

Gegenkopplungen in Niederfrequenz-Röhrenverstärkern

Allgemeines

Niederfrequenz-Röhrenverstärker sind spannungsgesteuert. Gegenkopplung bedeutet hierbei, daß dem Eingang zusätzlich zur Steuerspannung U_1 , und zwar gegenphasig zu ihr, eine vom Ausgang stammende Spannung U_G zugefügt wird.

Da die vom Ausgang auf den Eingang zurückgeführte Größe hier eine Spannung ist, handelt es sich dabei stets um eine Spannungs-Gegenkopplung. Je nach Ursprung der Gegenkopplungsspannung U_G unterscheidet man:

- Spannungs- Spannungs-Gegenkopplung,
- Strom- Spannungs-Gegenkopplung und
- gemischte Spannungs-Gegenkopplung.

Diese Gegenkopplungen werden im vorliegenden Beitrag kurz Spannungs-, Strom- und gemischte Gegenkopplung genannt.

Die auf den Eingang zurückgeführte Spannung U_G kann immer, ob sie nun unmittelbar von der Ausgangsspannung U_2 oder von dem Ausgangsstrom I_2 oder sowohl von U_2 wie von I_2 abhängig ist, stets zur Ausgangsspannung U_2 ins Verhältnis gesetzt werden. Dieses Verhältnis nennt man den Rückkopplungsgrad α :

$$\alpha = \frac{U_G}{U_2} \quad (1)$$

Jede Gegenkopplung reduziert die Verstärkung V auf V' . Außerdem beeinflußt sie, abhängig von der Schaltung, den zwischen den Ausgangsklemmen wirkenden Innenwiderstand R_i sowie den zwischen den Eingangsklemmen des Verstärkers wirkenden Eingangswiderstand Z_g . Für die Verstärkungsreduktion gilt

$$V' = \frac{V}{1 + \alpha V} \quad (2)$$

Die innerhalb des gegengekoppelten Verstärkers entstehenden nichtlinearen Verzerrungen werden auf den Bruchteil V'/V herabgesetzt, falls man den Verstärker nur soweit aussteuert, daß weder in der Ausgangsspannung noch im Ausgangswechselstrom Abkappungen zustande kommen. Die Verzerrungsverminderung des Klirrgrades k auf den Klirrgrad k'

$$k' = k \cdot \frac{V'}{V} \quad (3)$$

nutzt man z. B. in Verstärkern für elektroakustische Anlagen weitgehend aus.

Die Leistung, die von der Endröhre (oder den Endröhren) an den Außenwiderstand Z_a abgegeben werden kann, wird um die Anteile vermindert, die in den zum Gegenkoppeln zusätzlich notwendigen Widerständen verlorengehen. Es handelt sich hierbei z. B. um

die Widerstände Z_b , Z_c und Z_d in den Bildern 1 ... 3. Diese Verluste sind belanglos, falls, wie üblich,

$$|Z_b| \gg |Z_a| \text{ und } |Z_d| \ll |Z_a| \text{ gewählt werden.}$$

Beides wird für das Folgende als gegeben betrachtet.

Spannungs-Gegenkopplung (Bild 1)

Die zurückgeführte Spannung U_G ist bei dieser Gegenkopplung der am Außenwiderstand Z_a auftretenden Spannung U_2 proportional. Mit $|Z_b| \gg |Z_a|$ erhält man den Gegenkopplungsgrad

$$\alpha_U = \frac{U_G}{U_2} = \frac{Z_c}{Z_b + Z_c} \quad (4)$$

und hiermit aus der Verstärkung ohne Gegenkopplung V die Verstärkung mit Gegenkopplung V' :

$$V' = \frac{V}{1 + \alpha_U V} \quad (5)$$

Der Innenwiderstand des gegengekoppelten Verstärkers ist im allgemeinen Fall komplex. Deshalb wird er (statt mit R'_i) mit Z'_i bezeichnet:

$$Z'_i = \frac{R_i}{1 + \alpha_U V + \alpha_I V \frac{R_i}{Z_a}} \quad (6)$$

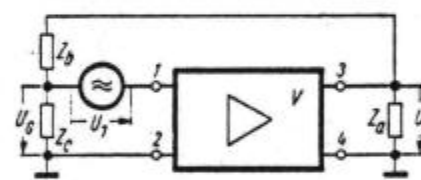


Bild 1

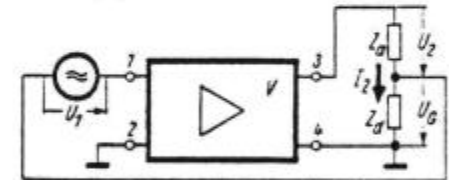


Bild 2

Strom-Gegenkopplung (Bild 2)

