



Faszination Röhre Teil 4

In diesem vierten Teil unserer Artikelserie beschäftigen wir uns eingehend mit der für alle Arten von Verstärkerschaltungen wichtigen Schaltungsmaßnahme Gegenkopplung. Erst hiermit ist es im wesentlichen möglich, den Übertragungsbereich eines Verstärkers zu beeinflussen.

Wichtiger Trick - die Gegenkopplung in Röhrenverstärkern

Die Gegenkopplung ist eine der wichtigsten Schaltungsmaßnahmen im Verstärkerbau, denn auch hier sind die Kenndaten einer Schaltung wesentlich beeinflussbar und wichtige Funktionen erst realisierbar. Sie basiert auf Rückkopplungseffekten zwischen Ein- und Ausgang einer Schaltung.

Unter Rückkopplung versteht man allgemein die Rückführung eines Teils der Ausgangsleistung einer (oder mehrerer) Verstärkerstufen auf den Eingang der Schaltung. Ist die Phasenlage der rückge-

koppelten Ausgangsspannung invers zu der der Eingangsspannung, so wirkt sie dieser entgegen - wir nennen diesen Effekt Gegenkopplung und nutzen ihn auf die verschiedensten Weisen aus.

Die Gegenkopplungsspannung kann entweder zur Verstärkerausgangsspannung oder zum Ausgangsstrom proportional sein. Auch eine Kombination beider Varianten ist möglich. Entsprechend bezeichnet man die Schaltungsanordnungen mit **Spannungsgegenkopplung**, **Stromgegenkopplung** oder **gemischter Spannungs-/Stromgegenkopplung**.

Das Verhältnis der auf den Eingang zurückgeführten Spannung U_g zur Ausgangs-

spannung U_2 wird als Gegenkopplungsgrad bezeichnet:

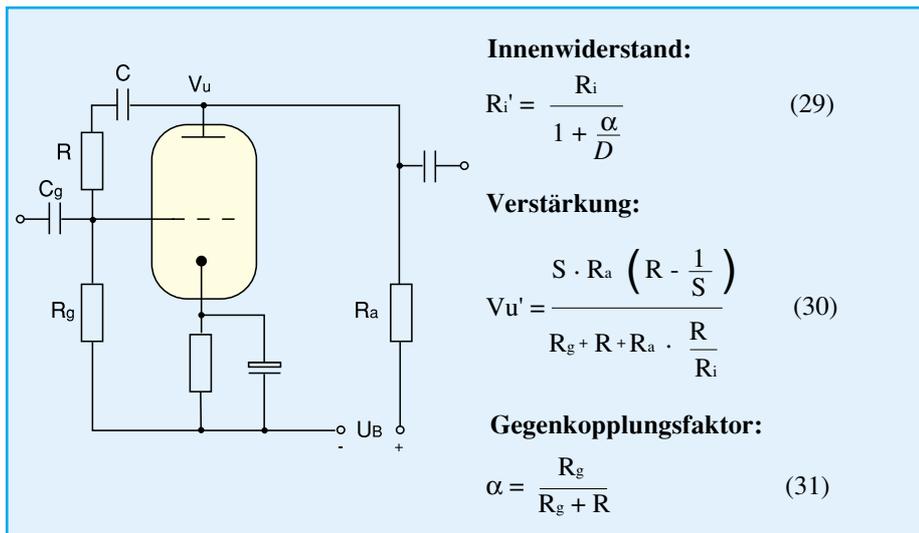
$$\alpha = \frac{U_g}{U_2} \quad (26)$$

Durch die Gegenkopplung sind die wichtigsten Eigenschaften der Gesamtschaltung in weiten Grenzen veränderbar:

- die **Verstärkung** (V) ohne Gegenkopplung sinkt auf den Wert mit Gegenkopplung:

$$V' = \frac{V}{1 + \alpha V} \quad (27)$$

- die **nichtlinearen Verzerrungen** der Schaltung (k) ohne Gegenkopplung



Innenwiderstand:

$$R_i' = \frac{R_i}{1 + \frac{\alpha}{D}} \quad (29)$$

Verstärkung:

$$V_{u'} = \frac{S \cdot R_a \left(R - \frac{1}{S} \right)}{R_g + R + R_a \cdot \frac{R}{R_i}} \quad (30)$$

Gegenkopplungsfaktor:

$$\alpha = \frac{R_g}{R_g + R} \quad (31)$$

Bild 24: Einfache Spannungsgegenkopplung von der Anode auf das Gitter

werden auf den Wert mit Gegenkopplung wie folgt reduziert:

$$k' = \frac{k}{1 + \alpha V} \quad (28)$$

- Die Gegenkopplung der Schaltung beeinflusst auch die **Eingangs- und Innenwiderstände** in weiten Grenzen, da die Röhrenkennwerte S , D und R_i eine Funktion der Gegenkopplung sind.

