

DESY A 2.28

Hamburg, den 29.7.1958  
Bo/Schw.

Auslegung der Ringdrossel und der Sperrkreise\*)

Für die folgenden Berechnungen sind gegeben:

- a) der Scheitelwert der gesamten im Magneten gespeicherten Energie  $W$
- b) die zulässige Spannung (Effektivwert)  $2U$  einer Einheit.  
 $U$ : die zulässige Spannung gegen Erde
- c) die Anzahl der Einheiten  $m$ .  $N = 56$ ;  $m = \frac{2N + 1}{3} = 19$
- d) die Kurvenform des Magnetstromes:

$$i = \frac{I_m}{2} (1 - \cos \omega t) \quad \omega \approx 2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1}$$

Ein geringes Abweichen von der vollständigen Gleichstromvormagnetisierung, was eventuell vorgesehen wird, spielt für diese Überlegungen keine Rolle.

Aus a) bis d) ergibt sich die Magnetinduktivität/Einheit  $L$  und damit die Reihenkapazität  $C$ . Die Sperrdrossel/Induktivität/Einheit sei  $L' = mM + L_s$ , und ferner sei  $x = \frac{L'}{L}$ . Dann werden in den Sperrkreisen folgende Energien gespeichert:

In den Kondensatoren  $C'$  
$$W_{C'} = \frac{1}{4} x \cdot W \quad (1)$$

In der Ringdrossel 
$$W' = \frac{1}{4} \frac{(1+x)^2}{x} \cdot W \quad (2)$$

Insgesamt: 
$$W' + W_{C'} = \frac{1}{4} W \left[ x + \frac{(1+x)^2}{x} \right] \quad (3)$$

\*) Literatur: CAP 12, CAP 12a, CEA 16, CEA TM 4

Aus (3) erhält man ein Minimum für die in den Sperrkreisen zu speichernde Energie aus:

$$\frac{d}{dx} \left[ x + \frac{(1+x)^2}{x} \right] = 0 \quad \text{für } x_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Es ist aber nicht damit zu rechnen, daß für die wirtschaftlichste Auslegung der Sperrkreise  $x = x_0$  sein wird.

Beim Entwurf der Ringdrossel werden zunächst folgende Voraussetzungen gemacht:

- a) Die magnetische Energie ist nur in den Luftspalten gespeichert.
- b) Die Streuung wird vernachlässigt.
- c) Die magnetischen Felder in Luft und Eisen sind homogen.

Die magnetische Scheitelinduktion  $B_m$  soll als feste Größe eingeführt werden. Maßgebend für die Wahl von  $B_m$  soll sein, daß die Drossel lineares Verhalten zeigt. Legt man das zugrunde und dazu den Aufbau des Eisenkörpers aus trapezförmigen Sektoren, so wird sich die Verwendung von kaltgewalztem vorzugsorientiertem Blech empfehlen. Nimmt man z.B. ARMCO M-6W, so kann man  $B_m = 17000$  G wählen.

Das Luftspaltvolumen der Drossel  $V_L$  muß betragen:

$$V_L = \frac{2 \cdot u_0 \cdot W^2}{B_m^2} \quad (4)$$

und mit  $B_m = 17000$  G

$$\frac{V_L}{[\text{cm}^3]} = 0,87 \cdot \frac{(1+x)^2}{4x} \cdot \frac{W}{[\text{Vs}]} \quad (5)$$

Die Abmessungen der Ringdrossel ergeben sich aus den folgenden Gleichungen:

$$W' = \frac{(1+x)^2}{4x} \cdot W = \frac{1}{2} Q_{Fe} \cdot Q_{Cu} \cdot B_m \cdot G \sqrt{\frac{1+x}{1+\frac{x}{2}}} \quad (6)$$

$$Q_{Cu} = \frac{2W}{Q_{Fe} \cdot B_m \cdot G} X \quad \text{mit} \quad (7)$$

$$X = \frac{\sqrt{1 + \frac{x^2}{2}} (1+x)}{4x} \quad (8)$$

$$Q_{Fe} = \gamma_{Fe} \cdot a \cdot b \quad (9)$$

$$Q_{Cu} = W \frac{2}{\gamma_{Fe} \cdot B_m} \frac{1}{a \cdot b \cdot G} X \quad (10)$$

Es wird nun ein Kupferfüllfaktor  $\gamma_{Cu}$  als Anteil des reinen Kupferquerschnittes an der Fläche des inneren Kreises eingeführt.  $\gamma_{Cu}$  läßt sich am Anfang nur ungenau schätzen, und es müssen deshalb mehrere Rechnungsgänge aufeinander folgen, bei denen auch jeweils die Wicklungsanordnung skizziert wird, so daß man ein Bild über den Wert von  $\gamma_{Cu}$  erhält.

$$Q_{Cu} = \gamma_{Cu} \frac{\pi}{4} D_i^2 \quad (11)$$

$$D_i = \sqrt{W} \sqrt{\frac{8}{\pi \gamma_{Cu} \cdot \gamma_{Fe} \cdot B_m}} \frac{1}{\sqrt{a \cdot b \cdot G}} \sqrt{X} \quad (12)$$

$$G_{\text{Fe}} = 0,9 \gamma_1 a \cdot b \quad (a+D_i) = \gamma_1 \left( a^2 b + \sqrt{\frac{a \cdot b}{G}} \sqrt{X} \sqrt{W} \sqrt{\frac{8}{\text{Cu Fe } B_m}} \right) \quad (13)$$

$$G_{\text{Cu}} = 1,15 \gamma_2 \quad 2(a+b) Q_{\text{Cu}} = \frac{a+b}{ab} \frac{1}{G} X W \frac{4}{B_m \cdot \varphi_{\text{Fe}}} \gamma_2 \quad (14)$$

Die Faktoren 0,9 und 1,15 bei den Ausdrücken für das Eisen- und Kupfergewicht berücksichtigen die Minderung des Eisengewichts infolge der Luftspalte und die Vergrößerung des Kupfergewichtes gegenüber einer Spule mit sehr geringer Wickelhöhe, die die mittlere Windungslänge  $2(a+b)$  hat.

