

Verlustleistung vs. Nutzleistung

**Zusammenhang
zwischen Anodenverlustleistung
und erzielbarer Nutzleistung
bei HF- Leistungsstufen mit Röhren**

**Mitteilungen aus dem Institut
für Umwelttechnik
Nonnweiler-Saar
Dr. Schau
DL3LH**

Vorwort

Bei Leistungsendstufen mit Röhren gibt es vier begrenzende Faktoren. Die maximale Anodenverlustleistung, der maximale Anodenstrom, die maximale Anodenwechselspannung bedingt durch den geringen Abstand der Sockelanschlüsse. Jede Komponente für sich muss bei der Konstruktion einer Leistungsstufe berücksichtigt werden.

Die Wärme, die an der Anode entsteht, wird im Wesentlichen durch die kinetische Energie der auf die Anoden prallenden Elektronen verursacht. Der Energieanteil für die Sekundärelektronen bzw. die der Röntgenstrahlen ist gegenüber der entwickelten Wärmeenergie vernachlässigbar klein.

Für jede Röhre gibt es eine zulässige Anodenverlustleistung, die nicht ohne Gefahr der Überhitzung überschritten werden darf. Bei modernen Röhren mit Hochleistungs-Kathoden ist die begrenzende Größe fast immer die maximale Anodenverlustleistung. Dabei versteht man unter Anodenverlustleistung diejenige Leistung, die an der Röhre in Wärme umgesetzt wird. Den exakten Wert der maximal zulässigen Anodenverlustleistung kann den Datenblättern der Hersteller entnommen werden. Bei kleinen Leistungen wird die Wärme durch Strahlung, bei größeren durch Druckluft oder Wasser abgeführt.

1. Die Anodenverlustleistung

Das Hauptproblem bei Leistungsendstufen ist die wirtschaftliche Erzielung der gewünschten Wechselleistung bei möglichst geringen Verlusten, d.h. mit hohem Wirkungsgrad. Je kleiner die Verluste in Form von Wärme sind, desto kleiner kann die Senderöhre dimensioniert werden. Die Forderung nach maximaler Wechselleistung bezieht sich dabei fast immer auf eine vorgeschriebene Anodenverlustleistung, die nicht überschritten werden

darf. Da die Wechselleistung sich aus dem Produkt von Anoden-Wechselspannung und -Wechselstrom berechnet, erzielt man die größte Ausgangsleistung immer dann, wenn Anodenwechselstrom und -Wechselspannung relativ zum Anodengleichstrom bzw. zur Anodengleichspannung möglichst groß werden. Die Anodenverlustleistung ergibt sich als Differenz zwischen aufgenommener Anodengleichleistung und Anodenwechselleistung.

2. Die maximale Nutzleistung bei voller Aussteuerung bis zur Grenzkennlinie

Zur Berechnung der von einer Röhre im Sender-Verstärker auf der Grundschiwingung abgebbaren Leistung nehmen wir an, dass eine genügend hohe Gitterwechselspannung das Kennlinienfeld bis zu der durch die Größe R_{iL} begrenzten Restspannung aussteuert /8/.

Für die nicht aussteuerbare Restspannung ergibt sich /8 - Bild 8/

$$u_r = U_{ao} - u_a = I_{asp} R_{iL} \quad (Gl.1)$$

mit R_{iL} als Leistungsinnenwiderstand und I_{asp} als Anodenspitzenstrom.

Die Spannungsamplitude der Grundschiwingung in der Anodenwechselspannung ist $u_a = i_{a1} * R_a$, die auf die Anodengleichspannung aufsetzt. Sie darf die vom Hersteller angegebene maximale Anodenwechselspannung nicht überschreiten, weil Überschläge zwischen den Anschlüssen zur Zerstörung der Röhre führen können.

Die Wechselleistung, die bei voller Aussteuerung bis zur Grenzkennlinie an den Außenwiderstand R_a abgegeben wird, beträgt /8/

$$P_- = \frac{1}{2} U_{ao}^2 / (R_{iL}) * (R_a / R_{iL}) * \frac{1}{[(R_a / R_{iL} + 1 / f_1(\Theta))]^2} \quad (Gl.2)$$

und ist nur abhängig von der Anodengleichspannung U_{ao} , vom Außenwiderstand R_a , dem Leistungsinnenwiderstand R_{iL} und der Stromflusswinkelfunktion $f_1(\Theta) / 1$.

Dabei ist Θ der Stromflusswinkel, der für den A-Betrieb 180° , für den B-Betrieb 90° und für den C-Betrieb kleiner 90° ist. Die Stromflusswinkelfunktion $f_1(\Theta)$ ist abhängig vom Stromflusswinkel und bewegt sich zwischen 0 und einem Maximum bei einem Winkel Θ von 122° mit $f_1(122) = 0.535$. Danach fällt der Wert wieder auf 0.5 zurück. Für den A-Betrieb ist der Winkel $\Theta = 180^\circ$ und $f_1(180)$ wieder 0.5.

Die von Röhre bei Aussteuerung aufgenommene Gleichleistung ist

$$P_{\sim} = I_{a\sim} * U_{ao} = U_{ao} * I_{asp} * \psi(\Theta) \quad (Gl.3)$$

wird umso kleiner, je kleiner der Stromflusswinkel Θ ist und umso größer der Anodenspitzenstrom und die Anodenspannung sind.

