

21 JUN 1968

Interner Bericht
DESY F21-68/1
Mai 1968

Grundkonzeption eines
Dauerstrich-Elektronenringbeschleunigers

von

H. Hultschig

INHALT

1. Arbeitsphasen
 - 1.1 Kompression
 - 1.2 Ionisation
 - 1.3 Expansion
 - 1.4 Stabilitätsbetrachtungen
2. Zusammenfassung

Für Zählerexperimente ist der kurze Teilchenimpuls ($\approx 10^{-11}$ sec) und die niedrige Wiederholffrequenz (geplant $\approx 0,1$ Hz, denkbar etwa 100 Hz) der bisher vorgeschlagenen Elektronenringbeschleuniger (Era) (siehe [1] , [2]) sehr ungünstig. Der duty cycle läßt sich durch Zwischenschalten eines Speicherringes verbessern. Der Aufwand für einen Speicherring ist jedoch recht beachtlich. Es erscheint daher sinnvoll, nach Möglichkeiten zu suchen, den duty cycle des Era zu verbessern. Da die Länge des Teilchenpulses durch das Prinzip gegeben ist, kann man nur versuchen, die Wiederholffrequenz zu erhöhen.

Die geringe Wiederholffrequenz im Era verursacht der erste Arbeitsgang, nämlich die energieerhöhende Kontraktion des Elektronenringes in einem zeitlich ansteigenden Magnetfeld. In einem Dauerstrich-Elektronenringbeschleuniger (Dera) muß dieser Arbeitsgang daher umgangen werden. Die Kontraktion des Ringes bleibt zur Verkleinerung des Strahlquerschnittes erwünscht. Die Kontraktion muß daher im Dera in einem zeitlich konstanten und räumlich veränderlichen Feld erfolgen. Daher bleibt im Gegensatz zum Era (bei den Eras wird die Elektronenenergie durch die Kompression um einen Faktor 5 - 10 erhöht) die Energie der Elektronen konstant, so daß beim Dera die volle Elektronenenergie (10 - 30 MeV) vom vorgeschalteten Linac aufgebracht werden muß.

1. ARBEITSPHASEN

1.1 Kompression

Die Kompression erfolge beim Dera in einem zeitlich konstanten, solenoidartigen, rotationssymmetrischen Feld, dessen Achsenkomponente B_z in Achsenrichtung ansteigt. Die Elektronen werden ohne radiale Impulskomponente schief zur Achse im Abstand R_1 eingeschossen, wobei R_1 der Krümmungsradius ist, der sich aus dem dort herrschenden Feld B_{z_1} und dem azimuthalen Elektronenimpuls P_{a_1} ergibt. Sie spiralen¹ mit abnehmendem Krümmungsradius und abnehmender Axialgeschwindigkeit in das Gebiet größerer Feldstärke (Abb. 1). Dieser Vorgang ist einer umgekehrten Expansion im Era äquivalent. Der gesamte Längsimpuls der Elektronen ist in azimuthalen Impuls umgewandelt, wenn für das Feld B_{z_2} an dieser Stelle gilt (in der Näherung $|\beta| = 1$):

$$\gamma_{z_1} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_{z_1}^2}} = \frac{\sqrt{B_{z_2}}}{\sqrt{B_{z_1}}} \quad \gamma_{z_2} = 1 \text{ d.h. } \beta_{z_2} = 0$$

Für die Krümmungsradien gilt entsprechend

$$R_2 = \frac{\sqrt{B_{z_1}}}{\sqrt{B_{z_2}}} \quad R_1 = \frac{1}{\gamma_{z_1}} \quad R_1$$

Wenn kein Eingriff vorgenommen wird, beginnt jetzt der an dieser Stelle entstandene Ring mit umgekehrter Translationsrichtung aus dem Feld herauszuspinalen.

1.2 Ionisation

Im Gebiet der Richtungsumkehr soll die Elektronenspirale mit Protonen beladen und Ringe geformt werden. Nach [1] ergibt sich das Verhältnis von Protonen zu Elektronen nach einer Zeit Δt bei einem Wasserstoffdruck p_{H_2} zu

$$\frac{N_p}{N_e} = 2,1 \times 10^8 \times p_{H_2} \times \Delta t \left[\frac{1}{\text{Torr sec}} \right]$$

Ein Proton-Elektron-Verhältnis von 0,01 läßt sich z.B. bei 10^{-3} Torr in 5×10^{-8} sec erreichen.