#### Verluste

Eisenverluste: Die Eisenverluste sind vom Grad der Gleichstromvormagnetisierung der Drossel, also von  $x$ , abhängig. Eine Funktion dafür wird jedoch nicht eingesetzt, sondern die Eisenverluste für den zu erwartenden Wert  $x \approx 0,4$ . Da

$$I_{\text{Drm}} = I_{\text{Gl}} (1+x)$$

ist das Verhältnis der Wechselamplitude der magnetischen Induktion  $B_{\sim}$  zum Scheitelwert der Induktion  $B_m$  für  $x = 0,4$

$$\frac{B}{B_m} \approx 0,29$$

Bei diesem Verhältnis und bei  $B_m = 17000$  G betragen nach durchgeführten Messungen für hochsilizierte Elektrobleche \*) die Hystereseverluste das 0,25fache derjenigen bei reiner Wechselmagnetisierung und  $B = 17000$  G. Nach den Unterlagen für M-6W sind bei  $B_{\sim} = 17000$  G die gesamten Eisenverluste 1,6 W/kg und

\*) Electr. Eng. 1934, S. 318

die Hystereseverluste allein 0,7 W/kg. In unserem Fall ist also zu rechnen mit:

Hystereseverluste: 0,175 W/kg  
 Wirbelstromverluste: 0,145 W/kg  
 Insgesamt:  $v_{Fe} = 0,32$  W/kg

$$\frac{V_{Fe}}{[kW]} = 0,32 G_{Fe} / [t]$$

Kupferverluste: Nimmt man einen summarischen Zuschlag von 10 % für die Wirbelstromverluste, so sind die Kupferverluste  $V_{Cu}$ :

$$\begin{aligned} \frac{V_{Cu}}{[kW]} &= 1,1 \cdot \xi \cdot G^2 \frac{G_{Cu}}{\gamma^2} = \\ &= 2,63 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega \text{ mm}^4}{\text{kg}} \frac{G_{Cu}}{[\text{kg}]} \left[ \frac{G^2}{\text{mm}^4} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

Dabei wurde  $\xi = \frac{1}{47} \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$  gesetzt, was einer Temperatur von 95° C entspricht (VDE Isolationsklasse A mit  $\lambda = 60^\circ$ ).

Kondensatorenverluste: Bei Papier-Öl- und bei Papier-Clophen-Kondensatoren betragen die Verluste bei 50 Hz  $\text{tg } \delta \approx 3$  % der Blindleistung. In den Sperrkreis-Kondensatoren treten dann folgende Verluste  $V_C$  auf:

$$V_{C'} = \frac{1}{4} x \cdot \omega \text{tg } \delta \cdot W$$

$$\frac{V_{C'}}{[kW]} = 0,236 \cdot x \cdot \frac{W}{[kWs]} \quad (16)$$

### Kosten

Die Sperrkreise sollen für geringste Anschaffungs- und Betriebskosten ausgelegt werden.

Anschaffungskosten: Preis für Kondensatoren und Drosselspule. Der Preis für die Spannungsquellen, die Schaltanlagen und die Kabel wird in erster Näherung als konstant und unabhängig von der Auslegung der Sperrkreise angenommen.

Betriebskosten: Fixe Kosten pro KW Anschlußwert bzw. Spitzenleistung pro Jahr plus Arbeitspreis pro KW h verbrauchten Stromes. Für den Betrieb des Synchrotrons wird eine jährliche Betriebsdauer von 4000 Stunden und eine Gesamtbetriebszeit von 10 Jahren veranschlagt.

#### Anschaffungskosten für die Drossel

Es wird nur der Preis für das aktive Material  $K_{Dr}$  angesetzt. Für Kessel, Halte- und Preßkonstruktionen, Ausleitungen, Durchführungen, Öl usw. wird ein konstanter Preis angenommen.

$$K_{Dr} = k_1 G_{Fe} + k_2 G_{Cu} \quad (17)$$

#### Anschaffungskosten für die Kondensatoren

Der Preis  $K_{C1}$  für die Kondensatoren ist bei gegebener Spannung und Frequenz proportional der gespeicherten Energie  $W_{C1}$ :

$$K_{C1} = k_3 \cdot \frac{1}{4} x \cdot W \quad (18)$$

#### Betriebskosten

Mit der o.a. Betriebszeit lassen sich die fixen Kosten und die Stromkosten zusammenfassen in den Faktor  $k_4$  für die gesamten Betriebskosten/kW:

$$K_3 = k_4 \left( v_{Fe} \cdot G_{Fe} + 115 \cdot G^2 \frac{G_{Cu}}{r^2} + \frac{1}{4} x \omega t g d \cdot W \right) \quad (19)$$