Unter Verwendung der (Gl 1) wird aus (Gl 3) die von der Röhre aufgenommene Gleichleistung

$$P_{\sim} = \psi(\Theta)/f_1(\Theta) * U_{ao}^2 / RiL * 1 / [RiL/Ra + RiL/f_1(\Theta)]. \quad (Gl.4)$$

Die optimale Wechselleistung wird nach (Gl 2) für Anpassung $Ra = RiL / f_1(\Theta)$ erreicht und ist

$$P_{\sim} = 1/8 U_{ao}^2 / [RiL / f_1(\Theta)] \quad (Gl.5)$$

d.h. es ergibt sich ein Zusammenhang, der nur von U_{ao} , RiL und $f_1(\Theta)$ abhängt.

Die Daten der Röhre wie Steilheit, Leerlaufverstärkung oder Innenwiderstand haben bei der Großsignalverstärkung keinerlei Bedeutung.

Die Stromflusswinkelfunktion $f_1(\Theta)$ hat bei einem Winkel von $\Theta = 122^\circ$ ein Maximum in Höhe von $f_1(122^\circ) = 0.535$. Daher wird das Maximum der Wechselleistung nach (Gl 5) bei Anpassung

$$P_{\sim opt} = 0.067 U_{ao}^2 / RiL \quad (Gl.6)$$

erreicht. Eine größere Wechselleistung als nach (Gl.6) berechnet kann die Röhre nicht abgeben. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Anodenspannung nicht beliebig erhöht werden kann, ohne die maximale Anodenverlustleistung zu überschreiten (siehe Gl 11).

Die tatsächliche Anodenverlustleistung ist die Differenz zwischen Gleich- und Wechselstromleistung. Mit der Abkürzung $\mathbf{a} = [Ra/RiL + 1/f_1(\Theta)]$ wird mit (Gl 2 u. Gl 4)

$$Qa = P_{\sim} - P_{\sim} = U_{ao}^2 / RiL * 1/\mathbf{a} [\psi(\Theta)/f_1(\Theta) - 1/2 * (Ra/RiL)/\mathbf{a}]. \quad (Gl.7)$$

Die Wechselleistung (Nutzleistung) ist die Differenz zwischen aufgenommener Anodengleichleistung und Anodenverlustleistung

$$P_{\sim} = P_{\sim} - Qa \quad (Gl.8)$$

und somit der Wirkungsgrad der Sender-Endstufe

$$\eta = P_{\sim} / P_{\sim} = (1 - Qa / P_{\sim}) = P_{\sim} / (P_{\sim} + Qa), \quad (Gl.9)$$

d.h. je kleiner die Anodenverlustleistung Qa umso größer wird der Wirkungsgrad.

Bezieht man die Anodenverlustleistung nach (Gl.5) auf den Leistungsinnenwiderstand und auf die Anodenspannung und schreibt (Gl.7) mit der Abkürzung $\mathbf{a} = [Ra/RiL + 1/f_1(\Theta)]$ in die Form

$$Qa * RiL / U_{ao}^2 = Qa^* = 1/\mathbf{a} [\psi(\Theta)/f_1(\Theta) - 1/2 * Ra/RiL/\mathbf{a}] \quad (Gl.10)$$

um, (Zusammenfassung der Größen, die von der Konstruktion der Röhre abhängig sind), dann bezeichnet der links stehende Ausdruck die normierte Anodenverlustleistung Qa^* mit der Dimension „1“.

Es gilt dann für die normierte Form der Anodenverlustleistung per Definition nach (Gl 10)

$$Qa^* = 1/\mathbf{a} [\psi(\Theta)/f_1(\Theta) - 1/2 * Ra/RiL/\mathbf{a}]. \quad (Gl.11)$$

Die die Leistung bestimmende Grenzgerade (RiL) kann dem Kennlinienfeld der verwendeten Röhre entnommen werden. Deren Größe ergibt sich allein aus der Konstruktion und der Größe der betreffenden Röhre. Man zeichnet die Grenzgerade in das Ausgangskennlinienfeld ein, dividiert die zugehörige Anodenspannung durch den entsprechenden Anodenstrom und erhält so den Leistungsinnenwiderstand RiL .

Bei Leistungspentoden erleichtert die abfallende Kennlinie im Ausgangskennlinienfeld die Ermittlung des RiL , bei Trioden ist ein wenig Zeichenarbeit erforderlich /1/.

Es sei betont, dass der Leistungsinnenwiderstand RiL in keinem Zusammenhang mit den anderen Röhrenkennwerten wie S (Steilheit), D (Durchgriff) und Ri (Innenwiderstand) steht /1/. Diese Röhrenwerte und die Barkhausen Gleichung gelten nur bei Kleinsignalaussteuerung. Bei der Großsignalaussteuerung haben S , D und Ri keinerlei Bedeutung, wie immer wieder behauptet wird.

3. Die Betriebsbedingungen bei begrenzter Anodenverlustleistung

Bei kleinen Anodenspannung U_{ao} , solange die maximale Anodenverlustleistung noch nicht erreicht wird, muss zur Erzielung größtmöglicher Leistung der Anpassungsfall mit $R_{iL}/R_a = f_1(\Theta)$ und $\Theta = 122^\circ$ (Anpassung) eingestellt werden.

Bei der geradlinig dynamischen Eingangskennlinie ist das Maximum der Stromflusswinkelfunktion $f_1(122^\circ) = 0.535$ und das Verhältnis der Stromflusswinkelfunktionen $f_1(122^\circ) / \psi(122^\circ) = 1.295$.

Damit berechnet sich die Grenze der Anodenspannung bei der gerade $Q_{a_{max}}$ erreicht wird mit (Gl 10) zu

$$U_{ao} = 2.74 \sqrt{Q_{a_{max}} R_{iL}} \quad (Gl.12)$$

Mit (Gl 2 und Gl 9) berechnet sich dann die optimal entnehmbare Wechselleistung mit der Grenze der

Anodenspannung nach (Gl 8) und für einen Stromflusswinkel von $\Theta = 122^\circ$ zu

$$P_{\sim max} = 0.503 Q_{a_{max}} \quad (Gl.13)$$

Die maximal der Röhre entnehmbare Nutzleistung (Effektivwert) ist also die Hälfte der maximalen Anodenverlustleistung, die dem Datenblatt der Hersteller entnommen werden kann, wenn nicht der Anodenspitzenstrom überschritten wird.