Die zurückgeführte Spannung U_G ist hier dem Strom I_2 proportional, der den Außenwiderstand $Z_a + Z_d$ durchfließt. Für $|Z_a| \gg |Z_d|$ gilt:

$$U_G = I_2 Z_d, \quad U_2 = I_2 \cdot Z_a$$

$$\alpha_I = \frac{U_G}{U_2} = \frac{Z_d}{Z_a} \quad (7)$$

$$V' = \frac{V}{1 + \alpha_I V} \quad (8)$$

$$Z'_i = R_i \left(1 + \alpha_I V + \alpha_I V \frac{Z_a}{R_i} \right) \quad (9)$$

Gemischte Gegenkopplung (Bild 3)

Werden Spannungs- und Strom-Gegenkopplung in einer Schaltung gemeinsam verwirklicht, so hat man gemischte Gegenkopplung. Dabei ist die zurückgeführte Spannung U_G

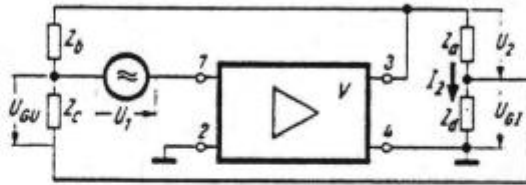


Bild 3

sowohl von der Ausgangsspannung U_2 wie vom Ausgangsstrom I_2 abhängig. Mit $|Z_b| \gg |Z_a|$ und $|Z_a| \gg |Z_d|$ ergibt sich:

$$\alpha = \alpha_I + \alpha_U, \quad \alpha_I = \frac{Z_d}{Z_a}, \quad \alpha_U = \frac{Z_c + Z_d}{Z_b + Z_c + Z_d} \quad (10)$$

$$\Gamma' = \frac{\Gamma}{1 + (\alpha_I + \alpha_U) \Gamma} \quad (11)$$

$$Z'_i = R_i \frac{1 + \alpha_I \Gamma + \alpha_U \Gamma}{1 + \alpha_I \Gamma + \alpha_U \Gamma} \frac{Z_a}{R_i} \frac{R_i}{Z_a} \quad (12)$$

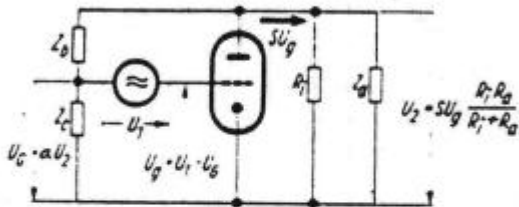


Bild 4

Spannungsgegenkopplung einer einzelnen Röhre (Bild 4)

Eine einzelne, spannungsgegekoppelte Röhre mit dem Innenwiderstand R_i , der Steilheit S und dem Verstärkungsfaktor μ verhält sich wie eine Röhre mit den Werten:

$$S' = S \quad (13)$$

$$Z'_i = \frac{R_i}{1 + \alpha_U \mu} \quad (14)$$

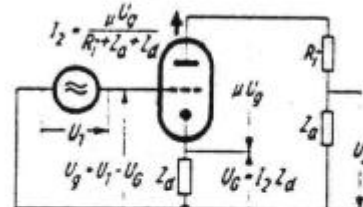


Bild 5

Stromgegenkopplung einer einzelnen Röhre (Bild 5)

Eine einzelne, stromgegekoppelte Röhre mit dem Innenwiderstand R_i , der Steilheit S und dem Verstärkungsfaktor μ verhält sich wie eine Röhre mit den Werten:

$$\mu' = \mu \quad (18)$$

$$Z'_i = R_i (1 + S Z_d) = R_i + \mu Z_d \quad (19)$$

$$S' = \frac{S}{1 + S Z_d} \quad (20)$$

$$\Gamma' = \frac{\Gamma}{1 + \alpha_I \Gamma} = \frac{\mu Z_a}{R_i + Z_a + Z_b (1 + \mu)} = \frac{S R_i Z_a}{R_i + Z_a + Z_d (1 + S R_i)} \quad (21)$$

Dazu gehört:

$$\alpha_I = \frac{U_G}{U_2} = \frac{I_2 Z_d}{I_2 Z_a} = \frac{Z_d}{Z_a} \quad (22)$$

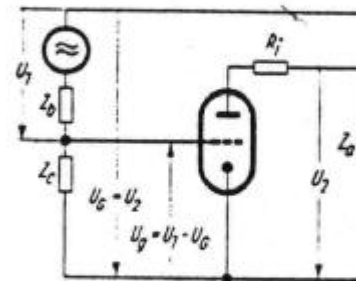


Bild 6

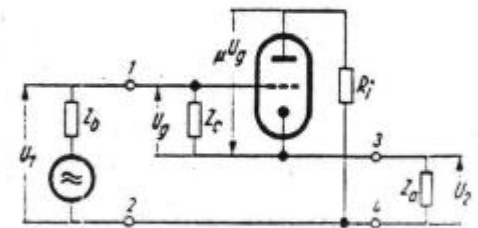


Bild 7

Anodenbasisstufe = Kathodenausgangsstufe (Bilder 6 und 7)