Gesamtkosten

$$K = K_{Dr} + K_C + K_B \quad (20)$$

$$k = f(a, b, x, G) = 0,9 \gamma_1 \pi (k_1 + k_4 v_{Fe}) (a^2 b + \sqrt{\frac{a \cdot b}{G}} \sqrt{x} \cdot \sqrt{W} \sqrt{\frac{8}{\pi \gamma_{Cu} \gamma_{Fe} B_m}} + (k_2 + k_4 \cdot 1,1 \cdot \rho \cdot \frac{G^2}{\gamma_2}) \cdot$$

$$1,15 \frac{4 \cdot \gamma_2}{B_m \gamma_{Fe}} \cdot W \cdot X \cdot \frac{1}{G} \frac{a+b}{a \cdot b} +$$

$$+ (k_3 \cdot \frac{1}{4} W + k_4 \cdot \tan \delta \cdot \omega \cdot \frac{1}{4} W) x = \min! \quad (21)$$

$$\frac{\partial K}{\partial a} = 0,9 \gamma_1 \pi (k_1 + k_4 v_{Fe}) (2ab + \frac{1}{2} a^{-\frac{1}{2}} b^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{4WX}{G \cdot B_m \gamma_{Fe}}} \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot \gamma_{Cu}}})$$

$$- (k_2 + k_4 \cdot 1,1 \rho \frac{G^2}{\gamma_2}) \cdot 1,15 \cdot \gamma_2 \frac{4WX}{G \cdot B_m \gamma_{Fe}} \cdot \frac{1}{a^2} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial K}{\partial b} = 0,9 \gamma_1 \pi (k_1 + k_4 v_{Fe}) (a^2 + \frac{1}{2} a^{\frac{3}{2}} b^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{4WX}{G \cdot B_m \gamma_{Fe}}} \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot \gamma_{Cu}}})$$

$$- (k_2 + k_4 \cdot 1,1 \rho \frac{G^2}{\gamma_2}) \cdot 1,15 \cdot \gamma_2 \frac{4 \cdot W \cdot X}{G \cdot B_m \gamma_{Fe}} \cdot \frac{1}{b^2} = 0 \quad (23)$$

Aus (22) folgt:

$$b + b^{\frac{1}{2}} a^{-\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{4WX}{G \cdot B_m \gamma_{Fe}}} \sqrt{\frac{1}{8\pi \gamma_{Cu}}} - a^3 \frac{4WX \cdot 1,15 \gamma_2 (k_2 + k_4 \cdot 1,1 \rho \frac{G^2}{\gamma_2})}{G \cdot B_m \gamma_{Fe} \cdot 0,9 \gamma_1 \cdot 2\pi (k_1 + k_4 v_{Fe})} = 0$$

$$b = a^{-3} \frac{2 W X}{\pi \psi_{Fe} \beta_m G} \left[ \sqrt{\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \frac{1,15 (k_2 + k_4 \cdot 1,19 \frac{G^2}{\gamma_2})}{0,9 (k_1 + k_4 \cdot v_{Fe})} + \frac{1}{16 \psi_{Cu}}} - \sqrt{\frac{1}{16 \psi_{Cu}}} \right]^2 \quad (25)$$

Mit den Abkürzungen:  $A = \frac{2 W X}{\pi \psi_{Fe} \beta_m G}$

$$B = \sqrt{\frac{1,15 \cdot \gamma_2 (k_2 + k_4 \cdot 1,19 \cdot \frac{G^2}{\gamma_2})}{0,9 \cdot \gamma_1 (k_1 + k_4 \cdot v_{Fe})} + \frac{1}{16 \psi_{Cu}}} - \sqrt{\frac{1}{16 \psi_{Cu}}}$$

erhält man:

$$b = a^{-3} \cdot A \cdot B^2 \quad (26)$$

$$a = \left[ \frac{1 + \frac{1}{\psi_{Cu} \cdot B}}{2 \cdot \frac{1,15}{0,9} \frac{\gamma_2 (k_2 + k_4 \cdot 1,19 \frac{G^2}{\gamma_2})}{\gamma_1 (k_1 + k_4 \cdot v_{Fe})}} \right]^{\frac{1}{4}} \cdot A^{\frac{1}{4}} \cdot B \quad (27)$$

Damit sind die optimalen Hauptabmessungen der Toroiddrossel gefunden. Sie sind noch eine Funktion von x und der Stromdichte G. Die Gesamtkosten für die Sperrkreise werden nun in Abhängigkeit von x und G graphisch aufgetragen, wobei x als Abszisse und G als Parameter genommen werden. - Die spezifischen Preise für die Materialien und den Strom, die aufgrund bisheriger Informationen geschätzt wurden, sind in Tab. I eingetragen. Bei Änderung eines oder mehrerer Preise wird sich die ganze Dimensionierung verschieben, und es müssen die Rechnungen wiederholt werden. Aus diesem Grunde sind mehrere Spalten in der Tabelle vorgesehen. Insbesondere werden für die Kondensatoren verschiedene Preise eingesetzt: einmal die normalen Preise für Kondensatoren nach VDE 0560, deren Nennspannung der hier auftretenden Spannung entspricht. (7.-- DM/Ws); dann den niedrigsten zu erwartenden Preis für Mittel-

spannungskondensatoren, deren "Dauergrenzspannung", die 10 % über ihrer Nennspannung liegt, gleich der in der Schaltung auftretenden Spannung ist (5,25 DM/Ws).

