

Tafelwerk zu Leistungsverstärkern

**Kleine Gedächtnisstütze
zu den wichtigsten Zusammenhängen
bei der Dimensionierung
von Leistungsverstärkern mit Röhren**

von Martin Lemke

Einleitung

Diese Mappe erklärt nichts und wird auch niemanden wirklich klüger machen. Sie dient nur als Erinnerungshilfe um schnell mal eine Formel nachzuschlagen, wenn man z.B. eine bekannte Schaltung nachzuvollziehen versucht oder selbst eine entwickelt. Dass es nicht auf das durchdringen von Zusammenhängen, sondern pragmatische Bauteildimensionierung ankommt sieht man auch daran, dass, so oft es ging, auf Faustformeln zurückgegriffen wird.

Dabei fasst sie nur die Formeln für die Berechnung der gebräuchlichsten Leistungsverstärker zusammen. Es gibt weitere. So ist z.B. PPP auch in Klasse B und ohne Kathodenkondensator denkbar. Auch SRPP ist ohne Kathodenwiderstand und auch in Klasse AB und B möglich, sowie mit zwei statt einer Steuerspannung. Diese Schaltungsvarianten sind außer acht gelassen, weil sie praktisch nie vorkommen und meist auch keine echten Vorteile bringen. Es gibt aber noch sehr viele weitere Leistungsverstärkervarianten: Ultralinear-, Brückenbetrieb, Splitload, Klasse 2 und viele andere mehr. Wer eine kleine Formelübersicht zu einer davon machen möchte, ist herzlich angehalten dies zu tun. Ich werde es hier einarbeiten.

Diese Mappe ist auf Anregung des Tube-Town-Forums¹ entstanden. Sie sollte zunächst ein ganzes Tafelwerk der wichtigsten Formeln aus dem Röhrenbereich werden. Das könnte sie auch jetzt noch. Mangels Hilfe ist bisher aber nur dieses eine Kapitelchen fertig geworden. Wer Lust hat darf sich gerne beteiligen und auch ein Kapitelchen machen. Am liebsten wäre mir eine Kugelschreibographie. Das geht für mich und Sie, so Sie helfen wollen, am schnellsten. Kleine Schaltskizzen, Wurzelzeichen und Bruchstriche, Indizes usw. sind so schnell umgesetzt. Die Digitalisierung übernehme ich. Z.B. folgende Themen stehen noch aus:

- Frequenzabhängige Spannungsteiler (Koppelkondensatoren)
- Gegenkopplungen
- Netzteile
- Dämpfungsfaktor
- Quellwiderstand, Eingangswiderstand, Anpassungsarten
- Vorstufenschaltungen (Pentode, Triode, Kathodenfolger, SRPP usw.)
- Sicherheit
- Weitere Themenwünsche nur bei Mitarbeit!

Danke an alle, die sich schon einem Thema angenommen haben.

Viele Grüße
Martin Lemke

¹ <http://www.tube-town.de/ttforum/index.php>

Inhalt

Kapitel	Seite
1. Lesehilfe	4
2. Leistungsverstärker in Klasse A_1	5
2.1. Eintakt	6
2.2. Gegentakt	8
2.3. PPP (Circlotron)	10
2.4. SRPP	12
3. Leistungsverstärker in Klasse AB_1	14
3.1. Gegentakt	15
3.2. PPP	17
4. Leistungsverstärker in Klasse B_1	19
4.1. Gegentakt	20
5. Literatur	22
6. Kleingedrucktes	23

1. Lesehilfe

Die Mappe ist nach den Betriebsklassen A, AB und B in drei Kapitel unterteilt und stellt deren wichtigsten Schaltungsvarianten als Tabelle vor. Wenn für Trioden und Pentoden verschiedene rechnerische Zusammenhänge gelten, dann ist darauf Rücksicht genommen.

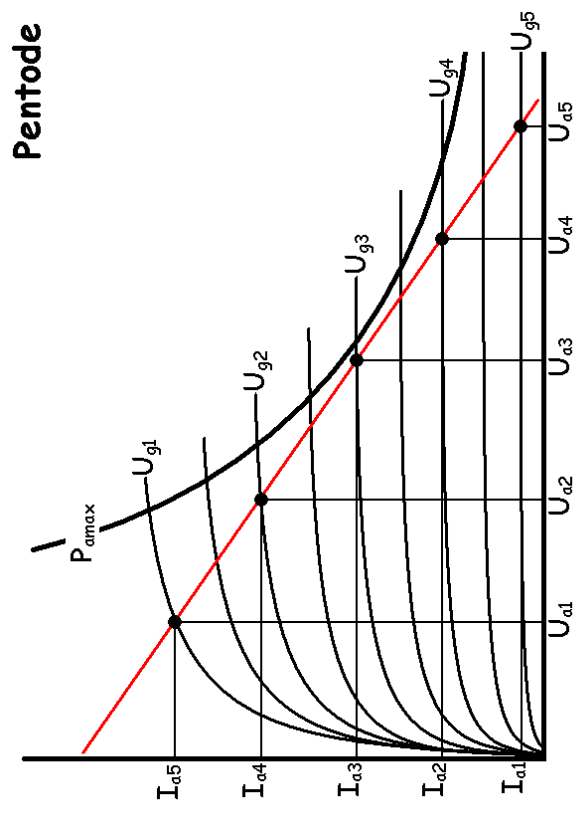
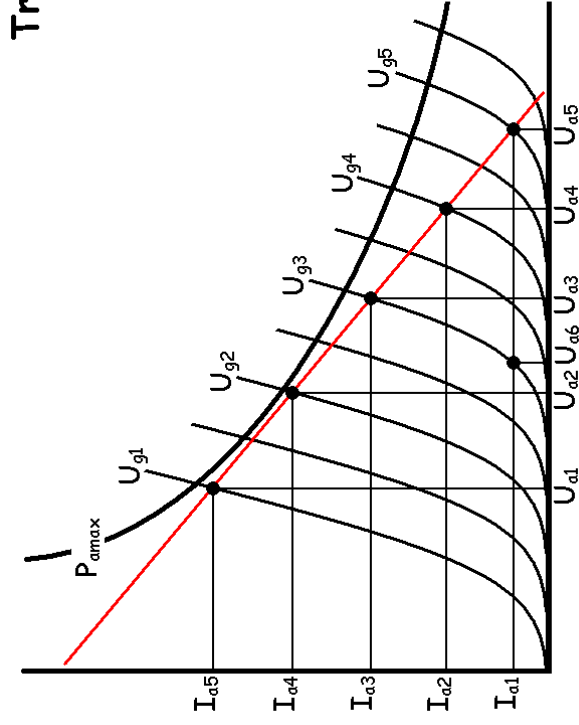
Am Anfang jeden Kapitels finden sich idealisierte Kennliniendiagramme mit eingetragener Lastgerade. Die dort eingezeichneten Punkte für Anodenstrom, Anodenspannung und Gittervorspannung sind Grundlage für die Formeln in den Tabellen. Nummerierte Werte von I_a , U_a oder U_g , wie z.B. U_{g3} oder U_{a2} sind immer im Diagramm zu finden.

Andere Werte finden sich in der Tabelle selbst. Die Tabellen sind so gestaltet worden, dass ein Wert, der in einer Zeile gebraucht wird, immer schon in einer darüber liegenden Zeile berechnet wurde. So kann man bei der Berechnung einer Schaltung die Tabellen von oben nach unten durchgehen.

Die Formelzeichen weichen eventuell hier und da vom Standard ab. Ich habe versucht sie so zu wählen das Verwechslungen, wie z.B. zwischen r_p und R_p und ähnliches nicht vorkommen können und ein wenigstens halbwegs einheitliches System zu erkennen ist.

2. Leistungsverstärker in Klasse A₁

Klasse A Verstärker zeichnen sich dadurch aus, dass ihre mittlere Stromaufnahme konstant ist. D.h. die Stromaufnahme des Verstärkers bleibt stets gleich, egal wie groß die Steuerspannung ist. Die Kennlinien eines Klasse A Verstärkers sehen Beispielhaft wie folgt aus:



Der Punkt mit den Werten $\{I_{a3}, U_{a3}, U_{g3}\}$ ist der Arbeitspunkt in Ruhe. Klasse A₁ Betrieb liegt genau dann vor, wenn folgende Kriterien gelten.

1. U_{g1} ist nicht negativ, aber sehr nahe bei OV.
2. I_{a3} ist in etwas der Mittelwert aus I_{a1} und I_{a5}
3. U_{g3} ist in etwas der Mittelwert aus U_{g1} und U_{g5}
4. I_{a5} ist im Verhältnis zu I_{a1} sehr klein, im theoretischen Idealfall sogar OA.

