

1 Rolle der Last bei Röhrenendstufen

1.1 Aufbau von Röhrenendstufen

Eine Röhrenendstufe besteht im Allgemeinen aus einer oder mehreren Röhren die mit hoher Spannung betrieben werden und einem Ausgangsübertrager der den hohen Innenwiderstand der Schaltung im Hochspannungsteil (Röhren) an den niedrigen Widerstand der Last (Lautsprecher) anpasst.

In Abb. 1 ist ein sehr vereinfachter schematischer Aufbau einer Röhrenendstufe gezeigt. U_v ist hierbei die Versorgungsspannung, U_s die Schirmgitterspannung auf die hier nicht näher eingegangen wird. U_+ und U_- sind die Eingangsspannung, zueinander sind sie invertiert, d.h. wenn U_+ positiv ist ist U_- negativ¹. Dies hat mit der Beschaltung der Endstufe zu tun (Push-Pull Betrieb). Durch die verpolte Ansteuerung fließt im linken Zweig kein Strom während im rechten Zweig maximaler Strom fließt und umgekehrt. Im Ausgangsübertrager ist dies aber so verschaltet das man hierdurch den doppelten Spannungshub erhält. Zusätzlich steuert auch die Anode wenn kein Strom fließt bis zur doppelten Versorgungsspannung aus (nur bei Wechselspannung, infolge der Induktivität). Die Spannungen schwanken also gegenphasig zwischen etwa 0 V und $2 \cdot U_v$ was einen maximalen Spannungshub zwischen beiden Enden des Ausgangsübertragers von ca. $4 \cdot U_v$ erzeugt.

Die Spannungen U_+ und U_- sind mit einer negativen Spannung vorgespannt (BIAS). Hiermit wird der Ruhestrom, der sich je nach Röhrentyp im mehrere 10 mA-Bereich befindet, eingestellt. Diese beiden Spannungen bestimmen auch den Anodenruhestrom der durch den Ausgangsübertrager fließt. Ändert sich nun die Eingangsspannung U_+ (und damit U_- in entgegengesetzte Richtung) so fließt durch den Ausgangsübertrager ein dazu proportionaler Strom der auf die Sekundärseite übertragen wird und somit den Lautsprecher speist.

¹nur wechselfspannungsmäßig, die negative BIAS-Spannung ist beiden Spannungen überlagert

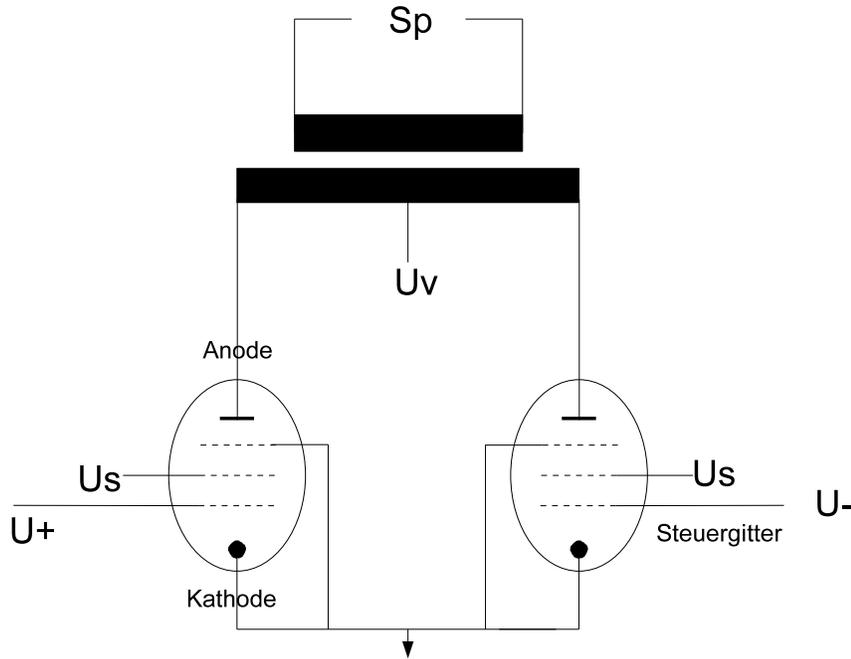


Abb. 1: Vereinfachte Endstufe mit Pentoden

1.2 Woher kommt die Leistung?

Prinzipiell sind Röhren spannungsgesteuerte Stromquellen, d.h. je nach Spannung am Steuergitter fließt ein unterschiedlicher Anodenstrom. Die Endstufe wird mit einer Spannung von etwa 300 V - 500 V und Strömen zwischen 10 und 100 mA betrieben. Durch die Röhren kann aber nur ein maximaler Anodenstrom I_{max} fließen, man ist strommäßig also begrenzt. Die maximale (Sinus) Leistung erhält man bei einem Sinussignal mit einem Spitzespitze-Pegel von $4 \cdot U_v$ und einem Spitzespitze-Strom von $2 \cdot I_{max}$ am Ausgangsübertrager. Dies entspricht einer Effektivspannung von

$$U_{eff} = \sqrt{2} \cdot U_v$$

und

$$I_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot I_{max}.$$

Hierbei kann I_{max} durch parallelschalten weiterer Röhren und U_v durch ändern der Versorgungsspannung beeinflusst werden. Damit dieser Strom fließt muss der Widerstand zwischen den Anoden

$$R_{aa} = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$$

sein. Dieser Widerstand ist in Datenblättern² auch unter dieser Bezeichnung oder als R_a für Single-Ended Endstufen zu finden.

