

DESY A 2.42

Hamburg, den 2.2.1959

Dr.Ste/Schw.

Reduktion der Energiestreuung am Ende des Beschleunigungs-
vorganges

Das einfachste Verfahren, die Elektronen am Ende des Beschleunigungsvorganges auf ein Target oder in ein magnetisches Ablenkkfeld zu bringen, besteht darin, daß man sie durch Verkleinerung der HF-Amplitude nacheinander aus dem phasenstabilen Bereich herausfallen und auf Grund ihrer Energieabstrahlung nach innen spiralen läßt. Die Abwanderung Δx des Sollkreises pro Umlauf ist dabei gegeben durch

$$\Delta x = \hat{\alpha} \frac{S}{E} \quad , \quad (1)$$

wobei $\hat{\alpha}$ der momentum compaction factor an der betrachteten Stelle, S der Strahlungsverlust pro Umlauf und E die Teilchenenergie ist.

Nach DESY-A 2.38 ist für unsere Maschine

$$\hat{\alpha}_{\max} = 2,13 \text{ m} \quad ; \quad \hat{\alpha}_{\min} = 1,08 \text{ m}$$

$$S = \begin{cases} 3,62 \text{ MeV} & \text{bei } 6 \text{ GeV} \\ 8,83 \text{ MeV} & \text{bei } 7,5 \text{ GeV} \end{cases} \quad (2)$$

und daher

$$\Delta x_{\max} = \begin{cases} 1,29 \text{ mm} & \text{bei } 6 \text{ GeV} \\ 2,51 \text{ mm} & \text{bei } 7,5 \text{ GeV} \end{cases}$$

Würde das Magnetfeld während des Abwanderungsvorganges konstant gehalten und würden außerdem die Teilchen keine Betatronschwingungen ausführen, so würden sie alle mit der gleichen Energie auf das Target treffen, weil die radiale Amplitude der Synchrotronschwingung am Ende der Beschleunigung so klein ist, daß sie vernachlässigt werden kann. Nach DESY A 2.26 haben die Teilchen - bei einer Einschuß-Amplitude von 1,8 cm und einer maximalen Feldstärke $B_{\max} = 8,5 \text{ kG}$ - eine maximale

Betatron-Amplitude von

$$x_{\max} = \begin{cases} 0,79 \text{ cm} & \text{bei 6 GeV und von} \\ 2,36 \text{ cm} & \text{bei 7,5 GeV} \end{cases} \quad (3)$$

Die dadurch verursachte Energiestreuung ist

$$\left(\frac{\Delta E}{E} \right)_{\text{Betatr.}} = \frac{x_{\max}}{\hat{\alpha}_{\max}} \quad (4)$$

$$\left(\frac{\Delta E}{E} \right)_{\text{Betatr.}} = \begin{cases} 0,37 \% \text{ bei 6 GeV} \\ 1,11 \% \text{ bei 7,5 GeV} \end{cases} \quad (5)$$

Ist der Verlauf des Magnetfeldes von der Form

$$B = \frac{1}{2} B_{\max} (1 - \cos \omega t), \quad (6)$$

so wird durch die Änderung des Magnetfeldes während des Ablenkens eine zusätzliche Energiestreuung hervorgerufen, die sich zu der obengenannten addiert und die um so größer wird, je länger der erzeugte Teilchenpuls ist. Für eine Pulsdauer τ ist sie gegeben durch

$$\left(\frac{\Delta E}{E} \right)_{\text{Magn.}} = \frac{\dot{B}}{B} \tau = \omega \tau \sqrt{\frac{B_{\max}}{B} - 1} \quad (7)$$

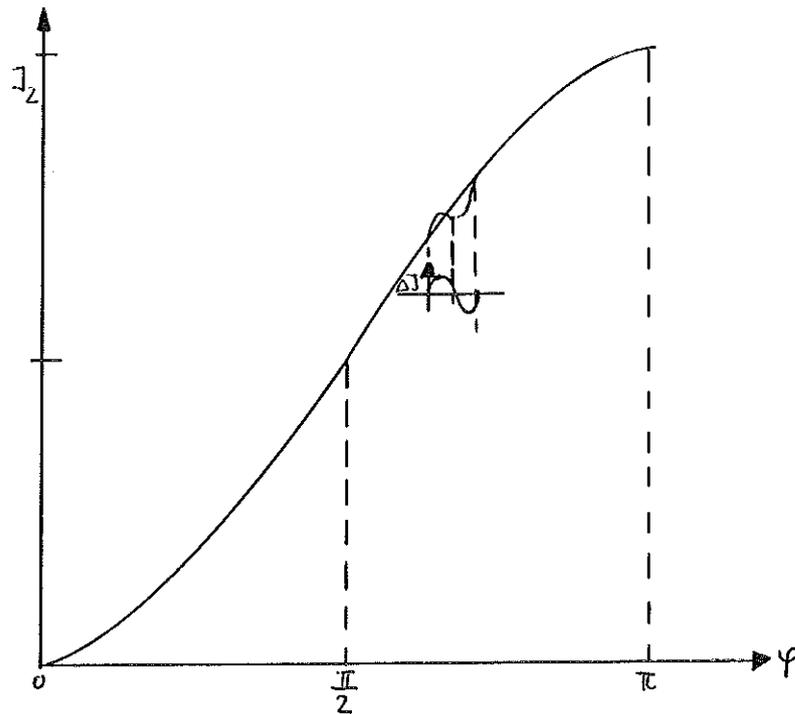
Z.B. beträgt diese Energiestreuung bei einer Pulslänge $\tau = 300/\text{usec}$ mit $B_{\max} = 8,5 \text{ k}\Gamma$ für unsere Maschine

