

PPP-Audioverstärker

- Teil 1: Erweiterungen zum Stand der Technik -

Zusammenfassung

Der Parallel-Push-Pull Verstärker, speziell als Röhrenverstärker wurde Mitte der 50er Jahre in verschiedenen Patenten vorgestellt. Obgleich seiner vielversprechenden Eigenschaften wurden bislang nur wenige Röhrenverstärker konzeptgemäß ausgeführt. Über 50 Jahre später stehen heute beim Bau von Röhrenverstärkern weniger der wirtschaftliche Aspekt als vielmehr andere Qualitäten im Vordergrund. Der vorliegende Artikel beschreibt Erweiterungen zum bekannten Konzept mit dem Ziel schaltungsbedingte Nachteile auszuräumen und die akustischen Qualitäten weiter zu steigern.

1 Stand der Technik beim PPP Verstärker

Das Gegenparallel-Prinzip wurde in den 1950er Jahren in verschiedenen Patenten vorgestellt, speziell ausgeführt als Audioverstärker in Röhrentechnik. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit siehe hierzu [2], [7], [4] und [5].

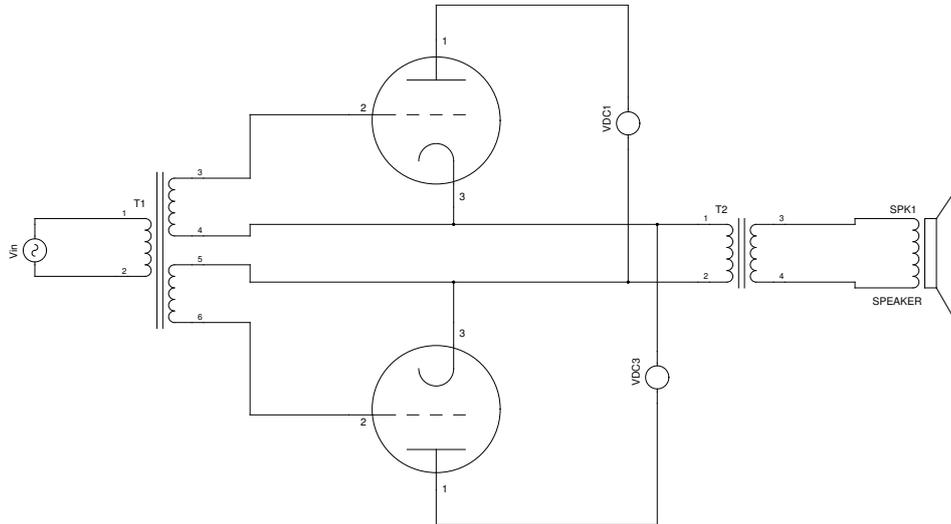


Abbildung 1: Prinzip des Patents Nr. 27332 von Matti Köykkä

In Abbildung 1 ist bereits das Grundprinzip aller PPP-Verstärker zu erkennen. Wenn man zunächst nur eine Hälfte der Schaltung betrachtet, erkennt man die Schaltung des verstärkenden Bauteils - in diesem Falle einer Triode - in Anoden-Basisschaltung, also als Kathodenfolger. Zwei dieser Hälften arbeiten auf eine gemeinsame Last, wobei die Hälften jeweils gegenphasig angesteuert werden. Bevor wir in Abschnitt 1.1 genauere Beobachtungen anstellen halten wir an dieser Stelle fest, daß es sich um eine symmetrische Schaltung handelt.

