

10.5.12 Spezielle Röhren-Endstufen

Im Folgenden werden ein paar ausgewählte Röhren-Endstufen vorgestellt und bezüglich einiger Parameter diskutiert. Hierbei sollte immer berücksichtigt werden, dass das Verhalten jedes Röhrenverstärkers von seinen individuellen Komponenten abhängt. Alle dargestellten Messkurven wurden an einem speziellen Verstärker ermittelt – selbst wenn ein anderer Verstärker desselben Typs nach demselben Schaltplan gebaut wurde, kann er sich anders verhalten.

VOX AC-30

Ein Gitarren-Verstärker, der häufig als "der" Prototyp der Gegentakt-A-Endstufe angesehen wird, ist der VOX AC-30, bzw. dessen Vorgänger, der AC-15. Dass es daneben noch eine Reihe weiterer Verstärker mit ähnlichen Schaltungen gegeben hat (z.B. von Gibson), soll nicht näher untersucht werden – wohl aber die Frage, ob denn der AC-30 wirklich eine Gegentakt-A-Endstufe besitzt. Die Literatur definiert diese Betriebsart übereinstimmend: Die Endröhren dürfen nicht in den Sperrbereich angesteuert werden, der Arbeitspunkt muss hierzu in der Mitte der Arbeitsgeraden liegen. Wie ist das beim VOX?

Beim AC-30 kommen vier EL-84 zum Einsatz, wobei jeweils zwei parallel geschaltet sind, um den Strom zu verdoppeln. **Abb. 10.5.42** zeigt das Ausgangskennlinienfeld dieser Endpentode, der Arbeitspunkt liegt bei ca. 310 V / 47 mA. Zumindest bei frühen Varianten. Nachdem der Siliziumgleichrichter die Gleichrichterröhre verdrängt hatte, gab's Spannungen über 360 V, aber das Untersuchungsobjekt sei der "Urvox", wie er zu Beginn der 60er Jahre gebaut wurde. Ohne Aussteuerung ergibt sich mit dem o.a. Arbeitspunkt eine Anodenverlustleistung von 14 W pro Röhre – immerhin 2 W mehr, als das Datenblatt erlaubt, aber (bei verringerter Lebensdauer) gerade noch zulässig. Eine symmetrische Aussteuerung, d.h. lehrbuchmäßiger A-Betrieb, ist mit diesem AP aber nicht möglich: Bei ca. -10 ± 6 V Steuergitterspannung beginnen die Endröhren *einseitig* zu begrenzen, und allein deshalb lautet das vorläufige Fazit: **Der VOX AC-30 hat keine Gegentakt-A-Endstufe.**

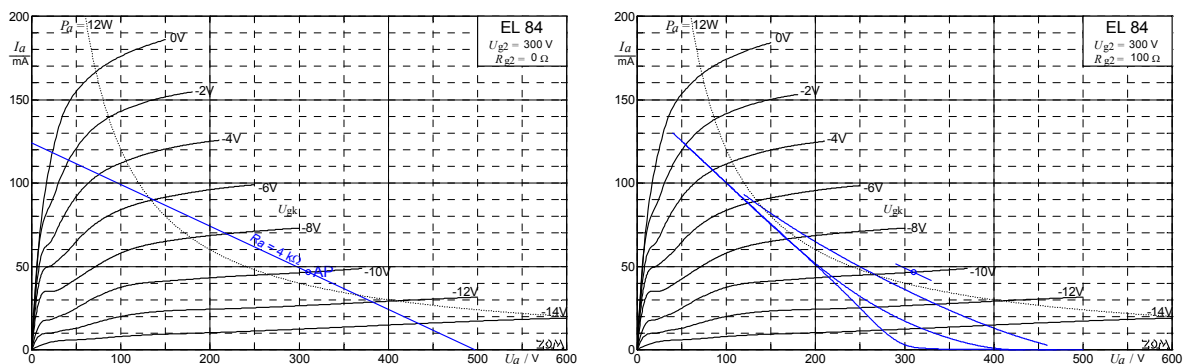


Abb. 10.5.42: Ausgangskennlinien der EL-84, ideale Arbeitsgerade (4 k Ω) bei 310 V Betriebsspannung (links). Im rechten Bild sind Messergebnisse eines VOX AC-30 dargestellt (reelle 8- Ω -Last am 8- Ω -Ausgang).