So wird beispielsweise bei der Spannungsgegenkopplung R_i verringert und D vergrößert, während S konstant bleibt. Bei der Stromgegenkopplung dagegen wird R_i vergrößert und S verringert. D bleibt hier konstant.

Durch geeignete Dimensionierung der Gegenkopplung sind z. B. Pentodendaten, konkret deren nichtlineare Verzerrungen, denen der Triode anzunähern oder Eingangs- und Ausgangswiderstände der Schaltung sind dem Zweck der Schaltung

anpaßbar.

Besondere Bedeutung hat die Verringerung der mit zunehmender Aussteuerung wachsenden nichtlinearen Verzerrungen durch eine Gegenkopplung.

Führt man die Gegenkopplung frequenzabhängig aus, kann man so den Frequenzgang eines Verstärkers beeinflussen, wie wir schon im Schaltungsbeispiel in Abbildung 21 sehen konnten. Man erhält so Klangregelglieder, die fest wie im Entzerrvorverstärker oder einstellbar („Klangregelung“) ausgeführt sein können.

Diese wenigen Beispiele zeigen sehr deutlich die Bedeutung einer sorgfältig dimensionierten Gegenkopplung auf, deshalb wollen wir die einzelnen Varianten in der Folge näher betrachten und praktisch dimensionieren.

Gegenkopplungsschaltungen

Abbildung 24 zeigt die einfachste Versi-

on der Spannungsgegenkopplung. Durch die Widerstände R und R_g (der gleichzeitig Gitterableitwiderstand ist), wird eine Teilung der Ausgangsspannung realisiert. Der Gegenkopplungsgrad ist durch das Widerstandsverhältnis festgelegt.

Der Kondensator C dient der Abtrennung der Anodengleichspannung. Wählt man seine Größe so, daß sein kapazitiver Widerstand im interessierenden Frequenzbereich nicht mehr gering gegen den Widerstand R ist, wird die Gegenkopplung frequenzabhängig. Es kommt zur Anhebung der tiefen Frequenzen. Die Kennwerte für R_i' , $V_{u'}$ und α ergeben sich aus den Formeln (29, 30 und 31) in Abbildung 24.

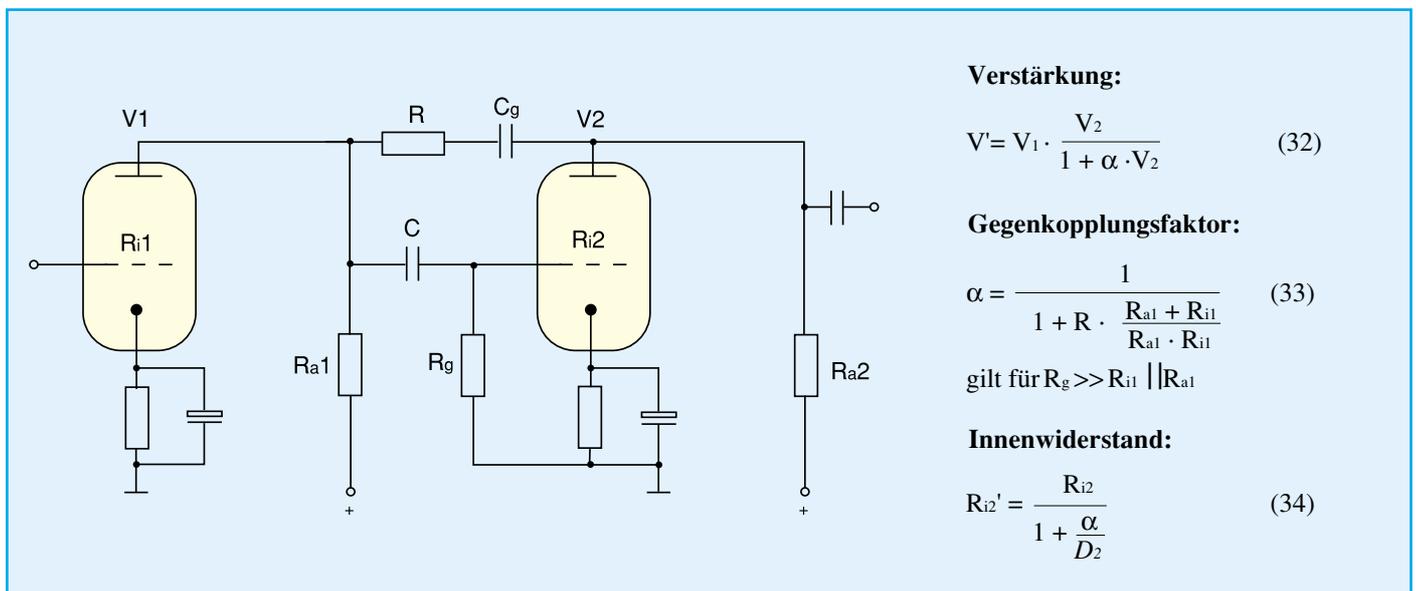
Die Spannungsgegenkopplung zweier Röhrensysteme (Anode auf die Anode der vorhergehenden Stufe) ist in Abbildung 25 zu sehen. Die Wirkungsweise ist ähnlich der einfachen Spannungsgegenkopplung in Abbildung 24. Der Unterschied zu dieser Schaltung besteht jedoch darin, daß sich der masseseitige Teilerwiderstand wie folgt zusammensetzt:

$$R = R_i \parallel R_a \parallel R_g \quad (\text{wenn gilt: } R_{Cg} \ll R_g)$$

Die entsprechenden Berechnungsgrundlagen für die Verstärkung, den Gegenkopplungsfaktor und den Innenwiderstand der Schaltung finden Sie in Abbildung 25.

Zu beachten ist hier, daß der Außenwiderstand der ersten Röhre (R_{a1}) verkleinert wird, wodurch sich die Aussteuerfähigkeit zwar verringert, die Verzerrungen aber ebenfalls.

Ein Beispiel für die stark verbreitete kombinierte Spannungs-/Stromgegenkopplung zweier Röhrenstufen zeigt Abbildung 26 neben den zugehörigen Formeln zur Berechnung des Verstärkungsfaktors. Hier erfolgt eine Spannungsgegenkopplung von der Anode in den Kato-



Verstärkung:

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

Gegenkopplungsfaktor:

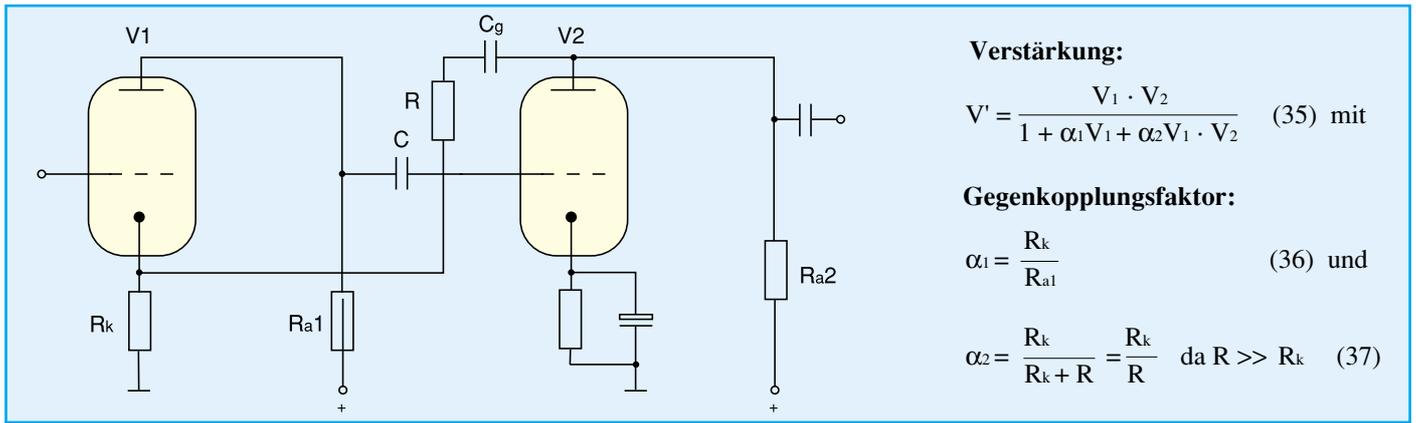
$$\alpha = \frac{1}{1 + R \cdot \frac{R_{a1} + R_{i1}}{R_{a1} \cdot R_{i1}}} \quad (33)$$

