

Leseprobe aus Kapitel 6 ‚Transformatoren und Übertrager‘ des Buchs

‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘

Weitere Informationen zum Buch finden Sie unter strukturbildung-simulation.de

7.3.1 Der Übertrager als Impedanz-Wandler

Netz-Transformatoren werden niederohmig, also durch Spannung angesteuert. Das muss jedoch nicht immer so sein. Im Audio-Bereich werden Lautsprecher oder Kopfhörer über Verstärker mit Innenwiderständen R_i angesteuert.

Lautsprecher und Kopfhörer benötigen Spannungen im Volt-Bereich. Transistor-Verstärker arbeiten mit Spannungen im 10V-Bereich, Röhren-Verstärker sogar mit einigen 100V. Zur Spannungs-Anpassung müssen Übertrager zwischen-geschaltet werden.



Abb. 7.3.1-1 Übertrager mit technischen Daten. Rechts: die Simulations-Ergebnisse der folgenden Übertrager-Struktur.

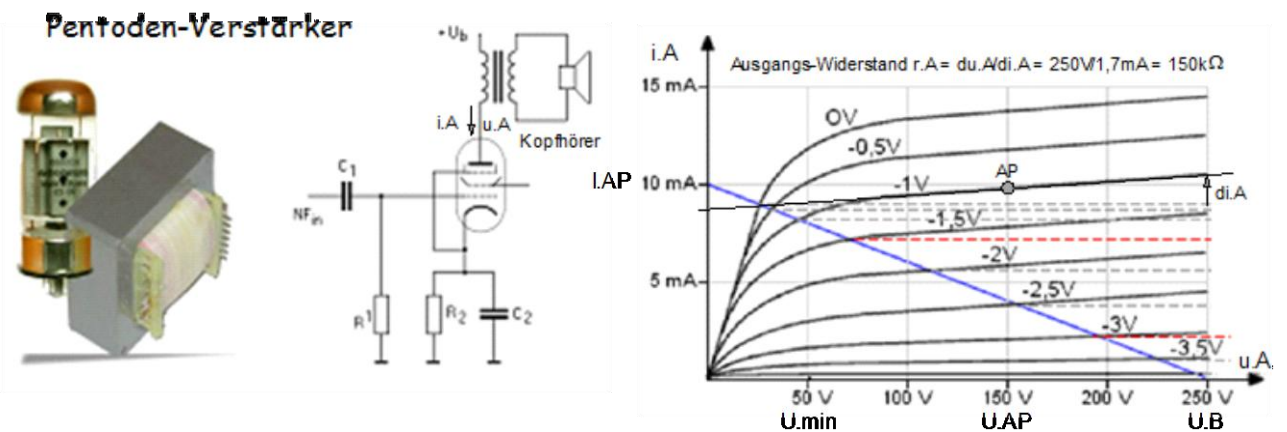


Abb. 7.3.1-2 Die Abbildung zeigt die Ausgangs-Kennlinien einer Pentode. Sie zeigt die Abhängigkeit des Anodenstroms i_A von der Anodenspannung u_A mit der Gitterspannung u_G als Parameter. Verstärker-Röhren sind, wie Transistoren auch, steuerbare Stromquellen. Ihr hoher Ausgangs-Widerstand (hier $150k\Omega$) zeigt sich durch die flachen Ausgangs-Kennlinien $i_A(u_A)$.

Die **Innen-Widerstände R_i** von Audio-Verstärkern mit Transistoren liegen je nach Nennleistung im Ohm- bis $k\Omega$ -Bereich, bei Röhren-Verstärkern können sie bis über $100k\Omega$ groß werden. Dann ist der belastete Übertrager eingangs-seitig niederohmig gegen den Innenwiderstand des Verstärkers. In diesem Falle ist der Übertrager Strom-gesteuert.

Gleichstrom-Vormagnetisierung und Luftspalt

Wenn ein Ausgangs-Übertrager, wie in der obigen Schaltung, von Gleichstrom durchflossen wird, kann der magnetische Kern in die Sättigung getrieben werden. Sie setzt z.B. bei Dynamo-Blech ab einer Grenz-Flussdichte $B_{gr} = 1,2T$ ein. Wie die Magnetisierungs-Kennlinie zeigt, gehört dazu eine Grenz-Feldstärke H_{gr} von $4A/cm$ (d.h., der maximale spezifische magnetische Leitwert $\mu_0 \cdot \mu_r = 3000$).

Wenn diese Grenze überschritten wird, muss der Kern einen Luftspalt zur Begrenzung der Flussdichte erhalten. Ob er benötigt wird – und, wenn ja, wie breit er sein muss - wollen wir anhand eines Zahlen-Beispiels zeigen.