2.1. Eintakt

	Triode	Pentode
Gittervorspannung	$U_g = \frac{U_{g5} - U_{g1}}{2}$	
Gitterstrom	$I_g = 0A$	
Gitterableitwiderstand	R_g <i>Maximalwert siehe Datenblatt</i>	
Eingangskapazität	$C_{ein} = C_{gk} + V \times C_{ga}$ C _{ga} : Kapazität zwischen Gitter und Anode, siehe Datenblatt C _{gk} : Kapazität zwischen Gitter und Kathode, siehe Datenblatt	$C_{ein} = C_{gk} + C_{gg2}$ C _{gg2} : Kapazität zwischen Gitter und Schirmgitter, siehe Datenblatt C _{gk} : Kapazität zwischen Gitter und Kathode, siehe Datenblatt
Eingangswiderstand	$R_{ein} = \frac{1}{R_g} + 2 \times \pi \times f \times C_{ein}$	
Kathodenspannung	$U_k = -U_g$	
Kathodenstrom	$I_k = I_a$	$I_k = I_a + I_{g2}$
Kathodenwiderstand	$R_k = \frac{U_k}{I_a}$	
Kathodenkondensator	$C_k = \frac{5,7 \times S}{2 \times \pi \times f_u}$ S: Stellheit, Siehe Datenblatt f _u : gewünschte untere Grenzfrequenz	
Anodenspannung	$U_a = U_{a3}$	
Anodenruhestrom	$I_a = I_{a3}$	
Anodenverlustleistung	$P_a = U_a \times I_a$ $P_a = P_{amax}$	
Maximale Anodenverlustleistung	optimal	
Betriebsspannung	mit R _k $U_b = U_k + U_a + I_a \times R_{draht}$ R _{draht} : Drahtwiderstand des Übertragers	<i>siehe Datenblatt</i>
	ohne R _k $U_b = U_a + R_{draht}$	
Schirmgitterspannung		U_{sg} <i>siehe Datenblatt</i>
Schirmgitterstrom		I_{sg} <i>siehe Datenblatt</i>

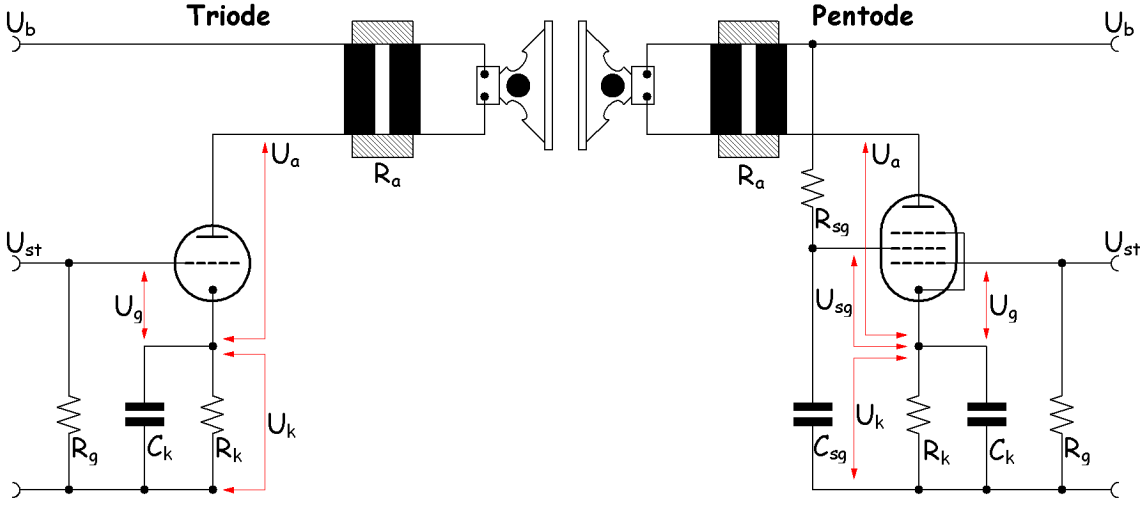
Diese Art der Leistungsstufe ist die einfachste Art eine Leistungsstufe mit Röhren zu schalten. Vor- und Nachteile der Schaltung sind:

- + einfacher Aufbau
- + geringe Anforderungen an die Stromlieferfähigkeit des Netzteils
- + sehr angenehmes Klirrspektrum
- + keine Phasenumkehr nötig
- + relativ geringe Versorgungsspannung
- schlechter Wirkungsgrad
- ohne Gegenkopplung sehr geringer Dämpfungsfaktor
- gute Siebung des Netzteils nötig
- für gute Tieftonwiedergabe werden große Übertrager benötigt
- hoher Klirrfaktor

Tips: Man sollte bei dieser Schaltung vor allem bei Verwendung von Pentoden wenigstens eine kleine Gegenkopplung einsetzen, am besten eine lokale. Ein Kniff für eine sehr phasenrichtige Variante wäre die Lautsprecherwicklung des Übertragers in Reihe zum C_k zu legen.

Eine weitere Maßnahme Verzerrungen zu senken, ist die Kompensation der Verzerrungen der Endstufe durch die der Vorstufe. Ein Rechenbeispiel findet sich in der Röhrenfibel unter Theorie im Tractatus- Calculo Amplificatus.

Schirmgitterwiderstand	$R_{sg} = \frac{U_b - U_{sg} - U_k}{I_{sg}}$	
Schirmgitterverlustleistung	$P_{sg} = U_{sg} \times I_{sg}$	
Schirmgitterkondensator	$C_{sg} = \frac{5}{\pi \times f_{ii} \times R_{sg}}$ <small>f_{ii}: gewünschte untere Grenzfrequenz</small>	
Innenwiderstand	$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_{a3} - U_{a6}}{I_{a3} - I_{a1}}$ $R_i = \infty$	
Arbeitswiderstand	$R_a = \frac{U_{a5} - U_{a1}}{I_{a5} - I_{a1}}$	
optimal	$R_a \approx 2 \dots 3 \times R_i$	
Anodenwechselspannung	$U_w = U_{a5} - U_{a1}$	
Anodenwechselstrom	$I_w = I_{a5} - I_{a1}$	
Steuerspannung	$U_{st} = U_{g5} - U_{g1} $	
Spannungsverstärkung	$V = \frac{U_w}{U_{st}}$	
Ausgangsleistung	$P_{aus} = \frac{(U_{a3} - U_{a1}) \times (I_{a3} - I_{a1})}{2}$	
Klirrfaktor	maximal	$P_{aus} = \frac{P_a}{2}$
	zweite Harmonische	$k_2 = \left \frac{2 \times I_a - I_{a1} - I_{a5}}{2 \times (I_{a5} - I_{a1})} \right $
	dritte Harmonische	$k_3 = \left \frac{2 \times I_{a4} - I_{a2} - I_{a5} + I_{a1}}{3 \times (I_{a5} - I_{a1})} \right $
gesamt	$K = \sqrt{k_2^2 + k_3^2}$	
Zusammenhänge	Je größer R_a desto größer V .	Je größer R_a desto kleiner P_{aus} .
	Beim optimalen R_a erreicht P_{aus} ein Maximum	Beim optimalen R_a erreicht K ein Minimum



2.2. Gegentakt

	Triode	Pentode
Gittervorspannung	$U_g = \frac{U_{g5} - U_{g1}}{2}$	
Gitterstrom	$I_g = 0A$	
Gitterableitwiderstand	R_g <i>Maximalwert siehe Datenblatt</i>	
Eingangskapazität je Röhre	$C_{ein} = C_{gk} + V \times C_{ga}$ C _{ga} : Kapazität zwischen Gitter und Anode, siehe Datenblatt C _{gk} : Kapazität zwischen Gitter und Kathode, siehe Datenblatt	$C_{ein} = C_{gk} + C_{gg2}$ C _{gg2} : Kapazität zwischen Gitter und Schirmgitter, siehe Datenblatt C _{gk} : Kapazität zwischen Gitter und Kathode, siehe Datenblatt
Eingangswiderstand je Röhre	$R_{ein} = \frac{1}{R_g} + 2 \times \pi \times f \times C_{ein}$	
Kathodenspannung	$U_k = -U_g$	
Kathodenstrom	$I_k = 2 \times I_a$	$I_k = 2 \times (I_a + I_{g2})$
Kathodenwiderstand	$R_k = \frac{U_k}{2 \times I_a}$	
Kathodenkondensator	$C_k = \frac{5,7 \times S}{\pi \times f_u}$ S: Steilheit, Siehe Datenblatt f _u : gewünschte untere Grenzfrequenz	
Anodenspannung	$U_a = U_{a3}$	
Anodenruhestrom	$I_a = I_{a3}$	
Anodenverlustleistung je Röhre	$P_a = U_a \times I_a$	
	optimal	
Maximale Anodenverlustleistung	P_{amax} <i>siehe Datenblatt</i>	
Betriebsspannung	mit R _k	$U_b = U_k + U_a + \frac{R_{draht} \times I_a}{2}$
	ohne R _k	$U_b = U_a + \frac{R_{draht} \times I_a}{2}$
Schirmgitterspannung		U_{sg} <i>siehe Datenblatt</i>

