

## Nf-Ausgangsübertrager für Röhren-Endstufen

### Ersatzschaltung

Der Ausgangsübertrager besteht aus Eisenkern und Wicklungen. Die Wicklungen weisen Drahtwiderstände und Induktivitäten auf. Die Querinduktivität stellt den Weg für den Magnetisierungsstrom dar. Die Streuinduktivitäten gehören zu den Einzelwicklungen. Ersatzschaltungen zeichnet man für die auf das Übersetzungsverhältnis 1 : 1 umgerechneten Übertrager. Bild 1 veranschaulicht Ersatzschaltungen des Einfach- und Gegentakt-Übertragers. Dort sind Wicklungskapazitäten und Eisen-Verlustwiderstand vernachlässigt, was meist zulässig ist.

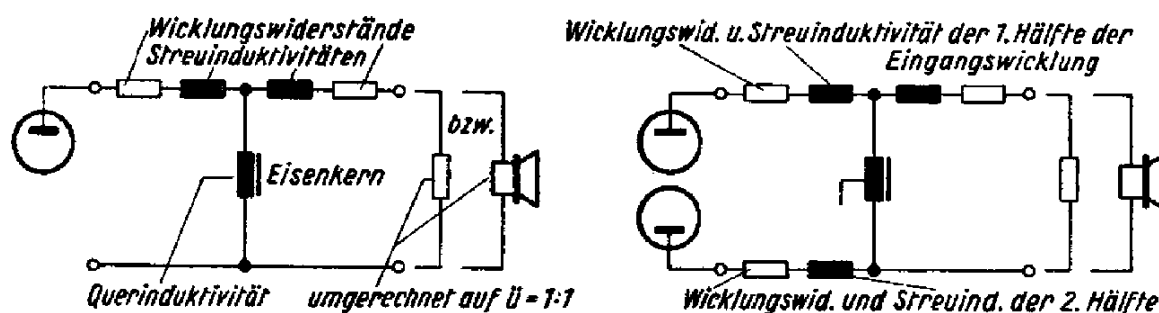


Bild 1

### Eisenquerschnitt $Q_E$

Der Eisenquerschnitt muß an die Übertrager-Eingangsleistung  $N_1$  angepaßt werden. Für  $Q_E$  in  $\text{cm}^2$  und  $N_1$  in W bzw. VA gilt für eine untere Grenzfrequenz von 50 Hz, einen Felddichte-Scheitelwert im Eisen von 4 kg und eine Stromdichte von  $0,5 \text{ A/mm}^2$ :

$$Q_E \approx \sqrt{4N_1} \quad (\text{Bild 2})$$

oder, wenn man die untere Grenzfrequenz  $f_u$  (in Hz) besonders berücksichtigen möchte:

$$Q_E \approx \sqrt{200N_1 : f_u}$$

### Felddichte-Scheitelwert $\mathfrak{B}$

Mit Rücksicht auf sonst zu hohe Verzerrungen darf diese Felddichte (Induktion)  $\mathfrak{B}$  im Eisen nicht zu groß gewählt werden. Vor allem für Übertrager ohne Vormagnetisierung des Eisens ist der Wert der Felddichte mitbestimmend für die Windungszahl der Eingangswicklung.

Für nicht gegengekoppelte Übertrager sollten Felddichte-Scheitelwerte von etwa 4000 Gauß nicht wesentlich überschritten werden. Für gegengekoppelte Übertrager sind 6000 Gauß bis ungefähr 8000 Gauß zulässig.

### Die Querinduktivität $L_q$

$L_q$  wird in H für den in sich geschlossenen, nicht vormagnetisierten Eisenkern durch Quadrat der Eingangswindungszahl  $w_1$  Eisenquerschnitt  $Q_E$  in  $\text{cm}^2$ , Eisenweglänge des Feldes  $l_E$  in cm und relative Permeabilität des Eisens  $\mu$  (meist mit 700 angenommen; siehe zu fehlender Vormagnetisierung im übrigen Bild 5) so bestimmt:

$$L_q = w_1^2 \cdot 0,4\pi \frac{Q_E \cdot 10^{-8}}{l_E} \cdot \mu = w_1^2 \cdot L_0$$

Luftspalt und Vormagnetisierung vermindern die Induktivität  $L_q$ , was man durch den Faktor  $\gamma$  ausdrückt, der zu  $L_0$  hinzukommt. Also gilt allgemein für Luftspalt und/oder Vormagnetisierung :

$$L_q = w_1^2 \cdot L_0 \cdot \gamma$$

Darin bedeuten  $L_0$ , wofür man auch das Formelzeichen  $A_L$  findet, die Induktivität ohne Vormagnetisierung bezogen auf eine Windung („Induktivitätskonstante“) und  $\gamma$  den Reduktionsfaktor, der den Einfluß des Luftspaltes und der Vormagnetisierung berücksichtigt (Bild 3).

