

Die Berechnung von Tonfrequenzübertragern

*Ein leicht anzuwendendes "Kochrezept" von Dietmar W. GERHOLD
nach einem Artikel von Prof. Dr. BENZ im "Journal of the Audio Engineering Society 2/58"*

Einleitung

Es gibt zwei Arten von Tonfrequenzübertragern: den Leistungsübertrager, der die Ausgangsleistung eines Verstärkers einem Verbraucher, z.B. einem Lautsprecher zuführt, und den Spannungsübertrager, der nur die Aufgabe hat, an eine weitere Verstärkerstufe eine möglichst große Spannung zu übertragen.

1. Der Leistungsübertrager (Ausgangs- oder Anpassungsübertrager)

Er hat nicht nur die Aufgabe einer möglichst hohen Leistungsübertragung, sondern auch noch die, einen möglichst breiten Frequenzgang bei einer möglichst flachen Übertragungskennlinie aufzuweisen.

1.1 Bestimmung des Übersetzungsverhältnisses (Verhältnis der sekundären zur primären Windungszahl)

Es ist:

$$\dot{u} = \frac{w_2}{w_1} = \sqrt{\frac{R_2}{R_w}} \quad [1]$$

R_2 ist der Belastungswiderstand (Scheinwiderstand oder Impedanz des Lautsprechers). R_w ist der günstigste Ausgangswiderstand, mit dem die Röhre belastet werden sollte. R_2 findet man bei dynamischen Lautsprechern entweder im Datenblatt oder durch eine Gleich- und Wechselstrommessung. Abweichungen von etwa $\pm 30\%$ von den geforderten Werten ergeben keine hörbar verschlechterte Wiedergabe.

Der günstigste Ausgangswiderstand R_w wird bei den meisten Röhren im Datenblatt angegeben. Er kann auch durch Wahl der Widerstandsgeraden aus dem U_a/I_a -Diagramm festgelegt werden.

Bei Trioden und A-Betrieb kann angenommen werden:

$$R_w = 0,6 \cdot \frac{U_a}{I_a} \quad [2]$$

U_a ist die Anodengleichspannung, I_a ist der Anodengleichstrom. U_a muß so groß gewählt werden, daß in [2] $R_w \geq 2 \cdot R_2$ ist.

Für Pentoden hingegen gilt für A-Betrieb:

$$R_w = \frac{U_a}{I_a} \quad [3]$$

In [2] und [3] kann I_a so groß gewählt werden, daß die maximale Anodenverlustleistung nicht überschritten wird. ($N_v \geq U_a \cdot I_a$)

Bei Gegentakt-A-Betrieb (gesamter Arbeitsbereich im geradlinigen steilen Teil der Kennlinie) wird jede Röhre mit dem gleichen Widerstand abgeschlossen. Die gesamte Primärwicklung besteht daher aus zwei Wicklungen mit insgesamt $R_w \text{ ges.} = 2 \cdot R_w$.

Bei Parallelschaltung von 2 Röhren halbiert sich $R_w \text{ ges.}$

Bei Parallelschaltung von 2 Lautsprechern addieren sich die Leitwerte der beiden Lautsprecher:

$$\frac{1}{R_{2\text{ges}}} = \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}} \quad [4]$$

Bei Reihenschaltung addieren sich die Widerstände:

$$R_{2\text{ges}} = R_{21} + R_{22} \quad [5]$$

Bei der Gegentakt-B-Schaltung (Arbeitspunkt im Kennlinienknick) arbeitet in jeder Halbwelle nur eine Röhre. Der Übertrager hat demnach auf der Primärseite einen übertragenen Widerstand von der Größe $R_w \text{ ges.} = 4 \cdot R_w$. Der günstigste Anpassungswiderstand R_w jeder Röhre ist:

$$R_w = \frac{U_a^2}{10 \cdot N_v} \quad [6]$$

Bei Trioden muß dabei U_a wenigstens so groß gewählt werden, daß in [6] $R_w \geq R_i$ ist.