Mit den Hilfsgrößen, die in Tab. II festgehalten sind, erhält man die Hauptabmessungen a, b und  $D_i$  der Drossel für verschiedene Werte von x und verschiedene Stromdichten G, siehe Tab. III.

Die Gesamtkosten K = Anschaffungs- und Betriebskosten - für die verschiedenen Entwürfe sind in Abb. 2 und 3 aufgetragen. Um einen zusätzlichen Bewertungsmaßstab zu haben, sind darunter die Anschaffungskosten für die günstigsten Entwürfe dargestellt. Aus beiden Kostenfunktionen geht hervor, daß es vorteilhaft ist, sich für eine Drossel mit den Werten  $x = 0,35$  ;  $G = 2,5 \text{ A/mm}^2$  zu entscheiden. Diese Drossel soll im folgenden in ihren Hauptdaten festgelegt werden.

#### Entwurf der optimalen Drossel

1)  $x = 0,35$ ;  $G = 2,5 \text{ A/mm}^2$

2) Eisenkern:

Tab. III zeigt, daß in dem in Frage kommenden Bereich der Stromdichten das Eisengewicht fast unabhängig von G ist.

Es wird gewählt:  $a = 100 \text{ cm}$ ;  $b = 160 \text{ cm}$ . Das erforderliche Luftspaltvolumen ist dann:

$$V_L = 0,87 \cdot 1,3 \cdot 1,23 \text{ m}^3 = 1,39 \text{ m}^3 - 19 \text{ Luftspalte zu je } 4,45 \text{ cm}$$

Ferner:  $D_i = 190 \text{ cm}$

$$Q_{Fe} = 0,92 \cdot 1,6 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 = 1,47 \cdot 10^4 \text{ cm}^2$$

Kraft im Luftspalt (Scheitelwert): ca. 170 t

3) Wicklung:

In der Drossel gespeicherte Energie:  $W' = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Ws}$

Scheitelwert des Magnetstromes:  $I_m = 1000 \text{ A}$

Scheitelwert des Drosselstromes:  $I_D = 675 \text{ A}$

Windungszahl pro Sektor  $w_s$ :

$$w_s = \frac{2W'}{Q_{Fe} \cdot B_m \cdot I_{Drm}} = 100$$

Drossel-Effektivstrom:  $I_{Dr} = 515 \text{ A}$

Leiterquerschnitt:  $q = 2,0 \text{ cm}^2$ ; damit wird die Stromdichte  $G = 2,58 \text{ A/mm}^2$ .

Abb. 4 zeigt eine Skizze der Ringdrossel. Der nach diesem Entwurf erforderliche reine Kupferquerschnitt pro Sektor  $Q_{Cus} = 200 \text{ cm}^2$  ist gut unterzubringen; also war der Kupferfüllfaktor richtig gewählt. Man teilt die Wicklung am besten auf in 4 Einzelspulen zu je 25 Windungen. Die gebräuchlichste Art des Aufbaues ist dann die der kompakten Anordnung mit drei parallelen Ölkanälen. Macht man diese 13 mm breit, so ergibt sich eine Wickelhöhe von 135 mm pro Sektor. Eine solche Wicklung läßt sich gut herstellen und gut pressen, und es bleibt noch genügend Platz für die Preßkonstruktionen des Eisenkernes. Nachteilig dabei ist nur die relativ ungleichmäßige Verteilung längs des Umfangs, was zu einem größeren Streufluß und damit zu höheren Wirbelstromverlusten im Wickelkupfer führt. Das wird vermieden bei der anderen skizzierten Art der Wicklungsanordnung, bei der die 4 Einzelspulen gleichmäßiger über den Umfang verteilt sind. Dieser Aufbau ist elektrisch günstiger, doch dürfte er mechanisch recht schwierig sein.

4) Gewichte und Verluste:

Eisengewicht: 102 t

Eisenverluste: 33 kW

Kupfergewicht: 17,8 t (ohne Primärwicklung)

Kupferverluste: 312 kW (ohne Primärwicklung und mit summarischem Zuschlag von 10 % für die Zusatzverluste).

29.7.1958  
Bo/Schw.

Bothe

## Verwendete Bezeichnungen

L	Magnetinduktivität/Einheit
L'	wirksame Drosselinduktivität/Einheit
$\frac{L}{L'} = x$	
C	Reihenkapazität/Einheit
C'	Sperrkreiskapazität/Einheit
m	Anzahl der Einheiten
L <sub>s</sub>	Streuinduktivität der Drossel pro Einheit
W	Scheitelwert der gesamten im Magneten gespeicherten Energie
W'	Scheitelwert der gesamten in der Drossel gespeicherten Energie
W <sub>C'</sub>	Scheitelwert der gesamten in den Kondensatoren C' gespeicherten Energie
B <sub>m</sub>	Maximalinduktion in der Ringdrossel
V <sub>L</sub>	Luftspaltvolumen der Ringdrossel
Q <sub>Cu</sub>	Kupferquerschnitt
Q <sub>Fe</sub>	Eisenquerschnitt
G	Effektivwert der Stromdichte der Drossel
D <sub>i</sub>	Ringkern-Innendurchmesser)
a	Ringkern-Breite )
b	Ringkern-Höhe )
	s Abb. 1
G <sub>Fe</sub>	Eisengewicht
G <sub>Cu</sub>	Kupfergewicht
γ <sub>Cu</sub>	Kupferfüllfaktor
γ <sub>Fe</sub>	Eisenfüllfaktor
I <sub>m</sub>	Scheitelwert des Magnetstromes
I <sub>Dr<sub>m</sub></sub>	Scheitelwert des Drosselstromes
I <sub>Dr</sub>	Effektivwert des Drosselstromes
γ <sub>1</sub>	Spezifisches Gewicht des Eisens
γ <sub>2</sub>	Spezifisches Gewicht des Kupfers
v <sub>Fe</sub>	Spezifische Eisenverluste pro kg
V <sub>Fe</sub>	Eisenverluste
V <sub>Cu</sub>	Kupferverluste