$$\left(\frac{\Delta E}{E} \right)_{\text{Magn.}} = \begin{cases} 5,57 \% \text{ bei 6 GeV} & (B = 6,30 \text{ k}\Gamma) \\ 2,64 \% \text{ bei 7,5 GeV} & (B = 7,88 \text{ k}\Gamma) \end{cases} \quad (8)$$

Nimmt man eine Pulsdauer von $\tau = 300/\text{usec}$ als erstrebenswert an, so folgt durch Vergleich von (8) und (5), daß es erwünscht wäre, die Feldänderung während der Dauer des Pulses bei 6 GeV um etwa einen Faktor 1/20 und bei 7,5 GeV um etwa einen Faktor 1/4 zu reduzieren. Es entsteht also die Aufgabe, den Feldverlauf im Synchrotronmagneten während der Dauer des Pulses in etwa diesem Maße abzuflachen.

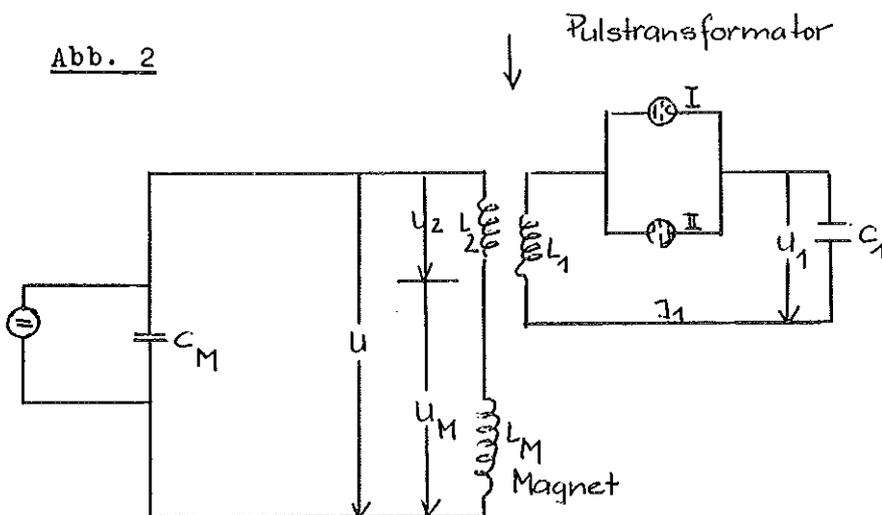
In DESY A 2.30 wurde ein Verfahren beschrieben, mit Hilfe von gesättigten Drosselspulen eine "Terasse" in den Magnetstromverlauf einzubauen. Hier soll ein anderes Verfahren angegeben und in seiner prinzipiellen Wirkungsweise untersucht werden, das darin besteht, dem Magnetstrom mittels eines Schwingkreises über einen Pulstransformator eine kurze Sinuswelle zu überlagern. Der addierte Strom ΔJ und der resultierende Magnetstrom J_2 sind schematisch in Abb. 1 dargestellt.

Abb. 1



Das zugehörige Prinzipschaltbild zeigt Abb. 2; der Drosselkreis ist darin fortgelassen:

Abb. 2

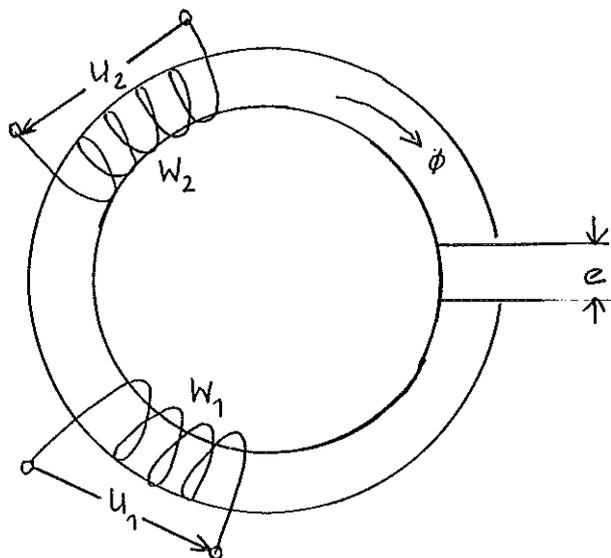


Zu Beginn des Pulses wird die Schaltröhre I gezündet, und der vorher aufgeladene Kondensator C_1 beginnt, sich über die Primärwicklung des Transformators zu entladen. Nach der ersten Halbwelle, wenn C_1 umgekehrt aufgeladen ist, wird Röhre I gelöscht und gleichzeitig Röhre II gezündet, und der Vorgang wiederholt sich in umgekehrter Richtung. Nach einer Schwingungsdauer wird dann auch Röhre II gelöscht, und der ursprüngliche Zustand ist - von Verlusten abgesehen - wieder hergestellt. (Das Löschen der Röhren sollte z.B. auch bei Verwendung von Thyratrons möglich sein, da im Abschaltzeitpunkt der Strom durch Null geht und die Spannung ihr Vorzeichen wechselt.)

Das Verhalten des in Abb. 2 dargestellten Systems während der Pulsdauer soll im folgenden quantitativ beschrieben und an Hand eines Zahlenbeispiels für DESY illustriert werden. Es soll dabei hier von Verlusten abgesehen und die vereinfachende Annahme gemacht werden, daß die Spannung U am Magnetkondensator während der Pulsdauer konstant bleibt (diese Annahme ist gerechtfertigt für den hier interessierenden Fall, daß die Schwingkreisfrequenz groß ist gegen die Magnetfrequenz). Es ist hier nicht beabsichtigt, die für DESY optimalen Parameter festzustellen und das System technisch auszulegen (dies müßte im Rahmen der Magnetstromversorgung erfolgen), sondern es soll nur dargelegt werden, daß ein solches System in Betracht gezogen werden sollte.

Der Pulstransformator werde nach Abb. 3 als ein Eisenringkern mit Luftspalt angenommen, der keinen Streufluß und keine Verluste besitzt und dessen Wicklungen die Windungszahlen w_1 und w_2 haben.

Abb. 3



Dann gelten für das Gesamtsystem der Abb. 2 die Gleichungen

$$\left. \begin{aligned} (L_M + L_2) \dot{J}_2 + L_{12} \dot{J}_1 &= U = \text{const.} \\ L_{12} \dot{J}_2 + L_1 \dot{J}_1 &= \frac{1}{C} \int J_1 dt \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\text{mit } L_i = \frac{w_i^2 \mu_0}{l} \quad \text{und } L_{12} = \sqrt{L_1 L_2}$$

Führt man die Abkürzungen

$$\alpha = \frac{L_2}{L_M + L_2}$$

$$\mathcal{L} = L_1 (1 - \alpha) \quad \text{und}$$

$$\omega^2 = \frac{1}{\mathcal{L} C_1} \quad \text{ein}$$

und setzt $t = 0$ im Einschaltzeitpunkt, so ist die Lösung der Gleichungen (9) während der Pulsdauer gegeben durch

$$J_1 = -\hat{J}_1 \sin \omega t \quad (10)$$

$$U_1 = -\frac{1}{\omega C} \hat{J}_1 \cos \omega t + \frac{w_1}{w_2} \alpha U \quad (11)$$

$$J_2 = \frac{w_1}{w_2} \alpha \hat{J}_1 \sin \omega t + \frac{U}{L_M + L_2} t + J_0 \quad (12)$$

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} \frac{1}{\omega C_1} \hat{J}_1 \cos \omega t + \alpha U \quad (13)$$

und der Fluß im Trafokern ergibt sich als

$$\phi = \frac{L_2}{w_2} J_0 + \frac{1}{w_2} \alpha U t - \frac{1}{w_1} \mathcal{L} \hat{J}_1 \sin \omega t \quad (14)$$

Über die Konstante \hat{J}_1 muß nun - in Abhängigkeit von der Wahl des Einschaltzeitpunktes - so verfügt werden, daß der Magnetstrom J_2 gerade die gewünschte Abflachung erhält.

Für unser Zahlenbeispiel werde die in Abb. 4 (untere Kurve) dargestellte Bedingung gewählt, daß die Zunahme \dot{J}_2 des Magnetstromes im Einschaltzeitpunkt $t = 0$ um das 1,25fache ihres Wertes zunimmt:

$$\dot{J}_2(t = +0) = 1,25 \cdot \dot{J}_2(t = -0) \quad (15)$$

Dann ändert sich z.B. während des eingezeichneten Intervalles

$$\tau = 0,45 \cdot \frac{2\pi}{\omega} \quad (16)$$

der Magnetstrom nur um $1/11$ des Wertes, um den er sich während dieser Zeit ohne Überlagerung der Sinuswelle ändern würde. Eine noch stärkere Verbesserung läßt sich erzielen, wenn man - bei gleichem $\omega \cdot \tau$ und \hat{J}_1 etwas herabsetzt.