gilt für $R_g \gg R_{i1} \parallel R_{a1}$

Innenwiderstand:

$$R_{i2}' = \frac{R_{i2}}{1 + \frac{\alpha}{D_2}} \quad (34)$$

Bild 25: Spannungsgegenkopplung zweier Röhrenstufen (Anode auf Anode der vorhergehenden Stufe)



Verstärkung:

$$V' = \frac{V_1 \cdot V_2}{1 + \alpha_1 V_1 + \alpha_2 V_1 \cdot V_2} \quad (35) \text{ mit}$$

Gegenkopplungsfaktor:

$$\alpha_1 = \frac{R_k}{R_{a1}} \quad (36) \text{ und}$$

$$\alpha_2 = \frac{R_k}{R_k + R} = \frac{R_k}{R} \quad \text{da } R \gg R_k \quad (37)$$

Bild 26: Gegenkopplung über mehrere Stufen (von der Anode in den Katodenkreis der Vorröhre)

zusätzlich stromgegengekoppelt ist (siehe dazu auch Abbildung 27). Auch hier gilt, daß die Gegenkopplung frequenzabhängig wird, falls der kapazitive Widerstand des Kondensators C_g für die Betriebsfrequenz nicht mehr klein gegenüber R ist.

In Abbildung 27 ist nochmals das Beispiel für die Stromgegengkopplung einer einzelnen Röhre zu sehen. Die am Widerstand R_k (oberer Bildteil) bei Aussteuerung entstehende Wechselspannung ist mit der Eingangswechselspannung gegenphasig in Reihe geschaltet und proportional dem durch R_k fließenden Wechselstrom. Die Verstärkung der Stufe ist

$$V' = \frac{V}{1 + \alpha_i V} \quad (38) \text{ mit}$$

$$\alpha_i = \frac{U_{Rk}}{U_{Ra}} = \frac{R_k}{R_a} \quad (39),$$

da beide Widerstände vom gleichen Strom durchflossen werden.

Ein Spezialfall der Schaltung ergibt sich, wenn $R_k = R_a$ gewählt wird. Dann gilt

