

IV. Röhrenverzerrungen

1. Einleitung

Die Kennlinien der Elektronenröhren im I_a/U_g -Kennlinienfeld sind gekrümmt. Dies bedeutet, daß der Anodenstrom sich nicht streng linear mit der angelegten Gitterspannung ändert, daß er zum Beispiel nicht genau sinusförmig verläuft, wenn die steuernde Gitterspannung sinusförmig schwankt. Dies ist gleichbedeutend damit,

daß im Anodenstrom außer der Grundschwingung von der Frequenz der angelegten Spannung Oberschwingungen der Grundschwingung auftreten; sie rufen Klangverzerrungen hervor. Stärke und Art der Oberschwingungen hängen von der Form der Kennlinienkrümmung ab. Maßgebend ist hierbei die Betriebskennlinie, das heißt die dynamische Kennlinie. Die *Bilder 69 (a und b)* zeigen den grundsätzlichen Verlauf der dynamischen Kennlinie einer Triode beziehungsweise einer Pentode und den bei sinusförmiger Aussteuerung dieser Kurven entstehenden Anodenstrom. Wie *Bild 69 (a)* entnommen werden kann, läßt sich der in seinen positiven Amplituden überspitzte und in seinen negativen Amplituden zusammengedrückte Anodenstrom einer Triode als Überlagerung von drei Stromkomponenten auffassen.

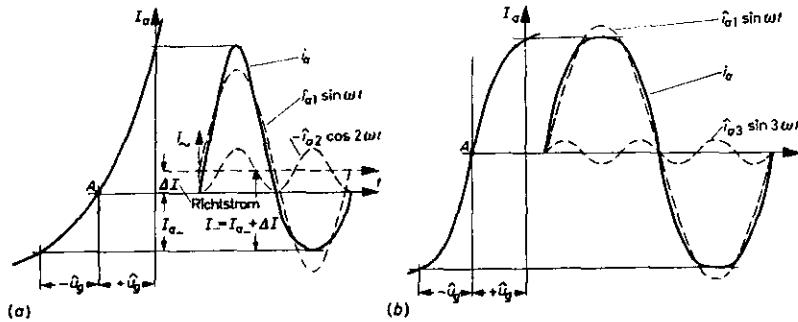


Bild 69. Entstehung nichtlinearer Verzerrungen an einer dynamischen (a) Trioden- und (b) Pentodenkennlinie

Neben der Grundschwingung mit der Amplitude i_{a1} tritt eine Gleichstromkomponente, ein sogenannter Richtstrom ΔI , vor allem aber eine 2ω -Oberschwingung mit der Amplitude i_{a2} auf. Der Richtstrom ΔI erhöht den Gleichstrom vom Ruhestromwert I_{a-} auf den Wert I_- . Während sich die Grundschwingung nach einer Sinusfunktion ändert, schwankt die Oberschwingung nach einer negativen Kosinusfunktion. Dadurch addieren sich beide so, daß während der positiven Stromamplituden eine Überhöhung des Scheitelwertes, dagegen während der negativen Stromamplituden eine Abplattung des Scheitelwertes zustande kommt.

Der S-förmige Verlauf der Pentodenkennlinie bedingt, wie *Bild 69 (b)* veranschaulicht, daß sich neben der Grundschwingung vor allem die 3. Harmonische (3ω -Oberschwingung) mit der Amplitude i_{a3} ausbildet. Ganz allgemein gilt: Trioden liefern, wenn Verzerrungen auftreten, vorwiegend die geradzahigen, Pentoden die ungeradzahigen Oberschwingungen. Strenggenommen muß man sagen, daß bei Pentoden auch die 2ω -Oberschwingungen auftreten, daß sie aber durch geschickte Wahl des Belastungswiderstandes und damit der Arbeitskennlinie unterdrückt werden können. Grafisch läßt sich das so beschreiben: Ist die dynamische Kennlinie eine symmetrische S-Kurve, treten nur die ungeradzahigen Oberschwingungen auf, ist die S-Kurve asymmetrisch, treten auch die geradzahigen Oberschwingungen 2ω

und 4ω auf. Praktisch versucht man stets, durch günstige Wahl des Arbeitspunktes und des Außenwiderstandes eine möglichst symmetrische Kennlinie mit geringer quadratischer Verzerrung zu erhalten.

Der Klirrfaktor guter Übertragungsanlagen soll einen bestimmten Wert von etwa 5...7% nicht überschreiten. Um besser erkennen zu können, welche Mittel und Wege man einzuschlagen hat, den Klirrfaktor kleinzuhalten, soll im folgenden versucht werden, den bei einer bestimmten Aussteuerung zu erwartenden Klirrfaktor größtmäßig aus dem Kennlinienfeld abzugreifen. Der Klirrfaktor kann entweder mit Hilfe des statischen Kennlinienfeldes und der Steuerspannung u_g oder an Hand des dynamischen Kennlinienfeldes und der Gitterwechselspannung $u_{g\sim}$ errechnet werden. Noch einfacher läßt er sich aus dem I_a/U_a -Kennlinienfeld unter Mitbenutzung der Widerstandsgeraden ermitteln. Da sich das letzte Verfahren aber aus dem umständlicheren mit der dynamischen Kennlinie herleitet, ist es notwendig, dieses vorher zu besprechen.

2. Ermittlung des Klirrfaktors aus dem dynamischen I_a/U_g -Kennlinienfeld

Der Anodenstrom i_a einer Röhre ist eine Funktion der Gitterspannung u_g . Der genaue Funktionszusammenhang ist nur grafisch durch die dynamische Kennlinie gegeben. Um eine Formel aufstellen zu können, muß für den Kennlinienverlauf zuvor ein mathematischer Ausdruck aufgestellt werden. Dies kann entweder mit Hilfe einer Taylorschen Reihenentwicklung oder mit Hilfe einer Potenzreihenentwicklung geschehen. Im ersten Fall geht man von folgender Form der Taylorschen Reihe aus:

$$y = f(a + x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!} x + \frac{f''(a)}{2!} x^2 + \frac{f'''(a)}{3!} x^3 + \dots \quad (41)$$