Die Verweilzeit im Umkehrbereich läßt sich bei Annahme eines linearen Gradienten der z Komponente des Feldes in diesem Bereich leicht berechnen

$$B_z = B_{z_2} (1 - gz_E) \quad z_E = z_2 - z$$

$$g = \frac{1}{B_{z_2}} \frac{\delta B_z}{\delta z}$$

$$\gamma_z = \frac{1}{\sqrt{1 - gz_E}}$$

$$\beta_z = \sqrt{gz_E}$$

$$\tau = \frac{2}{c} \frac{1}{g} \sqrt{z_E} \quad \left| \begin{array}{l} \alpha \uparrow \\ \alpha \downarrow \end{array} \right.$$

Umkehrbereich $0 \leq z_E \leq \alpha$

Es folgt $\tau = 4,2 \times 10^{-8}$ sec. für die Parameter $g = 1 \times 10^{-2}/m$ und $a = 0,1$ m. Damit gilt für die Geschwindigkeit $0 \leq \beta_z \leq 3 \times 10^{-2}$ und für die kinetische Energie in z Richtung $0 \leq T_z \leq 10$ keV (bei $\gamma_a = 40$) im Umkehrbereich. Leider wird durch eine Verschmierung der Primärenergie der Umkehrpunkt verwischt. Daher müssen elektrische Felder die Ringbildung unterstützen. Im Umkehrbereich sei eine magnetische Schwelle, innerhalb der B_z mit einem großen Gradienten um etwa 1% ansteigt. Die Elektronen können die Schwelle nicht übersteigen und werden durch ein cavity-Feld an der Schwelle festgehalten (Abb. 2). Die notwendigen Feldstärken liegen im Bereich einiger kV/cm. Die Frequenz richtet sich nach der Zeit für Ringbildung und Protonenbeladung und dürfte im Bereich $10^7 - 10^8$ Hz liegen. Im Umkehrbereich muß ein Wasserstoffdruck von etwa 10^{-3} Torr herrschen, um die Protonenbeladung zu erreichen. Die nötig geringen elektrischen Felder sollten trotz dieses Druckes erreichbar sein.

1.3 Expansion

Bei der Expansion gelten besonders für den Feldgradienten die gleichen Bedingungen wie im Era. Für die Endenergie gilt entsprechend

$$E_p = \gamma_{z_3} M = \frac{\sqrt{B_{z_2}}}{\sqrt{B_{z_3}}} M \quad \gamma_{z_3} \ll \gamma_0$$

Dabei sollten bei ähnlichen Parametern wie beim Era Protonenenergien von einigen GeV erreichbar sein.

Für die Expansion im Dera gibt es zwei Möglichkeiten:

- a) Nach Feldumkehr im für die Ringbildung benutzten cavity wird der Ring in das Kompressionsfeld zurückgebracht. Die Expansion erfolgt im gleichen Feld wie die Kompression (Abb. 3).
- b) Die magnetische Schwelle für die Ringbildung wird durch ein zweites cavity geeigneter Phasenlage ersetzt. Nach der Ringbildung wird durch Feldumkehr der Ring in der alten Bewegungsrichtung beschleunigt und in ein geeignetes Expansionsfeld oder einen Linac zur Weiterbeschleunigung gebracht.

1.4 Stabilitätsbetrachtungen

Die Expansion oder Weiterbeschleunigung in einem Linac geschieht analog wie im Era. Daher gelten die gleichen Stabilitätsbetrachtungen (siehe [2]).

Für die Kompression im Dera sollen die Auswirkungen von Abweichungen in der Einschußenergie, dem Einschußradius und dem Feldverhältnis untersucht werden. Für die Abweichung vom Radius R_2 nach der Kompression gilt

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta \gamma_{z_1}}{\gamma_{z_1}}$$

Ein weiterer Radiusfehler entsteht durch eine Abweichung δ zwischen Krümmungsmittelpunkt der Elektronen und der Achse der gewählten Magnetfeldkonfiguration. Nach (3) gilt für kleine Feldgradienten die gleiche Feldabhängigkeit wie für den Krümmungsradius

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{B_{z_1}}{B_{z_2}}} \delta_1$$

Diese beiden Abweichungen werden mit der Kompression entsprechend verkleinert.