Genauere Analysen der Arbeitsgeraden bestätigen diese Diagnose (Abb. 10.5.42 rechts). Für kleine Aussteuerung erhält man erwartungsgemäß eine Arbeitsgerade, deren Steigung sich aus dem 4-k Ω -Lastwiderstand ergibt. Mit zunehmender Aussteuerung wandert aber der AP nach unten, d.h. zu kleineren Stromwerten, und die Steigung ändert sich von 4 k Ω auf 2 k Ω . Das muss auch so sein, weil zum einen der einsetzende Endröhren-Gitterstrom den Koppel-Kondensator polarisiert (Kap. 10.4.4), zum anderen jede Röhre jetzt praktisch im Gegentakt-B-Betrieb arbeitet (Kap. 10.5.3, 10.5.5). Wäre die AC-30-Endstufe eine Gegentakt-A-Schaltung,

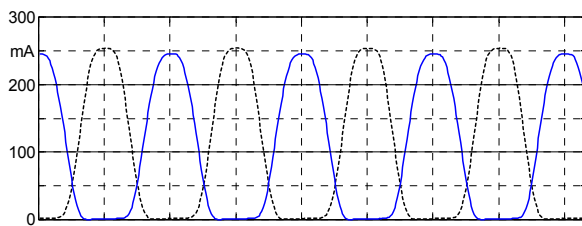


Abb. 10.5.43: Primärströme im Ausgangsübertrager.

müsste während der *vollen* Periode Strom fließen – das ist aber nicht der Fall, wie die Messwerte in Abb. 10.5.43 eindrucksvoll beweisen. Bei größerer Aussteuerung fließt nur während der *halben* Periode Strom in den Endröhren, und deshalb ist die AC-30-Endstufe keine A-Endstufe.

Es ist erstaunlich, wie beharrlich das Märchen von der angeblich einzigartigen Gegentakt-A-Endstufe wiederholt wird. Im VOX-Buch [Petersen/Denney 1995] geht es schon in der von Brian May verfassten Einführung los: *"The VOX AC-30 ... uses a Class A configuration."* Koautor Denney müsste es eigentlich besser wissen, hat er doch diesen Verstärker entwickelt. Oder der Röhren-Verkäufer TAD: *"Der Sound des Class A Betriebes wurde durch den VOX AC30 legendär! Durch den Class A Betrieb ergeben sich mehrere Vorteile: Ein dichter, 'dreidimensionaler' Ton mit angenehmer, leichter Kompression, singendem Sustain und harmonische, kontrollierbare Verzerrungen sind dafür typisch"*. Aspen Pitman meint in seiner Schaltplansammlung: *"Contributing to the amp's smooth tone in both the clean and distorted modes is its very unusual Class A circuit designed by Dick Denney"*. Nun, so unüblich war diese Endstufenschaltung ja nicht: Zwei Endpentoden, ein gemeinsamer Kathodenwiderstand (d.h. automatische Vorspannungserzeugung), das gab's bei Fender schon Jahre vorher (Deluxe 5B3), das gab's bei Gibson (GA-40), das war Lehrbuch-Standard. Lediglich die Größe des Kathodenwiderstandes variiert – mit ihm konnte der **Arbeitspunkt** festgelegt werden, konnte der Verstärker "heißer" oder "kälter" betrieben werden (Kap. 10.5.8). Und da weist der VOX tatsächlich eine Besonderheit auf: Er arbeitet am heißest möglichen Ende, mit einer Ruhe-Anodenverlustleistung von ca. 14 W (Maximalwert lt. Datenblatt: 12 W). Aber heißer Betrieb bzw. Kathodenwiderstand bedeutet nicht automatisch Gegentakt-A.

Wozu überhaupt Gegentakt-A? Für möglichst geringe nichtlineare Verzerrungen! Denn durch die Überlagerung unterschiedlich gekrümmter Röhrenkennlinien kompensieren sich die nichtlinearen Anteile, der Klirrfaktor nimmt ab. Die Literatur verweist allerdings deutlich darauf, dass dies nur bei Endstufen mit **Trioden** gilt: *"Bei Pentoden bringt die Gegentakt-A-Schaltung gegenüber dem Klirrfaktor der Einzelröhre keine wesentliche Verbesserung [Schröder]"*. Zur Erinnerung: Die EL-84 ist eine Pentode! Die Literatur weiß noch mehr: *"In einem korrekt abgeglichenen Gegentakt-A-Verstärker ist kein Kondensator zur Überbrückung des Kathodenwiderstandes erforderlich. Bei einem AB-Verstärker jedoch schon [Langford-Smith]"*. Der AC-30 hat einen derartigen Kondensator. Und zuletzt: Im VOX-Schaltplan ist die Spannung am Kathodenwiderstand spezifiziert: 10 V ohne Aussteuerung, 12.5 V vollausgesteuert. Wäre es eine Gegentakt-A-Schaltung, bliebe diese Spannung konstant. Ein alter **AC-15**-Schaltplan aus dem Jahre 1959 offenbart einen gemeinsamen Kathodenwiderstand von 130 Ω , sowie als Anoden-Lastwiderstand $R_{aa} = 8 \text{ k}\Omega$. Das Siemens-Datenblatt der EL-84 (anno 1955) empfiehlt für 300 V Anodenspannung einen gemeinsamen Kathodenwiderstand von 130 Ω , sowie $R_{aa} = 8 \text{ k}\Omega$. Zufall? Natürlich nicht, die Schaltungsentwickler taten gut daran, sich an die Empfehlungen der Röhrenhersteller zu halten. Siemens, Telefunken, Philips – alle spezifizierten für die EL-84-Gegentaktendstufe $R_k = 130 \Omega$, sowie $R_{aa} = 8 \text{ k}\Omega$. Aber nicht für die Gegentakt-A-Endstufe! Bei Siemens, Telefunken und Philips sind das Empfehlungen für **Gegentakt-AB-Betrieb**. Der AC-30 hat statt zweier EL-84 derer vier, also: doppelter Strom, halber Kathodenwiderstand. Alten Schaltplänen kann man entnehmen, dass beim AC-30 R_k zunächst 80 Ω hatte, aber schon bald auf 47 Ω reduziert wurde. Die Hälfte von 130 Ω wären 65 Ω gewesen – man hatte sich also für etwas höhere Ausgangsleistung (und etwas kürzere Röhrenlebensdauer) entschieden.