Da sich die Gitterspannung u_g aus der konstanten Vorspannung U_{g-} und der Wechselspannung $u_{g\sim}$ zusammensetzt, kann für i_a zunächst der Ansatz $i_a = f(U_{g-} + u_{g\sim})$ gemacht werden. Dieser Ausdruck stimmt mit der linken Seite der Taylorschen Reihe überein, denn die konstante Vorspannung U_{g-} entspricht offenbar der Konstanten a und die variable Wechselspannung $u_{g\sim}$ dem variablen x . Infolgedessen muß sich die Stromfunktion unter Benutzung der rechten Seite von Gl. (41) auch in der Form

$$i_a = f(U_{g-} + u_{g\sim}) = f(U_{g-}) + \frac{f'(U_{g-})}{1!} u_{g\sim} + \frac{f''(U_{g-})}{2!} u_{g\sim}^2 + \frac{f'''(U_{g-})}{3!} u_{g\sim}^3 + \dots \quad (42)$$

schreiben lassen. Diese Reihe bietet die Möglichkeit, für i_a einen mathematischen Ausdruck zu finden. $f(U_{g-})$ stellt den Anodenruhestrom I_{a-} dar, das heißt den Strom, der ohne Gitterwechselspannung ($u_{g\sim} = 0$) fließt. $f'(U_{g-})$ stellt den Wert der 1. Ableitung der dynamischen Kennlinie im Arbeitspunkt, also die dynamische Steilheit S_{dyn} , dar. $f''(U_{g-})$ und $f'''(U_{g-})$ sind höhere Ableitungen im Arbeitspunkt der dynamischen Kennlinie. Sie können dadurch ermittelt werden, daß man die dynamische Kennlinie mehrfach differenziert und dann im Arbeitspunkt die Werte der 1., 2., 3. und weiteren Ableitungen abgreift. Dieses rein grafische Verfahren ist aber ziemlich ungenau.

Indessen gibt es noch ein anderes halb grafisches, halb rechnerisches Verfahren. Es geht davon aus, daß die in Gl. (42) für den Arbeitspunkt gesuchten Ableitungen Konstanten

sind, die nicht von der Aussteuerung $u_{g\sim}$ abhängen; dementsprechend kann für i_a geschrieben werden

$$i_a = a_0 + a_1 u_{g\sim} + a_2 u_{g\sim}^2 + a_3 u_{g\sim}^3 + a_4 u_{g\sim}^4 + \dots \quad (43)$$

Nimmt man an, daß sich die Gitterwechselspannung sinusförmig nach der Funktion $u_{g\sim} \approx \hat{u}_g \sin \omega t$ ändert, nimmt Gl. (43) die Gestalt an

$$i_a = a_0 + a_1 \hat{u}_g \sin \omega t + a_2 \hat{u}_g^2 \sin^2 \omega t + a_3 \hat{u}_g^3 \sin^3 \omega t + a_4 \hat{u}_g^4 \sin^4 \omega t + \dots \quad (44)$$

In dieser Form geschrieben, stellt die Stromfunktion eine Potenzreihe dar, die für die Umgebung des Arbeitspunktes gilt. Ihre Konstanten lassen sich aus der dynamischen Kennlinie ermitteln. Man muß für sie so viele Gleichungen aufstellen, wie man Unbekannte berechnen will. Begnügt man sich mit den ersten fünf Konstanten $a_0 \dots a_4$, so müssen fünf Gleichungen aufgestellt werden. Man gewinnt die Gleichungen dadurch, daß man für fünf geschickte gewählte Werte der Gitterwechselspannung die zugehörigen Anodenströme abgreift und sie sowie die zugeordneten $u_{g\sim}$ -Werte in Gl. (44) einsetzt. Wählt man als Bereich, innerhalb dessen man die Kennlinie durch eine Potenzreihe nachbilden will, das Kennliniengebiet aus, das gerade durch die Wechselspannung ausgereutert wird, kann man unter Benutzung der Bezeichnungen vom Bild 70 in den Punkten

$$u_{g\sim} = -\hat{u}_g, -0,5\hat{u}_g, 0, +0,5\hat{u}_g, +\hat{u}_g$$

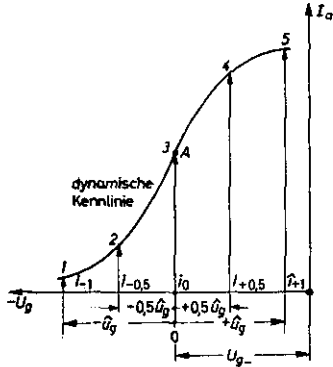


Bild 70. Zur Berechnung der Röhrenverzerrungen an Hand ihrer dynamischen I_a/U_g -Kennlinien

folgendes Fünfgleichungssystem aufstellen:

Ausgehend von

$$i_a = a_0 + a_1 u_{g\sim} + a_2 u_{g\sim}^2 + a_3 u_{g\sim}^3 + a_4 u_{g\sim}^4$$

gilt im Punkt 1 mit $u_{g\sim} = -\hat{u}_g$

$$\begin{aligned} i_{-1} &= a_0 + a_1(-\hat{u}_g) + a_2(-\hat{u}_g)^2 + a_3(-\hat{u}_g)^3 + a_4(-\hat{u}_g)^4 \\ &= a_0 - a_1 \hat{u}_g + a_2 \hat{u}_g^2 - a_3 \hat{u}_g^3 + a_4 \hat{u}_g^4 \end{aligned}$$

beziehungsweise im Punkt 2 mit $u_{g\sim} = -0,5\hat{u}_g$

$$i_{-0,5} = a_0 - \frac{a_1}{2} \hat{u}_g + \frac{a_2}{4} \hat{u}_g^2 - \frac{a_3}{8} \hat{u}_g^3 + \frac{a_4}{16} \hat{u}_g^4$$

beziehungsweise im Punkt 3 mit $u_{g\sim} = 0$

$$i_0 = a_0$$

beziehungsweise im Punkt 4 mit $u_{g\sim} = +0,5\hat{u}_g$

$$i_{+0,5} = a_0 + \frac{a_1}{2} \hat{u}_g + \frac{a_2}{4} \hat{u}_g^2 + \frac{a_3}{8} \hat{u}_g^3 + \frac{a_4}{16} \hat{u}_g^4$$

beziehungsweise im Punkt 5 mit $u_{g\sim} = +\hat{u}_g$

$$i_{+1} = a_0 + a_1 \hat{u}_g + a_2 \hat{u}_g^2 + a_3 \hat{u}_g^3 + a_4 \hat{u}_g^4$$