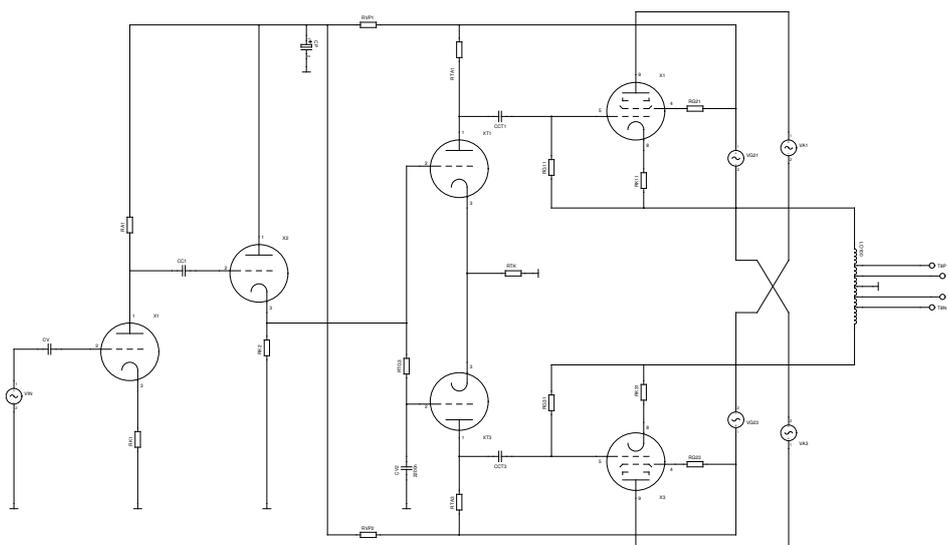


Abbildung 2: Prinzip des Patents Nr. 29642 von Matti Köykkä

Die Abbildung 2 zeigt dasselbe Prinzip in erweiterter Form. Als Endverstärker kommen hier alternativ Pentoden zum Einsatz. Der Zwischenübertrager aus Abbildung 1 ist durch eine Phasenumkehrstufe (hier „Treiberstufe“) aus zwei Trioden und eine Vorverstärker-Stufe ersetzt. Hier halten wir zunächst fest, daß die Leistungsstufe wieder symmetrisch arbeitet, die Ansteuerung erfolgt jedoch unsymmetrisch. Ein praktisch ausgeführter Audio-Röhrenverstärker dieser Topologie wurde in der Zeitschrift [6] vorgestellt, in ähnlicher Form mit Pentode in der Vorstufe auch in [3].

Eine interessante und auf dem vorgestellten Prinzip beruhende Variante wurde von Philips im Jahre 1957 mit dem HiFi-Verstärker AG9007 realisiert [1]. Der Verstärker AG9007 verwendet Pentoden anstatt der Triodensysteme in der Treiberstufe, verzichtet allerdings auf einen Ausgangsübertrager.

1.1 Kurze Analyse

Zm Entwurf zufriedenstellender Schaltungen in diesem Konzept ist es förderlich, die Verhältnisse in Treiber- und Endstufe formal vollständig zu berechnen, speziell was Spannungsverstärkung, Aussteuerung der Endröhren und Ausgangswiderstand angeht. Dies soll jedoch Gegenstand einer geplanten Fortsetzung dieses Artikels sein während nachfolgend die Vorzüge zunächst qualitativ in knapper Form betrachtet werden.

Leistungsstufe

Wenn zunächst ein einzelner Kathodenfolger betrachtet wird so liegt dessen Ausgangswiderstand in der Größenordnung von $R_a = 1/S$, zum Beispiel 100Ω . Der gewünschte oder sinnvolle Lastwiderstand wird i.d.R. wesentlich größer sein, beispielsweise $R_L = 1k\Omega$.

Nachdem zwei Röhren in der Leistungsstufe zur Verfügung stehen, könnte man diese parallel schalten und würde damit den Innenwiderstand auf $R_a = 50\Omega$ halbieren. Identische Anpassbedingungen ergäben sich dann bei ebenfalls halbiertem Lastwiderstand $R_L = 500\Omega$ und gleichzeitig verdoppeltem Strom durch die Last.

Alternativ - und hier konzeptgemäß - schaltet man die beiden Kathodenfolger gegenparallel wie in Abbildung 2. Durch diese Maßnahme wird ebenfalls der Strom durch die Last verdoppelt wie im ersten Fall. Gleichzeitig wird jedoch die Ausgangsspannung des einzelnen Kathodenfolgers in Bezug auf den Symmetriepunkt der Schaltung („Masse“) halbiert. Gemäß $R = U/I$ ergibt sich damit ein gegenüber der ersten Variante *halbierter* Lastwiderstand für gleiche Anpassbedingungen.

Die Anpassung an geringe Lastwiderstände wie z.B. 8Ω beim Lautsprecher wird durch das PPP-Konzept folglich erleichtert beziehungsweise sind im Falle der Verwendung eines Anpassübertragers entsprechend geringere Übersetzungsverhältnisse notwendig.

Es soll an dieser Stelle nicht verschwiegen werden, daß gemäß Abbildungen 1 und 2 zwei getrennte Versorgungen notwendig sind. Dem Leser wird ausserdem nicht entgangen sein, daß es sich nun *nicht* mehr um die Kombination aus zwei Kathodenfolgern handelt, da die Steuerspannung der Endröhren *nicht* dasselbe Bezugspotential wie die Ausgangsspannung hat. Vielmehr kommt eine Schaltungsvariante zum Einsatz, die als „bootstrapping“ bezeichnet wird um hier absichtlich den Begriff „Mitkopplung“ zu vermeiden.