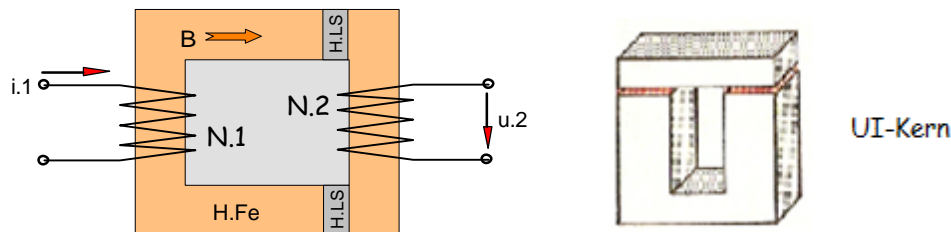


Abb. 7.3.1-3 UI-Kern-Trafo mit zwei Luft-Spalten

Gegeben sei ein UI-förmiger Eisenkern mit einer mittleren Eisen-Länge $l_{Fe} = 10cm$. Bis zu einer **Grenz-Durchflutung** $\Theta_{gr} = (I_1 \cdot N_1)_{gr} = H_{gr} \cdot l_{Fe}$ - hier $40A$ – ist kein Luftspalt erforderlich. In der obigen Schaltung ist $I_1 = 10mA$. Dazu gehört eine maximale Windungszahl $N_{1gr} = 4000$.

Wäre $\Theta > \Theta_{gr}$, gleichgültig ob durch i_1 oder N_1 oder beide erzeugt, so müsste die überschüssige magnetische Spannung über zwei **Luftspalten mit der Länge l_{LS}** abfallen:

$$2 \cdot V_{LS} = I_1 \cdot N_1 - \Theta_{gr} = l_{LS} \cdot H_{LS} \quad \text{mit } H_{LS} = B_{gr} / \mu_0$$

Daraus folgt die erforderliche Luftspalt-Länge: $l_{LS} = (I_1 \cdot N_1 - \Theta_{gr}) / (2 \cdot B_{gr})$
 Wäre beispielsweise $I_1 \cdot N_1 = 10000A$, so betrüge die Luftspalt-Länge l_{LS} in unserem Beispiel $33\mu m$. Das ist $1/3$ der Dicke von Drucker-Papier.


Die Nennleistung P.N

Der Ausgangs-Übertrager eines Röhren-Verstärkers muss an seine Nennleistung P_N angepasst sein. Diese ergibt sich aus dem Strom und der Spannung im Arbeitspunkt. Beide sollen so groß wie möglich sein, aber nicht so groß, dass Verzerrungen hörbar werden. Das wäre bei der oben abgebildeten Pentode bei Anoden-Spannungen unter $u_{min} = 50V$ der Fall. Daher wird sie in der Mitte zwischen U_{min} und der Versorgungs-Spannung U_B , hier $250V$ betrieben: $U_{AP} = U_{min} + (U_B - U_{min})/2$, hier $150V$.

Der Strom im Arbeitspunkt wird an die der Röhre zuträgliche Verlust-Leistung $P_{AP} = U_{AP} \cdot I_{AP}$ angepasst – hier $P_{AP} = 1,5W$. Daraus ergibt sich $I_{AP} = 10mA$.

Für die Dimensionierung des Ausgangs-Übertragers benötigen wir die **effektive Ausgangs-Nennleistung P.N** eines Röhren-Verstärkers. Sie ergibt sich aus der maximalen Aussteuerung, geteilt durch $\sqrt{2}$:


$$P.N = (U.B - U.min)/(2 \cdot \sqrt{2}) \cdot I.AP/\sqrt{2} = (U.B - U.min) \cdot I.AP / 4 - \text{hier } P.N=0.5W$$



Übertrager:
NTE 1 von Neutrik

Technische Daten

Windungsverhältnis:	1:10:3
Typ:	NTE 10/2
Ausgangs-impedanz:	50000 Ω
Eingangsimpedanz:	200 Ω
Typ:	NTE 10/3



Technische Daten

Höhe:	20.5 mm
Ausführung:	LSM-66F
Impedanz:	8 Ω
Lautstärke:	85 dB
Nennbelastbarkeit:	500 mW
Korb-Ø:	66 mm
Magnetmaße:	32 mm
Res. frequenz Hz fo-:	280 Hz
Übertragungsbereich fo-:	3.5 kHz

**Miniatur-Lautsprecher
500mW
von Conrad Electronic**

B/T	0,79089
ü	0,02
U 2/V	1,8478
B=H/cm	1,8966
I.Fe/cm	3,7932
H/(A/cm)	2,6363
A.Fe/cm²	0,37203
P.N/VA	0,49
V.mag/A	10
I.1/A	0,01