Für höhere Anodenspannungen als nach (Gl.12) bestimmt, müssen die Betriebsbedingungen unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Anodenverlustleistung gewählt werden. Dazu muss der Außenwiderstand R_a zur Verbesserung des Wirkungsgrades und zur Begrenzung des Spitzenstromes und damit der aufgenommenen Gleichleistung erhöht werden (siehe Rechenbeispiele in /1/ und unter Abschnitt 6.

4. Die Betriebsbedingungen bei begrenztem Anodenstrom

In vielen Fällen wird die Sendeleistung durch den maximalen Anodenstrom begrenzt. Der Zusammenhang zwischen Anodengleichstrom bei Aussteuerung und Anoden-Spitzenstrom ist nach /1/

$$I_a = I_{asp} * \psi(\Theta) \quad (Gl.14)$$

wobei die Stromflusswinkelfunktion $\psi(\theta)$ den Mittelwert des Stromes nach Fourier darstellt. Je nach Stromflusswinkel ist der Wert logischerweise zwischen 0 und 0.5 bei 180° (A-Betrieb).

Bei kleinen Anodenspannungen muss, ebenso wie bei Begrenzung durch die Anodenverlustleistung, der Anpassungsfall mit $R_a/R_{iL} = 1/ f_1(\Theta)$ und $\Theta = 122^\circ$ eingestellt werden.

Der Anodengleichstrom bei Vollaussteuerung wird nach /1/

$$I_a = \psi(\Theta)/f_1(\Theta)*(U_{ao}/R_{iL})*1/ [R_a /R_{iL}+1/f_1(\Theta)]. \quad (Gl.15)$$

Nach (Gl 15) wird der Anodenstrom bei Anpassung

$$I_a = \frac{1}{2} \psi(\Theta) U_{ao}/R_{iL}. \quad (Gl.16)$$

Für eine dynamisch gradlinige Kennlinie ist $\psi(122^\circ) = 0.414$ und daher der Anodenstrom

$$I_a = 0.207 U_{ao}/R_{iL}. \quad (Gl.17)$$

Dieser Betriebszustand kann eingestellt werden, bis $I_{a_{max}}$ erreicht wird. d.h. bis (Gl 17)

$$U_{ao} = 4.83 R_{iL} * I_{a_{max}}. \quad (Gl.18)$$

Stellt man (Gl 18) um und fasst alle Größen der Röhre zusammen, so erhält man

$$U_{ao}^* = U_{ao} / (R_{iL} I_{a_{max}}) \quad (Gl.19)$$

als normierte, dimensionslose Spannung, die entsprechend (Gl 19) zu

$$U_{ao}^* = 1/0.207 = 4.83.$$

Für $U_{ao}^* > 4.83$ müssen dann R_a/R_{iL} und der Stromflusswinkel Θ so eingestellt werden, dass sich mit dem maximalen Anodengleichstrom der maximal mögliche Wirkungsgrad ergibt. Diese Maximumbedingung mit Nebenbedingung ergibt sich aus (Gl 15, 19) zu

$$U_{ao}^* = f_1(\Theta) / \psi(\Theta) [R_a/R_{iL} + 1/ f_1(\Theta)] \quad (Gl.20)$$

und daraus der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{1}{2} \psi(\Theta) [1 - 1 / (U_{ao}^* \psi(\Theta))]. \quad (Gl.21)$$

Untersucht man (Gl 21) als Funktion des Stromflusswinkels, dann zeigt sich ein breites Maximum für den Wirkungsgrad. Abweichungen des Stromflusswinkels von $15 - 30$ Grad zu höheren

Werten hin verringern den Wirkungsgrad nur geringfügig, haben aber eine beträchtliche Reduzierung des Spitzenstroms zur Folge.

Der optimale Außenwiderstand, bei dem der maximal zulässige Anodenstrom erreicht wird, ergibt sich mit (Gl 20) zu

$$R_a/R_{iL} = U_{ao} \cdot \psi(\Theta) / f_1(\Theta) - 1/f_1(\Theta) \quad (\text{Gl.22})$$

und daraus der optimale Außenwiderstand

$$R_a = U_{ao} [\psi(\Theta)/f_1(\Theta)] / I_{a_{\max}} - R_{iL} / f_1(\Theta) \quad (\text{Gl.23})$$

Der (Gl.23) ist zu entnehmen, dass der Außenwiderstand von der Aussteuerung der Röhre abhängig ist. Je nach Grad der Aussteuerung muss der anodenseitige Resonanzkreis, der die Transformation - meist auf 50 Ω - übernimmt, nachgestellt werden.

Der Widerstand nach (Gl 23) ist für die Berechnung des Ausgangskreises maßgeblich. Bei Verwendung eines Pi-Filters erfolgt die Transformation dann von R_a auf R_L , wobei R_L meist 50 Ω ist.

5. Die Betriebsbedingungen und die Nutzleistung unter Berücksichtigung der Verluste im Anodenkreis

Der Anodenkreis wurde bislang als verlustlos angenommen. Wird der Verlust des ausgangsseitigen Parallelkreises berücksichtigt, erfolgt eine Leistungsteilung zwischen dem Lastwiderstand R_L und dem parallel liegenden Verlustwiderstand des Kreises R_p .