Energieschwankungen geben außerdem zusammen mit Fehlern im Feldverhältnis einen Fehler für den Umkehrpunkt Z_2

$$\Delta z_2 = \frac{1}{g} \left(2 \frac{\Delta \gamma_{z_1}}{\gamma_{z_1}} - \Delta \left(\frac{B_{z_2}}{B_{z_1}} \right) / \frac{B_{z_2}}{B_{z_1}} \right)$$

Bei dem außerhalb der Schwelle im Umkehrbetrieb gewählten Gradienten von $g = 10^{-2}/\text{m}$ ergibt sich

$$\Delta z_2 = 100 \left(2 \frac{\Delta \gamma_{z_1}}{\gamma_{z_1}} - \Delta \left(\frac{B_{z_2}}{B_{z_1}} \right) / \frac{B_{z_2}}{B_{z_1}} \right) \quad [\text{m}]$$

Das Feldverhältnis sollte leicht auf 10^{-4} konstant gehalten werden können (alle Magnetfelder werden vom gleichen Strom erzeugt). Energieschwankungen können durch einen Kniff klein gehalten werden, da es in unserem Fall nur auf die Axialkomponente ankommt. Durch ein geeignetes Einschußfeld, dessen Ablenkwinkel vom Primärimpuls abhängt, kann eine Abweichung vom Primärsollimpuls über die Änderung im Ablenkwinkel zum größten Teil in die azimutale Impulskomponente übergeführt werden, so daß der Axialimpuls bzw. die Größe γ_{z_1} näherungsweise konstant ist. Trotzdem wurde zur Ringbildung eine magnetische Schwelle mit größerem Gradienten vorgeschlagen, bei dem die Verschmierung des Umkehrpunktes entsprechend kleiner ist.

2. ZUSAMMENFASSUNG

Es wird versucht, einen Elektronenringbeschleuniger zu konzipieren, der vom Prinzip her Wiederholungsfrequenzen $> 10^6$ Hz gestattet. Die Wiederholungsfrequenz ist dabei, wie bei den alten Vorschlägen, durch die Beladung mit Protonen und die Ringbildung beschränkt.

Bei Verwendung herkömmlicher Linacs für die Beschleuniger der Einschusselektronen und für die evtl. Weiterbeschleunigung der Ringe besteht wahrscheinlich von diesen Linacs her eine Grenze für die Wiederholungsfrequenz in der Gegend von einigen kHz, so daß die vom hier konzipierten Elektronenringbeschleuniger her mögliche Frequenz erst mit supraleitenden Linacs ausgenutzt werden kann.

Für viele klärende Diskussionen danke ich gern Herrn Piwinski und den Herren Doktoren Nesemann, Ripken und Wiedemann.

LITERATUR:

- [1] Piwinski, DESY H16, März 68
- [2] Symposium on Electron Ring Accelerators, Berkeley, Feb. 68
- [3] Helm, SLAC Report Nr. 4, August 62

