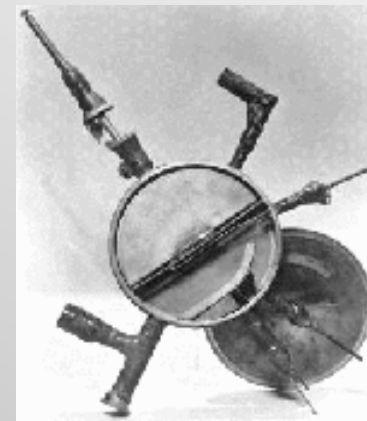
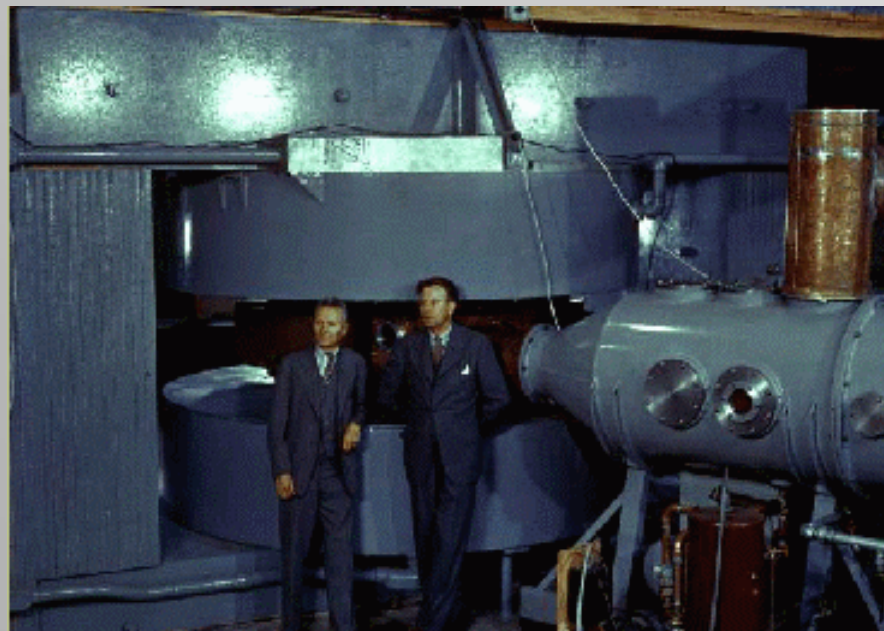
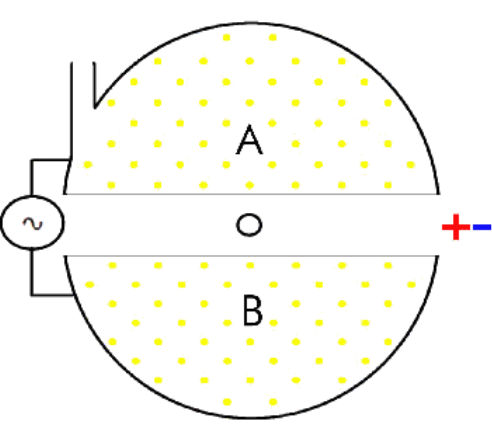


Kapitel 09

Zyklotron





9.1. Zyklotron

- Ein Teilchen der **Ladung** q und der **Geschwindigkeit** v , welches sich geradlinig senkrecht zur Richtung eines **Magnetfeldes** B bewegt, erfährt die Kraft

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

- Die **Lorentzkraft** in der Bahnebene kann mit der Zentripetalkraft angeschrieben werden als

$$qvB_z = m \frac{v^2}{r}$$



- Durch Umformen erhält man die Winkelgeschwindigkeit

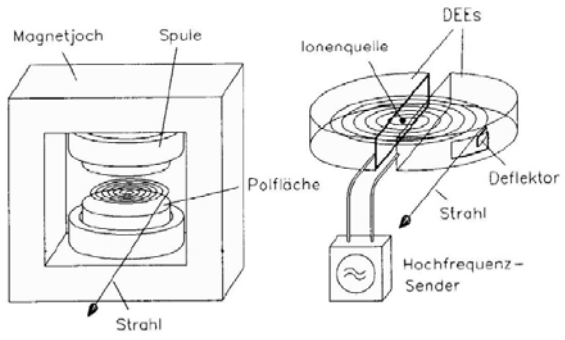
$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

- daraus folgt

$$v = \frac{qBr}{m}$$

- Damit ergibt sich eine Beziehung zwischen der kinetischen Energie (klassisch), dem Magnetfeld und dem Radius:

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}q^2 B^2 r^2 / m$$



9.1.1 Funktionsweise

- 1930 Lawrence und Edlefsen
- 1931/1932 Lawrence und Livingston

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{Bq}{m}$$

- die Winkelgeschwindigkeit (Umlaufzeit) hängt nur vom Magnetfeld B und von Verhältnis der Ladung q zu der Masse m ab
- Wenn Masse m konstant (bei $v \ll c$) und $B \sim const$
 $\rightarrow \omega \sim const$



- Andererseits müssen das zu beschleunigende Teilchen und das elektrische Feld zueinander proportional sein, woraus folgt, dass die Frequenz der Hochspannung ebenfalls konstant bleibt (k...harmonische Zahl):

$$f_e = k \frac{\omega}{2\pi}$$

- Beziehung der Synchronisation zwischen den Teilchen und dem Beschleunigungsfeld
- → Limit für maximal erreichbare Energie ($m \sim m_0$) (klassisch)
 - 15 MeV für Protonen
 - 25 MeV für Deuteronen
 - 50 MeV für α -Teilchen
- Für die Beschleunigung von Elektronen eignet sich das Zyklotron nicht, da ihre Masse bereits bei 1 MeV verdreifacht ist (relativistische Massenzunahme, $m_0 = 0,5 \text{ MeV}$).



