

Berechnung von Gegentakt-Ausgangsübertragern

VON DIPL.-ING. WULF ALEX

Die folgenden Berechnungen gelten für Ausgangsübertrager, deren Windungen entweder von keinem Gleichstrom durchflossen werden (Lautsprecherübertrager in 100-V-Netzen) oder bei denen sich die von Gleichstrom hervorgerufenen magnetischen Durchflutungen gegenseitig aufheben (Gegentakt-Übertrager). Vormagnetisierte Übertrager (z. B. in Eintakt-Endstufen) sind weitaus schwieriger und nur näherungsweise zu berechnen.

Zwar werden einige Vereinfachungen vorgenommen, die jedoch nicht den Kern der Sache, sondern nur Abweichungen vom idealen Verhalten der Bauelemente betreffen. So finden die Berechnungen von Dämpfung und Klirrfaktor keine Erwähnung, da sie den Rahmen eines Aufsatzes sprengen würden. Die Gleichungen werden einwandfrei abgeleitet (keine Faustformeln), und sie gelten gleichermaßen für Röhren- wie Transistorschaltungen.

Kerngröße

Gegeben seien der Scheitelwert P der zu übertragenden Leistung, der gleich dem Doppelten des Effektivwertes ist, sowie die untere Grenzfrequenz f . Ferner muß man sich einen Erfahrungswert für den Scheitelwert B der magnetischen Flußdichte vorgeben. Je niedriger die Flußdichte ist, desto geringer sind die vom Eisenkern verursachten Verzerrungen. Übliche Werte sind 4 bis 5 kG für Eintaktübertrager, 8 bis 10 kG für Gegentaktübertrager bei Verwendung von Dynamoblech IV. Für Schnittbandkerne aus Siliziumeisen mit magnetischer Vorzugsrichtung gelten die doppelten Werte.

Definitionsgemäß hängt die Flußdichte B mit dem elektrischen Strom i , der Windungszahl w , der Permeabilität μ und der Länge l der magnetischen Kraftlinien folgendermaßen zusammen

$$B = \mu \frac{i \cdot w}{l} \quad (1)$$

Die magnetischen Kraftlinien sollen vollständig im Eisen verlaufen, der Kern also keinen Luftspalt haben. Die Permeabilität μ wird in die Induktionskonstante $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am und die relative Permeabilität μ_r aufgeteilt

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2)$$

Die relative Permeabilität ist – leider – bei Eisen sehr stark von der Flußdichte oder Feldstärke des magnetischen Feldes abhängig und nimmt Werte zwischen etwa 500 und 5000 an. Daher ist jeder Übertrager strenggenommen ein nichtlineares Schaltelement.

Aus dem Induktionsgesetz erhalten wir eine zweite Gleichung zwischen elektrischen und magnetischen Größen

$$B = \frac{u}{2 \pi f \cdot w \cdot F} \quad (3)$$

mit dem Scheitelwert u der induzierten Spannung, die sinusförmig verlaufen soll, dem Eisenquerschnitt F und der Frequenz f . Durch Multiplikation der Gleichungen (1) und (3) erhalten wir

$$B^2 = \mu_0 \mu_r \frac{i \cdot u}{2 \pi f \cdot F \cdot l}$$

oder mit der Leistung P als Produkt von Strom und Spannung

$$B^2 = \mu_0 \mu_r \frac{P}{2 \pi f \cdot F \cdot l} \quad (4)$$

Nach den gesuchten Kernabmessungen aufgelöst ergibt sich daraus

$$F \cdot l = \mu_0 \mu_r \frac{P}{2 \pi f \cdot B^2} \quad (5)$$

Nochmals sei darauf hingewiesen, daß für Flußdichte und Leistung die Scheitelwerte einzusetzen sind. Aus einer Kerntabelle [1, 2] kann nach Lösen der Gleichung (5) sofort der geeignete Kern abgelesen werden. In Tabelle 1 sind gleich die Produkte $F \cdot l$ der Kerne aufgeführt, um die Arbeit zu erleichtern. Die Wahl eines größeren Kernes hat elektrisch nur Vorteile, nachteilig ist die Erhöhung von Gewicht, Raumbedarf und Preis.