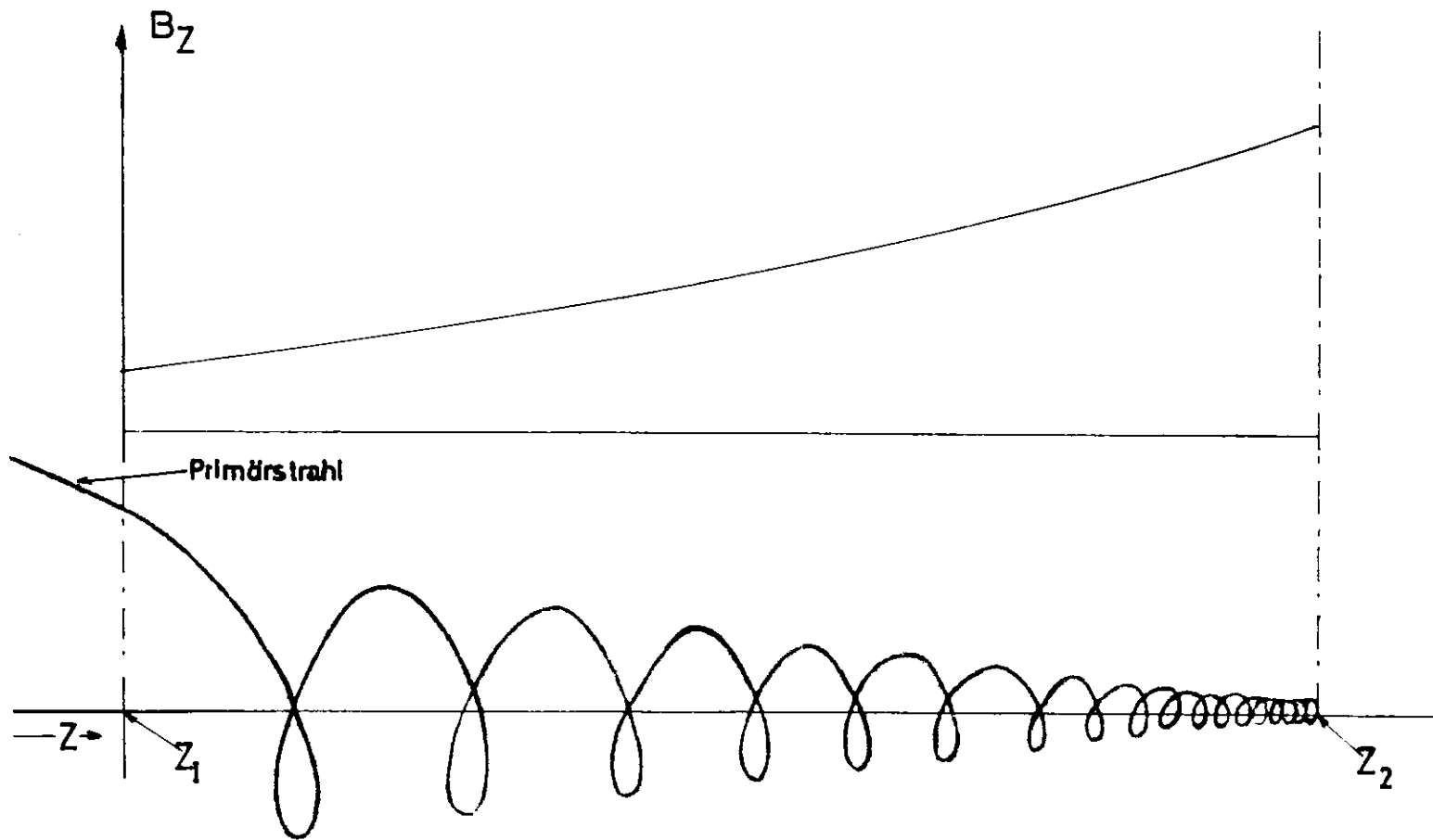


Abb.1 Aufspiralen der Elektronen im ansteigenden Feld

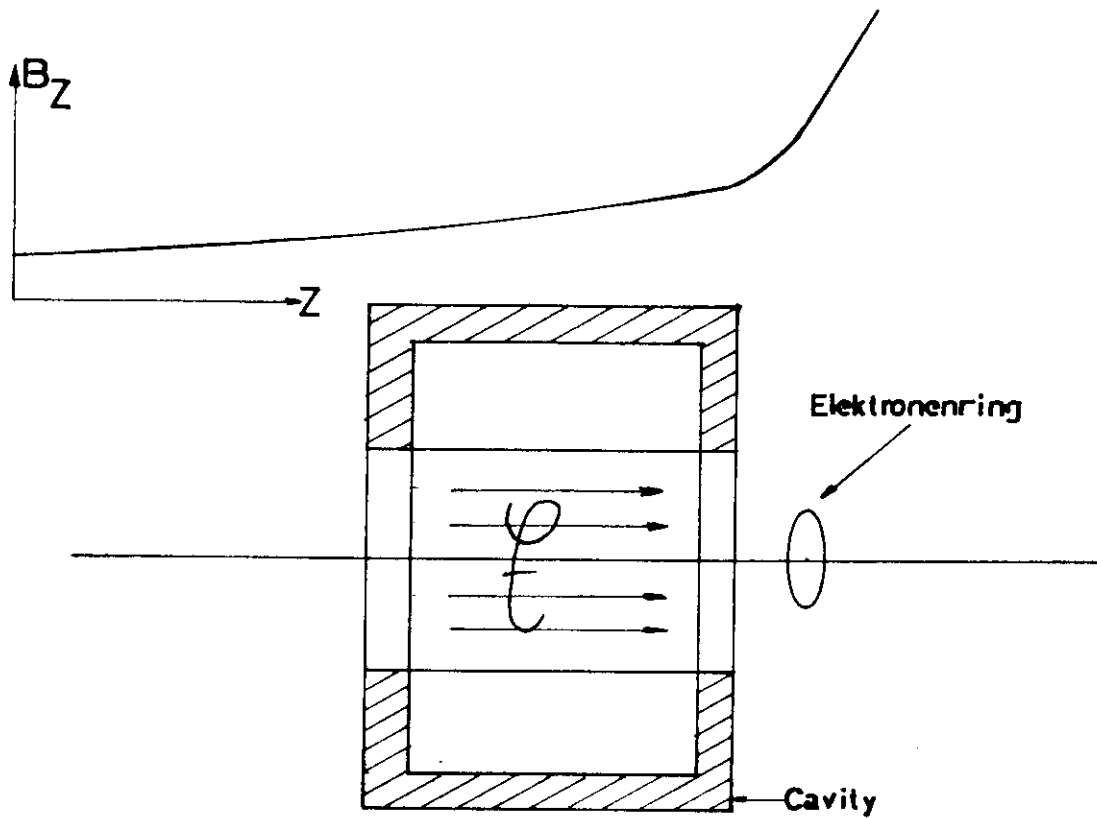