Und man hatte sich entschieden, auf Gegenkopplung zu verzichten. Der typische Fender-Verstärker der späten 50er-Jahre koppelt einen Teil der Ausgangsspannung auf den Phasen-Inverter zurück, und reduziert damit die nichtlinearen Verzerrungen der Endstufe. Der AC-30 (ab 1958) verzichtet auf eine derartige Gegenkopplung, und deshalb vermutet so mancher, die AC-30-Verzerrungen seien "extrem hoch". Sind sie nicht, wie **Abb. 10.5.44** entnommen werden kann. Zwar sind 5% Klirrfaktor bei Nennleistung nicht gerade Studio-Standard, aber der AC-30 ist ja keine Monitorendstufe. Bei kleiner Aussteuerung erreicht auch er $k_3 = 0.3\%$, und mit zunehmendem Signalpegel wachsen die Verzerrungen allmählich an. Im Gegensatz zu stark gegengekoppelten Endstufen, deren Klirrfaktor an der Aussteuerungsgrenze sprunghaft ansteigt. VOX-Gitarristen bevorzugen anscheinend den allmählichen Verzerrungsanstieg.

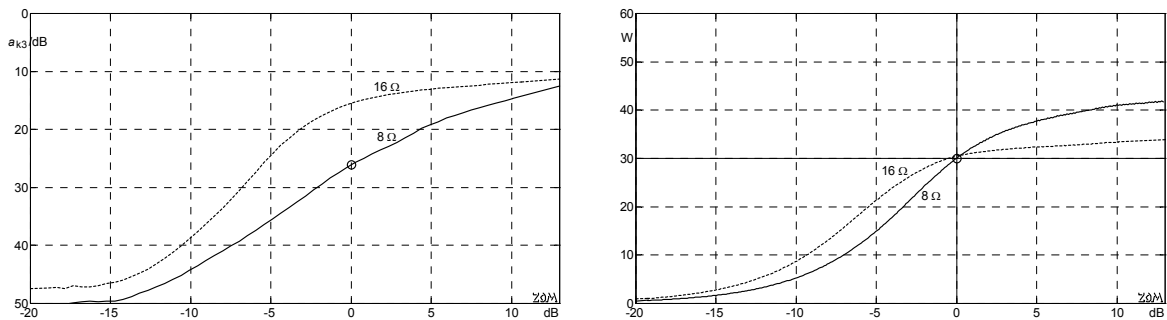


Abb. 10.5.44: AC-30, 8- Ω -Ausgang: Klirrdämpfung (links), Leistung (rechts); Abszisse für $P = 30$ W normiert.

Es wurde schon darauf hingewiesen, dass Röhrendstufen nicht durch *eine* Übertragungskennlinie beschreibbar sind, weil sich wegen Umladeeffekten die Arbeitspunkte verschieben. **Abb. 10.5.45** zeigt hierzu Messkurven, die mit unterschiedlicher Aussteuerung aufgenommen wurden. Mit zunehmender Steuerspannung flacht die Übertragungskennlinie ab, wobei sich im Ursprung ein Sattelpunkt auszubilden beginnt. Mit 16- Ω -Belastung (rechtes Bild) verlaufen die Kurven generell steiler (hochohmiger Innenwiderstand \approx Stromquelle). Das Abflachen der Kurven kann als eine Art Kompressor interpretiert werden, der mit zunehmender Aussteuerung die Verstärkung der Endstufe reduziert. Die Lastabhängigkeit der Ausgangsspannung bewirkt, dass die Lautsprecherresonanz und die hochfrequenten Signalanteile betont werden (vergl. Kap. 11). Eine stark gegengekoppelte Endstufe hätte demgegenüber eine aussteuerungsunabhängige Knick-Kennlinie, ähnlich der in Kap. 10.1.4 diskutierten. Auch die Maximalleistung verdient Beachtung: Wäre die Grenzspannung eingepreßt, würde sich mit 16 Ω Last gegenüber 8 Ω Last die halbe Grenzleistung ergeben ($P = U^2 / R$); der AC-30 erreicht hingegen über 80%.