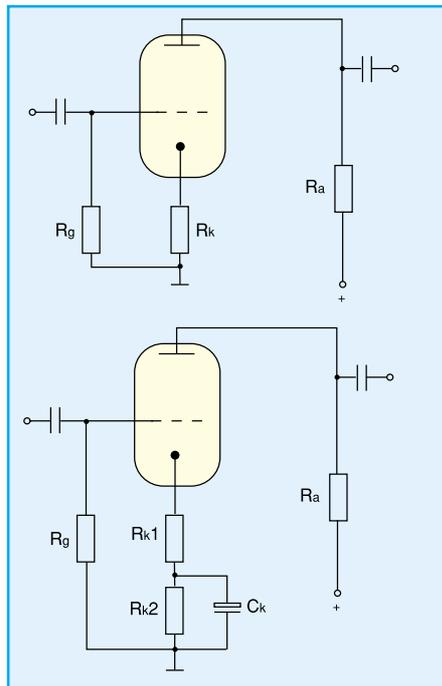


Bild 27: Zwei Varianten der Stromgegengkopplung

$$V' = \frac{V}{1 + V} = \frac{1}{\frac{1}{V} + 1} \quad (40)$$

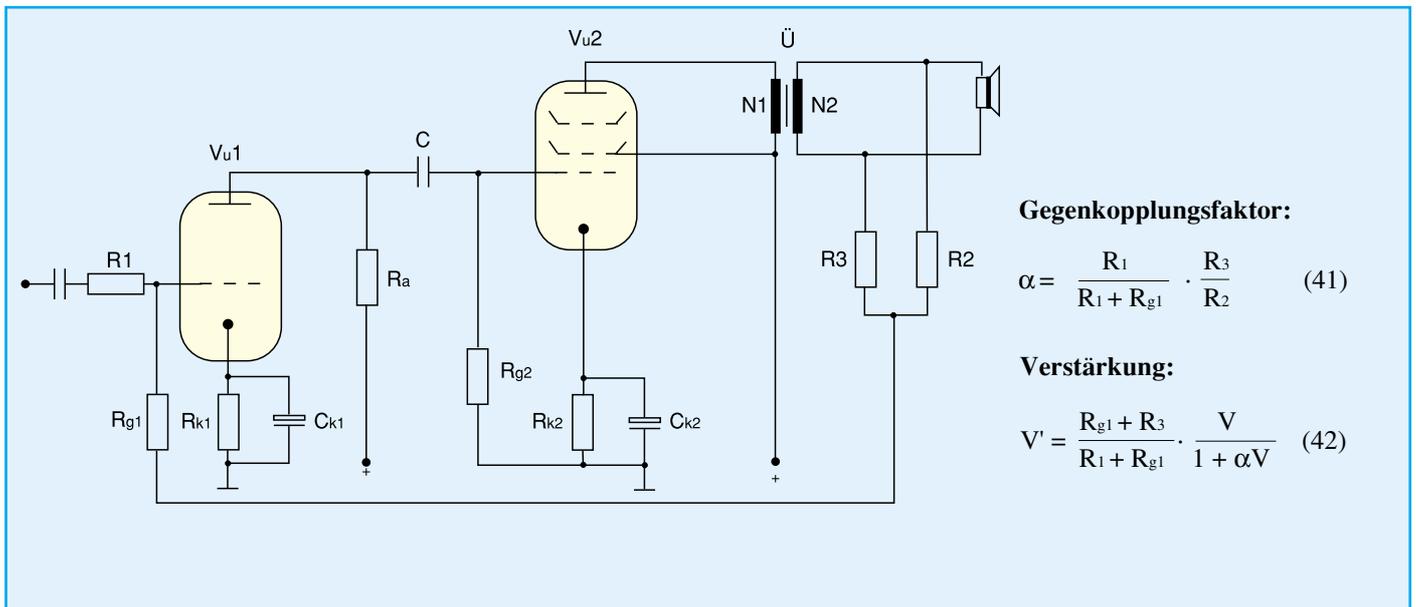
Für $V \gg 1$ nähert sich die Verstärkung V' dem Wert 1, und an R_a und R_k treten gleich große, gegenphasige Spannungen auf. Dieses Schaltungsprinzip finden wir oft als Phasenumkehrstufe zur Ansteuerung von Gegentaktendstufen wieder.

Im unteren Teil von Abbildung 27 stellen sich die gleichen Verhältnisse wie zuvor besprochen ein, jedoch ist der Widerstand der Katodenleitung in R_{k1} und R_{k2} aufgeteilt. Das läßt eine automatische Gitterspannungserzeugung zu:

$$U_g = (R_{k1} + R_{k2}) \cdot I_a$$

Für die Gegenkopplung ist nur der Widerstand R_{k1} von Bedeutung, da R_{k2} durch C_{k2} wechsellspannungsmäßig kurzgeschlossen ist und daher an ihm keine Gegenwechselspannung entstehen kann.

Eine in Niederfrequenzverstärkern in unterschiedlichen Dimensionierungen immer wiederzufindende Variante der Ge-



Gegenkopplungsfaktor:

$$\alpha = \frac{R_1}{R_1 + R_{g1}} \cdot \frac{R_3}{R_2} \quad (41)$$

Verstärkung:

$$V' = \frac{R_{g1} + R_3}{R_1 + R_{g1}} \cdot \frac{V}{1 + \alpha V} \quad (42)$$

Bild 28: Gegenkopplung „über alles“ von der Sekundärseite des Ausgangsübertragers auf den Eingang der Vorstufe.

