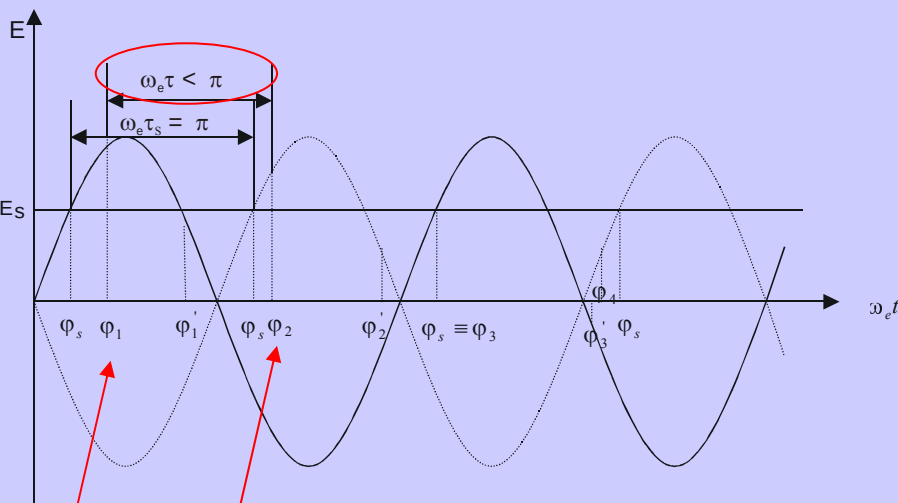
- Teilchenphase ändert sich im Vergleich zur synchronen Phase von Durchgang zu Durchgang
- Der Unterschied der Phasen bewirkt eine Differenz in der beim Spaltdurchgang gewonnenen Energie
- → unterschiedliche Dauer des Durchgangs (bzw. unterschiedliche Geschwindigkeit) bewirkt Änderung in der Phase



Stabile Phase

- **Frage:** Welche Bedingungen muss erfüllt sein, damit die auftretenden Phasendifferenzen in ihrer Größe beschränkt und im Mittel Null sind

- **Annahme:** $0 < \varphi_s < \frac{\pi}{2}$, sodass das Solteilchen mit dem elektrischen Feld in seiner Anstiegsphase in Wechselwirkung tritt



Teilchen hinter Sollteilchen

- **Frage:** Was passiert nun mit dem Teilchen, welches beim ersten Durchgang hinter dem Sollteilchen liegt und dabei eine Phase von $\varphi_1 > \varphi_s$ aufweist?
- **Annahme:** elektrisches Feld ist größer als E_s
 - Teilchen wird daher stärker beschleunigt als das Sollteilchen.
 - Zum Passieren einer Beschleunigungsstrecke wird das Teilchen daher eine Zeitspanne benötigen, die kürzer als jene des Sollteilchens ist.
 - Im darauf folgenden Spalt: zeichnet sich das Teilchen durch eine Phase φ_2 aus, welche näher zu φ_s liegt.

Phasenänderung / Transitzeiten

Sollteilchen reales Teilchen

- $\omega_e \tau_s = \pi$ und $\omega_e \tau < \pi$ siehe Abbildung
- τ und τ_s stellen Transitzeiten dar für den Durchgang durch die zweite Röhren
- Die Änderung der Phase wird solange andauern, bis die Verzögerung zwischen dem betrachteten Teilchen und dem Sollteilchen verschwunden ist



Annahme: keine Phasenverzögerung am Spalt 3

- Annahme: Phasenverzögerung zwischen dem betrachteten Teilchen und dem Sollteilchen ist beim Durchgang durch den 3. Spalt verschwindend klein
- Betrachtetes Teilchen gewinnt in diesem Zeitpunkt gleichzeitig die gleiche Energie wie das Sollteilchen ($\varphi_3 = \varphi_S$)
- Allerdings ist die (zu hohe) Teilchenenergie vor Passage von 3 dafür verantwortlich, dass das Teilchen noch immer eine größere Energie hat und daher den nächsten Spalt früher als das Sollteilchen (Phase φ_4) quert.

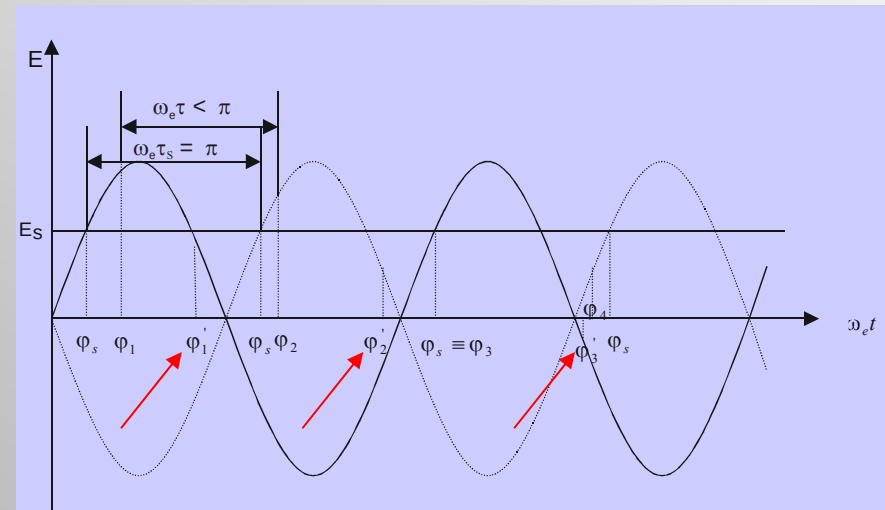


Annäherung an Solteilchen

- Vorsprung wird bei folgender Querung kleiner, da das Teilchen weniger Energie als das Solteilchen gewinnt.
- Einigen Transits später → Teilchen wieder in Phase mit dem Solteilchen
- Phase des typischen Teilchens oszilliert dabei um die Phase des Solteilchens
- Teilchen werden auf ihrer Bahn um das Solteilchen komprimiert
- Aber nur dann, wenn die Phase des Solteilchens kleiner als $\frac{\pi}{2}$ ist, d.h. wenn das Solteilchen in jener Viertelperiode eingeschossen wird, in der die Spannung positiv beschleunigend wirkt und ansteigend ist

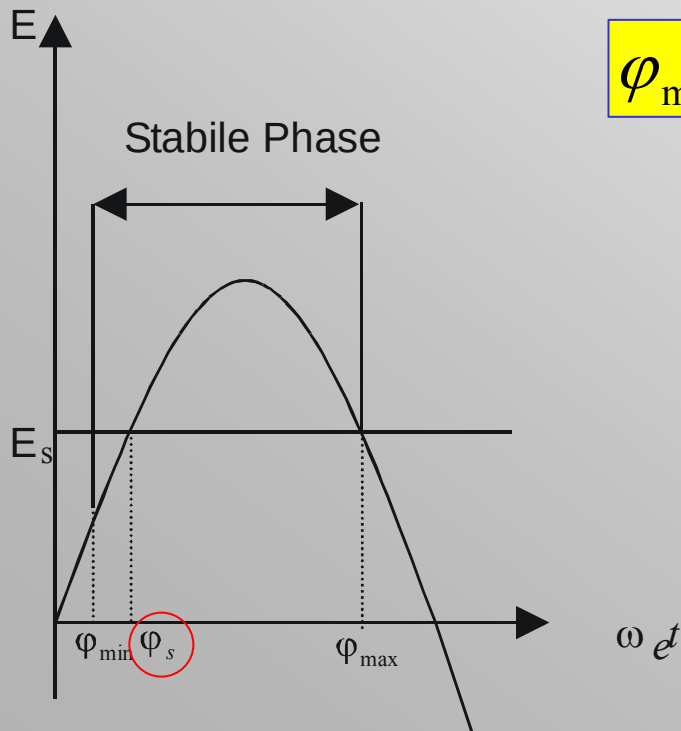
Teilchen hinter dem Solteilchen

- Jene Teilchen, welche noch weiter hinter dem Solkreis zurückbleiben wie jenes mit der Phase φ_1' beim ersten Durchgang, vergrößern ihre Verzögerung unbegrenzt (Phasen φ_2' , φ_3' bei den aufeinanderfolgenden Durchgängen)
- → gewinnen daher im Mittel keine Energie und gehen verloren.



Verwendbare Phasen

- = Phasen, welche um die Sollphase oszillieren können liegen immer zwischen einem Minimalwert und einem Maximalwert