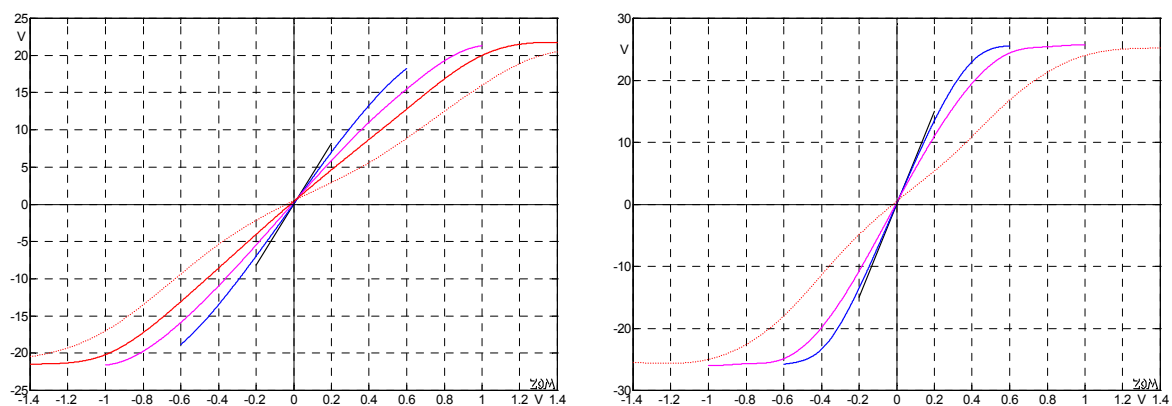


Abb. 10.5.45: Übertragungskennlinien einer AC-30-Endstufe. Links 8 Ω , rechts 16 Ω Last (am 8- Ω -Ausgang).

Diese spezielle Endstufencharakteristik dokumentieren auch Sweep-Messungen, bei denen der AC-30 mit einer Marshallbox (1960-AX) belastet war. Zwar ist dies nicht der typische AC-30-Lautsprecher, er hält aber mit 100 W Nennbelastbarkeit mehr aus als die fragilen und übersteuerten blauen Celestions. **Abb. 10.5.46** zeigt die am 16- Ω -Ausgang gemessenen Spannungspegel; einmal bei kleiner Aussteuerung (untere Kurven), darüber bei Übersteuerung.

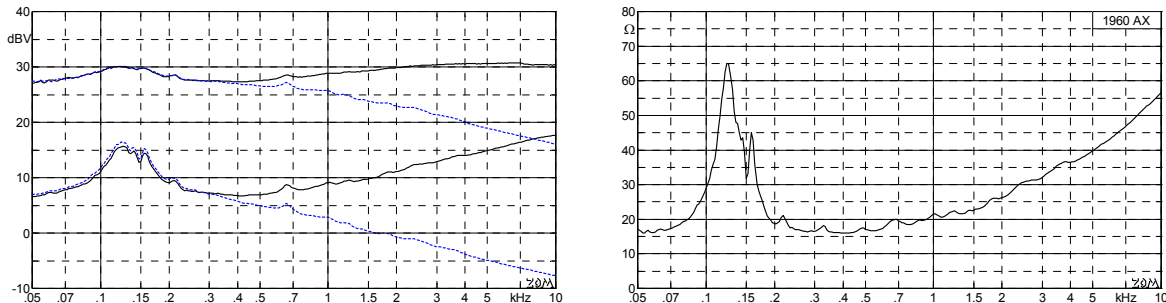


Abb. 10.5.46: Übertragungsfrequenzgang einer AC-30-Endstufe, 16- Ω -Ausgang mit 1960-AX belastet, Cut CCW (---), Cut CW (—). Rechts: Lautsprecher-Impedanz (im reflektierenden Raum). Vergl. Kap. 11.8.

Dass die im VOX verbauten Endröhren nicht nur bei Übersteuerung leiden, sondern auch bei völlig fehlendem Steuersignal, wurde schon mehrfach erwähnt. In **Abb. 10.5.47** sind über der um 30 dB ansteigenden Aussteuerung Anoden- und Schirmgitterverlustleistung aufgetragen. Ohne Aussteuerung beträgt die Anodenverlustleistung je EL-84 ca. 14 W. Mit zunehmender Aussteuerung verringert sich die Anodenbelastung, nach dem Abschalten des Signals entsteht aber eine kurze Belastungsspitze. Die **Schirmgitterbelastung** liegt in Ruhe knapp unter dem zulässigen Grenzwert; mit Aussteuerung wird der Grenzwert (2 W) sehr leicht überschritten, insbesondere bei hochohmiger Last (typische Lautsprecherimpedanzen siehe Kap. 11).