²z.B. unter tdsl.duncanamps.com

1.3 Woher kommen die verschiedenen Ohm-Zahlen bei Röhrenendstufen?

Da R_{aa} deutlich höher (k Ω -Bereich) ist als die Lautsprecherimpedanz wird der niedrige Widerstand des Lautsprechers auf den gewünschten Widerstand R_{aa} hochtransformiert. Ein Transformator ändert die Spannung mit dem Wicklungsverhältniss n , den Strom mit $\frac{1}{n}$ und den Widerstand $R = \frac{U}{I}$ mit n^2 .

Die Bezeichnung der Lautsprecherausgänge hat also nichts mit dem Innenwiderstand der Endstufe o.ä. zu tun, sondern gibt an welcher Widerstand auf den idealen Arbeitswiderstand R_{aa} transformiert wird.

1.4 Und wie wirkt sich Fehlanpassung aus?

Fehlanpassung macht sich erst bei höheren Pegeln bemerkbar. Wenn kein Signal am Eingang anliegt ist es der Endstufe egal wie sie belastet wird da keine Energie aus der Schaltung entfernt werden muss.

1.4.1 Leichte Fehlanpassung und Kurzschluss

- **etwas niedriger:** „Etwas“ bedeutet hierbei etwa bis Faktor zwei. Der Arbeitswiderstand ist dadurch auch niedriger, es fließt ein höherer Strom. Im höheren Asteuerungsbereich wird der Strom durch die Röhren begrenzt wodurch man weniger Leistung erhält. Durch die hohe Belastung der Röhren werden diese etwas schneller verschleifen.
- **etwas höher:** „Etwas“ wieder etwa bis Faktor zwei. Da der Widerstand zu hoch ist fließt maximal ein Strom der niedriger ist als I_{max} der Röhren. Wie im vorigen Fall verliert man dadurch etwas Leistung.
- **Extremfall Kurzschluss:** Durch den geringen Widerstand zwischen den Anoden fließt ein hoher Strom der durch die Röhren begrenzt wird, im Prinzip ähnlich wie bei Unteranpassung aber bereits bei deutlich niedrigeren Pegeln. Wieder hat man einen höheren Verschleiss.

1.4.2 Extremfall Leerlauf

Der Leerlauf ist separat da die Auswirkungen etwas komplizierter sind. Grundsätzlich funktioniert ein Transformator so das ein Strom I_p auf der Primärseite einen magnetischen Fluss Φ_p im Kern erzeugt. Die Flussänderung $\frac{d\Phi_p}{dt}$ erzeugt auf der Sekundärseite eine Spannung U_s wodurch ein Strom I_s durch den Sekundärwiderstand fließt. Der Strom I_s erzeugt wiederum einen mag. Fluss Φ_s der entgegengesetzt zu Φ_p ist und diesen kompensiert. Der magnetische Fluss in einem Transformator ist daher ungefähr Null.

Fehlt der Sekundärwiderstand so fließt auch kein Sekundärstrom und der Fluss wird nicht kompensiert. Der Trafo verhält sich dann wie eine Induktivität und versucht einen fließenden Strom aufrecht zu erhalten. Da der Innenwiderstand der Röhren recht hoch ist kann der Strom aber nicht darüber abfließen wodurch eine hohe Spannung entsteht (ähnlich wie beim Zündunterbrecher). Durch die hohe Spannung kann es dann zu Überschlägen innerhalb des Trafos aber auch der Schaltung kommen wodurch der Trafo und weitere Bauteile zerstört werden. Teilweise wird parallel zur Röhre eine Diode (von Masse zur Anode, ähnlich der Diode parallel zu einem Relais) in Sperrrichtung verbaut wodurch der Strom über die Diode abgeleitet werden kann.

1.5 Und nun?

Grundsätzlich ist es natürlich immer am Besten einen Verstärker mit der (impedanzmäßig) passenden Box zu betreiben da nur so der Verstärker betrieben wird wie sich der Hersteller es vorgestellt hat. Eine gewisse Fehlanpassung verkraftet eine Röhrenendstufe ohne weiteres. Der Verschleiss durch eine zu niedrige Impedanz ist vergleichbar mit dem erhöhten Verschleiss wenn man den Verstärker mit Endstufenverzerrung betreibt was ja auch hier und da vorkommen soll. Genau wie letzterer ist er auch aussteuerungsbedingt, bei leisen Pegeln wirkt sich eine Veränderung kaum aus.

Weiterhin ist zu bedenken das es bei einigen Verstärkern eine Umschaltung zwischen Pentoden- und Triodenbetrieb gibt was zu einer Leistungsreduzierung führt. Auch hier müsste der Arbeitswiderstand angepasst werden, was aber nicht gemacht wird, die Verstärker machen das dennoch problemlos mit.

Die Widerstandsangabe bei Transistorendstufen ist im Übrigen eine Mindestangabe da Transistorendstufen nicht kurzschlussfest sind (zumeist aber dennoch dagegen abgesichert). Ein Lautsprecher mit höherer Impedanz kann problemlos betrieben werden, man erhält allerdings weniger Leistung.