Diese fünf Gleichungen können nach den Unbekannten $a_0 \dots a_4$ oder besser nach den Größen $a_0, a_1 \hat{u}_g, a_2 \hat{u}_g^2, a_3 \hat{u}_g^3, a_4 \hat{u}_g^4$ aufgelöst und als Funktionen der abgegriffenen Stromordinaten $i_{-1} \dots i_{+1}$ hingeschrieben werden. Das Ergebnis der Auflösung ist

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= i_0 \\ a_1 \hat{u}_g &= \frac{4}{3} (i_{+0,5} - i_{-0,5}) - \frac{1}{6} (i_{+1} - i_{-1}) \\ a_2 \hat{u}_g^2 &= -5 i_0 + \frac{8}{3} (i_{+0,5} + i_{-0,5}) - \frac{1}{6} (i_{+1} - i_{-1}) \\ a_3 \hat{u}_g^3 &= \frac{2}{3} (i_{+1} + i_{-1}) - \frac{4}{3} (i_{+0,5} - i_{-0,5}) \\ a_4 \hat{u}_g^4 &= \frac{2}{3} (i_{+1} + i_{-1}) - \frac{8}{3} (i_{+0,5} + i_{-0,5}) + 4 i_0 \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Damit ist die Aufgabe, für die dynamische Kennlinie einen mathematischen Näherungsausdruck aufzustellen, im Prinzip gelöst. Man hat einfach die Werte von Gl. (45) in Gl. (44) einzusetzen. Bevor dies geschieht, soll Gl. (44) so umgeformt werden, daß ihre Glieder nicht mehr nach Potenzen von $\sin \omega t$, sondern nach den Vielfachen der Frequenz ω geordnet sind. Bekanntlich ist

$$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t$$

$$\sin^3 \omega t = \frac{3}{4} \sin \omega t - \frac{1}{4} \sin 3\omega t$$

$$\sin^4 \omega t = \frac{3}{8} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t + \frac{1}{8} \cos 4\omega t$$

Führt man dies in Gl. (44) ein, so ergibt sich

$$\begin{aligned} i_a &= a_0 + a_1 \hat{u}_g \sin \omega t + a_2 \hat{u}_g^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right) + \\ &+ a_3 \hat{u}_g^3 \left(\frac{3}{4} \sin \omega t - \frac{1}{4} \sin 3\omega t \right) + a_4 \hat{u}_g^4 \left(\frac{3}{8} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t + \frac{1}{8} \cos 4\omega t \right) \end{aligned}$$

Nach dem Ausmultiplizieren der Klammern und beim Ordnen nach den Vielfachen von ω erhält man

$$\begin{aligned}
i_a &= a_0 + \frac{1}{2} a_2 \hat{u}_p^2 + \frac{3}{8} a_4 \hat{u}_p^4 + && \text{Gleichstromanteil} \\
&+ \left(a_1 \hat{u}_p + \frac{3}{4} a_3 \hat{u}_p^3 \right) \sin \omega t - && \text{unverzerrter} \\
&- \left(\frac{1}{2} a_2 \hat{u}_p^2 + \frac{1}{2} a_4 \hat{u}_p^4 \right) \cos 2\omega t - && \text{Anodenwechselstrom} \\
&- \frac{1}{4} a_3 \hat{u}_p^3 \sin 3\omega t + \frac{1}{8} a_4 \hat{u}_p^4 \cos 4\omega t && \left. \begin{array}{l} \text{verzerrter} \\ \text{Anodenwechselstrom} \end{array} \right\}
\end{aligned}$$

Damit ist aus der Potenzreihe eine Harmonische Reihe von der Form

$$i_a = I_- + i_{a1} \sin \omega t - i_{a2} \cos 2\omega t - i_{a3} \sin 3\omega t + i_{a4} \cos 4\omega t \quad (46)$$

geworden. Die Amplituden der einzelnen Stromkomponenten haben folgende Werte:

$$\left. \begin{aligned}
I_- &= a_0 + \frac{1}{2} a_2 \hat{u}_p^2 + \frac{3}{8} a_4 \hat{u}_p^4 \\
i_{a1} &= a_1 \hat{u}_p + \frac{3}{4} a_3 \hat{u}_p^3 \\
i_{a2} &= \frac{1}{2} a_2 \hat{u}_p^2 + \frac{1}{2} a_4 \hat{u}_p^4 \\
i_{a3} &= \frac{1}{4} a_3 \hat{u}_p^3 \\
i_{a4} &= \frac{1}{8} a_4 \hat{u}_p^4
\end{aligned} \right\} \quad (47)$$

Dies besagt folgendes: Der Anodengleichstrom I_- ist um einen gewissen Richtstrom ΔI größer als der Ruhestrom I_{a-} , der nach Gl. (46) den Wert $a_0 = i_0$ hat (vergleiche ΔI im Bild 69). Der „unverzerrte“ Anodenwechselstrom i_{a1} weist außer dem Glied $a_1 \hat{u}_p$, das nach Gl. (43) beziehungsweise Gl. (42) dem Ausdruck $S_{dyn} \hat{u}_p$ entspricht, ein von der ungleichmäßigen Kennlinienkrümmung herrührendes Glied $\frac{3}{4} a_3 \hat{u}_p^3$ auf. Die Verzerrungsprodukte nehmen, den Zahlenfaktoren nach, mit der Höhe der Oberschwingung langsam ab. Genaueres hierüber läßt sich allerdings erst sagen, wenn man für die Konstanten $a_0 \dots a_4$ die für die spezielle Kurve gültigen Stromamplituden $i_{+1} \dots i_{-1}$ einsetzt und das ganze Formelsystem auswertet. Bei der Einführung von Gl. (46) in Gl. (47) ergibt sich beim Zusammenfassen

$$\left. \begin{aligned}
I_- &= \frac{1}{6} (i_{+1} + i_{-1}) + \frac{1}{3} (i_{+0,5} + i_{-0,5}) \\
i_{a1} &= \frac{1}{3} (i_{+1} - i_{-1}) + \frac{1}{3} (i_{+0,5} - i_{-0,5}) \\
i_{a2} &= \frac{1}{4} (i_{+1} + i_{-1}) - \frac{1}{2} i_0 \\
i_{a3} &= \frac{1}{6} (i_{+1} - i_{-1}) - \frac{1}{3} (i_{+0,5} - i_{-0,5}) \\
i_{a4} &= \frac{1}{12} (i_{+1} + i_{-1}) - \frac{1}{3} (i_{+0,5} + i_{-0,5}) + \frac{1}{2} i_0
\end{aligned} \right\} \quad (48)$$