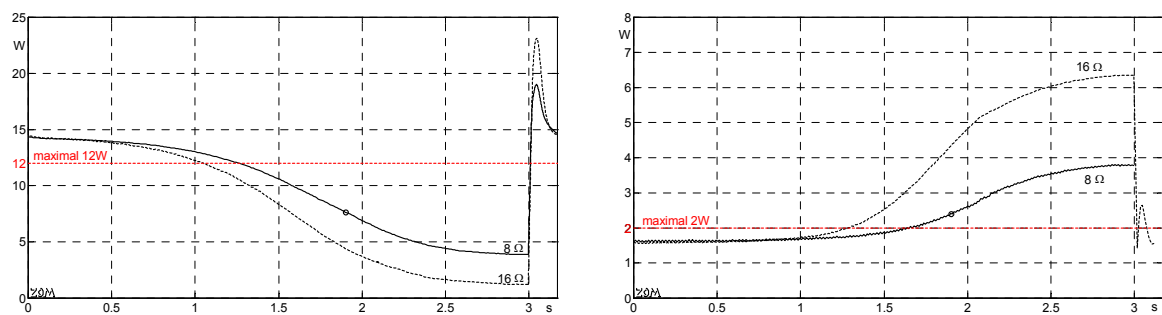


Abb. 10.5.47: AC-30: Anodenverlustleistung (links), Schirmgitterverlustleistung (rechts). Von 0...3 s steigt der Pegel des ansteuernden Sinustones linear um 30 dB an, bei $t = 1.9$ s wird an 8 Ω Last Nennleistung erreicht. Bei $t = 3$ s wird das Steuersignal abgeschaltet, danach folgen Ausgleichsvorgänge in den Endstufen-Kapazitäten.

Die Messungen zu **Abb. 10.5.47** erfolgten an einem AC-30, dessen Netzteil mit Röhrgleichrichter (GZ-34) arbeitet. Ersetzt man die GZ-34 durch Siliziumdioden, erhöht sich die Ruhe-Anodenbelastung auf ca. 17 W, die Spitze nach dem Abschalten erreicht 30 W. Die maximale Schirmgitterbelastung überschreitet dabei an einer 8- Ω -Last 6 W, an einer 16- Ω -Last 10 W! Da reale Lautsprecherimpedanzen (auch beim sog. 16- Ω -Lautsprecher) größer als 16 Ω werden können (Kap. 11.2), ist mit noch stärkerer Überlastung zu rechnen.

Das **Netzteil** verdient noch aus einem anderen Grund Beachtung: Die Betriebsspannung für die Endpentoden wird direkt an der Kathode der Gleichrichterröhre entnommen – mit entsprechend starker Welligkeit. Bei geringer Aussteuerung ist dies kein Problem, bei starker Aussteuerung schon, weil nun deutliche Amplitudenmodulationen entstehen.

In **Abb. 10.5.48** ist die Zeitfunktion der Ausgangsspannung dargestellt, der 8- Ω -Ausgang wurde hierzu reell mit 8 Ω belastet. Solange die Anodenspannungen nicht begrenzt werden, stellen Schwankungen der Betriebsspannung eine (überlagerte) Gleichtaktstörung dar, die der Ausgangsübertrager weitgehend unterdrückt – die Übertrager-Ausgangsspannung ist unmoduliert (linkes Bild). Bei Übersteuerung tritt hingegen eine unsymmetrische Begrenzung auf: Der maximale Anodenstrom hängt von der Betriebsspannung ab, der minimale Anodenstrom nicht (denn der ist praktisch null). Als Konsequenz entsteht eine von der doppelten Netzfrequenz abhängige Hüllkurve, die in erster Näherung als 100-Hz-Amplitudenmodulation aufgefasst werden kann. Dem NF-Signal wird kein 100-Hz-Ton überlagert, sondern seine Amplitude wird verändert (moduliert). Die zeitliche **Hüllkurve**, die nicht wirklich existiert, sondern eine gedachte Hilfslinie ist, ist im rechten Bild gestrichelt eingezeichnet.