$$\varphi_{\min}$$

$$\varphi_{\max} = \pi - \varphi_s$$

$$\varphi_{\min}$$

$$\varphi_{\max}$$

sind im Allgemeinen nicht symmetrisch zu

$$\varphi_s$$



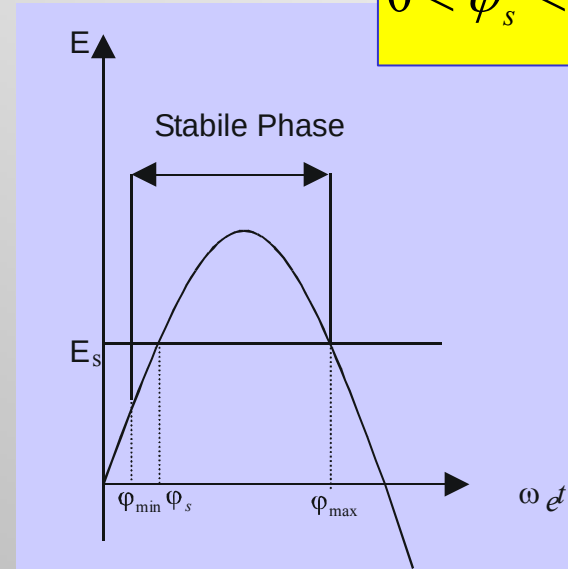
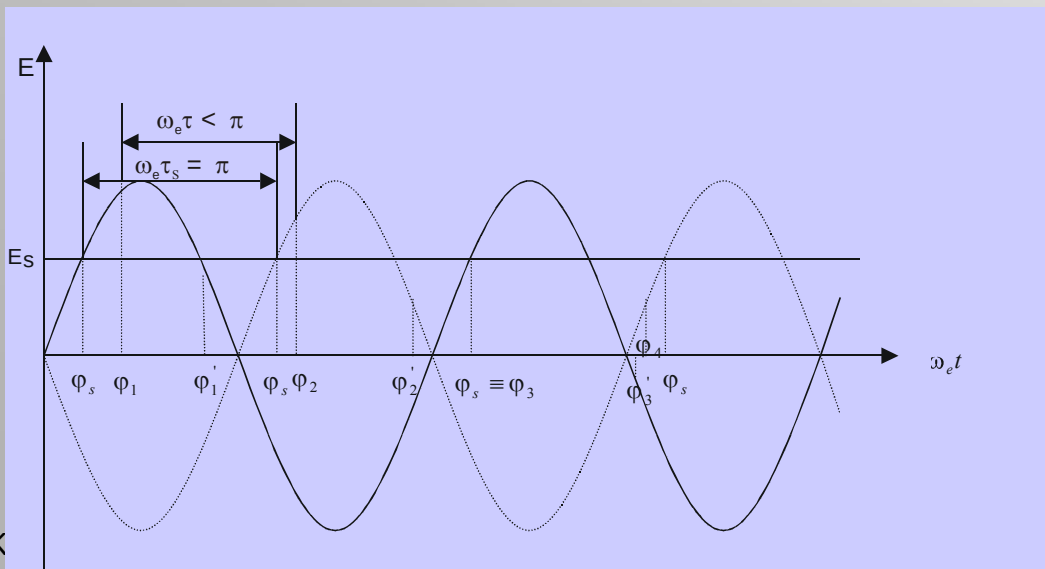
- Falls die Phase eines Teilchens **nicht innerhalb dieses Min / Max** während der Phasenoszillation liegt, fällt es in eine **instabile Zone und geht dabei verloren**
- Der vorgesehene Sollbeschleunigung gegeben durch E_s darf dem Maximalwert des Feldes nicht zu nahe liegen, da anderenfalls der nutzbare stabile Phasenbereich zu klein wird.
- Er ist null für den Grenzfall $\varphi_s = \frac{\pi}{2}$
- Auf der anderen Seite darf E_s nicht zu klein sein, damit die Teilchen eine genügend große Energie besitzen. **Meistens wählt man sodass**

$$\varphi_s \approx 30^\circ$$

$$E_s = \frac{1}{2} E_{\max}$$

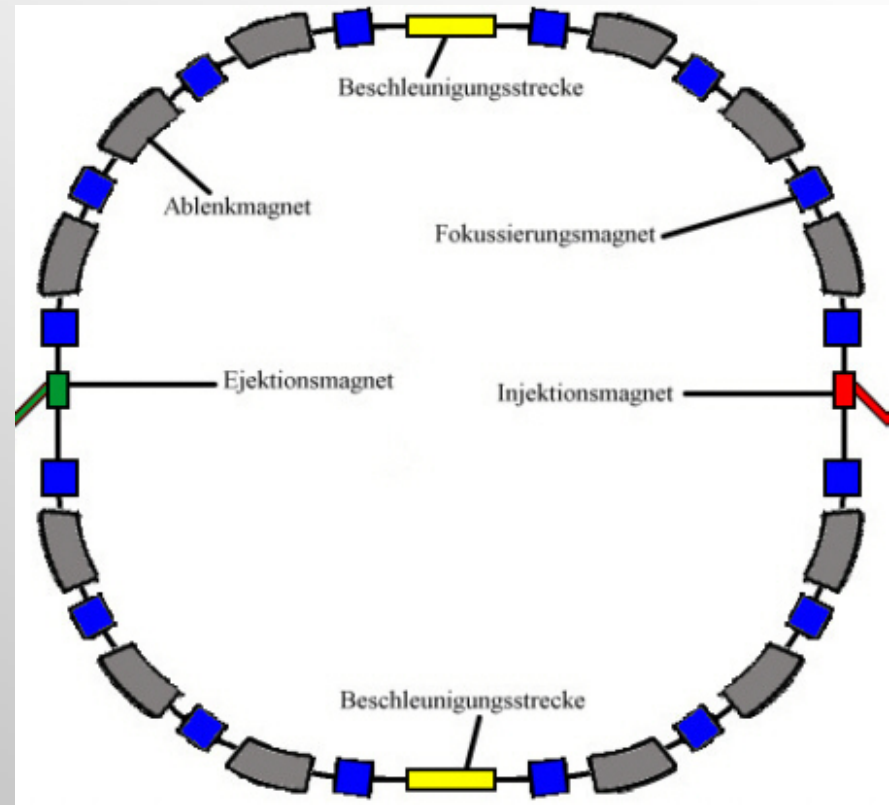
3.8 Allgemeine Diskussion des Prinzips der Phasenstabilität

- Im vorangegangenen Abschnitt führt die Tatsache, dass eine Beschleunigung eine verkürzte Durchgangszeit zwischen zwei aufeinander folgenden Durchgängen bedingt, zur Wahl eines stabilen Bereiches für $0 < \varphi_s < \frac{\pi}{2}$



Transitzeiten

- Nicht in allen synchronen Beschleunigern ist eine **höhere Teilchenenergie** unmittelbar mit einer **kürzeren Transferzeit** zwischen den Beschleunigungsstrecken verbunden



Synchrotron

- Zunahme der vom Teilchen gewonnenen Energie → zu einer Zunahme der Transitzeit zwischen den Beschleunigungen
- In diesem Fall findet man mit Hilfe der gleichen Argumente wie im vorhergehenden Kapitel, dass die Phasenstabilität für

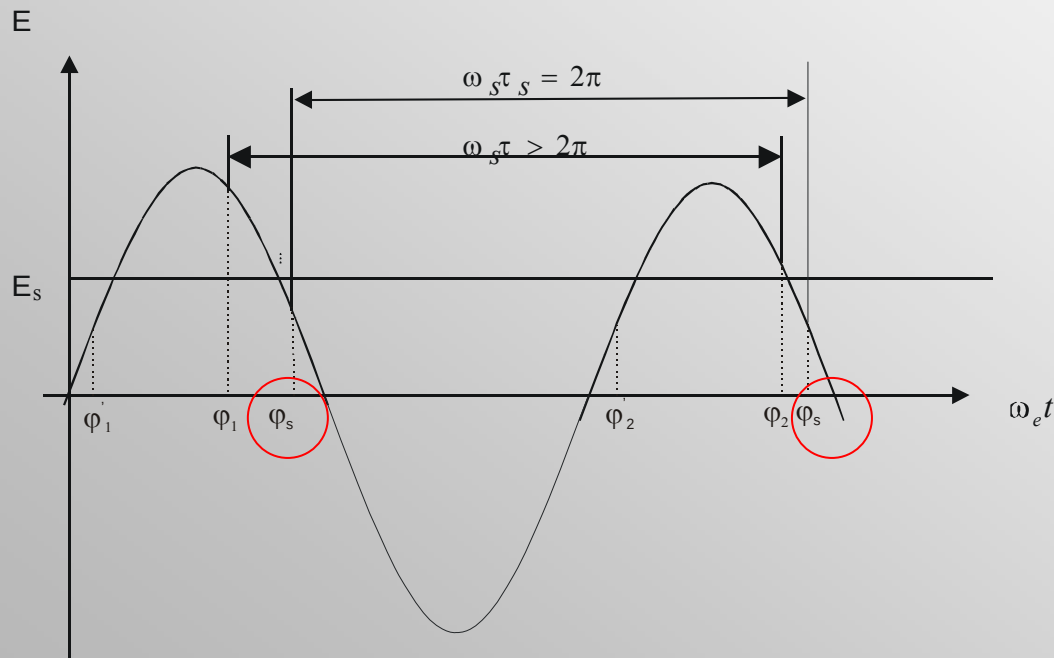
$$\frac{\pi}{2} < \varphi_s < \pi$$

Existiert (above transition)