Diese Schaltungsvariante ist zusammen mit der SRPP-Schaltung die verzerrungsärmste Endstufenschaltung mit Röhren ohne Gegenkopplung. Nur PPP in Klasse A übertrifft sie, wegen der starken Gegenkopplung aller PPP-Schaltungen. Die Vor- und Nachteile von Gegentakt A sind:

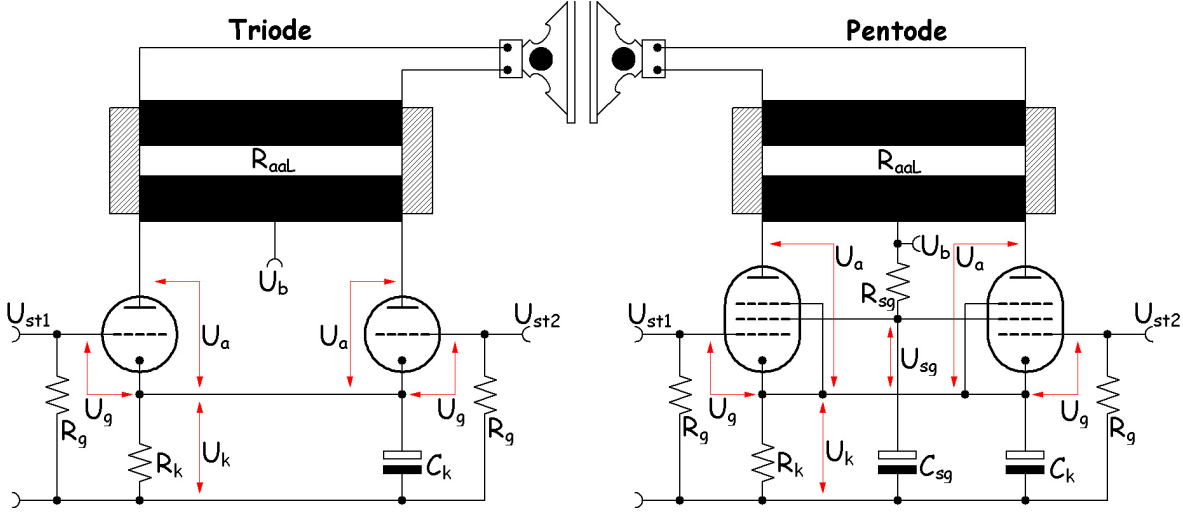
- + sehr geringer Klirrfaktor
- + geringe Anforderungen an die Stromlieferfähigkeit des Netztes
- + geringer Aufwand bei der Siebung im Netzteil
- + keine selektierten Röhren nötig
- + relativ geringe Versorgungsspannung
- schlechter Wirkungsgrad
- Ohne Gegenkopplung sehr geringer Dämpfungsfaktor
- hochwertig verschachtelte Übertrager nötig

Tips: Die Symmetrie der beiden Endstufenzweige verbessert sich enorm, wenn der C_k weggelassen wird.

Es empfiehlt sich R_{anL} für Trioden etwas am unteren Rand des Optimums zu wählen. Denn der neben der Mehrleistung entstehende höhere Klirrfaktor besteht fast nur in mehr k₂. Diese Klirrateile heben sich aber völlig auf.

Der Klang von Verstärkern mit dieser Endstufenart hängt fast nur von der Vorstufe ab, auf die darum besonderes Augenmerk zu richten ist.

Schirmgitterstrom je Röhre	I_{sg} siehe Datenblatt	
Schirmgitterwiderstand	$R_{sg} = \frac{U_b - U_{sg} - U_k}{2 \times I_{sg}}$	
Schirmgitterverlustleistung je Schirmgitter	$P_{sg} = U_{sg} \times I_{sg}$	
Schirmgitterkondensator	$C_{sg} = \frac{5}{\pi \times f_{ii} \times R_{sg1}}$ <small>f_{ii}: gewünschte untere Grenzfrequenz</small>	
Innenwiderstand je Röhre	$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_{a3} - U_{a6}}{I_{a3} - I_{a1}}$	
Arbeitswiderstand von Anode zu Anode	$R_{aaL} = 2 \times \frac{U_{a5} - U_{a1}}{I_{a5} - I_{a1}}$	
optimal	$R_{aa} \approx 3 \dots 6 \times R_i$	
Anodenwechselspannung	$U_w = 2 \times (U_{a5} - U_{a1})$	
Anodenwechselstrom	$I_w = I_{a5} - I_{a1}$	
Steuerspannung	$U_{st1} = -U_{st2} = U_{g5} - U_{g1} $	
Spannungsverstärkung	$V = \frac{U_w}{U_{st}}$	
Ausgangsleistung	$P_{aus} = (U_{a3} - U_{a1}) \times (I_{a3} - I_{a1})$ $P_{aus} \leq P_a$ $k_2 = 0$	
Klirrfaktor	Maximum	
	zweite Harmonische	$k_3 = \left \frac{2 \times I_{a4} - I_{a2} - I_{a5} + I_{a1}}{3 \times (I_{a5} - I_{a1})} \right $
	dritte Harmonische	$K = k_3$
Zusammenhänge	gesamt	Je größer R_a desto größer V.
		Je größer R_a desto kleiner P_{aus} .
		Beim optimalen R_a erreicht P_{aus} ein Maximum
	Je größer R_a desto kleiner K.	Beim optimalen R_a erreicht K ein Minimum



2.3. PPP (Circlotron)

	Triode	Pentode
Gittervorspannung	$U_g = \frac{U_{g5} - U_{g1}}{2}$	
Gitterstrom	$I_g = 0A$	
Gitterableitwiderstand	R_g Maximalwert siehe Datenblatt	
Eingangskapazität je Röhre	$C_{ein} = C_{gk} + V \times C_{ga}$ Cga: Kapazität zwischen Gitter und Anode, siehe Datenblatt	$C_{ein} = C_{gk} + C_{egg2}$ Cgg2: Kapazität zwischen Gitter und Schirmgitter, siehe Datenblatt
Eingangswiderstand je Röhre	$R_{ein} = R_{aaL} + \frac{1}{R_g} + 2 \times \pi \times f \times C_{ein}$	I Cgk: Kapazität zwischen Gitter und Kathode, siehe Datenblatt
Kathodenspannung	$U_k = -U_g$	
Kathodenstrom	$I_k = 2 \times I_a$	$I_k = 2 \times (I_a + I_{g2})$
Kathodenwiderstand	$R_k = \frac{U_k}{I_k}$	
Kathodenkondensator	$C_k = \frac{5,7 \times S}{\pi \times f_u}$ S: Stelltzeit, Siehe Datenblatt f _u : gewünschte untere Grenzfrequenz	
Anodenspannung	$U_a = U_{a3}$	
Anodenruhestrom	$I_a = I_{a3}$	
Anodenverlustleistung je Röhre	$P_a = U_a \times I_a$	
	optimal	$P_a = P_{amax}$
Maximale Anodenverlustleistung	P_{amax} siehe Datenblatt	
Siebkondensator	$C_s \geq \frac{5}{2 \times \pi \times f_u \times R_i}$ f _u : gewünschte untere Grenzfrequenz	$C_s \geq \frac{5}{2 \times \pi \times f_u \times R_{aaL}}$ f _u : gewünschte untere Grenzfrequenz