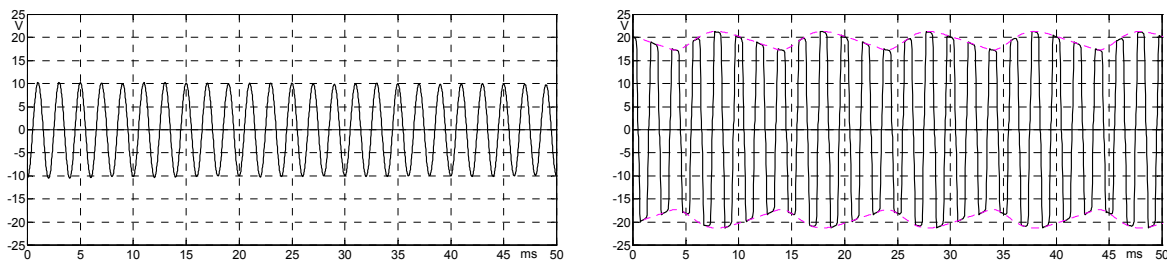


Abb. 10.5.48: Spannung am 8- Ω -Ausgang bei 8 Ω Last. Halb ausgesteuert (links), bzw. übersteuert (rechts).

Spektral gesehen macht sich diese 100-Hz-Modulation nicht als Linie bei 100 Hz bemerkbar, vielmehr entstehen Modulationslinien *neben* den Signallinien. Modellmäßig lässt sich die AM als zeitliche Multiplikation $\text{Signal} \cdot \text{Hüllkurve}$ darstellen, entsprechend einer Faltung im Frequenzbereich. Da die Hüllkurve nicht exakt sinusförmig ist (Kap. 11.7), entsteht nicht nur ein Nebenlinienpaar (± 100 Hz), sondern mehrere. In **Abb. 10.5.49** sind die zu Abb. 10.5.48 gehörenden Pegelspektren dargestellt: Im linken Bild haben die Modulationslinien (Seitenlinien) 45 dB Abstand zum Träger, der (kubische) Klirrfaktor (1.5 kHz) beträgt 1%. Bei der für das rechte Bild gewählten Übersteuerung beträgt der kubische Klirrfaktor 20%, der Modulationslinienabstand (± 100 Hz) hat auf 27 dB abgenommen.

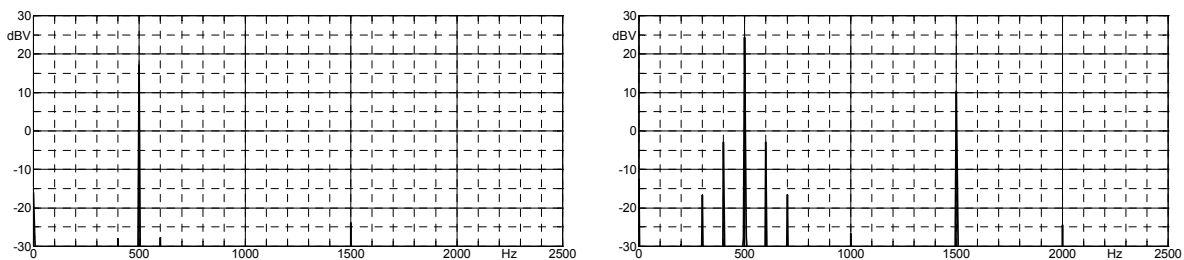


Abb. 10.5.49: Pegelspektren zu Abb. 10.5.48.

Nicht jede messbare Amplitudenmodulation muss auch hörbar sein – bei der im rechten Bild dargestellten AM ist aber davon auszugehen, dass sie als zusätzliche Rauigkeit wahrnehmbar wird. Mit dem Begriff "**Rauhigkeit**" kennzeichnet die Psychoakustik [12] die bei schnellen Signalschwankungen entstehenden Höreindrücke, die als eine Art Schnarren bezeichnet werden können. Klirrfaktormessungen erfassen in aller Regel nicht Modulationsverzerrungen, deshalb sind hierfür eigene Messungen erforderlich.

Marshall JTM-45

James Marshall eröffnete 1960 in London seinen Drum Shop (bzw. Store), und begann bald, neben Schlagzeugen auch Verstärker zu verkaufen. Zunächst teure Fender, ab 1962 dann die ersten Marshall-Amps, die sein Techniker Ken Bran nach Fender-Vorbild zusammenbaute. James Marshall Hendrix, ein junger Gitarrist, kaufte dort ein, und beide hatten den Grundstein zu ihrer Karriere gelegt: Der eine nannte sich fortan Jim Marshall, der andere Jimi Hendrix.