Für den nicht vormagnetisierten Übertrager gilt

$$\gamma = \frac{1}{1 + \mu \cdot \delta / l_E} = \frac{1}{1 + \mu / \alpha}$$

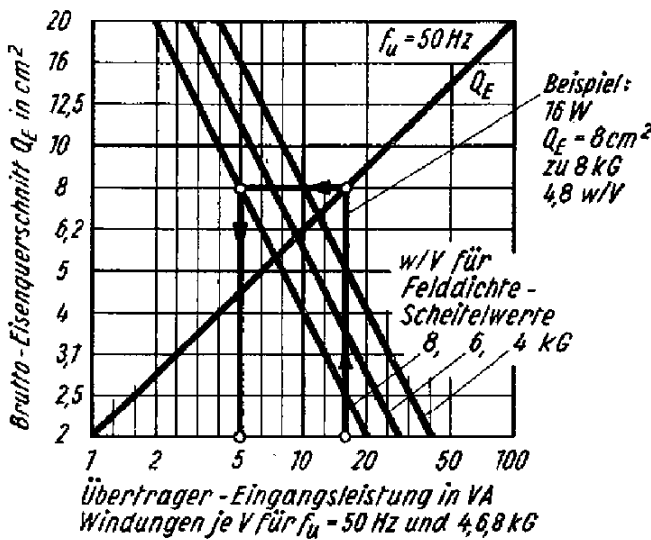


Bild 2

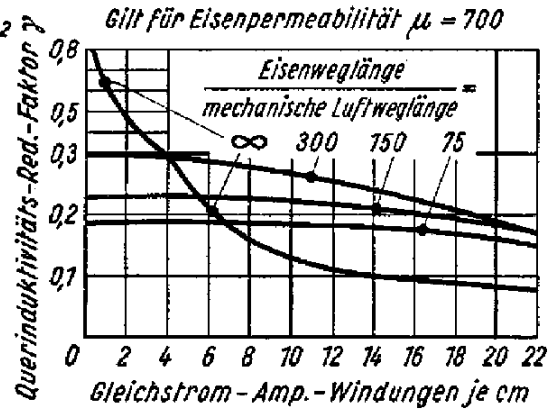


Bild 3

Hierin bedeutet  $\delta$  die „wirksame Luftspalt-Weglänge“. Die so bezeichnete Länge ist etwas geringer als die tatsächliche (mechanische) Länge, da sich an den Luftspaltändern ein Streufeld ausbildet. Dieses verbreitert für den Luftspalt den Feldquerschnitt und vermindert