Daher wird aus (Gl 2) die durch die Leistungsteilung reduzierte Nutzleistung

$$P_{n\sim} = \frac{1}{2} U_{ao}^2 / (R_{iL}) \cdot (R_a/R_{iL}) \cdot 1 / [(R_a/R_{iL} + 1/f_1(\Theta))^2] \cdot [R_p / (R_p + R_L)] \quad (\text{Gl.24})$$

d.h. die zu Verfügung stehende Leistung wird im Verhältnis der Widerstand R_p und R_L aufgeteilt.

Die Leistung $P_v = P_{n\sim} \cdot R_L / (R_p + R_L)$ wird in Form von Wärme im Anodenkreis verbraucht.

Der Wirkungsgrad wird entsprechend (Gl 8) auf

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_a \cdot [R_p / (R_p + R_L)] \quad (\text{Gl.25})$$

reduziert.

Die Röhre muss dazu immer mit Unteranpassung betrieben werden. Die im Schwingkreis vorhandenen Verluste verhindern die Anwendung hoher Außenwiderstände und damit auch hoher Anodenspannungen. Weitere Ausführungen dazu unter /1/.

6. Beispiel einer Berechnung für eine Endstufe in AB₁ Betrieb

Die oft genutzte GU 43 B zeigt Bild 1

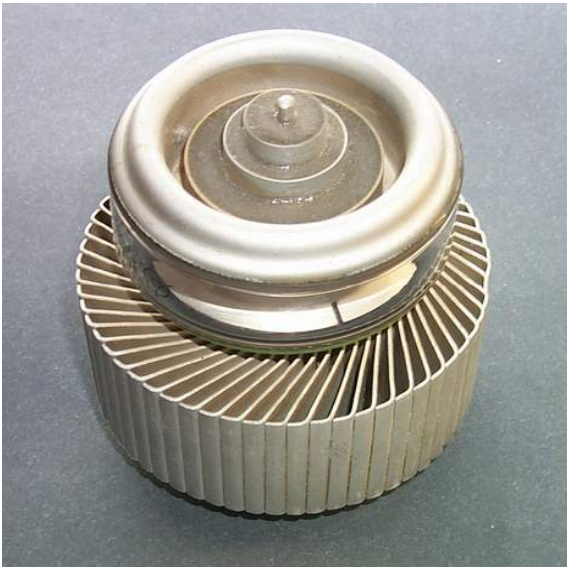


Bild 1: GU 43 B aus russischer Produktion

und hat folgende Daten bzw. Grenzdaten

Anodenspitzenstrom I_{asp}	1000 mA
Kathodenspitzenstrom I_k	3200 mA
Anodenspannung $U_{ao,max}$	3300 V
Anodenverlustleistung $Q_{a,max}$	1000 W
Maximaler Output	1600 W
Schirmgitterspannung U_{g2}	500 V
Schirmgitter-Verlustleistung $P_{g2,max}$, $I_{g2} = 80$ mA	28 W
Gittervorspannung - U_{g1}	200 V
Steuergitter-Verlustleistung $P_{1,max}$, $I_{g1} = 50$ μ A	5 W
Heizspannung	11.3 – 13.9 V
Heizstrom	6.0 – 7.2 A
Vorheizzeit der Kathode	180 s
Maximale Temperatur der Anode	150° C
Ausgangskapazität	10 – 18 pF
Eingangskapazität	90 – 100 pF
Maximale Betriebsfrequenz	100 MHz
Höhe	125 mm
Durchmesser	100 mm
Gewicht ohne Sockel	1.5 kg

Tab. 1 Daten der Tetrode GU 43 B

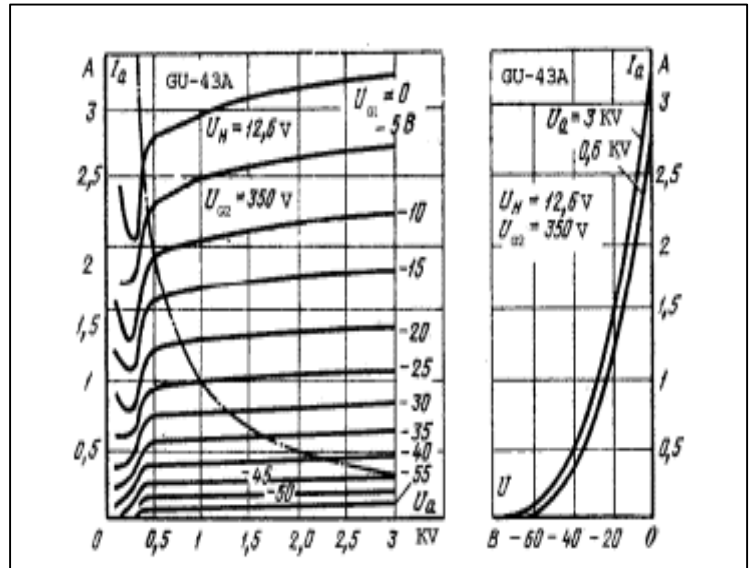


Bild 2: Kennlinienfelder der GU 43 B

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge berechnen wir eine Endstufe mit einem Schwingkreis als Außenwiderstand im AB₁ - Betrieb.

Die Röhre sei eine GU 43 B mit einer Anodenspannung $U_{ao} = 2800$ V und dem Anodenspitzenstrom $I_{asp} = 1000$ mA. Zeichnet man die Grenzgerade in das Ausgangskennlinienfeld ein, kann der Leistungsinnenwiderstand zu $R_{iL} = 300$ V/1 A = 300 Ω entnommen werden. Die Ausgangsgerade ist als linear angenommen, da eine Abstimmung auf Resonanz vorausgesetzt wird.