9.1.2 Vertikale Fokussierung

- Wie bei der Diskussion des Betatrons bereits abgeleitet gilt:

$$\frac{B_z}{B_{z0}} = \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-n}$$

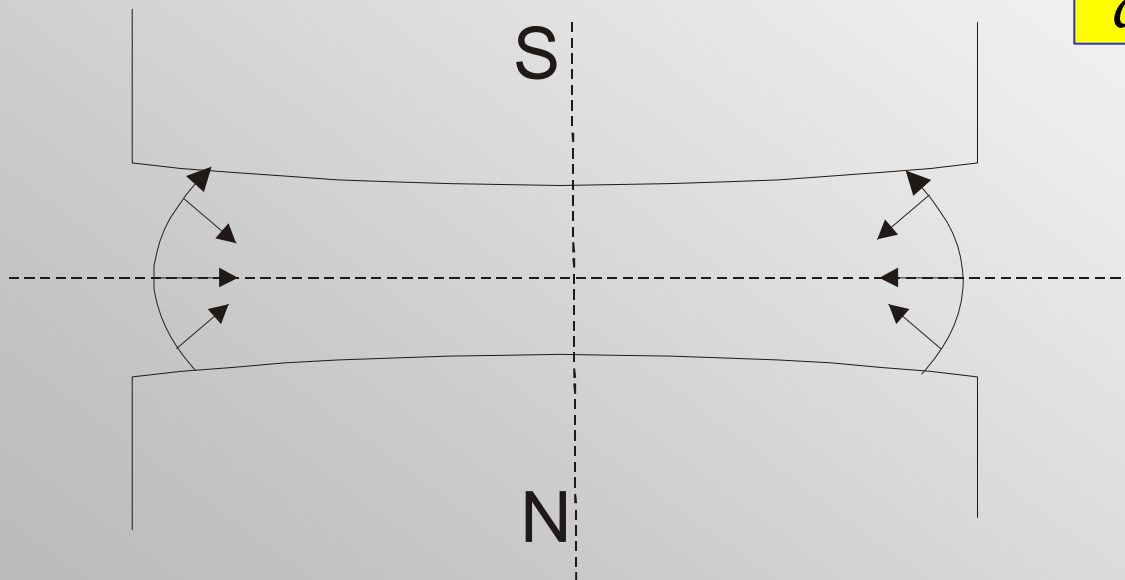
- Definition Feldindex:

$$n = - \frac{r}{B_z} \frac{dB_z}{dr} = - \frac{d \ln B_z}{d \ln r}$$

statisches Magnetfeld

- Erfüllt immer die folgende Gleichung (folgend aus Maxwell $\text{rot}B=0$ im Vakuum):

$$\frac{dB_r}{dz} = \frac{dB_z}{dr}$$



- Magnetfeld im klassischen Zyklotron; die Lorentzkraft wirkt ober- und unterhalb der Mittelebene fokussierend



- In der mittleren Ebene ist die radiale Komponente $B_r = 0$. Für kleine Entfernungen z , kann B_r folgendermaßen angeschrieben werden (mit Feldindex):

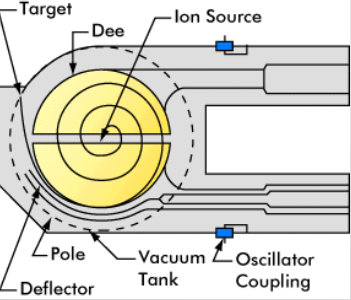
$$B_r(z) = \frac{dB_r}{dz} z = \frac{dB_z}{dr} z = -\left(\frac{B_z \cdot n \cdot z}{r}\right)$$

- Die vertikale Kraft F_z , die auf ein Teilchen in der Entfernung z von der mittleren Ebene wirkt, ergibt sich zu:

$$F_z = q \cdot v \cdot B_r = -\frac{q \cdot v \cdot B_z \cdot n \cdot z}{r} = -q \cdot \omega \cdot B_z \cdot n \cdot z = m \frac{d^2 z}{dt^2}$$



- Wenn man berücksichtigt, dass $\omega = \frac{qB_z}{m}$, so erhält man für die vertikale Schwingung folgende Gleichung: $\frac{d^2 z}{dt^2} + n\omega^2 z = 0$
- Wenn der Feldindex $n > 0$, also positiv ist, hat die Gleichung die Lösung: $z = A \sin(\sqrt{n} \cdot \omega \cdot t + \alpha)$
- $A, \alpha \rightarrow$ Randbedingungen.
- Die Bedingung $n > 0$ impliziert, dass $\frac{dB_z}{dr} < 0$
- \rightarrow daraus folgt, dass das Magnetfeld mit dem Radius abnehmen muss, wenn die vertikale Schwingung begrenzt sein soll.



9.1.3 Radiale Fokussierung

- ... , wenn das Teilchen in einem Abstand r vom Zentrum, im Unterschied zum Radius r_0 , welcher der Bahn im Gleichgewicht entspricht, einer rücktreibenden Kraft ausgesetzt ist

- Wenn man annimmt, dass $r > r_0$, muss die Lorentzkraft qvB bei Radius r schwächer sein, als qvB_0 bei r_0

- Auch die Zentrifugalkraft wird abnehmen. Das Verhältnis dieser beiden Kräfte bestimmt die radiale Stabilität.