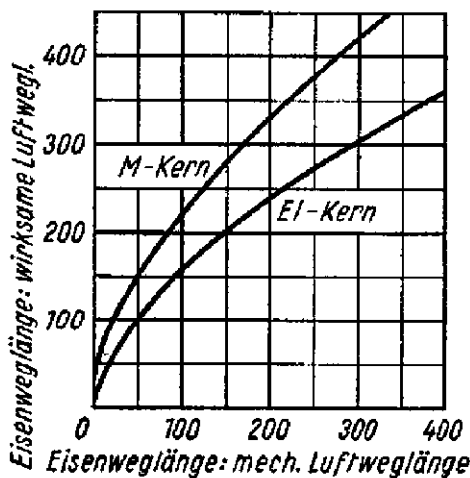


Bild 4

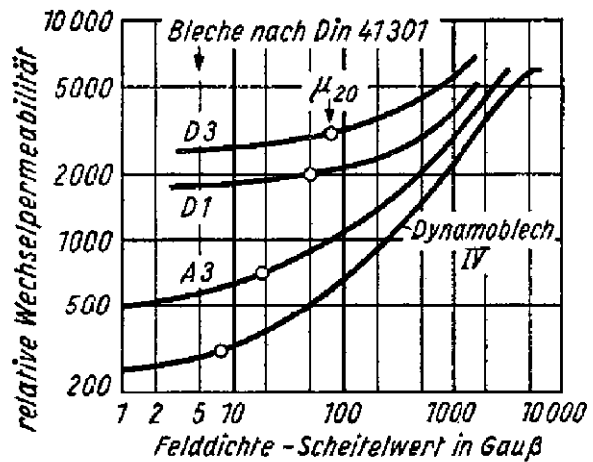


Bild 5

so den magnetischen Widerstand des Luftspaltes. Dem geringeren magnetischen Luftspaltwiderstand kann man unter Annahme des dem Eisenquerschnitt gleichbleibenden Luftspaltquerschnittes eine entsprechend geringere Luftspalt-Weglänge zuordnen. Damit ergibt sich an Stelle des durch die (mechanischen) Abmessungen gegebenen Längenverhältnisses ein größeres wirksames Verhältnis  $\alpha$  — Eisenweglänge geteilt durch die wirksame Luftweglänge (Bild 4), das der weiteren Rechnung zugrunde zu legen ist.

### Eingangswindungszahl $w_1$

Für nichtvormagnetisiertes Eisen berechnen wir — bezogen auf 1 Volt Eingangswchselspannung (Scheitelwert) — aus dem Eisenquerschnitt  $Q_E$ , der Felddichte  $\mathfrak{B}$  im Eisenkern und der tiefsten Frequenz  $f_u$  (meist 50 Hz) mit:

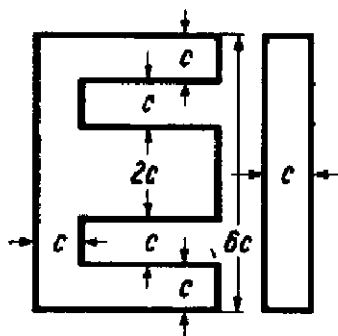
$$\frac{w_1}{U_1} = \frac{10^8}{2\pi f_u \cdot \mathfrak{B} \cdot Q_E} = \frac{16 \cdot 10^6}{f_u \cdot \mathfrak{B} \cdot Q_E} \text{ oder}$$

$$\text{für } \mathfrak{B} = 4 \dots 8 \text{ kg und für } f_u = 50 \text{ Hz} \quad \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{80 \dots 40}{Q_E} \quad (\text{Bild 2})$$

Für vormagnetisiertes Eisen ist die Querinduktivität  $L_q$  maßgebend: Der zugehörige induktive Widerstand soll für die tiefste Frequenz  $f_u$  das 0,7...1,3fache des an der Röhre geltenden Wertes des Belastungswiderstandes  $R_a$  betragen. Dem entspricht:

$$w_1 \geq \sqrt{\frac{(0,7 \dots 1,3) R_a \Omega}{2\pi f_u \cdot L_o \cdot \gamma}} \approx \sqrt{\frac{(100 \dots 200) R_a \text{ k}\Omega}{f_u \cdot L_o \cdot \gamma}}$$

Die Eisenweglänge gilt bei zwei parallel geschalteten Eisenwegen, wie sie beim E-Schnitt (Bild 6) vorhanden sind, nur für einen Weg. Die Luftspalt-Weglänge ist beim M-Schnitt nur in einer Luftstrecke gegeben. Beim EI-Schnitt liegen zwei Luftspalte in Reihe. Hier ist also der Abstand zwischen beiden Teilen des Eisenkernes doppelt zu rechnen.



