

10.5.7 Der Endstufen-Innenwiderstand

Röhrenschaltungen sind hochohmig, Lautsprecher niederohmig. Als Vermittler zwischen diesen unterschiedlichen Impedanzniveaus dient der Ausgangsübertrager, bei dessen Beschreibung stets das Wort "Anpassung" auftaucht: Der Ausgangsübertrager *passt* die unterschiedlichen Widerstände *aneinander an*. Üblicherweise wird unter Anpassung verstanden, dass Quell- und Lastwiderstand gleich groß sind. Das würde bei der Röhrenendstufe bedeuten, dass ihr Innenwiderstand durch den Ausgangsübertrager auf Lautsprecher-Niveau reduziert wird, also z.B. $8\ \Omega$ beträgt. Bei der Röhrenendstufe darf diese strenge Definition des Begriffes **Anpassung** aber nicht verwendet werden, die Widerstandsniveaus werden aneinander ange-nähert, aber nicht (leistungs-) angepasst. Wenn bei einem Röhrenverstärker als Lautsprecher-Nennwiderstand $8\ \Omega$ spezifiziert sind, beträgt der Verstärker-Innenwiderstand (die Quellimpedanz) in der Regel nicht $8\ \Omega$, sondern wesentlich mehr, z.B. $100\ \Omega$. Röhrenverstärker arbeiten also "fast schon als Stromquellen", und nicht leistungsangepasst.

Für einen HiFi-Lautsprecher ist eine derartige Stromeinprägung in der Regel unerwünscht, weil dadurch die Lautsprecherresonanz überbetont wird. Üblich ist der Betrieb aus einer sehr niederohmigen Quelle, wodurch die (unerwünscht hohe) Resonanzgüte verringert wird [3]. Mit Transistor-Endstufen ist dieses Ideal fast perfekt realisierbar, bei Röhren-Endstufen lässt sich durch Gegenkopplung die Quellimpedanz zwar auch erniedrigen, aber nicht in dem Maße wie beim Transistor-Verstärker (Phasendrehungen, Schwingneigung). Ob bei einem **Gitarrenverstärker** überhaupt eine **Gegenkopplung** wünschenswert ist, wurde in der Vergangenheit sehr unterschiedlich beantwortet: Keine Endstufen-Gegenkopplung bei fast allen VOX-Verstärkern, sowie beim (sehr frühen) Fender Bassman 5A6; Endstufengegenkopplung beim (etwas späteren) Fender Bassman 5B6, sowie bei vielen weiteren Fender-Verstärkern. Der gegengekoppelte Verstärker reagiert "zivilisierter", seine nichtlinearen Verzerrungen sind geringer als beim gegenkopplungsfreien Pendant – zumindest, solange man nicht übersteuert. Ob man die geringeren Verzerrungen als Vorteil empfindet, ist allerdings Geschmackssache, und soll hier nicht näher bewertet werden. Da Gegenkopplung aber nicht nur auf Klirrfaktor und Lautsprecherbedämpfung einwirkt, sondern auch auf die Quellimpedanz des Gitarren-Verstärkers, ist eine andere Frage naheliegend: Lässt sich durch Gegenkopplung die **Ausgangsleistung** erhöhen? Denn die in Endstufen übliche Gegenkopplung erniedrigt ja definitiv den ("zu hohen") Verstärker-Innenwiderstand, und müsste somit als Verbesserung der Leistungsanpassung zu interpretieren sein.

Doch so einfach sind die Verhältnisse nicht, die Röhre ist ein **nichtlineares Bauteil**, das sich mit der Theorie der linearen Zweitore nur unzureichend beschreiben lässt. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, zwischen (näherungsweise) linearem und (stark) nichtlinearem Betrieb zu unterscheiden. Bei kleiner Aussteuerung arbeitet die Endstufe näherungsweise linear*. Für diesen Fall lässt sich der Röhren-Innenwiderstand aus der Steigung der Ausgangskennlinie abschätzen. Je nach Röhrentyp und Arbeitspunkt ist ein Röhren-Innenwiderstand im Bereich $10 - 100\ \text{k}\Omega$ zu erwarten. Würde man nun im Sinne einer Leistungsanpassung den Anoden-Lastwiderstand genau so groß wie den Röhren-Innenwiderstand wählen (z.B. $100\ \text{k}\Omega$), müsste für $P = 12\ \text{W}$ die Anoden-Wechselspannung $3.1\ \text{kV}_{\text{ss}}$ betragen – das überfordert jede gängige Endröhre. Widerstandsgleichheit ist definitiv nicht das Wunschziel, stattdessen ist (unter Beachtung der Grenzwerte) die abgegebene Leistung zu maximieren. In den Kapiteln über die einzelnen Gegentakt-Endstufen werden Richtlinien für das Berechnen dieses optimalen Anoden-Lastwiderstandes angegeben – typischerweise erhält man Werte um $1 - 2\ \text{k}\Omega$.