Eine solche Stufe ermöglicht: eine Impedanzwandlung (Stromverstärkung). Hier wird die volle Ausgangsspannung U_2 auf den Eingang zurückgeführt ($U_G = U_2$; $\alpha = 1$). Es gilt mit Z'_i zwischen den Klemmen 3 und 4 (Bild 7) sowie

Z'_e zwischen den Klemmen 1 und 2 (Bild 7) und
 Z_b = Generator-Innenwiderstand zu U_1

$$V' = \frac{\mu Z_a}{R_i + Z_a(1 + \mu)} = \frac{1}{1 + \frac{R_i + Z_a}{S R_i Z_a}} \quad (23)$$

$$Z'_i = \frac{1}{S + \frac{Z_c + R_i}{Z_c R_i} - \frac{Z_b(S Z_c + 1)}{Z_c(Z_c + Z_b)}} \quad (24)$$

$$Z'_e = Z_c \left(1 + \frac{\mu Z_a}{R_i + Z_a} \right) \quad (25)$$

Diese Formeln vereinfachen sich folgendermaßen wesentlich, falls

$$R_i \gg Z_a, S \gg \frac{Z_c + R_i}{Z_c R_i} \text{ und } Z_b \approx 0:$$

$$V' = \frac{S Z_a}{1 + S Z_a} \quad (23a)$$

$$Z'_i = \frac{1}{S} \quad (24a)$$

$$Z'_e = Z_c(1 + S Z_a) \quad (25a)$$

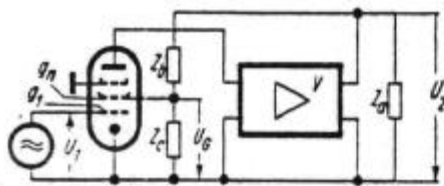


Bild 8

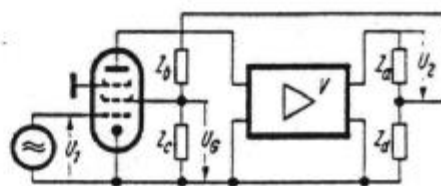


Bild 9

Schirmgittergegenkopplung (Bilder 8 und 9)

Mehrgitterröhren bieten die Möglichkeit, die gegenkoppelnde Spannung – statt auf das Steuergitter g_1 – auf ein anderes Gitter g_n , meist auf das Schirmgitter, der Röhre zurückzuführen. Hierfür gelten zu V' und Z'_i die Gleichungen (5), (8) und (11) bzw. (6), (9) und (12), falls gesetzt wird:

$$\alpha_U = D_n \frac{Z_c}{Z_b + Z_c} \quad (26)$$

$$\alpha_I = D_n \frac{Z_c Z_d}{Z_a(Z_b + Z_c)} \quad (27)$$

$$D_n = \frac{1}{\mu_n \mu_1} \text{ ist der Durchgriff des Gitters } g_n \text{ auf das Steuergitter } g_1.$$

Spannungsgegenkopplung Anode/Endröhre auf Gitter/Endröhre (Bild 10)

Die Gesamtverstärkung V' der gegengekoppelten Schaltung folgt aus α und den Einzelverstärkungen V_1 und V_2 zu

$$V' = V_1 \frac{V_2}{1 + \alpha V_2}, \text{ weiter gilt hier:} \quad (28)$$

$$Z'_{i2} = \frac{R_{i2}}{1 + \alpha \mu_2} \quad (29)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + Z_b \frac{R_{a1} + R_{i1}}{R_{a1} R_{i1}}} \quad (30)$$

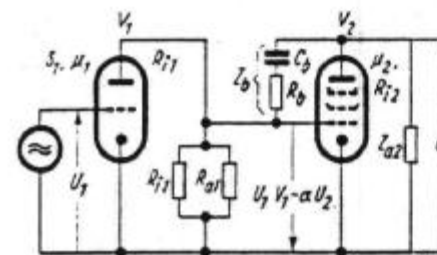


Bild 10

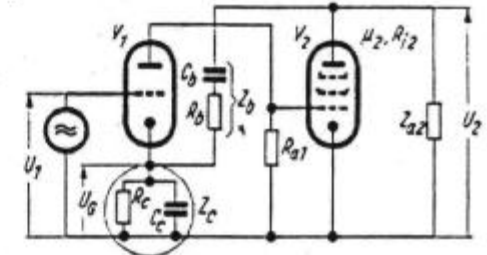


Bild 11

In dieser Schaltung verringert die Gegenkopplung den Vorröhren-Außenwiderstand R_{a1} auf Z'_{a1} . Das ist für die Aussteuerungsfähigkeit der Vorröhre zu beachten, weil dadurch der Klirrgrad ansteigen kann.