Marshall's (bzw. Brans) erster Verstärker war der JTM-45, in dessen Endstufe (von wenigen Ausnahmen abgesehen) zwei KT-66 im Gegentakt-AB-Betrieb arbeiten. Für diese Betriebsart nennt das GEC-Datenblatt eine Ausgangsleistung von 30 W. Die 45 nach dem JTM- ist also keine Angabe zur Sinus-Leistung – sie verspricht nur einen scheinbaren 50%-Vorsprung gegenüber dem AC-30. Die JTM-45-Endstufe ist für einen Röhrenverstärker relativ stark gegengekoppelt, was mehrere Konsequenzen hat: Die nichtlinearen Verzerrungen werden verringert, Lautsprecherresonanzen wirken sich schwächer aus, und insbesondere bei zugeordnetem Presence-Poti kann der Verstärker hochfrequent schwingen. Eine Rückkopplung wirkt als **Gegenkopplung**, wenn sich das rückgeführte Signal gegenphasig zum Steuersignal addiert. Im hohen Frequenzbereich treten jedoch (z.B. im Ausgangsübertrager) Phasendrehungen auf, sodass aus der Gegenkopplung eine **Mitkopplung** werden kann – der Verstärker schwingt. Diese Schwingungen entstehen u.U. nur in einem bestimmten Aussteuerungsbereich, weil nur hier die spezifische Verstärkung und Phasendrehung (beide sind aussteuerungsabhängig) dafür sorgt, dass die Schleifenverstärkung größer als 1 werden kann. Auch wenn derartige HF-Schwingungen a priori in einem unhörbaren Frequenzbereich liegen – sie müssen vermieden werden. Zum einen, weil hiermit ein unerlaubter Hochfrequenzsender betrieben würde, zum andern, weil sie die Endstufe zusätzlich und unnötig belasten.

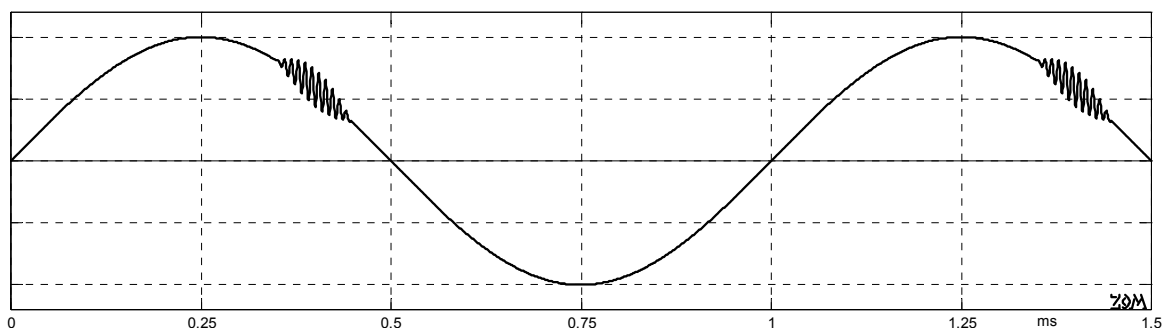


Abb. 10.5.50: 1-kHz-Ton mit überlagelter HF-Schwingung.

In **Abb. 10.5.50** ist der prinzipielle Verlauf eines "hochfrequenzverseuchten" NF-Signals dargestellt. Die HF (gerne um 150 kHz) ist nicht immer als saubere Schwingung zu erkennen, oft entsteht nur eine Verbreiterung oder Verschmierung der NF-Kurve. Als "Brute-Force-Bugfix" findet man kleine Kondensatoren, die "an geeigneter Stelle" eingelötet worden waren, um dem Übel abzuwehren. Viel besser wäre allerdings eine lehrbuchmäßige RC-Kompensation, die bei hohen Frequenzen die Schleifenverstärkung reduziert, ohne wesentliche Phasendrehungen hinzuzufügen (sog. Tiefpass mit Gegenhalt). Sicher kein triviales Thema, weil ja mit jedem Röhrenwechsel die Schwingbedingung neu ausgehandelt wird. Und lautsprecherabhängig ist sie ja auch noch. Wer dieses Thema nicht ganz so "sophisticated" angehen möchte, findet beim Presence-Poti aber einen sehr kooperativen Partner: Nach rechts (CW) drehen, und die störende HF ist weg. Es überrascht vielleicht, dass bei größerer Höhenverstärkung die HF-Schwingung absterbt, aber hierbei wird die Schleifenverstärkung reduziert, und diese bestimmt die Tendenz zu Eigenschwingungen.

Die JTM-45-Endstufe arbeitet im AB-Betrieb, und somit ergibt sich (neben der Röhrenwahl) ein weiterer Freiheitsgrad: Der Ruhestrom, bzw. die Gitter-Vorspannung. Es würde zu weit führen, alle wesentlichen Übertragungskurven für alle passenden Röhren bei mehreren Bias-Einstellungen abzubilden, deshalb nur einige wenige Beispiele: In Abb. 10.5.51 sind Klirrdämpfungsmessungen (a_{k3}) dargestellt, einmal ohne Endstufengegenkopplung, einmal mit der Originalgegenkopplung. Ken Bran macht bei seinen Kommentaren zur Marshall-Schaltung kein Hehl daraus, dass der 5F6A-Bassman das große Vorbild war, und so verwundert es nicht, dass bei beiden Verstärkern ein 27-k Ω -Widerstand auf ein 5-k Ω -Presence-Poti zurückkoppelt. Beim Bassman wird allerdings von der 2- Ω -Wicklung abgegriffen, beim JTM-45 von der 16- Ω -Wicklung, und deshalb ist die Marshall-Gegenkopplung ca. dreimal so effizient (Widerstände werden mit dem *Quadrat* des Windungsverhältnisses transformiert). Ob das ein Versehen war, oder Unwissenheit, oder Absicht – wer will das nach fast 50 Jahren noch so genau sagen können? Bei den Nachfolgemodellen wird die Endstufengegenkopplung jedenfalls wieder reduziert, warum auch immer.