* Hierfür muss beim Gegentakt-Betrieb ein ausreichender Ruhestrom eingestellt sein.

Der optimale Anoden-Lastwiderstand ist wesentlich kleiner als der Röhren-Innenwiderstand, und deshalb ist der Übertrager-Innenwiderstand wesentlich größer als der Lautsprecher-Nennwiderstand – mit der Konsequenz, dass die Lautsprecherspannung wesentlich von der Lautsprecherimpedanz abhängt. Dies ist kein Nachteil, denn im Gegensatz zum HiFi-Lautsprecher ist beim Gitarrenlautsprecher die Betonung der Lautsprecher- und Gehäuse-Resonanzen nicht generell unerwünscht, sondern in vielen Fällen als spezielles Klangcharakteristikum sogar gefordert. Wobei aber zu berücksichtigen ist, dass diese Stromsteuerung beim Clipping ihr rapides Ende findet. Die Endstufe ist nur im linearen Betrieb hochohmig, bei Übersteuerung stoßen die Anodenspannungen des Gegentakt-Verstärkers (und damit auch die Ausgangsspannung des Ausgangsübertragers) an eine relativ harte Grenze: Die Röhren-Restspannung (z.B. 50V). In **Abb. 10.5.18** ist das Ausgangskennlinienfeld einer 6L6-GC dargestellt, zusammen mit einigen Innenwiderständen. Diese Röhre hat (wie jede andere) nicht einen Innenwiderstand – stattdessen ist ihr Innenwiderstand stark aussteuerungsabhängig und ändert sich um bis zu zwei Zehnerpotenzen, wenn der Arbeitspunkt verschoben wird. Im Bereich üblicher Ruhestrome (z.B. 350 V, 30 mA) ist die Röhre mit ca. 70 k Ω Innenwiderstand relativ hochohmig, an der Aussteuerungsgrenze (z.B. 50 V, 200 mA) wird sie niederohmiger. So richtig überraschend kommt diese Erkenntnis natürlich nicht, denn die Röhre ist ein stark nichtlineares Bauteil. Diese Eigenschaft muss man sich aber immer wieder bewusst machen, weil die Theorie der LZI-Systeme mit ihren relativ einfachen Berechnungen allzu verlockend ist. Aber eben auch irreführend. Schließt man an die im Bild dargestellte **6L6-GC** einen 14:1-Übertrager an, transformiert er die 72 k Ω in 367 Ω ; das ist gegenüber einem 8- Ω -Lautsprecher hochohmig. Die 2 k Ω transformiert er hingegen in 10 Ω .

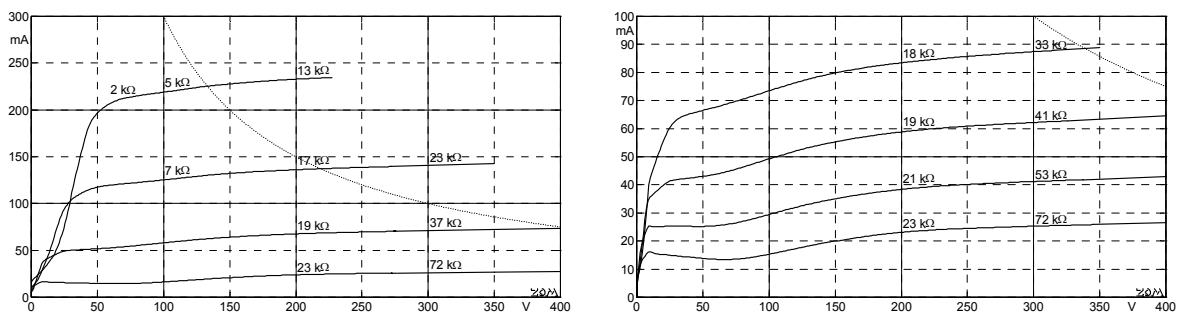


Abb. 10.5.18: Ausgangskennlinien der 6L6-GC, mit Angabe einiger Innenwiderstände. $U_{g2} = 300\text{V}$, $R_{g2} = 0$.