Abb.2 Bildung des Elektronenringes an der magnetischen Schwelle

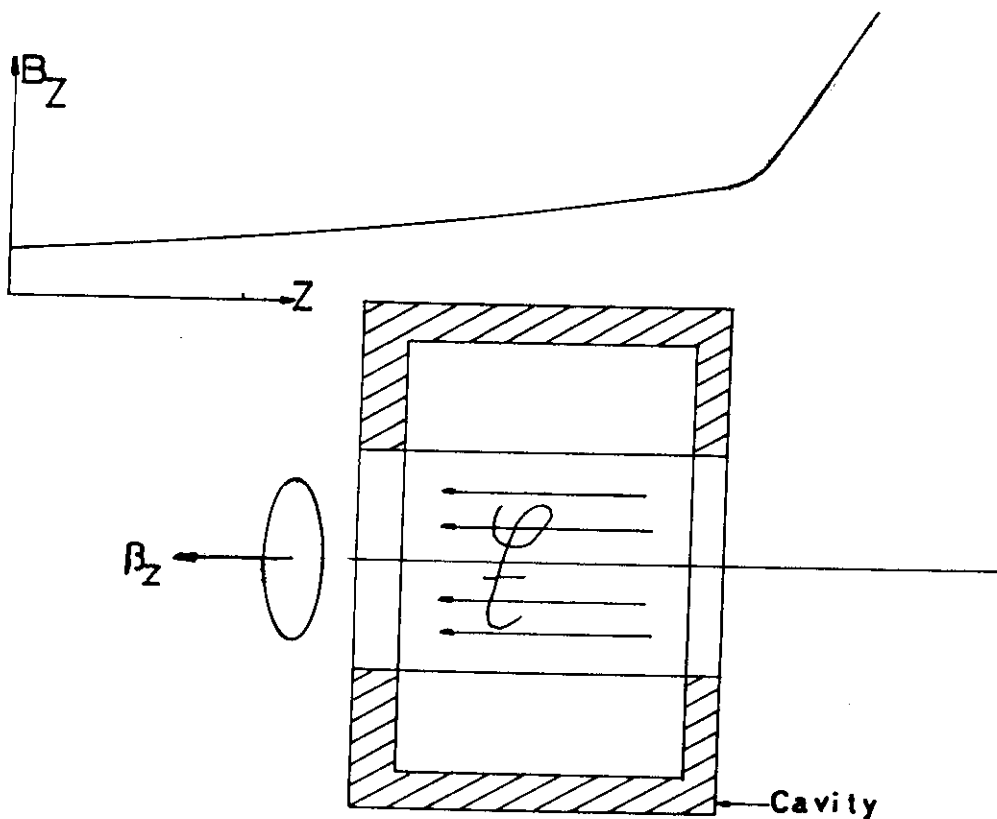


Abb.3 Rückbeschleunigung nach Feldumkehr