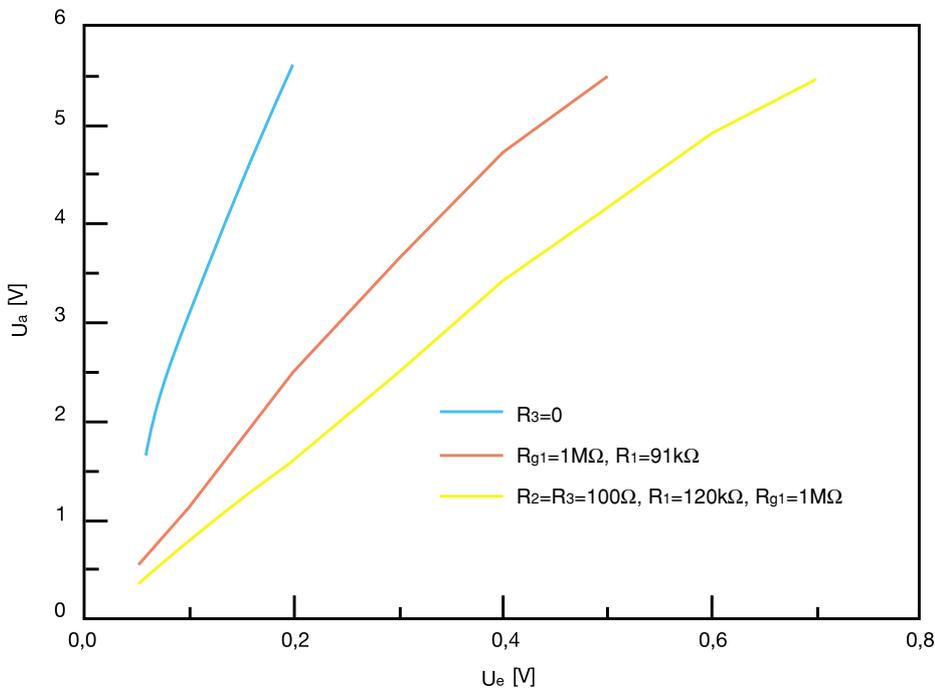


Bild 29: Gegenkopplung „über alles“ von der Sekundärseite des Ausgangsübertragers auf den Eingang der Vorstufe.

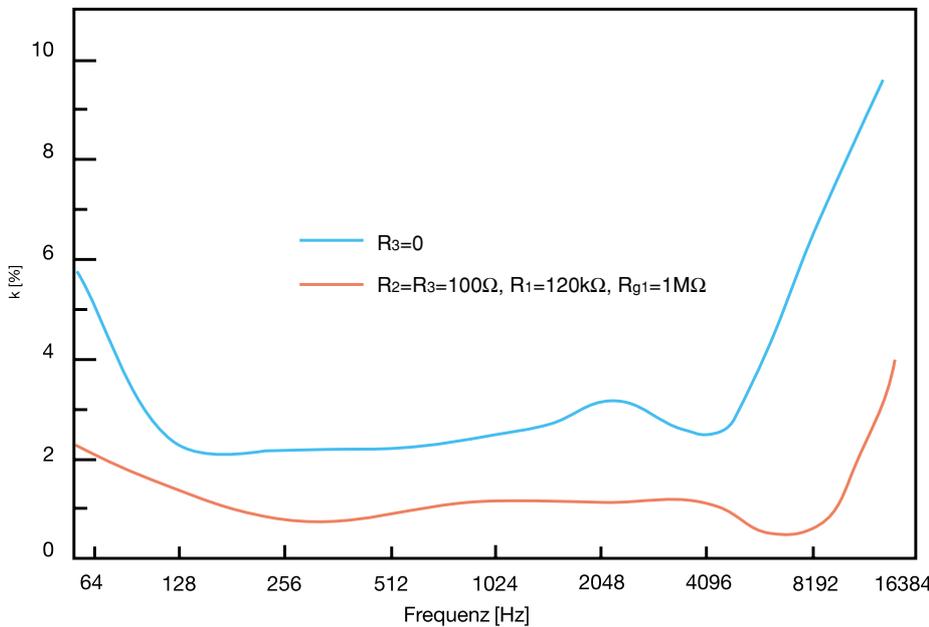
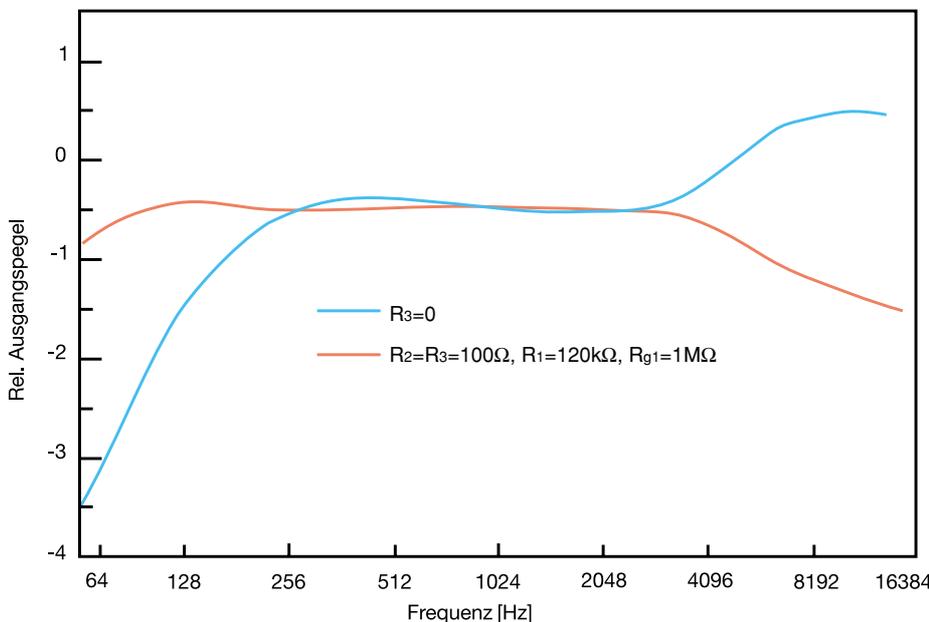