Fensterfläche  $3c^2$   
 Eisenweglänge  $12c$   
 Eisenquerschnitt;  
 $4c^2$  oder  $5c^2$   
 Induktivität je Windung in nH  
 mit  $c$  in cm;  
 $4,2c$  oder  $6,3c$

Bild 6

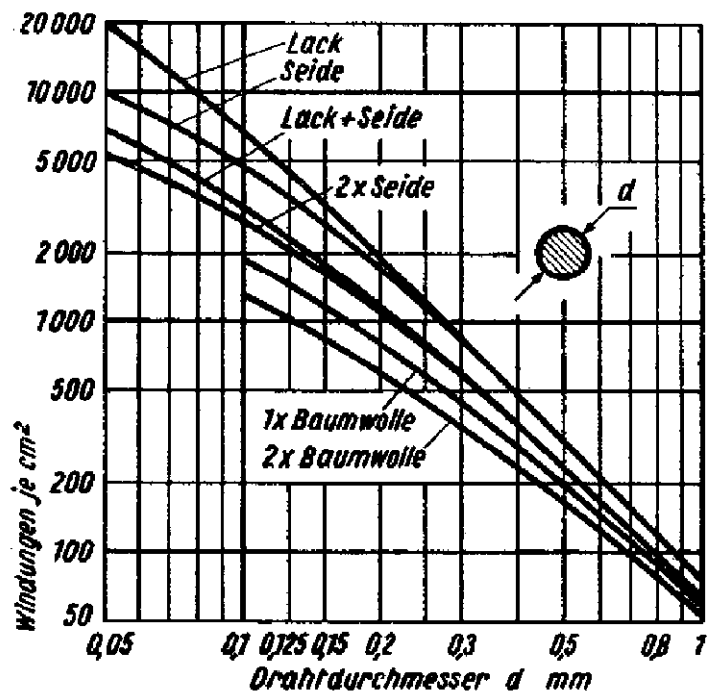


Bild 7

Eisen- kern	Maß e	$l_E$	$Q_E$	$\frac{\mu_o \cdot Q_E}{l_E}$	$\frac{L_o}{(\mu = 700)}$	$F_f$	Windungslänge cm			Kühl- lende Ober- fläche	Lei- stung 50 Hz	Wdg./V Scheitelwert zu $f_u = 50$ Hz	
El	mm	cm	cm <sup>2</sup>	nH	$\mu$ H	cm <sup>2</sup>	mittl.	oben	unten	cm <sup>2</sup>	VA	4 kG	8 kG
<b>48</b>	8	9,6	2,6	3,4	2,4	1,9	9,6	11,2	8,0	84	1,7	30	15
<b>54</b>	9	10,7	3,2	3,8	2,7	2,4	10,8	12,5	9,0	107	2,5	25	12
<b>60</b>	10	12,0	4,0	4,2	2,9	3,0	12,0	14,0	10,0	132	4	20	10
<b>66</b>	11	13,2	4,9	4,6	3,2	3,6	13,2	15,3	11,0	160	6	16	8
<b>78a</b>	13	15,6	6,8	5,5	3,8	5,1	15,6	18,0	13,1	223	11	12	6
<b>78b</b>	13	15,6	10,1	8,3	4,4	5,1	18,2	20,6	15,7	260	16	8	4
<b>84a</b>	14	16,8	7,8	5,9	4,1	5,9	17,0	19,5	14,5	295	15	10	5
<b>84b</b>	14	16,8	11,7	8,9	6,2	5,9	19,8	22,3	17,3	330	22	6,8	3,4

### Windungszahl $w_2$ der Ausgangswicklung

Der Widerstand wandelt sich entsprechend dem Quadrat des Windungszahlenverhältnisses. Somit ergibt sich die Windungszahl  $w_2$  der Ausgangswicklung aus der Gesamtwindungszahl  $w_1$  der Eingangswicklung, dem für die Röhrenseite geltenden Belastungswiderstand (Außenwiderstand)  $R_a$  und dem an die Ausgangswicklung angeschlossenen Belastungswiderstand (Lautsprecherwiderstand)  $R_L$  zu:

$$w_2 = w_1 \cdot \sqrt{\frac{R_L}{R_a}}$$

### Drahtdurchmesser

Infolge des Anoden-Gleichstromes ist die Stromdichte in der Eingangswicklung größer als in der Ausgangswicklung. Das gilt vor allem für A-Betrieb. Bei diesem kann es von Vorteil sein, der Eingangswicklung den größeren Teil der Fensterfläche zuzuordnen.

Im übrigen wird man für Eingangs- und Ausgangswicklung ungefähr gleiche Teile der Fensterfläche vorsehen.