Der im **Datenblatt** einer Röhre angegebene Innenwiderstand ist ein Richtwert, den man für Kleinsignalbetrachtungen zur groben Orientierung verwenden kann. Größere Berechnungen sollte man daraus aber nicht ableiten, weil zum einen eine Endstufe nur selten im Kleinsignalbetrieb arbeitet, und zum andern der Innenwiderstand arbeitspunktspezifisch ist, und darüber hinaus auch noch von der Schirmgitterspannung abhängt. Für die 6L6-GC nennt das Datenblatt einen Innenwiderstand von 33 k Ω (Class A). Das passt zu den o.a. Messwerten, ist aber nur für ganz wenige Gitarrenverstärker brauchbar, weil die zumeist im AB-Betrieb arbeiten. Für den geben die Datenblätter aber üblicherweise keine Innenwiderstände an – stattdessen wird der optimale Lastwiderstand spezifiziert, und daraus, und nicht aus dem Innenwiderstand, kann das Übersetzungsverhältnis des Ausgangsübertragers berechnet werden. Möchte man für den AB-Betrieb den Quellwiderstand R_Q ermitteln, den der Lautsprecher "sieht", müssen mehrere Besonderheiten berücksichtigt werden: Bei kleiner Aussteuerung arbeiten beide Endröhren zusammen, R_Q wird halbiert: Mit einem 10:10:1-Übertrager erhält man für $R_i = 60 \text{ k}\Omega \rightarrow R_Q = 300 \Omega$. Bei großer Aussteuerung arbeitet hingegen nur eine Röhre pro Halbwelle. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass der Übertrager keinesfalls ideal ist: Die (nichtlineare!) Hauptinduktivität und die Wicklungskapazität verringern R_Q .

Abb. 10.5.19 zeigt Messkurven einer Endstufe (JTM-45, KT-66, GZ-34). Die oberste Kurve entsteht, wenn die Betriebsspannung abgeschaltet ist (Standby): Die (beheizten) Röhren isolieren nicht perfekt, sind aber ziemlich hochohmig, sodass Übertrager-Kapazität und -Induktivität impedanzbestimmend sind. Bei eingeschalteter Betriebsspannung, aber deaktivierter Gegenkopplung (no NFB) verringert sich der Innenwiderstand R_O , weil nun die Röhren im Arbeitspunkt betrieben werden. Noch wesentlich kleiner wird R_O , wenn die Gegenkopplung arbeitet. Da der Frequenzgang der Schleifenverstärkung durch das Presence-Poti verändert werden kann, lassen sich unterschiedliche Charakteristiken realisieren. Dass die Kurven bei hohen Frequenzen nicht konvergieren, liegt an den vom Presence-Filter hervorgerufenen Phasendrehungen (Tiefpass in der Gegenkopplungs-Schleife, siehe auch Kap. 10.3.3), dass der Anstieg nicht proportional zur Frequenz erfolgt, liegt an der nichtlinearen Hauptinduktivität, die von der Aussteuerung und dem Hysterese-Arbeitspunkt abhängt (Kap. 10.6).