Dieses Gleichungssystem stellt die Beziehungen dar, nach denen man aus den fünf im dynamischen Kennlinienfeld innerhalb des jeweilig vorgesehenen Aussteuerungsbereiches abgegriffenen Stromordinaten die Scheitelwerte der einzelnen Stromkomponenten des Gesamtstromes ermitteln kann. Von hier aus ist es ein kleiner Schritt, aus den Oberschwingungen die Teilkirrfaktoren und den Gesamtkirrfaktor der Schwingung zu berechnen, denn es ist

$$k'_2 = \frac{i_{a2}}{i_{a1}} \quad k'_3 = \frac{i_{a3}}{i_{a1}} \quad k'_4 = \frac{i_{a4}}{i_{a1}} \quad \text{und} \quad k' = \sqrt{k_2'^2 + k_3'^2 + k_4'^2}$$

3. Ermittlung des Kirrfaktors aus dem I_a/U_a -Kennlinienfeld

Die Konstruktion der dynamischen Kennlinie erfordert verhältnismäßig viel Zeit. Darüber hinaus muß sie recht sorgfältig vorgenommen werden, wenn wegen der Differenzbildungen größere Ungenauigkeiten im Kirrfaktor vermieden werden sollen. Wie es sich gleich zeigen wird, kann – ausgehend vom Gleichungssystem Gl. (48) – der Kirrfaktor auch direkt, ohne irgendeine Umzeichnung, ermittelt werden, wenn man statt der dynamischen I_a/U_p -Kennlinien das I_a/U_a -Kennlinienfeld mit der Widerstandsgeraden benutzt.

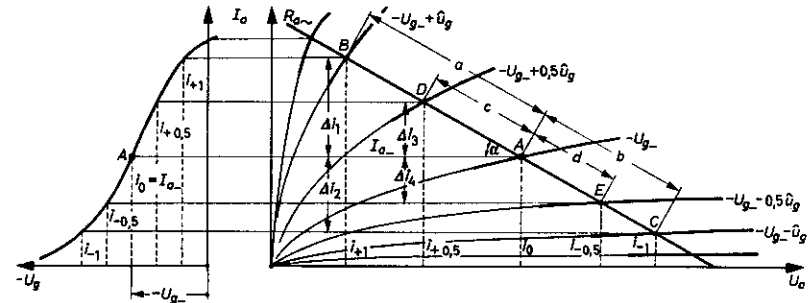


Bild 71. Zur Ermittlung des Kirrfaktors aus dem I_a/U_a -Kennlinienfeld

Im Bild 71 sind die dynamische Kennlinie und das I_a/U_a -Kennlinienfeld einer Pentode mit der Widerstandsgeraden gegeben. Das Kennlinienfeld wird zu beiden Seiten des Arbeitspunktes A um $\pm \hat{u}_p$ angesteuert. Wie Bild 71 erkennen läßt, können die zur Auswertung des Formelsystems Gl. (48) benötigten Stromordinaten $i_{-1} \dots i_{+1}$ statt auf der I_a/U_p -Kennlinie auch im I_a/U_a -Kennlinienfeld an den Grenzen und in der Mitte des Stromaussteuerungsbereiches abgegriffen werden. Zum Beispiel ist i_{-1} gleich der Ordinate des Punktes C oder $i_{+0,5}$ gleich der Ordinate des Punktes D . Unter Benutzung der Bezeichnungen vom Bild 71 wird zunächst

$$i_{+1} = I_{a-} + \Delta i_1 \quad i_{-1} = I_{a-} - \Delta i_2 \quad i_{+0,5} = I_{a-} + \Delta i_3 \quad i_{-0,5} = I_{a-} - \Delta i_4$$

Führt man dies in Gl. (48) ein, ergibt sich beim Zusammenfassen

$$\left. \begin{aligned} I_- &= I_{a-} + \frac{1}{6}(\Delta i_1 - \Delta i_2) + \frac{1}{3}(\Delta i_3 - \Delta i_4) \\ i_{a1} &= \frac{1}{3}(\Delta i_1 + \Delta i_2 + \Delta i_3 + \Delta i_4) \\ i_{a2} &= \frac{1}{4}(\Delta i_1 - \Delta i_2) \\ i_{a3} &= \frac{1}{6}(\Delta i_1 + \Delta i_2) - \frac{1}{3}(\Delta i_3 + \Delta i_4) \\ i_{a4} &= \frac{1}{12}(\Delta i_1 - \Delta i_2) - \frac{1}{3}(\Delta i_3 - \Delta i_4) \end{aligned} \right\} (49)$$

Damit nehmen die Klirrfaktorformeln folgende Form an:

$$\left. \begin{aligned} k'_2 &= \frac{i_{a2}}{i_{a1}} = \frac{3}{4} \frac{\Delta i_1 - \Delta i_2}{\Delta i_1 + \Delta i_2 + \Delta i_3 + \Delta i_4} \\ k'_3 &= \frac{i_{a3}}{i_{a1}} = \frac{\frac{1}{2}(\Delta i_1 + \Delta i_2) - (\Delta i_3 + \Delta i_4)}{\Delta i_1 + \Delta i_2 + \Delta i_3 + \Delta i_4} \\ k'_4 &= \frac{i_{a4}}{i_{a1}} = \frac{\frac{1}{4}(\Delta i_1 - \Delta i_2) - (\Delta i_3 - \Delta i_4)}{\Delta i_1 + \Delta i_2 + \Delta i_3 + \Delta i_4} \end{aligned} \right\} (50)$$