Treiberstufe

Die Treiberstufe im bekannten PPP-Konzept besteht aus zwei Triodensystemen. Der Verstärker AG9007 der Fa. Philips bildet hierbei eine Ausnahme und verwendet Pentoden in der Treiberstufe [1]. Die Treiberstufe hat die Aufgabe einer möglichst niederohmigen Ansteuerung der Leistungsstufe. Gleichzeitig übernimmt diese Stufe die Invertierung des Eingangssignals für eine Hälfte der Leistungsstufe (Röhren XT1 und XT3 in Abbildung 2).

Die Dimensionierung dieser Stufe ist nicht ganz problemfrei, da an diese folgende Forderungen gestellt werden:

- Niedriger Ausgangswiderstand
- Beitrag zur Spannungsverstärkung (auch wenn die Leistungsstufe selbst hierzu beiträgt)

Die erste Forderung bedingt ein kleines R_a und läuft damit der zweiten Forderung entgegen. Gemäß $SDR_i = 1$ benötigt man hier zusätzlich eine Triode mit großer Steilheit S und kleinem Durchgriff D beziehungsweise hohem Verstärkungsfaktor $\mu = 1/D$.

Warum dies so ist, vor allem der Durchgriff klein sein muß, erschließt sich am besten, wenn man die Treiberstufe und die Leistungsstufe als eine Einheit zusammen analysiert. In diesem Artikel nur kurz betrachtet sieht man, daß die Betriebsspannung der jeweiligen Treiberröhre gleich der Schirmgitterspannung der Leistungsröhre zuzüglich der Ausgangsspannung (gegen AGND) ist. Hierdurch addiert sich die Hälfte der Gesamt-Ausgangsspannung zur Betriebsspannung der jeweiligen Treiberröhre und verursacht hierdurch eine *Gegenkopplung*. Diese Gegenkopplung und der resultierende Verstärkungsverlust ist abhängig vom Durchgriff der Treiberröhre.

Zu den teilweise widersprüchlichen Forderungen kommt hinzu, daß die Grenzdaten der Treiberröhre vorzugsweise eingehalten werden. Zusammenfassend ist der Dimensionierungsspielraum für die Treiberstufe stark eingeschränkt. In der Praxis muß regelmäßig ein Kompromiss gefunden werden, der zur Folge hat, daß die Leistungsstufe *nicht* voll angesteuert werden kann.

Vorstufe

Die eingangsseitigen Verstärkerstufen sind ohne Besonderheiten als Kathodenbasisschaltung mit anschließendem Kathodenfolger geschaltet. Die Vorstufe liefert hierbei einen signifikanten Anteil zur Gesamt-Spannungsverstärkung. Bemerkenswert ist, daß hier die Symmetrie des PPP-Konzeptes zugunsten einer unsymmetrischen Verstärkerstufe aufgegeben wird. Die Gründe hierfür erschließen sich dem Autor nicht. Allerdings ist - für Liebhaber geradzahlgiger harmonischer Verzerrungen - hier die Möglichkeit geschaffen beliebige Mengen davon zu erzeugen.

2 Erweitertes PPP Konzept

Das Junghans-electronics Konzept gemäß Abbildung 3 beinhaltet wesentliche Änderungen gegenüber dem oben vorgestellten Stand der Technik.

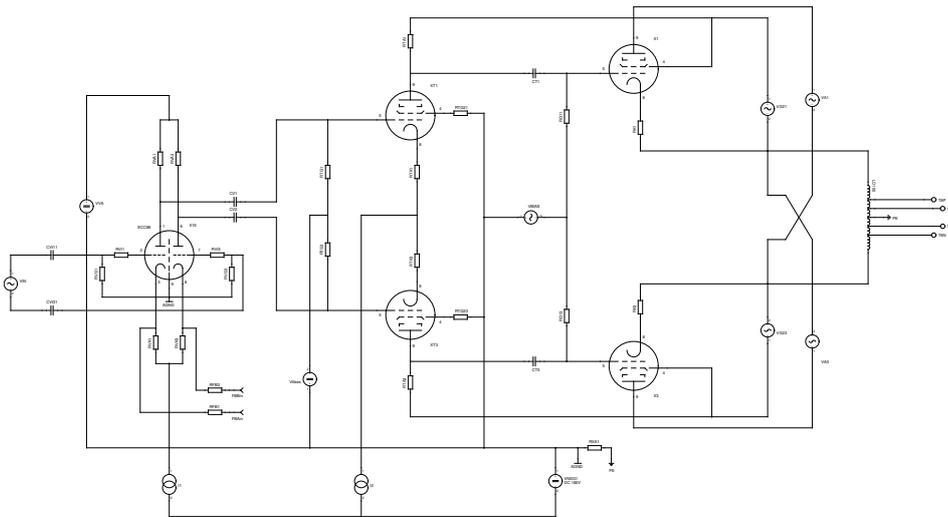


Abbildung 3: Erweiterter PPP Verstärker

- Einsatz einer Pentode in der Treiberstufe
- Symmetrische Vorstufe
- Verwendung eines Ausgangsübertragers

Die Vorzüge dieser Kombination sollen nachfolgend kurz beschrieben werden.

