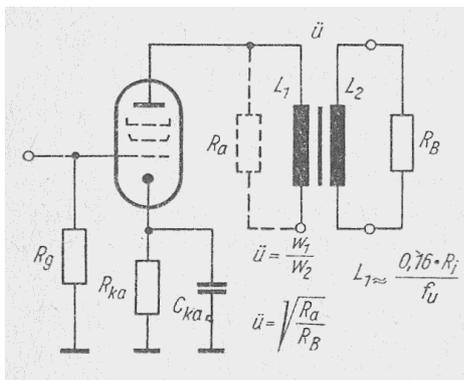
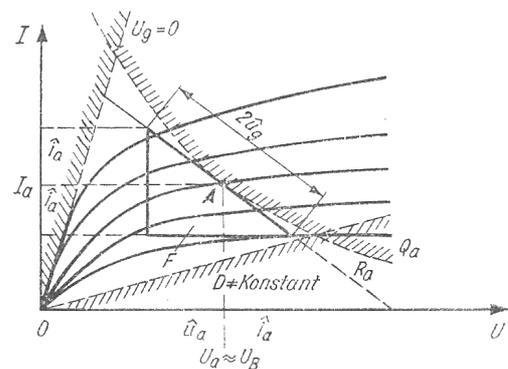


### 1.3. Leistungsverstärker

Die von einer Röhre abgegebene Wechselstromleistung kann man verschiedentlich verwenden, wie das beispielsweise zum Betrieb eines Lautsprechers geschieht. Allgemein ist der Lastwiderstand, an den die Röhre ihre Leistung abgibt, niederohmig. Aus diesen Grunde muß man ihn an den Außenwiderstand der Röhre anpassen. Das geschieht mit Hilfe eines Transformators, dessen Übersetzungsverhältnis  $\hat{u} = \sqrt{R_a / R_B}$  beträgt. Die optimale Leistungsabgabe erhält man, wenn  $R_i = R_a$  ist. Infolge der nichtlinearen Kennlinie der Röhre sowie der größeren Aussteuerung am Gitter ergeben sich aber Verzerrungen. Sie machen sich besonders bei der Lautsprecherwiedergabe unangenehm bemerkbar. Deshalb muß man bei der Dimensionierung von Endstufen auf den Grad der Verzerrungen Rücksicht nehmen. Bei Pentoden ist der Außenwiderstand etwa 0,15  $R_i$ . Das Aussteuerungsgebiet der Endröhren wird eingegrenzt durch die maximale Anodenverlustleistung, die Gittervorspannung von  $-1$  V (es darf kein Gitterstrom fließen) sowie durch die Durchgriffsverzerrungen; sie treten bei zu hohem Außenwiderstand auf. Bild 15a zeigt einen Leistungsverstärker im Prinzip. Darunter ist ein Kennlinienfeld mit den angegebenen Grenzen zu erkennen.



Bilder  
<15a 15b>



Der Arbeitspunkt muß immer innerhalb dieses Feldes liegen. Für symmetrische Aussteuerung muß gesorgt werden. Das Dreieck im Kennlinienfeld des Bildes gestattet eine Aussage über die von der Röhre gewonnene Wechselstromleistung; sie ist  $P_{\sim} \hat{=} 1/4 * F$  ( $F$  = Flächeninhalt des Dreiecks). Ohne Aussteuerung fließt der Anodenstrom  $I_a$ , wenn die Anodenspannung  $U_a$  (bei Pentoden auch die Schirmgitterspannung) vorhanden ist. Der Arbeitspunkt wird noch von der Gittervorspannung beeinflusst.

Für den Wirkungsgrad gilt bekanntlich allgemein  $\eta = P_{\sim} / P_{\_}$ .  $P_{\sim}$  ist die abgegebene Wechselstromleistung,  $P_{\_}$  die anodenseitig in die Röhre hineingesteckte Gleichstromleistung. Beim A- Verstärker — wie das bei den besprochenen Leistungsverstärkern der Fall sein soll — ist  $P_{\_}$  maximal  $Q_a$ . Die Anodenverlustleistung  $Q_a$ , ist in den Kenndaten der Röhren angegeben. Die Röhre gibt folgende Wechselstromleistung ab:

$$P_{\sim} = \frac{\hat{u}_a * \hat{i}_a}{2} = \frac{\hat{u}_g^2 * S}{2 * D} * \frac{z}{(1+z)^2}; \tag{44}$$

$P$  in mW,  $S$  in mA/V,  $\hat{u}$  in V.