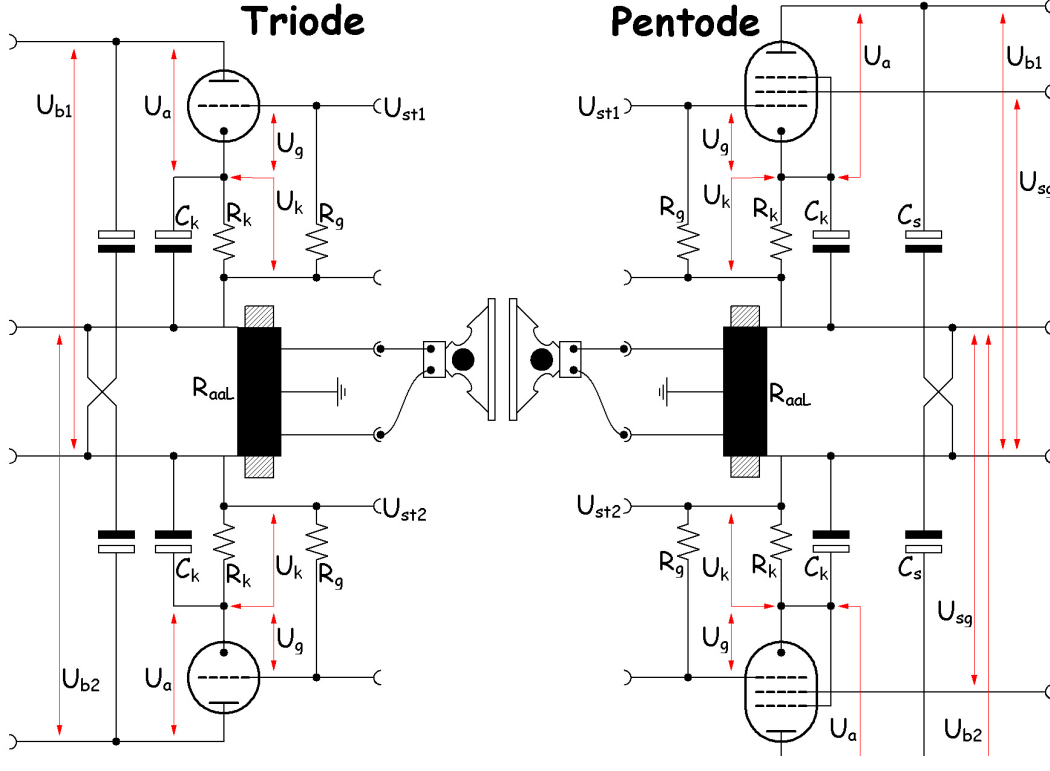
Die PPP-Schaltung hat von allen hier beschriebenen Endstufen die kleinsten Verzerrungen. Dies erreicht sie durch die extrem starke interne Gegenkopplung. Für und gegen sie spricht:

- + sehr hoher Dämpfungsfaktor
- + sehr geringer Aufwand an die Siebung im Netzteil
- + extrem kleine Verzerrungen
- + relativ niedrige Versorgungsspannung
- + Sehr einfach gewickelte Drossel, statt eines Übertragers (Selbstwickel leicht möglich)
- + sehr geringe Anforderungen an die Stromlieferfähigkeit des Netztesles
- + Sehr gute Symmetrie auch bei nicht selektierten Röhren
- zwei separate Netzteile nötig
- großer Spannungsbedarfn
- schlechter Wirkungsgrad

Tips: Es empfiehlt sich nicht die Schirmgitter wie üblich zu versorgen. Besser man versorgt das Schirmgitter des einen Zweiges direkt von der Anode des anderen Zweiges. Das führt zu einer Mitkopplung, die die nötige Spannungsstärkung stark senkt.

C_s ist Signalführend, da er das U_w von der Anode auf die Drossel koppelt. Deswegen sollte er eine entsprechende Spannungsfestigkeit und gute klangliche Eigenschaften haben.

Betriebsspannung	$U_{b1} = U_{b2} = U_k + U_a + \frac{R_{draht} \times I_a}{2}$ <p>R_{draht}: Drahtwiderstand des Übertragers über die ganze Wicklung, U_{b1} und U_{b2} müssen aus zwei galvanisch getrennten Quellen entnommen werden!</p>
Schirmgitterspannung	$U_{sg} = U_{sg} \times I_{sg}$
Schirmgitterstrom je Röhre	$I_{sg} = U_{sg} \times I_{sg}$
Schirmgitterverlustleistung je Schirmgitter	$P_{sg} = U_{sg} \times I_{sg}$
Innenwiderstand je Röhre	$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_{a3} - U_{a6}}{I_{a3} - I_{a1}}$
Arbeitswiderstand über die ganze Wicklung	$R_{aal} = \frac{U_{a5} - U_{a1}}{2 \times (I_{a5} - I_{a1})}$
optimal	$R_{aal} \approx R_i$
Anodenwechselspannung	$U_w = U_{a5} - U_{a1}$
Anodenwechselstrom	$I_w = 2 \times (I_{a5} - I_{a1})$
Steuerspannung	$U_{st1} = -U_{st2} = U_w$
Spannungsverstärkung	$V = 1$
Ausgangsleistung	$P_{aus} = (U_{a3} - U_{a1}) \times (I_{a3} - I_{a1})$
Maximum	$P_{aus} \leq P_a$
Zusammenhänge	<p>Je größer R_a desto kleiner P_{aus}.</p> <p>Je größer R_a desto größer V.</p> <p>Beim optimalen R_a erreicht P_{aus} ein Maximum</p>



2.4. SRPP

	Triode	Pentode
Gittervorspannung	$U_g = \frac{U_{g5} - U_{g1}}{2}$	
Gitterstrom	$I_g = 0A$	
Gitterableitwiderstand	R_g <i>Maximalwert siehe Datenblatt</i>	
Eingangskapazität	$C_{ein} = C_{gk} + V \times C_{ga}$ C _{ga} : Kapazität zwischen Gitter und Anode, siehe Datenblatt C _{gk} : Kapazität zwischen Gitter und Kathode, siehe Datenblatt	$C_{ein} = C_{gk} + C_{gg2}$ C _{gg2} : Kapazität zwischen Gitter und Schirmgitter, siehe Datenblatt C _{gk} : Kapazität zwischen Gitter und Kathode, siehe Datenblatt
Eingangswiderstand	$R_{ein} = \frac{1}{R_g + 2 \times \pi \times f \times C_{ein}}$	
Kathodenspannung	$U_k = -U_g$	
Kathodenstrom	$I_k = I_a$	$I_k = I_a + I_{g2}$
Kathodenwiderstand	$R_k = \frac{U_k}{I_a}$	
Kathodenkondensator	$C_k = \frac{5,7 \times S}{2 \times \pi \times f_u}$ S: Steilheit, Siehe Datenblatt f _u : gewünschte untere Grenzfrequenz	
Anodenspannung	$U_a = U_{a3}$	
Anodenruhestrom	$I_a = I_{a3}$	
Anodenverlustleistung	$P_a = U_a \times I_a$ $P_a = P_{amax}$	
Maximale Anodenverlustleistung	optimal	
Betriebsspannung	P_{amax} <i>siehe Datenblatt</i> $U_b = 2 * U_k + 2 * U_a$ R _{draht} : Drahtwiderstand des Übertragers	
Schirmgitterspannung		U_{sg} <i>siehe Datenblatt</i>
Schirmgitterstrom		I_{sg} <i>siehe Datenblatt</i>
Schirmgitterwiderstand		$R_{sg1} = \frac{U_a - U_{sg}}{2 \times I_{sg}}$

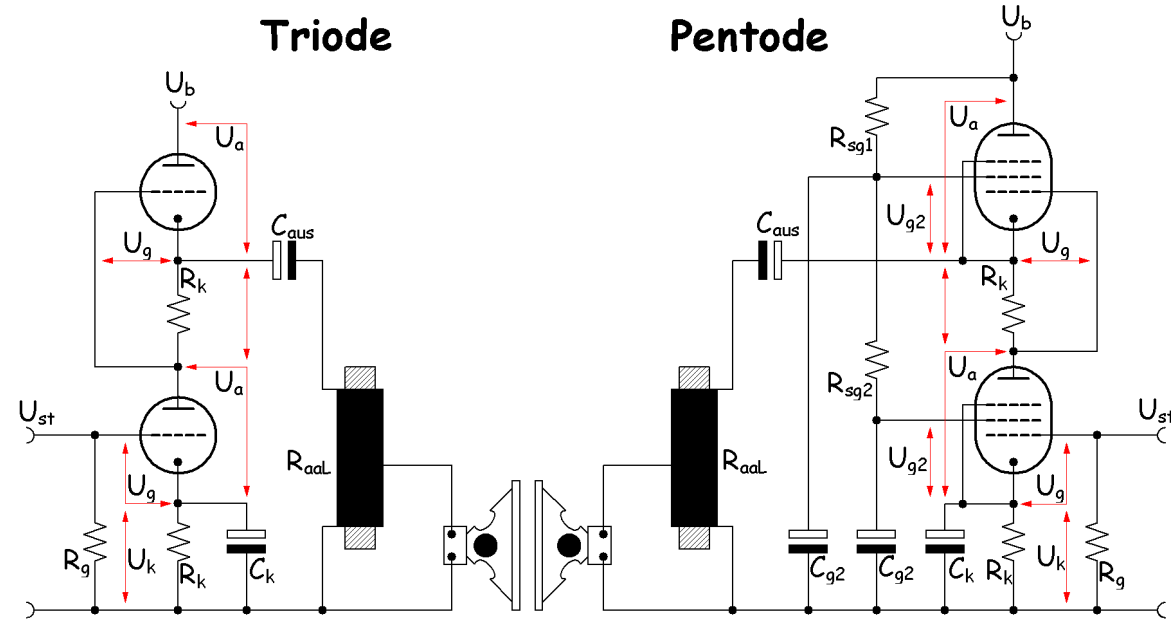
Die SRPP-Schaltung ist eine in Endstufen zu Unrecht selten genutzte Schaltung. Es spricht viel für sie:

- + einfacher Aufbau
- + geringe Anforderungen an die Stromlieferfähigkeit des Netzteils
- + sehr geringe Verzerrungen
- + keine Phasenumkehr nötig
- + relativ guter Dämpfungsfaktor
- + sehr einfacher kleiner Ausgangsstrom möglich
- + trotz Gegentakt nur eine Steuerspannung
- gute Siebung des Netzteils nötig
- schlechter Wirkungsgrad
- hoher Klirrfaktor

Tips: Es empfiehlt sich Röhren großer Steilheit aber keine Pentoden zu benutzen.