Bei Sparübertragern (PPP) ist die in (5) einzusetzende Leistung P geringer als die vom Verstärker abgegebene Leistung P_v . Es gilt mit R_a als Außenwiderstand der Endstufe und R_L als Widerstand des Lautsprechers:

$$P = P_v \left(1 - \sqrt{\frac{R_L}{R_a}} \right) \quad (6)$$

Wichtig wird diese Korrektur, wenn Außenwiderstand und Lautsprecherwiderstand nur wenig voneinander abweichen.

Als Beispiel soll – auch für die weiteren Rechnungen – der bekannte 20-W-PPP-Verstärker mit zwei Röhren EL 34 in der Endstufe dienen. Der Scheitelwert der Leistung beträgt 40 W, die untere Grenzfrequenz 40 Hz. Für die relative Permeabilität wird ein Wert von 1000 angenommen, für den Scheitelwert der Flußdichte ein Wert von 10 kG. Eine Korrektur nach Gleichung (6) ist nicht erforderlich. Dann wird

$$F \cdot l = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{10^3 \cdot 40}{2 \pi \cdot 40 \cdot 1} \text{ in } \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{\text{VA}}{\text{s}^{-1} (\text{Vs/m}^2)^2}$$

$$F \cdot l = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$F \cdot l = 200 \text{ cm}^3$$

Ein Kern M 85 kommt mit 170 cm³ diesem Wert am nächsten, besser ist ein Kern M 102a. Als Schnittbandkern kommt die Größe SM 65 in Frage.

Wenn die nach (5) ausgerechneten Kerne vielleicht sehr reichlich dimensioniert erscheinen, so sei z. B. auf [3] hingewiesen. Dort wird ein 25-W-Verstärker von Telefunken beschrieben, dessen Übertrager einen Kern EI 150 besitzt. Eine Möglichkeit zur Verringerung der Übertragergröße bieten die Schnittbandkerne, die auch noch weitere Vorteile aufweisen.

Tabelle 1. Kerndaten (Normal- und Schnittbandkerne gleicher Nummer haben gleiche Abmessungen)

P_{eff} = größte übertragbare Leistung für:

I Normalkern, 20 Hz III Normalkern, 40 Hz
II Schnittbandkern, 20 Hz IV Schnittbandkern, 40 Hz

Kern	$F \cdot l$ cm ³	l/F 1/cm	h mm	Q_{ges} cm ²	P_{eff}			
					I W	II W	III W	IV W
M 42	16	6,4	26	1,7	0,8	3	1	6
M 55	41	4,2	33	2,7	2	8	4	15
M 65	75	3,2	38	3,9	3	15	7	25
M 74	118	2,6	44	5,2	6	24	12	50
M 85 a	164	2,4	48	5,3	8	30	15	60
M 102 a	255	2,2	60	7,9	12	50	25	100
M 102 b	380	1,5	60	7,9	19	75	40	160
EI 130 a	308	2,4	64	16,7	15	60	30	120
EI 130 b	392	1,9	64	16,7	20	80	40	160
EI 150 a	455	2,1	70	20,9	23	90	45	180
EI 150 b	560	1,7	70	20,9	28	110	55	220
EI 150 c	670	1,4	70	20,9	34	140	70	280
EI 170 a	790	1,6	85	33,7	40	160	80	320
EI 170 b	940	1,4	85	33,7	47	180	90	350
EI 170 c	1090	1,2	85	33,7	54	220	105	400