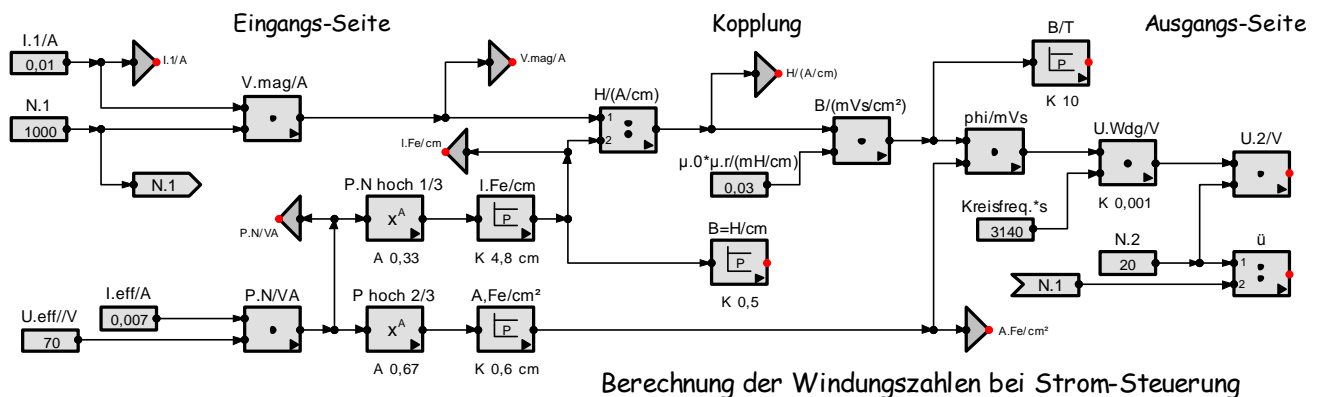
Abb. 7.3.1-4 Klein-Übertrager und Mini-Lautsprecher (0,5W). Ob die Ausgangs-Leistung einer Röhre zum Betrieb ausreicht, soll berechnet werden.

Übersetzungs-Verhältnis $\ddot{u} = u.2.0/u.1$.

Das Übersetzungs-Verhältnis \ddot{u} wird in der Trafo-Ersatzschaltung zur Umrechnung der sekundär-seitigen Widerstände auf die Primär-Seite und umgekehrt benötigt. Es ergibt sich aus der gegebenen Eingangs-Spannung $U.1$ und der Ausgangs-Spannung $U.2$. $U.1$ liegt bei einem Röhren-Verstärker bei 100V, $U.2$ liegt bei Lautsprechern bei einigen V. Typische Übersetzungs-Verhältnisse \ddot{u} von Ausgangs-Übertragern liegen bei Transistor-Verstärkern im Bereich 1:10, bei Röhren-Verstärkern 1:100. Zur Berechnung des Übersetzungs-Verhältnisses überlegen wir uns zunächst dessen Struktur.

Die Struktur des Strom-gesteuerten Übertragers

Die in der folgenden Abbildung gezeigte Struktur des Strom-gesteuerten Übertragers dient zur Berechnung der Daten, die zur Auswahl oder zum Bau benötigt werden, insbesondere der Windungszahlen und seiner Abmessungen.



Struktur 6-6 Windungszahlen bei Strom-Steuerung

Berechnung der Windungszahlen bei Strom-Steuerung

Zur Berechnung der Windungszahlen $N.1$ und $N.2$ des Audio-Übertragers unterscheiden wir eine Eingangs-Seite und eine Ausgangs-Seite.

Auf der Eingangs-Seite erzeugt der Primär-Strom $I.1$ eine magnetische **Feldstärke H** . Sie soll, laut Magnetisierungs-Kennlinie für Dynamo-Blech, effektiv nicht größer als **$H=2,8A/cm$** betragen. Dazu gehört eine Flussdichte **$B=0,8T$** (ebenfalls effektiv), die zur Berechnung der Ausgangs-Seite benötigt wird.

Die Feldstärke **$H = I.1 \cdot N.1 / l.Fe$** .

$I.1$ ist gegeben, hier $7mA$ (effektiv), die primäre Windungszahl $N.1$ wird gesucht.

Die mittlere Eisenlänge $l.Fe$ errechnen wir aus der Nennleistung $P.N$ des Übertragers:

$$l.Fe = 5cm \cdot (P.N / VA)^{1/3}$$

... hier ist $P.N=0,5W$. Dann ist $(P.N/VA)^{1/3} = 0,8$ und $l.Fe = 3,8cm$.