$V_{C'}$	Verluste in den Kondensatoren $C'$
$k_1$	Preis für 1 kg Eisen, fertig verarbeitet
$k_2$	Preis für 1 kg fertiggewickeltes und isoliertes Kupfer
$k_3$	Kondensatorenpreis pro $W_s$
$k_4$	Betriebskosten pro kW
$K_{Dr}$	Anschaffungskosten für die Drossel
$K_{C'}$	Anschaffungskosten für die Kondensatoren
$K_B$	Betriebskosten
$K$	Gesamtkosten
$w$	gesamte Windungszahl der Drossel
$w_s$	Windungszahl pro Sektor der Drossel
$tg\delta$	Verlustwinkel der Kondensatoren

Tabelle I: Konstanten

	1	2	3	4
W	$1,23 \cdot 10^6$ Ws	$1,23 \cdot 10^6$ Ws		
B <sub>m</sub>	17000 G	17000 G		
$\gamma_{Fe}$	0,92	0,92		
$\gamma_{Cu}$	0,15	0,15		
$\gamma_1$	$7,7 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{cm^3}$	$7,7 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{cm^3}$		
$\gamma_2$	$8,9 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{cm^3}$	$8,9 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{cm^3}$		
$v_{Fe}$	0,32 W/kg	0,32 W/kg		
tg $\delta$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$		
k <sub>1</sub>	6.-- DM/kg	6.-- DM/kg		
k <sub>2</sub>	18.--DM/kg	18.--DM/kg		
k <sub>3</sub>	7.-- DM/Ws	5,25 DM/Ws <sup>1)</sup>		
Gesamtbetriebszeit	10 Jahre	10 Jahre		
Betriebsdauer pro Jahr	4000 Stdn.	4000 Stdn.		
k <sub>4</sub>	2,7.-- DM/W	2,7.-- DM/W <sup>2)</sup>		

1) Unter Ausnutzung der 10 % Spannungsreserve der nach VDE 0560 ausgelegten Kondensatoren

2) Entspricht: 80.-- DM/kW. Jahr Leistungs-Maximumgebühr  
0,048 DM/kWh Arbeitspreis

Tabelle II: Hilfswerte

$$a) X = \frac{1}{4x} \sqrt{1 + \frac{x^2}{2} (1 + x)}$$

x = 0,1    0,2    0,3    0,35    0,4    0,5    0,6    0,7

---

X = 2,75    1,52    1,11    0,993    0,91    0,80    0,72    0,68

$$b) B = \sqrt{\frac{1,15 \cdot \gamma_2 (k_2 + k_4 \cdot 1,19 \frac{6^2}{\gamma_2})}{0,9 \cdot \gamma_1 (k_1 + k_4 \cdot \nu_{Fe})}} + \frac{1}{16 \gamma_{Cu}} - \sqrt{\frac{1}{16 \gamma_{Cu}}}$$

mit den Konstanten der Spalten 1 und 2:

G = 1,5            2,0            2,5            3,0             $\frac{A}{\text{mm}^2}$