Eine kleine Gegenkopplung verringert die schädlichen Einflüsse der Röhrenalterung auf die die Schaltung sehr empfindlich reagiert.

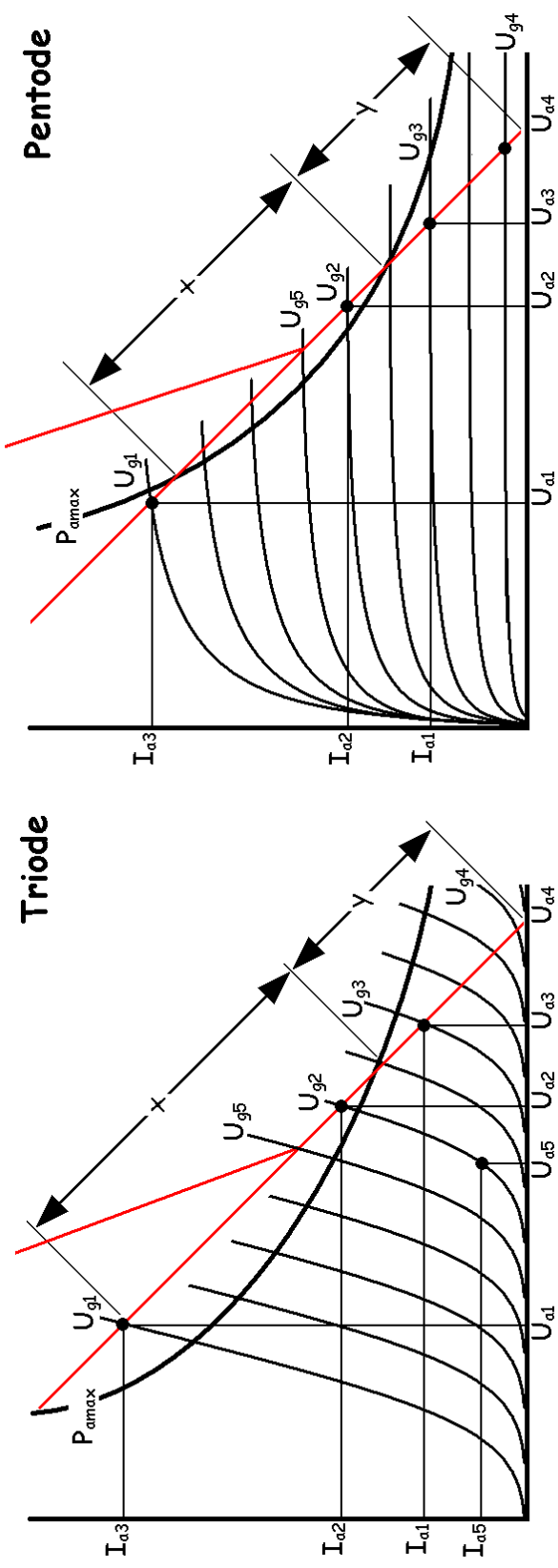
Ob die Schaltung eher im Gegen- oder Eintakt arbeitet hängt von der Last ab. Hohe Lastwiderstände bewirken einen eher Eintakt- und niedrige einen eher Gegentaktbetrieb. Dadurch ist der Klirrfaktor stark last- und somit auch frequenzabhängig. Denn Lautsprecher haben frequenzabhängige Impedanzen. Deswegen wurde auf eine Berechnung des Klirrs verzichtet.



Schirmgitterverlustleistung	$R_{sg2} = \frac{2 \times U_{sg} + U_k + U_a}{I_{sg}}$
Schirmgitterkondensator	$P_{sg} = U_{sg} \times I_{sg}$ $C_{sg1} = \frac{5}{\pi \times f_{i\underline{u}} \times R_{sg1}}$ <small>$f_{i\underline{u}}$: gewünschte untere Grenzfrequenz</small> $C_{sg2} = \frac{5}{\pi \times f_{i\underline{u}} \times R_{sg2}}$ <small>$f_{i\underline{u}}$: gewünschte untere Grenzfrequenz</small>
Innenwiderstand	$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_{a3} - U_{a6}}{I_{a3} - I_{a1}}$
Arbeitswiderstand	$R_a = \frac{U_{a5} - U_{a1}}{I_{a5} - I_{a1}}$ $R_a \approx R_i$
Anodenwechselspannung	$U_w = U_{a5} - U_{a1}$
Anodenwechselstrom	$I_w = 2 \times (I_{a5} - I_{a1})$
Steuerspannung	$U_{st} = U_{g5} - U_{g1} $
Spannungsverstärkung	$V = \frac{U_w}{U_{st}}$
Ausgangsleistung	$P_{aus} = (U_{a3} - U_{a1}) \times (I_{a3} - I_{a1})$ $P_{aus} = P_a$
Konstanz der mittleren Stromaufnahme	$I_{amed} = \frac{I_{a5} + I_{a1}}{2} = I_{a3} = I_a$
Zusammenhänge	Je größer R_a desto größer V . Je größer R_a desto kleiner P_{aus} . Beim optimalen R_a erreicht P_{aus} ein Maximum

3. Leistungsverstärker in Klasse AB₁

Klasse AB Verstärker zeichnen sich dadurch aus, dass ihre mittlere Stromaufnahme nicht konstant ist. D.h. es gibt eine Ruhestromaufnahme, die mittlere Stromaufnahme ist aber größer und von der Aussteuerung abhängig. Kennliniendiagramme für AB sehen so aus:



Der Punkt mit den Werten $\{I_{a1}, U_{a3}, U_{g3}\}$ ist der Arbeitspunkt in Ruhe. Klasse AB₁ Betrieb liegt genau dann vor, wenn folgende Kriterien gelten:

1. U_{g1} ist nicht negativ, aber sehr nahe bei OV.
2. I_{a3} ist kleiner als die Hälfte von I_{a1}
3. U_{g3} ist in etwas der Mittelwert aus U_{g1} und U_{g4}
4. I_{a1} ist größer als OA.

3.1. Gegentakt

	Triode	Pentode
Gittervorspannung in Ruhe	$U_g = U_{g3}$	
optimal	$U_g = U_{g3} = \frac{\pi \times U_{g4}^2}{(\pi \times U_{g4}) - (U_{g4} - U_{g1})}$	
Gitterstrom	$I_g = 0A$	
Gitterableitwiderstand	R_g Maximalwert siehe Datenblatt	
Eingangskapazität je Röhre	$C_{ein} = C_{gk} + V \times C_{ga}$ Cga: Kapazität zwischen Gitter und Anode, siehe Datenblatt	$C_{ein} = C_{gk} + C_{gg2}$ Cgg2: Kapazität zwischen Gitter und Schirmgitter, siehe Datenblatt
Eingangswiderstand je Röhre	$R_{ein} = \frac{1}{R_g} + 2 \times \pi \times f \times C_{ein}$	$\frac{1}{R_g}$ Cgk: Kapazität zwischen Gitter und Kathode, siehe Datenblatt
Kathodenspannung in Ruhe	$U_k = -U_g$	
Kathodenstrom	$I_k = 2 \times I_{a1}$	$I_k = 2 \times (I_{a1} + I_{sg})$
Kathodenwiderstand	$R_k = \frac{U_k}{2 \times I_k}$	$\frac{U_k}{2 \times I_k}$
Kathodenkondensator	$C_k = \frac{5,7 \times S}{\pi \times f_u}$ S: Steilheit, Siehe Datenblatt f _u : gewünschte untere Grenzfrequenz	
Maximaler Anodenstrom je Röhre	$I_{amax} = I_3$	
Minimaler Anodenstrom je Röhre	$I_{amin} = 0A$	
Anodenruhestrom	$I_a = I_{a1}$	
Mittlerer Anodenstrom bei Vollaussteuerung je Röhre	$I_{amed} = I_{a2} = \frac{2 \times I_{amax}}{\pi}$	
Anodenverlustleistung je Röhre in Ruhe	$P_a = U_a \times I_a$	
Maximale Anodenverlustleistung	P_{amax} siehe Datenblatt	
Mittlere Anodenverlustleistung je Röhre	$P_{amed} = U_a \times I_{amed}$	
optimal	$P_{amed} = P_{amax}$	
Anodenspannung	$U_a = U_3$	