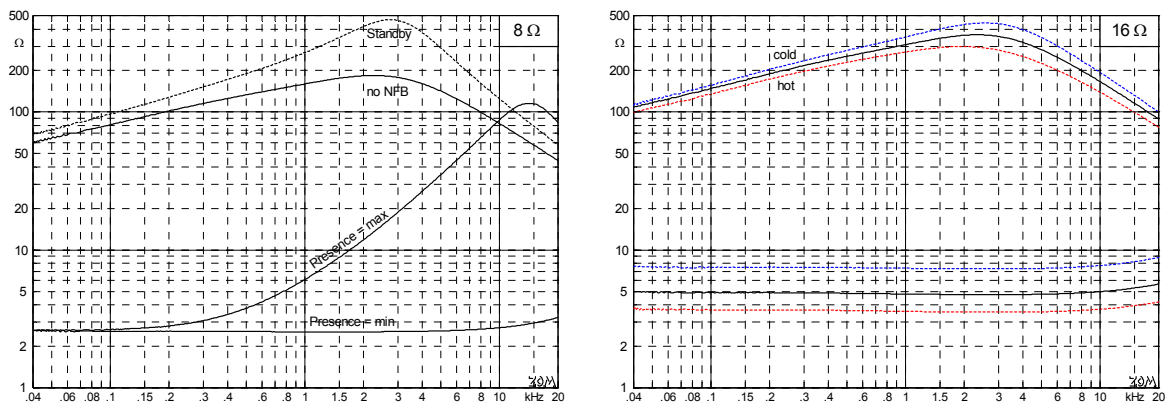


Abb. 10.5.19: Endstufen-Innenwiderstand des JTM-45. Links für den 8- Ω -Ausgang, rechts für 16 Ω . Im rechten Bild ist auch die Auswirkung der Ruhestromeinstellung ("Biasing") auf den Innenwiderstand eingezeichnet.

Die Impedanz hängt auch noch vom Ruhestrom der Endröhren sowie vom Endröhrentyp ab. Bei Ungleichheit der Endröhren kommen noch Vormagnetisierungseffekte des Übertragerkerns hinzu. Wegen dieser Abhängigkeiten sollte aus Abb. 10.5.19 nur entnommen werden, dass sich ohne Gegenkopplung Ausgangsimpedanzen um 100 Ω ergeben – die genauen Werte bzw. Frequenzabhängigkeiten sind doch sehr vom individuellen Verstärker abhängig. Bzw. gar nicht so bedeutend, wenn man berücksichtigt, dass beim JTM-45 die Gegenkopplungsschleife ja üblicherweise geschlossen ist. Dabei ergibt sich dann ein erstaunlich kleiner Endstufen-Innenwiderstand (= Betrag der Ausgangsimpedanz) von nur 2.5 Ω (8- Ω -Ausgang). Diese Endstufe ist effizient gegengekoppelt! Zumindest, solange man das Presence-Poti nicht allzu weit aufdreht. Schon überraschend: Marshall, nicht direkt für HiFi-Endstufen bekannt, verringert durch (verzerrungsmindernde) Gegenkopplung die Ausgangsimpedanz auf Werte, die deutlich unter dem Nenn-Lastwiderstand liegen!

Dass dies bei Marshall nicht immer so blieb, bewies der später entwickelte 18-W-Verstärker. Seine beiden EL-84 arbeiten in einer Endstufe, die ganz auf Gegenkopplung verzichtet. Man denkt hierbei sofort an VOX, aber angeblich war der "Watkins Dominator" der Ideenlieferant für Ken Bran [Doyle]. Große Unterschiede zum AC-30 findet man im Innenwiderstand aber nicht, wie Abb. 10.5.20 beweist. Und generell gilt ja: Derartige Messprotokolle sind Momentaufnahmen – jeder Röhrenwechsel ändert die Verstärker-Parameter, und somit auch den Innenwiderstand. Inwieweit das Selektieren der Endröhren hilft, interindividuelle Unterschiede zu minimieren, erläutert Kap. 10.5.11, Auswirkungen der Ruhestromeinstellung werden in Kap. 10.5.8 erläutert.

Drei der in **Abb. 10.5.20** dokumentierten Ausgangsimpedanzen stammen von nicht gegengekoppelten Endstufen: VOX AC-30, Marshall 18W und Tweed Deluxe; der Super-Reverb ist gegengekoppelt, wurde aber auch mit aufgetrennter Gegenkopplungsschleife vermessen.