- Wenn $r - r_0 = \rho$ eine kleine Größe ist, ergibt sich: $\frac{\rho}{r_0} \ll 1$

$$r^{-n} = (r_0 + \rho)^{-n} = r_0^{-n} \left(1 + \frac{\rho}{r_0}\right)^{-n} \cong r_0^{-n} \left(1 - n \frac{\rho}{r_0}\right) = r_0^{-n} - nr_0^{-n-1} (r - r_0)$$



- Wenn man diesen Zusammenhang in einsetzt erhält man:

$$\frac{B_z}{B_{z0}} = \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-n}$$

$$B_z = B_{z0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-n} = B_{z0} \left(\frac{r_0^{-n} - n r_0^{-n-1} (r - r_0)}{r_0^{-n}} \right) = B_{z0} \left(1 - n \frac{r - r_0}{r_0} \right)$$

- Die radiale Kraft produziert vom magnetischen Feld ist dann:

$$F_r = -q v B_{z0} \left(1 - n \frac{\rho}{r_0} \right)$$

mit $\rho = r - r_0$



- Wenn das Teilchen sich von der Gleichgewichtsbahn entfernt, wird es eine radiale Beschleunigung $\frac{d^2 r}{dt^2}$ und eine Zentripetalbeschleunigung $-\omega^2 r = -v^2 / r$ erfahren

- Newtonsche Gleichung ergibt sich zu

$$m \left(\frac{d^2 r}{dt^2} - \frac{v^2}{r} \right) = -qB_{z0} \left(1 - n \frac{\rho}{r_0} \right) v$$

- Division durch m :

$$\rho = r - r_0$$

$$\ddot{\rho} - \frac{v^2}{r} = -\omega_0 \left(1 - n \frac{\rho}{r_0} \right) v$$



Da ρ sehr klein ist, kann man

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_0 + \rho} = \frac{1}{r_0 \left(1 + \frac{\rho}{r_0}\right)} \cong \frac{1}{r_0} \left(1 - \frac{\rho}{r_0}\right)$$

setzen und erhält

$$\ddot{\rho} - \frac{v^2}{r} = \ddot{\rho} - \frac{v^2}{r_0} \left(1 - \frac{\rho}{r_0}\right) = \ddot{\rho} - \frac{v^2}{r_0} + \left(\frac{v}{r_0}\right)^2 \rho = -\omega_0 \left(1 - n \frac{\rho}{r_0}\right) v = -\frac{v^2}{r_0} + n \left(\frac{v}{r_0}\right)^2 \rho$$

Damit folgt:

$$\ddot{\rho} + \omega_0^2 (1 - n) \rho = 0$$

- Gleichung für kleine radiale Schwingungen



Ähnlich wie bei der vertikalen Fokussierung, werden harmonische Schwingungen auftreten für $n < 1$.

■ Aus $\ddot{z} + n\omega^2 z = 0$ und $\ddot{\rho} + \omega_0^2(1-n)\rho = 0$

■ folgen die Kreisfrequenzen für vertikale und radiale Schwingungen

$$\omega_z = \sqrt{n}\omega_0$$

$$\omega_r = \sqrt{(1-n)}\omega_0$$

mit der Bedingung, dass $0 < n < 1$

■ In einem Zyklotron hat n den Wert 0 im Zentrum, der mit dem Radius geradlinig zunimmt.

■ Wenn $n = 0,2$ dann ergibt sich

$$\frac{\omega_r}{\omega_z} = \left(\frac{1-n}{n}\right)^{1/2} = 2$$



9.1.4 Synchronisation

- Teilchen erreichen eine Phase, welche eine weitere Beschleunigung ermöglicht.
- Abschätzung: Beispiel: Zyklotron zur Beschleunigung von Deuteronen (20 MeV):
 - Die gesamte Abnahme des Feldes beträgt 3 %. durchschnittliche magnetische Feld, welches von den Teilchen wahrgenommen wird, ist um 1,5 % kleiner als im Zentrum.
 - Die Massenzunahme Δm bei voller Energie beträgt $(100 \cdot T/E_0) \cdot 20/1860 = 1,08$ %. → Das ergibt einen Durchschnitt von 0,54 %.
 - → Die durchschnittliche Abnahme der Frequenz beträgt $1,5 + 0,54 = 2,04$ % und die Phasenverschiebung in jedem Umlauf wird $2,04 \times 360^\circ / 100 = 7,3^\circ$ betragen (die gesamte Phasenverschiebung kann nur 90° sein). Daraus folgt, dass der gesamte Beschleunigungsprozess in $90^\circ / 7,3^\circ = 12$ Umläufen geschehen muss. Maximale Spannung zwischen Dees, bei mittlerer Phasenwinkel von 45° :

$$V_{\max} = \frac{20000kV}{(2 \times 12 \times \cos 45^\circ)} = 1180kV$$



9.1.5 Konstruktionsdetails eines Zyklotrons

- Beispiel: zwei Zyklotrone mit der gleichen Energie von 20 MeV
 - Beschleunigung für Protonen
 - Beschleunigung von Deuteronen
- Radius = ? (geg: Magnetfeld: 15.000 Gauß)

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}q^2 B^2 r^2 / m$$

$$T[J] = T[eV] \cdot q[C] \quad m[kg] = m[eV] \cdot q[C]/c^2 [m/s]^2$$

$$R = \frac{(2Tm)^{1/2}}{qB} = \frac{(2T[eV] \cdot m[eV])^{1/2}}{B \cdot c}$$

- $R = 0,44m$ für 20 MeV Protonen
- $R = 0,61m$ für 20 MeV Deuteronen.