Primärinduktivität

Für eine Endstufe mit Ausgangsübertrager und Lautsprecher gilt bei tiefen Frequenzen eine Ersatzschaltung (Bild). Die Endstufe besteht aus einem idealen Generator G und einem Innenwiderstand R_i . Die Last setzt sich aus der Primärinduktivität L des Übertragers und dem Außenwiderstand R_a zusammen,



der gleich dem mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses \ddot{u} multiplizierten Widerstand des Lautsprechers ist. Da es sich hier um Wechselspannungen handelt, sind die Widerstände komplex zu nehmen. Wenn wir nach der Frequenz f fragen, bei der die Spannung am Lautsprecher um 3 dB gegenüber dem Wert bei mittleren Frequenzen abgenommen hat, erhalten wir

$$2\pi f = \frac{1}{L} \cdot \frac{R_i \cdot R_a}{R_i + R_a} \quad (7)$$

Bei Pentoden und Transistoren wird aus Verzerrungsgründen der Außenwiderstand klein gegen den Innenwiderstand gemacht. Dann vereinfacht sich die Gleichung zu

$$2\pi f = \frac{R_a}{L}$$

oder umgestellt

$$L = \frac{R_a}{2\pi f} \quad (8)$$

Den günstigsten Außenwiderstand entnimmt man den Datentabellen der Röhren oder Transistoren.

Für das Beispiel beträgt der günstigste Außenwiderstand 850 Ω . Mit einer unteren Grenzfrequenz von 40 Hz ergibt sich

$$L = \frac{850}{2\pi \cdot 40} \text{ H} = 3,4 \text{ H}$$

Selbstverständlich gibt es auch eine obere Grenzfrequenz, für deren Berechnung man die Ersatzschaltung noch durch die Streuinduktivität ergänzen muß. Diese kann man jedoch nicht genau vorherberechnen, da sie von verschiedenen Konstruktionsmerkmalen abhängt. Überdies möchte man wegen der Stabilität des Verstärkers die obere Grenzfrequenz so hoch wie möglich legen. Dafür gelten folgende Regeln: Großer Kern besser als kleiner, Kernmaterial mit magnetischer Vorzugsrichtung besser als Dynamoblech, Mantelwicklung besser als Scheibenwicklung, Verschachtelung von Primär- und Sekundärwicklung besser, aber auch aufwendiger als einfache Wicklungsweise (bei Sparübertragern ist Verschachtelung automatisch gegeben).

Windungszahlen

Aus der Primärinduktivität und den Kerneigenschaften ergibt sich die Primärwindungszahl w_1

$$w_1^2 = \frac{L \cdot l}{\mu_0 \mu_r \cdot F} \quad (9)$$

Die Werte l/F sind ebenfalls aus Tabelle 1 zu ersehen.

Aus dem von der Schaltung geforderten Außenwiderstand R_a und dem Widerstand R_L des Lautsprechers (meist 4, 8 oder 16 Ω) kann das Übersetzungsverhältnis berechnet werden, das gleich dem Verhältnis der Windungszahlen ist:

$$\ddot{u} = \frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{R_a}{R_L}}$$

Durch Umstellen ergibt sich die Sekundärwindungszahl w_2

$$w_2 = w_1 \sqrt{\frac{R_L}{R_a}} \quad (10)$$

Im Beispiel beträgt der Außenwiderstand 850 Ω , der Lautsprecherwiderstand 16 Ω , dann ergeben sich für einen Kern M 85 folgende Windungszahlen

$$w_1^2 = \frac{3,4 \cdot 19,8}{1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 \cdot 9,15}$$

$$w_1 = 764$$

$$w_2 = 764 \cdot \sqrt{\frac{16}{850}}$$

$$w_2 = 104$$

PPP-Übertrager werden üblicherweise in Sparschaltung ausgeführt und in der Mitte geerdet, so daß sich die durchgehende Wicklung in vier Teile aufteilt: zuerst 330 Windungen, Lautsprecheranschluß, 52 Windungen, Mitte, 52 Windungen, Lautsprecheranschluß, 330 Windungen.