In dieser Gl. ist  $z = R_a / R_i$ . Es wird vorausgesetzt, daß für alle Übertragungsfrequenzen der Außenwiderstand praktisch reell ist. Infolge des Anodengleichstroms, der durch die Primärwicklung des Anpassungstransformators fließt, findet eine Vormagnetisierung des Kernes statt. Deshalb treten Schwierigkeiten bei Realisierung der erforderlichen Induktivität auf; denn bei der niedrigsten Betriebsfrequenz soll ja ihr Blindwiderstand noch hochohmig gegen den Außenwiderstand sein! Mit  $z=1$  erhält man bei Trioden die Wechselstromleistung von

$$P_{\sim Tr} = \frac{\hat{u}_{g^2} * S}{8 * D}; \quad (45)$$

$P_{\sim Tr}$  in mW

Setzt man dagegen  $z = 0,15$ , wie es bei Pentoden der Fall sein wird, so ergäbe sich die Wechselstromleistung

$$P_{\sim Pe} = 5,7 * 10^{-2} * \frac{\hat{u}_{g^2} * S}{D} \quad (46)$$

$P_{\sim Pe}$  in mW.

Die zu diesen Leistungen gehörenden Gitterwechselspannungen sind

$$\hat{u}_{gTr} \approx 2,83 \sqrt{\frac{P * D}{S}} \quad \text{und} \quad \hat{u}_{gPe} \approx 4,2 \sqrt{\frac{P * D}{S}} \quad (47)$$

$\hat{u}_{gTr}$  und  $\hat{u}_{gPe}$  in V.

Der Wirkungsgrad liegt praktisch zwischen 20 bis 40%.

### Beispiel 10

Es sind die Gitterwechselspannungen für maximale Leistungsabgabe bei einer Triode und Pentode zu ermitteln. Die Wechselstromleistung soll 4 W betragen. Bei der Triode ist die Steilheit  $S = 6$  mA/V und der Durchgriff  $D = 25$  %. Dagegen beträgt die Steilheit der Pentode 10 mA/V und der Durchgriff 0,3 %.

Es ergeben sich mit Gl. (47)

$$\hat{u}_{gTr} \approx 2,83 * \sqrt{\frac{4 * 25 * 10^{-2}}{6 * 10^{-3}}} = 36,3 \text{ V};$$

$$\hat{u}_{gPe} \approx 4,2 * \sqrt{\frac{4 * 3}{10}} = 4,6 \text{ V};$$

Man erkennt den großen Vorteil der Pentode bezüglich der erforderlichen Gitterwechselspannung. Dadurch kann man gegebenenfalls eine NF-Verstärkerstufe einsparen

### 1.3.1. Verzerrungen

Legt man an den Eingang einer Übertragungseinrichtung eine unverzerrte Wechselgröße, so kann infolge von Nichtlinearitäten in der Einrichtung eine Verformung dieser Größe entstehen. Zur Beurteilung der entstandenen Verzerrung hat man den Klirrfaktor definiert. Er ist das Verhältnis des Effektivwertes des Stromes bzw. der Spannungen sämtlicher Oberwellen zum Effektivwert des Gesamtstroms oder der Gesamtspannung.

In mathematischer Ausdrucksweise ergäbe sich dann z. B.

$$K = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_n^2}} * 100; \quad (48)$$

K in %.

$U_0$  ist der Effektivwert der Grundwelle und  $U_n$  der Effektivwert der n-ten Oberwelle. Der Klirrfaktor ist rechnerisch, grafisch oder meßtechnisch bestimmbar. Zur überschlagsmäßigen Ermittlung von K bei Pentoden gilt folgende Näherungsbeziehung:

$$K \approx 12,5 * \frac{\hat{u}_g}{U_{st}}; \quad (49)$$

K in %.

Infolge des sehr kleinen Durchgriffs bei Pentoden gilt für die Steuerspannung

$$U_{St} \approx D_2 \cdot U_{g2} - U_{g1}; \quad (50)$$

$U_{St}$  in V.

$D_2$  ist der Schirmgitterdurchgriff,  $U_{g2}$  die Schirmgitterspannung und  $U_{g1}$  die Gittervorspannung.

### 1.3.2. Gegenkopplung

Ein geeignetes Mittel, das die Verzerrungen herabsetzt, bildet die Gegenkopplung. Ihre Funktionsweise beruht darauf, daß man einen Teil der Ausgangsgröße einer Übertragungseinrichtung gegenphasig zur Eingangsgröße auf den Eingang zurückgibt. Die zurückgeführte Größe muß in einem bestimmten Verhältnis zur Eingangsgröße stehen, was sich im Gegenkopplungsgrad ausdrückt. Durch diese Maßnahmen entsteht allerdings ein Verstärkungsverlust. Infolge besonderer Schaltmaßnahmen kann man die gewünschte Frequenz gegenkoppeln.

Desgleichen läßt sich die Gegenkopplung auch amplitudenabhängig ausführen. Zwei Ausführungen der Gegenkopplung werden im folgenden besprochen.