- Wir wählen eine relative Zunahme (zum Zentrum) von 3% für das Magnetfeld.
- → Feld im Zentrum 15.450 Gauß
- → Massenzunahme
 - 2,14 % für Protonen $(20/938)*100$
 - 1,08 % für Deuteronen $(20/1876)*100$
- Frequenzen $f = \frac{qB}{2\pi m}$
- Werte an den Stellen $r = 0$ und $r = R$ betragen:
 - $f_0 = 23,6Mc/s$ für Protonen
 $f_r = 22,4Mc/s$
 - $f_0 = 11,8Mc/s$ für Deuteronen
 $f_r = 11,3Mc/s$
 - wobei Mc/s...Mega cycles/second



- Spannungen zwischen den Dees (9 Umläufe):
 - 300 kV für Protonen
 - halbe Wert, 150 kV, für Deuteronen
- → In der Praxis meist typische Werte
 - 400 kV für Protonen
 - 200 kV für Deuteronen.
- nur sehr wenige Zyklotrone für die alleinige Beschleunigung von Protonen gebaut → meist für Deuteronen + Protonen



9.2 Synchro-Zyklotron = Frequenz-moduliertes Zyklotron

- Synchro-Zyklotron konventionelles Zyklotron, indem sich die Frequenz der Schwingungen abhängig von den Dees periodisch mit der Zeit ändern.
- Umlauffrequenz
$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m}$$
- Nimmt ab, wenn die Energie zunimmt
 - Relativistischen Massenzunahme
 - Magnetfeldabnahme mit dem Radius.
- Wenn die Hochfrequenz konstant gehalten wird, kommt es zu einem Fehler in der Synchronisation.



- Vorgabe eines Frequenzprogramms für RF:
- → Frequenz der Beschleunigungsspannung RF folgt zu jedem Zeitpunkt dem **idealem Teilchen**
- Die **alternierende Spannung zwischen den Dees** ist dann gegeben durch

$$V(t) = V_{max} \sin \left[\int_0^t \omega_s(t) dt + \varphi_s \right]$$

- Wobei im Gegensatz zum Festfrequenzzyklotron die Winkelgeschwindigkeit des synchronen Teilchens ω_s sich während der Beschleunigung ändert.
- Die Beschleunigungsphase φ_s wird durch den Sollenergiegewinn bei jeder Durchquerung des Beschleunigungsspalt zwischen den Dees definiert.
- pro Umlauf zwei Spaltdurchquerungen
 - → Energiegewinn pro Umlauf $2qV_{max} \sin \varphi_s$



9.2.1 Konstruktion eines typischen Synchro-Zyklotrons

- Design eines Synchro-Zyklotrons zur Beschleunigung von Protonen auf 500 MeV
- Massenzunahme der Protonen ist 53,2 %
- Ruhemasse des Protons beträgt 938 MeV
- → relativistischen Ansatz
- Magnetfeld von 20.000 Gauss (= 2 Weber/m²)
- → maximaler Radius:

$$R = \frac{(E^2 - E_0^2)^{1/2}}{qcB} = \frac{(1438^2 - 938^2)^{1/2} 10^6}{1 \times 3 \times 10^8 \times 2} = 1,82m$$



- Die Magnetfeldabnahme spielt beim Synchro-Zyklotron keine so große Rolle wie beim Zyklotron (ca. 5 %)
- Das resultierende Feld im Zentrum kann daher einen Wert von 21.000 Gauss annehmen
- Mit $E_0 = 938 \text{ MeV}$ kann die Winkelgeschwindigkeit im Zentrum mit $20,1 \times 10^7 \text{ rad/s}$ abgeschätzt werden und die Frequenz im Zentrum beträgt 32,1 MHz
- Mit einer Synchronisationsphase $\varphi_s = 30^\circ$ wird der
- Energiegewinn pro Umlauf $2qV_{\text{max}} \sin \varphi_s = 15 \text{ keV}$ betragen. Die ganze Energie wird nach $500/0,015 = 33.440$ Umläufen zu Verfügung stehen.
- Frequenzänderung (Abnahme) = 10.6 MHz!



Strahlcharakteristik Synchro-Zyklotrons

- Der Strahl eines Synchro-Zyklotrons erscheint in der Form von kurzen Paketen, getrennt durch die Zeitintervalle, in denen die Frequenz auf den Injektionswert gebracht wird bzw. ein neues Paket beschleunigt wird.
- Die Abfallzeit und Anstiegszeit ist typischerweise einen Faktor 10^3 , grösser als die Strahllänge was einem duty cycle (Tastverhältnis) von 0,1 % entspricht
- Deshalb viel geringere Strahlleistung als das quasi-kontinuierliche Zyklotron.