AB₁ - Betrieb

Beim AB₁-Betrieb ist der Stromflusswinkel etwa $\Theta = 140$ Grad und daher nach $1/f_1(140) = 0.529$ und $\psi(\Theta) = 0.4532$.

Der Ruhestrom im AB₁-Betrieb sei $I_{ao} = 300$ mA und liegt dabei etwa im gradlinigen Teil der Eingangskennlinie (Bild 2).

Die nicht aussteuerbare Anodenrestspannung berechnet sich zu $u_r = I_{asp} * R_{iL} = 1000$ mA * 300 $\Omega = 300$ V und damit die **Amplitude** der Anodenwechselspannung $u_a = 2800$ V – 300 V = 2500 V.

Die minimale Anodenmomentanspannung ist identisch mit der Restspannung u_r . Sie liegt unterhalb der Spannung des Gitter 2 von $U_{g_2} = 500 \text{ V}$, so dass eine Stromübernahme durch das Gitter 2 erfolgt. Dessen Verlustleistung ist auf $P_{g_2} = 28 \text{ W}$ begrenzt, wobei der Gitterstrom $I_{g_2} = 80 \text{ mA}$ nicht überschritten werden darf, ohne das Gitter 2 zu zerstören.

$$U_{\min} = 2800 \text{ V} - 2500 \text{ V} = 300 \text{ V}.$$

Die maximale mögliche Anodenwechselspannung wird für diese Spannung muss nicht nur der Trennkondensator zum Ausgangskreis dimensioniert werden.

$$U_{\max} = 2800 \text{ V} + 2500 \text{ V} = 5300 \text{ V}.$$

Der Anodengleichstrom bei Aussteuerung steigt vom Ruhestrom $I_{a0} = 300 \text{ mA}$ auf

$$I_a = I_{asp} * \psi(\Theta) = 1000 \text{ mA} * 0.4532 = 0.4532 \text{ A}.$$

Für diesen Strom muss das Hochspannungsnetzteil ausgelegt sein, dessen Leistung sich zu

$$P_n = 2800 \text{ V} * 0.4532 \text{ A} = 1268.96 \text{ W} \text{ berechnet.}$$

Der Anodenruhestrom ohne Aussteuerung bei AB_1 ist $I_{a0} = 300 \text{ mA}$ um nichtlineare Verzerrungen auf ein Minimum zu reduzieren /1/.

Die Gleichleistung **ohne Aussteuerung** wird und liegt unterhalb der maximal zulässigen Anodenverlustleistung bei Kühlung durch einen ausreichenden Luftstrom.

$$P_{\sim} = I_{a0} * U_{a0} = 0.3 \text{ A} * 2800 \text{ V} = 840 \text{ W}$$

Bei Aussteuerung erhöht sich die Gleichleistung auf

$$P_{\sim} = I_a * U_{a0} = 0.4532 \text{ A} * 2800 \text{ V} = 1268.96 \text{ W}.$$

Die Amplitude der Grundschiwingung des Anodenwechselstromes ist

$$i_{a1} = I_a * f_1(140) / \psi(140) = 0.4532 \text{ mA} * 0.529 / 0.4532 = 0.529 \text{ A}$$

oder auch

$$i_{a1} = I_{asp} * f_1(\Theta) = 1000 \text{ mA} * 0.529 = 0.529 \text{ A}$$

oder auch

$$i_{a1} = u_r * f_1(\Theta) / R_{iL} = 300 \text{ V} * 0.529 / 300 \Omega = 0.529 \text{ A}.$$

Der Spitzenstrom wird und liegt nur wegen der Rundungsfehler unterhalb des maximal zulässigen Spitzenstromes von

$$I_{asp} = (0.4532 + 0.529) \text{ A} = 0.9822 \text{ A}$$

$$I_{asp} = 1000 \text{ mA} - \text{nach Datenblatt.}$$

Der Außenwiderstand für die Betriebsfrequenz (Grundschiwingung) wird

$$R_a = u_a / i_{a1} = 2500 \text{ V} / 0.529 \text{ A} = 4725 \Omega$$

(genau 4725.89Ω für die folgende Rechnung).

Die Nutzleistung im AB_1 Betrieb berechnet sich mit den Amplituden von Strom und Spannung

$$P_{\sim} = \frac{1}{2} i_{a1}^2 * R_a = \frac{1}{2} (0.529 \text{ A})^2 4725 \Omega = 661.25 \text{ W}$$

oder auch

$$P_{\sim} = \frac{1}{2} u_a * i_{a1} = \frac{1}{2} 2500 \text{ V} * 529 \text{ mA} = 661.25 \text{ W}$$

und ist weit weg von den sagenumwogenen Kilowatt die man mit dieser Röhre erreicht - **ohne die Grenzdaten der Röhre zu überschreiten (siehe unten)**

Diese Wirkleistung wird durch die Verluste im Anodenkreis reduziert. Wird ein Pi-Filter zur Transformation auf 50Ω mit einer Spulengüte von $Q = 100$ angenommen, ist der Verlust $/2/$ bei $f = 3.6 \text{ MHz}$ und einem antennenseitigen Kondensator von $C_2 = 100 \text{ pF}$ immerhin $P_v = 74 \text{ W}$.

Die verbleibende Leistung ist die an 50Ω zur Verfügung steht. Diese Leistung ist die verfügbare Leistung des Senders bei Anpassung.

$$P_{\text{out}} = (661 - 74) \text{ W} = 587 \text{ W},$$

Der Gesamt-Wirkungsgrad (gerundet) ist

$$\eta_{\text{ges}} = P_{\sim} / P_{\text{e}} = 587 \text{ W} / 1269 \text{ W} = 0.4625$$

entsprechend 46.25 % ohne Berücksichtigung der Heizleistung.