$$Z'_{a1} = \frac{R_{a1}}{1 + \alpha V_2 + \alpha V_2 \frac{R_{a1}}{R_{i1}}} \quad (31)$$

Spannungsgegenkopplung Anode/Endröhre auf Kathode/Vorröhre bei Stromgegenkopplung der Vorröhre (Bild 11)

$$V' = \frac{V_1 V_2}{1 + \alpha_1 V_1 + \alpha_2 V_1 V_2} \quad (32)$$

$$Z'_{i2} = \frac{R_{i2}}{1 + \frac{\alpha_2 V_2 \mu_2}{1 + \alpha_1 V_1}} \quad (33)$$

$$\alpha_1 = \frac{Z_c}{R_{a1}} \quad (34)$$

$$\alpha_2 = \frac{Z_c}{Z_b + Z_c} = \frac{Z_c}{Z_b}, \text{ da } Z_b \gg Z_c. \quad (35)$$

Spannungsgegenkopplung von Sekundärseite Ausgangstransformator in Fußpunkt Lautstärkepotentiometer (Bild 12)

Für $Z_4 \ll Z_3$, $Z_a \ll Z_3$ und $R_1 + R_2 \gg Z_4$ gilt für die Gesamtverstärkungen V und V' :

$$V' = \frac{R_2 + Z_4}{R_1 + R_2} \cdot \frac{V}{1 + \alpha V}, \text{ worin} \quad (36)$$

$$\alpha = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} \quad (37)$$

$$Z'_i = \frac{R_i}{1 + \alpha V + \alpha V' \frac{R_i}{Z_a}} \quad (38)$$

$$Z'_e = R_1 + \frac{R_2}{1 + V' \frac{Z_4}{Z_3}} \quad (39)$$

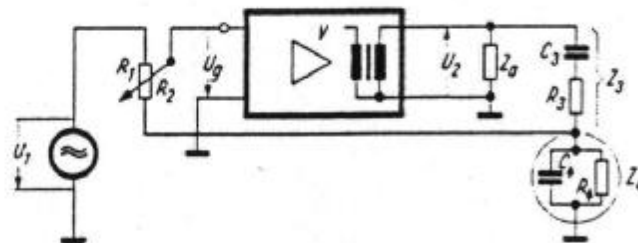


Bild 12

Frequenzabhängige Gegenkopplung

Wird der Spannungsteiler für die Gegenkopplung frequenzabhängig ausgelegt, so ist auch die resultierende Verstärkung V' frequenzabhängig. Von dieser Möglichkeit wird z. B. in Rundfunkempfängern Gebrauch gemacht. Die in den Bildern 10, 11 und 12 dargestellten Schaltungen enthalten frequenzabhängige Gegenkopplungen. Die frequenzabhängigen Glieder sind: in Bild 10 Z_b , in Bild 11 Z_b sowie Z_c und in Bild 12 Z_3 sowie Z_4 .

Zahlenbeispiel zu Bild 10

Gegeben:	$V_1 = 65 \text{ fach}$	$V_2 = 55 \text{ fach}$
	$S_1 = 1 \text{ mA/V}$	$S_2 = 11 \text{ mA/V}$
	$\mu_1 = 80$	$\mu_2 = 440$
	$R_{i1} = 80 \text{ k}\Omega$	$R_{i2} = 40 \text{ k}\Omega$
	$R_{a1} = 348 \text{ k}\Omega$	$R_{a2} = 5,7 \text{ k}\Omega$

Gegenkopplungsweig: $Z_b = R_b + \frac{1}{j \omega C_b}$, $R_b = 1,2 \text{ M}\Omega$, $C_b = 130 \text{ pF}$.

Gesucht:	$\alpha = f(f)$	Bild 13
	$V' = f(f)$	Bild 14
	$Z'_{i2} = f(f)$	Bild 14.
	$Z'_{a1} = f(f)$	

Lösung:

Die Zahlenrechnungen sind hier beispielsweise für eine Frequenz von 1 kHz durchgeführt.

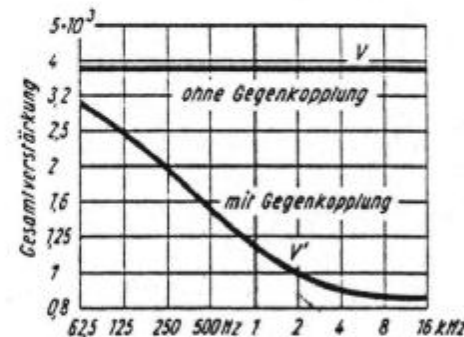


Bild 13

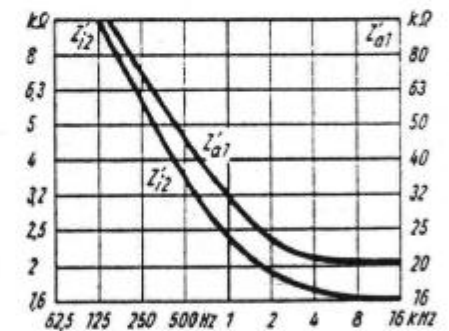


Bild 14

Man verwendet Gl. (30)