9.3 Das Isochron-Zyklotron

- Bei einem konventionellen Zyklotron bewirkt die relativistische Massenzunahme und die radiale Abnahme des Magnetfeldes einen Verlust der Synchronität bzw. eine Energielimit von etwa 20 MeV für Protonen.
- Ausweg: Erhöhung des Magnetfelds nach außen proportional zu γ um rel. Energiegewinn (Massenzunahme) auszugleichen:

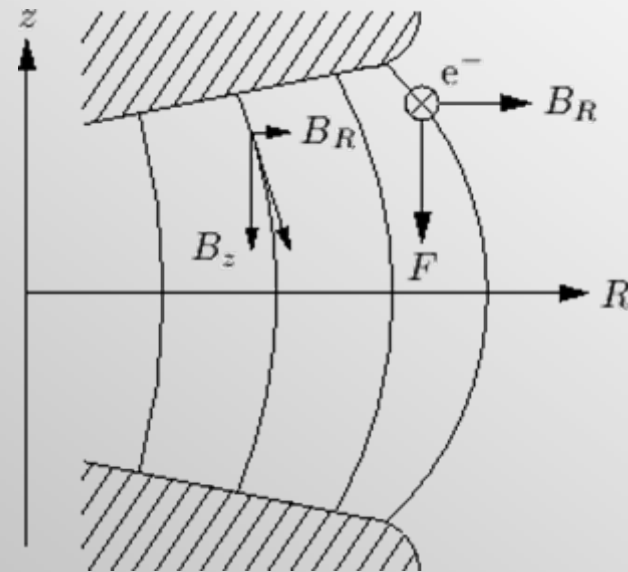
$$\omega_s = \frac{qB}{m(\gamma)} \Rightarrow B \rightarrow B(r, \gamma) \Rightarrow \omega_s = \textit{konst.}$$

- Zunahme des Magnetfelds widerspricht Kriterium um vertikale Stabilität zu erhalten (Feldindex $n > 0$)
- Ist jedoch kompatibel mit radialer Stabilität (Feldindex $n < 1$), d.h. Feld fällt schwächer als mit $1/r$ (Feldanstieg verstärkt Fokussierung).



Vertikale Stabilitätsbedingung

- Durch die Krümmung der Magnetfeldlinien nach außen wird eine rücktreibende Kraft in z-Richtung zu $z = z_0$ erzeugt. Die Stabilität im Zyklotron wird dann durch $B(r) \propto R^{-n}$ mit $n > 0$ gewährleistet.