Die in diesen Ausdrücken auftretenden Differenzen Δi lassen sich durch einen Proportionsansatz oder unter Verwendung von $\sin \alpha$ auch durch entsprechende Abschnitte a, b, c, d auf der Widerstandsgeraden ausdrücken. Nach der Zeichnung ist

$$\Delta i_1 = a \sin \alpha \quad \Delta i_2 = b \sin \alpha \quad \Delta i_3 = c \sin \alpha \quad \Delta i_4 = d \sin \alpha$$

Führt man diese Werte in die Klirrfaktorformel Gl. (50) ein, hebt sich im Zähler und Nenner das $\sin \alpha$ -Glied heraus und es bleibt

$$\left. \begin{aligned} k'_2 &= \frac{3}{4} \frac{a - b}{a + b + c + d} \\ k'_3 &= \frac{0,5(a + b) - (c + d)}{a + b + c + d} \\ k'_4 &= \frac{0,25(a - b) + (d - c)}{a + b + c + d} \end{aligned} \right\} (51)$$

Damit ist das Ziel erreicht, die Klirrfaktoren der ersten drei Oberschwingungen einer Grundschwingung in möglichst einfacher Weise aus dem Kennlinienfeld abzugreifen. Entsprechend der gewählten Aussteuerung hat man lediglich die Abschnitte a und b vom Arbeitspunkt bis zum höchsten und tiefsten Aussteuerungspunkt B beziehungsweise C sowie die Strecken c und d bis zur halben Aussteuerung

auf der Widerstandsgeraden (Punkt D beziehungsweise E) in mm abzumessen und nach Gl. (51) auszuwerten. Dabei ist es völlig einerlei, ob bei der Berechnung ein Klirrfaktor positiv oder negativ herauskommt. Ein Minuszeichen besagt lediglich, daß die betreffende Oberschwingung und Grundschwingung verschiedene Vorzeichen haben; hier interessiert nur der Betrag der Rechnung.

Wie die Ableitung erkennen läßt, sind die Formeln Gl. (51) keine Faustformeln. Sie sind völlig exakt und ohne irgendeine Vernachlässigung, allerdings auf Grund einer Potenzreihenentwicklung aufgestellt, die nach dem 5. Gliede abgebrochen wurde.

4. Wechselstromleistung einer Röhre unter Berücksichtigung der Verzerrungen

Bei der Berechnung der Wechselstromleistung verzerrter Ströme geht man von dem Satz aus, daß die Gesamtleistung gleich der Summe der Einzelleistungen der Stromkomponenten ist. Es gilt

$$P_{\sim} = R_{a1} I_{a1}^2 + R_{a2} I_{a2}^2 + R_{a3} I_{a3}^2 + R_{a4} I_{a4}^2$$

Können die Widerstände $R_{a1} \dots R_{a4}$ als gleich groß und reell angesehen werden, ergibt sich für die resultierende Wirkleistung

$$P_{\sim} = R_a (I_{a1}^2 + I_{a2}^2 + I_{a3}^2 + I_{a4}^2) \quad (52)$$

Unter Berücksichtigung der Klirrfaktoren wird daraus

$$P_{\sim} = R_a I_{a1}^2 (1 + k_2'^2 + k_3'^2 + k_4'^2) \quad (53)$$

Der Effektivwert I_{a1} der Grundschwingung errechnet sich dabei am besten aus dem Scheitelwert i_{a1} und er wieder aus Gl. (49); es ist

$$I_{a1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{3} (\Delta i_1 + \Delta i_2 + \Delta i_3 + \Delta i_4) \quad (54)$$

Beispiel 9

Es soll der Klirrfaktor der früher vielbenutzten Leistungstriode AD 1 an Hand des Kennlinienfeldes vom Bild 72 in dem von den Röhrenfirmen vorgeschlagenen Arbeitspunkt bestimmt werden, und zwar 1) für den optimalen Belastungswiderstand $R_{a, \text{opt}} = 2300 \Omega$ und 2) für den Fall der Anpassung $R_a = R_l = 670 \Omega$. Die Gitterwechselspannung habe einen Scheitelwert von $\hat{u}_g = 40 \text{ V}$. Welche Wechselstromleistung gibt die Röhre in beiden Fällen unter Berücksichtigung der Verzerrungen ab? In alten Röhrenbüchern wird für den Fall optimaler Belastung mit 2300 die Zahl 4,2 W angegeben, allerdings bei $U_{g\sim} = 30 \text{ V}$ oder $\hat{u}_g = 42,5 \text{ V}$. Da sich diese Spannung aber schlecht grafisch abtragen läßt, soll hier mit 40 V Scheitelwert operiert werden. Laut Röhrentabelle liegt der Arbeitspunkt bei $U_{e-} = 250 \text{ V}$, $U_{g-} = -45 \text{ A}$ und $I_{a-} \approx 60 \text{ mA}$. Für $R_a = 2300 \Omega$ und $\hat{u}_g = 40 \text{ V}$ entnimmt man dem Kennlinienfeld folgende Abschnitte:

$$a = 35,5 \text{ mm} \quad b = 31,5 \text{ mm} \quad c = 17,5 \text{ mm} \quad d = 15,7 \text{ mm}$$

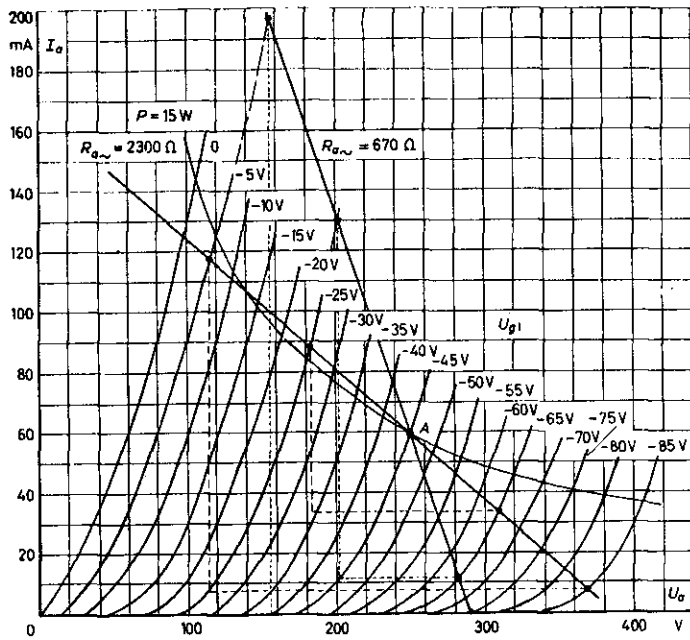


Bild 72. I_a/U_a -Kennlinienfeld einer Leistungsröhre (AD1)