$l.Fe$ ist etwa doppelt so groß, wie der Eisenkern lang und breit ist: **$l.Fe \approx L$** hier $1,9cm$. So erhalten wir die primäre Windungszahl **$N.1 = H \cdot l.Fe / I.1$** – hier **1500**.

Die sekundäre Windungszahl $N.2$ erhalten wir aus der Berechnung der Ausgangs-Seite. Wie Sie in der obigen Struktur erkennen, ist die Ausgangs-Spannung bei Strom-Steuerung der **Frequenz $f = \omega / 2\pi$** proportional:

$$U.2 = N.2 \cdot \omega \cdot A.Fe \cdot B \rightarrow N.2$$

Daher müssen wir uns zur Berechnung von $N.2$ für eine mittlere Frequenz entscheiden. Wir wählen z.B. $f=160Hz$. Dann ist **$\omega=10^3/s$** .

Die benötigte Ausgangs-Spannung hängt vom Belastungs-Widerstand ab. Wählen wir z.B. den abgebildeten Klein-Lautsprecher, ist $R.L=8\Omega$. Seine Nenn-Leistung $P.N$ soll gleich der des Verstärkers sein: hier $P.N=0,5W$. Da $P.N=U.2^2 \cdot R.L$ ist, erhalten wir die erforderliche Ausgangs-Spannung

$$U.2 = \sqrt{P.N * R.L} \quad - \text{hier } U.2=2V.$$

Die bei Dynamo-Blech zur gewählten Feldstärke $H=2,8A/cm$ gehörende Flussdichte ist **$B = 0,8T = 0,8 \cdot 10^{-4} Vs/cm^2$** . Zur Berechnung des magnetischen Flusses $\phi=A.Fe \cdot B$ muss der Eisen-Querschnitt $A.Fe$ bekannt sein. Wir errechnen ihn aus der Nennleistung $P.N$ des Übertragers:

$$A.Fe = 0,5cm^2 \cdot (P.N/VA)^{2/3}$$

- hier mit $P.N=0,5W \rightarrow (P.N/VA)^{2/3} = 0,62$, ergibt $A.Fe=0,31cm^2$.

Daraus folgt die Windungs-Spannung **$U.Wdg = d\phi/dt = \omega \cdot A.Fe \cdot B = 78mV$** und die Windungszahl **$N.2=U.2/U.Wdg$** – hier $N.2= 26$.

Damit können wir auch das Übersetzungs-Verhältnis $\ddot{u} = N.2/N.1$ angeben: hier ist **$N.1/N.2 = 1500/26 \approx 58 \rightarrow \ddot{u} \approx 0,017$** .

Die Tatsache, dass die Ausgangs-Spannung bei hochohmiger Ansteuerung des Übertragers mit der Frequenz ansteigt, ist meist unerwünscht. Allerdings verschlechtern sich die Eigenschaften der Komponenten einer Schall-Übertragungs-Strecke – z.B. das menschliche Gehör – mit steigender Frequenz. Dann kann der Strom-gesteuerte Übertrager diesen Verlust kompensieren.

Um beurteilen zu können, ob sich ein Transformator als Audio-Übertrager eignet, muss sein Frequenzgang $U.2/U.1(f)$ mit bekannt sein.

Er zeigt seine Grenz- und Resonanz-Frequenzen. Mehr zu diesem Thema erfahren Sie im Abschnitt 6.5.3. Um die Fälle ‚Spannungs-Steuerung‘ und ‚Strom-Steuerung‘ besser unterscheiden zu können, soll der Übertrager nun als Vierpol behandelt werden.

Die Vierpol-Parameter des Strom-gesteuerten Übertragers

Der Vollständigkeit halber interessieren wir uns nun noch für die Vierpol-Eigenschaften eines Übertragers mit Spannungs-Ausgang bei der hochohmigen Ansteuerung.

Die Vorwärts-Impedanz

$$F.v = \frac{U.2}{I.1} = \ddot{u} * j\omega * L1$$

Die Rückwärts-Impedanz

$$F.r = \frac{U.1}{I.2} = j\omega * L.2 / \ddot{u} = j\omega * L.1 * ue = F.v$$

Der Eingangs-Widerstand

$$F.e = \frac{U.1}{I.1} = R.W1 + j\omega * L.1$$

Der Ausgangs-Widerstand

Mit den Koppelspannungen $U.2k = \ddot{u} \cdot U.1k$ und der Strom-Wandlung $i.1 = \ddot{u} \cdot i.2$ erhalten wir

$$F.a = \frac{U.2}{I.2} = R.W2 + j\omega * L.2$$