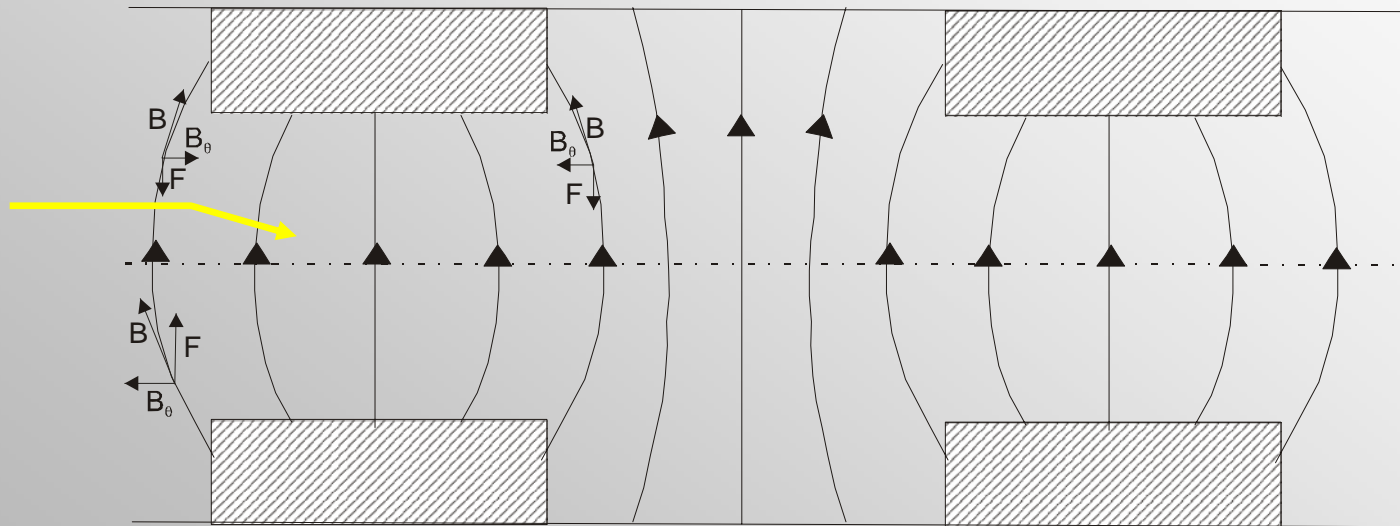




9.3 Das Isochron-Zyklotron

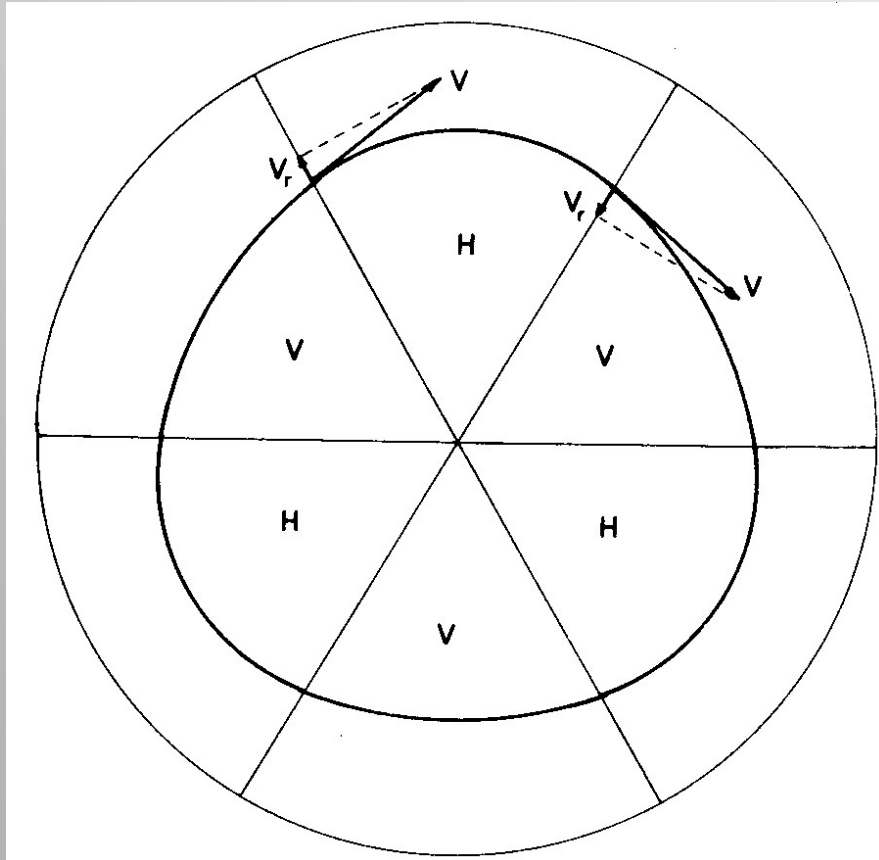
- **Ausweg:** Konstruktion des Magneten aus mehreren Sektoren
- **Wechsel zwischen Hoch- und Niedrigfeldsektoren:**
 - 1. Sektor erhöht das Feld → „Hill“
 - 2. Sektor reduziert das Feld → „Valley“
- → Teilchenbahn ist nicht mehr ein Kreis, sondern nimmt die Form einer **polygonen Kurve** an
- An Übergängen zwischen Sektoren ergeben sich zusätzliche azimuthale Feldkomponenten die für die vertikale Fokussierung benützt werden.
- Das Festfrequenz-Zyklotron war die **erste Anwendung des „Alternating-Gradient“ Prinzips zur Fokussierung** (Thomas, 1938).

Kraftfeld zwischen „Hills“ und „Valleys“



- Die **azimuthale Komponente des Feldes B_θ** (in Richtung der **Teilchenbahn**) oberhalb und unterhalb der Mittelebene und die **radiale Geschwindigkeit v_r** verursachen die fokussierende Kraft.
- „Normales“ Zyklotron: keine azimuthale Feldekomponente!

Teilchenbahn eines in azimuthaler Richtung variierenden Feldes eines Zyklotrons



- Die radiale Komponente der **Geschwindigkeit v_r** ist an der Grenze zwischen Hills und Valleys dargestellt



Zusammenfassung Synchro-Zyklotron

- Teilchen haben eine von null verschiedene radiale Komponente der Geschwindigkeit v_r .
- Die Valleys und Hills haben eine von null verschiedene azimuthale Magnetfeldkomponente B_θ
- Bewirkt eine vertikale fokussierende Kraft F_z für Teilchen außerhalb der mittleren Ebene.
- Bedingung für Synchronisation (Mittelung über einen Umlauf) lautet:

$$\langle \omega \rangle = \frac{v}{\langle r \rangle} = \frac{q \langle B \rangle}{m} = \frac{q \langle B \rangle}{m_0} (1 - \beta^2)^{1/2} = \frac{q \langle B \rangle}{m_0 \gamma} = \frac{q B_0}{m_0} = const$$



- Das Symbol $\langle \rangle$ bedeutet eine **Mittelung über einen Umlauf und der Index 0** beschreibt ein Teilchen bzw. ein Feld im Zentrum der Maschine.

- **Mittlere Feld:**

$$\langle B \rangle = B_0 \gamma = B_0 \left[1 - \left(\frac{\langle \omega \rangle \langle r \rangle}{c} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

- Es ist üblich den **Feldindex** in diesen Maschinen folgendermaßen zu definieren:

$$k = \frac{\langle r \rangle}{\langle B \rangle} \frac{d\langle B \rangle}{d\langle r \rangle}$$



- Mit

$$\langle B \rangle = B_0 \gamma = B_0 \left[1 - \left(\frac{\langle \omega \rangle \langle r \rangle}{c} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

- ergibt dies nach **Differentiation** und dem Einsetzen von: $v = \langle r \rangle \langle \omega \rangle$ den Feldindex als Funktion der Teilchenenergie:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{c}{\omega \langle r \rangle} \right)^2 - 1} = \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} = (\beta \gamma)^2$$

- Für die Analyse von Betatron-Schwingungen in einem **FFAG-Zyklotron (fixed-field alternating gradient cyclotron)** werden vielfach Simulationsprogramme eingesetzt.