Hiermit ergeben sich nach Gl. (51) die Klirrfaktoren

$$k'_2 = \frac{3}{4} \frac{35,5 - 31,5}{35,5 + 31,5 + 17,5 + 15,7} = \frac{3}{4} \frac{4}{100,2} \approx 0,03 = 3\%$$

$$k'_3 = \frac{0,5(35,5 + 31,5) - (17,5 + 15,7)}{100,2} \approx 0,003 = 0,3\%$$

$$k'_4 = \frac{0,25(35,5 - 31,5) + (15,7 - 17,5)}{100,2} \approx (-)0,008 = 0,8\%$$

und

$$k'_{ges} = \sqrt{3^2 + 0,3^2 + 0,8^2} \% = 3,1\%$$

Für die Berechnung der Leistung benötigt man den Effektivwert der Grundschwingung. Nach Gl. (54) ist, wenn man die Δi -Werte aus dem Kennlinienfeld zu

$$\Delta i_1 + \Delta i_2 = 110 \text{ mA} \quad \text{und} \quad \Delta i_3 + \Delta i_4 = 55 \text{ mA}$$

abgreift,

$$I_{o1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{3} (110 + 55) \text{ mA} = 33,9 \text{ mA} \approx 0,039 \text{ A}$$

Dem entspricht nach Gl. (53) eine Gesamtwechselstromleistung von

$$P_{\sim} = 2300 \Omega \cdot 0,039^2 \text{ A}^2 (1 + 0,03^2 + 0,003^2 + 0,008^2)$$

oder

$$P_{\sim} = 3,5 \text{ W}$$

Wie man aus den Zahlenwerten in der Leistungsformel sieht, ist der Leistungsbeitrag der Oberschwingungen verschwindend klein. Die errechnete Leistung von 3,5 W ist praktisch die Leistung der Grundschwingung allein. Die hier ermittelten 3,5 W sind kleiner als die in den Röhrentabellen genannte Zahl von 4,2 W. Ein Teil der Differenz erklärt sich aus der geringeren Aussteuerung mit $\hat{u}_g = 40 \text{ V}$ statt 42,4 V. Beachtet man, daß sich die Leistungen wie die Quadrate der Spannungen verhalten, kann man sagen, daß das vorliegende Beispiel bei $\hat{u}_g = 42,5 \text{ V}$ etwa $3,5 \text{ W} \cdot (42,5/40)^2 = 3,95 \text{ W}$ ergeben haben würde.

Für $R_a = R_1 = 670 \Omega$ liefert das Diagramm folgende Abschnittslängen:

$$a = 58,3 \text{ mm} \quad b = 25 \text{ mm} \quad c = 30 \text{ mm} \quad d = 20 \text{ mm}$$

Damit wird

$$k'_2 = \frac{3}{4} \frac{58,3 - 25}{58,3 + 25 + 30 + 20} = \frac{3}{4} \frac{33,3}{133,3} = 0,187 = 18,7\%$$

$$k'_3 = \frac{0,5(58,3 + 25) - (30 + 20)}{133,3} = 0,063 = 6,3\%$$

$$k'_4 = \frac{0,25(58,3 - 25) + (20 - 30)}{133,3} = 0,012 = 1,2\%$$

und

$$k'_{ges} = \sqrt{18,7^2 + 6,3^2 + 1,2^2} \% = 19,8\%$$

Wie der Vergleich der Klirrfaktoren bei $R_a = 2300 \Omega$ und $R_a = R_1 = 670 \Omega$ zeigt, liegt k' im ersten Fall noch mit Sicherheit innerhalb der zulässigen Grenzen, während er im zweiten Fall das zulässige Maß weit überschreitet. Hinsichtlich der Leistung wird mit den aus dem Kennlinienfeld abgegriffenen Abschnitten

$$\Delta i_1 + \Delta i_2 = 197 \text{ mA} \quad \text{und} \quad \Delta i_3 + \Delta i_4 = 118,5 \text{ mA}$$

zunächst

$$I_{o1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{3} (197 + 118,5) \text{ mA} = 74,3 \text{ mA} = 0,0743 \text{ A}$$

Dem entspricht eine Leistung von

$$P_{\sim} = 670 \Omega \cdot 0,0743^2 \text{ A}^2 (1 + 0,187^2 + 0,063^2 + 0,012^2)$$

oder

$$P_{\sim} \approx 3,8 \text{ W}$$

Man erkennt, daß trotz der theoretischen Anpassung die Leistung kaum größer als bei Abschluß mit dem klirrfaktormäßig günstigeren Widerstand von 2300 Ω ist. Das hängt mit den starken Verzerrungen zusammen, die im Anpassungsfall auftreten. Würde man untersuchen, bei welchem Widerstand die Röhre im stark angesteuerten Betrieb die größte Leistung abgibt, käme man auf einen Widerstand von etwa $1,5 \dots 2 R_1$.

Aufgabe 22

Ermittle aus dem im Bild 62 wiedergegebenen Kennlinienfeld der EL 95 für eine Gitterwechselspannung von $\hat{u}_g = 5 \text{ V}$ und die drei Belastungswiderstände $R_a = 6,7 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$ und $12 \text{ k}\Omega$ die zu erwartenden Klirrfaktoren $k'_2 \dots k'_4$ und die Wechselstromleistungen. Der Arbeitspunkt liege auf der Grenzleistungskurve bei $U_{g2} = -9 \text{ V}$ ($I_{a2} \approx 24 \text{ mA}$, $U_{a2} \approx 240 \text{ V}$). Welcher Widerstand ist hinsichtlich des Klirrfaktors am günstigsten, welcher hinsichtlich der Leistung? Welcher Widerstand wäre für die Anwendung vorzuschlagen? Vergleiche die hier unter Berücksichtigung der Verzerrungen ermittelte Leistung mit der in Aufgabe 21. Welche Werte gibt die Röhrentabelle für $R_{a, \text{opt}}$, P_{\sim} , k' an? Warum können diese Angaben hier nicht nachgeprüft werden?