Für die Drahtstärke der einzelnen Wicklung gilt mit  $d$  Drahtdurchmesser in mm,  $\varepsilon$  Bruchteil der Fensterfläche, wie er für die Wicklung vorgesehen ist,  $F_f$  Fensterfläche in cm<sup>2</sup> und  $w$  die Windungszahl der Wicklung

$$d = (0,9 \dots 1,1) \cdot \sqrt{\frac{50 F_f}{w} \cdot \varepsilon}$$

0,9 gilt für Wicklungen, an denen hohe Spannungen herrschen, 1,1 für dickdrähtige Wicklungen, zu denen nur geringe Spannungen gehören.

Eine gewisse Kontrolle für die richtige Wahl der Drahtstärke läßt sich daraus gewinnen, daß man aus Strom und Querschnitt die Stromdichte berechnet. Diese darf für kleine

Übertrager etwa  $2,5 \text{ A/mm}^2$  und für große Übertrager ungefähr  $1,5 \text{ A/mm}^2$  nicht wesentlich übersteigen. Eine weitere Kontrolle läßt sich durch Vergleich der reinen Wicklungsfläche mit den Angaben in Bild 7 durchführen.

### Wicklungsausführung und Streuinduktivitäten

Je weiter man mit dem Übertragungsbereich an die obere Grenze des Hörbereiches herankommen will, desto geringer muß man die Streuinduktivitäten machen. Das erreicht man durch sinnvolles Aufteilen, Zusammenschalten und Ineinanderschachteln der einzelnen Wicklungen. Insbesondere wird man Wicklungen mit verhältnismäßig wenigen Windungen doppelt oder vierfach ausführen und die Teile parallel schalten. Die eine Wicklung wird hierbei innen und die andere außen angeordnet.

Bild 8 gibt ein Beispiel für eine erprobte Wicklung, die auf zwei Kammern des Spulenkörpers verteilt ist. Das Bild 8 bezieht sich auf das Rechenbeispiel für den Gegentakübertrager. Bei dieser Wicklung sind nicht nur die Streuinduktivitäten, sondern auch die schädlichen Wicklungskapazitäten so klein wie möglich gehalten.

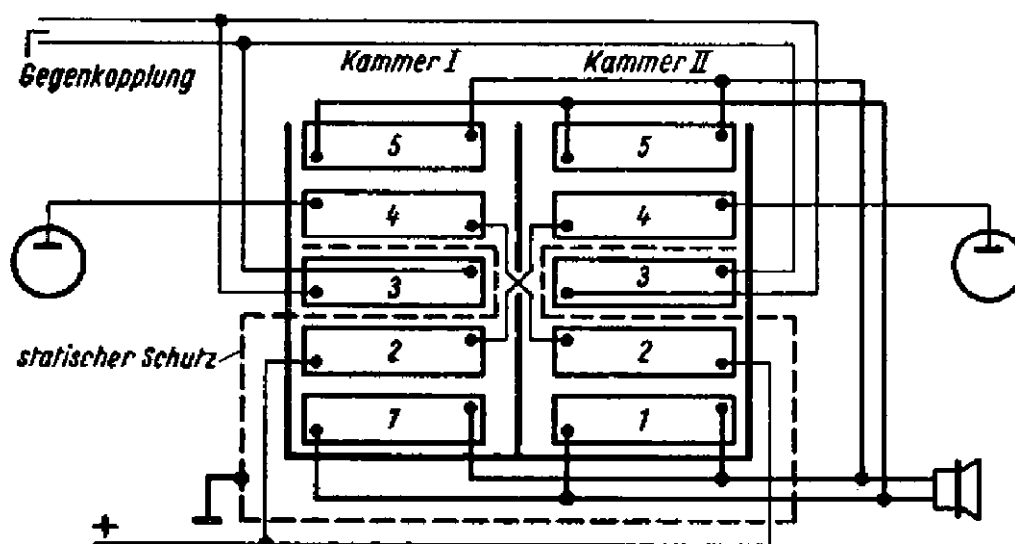


Bild 8

### Beispiel: Ausgangsübertrager für Eintakt-Endstufe

Der Übertrager sei für eine EL84 zu bemessen. Für diese gilt laut Röhrendaten  $R_a = 5,2 \text{ k}\Omega$ ,  $I_a = 48 \text{ mA}$ ;  $N_a = 5,7 \text{ W}$ . Der Lautsprecherwiderstand sei mit  $5 \Omega$  in Rechnung zu setzen. Der Eisenkern-Querschnitt muß zu  $5,7 \text{ W}$  — gemäß Bild 2 — zu  $f_u = 50 \text{ Hz}$  etwa  $4,8 \text{ cm}^2$  betragen. Wir wählen hierzu den Eisenkern El 66 mit  $4,9 \text{ cm}^2$  und Eisenweglänge  $13,2 \text{ cm}$  (siehe im übrigen die Tabelle).