Die Anodenverlustleistung bei Aussteuerung wird und liegt unter der maximal zulässigen Anodenverlustleistung von $Q_{\text{max}} = 1000 \text{ W}$.

$$Q_a = 1269 \text{ W} - 661 \text{ W} = 608 \text{ W}$$

Die maximal mögliche Anodenwechselleistung wird bei Anpassung und für den Stromflusswinkel von $\Theta = 122 \text{ Grad}$ erreicht und ist nach (Gl 5, 6)

$$P_{\sim} = 1/8 U_{\text{ao}}^2 / [\text{RiL} / f_1(\Theta)] =$$

$$= 1/8 (2800 \text{ V})^2 * 0.535/300 = 1747 \text{ W}$$

mit dem Wirkungsgrad

$$\eta = 1/4 f_1(\Theta) / \psi(\Theta) = 1/4 1.295 = 0.3237$$

entsprechend $\eta = 32.37 \%$.

Die Anodenverlustleistung wird dabei weit überschritten. Der Anodenstrom (Gl 16) wird

$$I_a = 1/2 \psi(\Theta) U_{\text{ao}} / \text{RiL} = 1/2 0.413 * 2800 \text{ V} / 300 \Omega$$

$$= 1.9273 \text{ A und}$$

überschreitet den zulässigen Anodenspitzenstrom. Bei Endstufen kleiner Leistung, wie im Amateurfunk gebräuchlich, tritt der Wirkungsgrad meist in den Hintergrund, man will möglichst viel Nutzleistung erzielen.

Bei Anpassung $\text{RiL}/R_a = f_1(\Theta)$ und dem Maximum der Stromflusswinkelfunktionen für $f_1(122^\circ) = 0.535$ wird die maximal zulässige Anodenspannung aus (Gl.7) $U_{\text{ao,max}} = 1500 \text{ V}$. Bei Anpassung darf dann keine höhere Anodenspannung gewählt werden, ohne die Grenzdaten der Röhre zu überschreiten.

Der Anpassungszustand ist wegen des schlechten Wirkungsgrades natürlich absolut uninteressant. Der Anodengleichstrom, der bei Anpassung fließen würde, berechnet sich aus (Gl.16) zu $I_a = 1/2 \psi(\Theta) U_{\text{ao,max}} / \text{RiL} = 1/2 0.413 * 1500 \text{ V} / 300 \Omega \approx 1000 \text{ mA}$.

Der minimale Außenwiderstand, bei dem der maximal zulässige Anodenstrom gerade erreicht wird, berechnet sich nach (Gl 23) und ist

$$R_a = U_{\text{ao}} [\psi(\Theta) / f_1(\Theta)] / I_{a,\text{max}} - \text{RiL} / f_1(\Theta) = 2800 \text{ V} / 1 \text{ A} * 1 / 1.295 - 300 \Omega / 0.535 = 2162 - 560 \Omega = 1602 \Omega.$$

Wird dieser Anodenwiderstand unterschritten, dann wird der zulässige Anodenspitzenstrom überschritten. Dies kann leicht geschehen, wenn bei voller Aussteuerung der Leistungsstufe eine Veränderung in der Abstimmung vorgenommen wird.

Besonders gefährlich beim Einsatz des mehrdeutigen Pi-Filters $/2/$, das gerne als Ersatz für den Parallelkreis in der Anode eingesetzt wird. Die richtige Aussteuerung einer Endstufe kann durch Messung des Schirmgitterstromes leicht überprüft werden. Steigt der Schirmgitterstrom stark an, ist das ein Zeichen für den Übergang in den überspannten Betrieb. Die Aussteuerung muss dann etwas zurückgenommen werden, da im überspannten Betrieb der Steuer-Gitterstrom I_{g_1} zu- und die Nutzleistung abnimmt.

Bei reellem Abschluss (Abstimmung auf Resonanz) ist die Gitterwechselspannung in Gegenphase zur Anodenwechselspannung. Liegt die momentane Anodenspannung unterhalb des Momentanwertes der Gitterwechselspannung nimmt der Strom im Gitter 1 zu, der $I_g = 50 \mu\text{A}$ nicht überschreiten darf ohne das Gitter in seiner Feinstruktur zu zerstören. Die Gittervorspannung ist etwa $U_{g1} = -50 \text{ V}$ und muss zur Einstellung des Ruhestroms von $I_{a0} = 300 \text{ mA}$ einstellbar sein.

Aus dem Eingangskennlinienfeld ist die Amplitude der Gitterwechselspannung für Vollaussteuerung bis $I_{a_{\max}} = 1 \text{ A}$ ungefähr $u_g = 20 \text{ V}$.

Ein Gitterstrom I_{g1} kann nur während der positiven Spitze der Gitterspannung fließen. Die notwendige Steuerleistung kann in zwei Komponenten aufgeteilt werden. Ein Teil wird der Gittervorspannungsquelle zugeführt, wenn diese nicht kapazitiv überbrückt ist, der Rest der Steuerleistung tritt als Wärmeleistung P_{g1} am Steuergitter auf/1/. Nähere Information unter /1/.

Das Pi-Filter als Ausgangskreis

Die Berechnung des Pi-Filters muss unter Berücksichtigung der Ausgangskapazität der Röhre von ca. $C_a = 100 \text{ pF}$ erfolgen. Die anodenseitige Kapazität C_1 kann nicht negativ werden und muss einen endlichen Wert für die Abstimmung behalten. Der Anodenwiderstand, der sich bei Vollaussteuerung einstellt ist $R_a = 4725 \Omega$, der auf 50Ω transformiert werden muss.