---

B = 2,13            2,58            3,08            3,51

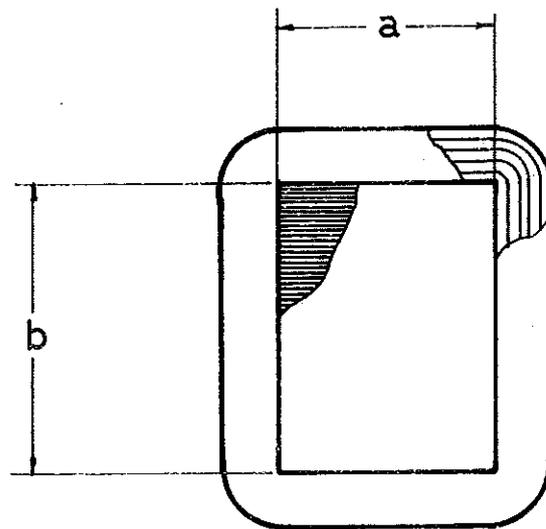
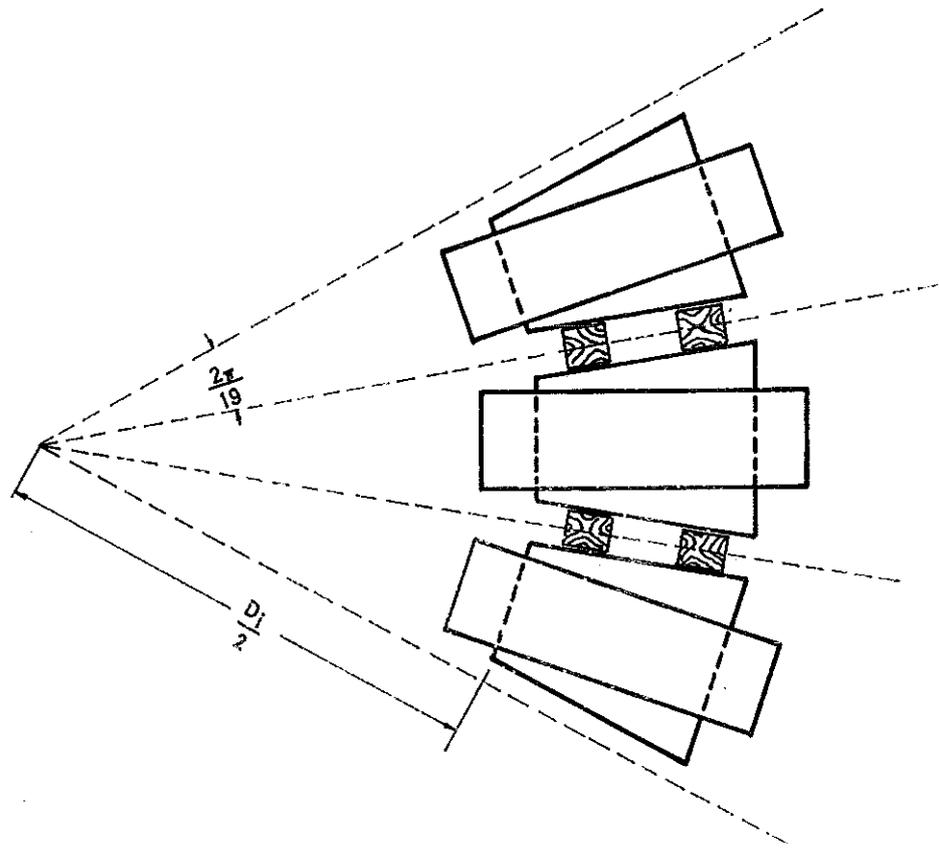
c)  $A = \frac{2WX}{\pi \gamma_{Fe} \cdot B_m \cdot G}$  mit den Konstanten der Spalten 1 und 2:

	G = 1,5	2,0	2,5	3,0	$\frac{A}{\text{mm}^2}$
x = 0,2	0,507	0,380	0,304	0,254	$\cdot 10^8 \text{ cm}^4$
0,3	0,370	0,278	0,222	0,185	$\cdot 10^8 \text{ cm}^4$
0,4	0,304	0,228	0,182	0,152	$\cdot 10^8 \text{ cm}^4$
0,5	0,267	0,200	0,160	0,134	$\cdot 10^8 \text{ cm}^4$
0,6	0,240	0,180	0,144	0,120	$\cdot 10^8 \text{ cm}^4$

Tabelle III: Abmessungen, Gewichte und Kosten

	G	1,5	2,0	2,5	3,0	A/mm <sup>2</sup>
x = 0,2	a	113	114	116	117	cm
	b	162	172	185	195	cm
	D <sub>i</sub>	272	227	195	173	cm
	G <sub>Fe</sub>	153	146	145	144	t
	G <sub>Cu</sub>	49	35,8	27,5	22,4	t
	K	3,35	3,10	3,36	3,47 · 10 <sup>6</sup>	DM
x = 0,3	a	105	105	108	110	cm
	b	145	160	160	172	cm
	D <sub>i</sub>	255	209	186	162	cm
	G <sub>Fe</sub>	120	115	111	112	t
	G <sub>Cu</sub>	39	28,2	22,2	17,8	t
	K	3,08	3,07	3,12	3,20 · 10 <sup>6</sup>	DM
x = 0,4	a	99	100	103	103	cm
	b	140	152	158	171	cm
	D <sub>i</sub>	241	200	174	152	cm
	G <sub>Fe</sub>	103	99	98	98	t
	G <sub>Cu</sub>	33,8	24,4	18,8	15,2	t
	K	3,15	3,10	3,13	3,21 · 10 <sup>6</sup>	DM
x = 0,5	a	96	98	99	100	cm
	b	137	142	157	165	cm
	D <sub>i</sub>	232	200	167	148	cm
	G <sub>Fe</sub>	94	91	90	89	t
	G <sub>Cu</sub>	30,5	22,2	17	13,9	t
	K	3,30	3,26	3,29	3,43 · 10 <sup>6</sup>	DM