Drahtstärke

Der Wirkwiderstand der Wicklungen verursacht einen Verlust an elektrischer Leistung und damit verbunden eine Erwärmung des Übertragers. Man wird daher die Drahtdurchmesser möglichst groß wählen. Andererseits ist der Wickelraum durch die Abmessungen des Spulenkörpers beschränkt, so daß man sich hieraus den größtmöglichen Drahtdurchmesser ausrechnen kann.

Der für die gesamte Wicklung zur Verfügung stehende Querschnitt (Tabelle 1) muß mit dem Kupferfüllfaktor (etwa 0,5 bis 0,7) multipliziert werden, da ein beträchtlicher Teil durch Isolation und Hohlräume verlorengeht. Bei verschachtelten Wicklungen und vielen Anzapfungen ist der kleinere Füllfaktor zu nehmen. Weiter ist zu überlegen, wie der Querschnitt auf Primär- und Sekundärwicklung aufgeteilt werden soll. Bei Annahme konstanter Windungslänge erhält man die geringsten Kupferverluste, wenn die Querschnitte der Primär- und der Sekundärwicklung gleich groß sind. Wenn das Übersetzungsverhältnis größer als etwa 4 wird, ist eine solche Aufteilung aus praktischen Gründen oft unzuweckmäßig. Man wird in diesem Fall $2/3$ bis $3/4$ des gesamten Querschnittes für die Wicklung mit der höheren Windungszahl verwenden. Mit Q als Kupferquerschnitt der betreffenden Wicklung gilt für den Drahtdurchmesser d

$$d^2 = \frac{4Q}{\pi \cdot w} \quad (11)$$

Dieser Drahtdurchmesser ergibt sich allein aufgrund der Abmessungen des Spulenkörpers. Es ist noch zu prüfen, ob die größte zulässige Stromdichte nicht überschritten wird. Als Grenze wird allgemein ein Wert von 2,5 A/mm² angenommen. Höhere Werte bis etwa 4 A/mm² sind nur bei besonders guten Kühlungsverhältnissen erlaubt (kleine Übertrager, außenliegende Wicklung, keine heißen Bauteile in der Nähe des Übertragers, gut belüftetes Gehäuse). Für Musik- und Sprachübertragungen braucht der Übertrager nicht unbedingt auf Dauerbetrieb bei Spitzenlast ausgelegt zu werden. Die Stromdichte g in einer Wicklung ist

$$g = \frac{4i}{\pi d^2} \quad (12)$$

wobei i der Effektivwert des Stromes in dieser Wicklung ist. Er kann sich aus einem Gleichstrom- und einem Wechselstromanteil zusammensetzen.

Wenn diese Rechnung zeigt, daß die größte zulässige Stromdichte überschritten wird, muß entweder die Aufteilung des Gesamtquerschnittes auf Primär- und Sekundärwicklung geändert oder ein größerer Kern genommen werden.

Zum Kern M 85 des Beispiels gehört ein Spulenkörper mit einem Wicklungsquerschnitt von 530 mm². Mit einem Kupferfüllfaktor 0,7 (der Sparübertrager benötigt wenig Isolation) werden daraus 370 mm². Davon verwenden wir zwei Drittel für die Wicklung mit 2×330 Windungen, der zugehörige Drahtdurchmesser ist

$$d_1^2 = \frac{4 \cdot 0,67 \cdot 370}{\pi \cdot 660} \text{ mm}^2$$

$$d_1 = 0,69 \text{ mm}$$

Für den Sekundärabschnitt mit 104 Windungen folgt in gleicher Weise

$$d_2^2 = \frac{4 \cdot 0,33 \cdot 370}{\pi \cdot 104} \text{ mm}^2$$

$$d_2 = 1,2 \text{ mm}$$

Beim PPP-Übertrager wird die Wicklung nur von Wechselstrom durchflossen, dessen Effektivwert sich aus Leistung und Widerstand errechnet:

$$i^2 = \frac{P_{\text{eff}}}{R} \quad (13)$$

also in der Sekundärwicklung

$$i^2 = \frac{20}{16} \frac{VA}{V/A}$$

$$i = 1,12 \text{ A}$$

Damit ist die Stromdichte in diesem Teil der Wicklung

$$g = \frac{4 \cdot 1,12}{\pi \cdot 1,2^2} \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} = 0,91 \text{ A/mm}^2$$