- = Phase in der das beschleunigende Feld mit der Zeit abnimmt

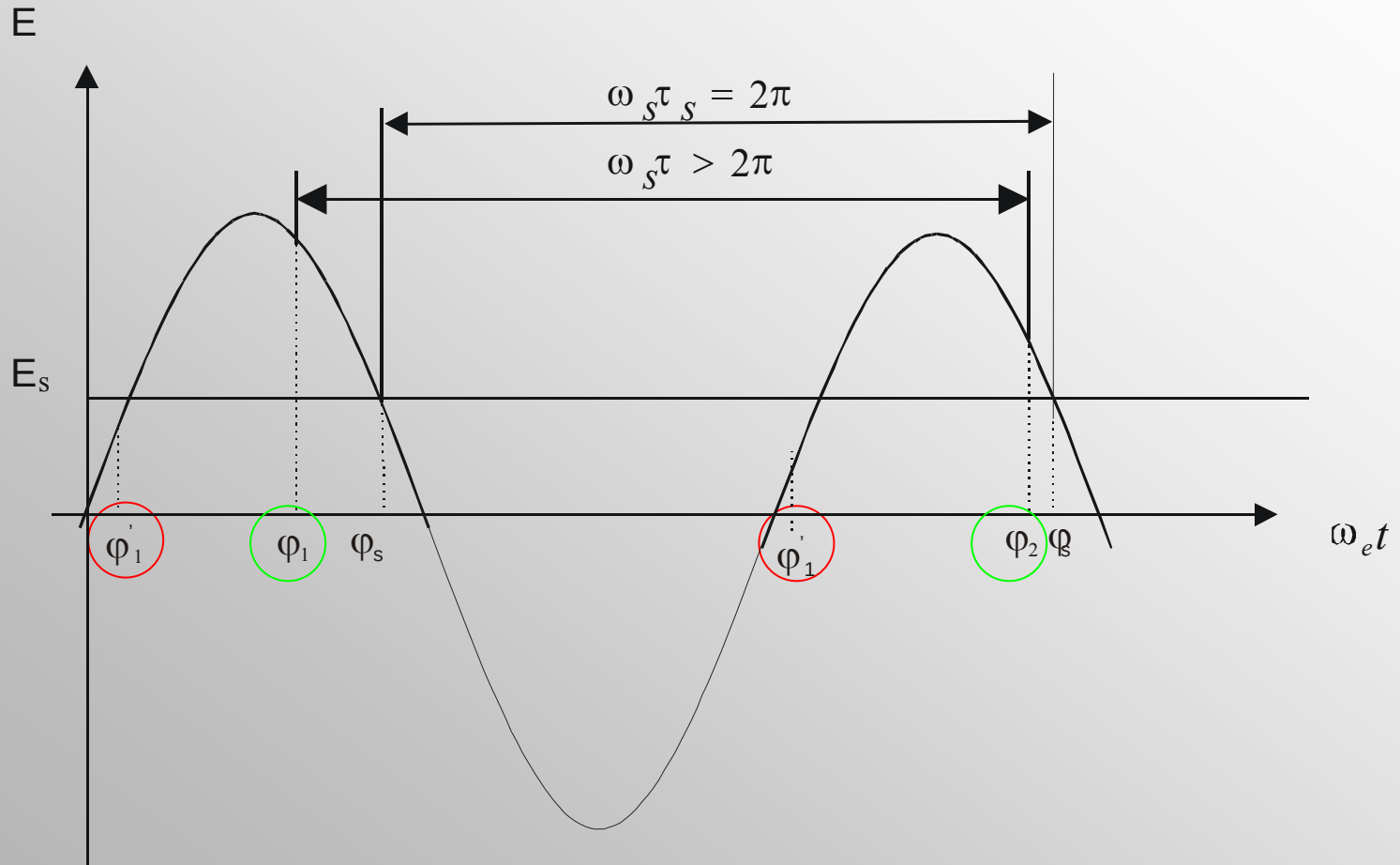
Synchrotron mit einer Kavität

- Annahme: elektrische Feld = periodisch veränderlich





Phasenstabilität oberhalb Transitionsenergie





Allgemeine Beschreibung des Mechanismus der Phasenstabilität für verschiedene Synchron-Maschinen

- „Impuls-Kompressions-Faktor (α)“

$$\alpha = \frac{dp/p}{dS/S}$$

- S die von einem Teilchen zwischen zwei aufeinander folgenden Durchgängen durch das beschleunigende Feld zurückgelegte Wegstrecke
- p der Impuls des Teilchens auf dieser Wegstrecke ist

Diskussion α

$$\alpha = \frac{dp/p}{dS/S}$$

- Falls α groß ist, bedeutet dies, dass **nahe beieinander liegende Bahnen zu stark verschiedenen Impulsen gehören können**, sodass in einem engen Bündel von Bahnen viele Impulse „komprimiert“ sind
- Falls α klein ist, bedingt **eine kleine Änderung des Impulses eine große Änderung der Bahnen**. Hier können sich die **schnellen Teilchen gegenüber den langsameren Teilchen verzögern**, da sie eine längere Bahn zu durchlaufen haben.

α beim Linearbeschleuniger

- Alle Teilchen folgen der selben Bahn, unabhängig von der Größe des Impulses

- $\alpha = \infty$ und $dS = 0$

-
- Einführung eines „Soll Radius“ für Synchrotrone

$$r = S / 2\pi \longrightarrow \alpha = \frac{dp/p}{dr/r}$$

- α ist abhängig von den Beschleunigerparametern, wie r , p , ...

Bestimmung des Verhältnisses zwischen der Änderung des Impulses und der Änderung der Transitzeit zwischen zwei aufeinander folgenden Beschleunigungen

$$\begin{array}{c}
 \boxed{\tau = \frac{S}{v}} \quad \boxed{v = c\beta} \quad \boxed{\alpha = \frac{dp/p}{dr/r}} \\
 \swarrow \quad \searrow \quad \searrow \\
 \boxed{\frac{d\tau}{\tau} = \frac{dS}{S} - \frac{dv}{v} = \frac{dS}{S} - \frac{d\beta}{\beta}} \quad \boxed{cp = \beta E} \quad \boxed{\frac{d\tau}{\tau} = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\gamma^2} \right) \frac{dp}{p}} \\
 \nwarrow \\
 \boxed{\frac{d\beta}{\beta} = (1 - \beta^2) \frac{dp}{p} = \frac{1}{\gamma^2} \frac{dp}{p}}
 \end{array}$$

Einfluss einer Impulsänderung auf die Änderung der Transitzeit

Wobei:

Impuls und die Transitzeit des Sollteilchens $\boxed{p}$ $\boxed{\tau}$
 zugehörigen Differenzen des benachbarten Teilchens zum
 Sollteilchen $\boxed{dp}$ $\boxed{d\tau}$

Diskussion α (Impuls-Kompression-Faktor)

$$\alpha = \frac{dp/p}{dr/r}$$

$$\frac{d\tau}{\tau} = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\gamma^2} \right) \frac{dp}{p}$$

- Im Linearbeschleuniger: $\alpha = \infty$

- Immer **umgekehrte** Vorzeichen

$$\frac{d\tau}{\tau} \longleftrightarrow \frac{dp}{p}$$

- Im Synchrotron: $\alpha < 1$

- Ultrarelativistisch (p gross): $\alpha \rightarrow 0$

- Immer **gleiches** Vorzeichen

$$\frac{d\tau}{\tau} \longleftrightarrow \frac{dp}{p}$$

- Niedrigenergetisch:

- Eventuell **entgegengesetztes** Vorzeichen! (below transition)



Phasenstabilität existiert in den folgenden Fällen:

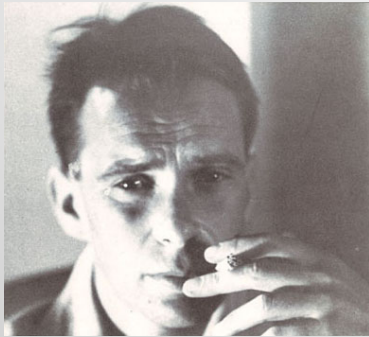
$$0 < \varphi_s < \frac{\pi}{2}$$

Wenn $\alpha > \gamma^2$

$$\frac{\pi}{2} < \varphi_s < \pi$$

wenn $\alpha < \gamma^2$

Sonderfall: wenn $\alpha = \gamma^2$ wechselt $\frac{dp}{d\tau}$ ständig das Vorzeichen → meist mit Teilchenverlust verbunden!
TRANSITIONSÜBERGANG im Synchrotron
-> Erfordert Phasensprung der RF.



Bruno Touschek

3.9 Speicherring

- Konstanter Energie möglichst lange ohne große Intensitätsverluste
- 1943 von Rudolf Kollath, Bruno Touschek und Rolf Wideröe
- 12 Jahre später (1955) Donald W. Kerst und Gerry O'Neill → Vorschläge zum Bau
- ab 1958 wurden in Stanford und Moskau Pläne ausgearbeitet



Beschleuniger - Speicherring

- Speicherring ist nicht immer auch Beschleuniger
 - Teilchenenergie und Teilchengeschwindigkeit = const.
- ständiges Hinzufügen neuer Teilchen
- ohne nennenswerte Verluste
- viele Stunden umlaufen zu lassen
- gleichen Komponenten wie das Synchrotron
 - Ablenkmagneten
 - Fokussierungsmagneten
 - Beschleunigungsstrecken (RF um Pakete zu erhalten)
 - z.B.: zwei Injektionspunkte, an denen jeweils Elektronen und Positronen in den Speicherring eingebracht werden.
 - entgegengesetzten Ladung aber identischen Masse → entgegengesetzter Richtung durchlaufen
 - → Kollisionspunkt