Da es sich um eine Eintakt-Endstufe handelt, ist der Eisenkern vormagnetisiert und muß mit einem Luftspalt ausgeführt werden. Wir wählen das Verhältnis „Eisenweglänge: wirksame Luftweglänge“ mit 150. Als Gleichstromvormagnetisierung nehmen wir probeweise  $20 \text{ AW/cm}$  an. Aus der Tabelle erhalten wir zu El 66 die Induktivitätskonstante  $L_o = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ H}$ . Davon gilt wegen der Vormagnetisierung (Bild 3) das 0,2-fache.

Hieraus errechnen wir (für  $f_u = 50$  Hz,  $\omega_u = 314$  und  $\omega_u \cdot L_q \approx 1,1 R_a$ ) die

$$\text{Eingangswindungsanzahl } w_1 = \sqrt{\frac{1,1}{314} \cdot \frac{5200}{3,2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}}} \approx 5350$$

Mit dieser Windungsanzahl und dem gegebenen Anodenruhestrom rechnen wir die Gleichstromvormagnetisierung nach und erhalten nur  $5,35 \cdot 48:13,2 \approx 19 \text{ AW/cm}$  anstelle der angenommenen  $20 \text{ AW/cm}$ . Somit ergibt sich eine etwas höhere Induktivität.

Das Übersetzungsverhältnis folgt aus:  $\sqrt{5200:5} \approx 32:1$ . Hiermit gewinnen wir aus der Eingangswindungsanzahl die Ausgangswindungsanzahl zu  $5350:32 \approx 170$ .

Diese Wicklung wollen wir doppelt ausführen, um die Streuung herabzusetzen. Das bedeutet  $2 \times 170$  Windungen. Es werden 170 Windungen unter  $w_1$  und 170 Windungen über  $w_1$  gewickelt. Beide Wicklungshälften werden parallel geschaltet.

Wir berechnen nun die Drahtdurchmesser. Für die Eingangswicklung wählen wir in der Formel wegen der relativ hohen Spannung den Faktor 0,9. Für die Ausgangswicklung ist die Spannung wesentlich geringer, weshalb wir hier den Faktor 1,1 benutzen. Wir wollen von dem gesamten Wickelraum 60% für die Eingangswicklung und 40% für die Ausgangswicklung vorsehen ( $\varepsilon_1 = 0,6$ ,  $\varepsilon_2 = 0,4$ ). Hiermit ergibt sich zu der Fensterfläche  $3,6 \text{ cm}^2$ :

$$\text{Eingangswicklung: } d_1 = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{50 \cdot 3,6}{5350} \cdot 0,6} \approx 0,14 \text{ mm};$$

$$\text{Ausgangswicklung: } d_2 = 1,1 \cdot \sqrt{\frac{50 \cdot 3,6}{320} \cdot 0,4} \approx 0,36 \text{ mm}.$$

### Beispiel: Ausgangsübertrager für Gegentakt-Endstufe

Der Übertrager sei für zwei EL 84 zu bemessen. Die Endstufe soll im A-Betrieb arbeiten. Anoden- und Schirmgitterspannungen betragen 250 V. Hierzu gehören: Anodenruhestrom 42 mA; Höchstwert der Wechselspannung etwa 440 V (für beide Röhren zusammen); gesamte Wechselstromleistung 9,2 W;  $R_a$  je Röhre  $5 \text{ k}\Omega$ . Der Lautsprecherwiderstand ist mit  $5 \Omega$  in Rechnung zu setzen.

Zu den 9,2 W finden wir in Bild 2 einen Mindestquerschnitt des Eisenkerns von  $6 \text{ cm}^2$ . Hier soll ein Eisenkern EI 78a gewählt werden. Dessen Eisenkernquerschnitt beträgt  $6,8 \text{ cm}^2$ . Wir wollen für das Eisen einen Felddichte-Höchstwert von 8000 Gauß zulassen. Dazu gehören gemäß Bild 2 für den gewählten Eisenkern etwa 5,5 Windungen je Volt. Die Spannung beträgt 440 V. Somit bekommen wir als Windungsanzahl der gesamten Eingangswicklung  $440 \cdot 5,5 \approx 2400$ .