1.2 Berechnung der Primär und Sekundärinduktivität

Hierfür gilt:

$$L_1[H] = \frac{0,16 \cdot R_i \cdot R_{w\text{ges}}}{(R_i + R_{w\text{ges}}) \cdot f_u} \quad [7]$$

Dabei ist R_i der statische innere Röhrenwiderstand und f_u die untere Grenzfrequenz. Nimmt man diese mit 40 Hz an, so ist:

$$L_1[H] = \frac{0,004 \cdot R_i \cdot R_{w\text{ges}}}{(R_i + R_{w\text{ges}})} \quad [8]$$

Für Gegentakt-A-Betrieb ist $R_w \text{ ges.} = 2 \cdot R_w$, für Gegentakt-B-Betrieb ist $R_w \text{ ges.} = 4 \cdot R_w$.

Die Sekundärinduktivität bestimmt sich aus dem Übersetzungsverhältnis:

$$\dot{u} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad \text{oder} \quad L_2 = \dot{u}^2 \cdot L_1 \quad [9]$$

1.3 Berechnung der Ausgangsleistung von Röhrenstufen

Die maximale unverzerrte Ausgangsleistung N_w , bedingt durch einen höchsten zulässigen Klirrfaktor von ca. 5% einer Triode in A-Schaltung, ist etwa:

$$N_w = 0,25 \cdot N_{DC} \leq 0,25 \cdot N_v \quad [10]$$

Dabei ist N_{DC} die Gleichstrom-Leistungsaufnahme und N_v die maximale Anodenverlustleistung. Der größte Anodenverlust tritt in den Pausen auf, es ist dann N_{DC} fast N_v .

Die maximale unverzerrte Ausgangsleistung einer Pentode in A-Schaltung ist etwa:

$$N_w = 0,4 \cdot N_{DC} \leq 0,4 \cdot N_v \quad [11]$$

Die maximale unverzerrte Ausgangsleistung einer Triode in Gegentakt-B-Schaltung ist etwa:

$$N_w = 0,6 \cdot N_{DC} \quad , \text{ also } N_w = 1,5 \cdot N_v \quad [12]$$

Die maximale unverzerrte Ausgangsleistung einer Pentode in Gegentakt-B-Schaltung ist etwa:

$$N_w = 0,7 \cdot N_{DC} \quad , \text{ also } N_w = 2,3 \cdot N_v \quad [13]$$

Für AB-Verstärker (Arbeitspunkt etwas oberhalb des Kennlinienknicks) gelten Zusammenhänge zwischen N_w und N_v , die zwischen den betreffenden Werten der A- und B-Verstärker liegen.

1.4 Kernabmessungen und Windungszahl

Die Größe des Übertragers, insbesondere der Blechschnitt, ergibt sich aus der geforderten Wechselstromleistung. Es ist angenähert:

$$A_{fe} = 1,7 \cdot \sqrt{N_w} \quad [14]$$

Dabei ist A_{fe} der Eisenquerschnitt. Dieser sollte in etwa der Querschnittsfläche des Fensters entsprechen. Der Eisenquerschnitt ermittelt sich aus dem Produkt der Kernbreite b_k , der Paketstärke s_k und dem Eisenfüllfaktor k_{fe} (ca. 0,9).

$$A_{fe} = b_k \cdot s_k \cdot k_{fe} \quad [15]$$

Die Fensterfläche A_f errechnet sich aus dem Produkt der Fensterbreite b_f und der Fensterhöhe h_f .

$$A_f = b_f \cdot h_f \quad [16]$$

Die Zusammenhänge zwischen den Abmessungen der Blechschnitte können in Tabellenbüchern nachgelesen werden.

Um die Gleichstromvormagnetisierung zu begrenzen, erhalten die Bleche einen Luftspalt von zumeist 0,5 mm. Man erhält dann für die Primärwindungszahl:

$$w_1 = 2000 \cdot \sqrt{\frac{L_1}{A_{fe}}} \quad \text{Windungen} \quad [17]$$

Die sekundäre Windungszahl ergibt sich daraus zu:

$$w_2 = \dot{u} \cdot w_1 = w_1 \cdot \sqrt{\frac{R_2}{R_{wges}}} \quad \text{Windungen} \quad [18]$$