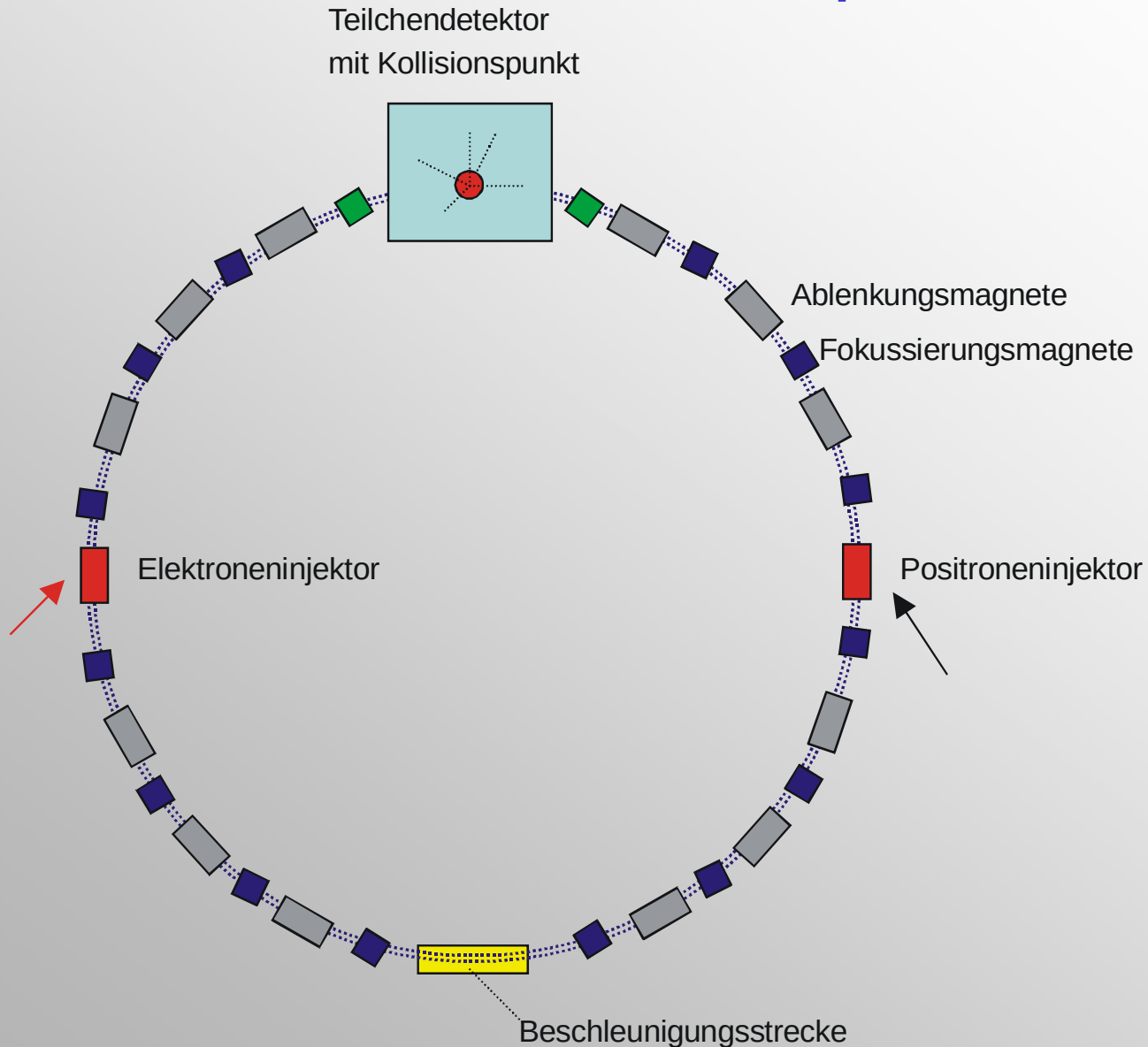


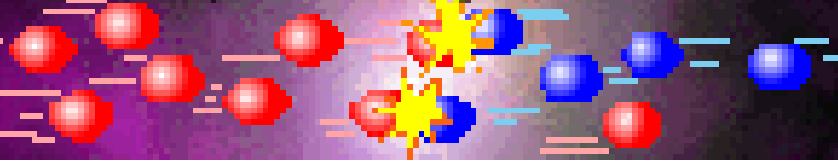
Kollisionsspeicherring

- z.B.: zwei Injektionspunkte, an denen Teilchen in jeweils umgekehrter Richtung in den Speicherring eingebracht werden.
- Bsp. Elektronen und Positronen
 - entgegengesetzten Ladung aber identischen Masse →
 - Durchlaufen gleiche Vakuumkammer und Magneten in entgegengesetzter Richtung
 - → Kollisionspunkt