(Antwort:

$R_a = 6,7 \text{ k}\Omega$:	$k'_2 \approx 4,8 \%$	$k'_3 \approx 3,3 \%$	$k'_4 \approx 1,8 \%$	$I_{a2} \approx 15,9 \text{ mA}$	$P_{\sim} \approx 1,7 \text{ W}$
$= 10 \text{ k}\Omega$:	0,8 %	5,9 %	2,2 %	14,4 mA	2,08 W
$= 12 \text{ k}\Omega$:	4,1 %	6,4 %	1,9 %	13,4 mA	2,17 W

Aufgabe 23

Im Bild 73 ist das Kennlinienfeld der Leistungspentode EL 84 gegeben. Die Röhrentabelle gibt für den Arbeitspunkt $U_a = 250 \text{ V}$, $U_{g2} = 250 \text{ V}$, $U_{g1} = -7,3 \text{ V}$, $I_a = 48 \text{ mA}$ an, daß der Röhre hier bei einem Anodenwiderstand von $R_{a2} = 4,5 \text{ k}\Omega$ und einer Gitter-

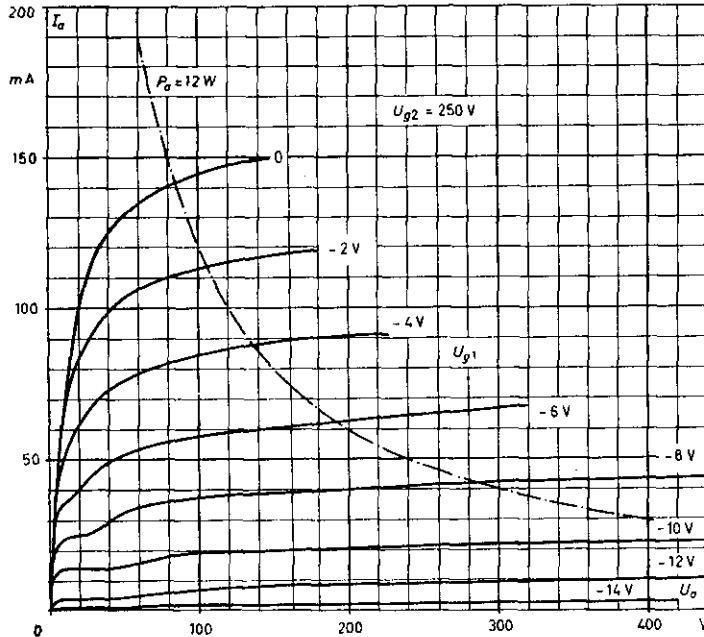


Bild 73. I_a/U_a -Kennlinienfeld der Leistungspentode EL 84

wechselspannung von $U_{g2} = 4,4 \text{ V} \hat{=} \hat{u}_g = 6,2 \text{ V}$ eine Wechselstromleistung von $5,7 \text{ W}$ bei einem Klirrfaktor von 10% entnommen werden kann. Sie gibt ferner an, daß sich bei Aussteuerung wegen der Verzerrungen der Anodenruhestrom der Röhre von $I_{a2} = 48 \text{ mA}$ auf $I_{a2} = 50,6 \text{ mA}$ erhöht.

Prüfe nach möglichst sorgfältigem Einzeichnen von Hilfskennlinien, ob sich die obigen Werte, nämlich k'_{ges} , P_{\sim} und I_{a2} (Gl. 49), auch aus den vorliegenden Kennlinien ergeben. In welcher Richtung müßte man R_a ändern, damit der Klirrfaktor k'_2 kleiner wird? Wie groß ist der Röhrenwirkungsgrad und wie liegt er hier im Vergleich zu den allgemeinen Angaben für Pentoden im Abschnitt A.II.11. b)?

(Antwort: $k'_2 = 3\%$, $k'_3 = 10,1\%$, $k'_4 = 2,7\%$, $k'_{\text{ges}} = 10,8\%$, $I_{a1} = 35,6 \text{ mA}$, $P_{\sim} = 5,7 \text{ W}$, $I_{a2} = 51,3 \text{ mA}$, $\eta = 47,5\%$)

5. Allgemeine Abhängigkeit des Klirrfaktors von der Leistung und dem Anodenwiderstand

Untersucht man den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen dem Klirrfaktor, der Wechselstromleistung und den Schaltgrößen, vornehmlich dem Anodenwiderstand, erhält man für Trioden und Pentoden die in den Bildern 74 bis 77 dargestellten Abhängigkeiten. Im Bild 74 ist der Klirrfaktor als Funktion der abge-

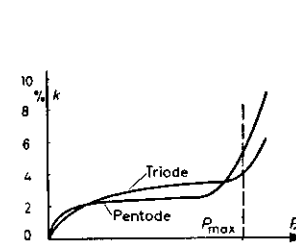


Bild 74. Klirrfaktor von Trioden und Pentoden in Abhängigkeit von der entnommenen Leistung

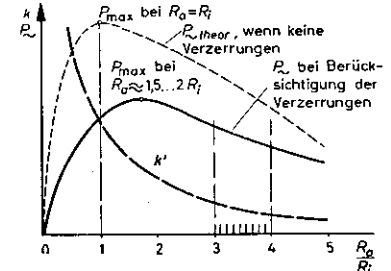


Bild 75. Klirrfaktor und Leistung einer Triode in Abhängigkeit vom Verhältnis des Anodenwiderstandes zu ihrem Innenwiderstand

gebenen Leistung aufgetragen. Das Bild läßt erkennen, daß der Klirrfaktor von Pentoden im Bereich unterhalb der maximalen Nennleistung etwas kleiner als der von Trioden ist. Pentoden sind jedoch in bezug auf Überschreitungen der Nennleistung, das heißt in bezug auf Übersteuerungen, empfindlicher. Die Klirrfaktor-Kurve einer Pentode steigt jenseits der Grenze steiler an als die einer Triode.