1.5 Berechnung des Drahtquerschnittes

Bei normalen Wickelarbeiten kann mit einem Kupferfüllfaktor von etwa 0,4 gerechnet werden. Für Primär- und Sekundärwicklung steht jeweils der halbe Wickelraum zur Verfügung. Das heißt also, es steht für jede Wicklung der Querschnitt

$$q_w = 0,2 \cdot A_f = 0,2 \cdot h_f \cdot b_f \quad [19]$$

zur Verfügung; daraus errechnet sich der Drahtquerschnitt zu

$$q_{Cu} = \frac{0,2 \cdot h_f \cdot b_f}{w} \quad [20]$$

Der Drahtdurchmesser errechnet sich daraus nach

$$d = 1,12 \cdot \sqrt{q_{Cu}} \quad [21]$$

Es wird empfohlen, für weniger anspruchsvolle Einsätze zuerst die Sekundärwicklung und darauf die Primärwicklung aufzubringen (Instrumentalverstärker). Besser ist es, die Primärwicklung in zwei Teile aufzuteilen und die Sekundärwicklung dazwischen einzubringen. Für Anwendungen im HiFi-Bereich empfiehlt es sich, die Primärwicklung(en) zumindest in drei Teile zu teilen und die Sekundärwicklung(en) dazwischen einzubringen. Weiters ist es von Nutzen, einen Zweikammerspulenkörper zu verwenden und die Primärwicklungen auszukreuzen.

2. Rechenbeispiele für Endverstärker

2.1 Ausgangsübertrager für Anpassung an einen dynamischen Lautsprecher

Verwendung findet eine Endpentode und ein dynamischer Lautsprecher mit einer Impedanz von 5Ω .

Annahme: $U_a = 250V$
 $I_a = 36 \text{ mA}$
 $R_i = 50 \text{ k}\Omega$
 Eintakt-A-Betrieb

Somit ist nach [3]

$$R_w = \frac{250}{0,036} = 6,944 \text{ k}\Omega$$

Das Übersetzungsverhältnis errechnet sich daraus nach [1] zu

$$\ddot{u} = \sqrt{\frac{5}{6944}} = 37,2666^{-1}$$

Nach [8] berechnet sich die Primärinduktivität

$$L_1 = \frac{0,004 \cdot 50000 \cdot 6944}{56944} = 24,39 [H]$$

Somit ist nach [9]

$$L_2 = 24,39 \cdot (37,26^{-1})^2 = 0,0176 [H]$$

Die Kerngröße bestimmt sich aus der Ausgangsleistung. Sie wird mit 4,3 W angenommen. Es ergibt sich nach [14]

$$A_{fe} = 1,7 \cdot \sqrt{4,3} = 3,5 [cm^2]$$

Gewählt wird ein Kern M55 mit $b_k = 17 \text{ mm}$ und $s_k = 21 \text{ mm}$. Daraus ergibt sich ein A_{fe} von $3,2 \text{ cm}^2$. Die primäre Windungszahl errechnet sich nach [17] zu

$$w_1 = 2000 \cdot \sqrt{\frac{24,39}{3,2}} = 5521 [Windungen]$$

und die sekundäre Windungszahl

$$w_2 = \frac{5521}{37,26} = 148 [Windungen]$$

Aus dem Füllfaktor und der Fensterfläche A_f bestimmt sich nach [20] der Drahtquerschnitt der Primärwicklung zu

$$q_{Cu_1} = \frac{0,2 \cdot 7,6 \cdot 31}{5521} = 0,0085 [mm^2]$$

und für den Drahtdurchmesser

$$d_1 = 1,12 \cdot \sqrt{0,0085} = 0,1 [mm]$$

Für die Sekundärwicklung erhält man

$$q_{Cu_2} = \frac{0,2 \cdot 7,6 \cdot 31}{148} = 0,318 [mm^2]$$

und für den Drahtdurchmesser

$$d_2 = 1,12 \cdot \sqrt{0,318} = 0,63 [mm]$$

2.2 Anpassung eines Verstärkers an eine Ausgangsleitung

Sind Lautsprecher und Verstärker getrennt voneinander angeordnet (z.B. PA, Schaustelleranlagen, ELA-Anwendungen ...), so ist es zweckmäßig, die Leitung mit einigen hundert Ohm abzuschließen. Da der Lautsprecher im allgemeinen eine wesentlich geringere Impedanz aufweist, wird sein Widerstand auf diesen Wert hinauftransformiert. Die Leitung selbst ist wieder durch einen Transformator an den Röhrenausgang angeschlossen. Die zweimalige Anordnung von Transformatoren hat drei Gründe:

- es ist ein Ausgangstransformator notwendig, um die Leitung gleichspannungsfrei zu machen und eine Erdung zu ermöglichen.
- um Leitungsverluste zu minimieren, darf der Verstärkerausgang nicht zu niederohmig sein.
- er darf auch nicht zu hochohmig sein, um durch die unvermeidbaren Kabelkapazitäten die höheren Frequenzanteile nicht zu stark zu beeinträchtigen.