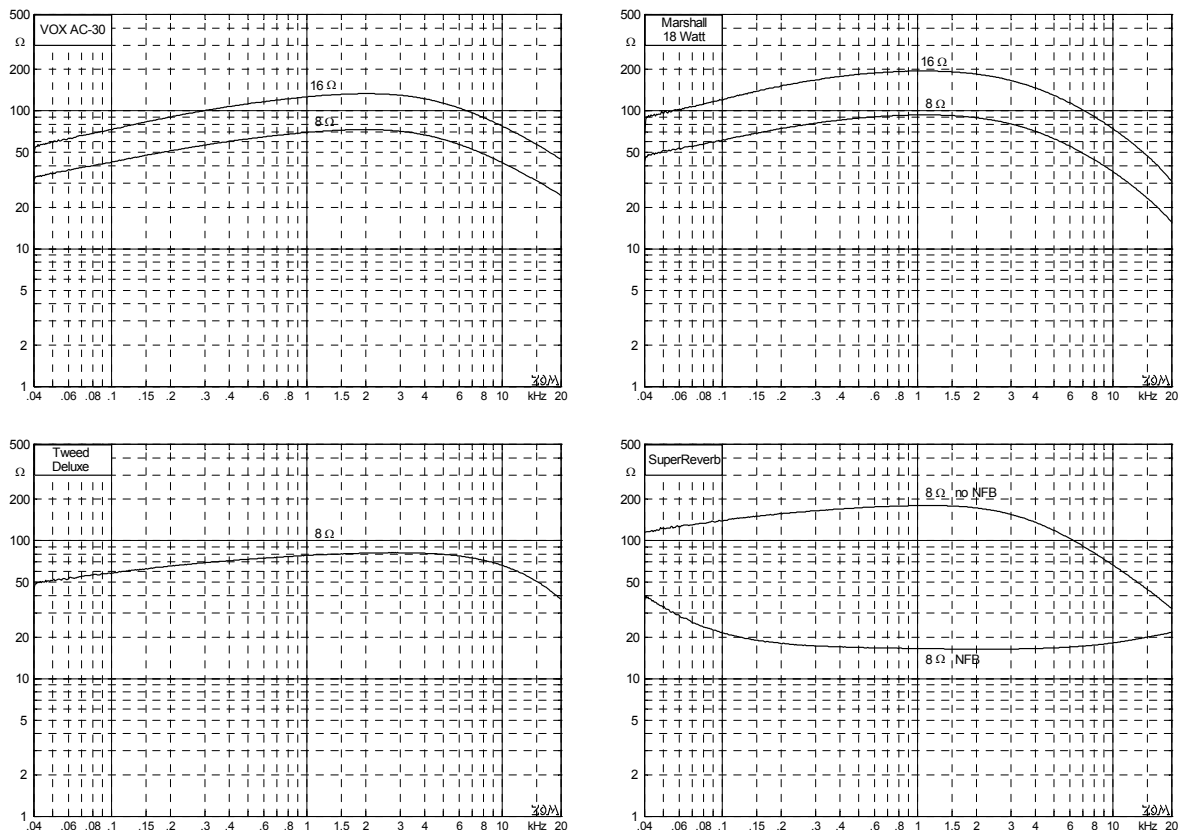


Abb. 10.5.20: Endstufen-Innenwiderstände einiger Gitarrenverstärker (Super-Reverb mit/ohne Gegenkopplung).

Angeht diese doch erheblichen Innenwiderstände könnte die Frage entstehen, wo denn die **Energie** zu deren Betrieb herkommt. Wenn ein 8- Ω -Widerstand 30 W aufnimmt, und in Reihe dazu liegen 75 Ω , dann nimmt der Vorwiderstand (also der Verstärker-Innenwiderstand) 281 W auf? Wird deshalb der VOX so heiß? Nein, mit einer derartigen Argumentation würde man ein Modell missbrauchen. *Eine Ersatzschaltung weist bezüglich einer bestimmten Problemstellung das gleiche Verhalten auf wie die zugehörige reale Anordnung* [20]. Die Problemstellung bei der realen Quelle und deren Ersatz durch eine ideale Quelle mit Innenwiderstand ist aber nicht die Energiebilanz, vielmehr soll der Unterschied zwischen Quellenspannung und Klemmenspannung veranschaulicht werden. Man sieht das sofort, wenn man die Spannungsquelle mit in Reihe geschaltetem Innenwiderstand durch eine Stromquelle mit parallelgeschaltetem Innenwiderstand ersetzt: Im Leerlauf sind die inneren Verluste dieser Stromquelle maximal, die der Spannungsquelle hingegen null. Das Modell einer Quelle mit Innenwiderstand ist gut geeignet, um die Abhängigkeit der Ausgangsspannung vom Lastwiderstand (Lautsprecherwiderstand) zu erklären: Bei niederohmigem Innenwiderstand ist die Klemmenspannung praktisch lastunabhängig, bei hochohmigem Innenwiderstand praktisch widerstandsproportional – insoweit passen Realität und Modell gut zusammen. Nicht geeignet ist dieses Modell, um Röhren-Verlustleistungen zu ermitteln: Hierzu müssen die tatsächlichen Spannungen und Ströme der Röhren verwendet werden.