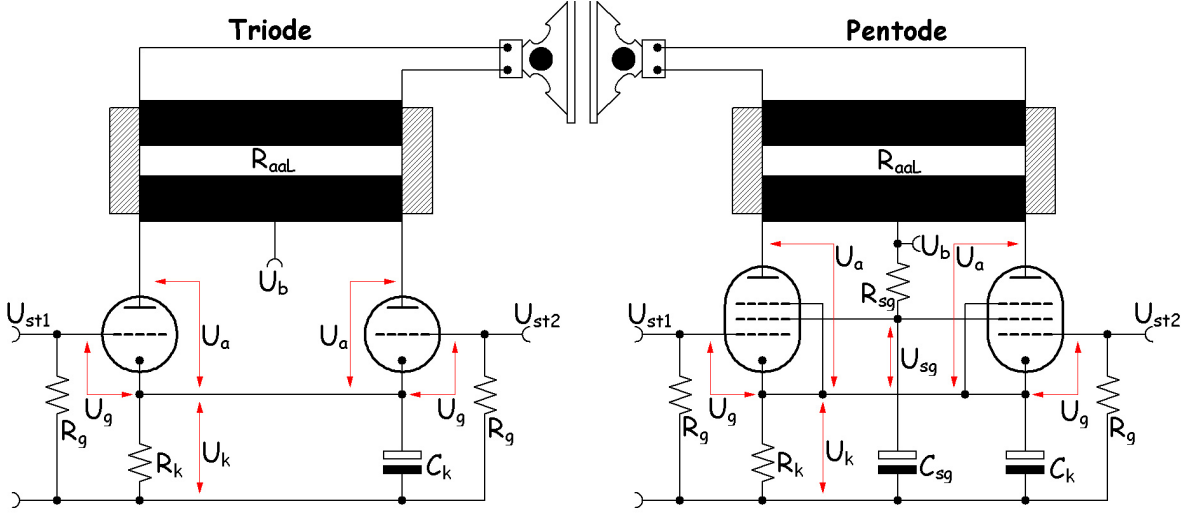
Diese Schaltungsvariante ist als Kompromiss zwischen Wirkungsgrad und Verzerrungen gedacht. Wer sie wählt sollte folgendes bedenken:

- + sehr geringer Klirrfaktor bei kleinen Pegeln
- + relativ guter Wirkungsgrad
- + geringer Aufwand an die Siebung im Netzteil
- + relativ geringe Stromaufnahme in Ruhe
- relativ hohe Versorgungsspannung
- hohe Anforderungen an die Stromlieferfähigkeit des Netztes
- Ohne Gegenkopplung sehr geringer Dämpfungsfaktor
- hochwertig verschachtelte Übertrager nötig
- selektierte Röhren nötig

Tips: Es empfiehlt sich, R_{cal} für Trioden eher klein als groß zu wählen.

Es kann vom optimalem U_g aus der Tabelle abgewichen werden. Je dichter der gewählte Wert am Mittelwert aus U_{g1} und U_{g4} liegt, desto geringer fallen die Verzerrungen und der Wirkungsgrad aus. Auf eine genaue Berechnung der Verzerrungen muss verzichtet werden. Eine ausreichend genaue Vorhersage eines etwaigen Messergebnisses ist nicht möglich. Denn der Klirrfaktor hängt stark von der Wahl des Arbeitspunktes und der Symmetrie der Ansteuerung ab. U_{st1} und U_{st2} sind deswegen über den gesamten Frequenzbereich gleich groß zu halten.

Betriebsspannung	mit R_k	$U_b = U_k + U_a + \frac{R_{draht} \times I_a}{2}$	$R_{draht} \times I_a$
	ohne R_k	$U_b = U_a + \frac{R_{draht}}{2 \times I_a}$	R_{draht}
Schirmgitterspannung		$U_{sg} = \text{siehe Datenblatt}$	U_{sg}
Schirmgitterstrom je Röhre		$I_{sg} = \text{siehe Datenblatt}$	I_{sg}
Schirmgitterwiderstand		$R_{sg} = \frac{U_b - U_{sg} - U_k}{2 \times I_{sg}}$	R_{sg}
Schirmgitterverlustleistung je Schirmgitter		$P_{sg} = U_{sg} \times I_{sg}$	P_{sg}
Schirmgitterkondensator		$C_{sg} = \frac{5}{\pi \times f_u \times R_{sg1}}$ <small>f_u: gewünschte untere Grenzfrequenz</small>	C_{sg}
Innenwiderstand je Röhre		$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_{a2} - U_{a4}}{I_{a2} - I_{a5}}$	$R_i = \infty$
Arbeitswiderstand von Anode zu Anode		$R_{aal} = \frac{U_{a4} - U_{a1}}{I_{a3}}$	R_{aal}
optimal		$R_{aa} \approx 3 \dots 6 \times R_i$	$R_{aa} \approx \frac{2 \times U_{a2}}{I_{amed}}$
Faustregel für die Lage der Lastgeraden		$x < 2 \times y$ <small>x und y werden im Diagramm mit dem Lineal gemessen</small>	
Steuerspannung je Röhre		$U_{st1} = -U_{st2} = 2 \times U_{g3} $	
Spannungsverstärkung		$V = \frac{(U_{g4} - U_{a1})}{(U_{g4} - U_{g1})}$	
Steuerspannung für den Übergang in den B-Betrieb		$U_{stB} = 2 \times (U_{a3} - U_{a1}) $	
Ausgangsleistung bei Vollaussteuerung		$P_{aus} \approx \frac{(U_{a3} - U_{a1}) \times (I_{a3} - I_{a1})}{2} + (U_{a4} - U_{a3}) \times I_{a1}$	
Theoretisches Maximum		$P_{amed} < P_{aus} < 1,6 \times P_{amed}$	
Zusammenhänge		Je größer R_a desto größer V. Je größer R_a desto kleiner P_{aus} .	Beim optimalen R_a erreicht P_{aus} ein Maximum



3.2. PPP (Circlotron)

	Triode	Pentode
Gittervorspannung in Ruhe	$U_g = U_{g3}$	
optimal	$U_g = U_{g3} = \frac{\pi \times U_{g4}^2}{(\pi \times U_{g4}) - (U_{g4} - U_{g1})}$	
Gitterstrom	$I_g = 0A$	
Gitterableitwiderstand	R_g Maximalwert siehe Datenblatt	
Eingangskapazität je Röhre	$C_{ein} = C_{gk} + V \times C_{ga}$ C _{ga} : Kapazität zwischen Gitter und Anode, siehe Datenblatt	$C_{ein} = C_{gk} + C_{gg2}$ C _{gg2} : Kapazität zwischen Gitter und Schirmgitter, siehe Datenblatt
	C_{gk} : Kapazität zwischen Gitter und Kathode, siehe Datenblatt	C_{gk} : Kapazität zwischen Gitter und Kathode, siehe Datenblatt
Eingangswiderstand je Röhre	$R_{ein} = R_{aal} + \frac{1}{R_g} + 2 \times \pi \times f \times C_{ein}$	$\frac{1}{R_{ein}}$
Kathodenspannung in Ruhe	$U_k = -U_g$	
Kathodenstrom	$I_k = 2 \times I_{a1}$	$I_k = 2 \times (I_{a1} + I_{sg})$
Kathodenwiderstand	$R_k = \frac{U_k}{I_k}$	
Kathodenkondensator	$C_k = \frac{5,7 \times S}{\pi \times f_u}$ S: Stelltzeit, Siehe Datenblatt f _u : gewünschte untere Grenzfrequenz	
Maximaler Anodenstrom je Röhre	$I_{amax} = I_3$	
Minimaler Anodenstrom je Röhre	$I_{amin} = 0A$	
Anodenruhestrom	$I_a = I_{a1}$	
Mittlerer Anodenstrom bei Vollaussteuerung je Röhre	$I_{amed} = I_{a2} = \frac{2 \times I_{amax}}{\pi}$	
Anodenverlustleistung je Röhre in Ruhe	$P_a = U_a \times I_a$	
Maximale Anodenverlustleistung	P_{amax} siehe Datenblatt	
Mittlere Anodenverlustleistung je Röhre	$P_{amed} = U_a \times I_{amed}$	
optimal	$P_{amed} = P_{amax}$	