Aus der Bedingung (15) ergibt sich

$$\hat{J}_1 = 1,25 \cdot \frac{U}{L_2 \omega} = 1,25 \cdot \frac{W_2}{V_1} \cdot \frac{U}{L_2 \omega} \quad (17)$$

und damit

$$U_1 = \frac{W_1}{W_2} U \left[\alpha - 1,25 (1 - \alpha) \cos \omega t \right] \quad (18)$$

$$\hat{U}_1 = \frac{W_1}{W_2} U (1,25 - 0,25 \alpha) \quad (18a)$$

Für den Fluß im Trafokern erhält man

$$\phi = \frac{1}{W_2} \left[L_2 J_0 + \alpha U t - \frac{1}{\omega} (1 - \alpha) \cdot 1,25 U \sin \omega t \right] \quad (19)$$

In Tabelle 1 sind für Teilchenenergien von 4 GeV, 6 GeV und 7,5 GeV die Werte zusammengestellt, die sich aus diesen Gleichungen ergeben, wenn man die dort verzeichneten technischen Daten für unser DESY-Beispiel zugrunde legt. Die Schwingungsdauer des Schwingkreises wurde mit 600 μ sec gewählt, woraus sich eine nutzbare Targetpulsdauer von 250 - 300 μ sec ergibt. Unter dieser Annahme beträgt die erforderliche Schwingkreiskapazität 4,7 % der Magnetkreis- plus Drosselkreiskapazität (bei gleicher Spannung), und die Magnetkreiskapazität erniedrigt sich um 2 % (gegenüber dem einfachen Magnet-system ohne Pulszusatz) bei einer Spannungserhöhung $\Delta \hat{U}$ von 2 %. Bei einer maximalen Schwingkreisspannung zwischen 6 und 12 kV liegt der maximale Schwingkreisstrom zwischen 800 und 1600 A und die im Schwingkreiskondensator gespeicherte Maximalenergie zwischen 250 und 950 Ws. Die Zahlen der Tabelle 1 zeigen ferner, daß die Puls-transformatoren sich mit vernünftigen Dimensionen realisieren lassen.

K.G. Steffen

Beispiel 1:

Beispiel für $\overset{\circ}{J}_2 (t = +0) = \frac{9}{4} \overset{\circ}{J}_2 (t = -0)$, ohne Verluste gerechnet unter Zugrundelegung der folgenden Daten für ein Magnetpaar:

maximaler Magnetstrom	$\hat{J}_2 = 13,60 \text{ A}$
maximale Magnetspannung	$\hat{U}_M = 11,9 \text{ kV}$
Selbstinduktion	$L_M = 55,6 \text{ mH}$

Teilchenenergie		4 GeV	6 GeV	7,5 GeV
Magnetfeldstärke am Sollkreis		4,2 kΓ	6,3 kΓ	7,9 kΓ
Magnetstrom	$J_2 =$	642 A	1010 A	1260 A
Magnetspannung	$U_M =$	11,8 kV	10,4 kV	6,2 kV
Kondensatorspannung im Magnetkreis	$U =$	12,1 kV	10,6 kV	6,4 kV
	$\frac{L_2}{L_M + L_2} = \alpha =$	0,02	0,02	0,02
Selbstinduktion des Trafos	$L_2 =$	1,14 mH	1,14 mH	1,14 mH
Windungszahlen des Trafos	$W_1 =$	40	40	40
	$W_2 =$	50	50	50
Querschnitt d. Trafokerns	$q =$	250 cm ²	250 cm ²	250 cm ²
Höhe d. Luftspaltes im Trafokern	$l =$	6,9 cm	6,9 cm	6,9 cm
Kreisfrequenz des Schwingkreises	$\omega =$	$1,05 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^4$
Kapazität d. Schwingkreis-kondensators	$C_1 =$	12,8 /μF	12,8 /μF	12,8 /μF
Max. Strom im Schwingkreis	$\hat{J}_1 =$	1580 A	1390 A	840 A
Max. Kondensatorspannung im Schwingkreis	$\hat{U}_1 =$	12,0 kV	10,6 kV	6,4 kV
Maximalenergie im Schwing-kreiskondensator	$\hat{E}_{c1} =$	920 Ws	710 Ws	260 Ws
Max. Feld im Trafokern	$\hat{B} =$	17,2 k	19,8 k	17,5 k

Abb. 4