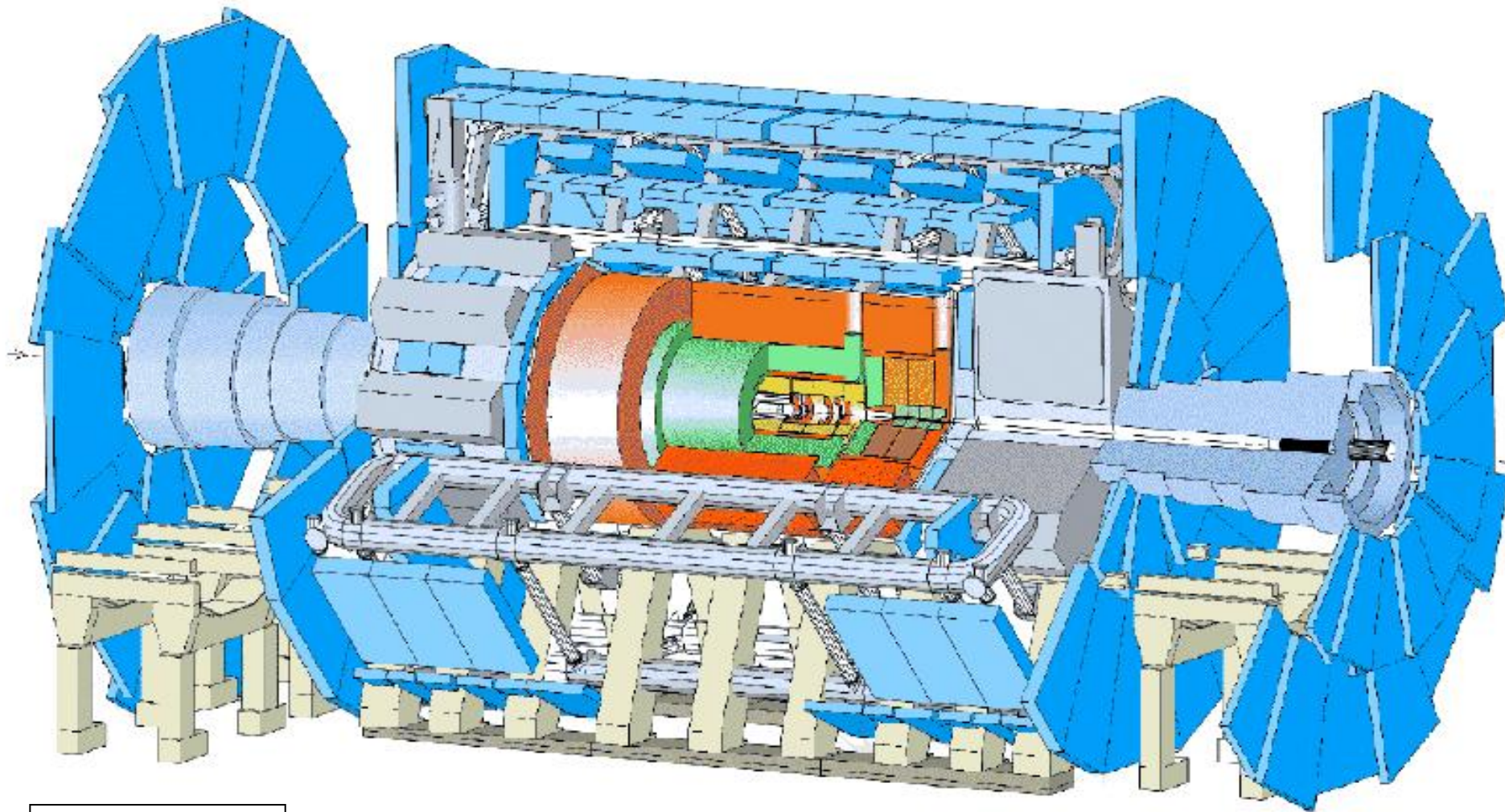
Elektronen-Positronen-Speicherring



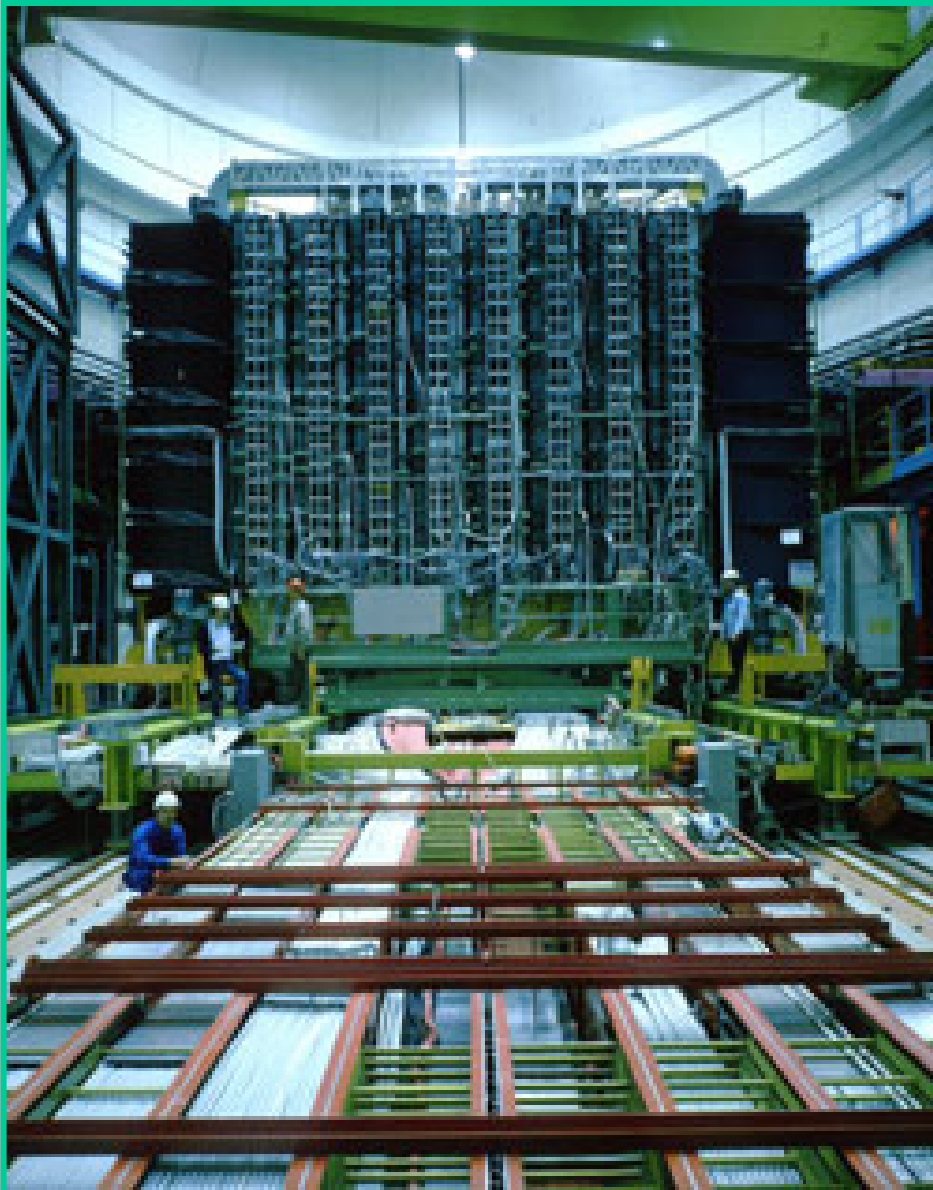


Colliding Beam Experimente

Detektoren z.B. Atlas



Ca. 2 m



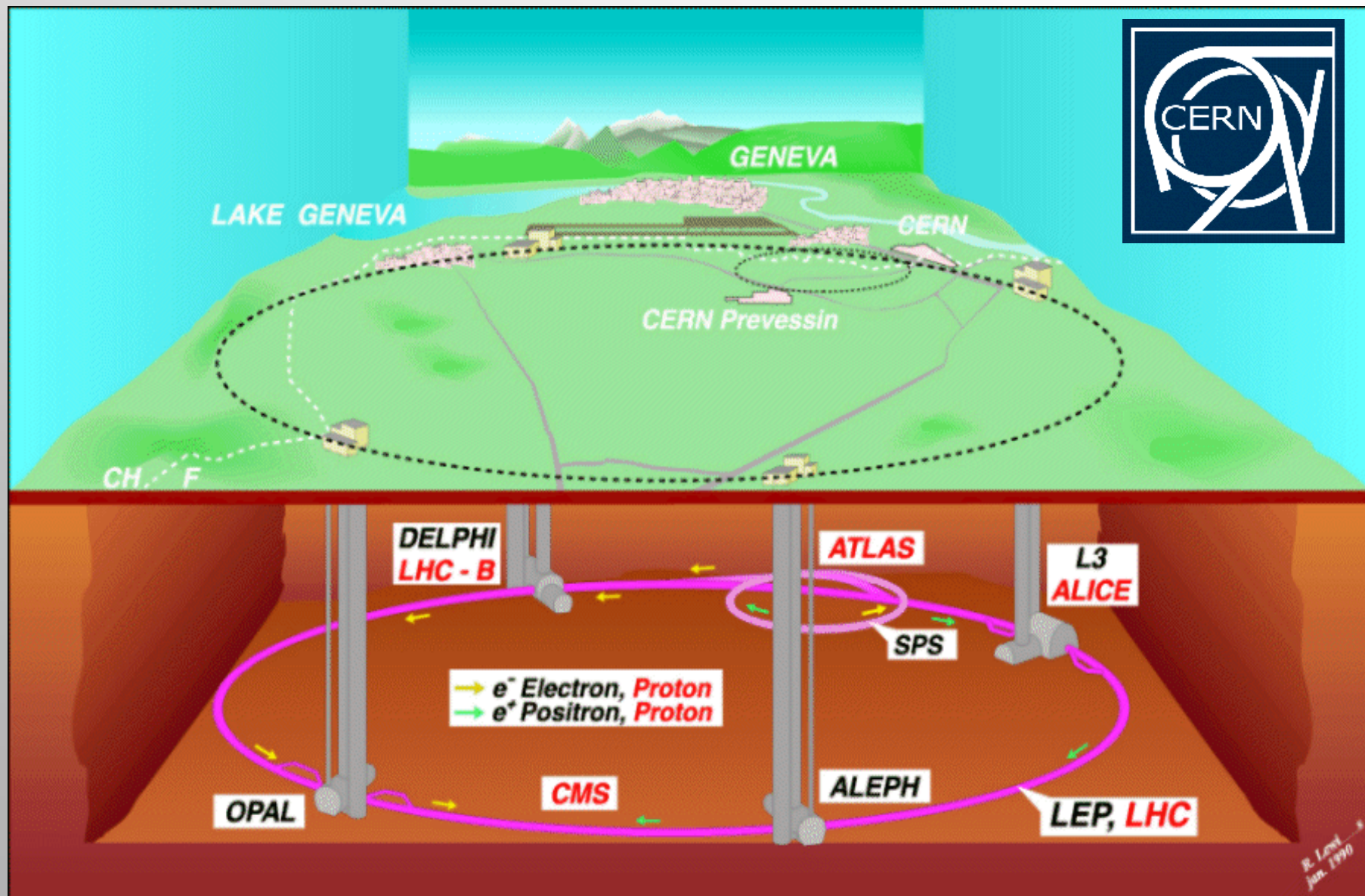
Mit Hilfe des UA 1-Detektors p-pbar SPS, konnten die $W^\pm$ und Z Bosonen (Kräfteteilchen der schwachen Wechselwirkung) gefunden werden.

1984: Nobelpreis an C. Rubbia & S. Van der Meer

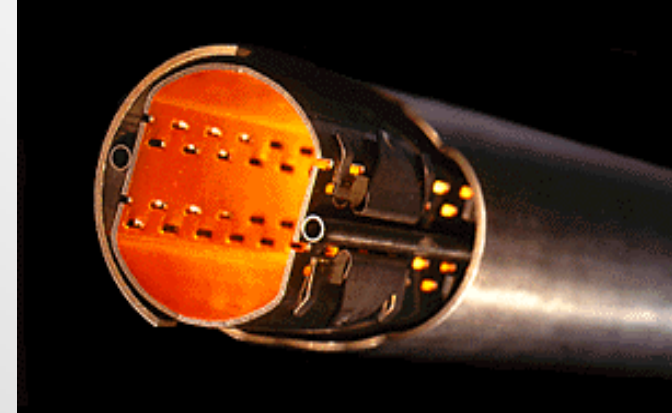
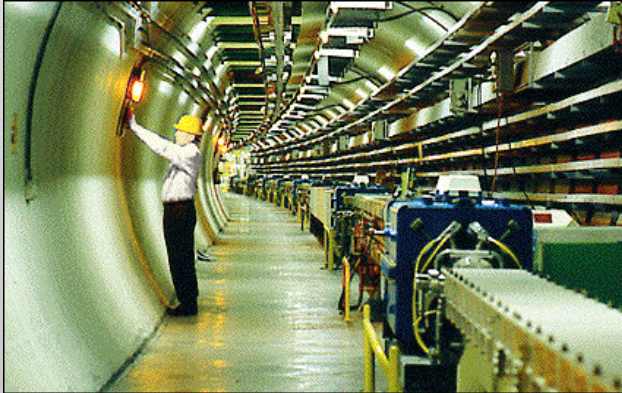
Das Institut für Hochenergiephysik Wien war am Erfolg dieses Experimentes wesentlich beteiligt.



Experimente	Beschleuniger	Labor	Forschungs- schwerpunkt
CDF, D0	TEVATRON	FNAL (Chicago/USA)	Top-Quark, Higgs-Suche
STAR	RHIC	BNL (New York/USA)	Quark-Gluon- Plasma
BABAR	PEP II	SLAC (Kalifornien/ USA)	CP-Verletzung
BELLE	KEK B	KEK (Japan)	CP-Verletzung
H1, ZEUS	HERA	DESY (Deutschland)	QCD
CMS, ATLAS, ALICE, LHCb	LHC	CERN (Genf/ Schweiz)	Higgs-Suche, neue Physik



Speicherringe



Das Centre Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN, CH) nahe Genf (graphisch überlagert) und ein Blick ins Innere des großen Tunnels (LHC Sector 8-1)



Strahlqualität im Speicherring - Emittanz

- Kollisionspunkt: **Großdetektor**
- Beschleunigungsstrecken wegen Energieverlust
- **Synchrotronstrahlung**
- Entscheidend: **Strahlqualität**
 - **Definition Strahlqualität: geometrische Bündelung in transversaler Richtung (Fokussierung)**
- Impuls- und Energieunschärfe, sowie die zeitliche Struktur des Strahls erfordern **fokussierende Elemente**, welche den Teilchenstrahl einschnüren und dem Strahl eine „**Strahl – Taille**“ aufzwingen.
- Maß für die **Strahlqualität: Emittanz**, die sich aus der **Ortsausdehnung** und der **Winkelverteilung im Strahl** zusammensetzt (transversale Phasenraumfläche)
- **Kleine Emittanzwerte → bessere Strahlqualität → bessere Reaktionsrate im Experiment**





Parameter einiger typischer Beschleuniger

Beschleuniger	Teilchen	Beam Energie (in GeV)	Energie im Kollisionspunkt (in GeV)	Luminosität ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Anmerkungen
KEK Japan	p	12	5	-	Fixed target
AGS Brookhaven	p	33	8	-	Fixed target, polarisierte p
PS Cern	p e ⁺ , e ⁻ , p ⁻ , Ionen	28 (p) 3,5(e)	7 -	- -	Fixed target Injektor
CESR Cornell	e ⁺ , e ⁻	9	18	10^{32}	Collider
TEVATRON II FNAL	p p, p ⁻	800 (p)	40 -	- -	Fixed target, Injektor
SPS CERN	p, e p, p	- 450 (p), 20(e) 2x315	30 (p), - 630	- 3×10^{30}	Fixed target, Injektor, collider
SLC SLAC	e ⁺ , e ⁻		100	(6×10^{30})	Linear collider
TEVATRON I FNAL	p, p ⁻	900	1800	10^{31}	Synchrotron collider
TRISTAN Japan	e ⁺ , e ⁻	32	64	8×10^{31}	Collider, Synchrotron
LEP I2 CERN	e ⁺ , e ⁻	100	200	$1,6 \times 10^{31}$	Collider
HERA DESY	e, p	30(e ⁻) 820 (p)	310	3×10^{31}	Collider Synchrotron p-Ring