Der Abschlußwiderstand je Röhre ist mit  $5 \text{ k}\Omega$  gegeben. Das entspricht  $10 \text{ k}\Omega$  für die gesamte Eingangswicklung. Auf diesen Wert muß der Lautsprecherwiderstand von  $5 \Omega$  gewandelt werden. Das ergibt das Übersetzungsverhältnis von  $\sqrt{10000:5} \approx 45:1$  und die Windungsanzahl der Ausgangswicklung mit  $2400:45 \approx 54$ .

Der Übertrager soll außer Eingangswicklung und Ausgangswicklung eine Gegenkopplungswicklung erhalten. Als Höchstwert der Gegenkopplungsspannung ist 1 V verlangt. Dazu gehört eine Windungsanzahl von  $5,5 \approx 6$

Nun die Drahtdurchmesser: Für die Eingangswicklung wählen wir den Faktor 0,9, für die anderen Wicklungen den Faktor 1,1. Die Eingangswicklung umfasse 55% des Wickelraumes, die Ausgangswicklung 40% und die Gegenkopplungswicklung 5%. Hierzu gilt mit  $F_f = 5,1 \text{ cm}^2$  (aus Tabelle), wovon wir (wegen der Wicklung in zwei Kammern) nur zu  $4 \text{ cm}^2$  ansetzen wollen:

Drahtdurchmesser für Eingangswicklung

$$= 0,9 \cdot \sqrt{\frac{50 \cdot 4}{2400}} \cdot 0,55 \approx 0,21 \text{ mm}; \text{ wir wählen } 0,2 \text{ mm}.$$

Drahtdurchmesser für Ausgangswicklung: Die Ausgangswicklung wird aus vier parallel zu schaltenden Teilen gebildet. Das bedeutet  $4 \times 54 = 216$  Windungen. Also Drahtdurchmesser

$$= 1,1 \cdot \sqrt{\frac{50 \cdot 4}{216}} \cdot 0,4 \approx 0,61 \text{ mm}; \text{ wir wählen } 0,6 \text{ mm}.$$

Drahtdurchmesser für Gegenkopplungswicklung: gewählt 0,1 mm (zwei Wicklungsteile parallel).

Wickelvorschrift. Je Kammer ist zu wickeln:

Isolation	1 × LPP 0,1
Wicklung 1	54 Wdg. 0,6 CuL
Isolation	2 × LPP 0,1
Wicklung 2	600 Wdg. 0,2 CuL nach jeder Lage 1 × LPP 0,06. In Kammer 1 rechts herum, in Kammer 2 links herum wickeln.
Isolation	2 × LPP 0,1
stat. Schutz	1 Lage Cu-Folie 0,06 mm
Isolation	1 × LPP 0,1
Wicklung 3	9 Wdg. 0,1 CuL
Isolation	1 × LPP 0,1
stat. Schutz	1 Lage Cu-Folie 0,06 mm
Isolation	2 × LPP 0,1
Wicklung 4	600 Wdg. 0,2 CuL nach jeder Lage 1 × LPP 0,06. In Kammer 1 links herum, in Kammer 2 rechts herum wickeln.
Isolation	2 × LPP 0,1
Wicklung 5	54 Wdg. 0,6 CuL
Isolation	1 × LPP 0,1.

Wicklungen 1, 3 und 5 in beiden Kammern im selben Wickelsinn wickeln, Wicklungen 1 und 5 beider Kammern nach Bild 8 untereinander parallel schalten (Lautsprecherwicklung — 4 parallelgeschaltete Teile).

Wicklung 2 der linken Kammer in Reihe mit Wicklung 4 der rechten Kammer und Wicklung 2 der rechten Kammer in Reihe mit Wicklung 4 der linken Kammer. Enden der Wicklungen 4 werden an die Anoden, Anfänge der Wicklungen 2 werden zusammengeschaltet (Zuführung der Anodenspannung). Wicklungen 3 beider Kammern parallel geschaltet.