

W. Z. W.

Maximal mögliche HF-Leistung
und Teilchenstromstärke am Anfang der Beschleunigung

Der HF-Generator eines 6 GeV-Elektronen-Synchrotrons ist während der Beschleunigungsperiode mit einem sich verändernden Arbeitswiderstand belastet. Dabei arbeitet er am Anfang der Beschleunigung infolge des nichtlinearen Charakters des Strahlwiderstandes fehlangepaßt auf das Verbrauchersystem. Es ist sowohl eine Fehlanpassung dem Betrage nach, als auch der Phase nach vorhanden, wenn keine automatische Korrektur durch geeignete Maßnahmen (z.B. Nachstimmsystem) erfolgt.

Besteht Anpassung am Ende der Beschleunigung für einen zirkulierenden Teilchenstrom \bar{I}_e bei einer Cavityspannung U_0 und einer synchronen Phase φ_s , so ist danach zu fragen, welcher maximale Strom \bar{I}_{e1} am Anfang der Beschleunigung bei veränderten Werten U_0 und φ_s möglich ist, und zwar zunächst aus rein leistungsmäßigen Gründen. Die Verhältnisse sollen unter diesem Gesichtspunkt im folgenden näher untersucht werden.

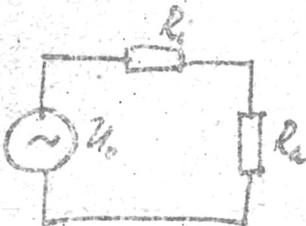


Fig. 1

Nach dem Ersatzschaltbild der Fig. 1 ergibt sich für phasenreine Fehlanpassung $R_a \neq R_i$ eine Betriebsdämpfung entsprechend einem Verhältnis von abgegebener Leistung

$$N = U_0^2 \cdot \frac{R_a}{(R_a + R_i)^2}$$

Zu angebotener (d.h. bei $R_a = R_i$ maximal entziehbarer) Leistung

$$N_{max} = \frac{U_0^2}{4R_i}$$

von

$$\frac{N}{N_{max}} = \frac{4 R_a R_i}{(R_a + R_i)^2} = \frac{4 \frac{R_a}{R_i}}{\left(1 + \frac{R_a}{R_i}\right)^2}$$

Einige charakteristische Zahlenwerte hierzu sind aus der nachstehenden Tabelle ersichtlich.

$\frac{R_e}{R_i}$	$\frac{N}{N_{max}}$	Betriebsdämpfung [db]
0,01 oder 100	0,04	14 = $10 \lg \frac{N_{max}}{N}$
0,02 " 50	0,08	11
0,05 " 20	0,18	7,5
0,1 " 10	0,33	4,8
0,2 " 5	0,55	2,6
0,5 " 2	0,89	0,5
1,0	1,0	0

Bei Anwendung auf den Beschleuniger müssen zunächst die Widerstände bzw. Leitwerte des Verbrauchersystems berechnet werden. Diese setzen sich im wesentlichen aus den durch die Cavities einerseits und den Elektronenstrahl andererseits gebildeten Anteilen zusammen.

Der Cavity-Leitwert ist

$$Y_c = \frac{1}{R_p} \cdot (1 + jF)$$

wobei $F = Q \cdot \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$ die normierte Verstimmung und R_p den Parallelresonanzwiderstand bedeuten ($Q =$ Kreisgüte). ω_0 Kreisfrequenz
 ω_0 Resonanzfrequenz

Der für die Strahlbelastung anzusetzende äquivalente Widerstand R_B bzw. Leitwert Y_B muß erst sinnvoll definiert werden, und zwar folgt sein Realteil G_B aus der Bedingung, daß die verbrauchte Wirkleistung $\frac{1}{2} U^2 G_B$ gleich der auf den Strahl übertragenen Leistung $U \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \varphi) \cdot I_B$ sein muß, wobei U den Scheitelwert der Cavity-Spannung und φ den synchronen Phasenwinkel (vom Spannungsnulldurchgang aus gerechnet) bedeuten (s. Fig. 2).



Fig. 2

Der Einfluß der Laufzeit in den Beschleunigungstrecken sei der Einfachheit halber vernachlässigt.

Es ist damit also

$$G_B = \frac{2.3 \cdot I_0}{u} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)$$

der Realteil des komplexen Strahlleitwertes

$$Y_B = \frac{2.3 \cdot I_0}{u} \cdot e^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}$$

Die Blindkomponente von Y_B ist negativ entsprechend einem dem Spannungsmaximum nacheilenden Strommaximum (induktiver Charakter des Strahles).