Dieser Wert liegt weit unter der Grenze von 2,5 A/mm². Im Primärabschnitt ist die Stromdichte noch geringer:

$$i^2 = \frac{20}{850} \frac{VA}{V/A}$$

$$i = 0,15 \text{ A}$$

$$g = \frac{4 \cdot 0,15}{\pi \cdot 0,69^2} \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} = 0,4 \text{ A/mm}^2$$

Bei Sparübertragern ist zu beachten, daß im gemeinsamen Wicklungsteil bei reeller Last nur die Differenz des Primär- und des Sekundärstromes fließt. Diese Korrektur spielt jedoch nur bei Übersetzungsverhältnissen um 1 herum eine Rolle. Bei Nichtbeachtung liegt man in jedem Fall auf der sicheren Seite.

Isolation

Man muß grundsätzlich zwischen der Lagen- und der Wicklungsisolation unterscheiden. Der Scheitelwert der Spannung zwischen zwei sich berührenden Kupferlackdrähten soll 30 V nicht überschreiten. Sind zwei Lagen fortlaufend Windung neben Windung gewickelt, dann ist die Spannung zwischen der Anfangswindung der ersten Lage und der letzten Windung der zweiten Lage am größten. Diese Spannung ist

$$u = \frac{2 h \cdot \sqrt{R \cdot P}}{d \cdot n} \quad (14)$$

mit h als Höhe des Wickelraumes. Für die Leistung ist wieder der Scheitelwert einzusetzen, da für die Isolation der Scheitelwert der Spannung maßgebend ist.

Für einen Kern M 85 ist die Höhe des Wickelraumes 48,5 mm. In unserem Beispiel ist damit die maximale Spannung zwischen zwei Lagen

$$u = \frac{2 \cdot 48,5 \sqrt{850 \cdot 40}}{0,62 \cdot 764} \frac{\text{mm} \sqrt{V/A \cdot VA}}{\text{mm}} = 39 \text{ V}$$

Also ist eine Lagenisolation erforderlich, die aus dünnem Lackpapier oder einer Kunststoffolie bestehen kann.

Die Wicklungsisolation soll die Wicklungen, die ja auf verschiedenem Potential liegen können, gegeneinander isolieren. Meist werden mehrere Lagen derselben Folie angebracht, die auch für die Lagenisolation verwendet wird. Die Stärke der Isolation richtet sich nach der größten Spannung zwischen den Wicklungen und der Durchschlagfestigkeit des Isoliermaterials. Wenn bei einem Durchschlag Personen zu Schaden kom-