$$\alpha = \frac{1}{1 + Z_b \frac{R_{a1} + R_{i1}}{R_{a1} R_{i1}}}. \text{ Hierin ist:}$$

$$Z_b = 1,2 \cdot 10^6 - j \frac{1}{2 \pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 130 \cdot 10^{-12}} = (1,2 - j 1,225) \text{ M}\Omega = 1,71 \text{ M}\Omega \cdot e^{-j45^\circ}$$

$$\frac{R_{a1} + R_{i1}}{R_{a1} R_{i1}} = \frac{348 \cdot 10^3 + 80 \cdot 10^3}{348 \cdot 80 \cdot 10^6} = 15,4 \cdot 10^{-6} \text{ Siemens}$$

$$Z_b \frac{R_{a1} + R_{i1}}{R_{a1} R_{i1}} = 1,71 \cdot 10^6 \cdot e^{-j45^\circ} \cdot 15,4 \cdot 10^{-6} = 26,4 e^{-j45^\circ} \text{ also:}$$

$$|\alpha| = \frac{1}{1 + 26,4 \cdot e^{-j45^\circ}} = 36,5 \cdot 10^{-3}$$

Nun kann man die Verstärkung V' nach Gl. 28 ermitteln:

$$V' = V_1 \frac{V_2}{1 + \alpha V_2} = 65 \frac{55}{1 + 36,5 \cdot 10^{-3} \cdot 55} \\ = 65 \frac{55}{3} = 1180 \text{ fach,}$$

während die Verstärkung V ohne Gegenkopplung gegeben wäre mit

$$V = V_1 V_2 = 65 \cdot 55 = 3580 \text{ fach.}$$

Der reduzierte Innenwiderstand Z'_{i2} folgt aus Gl. (29) zu

$$Z'_{i2} = \frac{R_{i2}}{1 + \alpha \mu_2} = \frac{40 \cdot 10^3}{1 + 36,5 \cdot 10^{-3} \cdot 440} = \frac{40 \cdot 10^3}{17,2} = 2,32 \text{ k}\Omega$$

Den für die Vorröhre wirksamen Außenwiderstand Z'_{a1} gewinnt man aus Gl. (31):

$$Z'_{a1} = \frac{R_{a1}}{1 + \alpha V_2 + \frac{R_{a1}}{R_{i1}} \alpha V_2} \\ = \frac{348 \cdot 10^3}{1 + 36,5 \cdot 10^{-3} \cdot 55 + \frac{348 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^3} 36,5 \cdot 10^{-3} \cdot 55} \\ = \frac{348 \cdot 10^3}{11,7} = 29,8 \text{ k}\Omega.$$

Die Bilder 13 und 14 zeigen V' , Z'_{i2} und Z'_{a1} abhängig von der Frequenz.

Zahlenbeispiel zu Bild 11

Gegeben: Schaltung nach Bild 11, Grundwerte gemäß Zahlenbeispiel zu Bild 1
Hierzu sollen in der Schaltung nach Bild 11 Z_b und Z_c so verwirklicht werden, daß f

$f_0 = 800 \text{ Hz}$ die Phasenwinkel des Längs- und Querzweiges 45° betragen. Damit wird α_2 für 800 Hz am größten und reell (siehe Bild 16) und die Gegenkopplung für ca. 800 Hz am wirksamsten.

Längsweig: $Z_b = R_b + \frac{1}{j\omega C_b}$, worin $R_b = 700 \text{ k}\Omega$ sein möge.

Daraus: $C_b = \frac{1}{2\pi f_0 R_b} = 285 \text{ pF}$

Querweig: $Y_c = \frac{1}{Z_c} = \frac{1}{R_c} + j\omega C_c$, worin $R_c = 1 \text{ k}\Omega$ betragen möge.

Daraus $C_c = \frac{1}{2\pi f_0 R_c} = 0,2 \text{ }\mu\text{F}$

Gesucht: $V' = f(f)$ Bild 15
 $x_1 = f(f)$ Bild 17
 $x_2 = f(f)$ Bild 16.