Unter Verwendung der Indizes 1 und 2 für Anfang bzw. Ende der Beschleunigung ergeben sich somit folgende Widerstands- und Leitwerte:

	am Anfang	am Ende
Cavity-Widerstand	$R_1 = R_p \cdot \frac{1}{1+j\zeta_1}$	$R_2 = R_p \cdot \frac{1}{1+j\zeta_2}$
Äquiv. Strahlwiderstand	$R_{B1} = \frac{u_1}{2.3 I_1} \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_1\right)}$	$R_{B2} = \frac{u_2}{2.3 I_2} \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_2\right)}$
Cavity-Leitwert	$Y_{C1} = \frac{1}{R_p} \cdot (1+j\zeta_1)$	$Y_{C2} = \frac{1}{R_p} \cdot (1+j\zeta_2)$
Äquiv. Strahlleitwert	$Y_{B1} = \frac{2.3 I_1}{u_1} \cdot e^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_1\right)}$	$Y_{B2} = \frac{2.3 I_2}{u_2} \cdot e^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_2\right)}$

Gesamtleitwert am Anfang

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= \frac{1}{R_p} (1+j\zeta_1) + \frac{2.3 I_1}{u_1} \cdot e^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_1\right)} \\
 &= \frac{1}{R_p} + \frac{2.3 I_1}{u_1} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_1\right) + j \left[\frac{1}{R_p} \zeta_1 - \frac{2.3 I_1}{u_1} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_1\right) \right]
 \end{aligned}$$

Es sei angenommen, daß durch ein automatisches Abstimm-
system das Cavity während der Beschleunigungsperiode so abge-
stimmt wird, daß die Blindkomponente des ^{Gesamt} Verbraucherleitwertes
verschwindet ($0 < \xi < \infty$). $\xi = R_p \frac{2F_B}{U} \cos \varphi$ de l'impédance de la
cavity - le facteur est
à multiplier

Dann ist der Gesamtleitwert $resll$ und

am Anfang $G_1 = \frac{1}{R_p} + \frac{2F_{B1}}{U_1} \sin \varphi_1$ bezw.

am Ende $G_2 = \frac{1}{R_p} + \frac{2F_{B2}}{U_2} \sin \varphi_2$

Wenn Anpassung für G_2 vorhanden ist, beträgt für G_1 die
Fehlanspassung am Anfang der Beschleunigungsperiode

$$\frac{R_a}{R_i} = \frac{\frac{1}{G_1}}{\frac{1}{G_2}} = \frac{\frac{1}{R_p} + \frac{2F_{B1}}{U_1} \sin \varphi_1}{\frac{1}{R_p} + \frac{2F_{B2}}{U_2} \sin \varphi_2} = \frac{G_2}{G_1}$$

$R_i = \frac{1}{G_2}$

Daraus folgt die dem Generator entziehbare Leistung
(bei gleichbleibender EMK U_0 !) zu

$$N_1 = \frac{4 \frac{R_a}{R_i}}{\left(1 + \frac{R_a}{R_i}\right)^2} \cdot N_2$$

$$\frac{1}{2} U_1^2 G_1 = \frac{4 \frac{G_2}{G_1}}{\left(1 + \frac{G_2}{G_1}\right)^2} \cdot \frac{1}{2} U_2^2 G_2$$

Für eine EMK $U_{01} \leq U_{02}$ muß sein folgt daraus:

$$\frac{U_1}{U_2} \leq \frac{2G_2}{G_1 + G_2} = \frac{\frac{1}{R_p} + \frac{2F_{B2}}{U_2} \sin \varphi_2}{\frac{1}{R_p} + \frac{F_{B2}}{U_1} \sin \varphi_1 + \frac{F_{B2}}{U_2} \sin \varphi_2}$$

oder

$$F_{B1} \leq F_{B2} \cdot \frac{1}{\sin \varphi_1} \left[\frac{U_2}{F_{B2} \cdot R_p} \left(1 - \frac{U_1}{U_2}\right) + \sin \varphi_2 \left(2 - \frac{U_1}{U_2}\right) \right]$$

oder

Beispiel 1:

Sind gegeben

$U_2 = 70 \cdot 10^3$ V je Cavity (Beschl. + Strahlungsverluste)

$I_{B2} = 32 \cdot 10^{-3}$ A (d.h. $2 \cdot 10^{11}$ Elektronen bei 1 μ s Umlaufzeit)