Das ist mit einem Pi-Filter nicht möglich, da der anodenseitige Kondensator $C_1 = 97 \text{ pF}$ beträgt und daher die Ausgangskapazität der Röhre in der gleichen Größenordnung liegt und eine Abstimmung nicht mehr möglich ist. Wir müssen den Anodenwiderstand verkleinern. Nach (Gl.23) ist der minimale Wert des Anodenwiderstandes bei einem Stromflusswinkel von $\Theta = 140^\circ$

$$R_a = U_{a0} (\psi(\Theta)/f_1(\Theta)) / I_{a_{\max}} - R_{iL} / f_1(\Theta)$$

und die Werte von oben eingesetzt

$$R_{a_{\min}} = 2800 \text{ V/1A} * 0.453 / 0.529 - 300 \Omega / 0.529 = 2398 - 567 = 1831 \Omega.$$

Wir wählen $R_a = 2500 \Omega$ und überprüfen rückwärts ob die Grenzdaten der Röhre nicht überschritten werden.

Mit dem Anodenspitzenstrom $I_{a_{\max}} = 1000 \text{ mA}$ bleibt bei einem Stromflusswinkel von 140° die Amplitude des Anodenwechselstromes

$$i_{a1} = I_{asp} * f_1(\Theta) = 1000 \text{ mA} * 0.529 = 0.529 \text{ A}$$

Bei Aussteuerung bleibt der Anodenstrom wie oben

$$I_a = I_{asp} \psi(\Theta) = 1000 \text{ mA} * 0.4532 = 0.4532 \text{ A}.$$

Die Gleichleistung bleibt wie oben

$$P_{\text{=}} = I_a * U_{a0} = 0.4532 \text{ A} * 2800 \text{ V} = 1268.96 \text{ W}$$

Die Anodenwechselspannungsamplitude wird

$$u_a = i_a R_a = 0.529 \text{ A} * 2500 \Omega = 1322.5 \text{ V}$$

Die Nutzleistung dann

$$P_{\sim} = \frac{1}{2} i_{a1}^2 * R_a = \frac{1}{2} (0.529 \text{ A})^2 * 2500 \Omega = 349.8 \text{ W}.$$

Der Wirkungsgrad bei verlustlosem Ausgangskreis

$$\eta = 350 / 1269 = 0.2758 \text{ entspr. } 27.58 \%$$

Die Anodenverlustleistung im Betrieb ist

$$Q_a = 1269 \text{ W} - 350 = 919 \text{ W}.$$

Mit den letzten 7 Rechenschritten können die Angaben jeder beliebigen Endstufe auf Richtigkeit überprüft werden. Da die Stromflusswinkelfunktion $f_1(\Theta)$ für eine gradlinig dynamische Kennlinie nur den Maximalwert von 0.535 annimmt und für andere Kennlinien und Winkel immer unterhalb dieses Wertes liegt, kann bei bekanntem Anoden-Spitzenstrom (nach Datenblatt) sofort die Amplitude des Anodenwechselstromes berechnet werden. Mit dem Außenwiderstand R_a ergibt sich die Nutzleistung, die überhaupt mit der Röhre erzeugt werden kann.

Will man wirklich den Wirkungsgrad wissen, kann aus der Anodenspannung (unter Last) und der Stromwinkelfunktion $\psi(\Theta)$, die zwischen 0 und maximal 0.5 liegt, die Gleichleistung berechnet werden. Diese Gleichleistung bei Aussteuerung ist auch durch Messung von Anodenspannung und Anodenstrom bestimmbar.

Immer überprüfen sollte man die Anodenverlustleistung, die sich sehr einfach aus der aufgenommenen Gleichleistung (Messung) und der Nutz(wechsel)leistung ergibt. Einfach die Differenz bilden. Die Nutzleistung ist natürlich auch an einem Dummy-Load messbar. Nur die Verluste im Ausgangskreis müssen geschätzt werden. Die maximal einer Röhre entnehmbare Nutzleistung ist immer nur die Hälfte der maximalen Anodenverlustleistung nach Datenblatt (Gl 13), wenn die Grenzdaten der Röhre eingehalten werden.. Diese Nutzleistung ist nicht zu verwechseln mit der PEP Leistung /1/ und der Spitzenleistung bei Modulation.

Merke:

Bei einer bestehenden Endstufe kann die Ausgangsleistung an einer Dummy-Load gemessen werden. Die zugeführte Gleichstromleistung bei Aussteuerung ist das Produkt aus Anodenspannung und – Strom. Die Differenz ist die um die Verluste im Ausgangskreis verminderte Anodenverlustleistung der Röhre.

Die Verluste im Ausgangskreis können mit etwa 80 bis 100 W angesetzt werden. Gleiche Überlegungen gelten auch für Endstufen mit Transistoren.

Beispiel:

Wir messen an einem 50 Ω Lastwiderstand den Effektivwert der Leistung zu $P_{out} = 700$ W. Die Anodenspannung beträgt unter Last $U_{ao} = 2500$ V, der Anodenstrom bei Aussteuerung ist $I_a = 512$ mA. Die Eingangsleistung daraus $P_{in} = 2500$ V * 0.512 A = 1280 W. Als Ausgangskreis wird ein Pi-Filter benutzt, dessen Verluste mit $P_v = 100$ W angenommen werden. In das Pi-Filter werden also $P = 700$ W + 100 W geliefert. Die Differenz zur Gleichleistung ist die Anodenverlustleistung während des aktiven Betriebes und wird $Q_a = 1280$ W – 800 W = 480 W. Diese darf die maximale Anodenverlustleistung der betreffenden Röhre nicht überschreiten ohne dauerhafte Schäden zu verursachen.