Lösung: Die Zahlenrechnung ist beispielsweise für die Frequenz 500 Hz durchgeführt
Nach Gl. (34) erhält man

$$x_1 = \frac{Z_c}{R_{a1}} = \frac{1}{R_{a1} Y_c}. \text{ Hierin ist für } 500 \text{ Hz:}$$

$$Y_c = \frac{1}{1 \cdot 10^3} + j 2\pi 500 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} = (1 + j 0,623) \text{ mS} \\ = 1,17 \text{ mS} \cdot e^{j32^\circ}.$$

Daraus folgt α_1 :

$$x_1 = \frac{1}{348 \cdot 10^3 \cdot 1,17 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j32^\circ}} = 2,46 \cdot 10^3 \cdot e^{-j32^\circ}.$$

Nach Gl. (35) ist

$$x_2 = \frac{Z_c}{Z_b} = \frac{1}{Z_b Y_c}.$$

Der Widerstand Z_b beträgt für 500 Hz :

$$Z_b = 700 \cdot 10^3 - j \frac{1}{2\pi 500 \cdot 285 \cdot 10^{-12}} \\ = (700 - j 1120) \text{ k}\Omega = 1,31 \text{ M}\Omega \cdot e^{-j58^\circ}.$$

Mit Y_c und Z_b ergibt sich:

$$\alpha_2 = \frac{1}{1,31 \cdot 10^6 \cdot e^{-j58^\circ} \cdot 1,17 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j32^\circ}}$$

$$= \frac{1}{1,53 \cdot 10^3 \cdot e^{-j26^\circ}} = 0,655 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j26^\circ}$$

Nach Gl. (32) kann gerechnet werden:

$$V' = \frac{V_1 V_2}{1 + \alpha_1 V_1 + \alpha_2 V_1 V_2} \quad \text{Darin sind:}$$

$$\alpha_1 V_1 = 2,46 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-j32^\circ} \cdot 65 = 0,16 \cdot e^{-j32^\circ} = 0,136 - j0,085$$

$$\alpha_2 V_1 V_2 = 0,655 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j26^\circ} \cdot 65 \cdot 55 = 2,34 \cdot e^{j26^\circ} = 2,1 + j1,03$$

Der Realteil a des Nenners im Ausdruck für V' ist:

$$a = 1 + 0,136 + 2,1 = 3,236$$

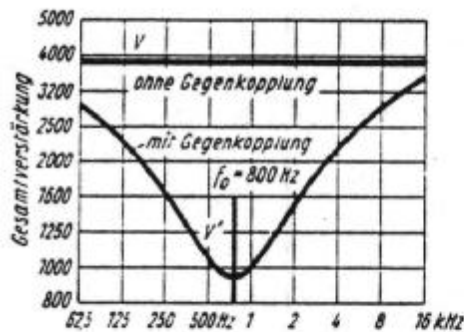


Bild 15

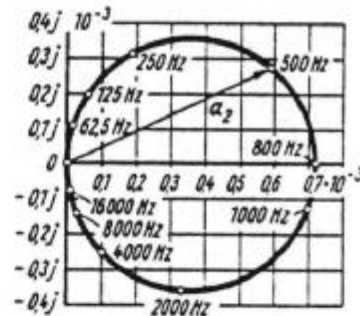


Bild 16

Der Imaginärteil b des Nenners im Ausdruck für V' beträgt:

$$b = -0,085 + 1,03 = 0,945$$

Für den Nennerbetrag erhält man somit

$$|a + jb| = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{3,236^2 + 0,945^2} = 3,36$$

Die reduzierte Verstärkung V' beläuft sich demgemäß bei 500 Hz auf:

$$V' = \frac{V_1 V_2}{|a + jb|} = \frac{65 \cdot 55}{3,36} = 1065 \text{ fach.}$$

Bild 15 zeigt – abhängig von der Frequenz – die Verstärkungen V und V' . Die Ortskurven für α_1 und α_2 sind in den Bildern 16 und 17 aufgetragen.

Zahlenbeispiel zu Bild 12

Die Gegenkopplung sei hier bei $f_0 = 1 \text{ kHz}$ am wirksamsten.

Gegeben

$V = 106$ fach; $Z_a = 5 \Omega$ reell;
Lautstärkereger ($R_1 + R_2$) = $1 \text{ M}\Omega$

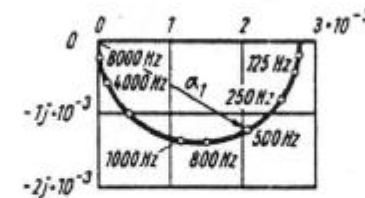


Bild 17

Längsweig: $Z_3 = R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}$, worin $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ sein soll.

Daraus mit $R_3 = \frac{1}{j\omega_0 C_3}$ für 1 kHz : $C_3 = \frac{1}{2\pi f_0 R_3} = 160 \text{ nF}$

Querweig: $Y_4 = \frac{1}{Z_4} = \frac{1}{R_4} + j\omega C_4$; mit $R_4 = 100 \Omega$.