Die Berechnung erfolgt nach den vorhin verwendeten Formeln.

3. Der Spannungsübertrager

Solche Übertrager sind notwendig, um z.B. die Ausgangsspannung eines Mikrofons oder eines dynamischen Tonabnehmers zu erhöhen und/oder an einen Verstärkereingang anzupassen. Seltener werden sie zur Kopplung von zwei Verstärkerstufen verwendet (anstelle der DC-Kopplung oder der kapazitiven Kopplung). Der Transformator ist nur mit der Eingangsimpedanz der darauffolgenden Stufe belastet.

3.1 Bestimmung der Induktivitäten

Die Primärinduktivität wird wie beim Leistungsübertrager aus der unteren Grenzfrequenz und dem Innenwiderstand der Tonquelle berechnet. Es ist

$$L_1 = \frac{R_i}{2 \cdot \pi \cdot f_u} \quad [22]$$

oder wenn $f_u = 40$ Hz, dann ist

$$L_1 = \frac{R_i}{250} = R_i \cdot 0,004 \quad [23]$$

Dabei ist R_i der Innenwiderstand der Tonfrequenzquelle, er ist entweder bekannt oder er wird durch eine Spannungs-/Strommessung ermittelt.

Aus der oberen Grenzfrequenz, der Streuung und der kapazitiven Belastung bestimmt sich die Sekundärinduktivität L_2 . Unter der Annahme einer f_o von 5 bis 7,5 kHz (für Instrumentalanwendungen), einem Streufaktor von $\Gamma = 0,05$ und einer gesamten kapazitiven Belastung von $C_2 = 100\text{pF}$ erhält man angenähert

$$L_2 = 200 \div 300[H]$$

und für HiFi-Anwendungen ($f_o = \geq 20$ kHz) für

$$L_2 = 75[H] \quad (\text{angenähert}).$$

3.2 Kernabmessungen und Windungsanzahl

Die Größe eines derartigen Übertragers, insbesondere der Blechschnitt ergibt sich wieder aus der dem Transformator zugeführten Wechselstromleistung. Indes sollten die kleinsten, wegen etwaiger DC-BIAS durch die Tonquelle oder den Anodengleichstrom, mindestens einen Blechschnitt von M42 aufweisen. In einem solchen Fall sind auch kleine Luftspalte von ca. 0,1 mm Breite sinnvoll.

Die primäre und sekundäre Windungszahl ergibt sich wieder aus [17], bzw. aus [18].

$$w_1 = 2000 \cdot \sqrt{\frac{L_1}{A_{fe}}} \quad \text{Windungen}$$

und

$$w_2 = \ddot{u} \cdot w_1 = w_1 \cdot \sqrt{\frac{R_2}{R_{wges}}} \quad \text{Windungen}$$

Für den Drahtquerschnitt gelten [19] bis [21].

3.3 Beispiel

Ein Mikrofon mit einem Innenwiderstand (R_i) von 200Ω soll über einen Übertrager an einen Triodeneingang angepaßt werden. Es wird ein L_2 von 100 Henry angenommen. Dann ist

$$L_1 = 0,004 \cdot 200 = 0,8[H]$$

Das Übersetzungsverhältnis beträgt

$$\ddot{u} = \sqrt{\frac{100}{0,8}} = 11,2$$

Daher ist, wenn der Blechschnitt M42 gewählt wird ($A_{fe} = 1,6 \text{ cm}^2$)

$$w_1 = 2000 \cdot \sqrt{\frac{0,8}{1,6}} = 1414[\text{Wdg.}]$$

und

$$w_2 = 2000 \cdot \sqrt{\frac{100}{1,6}} = 15811[\text{Wdg.}]$$

Die Ermittlung der Drahtstärken erfolgt analog zu den Gleichungen [19] bis [21].