Abb. 1

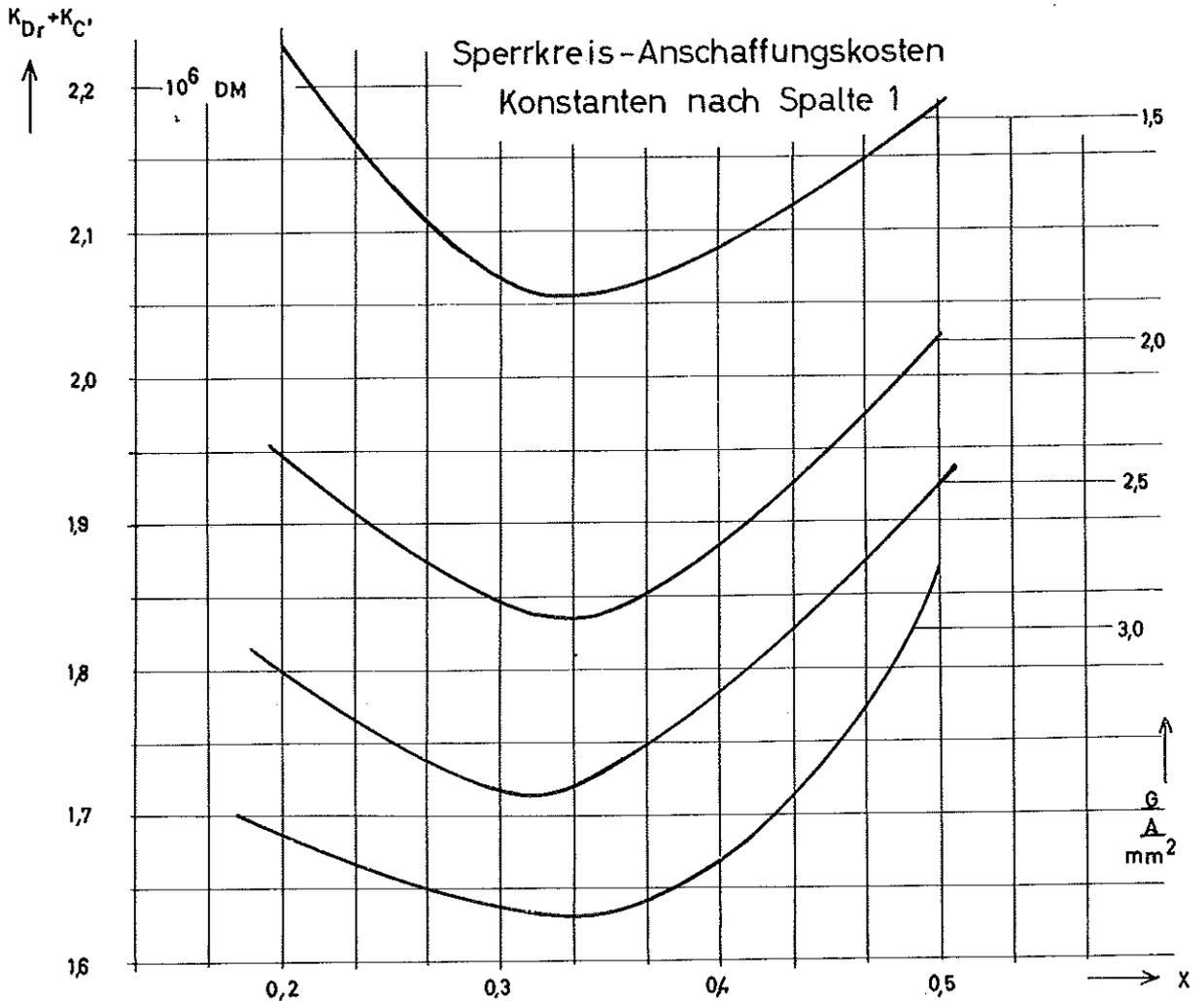
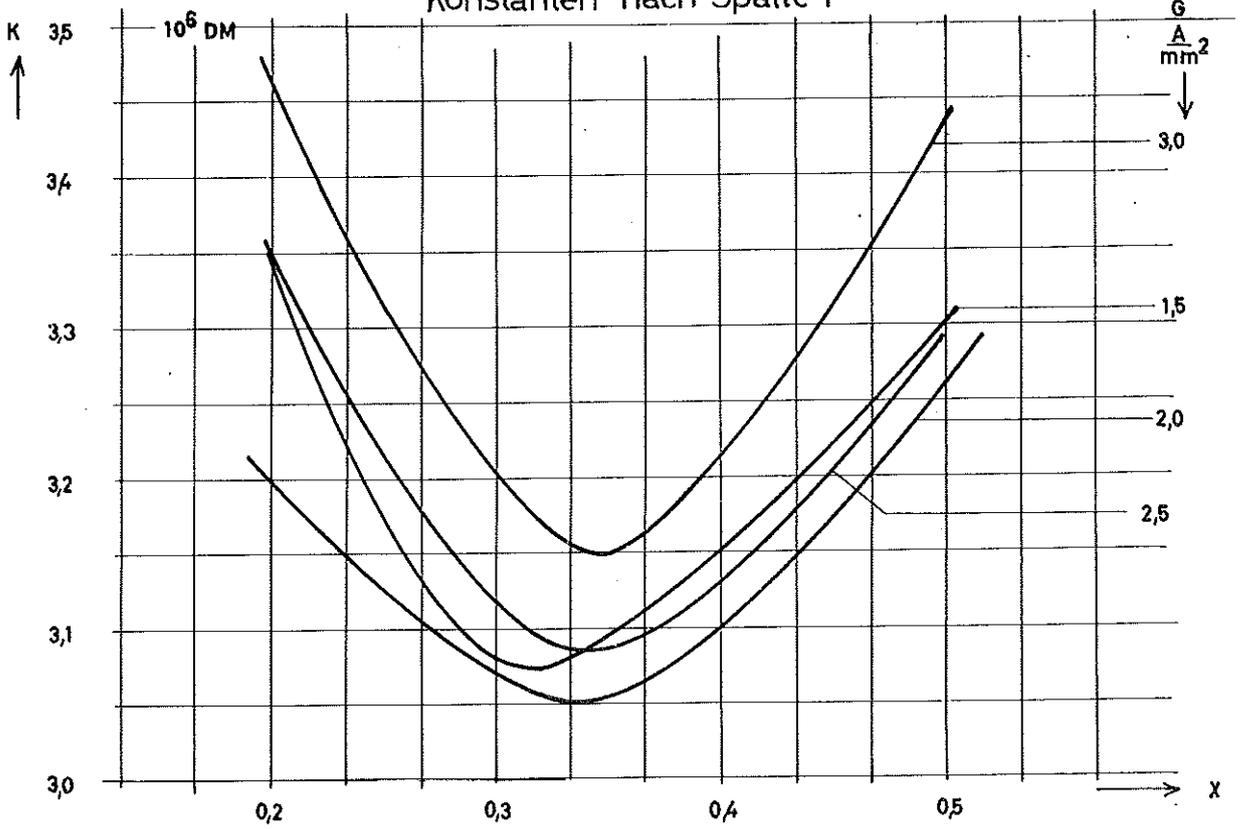