Bild 30 (oben): Der Klirrfaktorverlauf der Schaltung nach Bild 28 bei konstanter Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Übertragungsfrequenz
Bild 31 (unten): Relativer Ausgangspegel als Funktion der Eingangsfrequenz bei konstanter Eingangsspannung



genkopplung ist die „Gegenkopplung über alles“, d. h., wie in Abbildung 28 dargestellt, von der Sekundärseite des Ausgangsübertragers auf den Eingang der Vorstufenröhre. Diese Schaltung wird hauptsächlich zur Reduzierung der nichtlinearen Verzerrungen der Leistungsverstärkerstufe und, wenn die Gegenkopplung zusätzlich frequenzabhängig gestaltet wird, zur Linearisierung des Frequenzgangs eingesetzt.

Eine weitere, weitverbreitete Schaltungsvariante dieser Gegenkopplungsart besteht darin, daß die Gegenkopplungsspannung unter Weglassen des Kondensators C_{k1} auf die Katode der Vorröhre erfolgt. Diese Version entspricht der in Abbildung 26 dargestellten, nur die Quelle der Gegenkopplungsspannung ist eine andere.

Vor allem die Senkung des Klirrfaktors einer Röhrendstufe ist eine der Hauptaufgaben der Gegenkopplung. Gelingt hier eine exakte Dimensionierung, so ist der spätere Hörerfolg sicher.

Ergebnisse ...

Die Diagramme der Abbildungen 29 bis 31 zeigen für eine praktisch ausgeführte Schaltung nach Abbildung 28 die Abhängigkeit der nichtlinearen Verzerrungen, des Frequenzgangs und der benötigten Eingangsspannung für verschiedene Ausgangsleistungen vom Gegenkopplungsfaktor. Hier kann man sehr anschaulich den Einfluß unterschiedlicher Schaltungsdimensionierungen nachvollziehen und deutlich sehen, wie wichtig und wirkungsvoll die Schaltungsmaßnahme Gegenkopplung gerade im Bereich der NF-Verstärkung für die exakte Funktion der Schaltung ist.

Deshalb sollte man gerade diesem Schaltungsdetail, neben der Arbeitspunkteinstellung, besondere Aufmerksamkeit widmen.

Einige traditionelle Hersteller von Röhrenverstärkern wie Marshall, Laney, Orange haben in der Vergangenheit diese Kunst der Schaltungsdimensionierung zu einer wahren Blüte getrieben, so daß ganz bestimmte Soundlinien, z. B. bei Gitarrenverstärkern, kreiert werden konnten, deren Entstehung das wohl bestgehütete Geheimnis der Branche ist.

Denn nicht umsonst bevorzugten bzw. bevorzugten solche große Gitarristen wie Jimi Hendrix, John Lee Hooker, Keith Richards und auch technische Perfektionisten wie Pink Floyd oder Dire Straites und andere ganz bestimmte Marken und Konfigurationen ihrer Röhren-Bühnenverstärker.

Im fünften Teil unserer Artikelserie unternehmen wir einen interessanten Exkurs durch die praktischen Anwendungen der Röhren in der HF-Technik von der Empfängervorstufe bis zur Senderendstufe. **ELV**