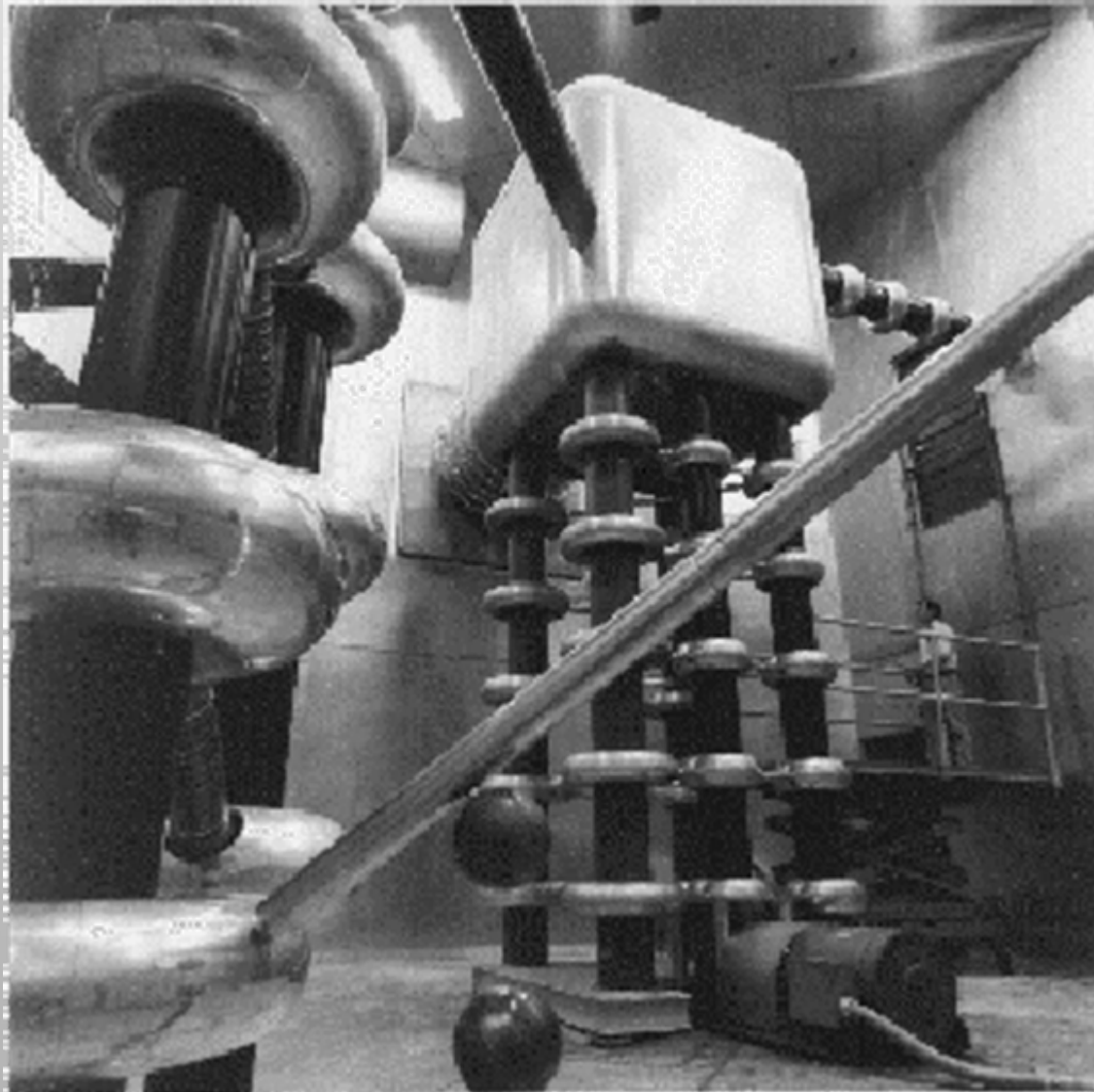


Meilensteine in der Beschleunigerphysik

Jahr	Persönlichkeit	Ereignis
1921	Greinacher, H	Entwicklung des Kaskadengenerators zur Erzeugung hoher Gleichspannungen
1924	Ising, G	Vorschlag eines Linearbeschleunigers mit Driftröhre , bei dem die Teilchen durch eine hochfrequente Wechselspannung beschleunigt werden
1928	Wideröe, R	Bau des ersten Linearbeschleunigers und Beschleunigung von Na^+ - und K^+ - Ionen mit einer Hochfrequenzspannung von 25 kV auf eine Energie von 50 keV . Versuche zur Entwicklung eines Betatrons scheiterten wegen der fehlenden transversalen Fokussierung
1930	Van de Graaff, RJ	Bau des ersten MV-Hochspannungsgenerators mit einer Spannung von bis zu 1,5 MV
1930	Lawrence, EO (Nobelpreis Physik 39)	Idee des Zyklotrons
1932	Cockcroft, JD Waltson, ETS (Nobelpreis Physik 51)	Bau des ersten elektrostatischen Beschleunigers unter Verwendung eines 800 kV Kaskadengenerators ; Spannungsfestigkeit der Anlage: 700 kV, erste Kernreaktionen mit 400 keV Protonen: ${}^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ und ${}^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow {}^7\text{Be} + \text{n}$



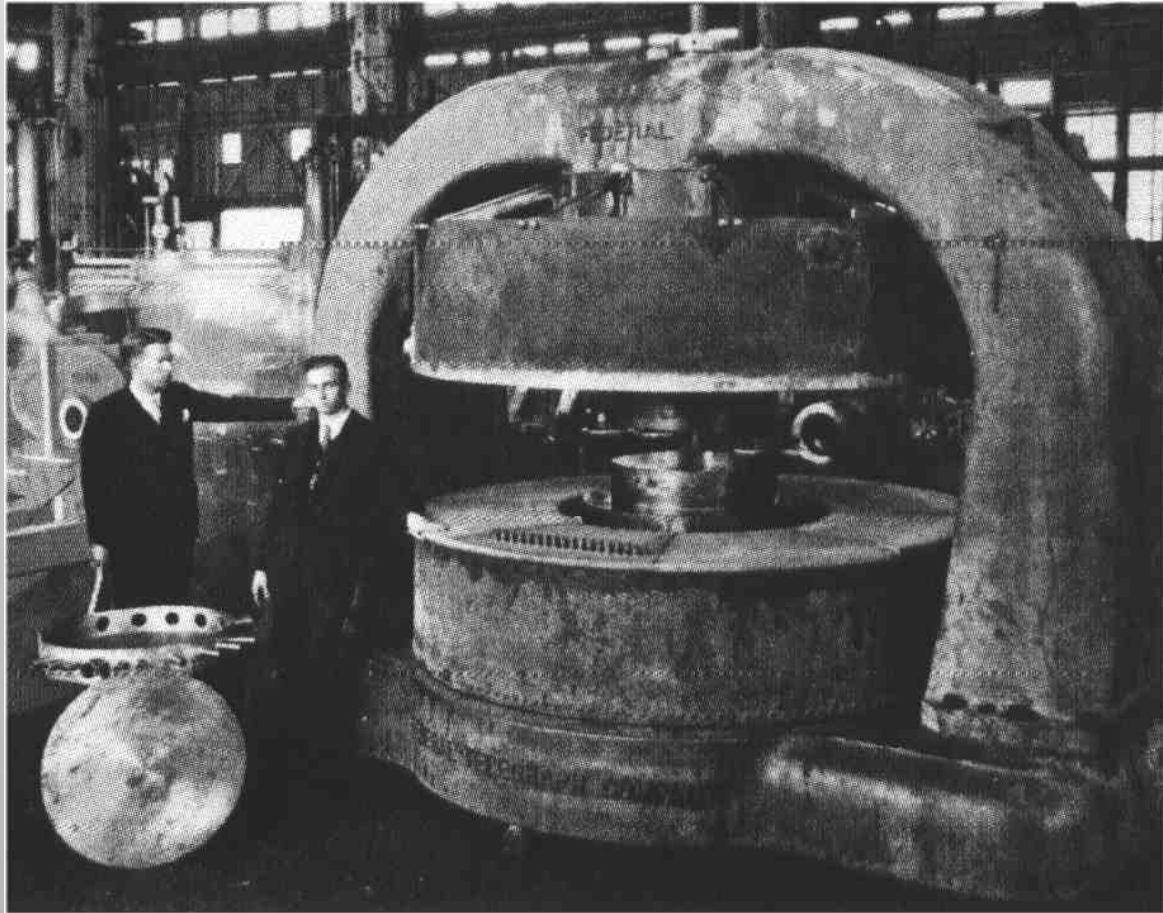
Cockcroft – Walton Beschleuniger





1932	Lawrence, EO Livingston, MS	Beschleunigung von Protonen in einem Zyklotron auf eine Endenergie von 1,25 MeV
1938	Thomas, G	Vorschlag des Prinzips der starken Fokussierung für das Zyklotron (Magnetische Sektorfelder)
1939	Lawrence, EO (Nobelpreis Physik 39)	Inbetriebnahme des ersten größeren Zyklotrons in Berkeley. Mit dem Polschuhdurchmesser von 60 inch werden Protonen auf 9 MeV, Deuteronen auf 19 MeV und α -Teilchen auf 35 MeV beschleunigt. Erste Versuche zur Tumorthherapie mit Neutronen aus der Spaltung der Deuteronen.
1941	Kerst, DW Serber, R	Erste erfolgreiche Beschleunigung von Elektronen in einem Betatron mit einer Endenergie von 2,5 MeV. Untersuchung der sog. Betatronschwingungen und der Bahnstabilität bei konstantem Gradienten
1945	Veksler, VI McMillan, EM	Getrennte Entdeckung des Prinzips des Synchrotrons und der Phasenfokussierung
1946	Godward, FK Barnes, DE	Bau des ersten Elektronensynchrotrons unter Verwendung eines Betatronmagneten
1946	Alvarez, LW	Entwurf des ersten 200 MHz Linearbeschleunigers für Protonen in Berkeley
1947	Ginzton, EL	Stanford, Beschleunigung von Elektronen mit dem ersten 2,855 GHz Linearbeschleuniger bis zu einer Energie von 4,5 MeV