#### 1.3.2.1. Spannungsgegenkopplung

Nach Bild 16 wird durch den Widerstand  $R_k$  ein Teil der Anodenwechselspannung gegenphasig auf das Gitter der Röhre zurückgeführt. Der Kondensator  $C_g$  riegelt die Anodengleichspannung vom Gitter ab. Diesen kann man auch so dimensionieren, daß die Gegenkopplung frequenzabhängig wird; damit werden die gewünschten Frequenzen hervorgehoben bzw. abgeschwächt. Für den Gegenkopplungsgrad ergibt sich

$$g = R_g / (R_g + R_k) \quad (51)$$

Da über den Ankopplungskondensator  $C_k$  der Außenwiderstand der Vorröhre parallel zu  $R_g$  liegt, muß dessen Einfluß bei der Dimensionierung berücksichtigt werden. Die Verstärkung verringert sich auf

$$v_g = v / (1 + g \cdot v) \quad (52)$$

Hierin ist  $v$  die Verstärkung ohne Gegenkopplung. Der Verstärkungsfaktor wird

$$\mu_g = \mu / (1 + \mu \cdot g). \quad (53)$$

Der Innenwiderstand der Röhre ändert sich in

$$R_{ig} = R_i / (1 + \mu \cdot g) \quad (54)$$

Die Steilheit bleibt unverändert. Aus den Gl. ersieht man, daß die Pentode ihren Charakter ändert; dieser nähert sich dem der Triode.

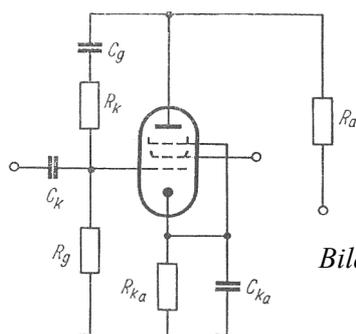


Bild 16

#### 1.3.2.2. Stromgegenkopplung

Entfernt man den Katodenkondensator einer Verstärkerstufe, wie in Bild 17 angegeben, so wird die am Katodenwiderstand abfallende Wechselspannung dem Steuergitter zugeführt. Wegen der Gegenphasigkeit der gegengekoppelten Oberwellen (die ja in der Stufe entstanden sind) werden diese wesentlich mehr geschwächt als die Grundwelle. Der Gegenkopplungsfaktor in der Schaltung ist

$$g' = R_{Ka} / R_a \quad (55)$$

Die Verstärkung verändert sich in

$$v'_g = v / (1 + g' \cdot v). \quad (56)$$

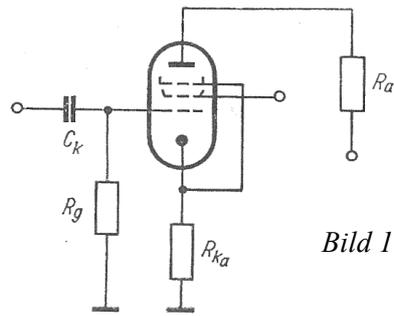
Der Innenwiderstand wird

$$R'_{ig} = R_i + \mu \cdot R_{Ka}, \quad (57)$$

und die Steilheit erhält den Wert

$$S'_g = S / (1 + S \cdot R_{Ka}). \quad (58)$$

Der Verstärkungsfaktor  $\mu$  verändert sich nicht. Die gleiche Gegenkopplungsart verwendet man vorwiegend bei Trioden. Durch die Gegenkopplung lässt sich eine größere Unempfindlichkeit gegenüber Betriebsspannungsänderungen und Alterungserscheinungen erreichen.



### Beispiel 11

Bei einer Pentode mit einer Schirmgitterspannung von 250 V ist ein Schirmgitterdurchgriff von 4% vorhanden.

Welcher Klirrfaktor stellt sich bei einer Gitterwechselspannung  $\hat{u}_g = 3,5 \text{ V}$  ein, wenn die Gittervorspannung 5 V beträgt ?

Zunächst ist mit Gl. (50) die Steuerspannung zu berechnen.

$$U_{st} \approx 4 \cdot 2,5 - 5 = 5 \text{ V};$$

sodann wird nach Gl. (49)

$$K \approx 12,5 \cdot 3,5 / 5 = 9,4 \%$$

### Beispiel 12

Durch eine Spannungsgegenkopplung reduziert sich die Verstärkung um 50 %. Sie betrug ohne Gegenkopplung  $v = 50$ . Welcher wirksame Gitterableitwiderstand muß vorhanden sein, wenn  $R_k = 10 \text{ M}\Omega$  ist ?

Gl. (52) ist umzustellen.

$$g = (v - v_g) / (v \cdot v_g) = 25 / (50 \cdot 25) = 2 \cdot 10^{-2}$$

Nun ergibt sich ebenfalls nach einer Umstellung von Gl. (51)

$$R_g = (g \cdot R_k) / (1 - g) = 2 \cdot 10^2 / 0,98 = 204 \text{ k}\Omega$$

-----  
Anmerkung (04/2015): Bei einigen Formeln wurde eine andere Schreibweise gewählt, wie am Beispiel der letzten Zeile gezeigt wird. Um Missverständnisse zu vermeiden, wurde mit den Klammern großzügig umgegangen.

$$R_g = \frac{g \cdot R_k}{1 - g} = \frac{2 \cdot 10^2}{0,98} = 204 \text{ k}\Omega.$$

-----