Bild 75 zeigt den Klirrfaktor und die Leistung einer Triode in Abhängigkeit vom Verhältnis des Anodenwiderstandes zum Innenwiderstand. Den Kurven entnimmt man, daß die Verzerrungen um so kleiner werden, je größer R_a im Verhältnis zu R_i ist. Allerdings geht dabei die abgegebene Leistung zurück, weil man sich vom Fall der Anpassung entfernt. In der Praxis wählt man – wenn man überhaupt noch

Trioden benutzt – als Kompromißlösung den Außenwiderstand drei- bis viermal größer als den Innenwiderstand. Man macht

$$R_a = (3 \dots 4) R_i \quad \text{bei Leistungstrioden}$$

In diesem Fall sind die Verzerrungen bereits wesentlich zurückgegangen, ohne daß der Leistungsrückgang zu groß geworden wäre. Eine vollausgesteuerte Triode gibt wegen der Strom- und Spannungsverzerrungen bei Anpassung sowieso nicht mehr

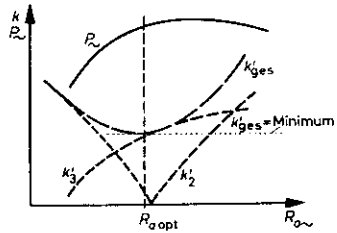


Bild 76. Klirrfaktor und Leistung einer Pentode in Abhängigkeit vom Anodenwiderstand

ihre dort theoretisch mögliche Leistung ab. Vergleiche hierzu die Leistung einer AD 1 bei Anpassung im *Beispiel 9*. Das Leistungsmaximum einer vollausgesteuerten und mit stärkeren Verzerrungen arbeitenden Triode liegt, wie *Bild 75* veranschaulicht, nicht mehr bei $R_a = R_i$, sondern bei $R_a \approx 1,5 \dots 2 R_i$. Der Grund für die Abnahme des Klirrfaktors mit der Vergrößerung von R_a liegt, grafisch ausgedrückt

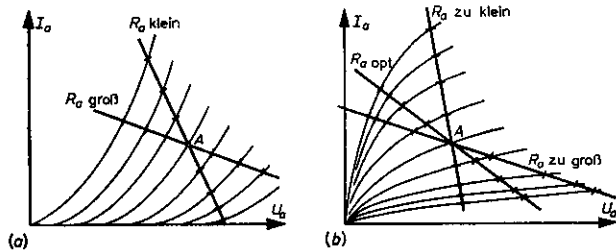


Bild 77 (a und b). Zur Erklärung der Abhängigkeit des Klirrfaktors von der Größe des Anodenwiderstandes

darin, daß die Widerstandsgerade um so flacher verläuft, je größer R_a ist. Je flacher aber die Widerstandsgerade im Kennlinienfeld liegt (*Bild 77 a*), desto mehr meidet sie die unteren, stärker gekrümmten Kennlinienteile, desto gleichmäßiger werden die Abstände der einzelnen Kennlinien auf ihr und desto kleiner wird der Klirrfaktor.

Bild 76 zeigt die Verhältnisse an einer Pentode. Die Abbildung läßt erkennen, daß der Gesamtklirrfaktor k'_{ges} bei einem ganz bestimmten Wert von R_a ein Minimum hat. Dasselbe Ergebnis lieferte auch die *Aufgabe 22* für die EL 95-Klirrfaktoren.

Dies hängt damit zusammen, daß der Klirrfaktoranteil k'_2 der 2ω -Oberschwingung bei einem bestimmten Außenwiderstand minimal klein ist, oberhalb und unterhalb davon jedoch stark steigt. Da andererseits k'_3 mit zunehmendem R_a stetig wächst, muß es für R_a einen optimalen Wert $R_{a,opt}$ geben, bei dem der Gesamtklirrfaktor ein Minimum durchläuft. Grafisch liegt die Ursache für das Verschwinden der quadratischen Verzerrung darin, daß, wie *Bild 77 (b)* veranschaulicht, bei bestimmter Neigung der Widerstandsgeraden eine symmetrische Aussteuerung des Kennlinienfeldes erfolgt: Die Abstände der Schnittpunkte der Kennlinien mit der Widerstandsgeraden ändern sich vom Arbeitspunkt aus nach beiden Seiten gleichmäßig; sie werden zwar enger, aber gleichmäßig enger. Die dynamische Kennlinie würde die Form eines symmetrischen „S“ annehmen. Nach *Bild 69 (b)* tritt in diesem Fall nur die 3ω -Oberschwingung auf.

Der Wert des günstigsten Außenwiderstandes, für den im allgemeinen auch die Leistungsverhältnisse noch recht brauchbar sind, ist in den Röhrentabellen angegeben. Nach einer Faustformel erhält man ihn angenähert dadurch, daß man die Anodengleichspannung U_{a-} des Arbeitspunktes durch den Anodengleichstrom I_{a-} dividiert:

$$R_{a,opt} = \frac{U_{a-}}{I_{a-}} \quad \text{bei Pentoden} \quad (55)$$

Vergleiche hierzu Gl. (124). Da sich der wirksame Außenwiderstand bei Ausgangsschaltungen mit Lautsprechern oder anderen induktiven Belastungen in der Regel so ändert, daß er mit zunehmender Frequenz steigt, weisen bei Pentoden die höheren Frequenzen stärkere Verzerrungen als die tiefen auf; bei Trioden ist es umgekehrt.

Die Verzerrungen spielen in den Endstufen sogenannter Kraftverstärker eine große Rolle. Bei möglichst hoher Leistungsabgabe sollen Kraftverstärker einen bestimmten Klirrfaktor nicht überschreiten. Die Eingangsstufen von Verstärkern sind in der Regel in bezug auf den Klirrfaktor unkritisch, da die Gitterwechselspannungen dieser Stufen so gering sind, daß für sie die Röhrenkennlinien als geradlinig angesehen werden können. Etwas kritischer sind Regelröhren, da sie auch in den unteren Knickpunkten der Kennlinien angesteuert werden. Dort werden sie sogar besonders stark angesteuert, da hierin die Regelwirkung besteht. Außer durch richtige Wahl des Anodenwiderstandes wird der Klirrfaktor von Endstufen heutzutage vor allem durch Anwendung der Gegenkopplung kleingehalten. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zur Benutzung von Gegentaktschaltungen (Abschnitt B.III.8.a und 9.a).