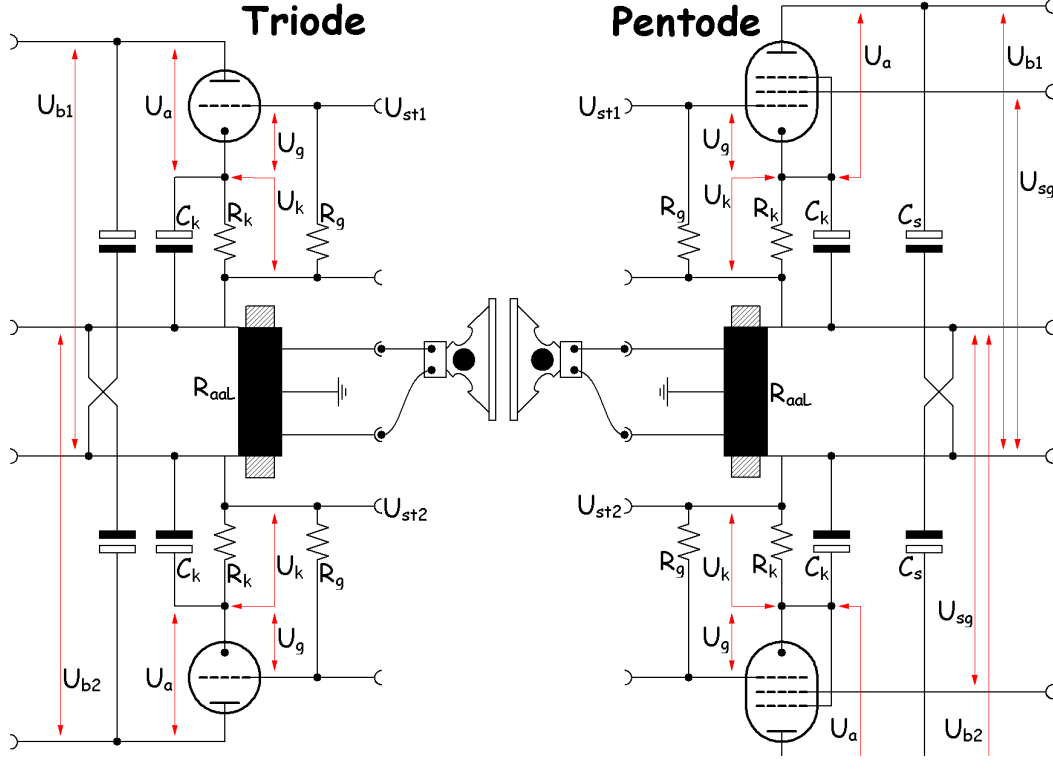
Die PPP-Schaltung kann auch in Klasse AB gefahren werden um den Wirkungsgrad zu erhöhen. Die Pros und Kontras sind:

- + sehr hoher Dämpfungsfaktor
- + sehr geringer Aufwand an die Siebung im Netzteil
- + kleine Verzerrungen
- + Sehr einfach gewickelte Drossel, statt eines Übertragers (Selbstwickel leicht möglich)
- + guter Wirkungsgrad
- hohe Anforderungen an die Stromlieferfähigkeit des Netztes
- zwei separate Netzteile nötig
- sehr großer Spannungsbedar
- hohe Versorgungsspannung

Tips: Es empfiehlt sich nicht die Schirmgitter wie üblich zu versorgen. Besser man versorgt das Schirmgitter des einen Zweiges direkt von der Anode des anderen Zweiges. Das führt zu einer Mitkopplung, die die nötige Spannungsleistung stark senkt.

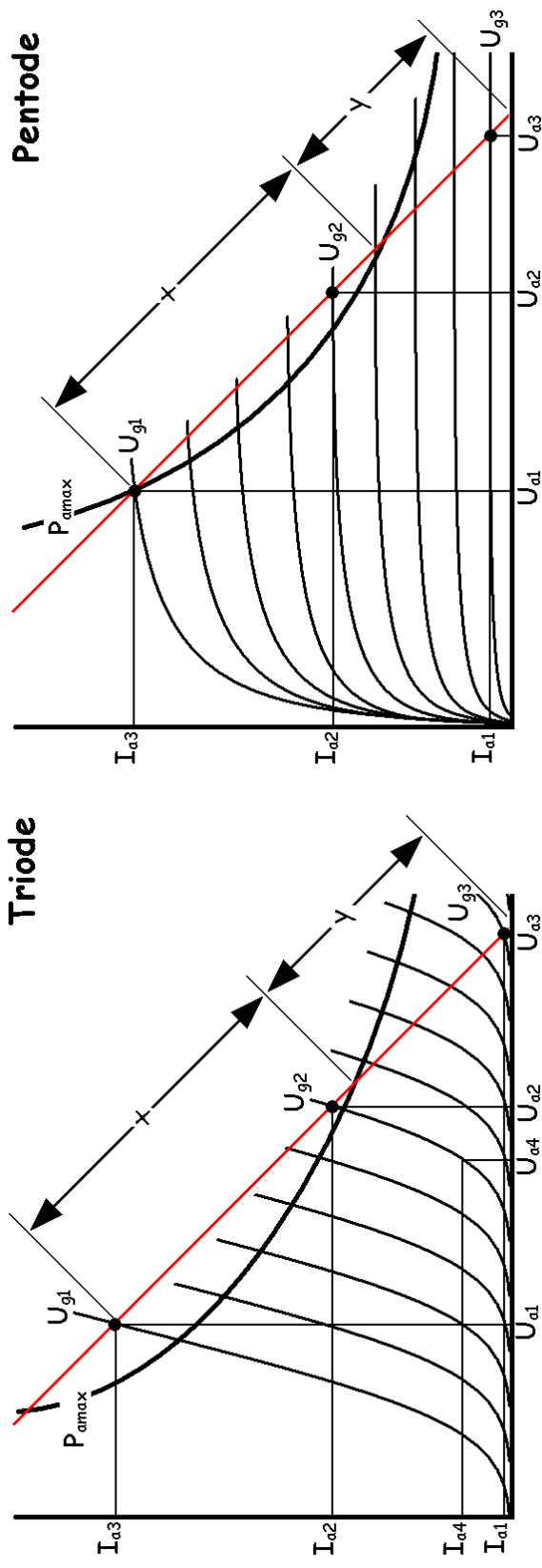
C_s ist Signalführend, da er das U_w von der Anode auf die Drossel koppelt. Deswegen sollte er eine entsprechende Spannungsfestigkeit und gute klangliche Eigenschaften haben.

Anodenspannung	$U_a = U_3$
Siebkondensator	$C_s \geq \frac{5}{2 \times \pi \times f_u \times R_i}$ <small>f_u: gewünschte untere Grenzfrequenz</small>
Betriebsspannung	$U_{b1} = U_{b2} = U_k + U_a + \frac{R_{draht} \times I_a}{2}$ <small>R_{draht}: Drahtwiderstand des Übertragers von Anode zu Anode U_{b1} und U_2 müssen aus zwei galvanisch getrennten Quellen entnommen werden!</small>
Schirmgitterspannung	U_{sg} siehe Datenblatt
Schirmgitterstrom je Röhre	I_{sg} siehe Datenblatt
Schirmgitterverlustleistung je Schirmgitter	$P_{sg} = U_{sg} \times I_{sg}$
Innenwiderstand je Röhre	$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_{a2} - U_{a4}}{I_{a2} - I_{a5}}$ $R_i = \infty$
Arbeitswiderstand von Anode zu Anode	$R_{aal} = \frac{U_{a4} - U_{a1}}{I_{a3}}$
	$R_{aa} \approx R_i$
	optimal
Faustregel für die Lage der Lastgeraden	$x < 2 \times y$ <small>x und y werden im Diagramm mit dem Lineal gemessen</small>
Steuerspannung je Röhre	$U_{st1} = -U_{st2} = 2 \times (U_{a3} - U_{a1}) $
Spannungsverstärkung	$V = 1$
Ausgangsleistung bei Vollaussteuerung	$P_{aus} \approx \frac{(U_{a3} - U_{a1}) \times (I_{a3} - I_{a1})}{2} + (U_{a4} - U_{a3}) \times I_{a1}$
Theoretisches Maximum:	$P_{amed} < P_{aus} < 1,6 \times P_{amed}$
Zusammenhänge	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Je größer R_a desto kleiner P_{aus}.</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>Je größer R_a desto größer V.</p> </div> </div> <p>Beim optimalen R_a erreicht P_{aus} ein Maximum</p>



4. Leistungsverstärker in Klasse B₁

Klasse B Verstärker zeichnen sich dadurch aus, dass kein Ruhestrom fließt, sondern nur bei Aussteuerung ein zu dieser proportionaler Strom aufgenommen wird. Die Kennlinien sind etwas einfacher als bei Klasse AB.