Für das ausgangsseitige Pi-Filter ergeben sich bei $f = 3.6$ MHz mit dem gewählten Anodenwiderstand $R_a = 2500$ Ω folgende Werte /2/ für unterschiedliche Kapazitätswerte C_2 auf der 50 Ω Seite: $Q_L = 100$, $Q_c = 500$, $f = 3.6$ MHz

C_2 pF	L μH	C_1 pF	U_{c1} V	U_{c2} V	U_L	I_L	L_v W	Güte Q
100	16.01	121.5	1323	182	1330	2.6	0.22	7.0
200	15.96	123.8	1323	182	1350	2.6	0.23	7.2
500	14.85	138.4	1323	182	1402	3.0	0.26	8.4
1000	11.82	180.5	1323	180	1451	3.8	0.36	11.3

Tab. 2: Daten des Pi-Filters für das obige Rechenbeispiel bei einer Leistung von 350 W.

Man sieht an diesem Beispiel wieder wie sich die Verluste erhöhen, wenn eine große Ausgangskapazität C_2 auf der 50 Ω Seite gewählt wird /2/, außerdem erhöht sich die Güte und die Abstimmung wird empfindlicher.

Da die Röhre etwa eine Anodenkapazität von $C = 100$ pF hat, ist dieser Wert vom Kapazitätswert C_1 nach Tab. 2 abzuziehen. Der anodenseitige Kondensator kann daher sehr klein im Kapazitätswert ausfallen, muss aber die maximal auftretende Wechselfspannung aushalten können. Hier bietet sich immer ein Vakuum-Kondensator an. Niemals vergessen sollte die antennenseitige Schutzdrossel, für den Fall das der Koppelkondensator seinen Geist aufgibt und die volle Anoden-Spannung an der Antenne liegt.

Gehen wir noch der letzten Frage nach: Welche maximale Leistung kann mit der GU43 B erreicht werden, wenn ohne Rücksicht auf Verluste die Grenzdaten der Röhre unberücksichtigt bleiben?

Der maximale Kathoden-Impulsstrom ist $I_{ap} = 3200 \text{ mA}$ und die maximale Anodenspannung $U_{ao} = 3300 \text{ V}$.

Daraus:

die Amplitude des Anodenwechselstromes
 die Restspannung
 die Amplitude der Anodenwechselspannung
 der dynamische Anodenwiderstand
 die Anodenstrom bei Aussteuerung
 die Gleichleistung bei Aussteuerung
 die Nutzleistung bei Aussteuerung
 die Anodenverlustleistung

$$\begin{aligned}
 i_a &= 3200 \text{ mA} \cdot 0.535 = 1.712 \text{ A} \\
 u_r &= 3200 \text{ mA} \cdot 300 \Omega = 960 \text{ V} \\
 u_a &= 3300 \text{ V} - 960 \text{ V} = 2340 \text{ V} \\
 R_a &= 2340 \text{ V} / 1.712 \text{ A} = 1366.68 \Omega \\
 I_a &= 3200 \text{ mA} \cdot 0.414 = 1.322 \text{ A} \\
 P_{=} &= 3300 \text{ V} \cdot 1.322 \text{ A} = 4362.6 \text{ W} \\
 P_{\sim} &= \frac{1}{2} (1.712 \text{ A})^2 1366 \Omega = 2001 \text{ W} \\
 Q_a &= 4362 \text{ W} - 2001 \text{ W} = 2325 \text{ W}
 \end{aligned}$$

ist natürlich jenseits von Gut und Böse und reduziert die Lebensdauer der Röhre oder vernichtet diese bei längeren Aussteuerungsphasen.

Typisches Beispiel einer Endstufe mit einer GU 43 B zeigt Bild 3

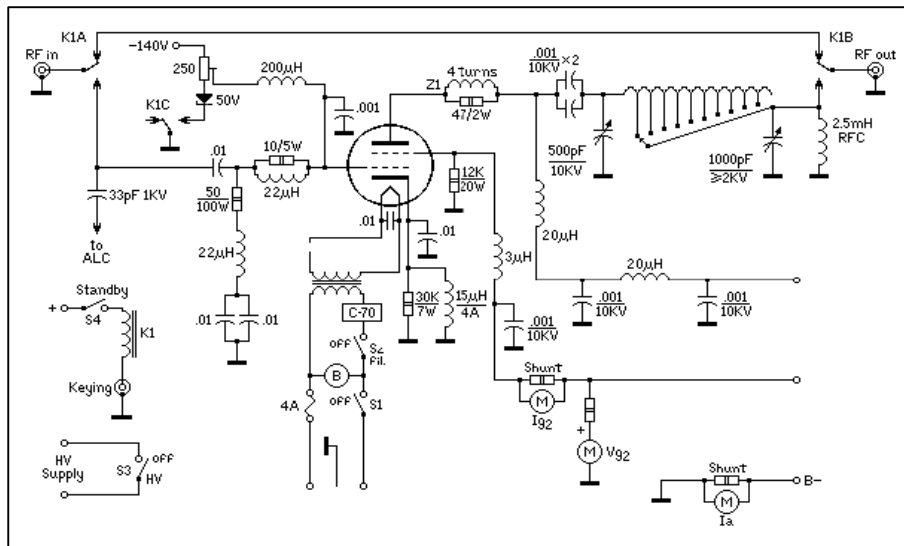


Bild 3: Beispiel einer Röhrendstufe mit GU 43 B mit diversen Schutzfunktionen

DL3LH, Walter
wa-schau@t-online.de
dl3lh@gmx.de
www.heide-holst.de

Literatur

/1/ Leistungsstufen mit Röhren und Transistoren, Dr. Schau, DL3LH

/2/ Die Anodendrossel in Sendeendstufen und deren Dimensionierung

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.