Leistungsstufe

Die Leistungsstufe beinhaltet zunächst keine Änderungen. Die Dimensionierung geschieht analog dem bekannten PPP Konzept wobei durch den Einsatz einer Pentode in der Treiberstufe mehr Freiheit bei der Dimensionierung und Ausführung der Endstufe besteht. Anders als im Philips Konzept nach [1] wird jedoch nicht auf einen Ausgangsübertrager verzichtet. Dessen Konstruktion wird jedoch durch die inhärent niederohmige Schaltungstopologie wesentlich vereinfacht. Umgekehrt werden bei entsprechendem Konstruktionsaufwand des Übertragers dessen Eigenschaften wesentlich verbessert.

Treiberstufe

Im Abschnitt 1.1 wurde der Triodendurchgriff als ungünstig in einer PPP-Treiberstufe identifiziert. Der Durchgriff beziehungsweise die durch ihn entstehende Gegenkopplung lässt sich jedoch elegant vermeiden durch den Einsatz einer Pentode an dieser Stelle. Hierdurch ergeben sich folgende Vorteile gegenüber der Lösung mit Triode:

- Höheres Verstärkungs-Bandbreite-Produkt
- Möglichkeit des Verzichts auf eine Vorstufe (höhere Verstärkung)
- Bessere Skalierbarkeit der Leistungsstufe (geringerer Ausgangswiderstand)
- Geringere Eingangskapazität der Treiberstufe

Sofern weiterhin noch eine Verstärkerstufe vorher eingesetzt wird, so erhöht der letzte Punkt auch deren Designspielraum. Anzumerken ist, daß neben einer Pentode an dieser Stelle auch andere Mehrgitterröhren oder auch Kombinationsschaltungen aus z.B. zwei Triodensystemen eingesetzt werden könnten. Letzteres verkompliziert jedoch das Design ohne ersichtlichen Vorteil.

Vorstufe

Die Vorstufe im hier vorgestellten Konzept ist vollsymmetrisch ausgeführt. Durch die verringerte Eingangskapazität der Treiberstufe kann der Impedanzwandler bestehend aus dem zweiten Triodensystem im originalen Konzept entfallen. Dieses zweite Triodensystem wird im vorgestellten Konzept zusammen mit dem ersten Triodensystem zur Bildung eines Differenzverstärkers genutzt. Diese Variante hat den zusätzlichen Vorteil, daß der Verstärker nun wahlweise vollsymmetrisch angesteuert werden kann (z.B. von einem symmetrischen Vorverstärker über XLR Verbindung) oder auch über einen unsymmetrischen Eingang.

3 Zusammenfassung

Die Verwendung einer Pentode in der Treiberstufe eines PPP-Verstärkers vergrößert den Designspielraum nicht nur für eben diese Treiberstufe sondern auch für die nachfolgende Leistungsstufe (höheres Verstärkungs-Bandbreite Produkt) und die eventuell vorangehende Verstärkungsstufe (geringere Eingangskapazität). Bei Beibehaltung eines Ausgangsübertragers lassen sich extrem niederohmige und breitbandige Audio-Verstärker entwerfen, da sich durch die vorgestellte Anordnung wesentlich vergrößerte Designspielräume für alle Verstärkerstufen und den Ausgangsübertrager ergeben.

Literatur

- [1] N.V. Philips Gloeilampenfabrieken. *Service Dokumentatie AG9007*. Service manual. 1957.
- [2] Cecil T. Hall. *Parallel opposed power amplifiers*. Patent. Patent. März 1955.
- [3] G. Herrmann und H. Sachs. »Der Gegenparallel-Verstärker«. In: *Radio und Fernsehen* 17 (1957).
- [4] Matti Köykkä. *Vuorovaihevahvistin*. Patent. Patent. Apr. 1955.
- [5] Matti Köykkä. *Vuorovaihevahvistin*. Patent. Patent. Sep. 1958.
- [6] Fritz Kühne. »20-Watt-Hi-Fi-Verstärker«. In: *Funkschau* 2 (1957).
- [7] Alpha M. Wiggins. *High fidelity audio amplifier*. Patent. März 1958.