Am PSI, in Hamburg, in Jülich und in Karlsruhe



- Protonenenergie: 17 - 38 MeV
- Protonenstrom: 100 nA – 25 μ A



Beschleunigte Ionen:

Teilchen:	Energie:
Protonen	7 - 14 MeV
Deuteronen	14 - 28 MeV
$^4\text{He}^{2+}$	28 - 56 MeV
$^3\text{He}^{2+}$	21 - 42 MeV
$^{12}\text{C}^{6+}$	82 MeV
$^{14}\text{N}^{7+}$	94 - 112 MeV
$^{16}\text{O}^{8+}$	107 - 140 MeV

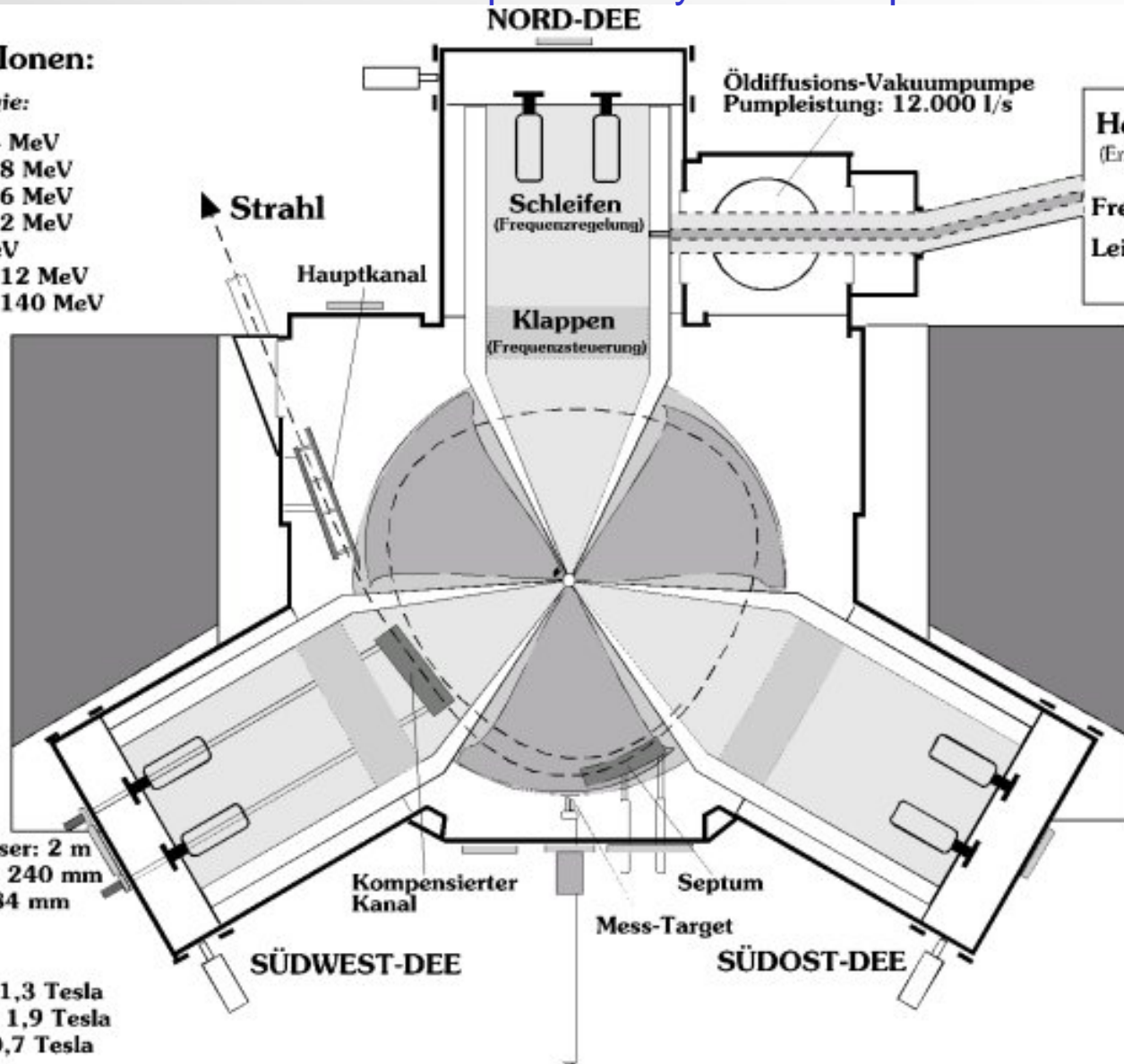
Magnet:

Gewicht ca. 250 t
 Polplatten-Durchmesser: 2 m
 Luftspalt Bergsektor: 240 mm
 Luftspalt Talsektor: 84 mm

Maximale Werte:
 Mittlere Flussdichte: 1,3 Tesla
 Flussdichte Bergfeld: 1,9 Tesla
 Flussdichte Talfeld: 0,7 Tesla

Hauptspulen-Strom: 430 A

21 Korrekturspulen,
 Ströme: 21 x 30 A



Öldiffusions-Vakuumpumpe
 Pumpleistung: 12.000 l/s

Hochfrequenz-Generator
 (Erzeugt die Beschleunigungs-Spannung)

Frequenzbereich: 20 - 30 MHz
 Leistung: 50 kW

Beschleunigungs-System:

HF-Sektoren (DEEs): 3
 Beschleunigungsspalte: 6
 Frequenz: 20 - 30 MHz
 HF-Spannung: max. 45 kV
 Strom im Kurzschlussboden: 3500 A
 Zahl der Umläufe: ca. 130

Isochron-Zyklotron





BSP: Bonner Isochron-Zyklotron

- 1968 bis 1970 durch die AEG-Beschleunigerbau, Grosswelzheim als dritte Maschine dieser Art nach Karlsruhe und Jülich gebaut.
- Um Kosten einzusparen, wurde das Magneteisen (ca 250t) des seit Mitte der 50er Jahre betriebenen Synchro-Zyklotrons nach Bearbeitung weiterverwendet
- Am 20. 12. 1968 lieferte der Beschleuniger den ersten internen Deuteronen-Strahl
- Die wichtigsten Arbeiten am Strahlführungssystem waren Ende 1973 abgeschlossen



Physik / Technik

■ Magnet:

- Masse Magneteisen ca. 250 t
- Poldurchmesser 2000 mm
- Anzahl Bergsektoren 3
- Luftspalt (Bergsektor / Talsektor) 84 / 240 mm
- Freier Luftspalt 48 mm
- Anzahl Magnetspulen 2
- Magneterregung max. 430 A / max. 38 kW
- Anzahl Korrekturspulen 21 Paar
- Korrekturspulenerregung ± 30 A / max. 6 kW



■ Beschleunigungskammer:

- Material V2A-Stahl / Aluminium
- Öldiffusionspumpe 12.000 l/s
- Erreichbarer Kammerdruck 2×10^{-6} mbar

■ Ionenquellen:

- Electron-Cyclotron-Resonance (ECR) Protonen bis Sauerstoff
- ECR für polarisierte Ionen Protonen, Deuteronen
- Einschuss-Energie 0.004 - 0.008 MeV
- Injektions-Radius 37 mm
- Einfangrate 30 %



■ Hochfrequenzgenerator:

- Anzahl HF-Sektoren (Dees) 3
- Anzahl Beschleunigungsspalte 6
- Durchstimmbarer Frequenzbereich 20,0 - 29,8 MHz
- HF-Spannung max. 40 kV
- HF-Leistung max. 50 kW

■ Extraktion:

- Extraktions-Radius 900 mm
- Elektrische Feldstärke im Deflektor (Septum) 80 - 100 kV/cm



■ Strahleigenschaften:

- Energiebereich 7 - 14 MeV pro Nukleon
- Strahlintensität intern / extern max. 15 / 10 μ A
- Energiegewinn pro Umlauf (6 Beschleunigungsspalte) ca. 240 keV
- Anzahl der Umläufe ca. 120
- Bahnabstand (bei $r = 900$ mm) 3 mm
- Zeitlicher Abstand der Teilchenpulks (E_{\min} / E_{\max}) 50 / 33,6 nsec
- Zeitliche Breite des Teilchenpulks (E_{\min} / E_{\max}) 0,75-6 / 0,5-4 nsec
- Geschwindigkeit der Teilchenpulks $\sim 50\,000$ km/sec ($\sim 17\%$ c)
- Energieunschärfe des extrahierten Strahles ($\Delta E / E$) 4 ‰
- Energieauflösung am Target nach zwei 90° -Magneten bis 1:10000



Beschleunigte Ionen am Bonner Isochron-Zyklotron

<i>Ion</i>	<i>Ion</i>	<i>Ladung/Masse</i> (e/m)	<i>Energie</i> [MeV]	<i>Externer Strom</i> [μ A]	<i>Besonderheiten</i>
p	$^1\text{H}^{1+}$	1	17-14	10	auch polarisiert
H_2^+	$(^1\text{H}_2)^{1+}$	$\frac{1}{2}$	14-28	5	
d^2	H^{1+}	$\frac{1}{2}$	14-28	5	auch polarisiert
3Helium	$^3\text{He}^{2+}$	$\frac{2}{3}$	21-42	3	
α^4	He^{2+}	$\frac{1}{2}$	28-56	3	
Kohlenstoff	$^{12}\text{C}^{4+}$	$\frac{1}{3}$	81-84	0.2	
Stickstoff	$^{14}\text{N}^{5+}$	0.36	94-110	0.2	
Sauerstoff	$^{16}\text{O}^{6+}$	0.38	107-140	0.2	



Erzeugte Aktivierungen am Hochstromplatz

<i>Isotop</i>	<i>Halbwertszeit</i>	<i>Reaktion</i>	<i>Zweck</i>
^{11}C	20 m	$^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$	Medizin (PET)
^{74}As	17.8 d	$^{74}\text{Ge}(\text{p},\text{n})^{74}\text{As}$	Positronenquelle für Festkörperphysik
^{77}Br	56 h	$^{75}\text{As}(\alpha, 2\text{n})^{77}\text{Br}$	Ionenimplantation in Halbleiter
^{103}Pd	17 d	$^{103}\text{Ru}(\text{p},\text{n})^{103}\text{Pd}$	
^{111}In	2.7 d	$^{109}\text{Ag}(\alpha, 2\text{n})^{111}\text{In}$	



Kernphysikalische Experimente am externen Strahl

<i>Reaktion</i>	<i>Zweck</i>
${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$	Neutronenstrahl für Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung (unpolarisierte und polarisierte Deuteronen als einlaufende Teilchen)
(α, xn) - $({}^{12}\text{C}, xn)$ - $({}^{16}\text{O}, xn)$ - Reaktionen	Kernspektroskopie, Lebensdauermessungen etc. an diversen stabilen und radioaktiven Kernen



TRIUMF – Weltgrößtes Zyklotron



- protons to energies up to **520 MeV**
- At maximum energy the **protons** are travelling at **75% the speed of light**, fast enough to take you from the earth to the moon in 2 s.



TRIUMF FACTS

- Construction: 1968-1974
- Maximum beam energy: 520 MeV
- On-site personnel: About 350 employees. Up to 200 visiting scientists
- **Total magnet weight:** **4000 t**
- **Magnet diameter:** **18 m**
- Magnetic field: up to 6 kilogauss
- Current required by magnet: about 18.500 A
- Electric field frequency: 23 MHz
- Maximum spiral turns by particles: 1500 (particles travel up to 45 km - during acceleration)
- Time required for acceleration: 326 μ s (i.e. 1/3000 sec)
- Number of particles accelerated: $6 \times 10^{14}/s$
- Beam power 50 kW