Der Punkt mit den Werten $\{I_{a1}, U_{a3}, U_{g3}\}$ ist der Arbeitspunkt in Ruhe. Klasse AB₁ Betrieb liegt genau dann vor, wenn folgende Kriterien gelten:

1. U_{g1} ist nicht negativ, aber sehr nahe bei OV.
2. I_{a1} ist OA [In der Praxis ist I_{a3} nur sehr klein]

4.1. Gegentakt

	Triode	Pentode
Gittervorspannung in Ruhe	$U_g = U_{g3}$	
Gitterstrom	$I_g = 0A$	
Gitterableitwiderstand	R_g Maximalwert siehe Datenblatt	
Eingangskapazität je Röhre	$C_{\text{ein}} = C_{\text{gk}} + V \times C_{\text{ga}}$ C _{ga} : Kapazität zwischen Gitter und Anode, siehe Datenblatt	$C_{\text{ein}} = C_{\text{gk}} + C_{\text{gg2}}$ C _{gg2} : Kapazität zwischen Gitter und Schirmgitter, siehe Datenblatt
Eingangswiderstand je Röhre	$R_{\text{ein}} = \frac{1}{\frac{1}{R_g} + 2 \times \pi \times f \times C_{\text{ein}}}$	
Kathodenspannung in Ruhe	$U_k = 0V$	
Kathodenstrom	$I_k = I_{a1} = 0A$	$I_k = I_{a1} + I_{\text{sg}} = I_{\text{sg}}$
Maximaler Anodenstrom je Röhre	$I_{\text{amax}} = I_3$	
Minimaler Anodenstrom je Röhre	$I_{\text{amin}} = 0A$	
Anodenruhestrom	$I_a = I_{a1} = 0A$	
realistisch	I_{a1} ist so klein, dass die Röhre gerade nicht sperrt	
Mittlerer Anodenstrom bei Vollaussteuerung je Röhre	$I_{\text{amed}} = I_{a2} = \frac{2 \times I_{\text{amax}}}{\pi}$	
Anodenverlustleistung je Röhre in Ruhe	$P_a = U_a \times I_a = 0W$	
Maximale Anodenverlustleistung	P_{amax} siehe Datenblatt	
Mittlere Anodenverlustleistung je Röhre	$P_{\text{amed}} = U_a \times I_{\text{amed}}$	
optimal	$P_{\text{amed}} = P_{\text{amax}}$	
Anodenspannung	$U_a = U_3$	
Betriebssspannung	$U_b = U_a + \frac{R_{\text{draht}} \times I_{\text{amed}}}{2}$	
Schirmgitterspannung		U_{sg} siehe Datenblatt
Schirmgitterstrom je Röhre		I_{sg} siehe Datenblatt

Diese Schaltungsvariante ist auf bestmöglichen Wirkungsgrad ausgerichtet. Für und gegen sie spricht:

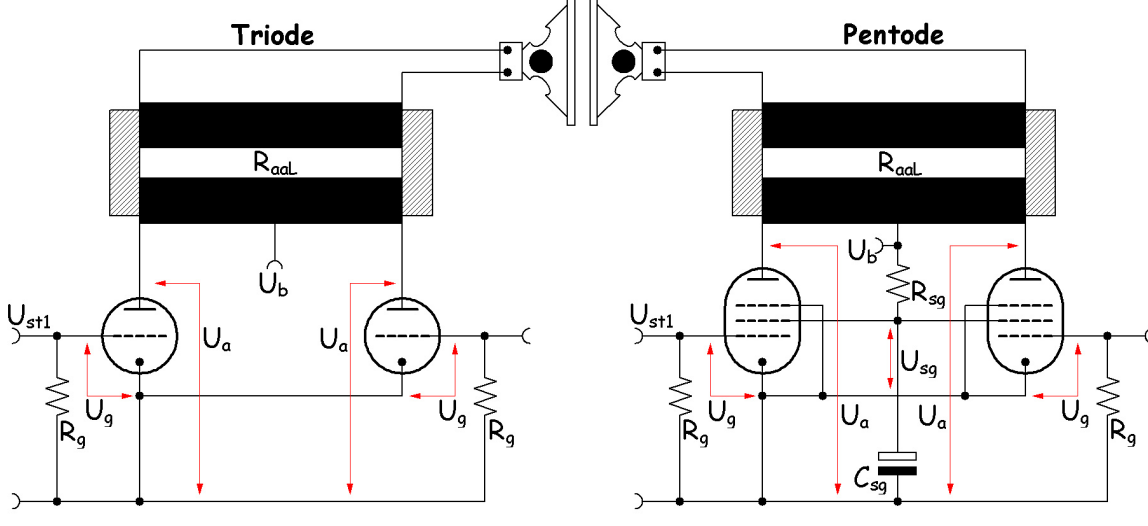
- + sehr guter Wirkungsgrad
- + geringer Aufwand bei der Siebung im Netzteil
- + sehr geringe Stromaufnahme in Ruhe
- kein automatisches Bias möglich
- sehr hohe Versorgungsspannung
- sehr hohe Anforderungen an die Stromlieferfähigkeit des Netztesiles
- Ohne Gegenkopplung sehr geringer Dämpfungsfaktor
- hohe Verzerrungen bei kleinen Pegeln
- hochwertig verschachtelte Übertrager nötig
- selektierte Röhren nötig

Tips: Der Klimfaktor hängt sehr stark von der Symmetrie der Ansteuerung ab. Deswegen sollte sehr viel Sorgfalt darauf verwandt werden, U_{st1} und U_{st2} über den gesamten Frequenzbereich identisch zu halten.

Tatsächlich ist I_a in der Praxis immer etwas größer als 0A. Man hat also eigentlich immer sehr kalten AB-Betrieb.

Auf eine genaue Berechnung der Verzerrungen muss verzichtet werden. Eine ausreichend genaue Vorhersage eines etwaigen Messergebnisses sind mit einer rechnerische Schätzung auf Basis des Datenblattes kaum möglich.

Schirmgitterwiderstand	$R_{sg} = \frac{U_b - U_{sg}}{2 \times I_{sg}}$
Schirmgitterverlustleistung je Schirmgitter	$P_{sg} = U_{sg} \times I_{sg}$
Schirmgitterkondensator	$C_{sg} = \frac{5}{\pi \times f_u \times R_{sg}}$ <small>f_u: gewünschte untere Grenzfrequenz</small>
Innenwiderstand je Röhre	$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_{a2} - U_{a4}}{I_{a2} - I_{a4}}$
Arbeitswiderstand von Anode zu Anode	$R_{aal} \approx 6 \dots 12 \times R_i$
Faustregel für die Lage der Lastgeraden	$x < 2 \times y$ <small>x und y werden im Diagramm mit dem Lineal gemessen</small>
Steuerspannung je Röhre	$U_{st1} = -U_{st2} = 2 \times U_{g3} $
Spannungsverstärkung	$V = \left \frac{U_{a3} - U_{a1}}{U_{g3} - U_{g1}} \right $
Ausgangsleistung bei Vollaussteuerung	$P_{aus} = \frac{(U_{a3} - U_{a1}) \times (I_{a3} - I_{a1})}{2}$
Zusammenhänge	$P_{aus} = 1,6 \times P_{amed}$
	<p>Je größer R_a desto größer V.</p> <p>Je größer R_a desto kleiner P_{aus}.</p> <p>Beim optimalen R_a erreicht P_{aus} ein Maximum</p>



5. Literatur

- O. Diciol: Niederfrequenzverstärker-Praktikum, München: Franzis-Verlag, 1954
H. Schweitzer: Röhrenmesstechnik, München: Franzis-Verlag, 1950
N.H. Crowhurst & G.F. Cooper: High Fidelity Circuit Design, Gernsback Library Inc., 1956
F. Langford-Smith [Hrsg.]: Radiotron Designer's Handbook, New York: RCA, 1954

Kleingedrucktes

- §1. Dieses Dokument gibt nichts als meine eigene Meinung wieder, die fehlerhaft sein kann und subjektiv ist. Darum kann sachliche Richtigkeit nicht garantiert werden.
- §2. Schäden und Verletzungen, die beim Aufbau oder durch die Schaltung entstehen, sind von der Haftung ausgenommen.
- §3. Jegliche Nutzung, Publikation und Vervielfältigung des Dokumentes oder seiner Teile bedarf meiner ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung, wenn sie durch einen gewerblichen Betrieb, eine Einrichtung öffentlichen Rechts, eines Vereins oder einer sonstigen nicht privaten Einrichtung erfolgt.
- §4. Ich untersage jegliche Veröffentlichung der Mappe in Teilen oder in veränderter Form.
- §5. Ich untersage das Verkaufen, oder Tauschen des Dokumentes für geldwerte Vorteile oder Geld. D.h., es ist verboten, dieses Dokument, seine Kopien, seine Teile, oder Teile seiner Kopien auf einem Datenträger oder gegen einen geldwerten Vorteil oder Geld anzubieten.
- §6. Alle Rechte liegen bei mir und das ist
Martin Lemke
Lindenstraße 16
18209 Bad Doberan
Maritim@Roehrenfibel.de