695/6.4

<b>DESY</b>	gez.:	Datum	Name	Gruppe:	M5
	gepr.:	4.1950	kn	Zchg. No.:	2a
	gen.:			Blatt No.:	3
				Ersatz für:	2
Maßstab: 1: 250	<b>Summendrossel</b> für Magnetstrom-Versorgung			Ersetzt durch:	
				x ausf.:	
				ausgef. von:	
				Auftrag No.:	

Sperrkreis - Gesamtkosten

Konstanten nach Spalte 1

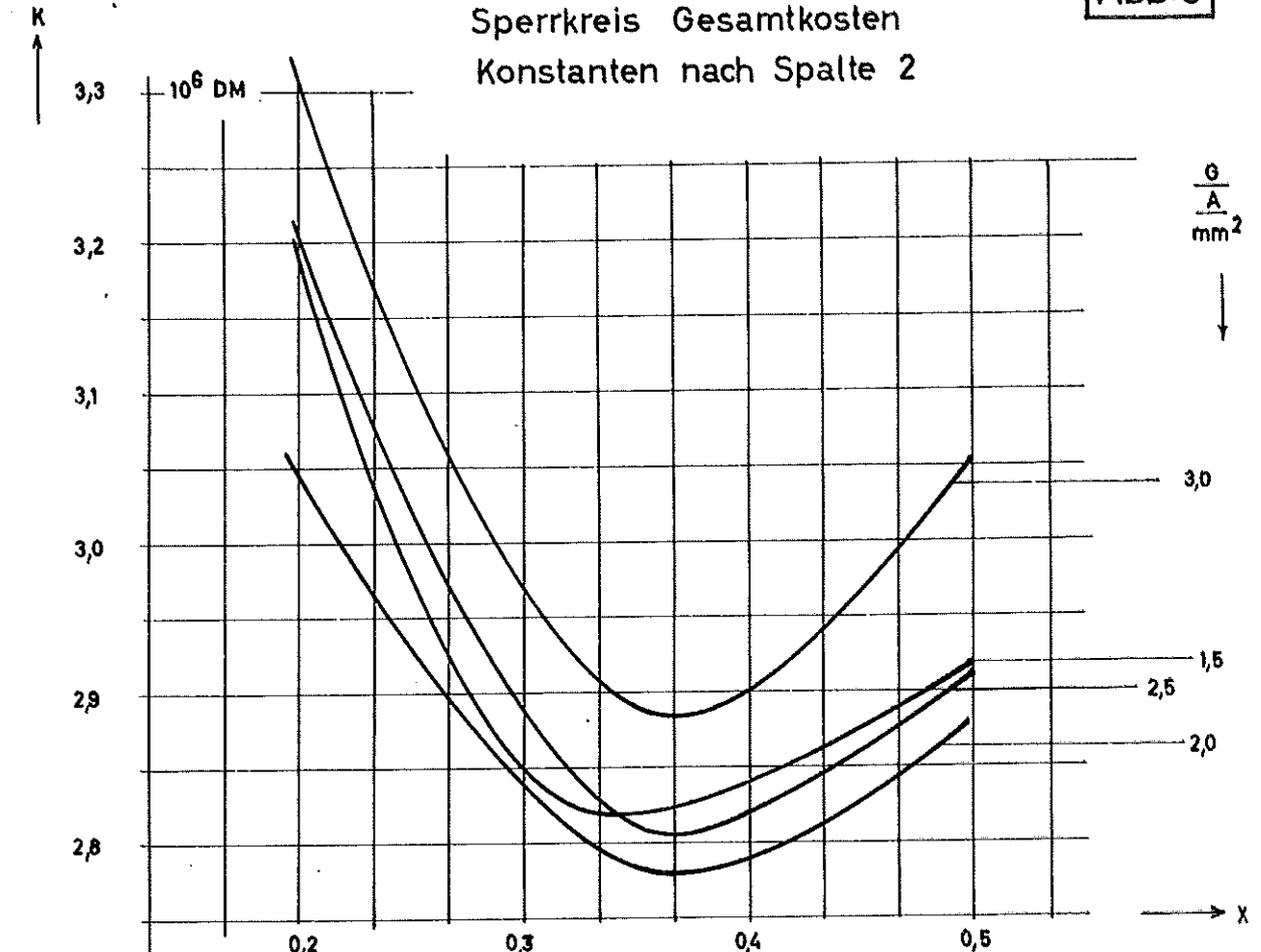


695/9.4

DESY/M6/ 2/7 / 7.58

Abb.3

Sperrkreis Gesamtkosten  
Konstanten nach Spalte 2



Sperrkreis Anschaffungskosten  
Konstanten nach Spalte 2