$R_1 = 1,5 \cdot 10^6$ Ohm je Cavity

$\varphi_2 = 45^\circ$

So wäre für $\frac{U_1}{U_2} = 0,3$ (Annahme) der Klammerwert

$$[] = \left[\frac{70 \cdot 10^3 \cdot 0,3}{32 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^6} + \frac{1,2}{\sqrt{2}} \right] = 2,2$$

also

$$I_{B1} \leq I_{B2} \cdot \frac{2,2}{1,2}$$

und für $\varphi_1 = 15^\circ$ $\sin \varphi_1 = 0,25$ (Annahme) $I_{B1} \leq 8,8 I_{B2} = 284$.

Beispiel 2:

Rechnet man mit einer Beschleunigung am Anfang von 0,3 MeV / Umlauf (d.h. $U_1 \cdot \sin \varphi_1 \cdot 96$ für 96 Cavities) und betragen Strahlungsverluste + Beschleunigung am Ende zusammen 4,7 MeV / Umlauf (d.h. $U_2 \cdot \sin \varphi_2 \cdot 96$) so ist für

$\varphi_2 = 45^\circ$ und $\varphi_1 = 15^\circ$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{0,3}{4,7} \cdot \frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_1} = 0,18$$

und der maximal zulässige Strom wäre

$$I_{B_1} \cong I_{B_2} \cdot \frac{1}{0,25} \cdot [1,2 + 1,2] = 10 \cdot I_{B_2} = 0,32 \text{ A}$$

In dem letztgenannten Falle beträgt ^{die} Fehlanpassung am Anfang

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{\frac{1}{1,5 \cdot 10^{-6}} + \frac{2 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,96}{\frac{1}{2,5 \cdot 10^{-6}} + \frac{2 \cdot 0,32}{0,2 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,25^2 \cdot 96} = \frac{0,67 \cdot 10^{-6} + 9,68 \cdot 10^{-6}}{0,4 \cdot 10^{-6} + 13,8 \cdot 10^{-6}} = 0,1$$

(etwa gleiche Anteile)
(überwiegend am Ende!)

Die Wirkleistung für 96 Cavities ist

am Anfang $96 \cdot 1/2 U_1^2 G_1 = 100 \text{ kW}$

am Ende $96 \cdot 1/2 U_2^2 G_2 = 300 \text{ kW}$

Zur Berücksichtigung der Laufzeiteinflüsse und der Leistungsverluste ist ein Zuschlag von ca 20 % zu machen, so daß der Leistungsbedarf am Ende der Beschleunigung ca 360 kW beträgt. Diese Leistung kann von zwei Klystrons X 602 geliefert werden unter der Voraussetzung, daß die mittlere Kollektor-Verlustleistung pro Klystron den Wert von 100 kW nicht überschreitet. Mit einem Wirkungsgrad von 40 % bei Anpassung ist die gesamte Leistungsaufnahme beider Klystrons $\frac{360}{0,4} = 900 \text{ kW}$ am Ende der Beschleunigung.

Für den Fall, daß keine Möglichkeit besteht, die Fehlanpassung der Klystrons während der Beschleunigung zu korrigieren, ist die Leistungsaufnahme während der Beschleunigung als konstant anzusetzen, und es ergäbe sich bei einer mittleren Nutzleistung von ca 240 kW während der Beschleunigungszeit eine mittlere Verlustleistung von ca 660 kW. Unter Berück-

sichtigung einer rel. Einschaltdauer von 40 % wäre der zeitliche Mittelwert der Verlustleistung ca 264 kW, d.h. 132 kW je Klystron. Es würden in einem solchen Falle also drei Klystrons erforderlich sein.

Infolge des Vorhandenseins von Modulationsanoden in den Klystrons besteht jedoch die Möglichkeit, die Klystrons bis zu einem gewissen Grade dem veränderten Verbraucherwiderstand am Anfang der Beschleunigung anzupassen. Dabei ist der Fall $G_1 < G_2$ günstiger als $G_1 > G_2$, was im Bedarfsfalle leicht dadurch erreicht werden kann, daß die zwischen Verbraucher und Generator geschaltete Leitung ein ungeradzahliges Vielfaches einer Viertelwellenlänge lang gemacht wird. Damit ist zu erwarten, daß bei insgesamt zwei Klystrons die mittlere Verlustleistung je Klystron unter dem max. zulässigen Wert von 100 kW liegen wird.

Dr. Scha/W
5.2.58