Daraus mit $R_4 = \frac{1}{j\omega_0 C_4}$ für 1 kHz : $C_4 = \frac{1}{2\pi f_0 R_4} = 1,6 \mu\text{F}$

Gesucht:

$$a = f(f) \text{ und } f\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)$$

$$V' = f(f) \text{ und } f\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \quad \text{Bild 18}$$

$$Z'_e = f(f) \text{ und } f\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \quad \text{Bild 19.}$$

Lösung: Die Zahlenrechnung ist als Beispiel für eine Frequenz von 500 Hz durchgeführt.

Nach Gl. (37) gilt:

$$a = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{Z_4}{Z_3} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{Z_3 Y_4}$$

der Widerstand Z_3 beträgt:

$$Z_3 = 1 \cdot 10^3 - j \frac{1}{2\pi \cdot 500 \cdot 0,16 \cdot 10^{-6}}$$

$$= (1 - j2) \text{ k}\Omega = 2,24 \text{ k}\Omega \cdot e^{-j64^\circ}$$

Der Leitwert Y_4 ergibt sich zu

$$Y_4 = \frac{1}{100} + j 2 \pi 500 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} = (10 + j 5) \text{ mS} = 11,2 \text{ mS} \cdot e^{j 26,5^\circ}$$

Damit ist:

$$\frac{1}{Z_3 Y_4} = \frac{1}{2,24 \cdot 10^3 \cdot e^{-j 64^\circ} \cdot 11,2 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j 26,5^\circ}} = 0,04 \cdot e^{j 37,5^\circ}$$

Für $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ werden nun zwei Fälle angenommen:

Fall a: $R_1 = 950 \text{ k}\Omega$, also: $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$; $\frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0,95$; $\frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0,05$.

Fall b: $R_1 = 500 \text{ k}\Omega$, also: $R_2 = 500 \text{ k}\Omega$; $\frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0,5$; $\frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0,5$.

Dazu gehören:

$$\alpha_a = 0,95 \cdot 0,04 \cdot e^{j 37,5^\circ} = 0,038 \cdot e^{j 37,5^\circ} \text{ und}$$

$$\alpha_b = 0,5 \cdot 0,04 \cdot e^{j 37,5^\circ} = 0,02 \cdot e^{j 37,5^\circ}$$

Mit Gl. (36) ist

$$V' = \frac{R_2 + Z_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{V}{1 + \alpha V}, \text{ worin } R_2 \gg Z_1, \text{ also}$$

$$V' = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{V}{1 + \alpha V}$$

$$\alpha_a V = 0,038 \cdot e^{j 37,5^\circ} \cdot 106 = 4,0 \cdot e^{j 37,5^\circ} = 3,2 + j 2,4$$

$$\alpha_b V = 0,02 \cdot e^{j 37,5^\circ} \cdot 106 = 2,12 \cdot e^{j 37,5^\circ} = 1,7 + j 1,27$$

$$1 + \alpha_a V = 4,2 + j 2,4$$

$$1 + \alpha_b V = 2,7 + j 1,27$$

$$|1 + \alpha_a V| = 4,82$$

$$|1 + \alpha_b V| = 2,98$$

$$V'_a = 0,05 \frac{106}{4,82} = 1,1 \text{ fach}$$

$$V'_b = 0,5 \frac{106}{2,98} = 17,8 \text{ fach.}$$

Gl. (39) besagt:

$$Z'_e = R_1 + \frac{R_2}{1 + V \frac{Z_4}{Z_3}} = R_1 + \frac{R_2}{1 + V \frac{1}{Z_3 Y_4}}, \text{ worin}$$

$$\frac{1}{Z_3 Y_4} = 0,04 \cdot e^{j 37,5^\circ}$$

Hieraus folgt allgemein, also zu Fall a und zu Fall b

$$1 + V \frac{1}{Z_3 Y_4} \text{ zu: } 1 + 106 \cdot 0,04 \cdot e^{j 37,5^\circ} = 1 + 3,4 + j 2,56$$

$$= 4,4 + j 2,56 = 5,1 \cdot e^{-j 30,5^\circ}$$

Zu Fall b ($R_1 = 500 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 500 \text{ k}\Omega$) gehört somit:

$$Z'_e = 500 \text{ k}\Omega + \frac{500 \text{ k}\Omega}{5,1 \cdot e^{j 30,5^\circ}} = 500 \text{ k}\Omega + 98 \cdot e^{-j 30,5^\circ} \text{ k}\Omega$$

$$= 500 \text{ k}\Omega + 84,5 \text{ k}\Omega - j 49,6 \text{ k}\Omega = (584,5 - j 49,6) \text{ k}\Omega$$

$$= 585 \text{ k}\Omega \cdot e^{-j 4,8^\circ}$$

Bild 18 zeigt die Verstärkungen V' abhängig von der Frequenz für $\frac{R_2}{R_1 + R_2} = 1, 0,5$

und 0,05. Man erkennt deutlich, daß mit wachsendem $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ der Einfluß der Gegenkopplung auf den Frequenzgang sinkt. Dies entspricht der physiologischen Lautstärke-regelung. Bild 19 enthält die Ortskurve des Eingangswiderstandes Z'_e für Fall b.