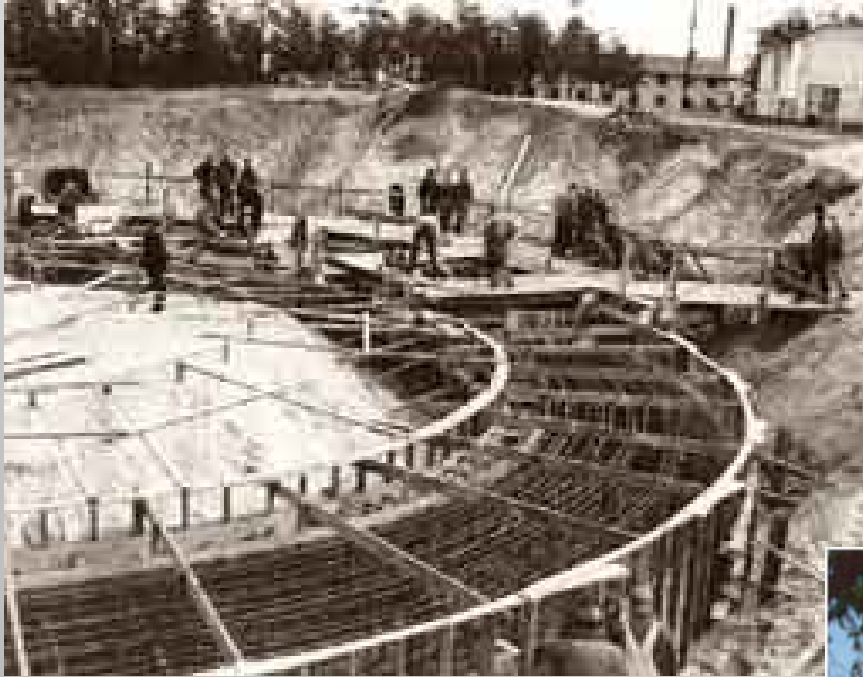
E. Lawrence und M.S. Livingston



27-inch Zyklotron in den dreißiger Jahren in Berkeley/USA



1947	Oliphant, ML Gooden, ML Hyde, GS	Vorschlag eines Synchrotrons für 1 GeV Protonen : Inbetriebnahme 1953
1949	McMillan, EM	In Berkeley, Inbetriebnahme eines Elektronensynchrotrons mit einer maximalen Energie von 320 MeV
1952	Brookhaven National Laboratory (USA)	Inbetriebnahme eines 3 GeV Protonensynchrotrons , („Comotron“); erstmalige Beschleunigung von Teilchen auf Energien, die sonst nur bei kosmischen Strahlen beobachtet werden
1952	Courant, E Livingston, MS Snyder, H	Veröffentlichung der für die weitere Beschleunigerentwicklung entscheidend wichtigen Untersuchung zur starken Fokussierung, d.h. zur Fokussierung mit "alternating gradient"
1953	Paul, W (Nobelpreis Physik 89)	Paulsches HF-Massenfilter , „Paul-Falle“
1953	Paul, W	An der Universität Bonn - Baubeginn für das erste europäische Synchrotron mit starker Fokussierung (500 MeV Elektronensynchrotron) , Inbetriebnahme 1958
1954	Wilson, RR	An der Cornell Universität (USA) - Inbetriebnahme des ersten Elektronensynchrotrons mit starker Fokussierung und einer Endenergie von 1,1 GeV .
1954	Berkeley	Inbetriebnahme des sog. Bevatrons , eines 6,2 GeV Protonensynchrotrons .



Bevatron, Berkeley 1954-1993

Beschleunigung von
Protonen auf 6 GeV





1954	CERN	In Genf: Gründung des europäischen Kernforschungszentrums CERN (Conseil Européen de Recherche Nucléaire)
1955	Sergé, E Chamberlain, O (Nobelpreis Physik 59)	In Berkeley: Erzeugung von Antiprotonen und Antineutronen mit Protonen aus dem Bevatron.
1959	DESY	In Hamburg Gründung des DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron).
1959	CERN	Inbetriebnahme des CERN PS, des ersten großen Protonensynchrotrons mit "alternating gradient" Maximale Protonenenergie: 28 GeV; noch heute die erste Stufe für alle weiteren Hochenergiebeschleuniger am CERN; wird auch zur Beschleunigung von Antiprotonen, Elektronen, Positronen, Deuteronen und schweren Ionen benutzt
1960	Brookhaven National Laboratory (USA)	Ebenfalls Inbetriebnahme eines großen Protonensynchrotrons mit „alternating gradient“, des sog. AGS (Alternating Gradient Synchrotron); Maximalenergie 33 GeV
1961	Frascati (Italien)	Inbetriebnahme des ersten Speicherrings für Elektronen und Positronen AdA (Anello di Accumulatione); maximal erreichbare Energie: 250 MeV
1962	DESY	In Hamburg Inbetriebnahme des Deutschen Elektronen Synchrotrons DESY; Beschleunigung von Elektronen auf 6 GeV

DESY, Hamburg





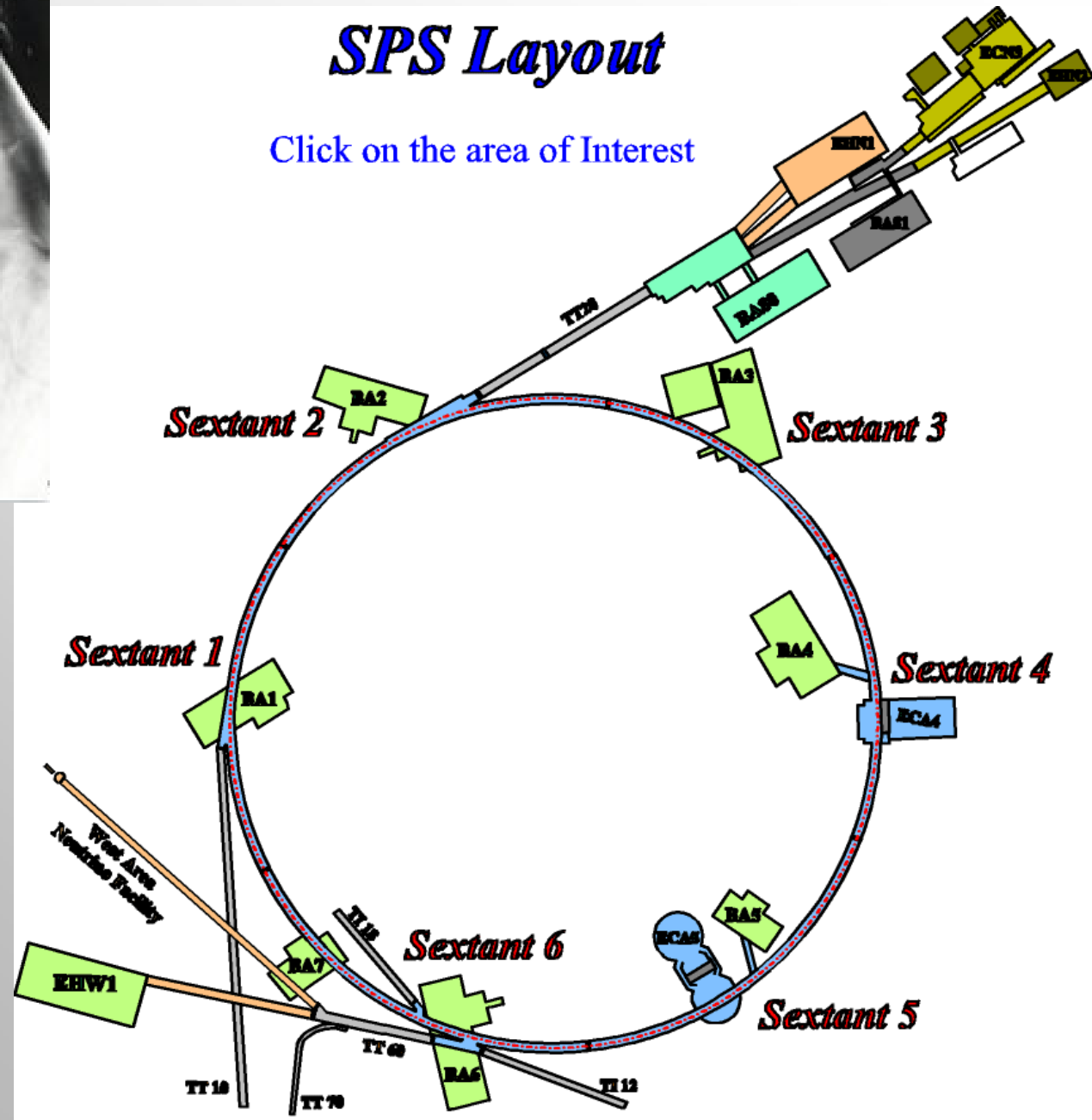
1966	Stanford Accelerator SLAC (USA)	Linear Center	Inbetriebnahme des Two Mile Linear Accelerator zur Beschleunigung von Elektronen auf Endenergien von 20 -22 GeV; 1989 Umbau zu einem Elektron-Positron Collider. Maximale erreichbare Energie: je 52 GeV
1972	Stanford Accelerator SLAC (USA)	Linear Center	Inbetriebnahme des Positron-Elektron Collider SPEAR mit einer maximalen Strahlenergie von 4 GeV
1974	Richter, B Ting, S (Nobelpreis Physik 76)		Mit dem Positronen-Elektronen Collider SPEAR in Stanford und dem AGS-Protonenstrahl in Brookhaven Beobachtung einer unerwartet energiescharfen Resonanz bei einer Schwerpunktsenergie von 3097 MeV. Die sog. J^{ψ} – Resonanz spielt eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung des Quarkmodells und der Quantenchromodynamik dar.
1976	CERN		Inbetriebnahme des sog. Superprotonensynchrotrons SPS; Maximale Protonenenergie: 600 GeV.
1981	CERN, Rubbia, C Van der Meer, S (Nobelpreis Physik 84)		Einrichtung der SPS-Maschine als Protonen-Antiprotonen Collider: Maximale Schwerpunktsenergie 630 GeV. Die Speicherung eines intensiven Antiprotonenstrahls gelingt mit Hilfe der von S. van der Meer entwickelten stochastischen Kühlung. 1983 Erreichung des experimentellen Ziels: der Nachweis der intermediären Vektorbosonen der schwachen Wechselwirkung W^+ , W^- und Z^0
1987	Fermi National Accelerator Centre		Inbetriebnahme des Proton-Antiproton Collider TEVATRON. Maximale Strahlenergie: 1 TeV, d.h. erreichbare Energie im Schwerpunktssystem: 2 TeV