Tabelle 2. Übertrager für PPP-Endstufen

	f	Kern	n_{ges}	$n_{16 \Omega}$	d_1	g_1	d_2	g_2
	Hz				mm	$\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$	mm	$\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$
EL 84	40	M 85	1230	110	0,50	0,4	1,20	0,9
$P_{\text{eff}} =$		SM 55	1626	146	0,30	1,2	0,75	2,2
15 W	20	M 102 b	1370	122	0,60	0,3	1,40	0,6
		SM 65	2008	180	0,35	0,9	0,80	1,9
EL 34	40	M 102 a	768	106	0,80	0,3	1,50	0,6
$P_{\text{eff}} =$		SM 65	926	126	0,50	0,8	0,95	1,5
20 W	20	EI 130 b	998	136	1,00	0,2	1,90	0,4
		SM 74	1180	162	0,55	0,6	0,95	1,5
	10	SM 102 a	1534	210	0,60	0,5	1,00	1,3
EL 503	40	M 102 a	644	104	0,90	0,3	1,50	0,6
$P_{\text{eff}} =$		SM 65	778	126	0,60	0,6	0,95	1,5
20 W	20	EI 130 b	838	136	1,10	0,2	1,90	0,4
		SM 74	990	162	0,60	0,7	0,95	1,5
	10	SM 102 a	1288	210	0,65	0,6	1,05	1,3
EL 503	40	M 102 b	530	86	1,00	0,3	1,60	0,8
$P_{\text{eff}} =$		SM 74	700	114	0,70	0,7	1,20	1,4
40 W	20	EI 170 a	788	128	1,70	0,1	2,80	0,3
		SM 102 a	912	148	0,75	0,6	1,20	1,3
	10	SE 130 b	1186	194	1,00	0,3	1,60	0,8

men können (z. B. dann, wenn der Übertrager die galvanische Trennung der Lautsprecherleitung vom Netz bewirken soll), ist ein Sicherheitszuschlag von 100% dazuzurechnen. Sparübertrager enthalten nur eine Wicklung, die Wicklungsisolation entfällt.

PPP-Übertrager

In Tabelle 2 sind die Daten einiger Übertrager für PPP-Endstufen angegeben. Den Rechnungen wurden maximale Flußdichten von 10 kG für normale Kerne und von 20 kG für Schnittbandkerne, eine relative Permeabilität von 1000 und ein Kupferfüllfaktor von 0,7 zugrunde gelegt. Der Wickelraum wird zu zwei Dritteln vom Primärabschnitt der Wicklung beansprucht. Die Drahtdurchmesser ergeben sich allein aus den Abmessungen der Spulenkörper. Wie die ebenfalls angegebenen Stromdichten zeigen, können in den meisten Fällen ohne Bedenken kleinere Durchmesser verwendet werden. Der halbe Durchmesser ergibt die vierfache Stromdichte.

Die beiden Schaltungen mit der Röhre EL 503 unterscheiden sich lediglich im Übertrager. Die 20-W-Ausführung ist für den Fall gedacht, daß die geringere Leistung ausreicht und die Kosten für den Übertrager niedrig gehalten werden sollen. Die Verwendung der EL 34 anstelle der neueren EL 503 bringt keine Vorteile.

Schnittbandkerne

In der modernen Technik herrscht ein Zug zur Verkleinerung der Bauelemente und Geräte. Bei Verstärkern liegen außerdem die eisenlosen Endstufen mit der herkömmlichen Schaltungstechnik im Streit. Schaltungen mit Übertragern haben ihre besonderen Vorteile (galvanische Trennung, beliebige Anpassungsverhältnisse), wie auch Röhren in manchen Fällen den Halbleitern vorzuziehen sind. Sie werden sich aber nur behaupten können, wenn jeweils die modernsten Bauelemente verwendet werden. Zu diesen gehören Schnittbandkerne, die eine beträchtliche Raum- und Gewichtsersparnis ermöglichen, wie Tabelle 1 zeigt. Hinzu kommen geringere Streuung und einfache Schachtelung bei nur mäßig höherem Preis. Die Beschaffung dürfte auch auf keine Schwierigkeiten stoßen, da wenigstens ein Hersteller SM-Kerne ab Lager und SE-Kerne auf Bestellung liefert.

Literatur

- [1] Klein, E.: Netztransformatoren und Drosseln. RPB Nr. 106/107, Franzis-Verlag, München.
- [2] Wagner, S. W.: Stromversorgung elektronischer Schaltungen und Geräte. R. v. Decker's Verlag, Hamburg.
- [3] Diciol, O.: Niederfrequenzverstärker-Praktikum. Franzis-Verlag, München.