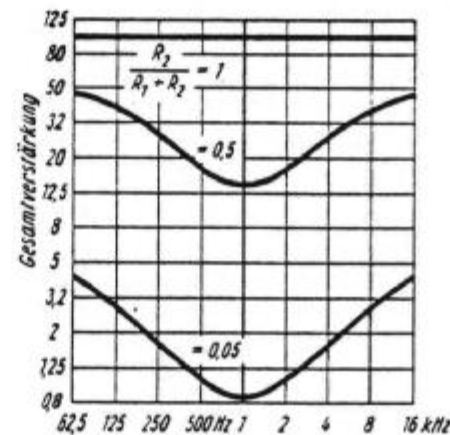


Bild 18

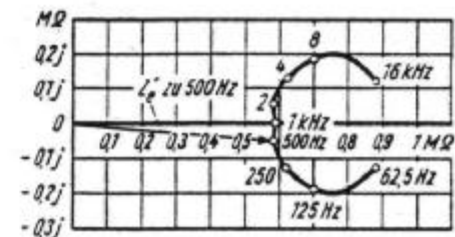


Bild 19

Gegenkopplung in Gegentaktschaltungen mit Kathodenwiderständen (Bild 20)

An dem gemeinsamen Kathodenwiderstand R_d (Bild 20) entsteht die Vorspannung für beide Röhren in der Weise, daß sie für den Gesamtanodenstrom stabilisierend wirkt. Gleichsinnige Änderungen der zwei Gitterspannungen kommen also nur geschwächt zur Geltung. Für eine gleichsinnige Spannungsänderung ΔU_g ist die reduzierte Anodenstromänderung entsprechend Gl. (20):

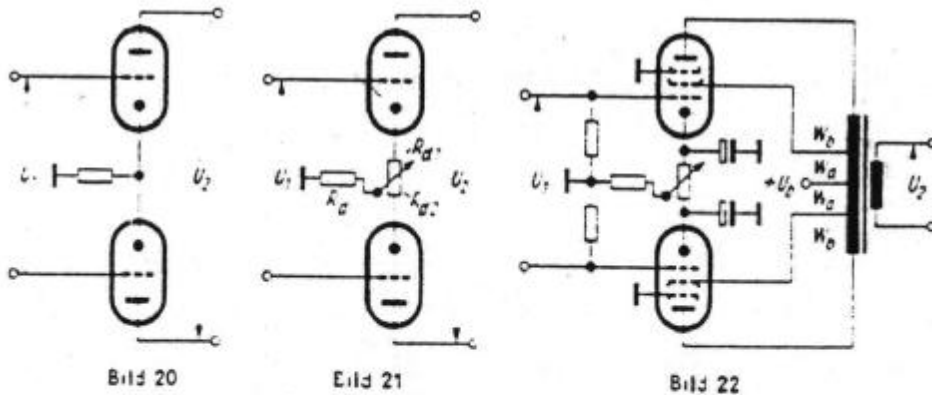
$$\Delta I'_a = \Delta U_g \cdot \frac{S}{1 + S R_d} \quad (40)$$

Eine Gegenkopplung für gegenseitige Gitterspannungsschwankungen ergibt sich damit nicht.

Außer dem gemeinsamen Kathodenwiderstand R_d kann man noch zwei Einzelkathodenwiderstände R_{d1} und R_{d2} einfügen. Daraus folgt auch für gegenseitig auf die Gitter wirkende Eingangsspannungen eine – allerdings nur geringe – Gegenkopplung. R_{d1} und R_{d2} können zu einem Symmetrierpotentiometer zusammengefaßt sein (Bild 21).

Schirmgitter-Gegenkopplung in Gegentaktschaltungen (Bild 22)

Vielfach wird heute in Gegentaktschaltungen von Endstufen eine Gegenkopplung auf die Schirmgitter der Endröhren angewandt. Die beiden Anzapfungen für die Schirmgitter



werden je nach Röhrentyp und Betriebsbedingungen zu 20 .. 50% der Windungszahlen (ab Mittelpunkt) der Anodenwicklungshälfte gewählt.

Die Verstärkung reduziert sich hiermit entsprechend Gl. (16) auf

$$V' = \frac{\Gamma}{1 + a_U \Gamma}, \text{ worin} \quad (41)$$

$$a_U = \frac{1}{\mu_{21}} \cdot \frac{\omega_a}{\omega_a + \omega_b} \quad (42)$$

Der Innenwiderstand wird entsprechend Gl. (14) verringert

$$R'_i = \frac{R_i}{1 + a_U \mu}$$

Damit nähert sich das Verhalten der Pentode bzw. Tetrode dem der Triode. Verzerrungen werden durch die Stromübernahme der Schirmgitter zusätzlich vermindert.