Carlo Rubbia
NP 1984

SPS Layout

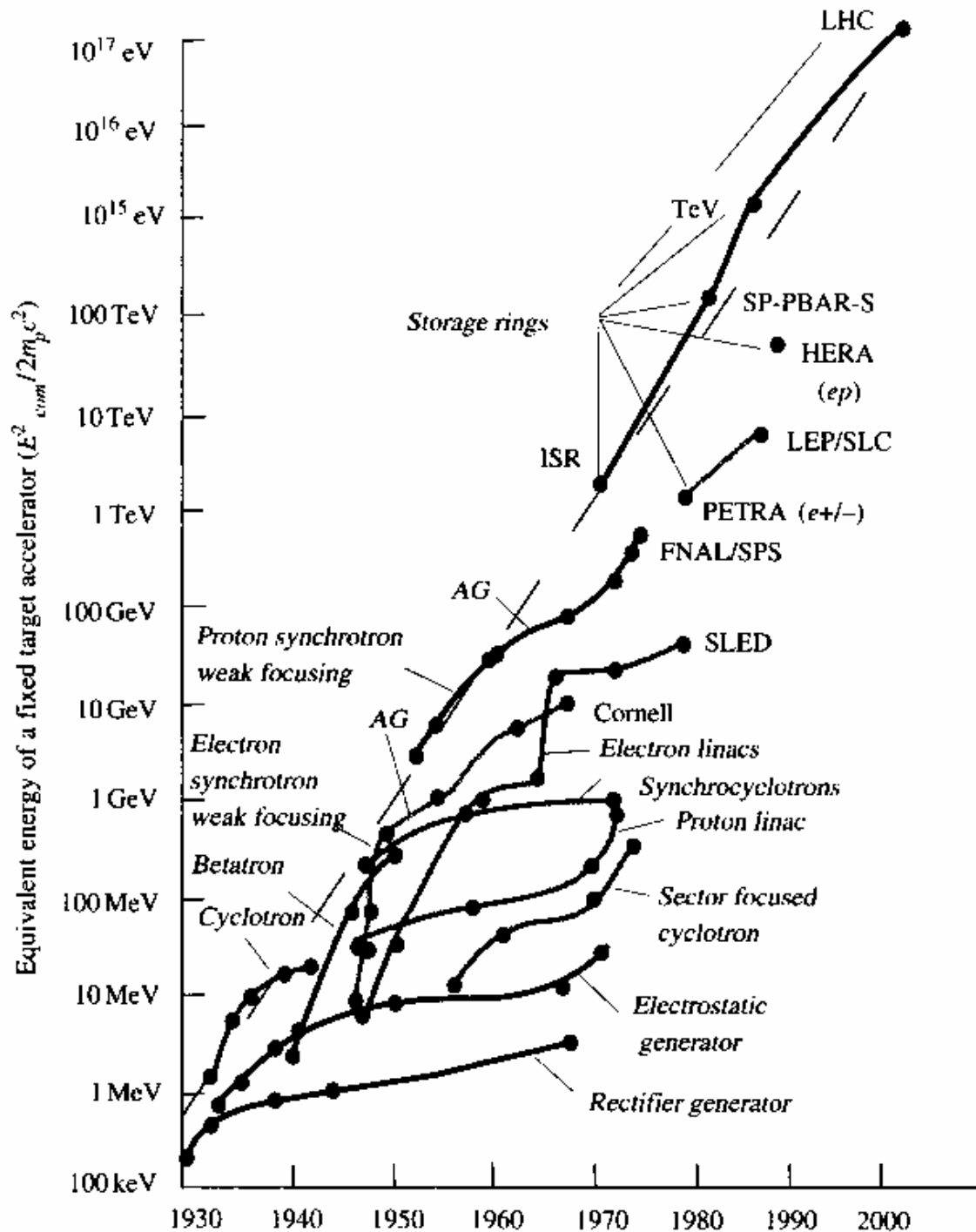
Click on the area of Interest



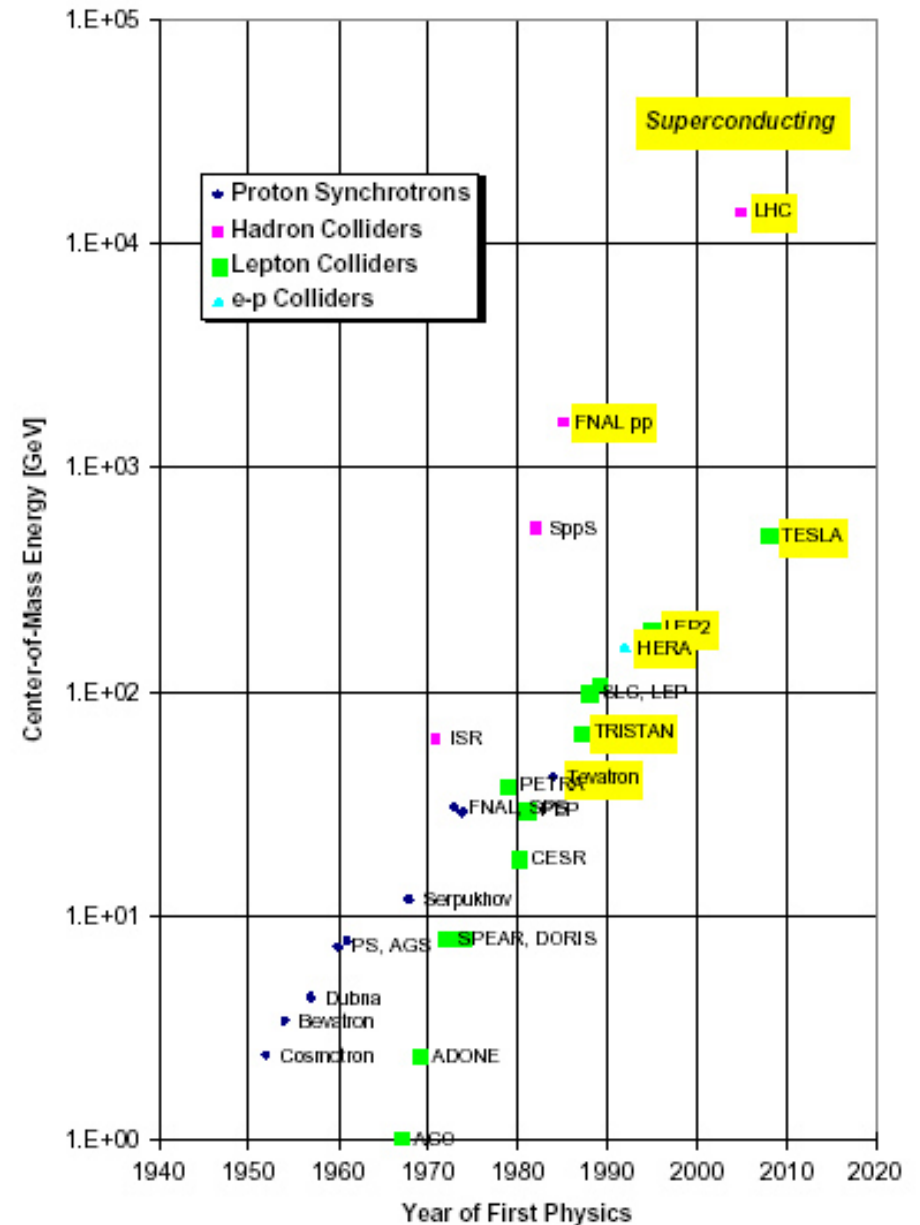
1989	CERN	Inbetriebnahme des Large Elektron-Positron Collider LEP . Erste Ausbaustufe (1989-1996): Beschleunigung der beiden entgegengesetzt umlaufenden Strahlen auf jeweils 55 GeV möglich; zweite Ausbaustufe (ab 1996): durch den Einbau zusätzlicher supraleitenden HF-Resonatoren erreichbare Energien von jeweils 100 GeV , d.h. Gesamtenergie im Schwerpunktssystem : 200 GeV . Umfang der in einem unterirdischen Tunnel installierten Maschine: 27 km
1990	DESY	Inbetriebnahme des Elektronen-Protonen Collider HERA (Hadron-Elektron Ring Anlage); Energie der entgegengesetzt umlaufenden Elektronen- bzw. Protonenstrahlen: 30 GeV bzw. 920 GeV ; mit HERA z. Zt. höchste erreichbare Auflösung bei der Untersuchung der Struktur des Nukleons
1994	CERN Council	Beschluss über den Bau des Large Hadron Collider LHC im LEP-Tunnel ; Bauziel: in einem Doppelring aus supraleitenden Magneten Beschleunigung zweier entgegengesetzt umlaufender Pb-Strahlen auf jeweils 574 TeV ; erste Experimente ab ca. 2007 (+ 3 Jahre)
...	...	...



Evolution der Beschleunigerphysik



CERN LHC





Fortsetzung

- Vorlesungsblock 2
 - Technische Aspekte der verschiedenen Beschleuniger
 - Keine Wellentheorie und Frequenzgleichung bei Linac (im Vgl. zu Skriptum).

- Vorlesungsblock 3
 - Beispiele für Synchrotronbeschleunigerzentren.