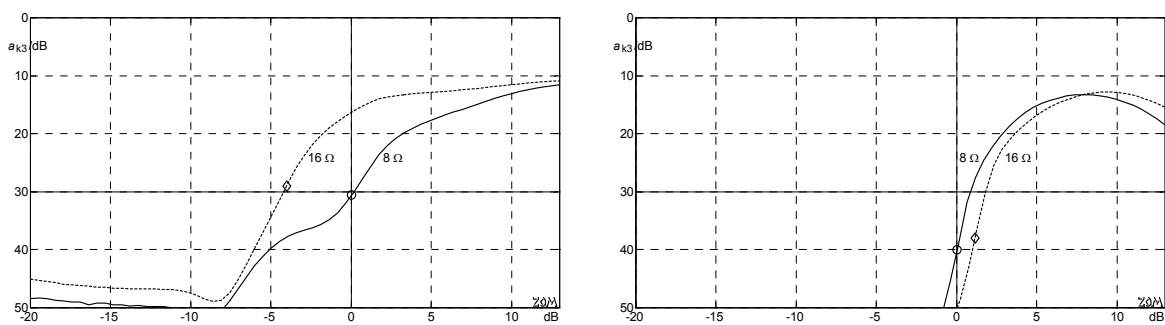


Abb. 10.5.51: JTM-45, Endstufen-Klirrdämpfung ohne (links) bzw. mit Endstufen-Gegenkopplung (rechts). Zu den Messungen wurde der 8- Ω -Ausgang mit einem reellen Widerstand (8 Ω bzw. 16 Ω) belastet, $f = 500$ Hz.

In Abb. 10.5.51 ist die Abszisse so normiert, dass bei 0 dB und Nennbelastung das Signal gerade begrenzt wird. Klirrdämpfungen über 40 dB (entsprechend $k < 1\%$) sind für den Höreindruck sicher irrelevant, bei einem Gitarrenverstärker darf man die Hörbarkeitsgrenze vermutlich sogar bis auf 30 dB (ca. 3 % Klirrfaktor) verschieben. Einen verbindlichen Grenzwert gibt es allerdings nicht, weil zu viele Parameter über die Hörbarkeit von nichtlinearen Verzerrungen entscheiden. Aufgrund ihrer starken Gegenkopplung verzerrt die JTM-45-Endstufe auf den ersten Blick ähnlich wie eine Transistorendstufe: Praktisch verzerrungsfrei bei nichtbegrenztem Signal, lehrbuchmäßiger Klirrfaktoranstieg bei Überschreiten der Aussteuerungsgrenze. Diesen Satz müsste man eigentlich in Granit meißeln: "Marshall's Röhrendstufe verzerrt wie eine Transistorendstufe." Wo doch alle Verstärker-Gurus die speziell gezüchtete Marshall-Verzerrung in den höchsten Tönen loben! Aber wo ist Besonderes, wenn man einen amerikanischen Verstärker nachbaut, dessen Schaltung aus Röhrenhandbüchern stammt? Die JTM-45-Endstufe enthält einen lehrbuchmäßigen Differenzverstärker als Phaseninverter, zwei lehrbuchmäßig angesteuerte Strahlentoden im AB-Betrieb, und einen Ausgangsübertrager, der für eine Klientel angeboten wurde, die man in Deutschland als Radiobastler* bezeichnete. Dass diesem "Radiospares-Deluxe-Transformer" von seiner Fangemeinde geheime Kräfte zugewiesen werden, darf nicht verwundern, ist er doch in guter Gesellschaft mit Ken Brans speziellem Lötzinn, dessen Atome sich von selbst immer nach Hanwell ausrichten. Aber aufgepasst, Buddies, nach dem Herumtragen des Verstärkers erst 4 Minuten warten, denn wie lernt man im Chemie-Unterricht: Zinn und Blei haben 4 Valenzelektronen, das sind die sog. inerten (trägen) Schwermetalle, da dauert das Ausrichten der Atome etwas.

* Aus jenen Tagen stammt z.B. Richters Lehrbuch "Radiobasteln für Jungen", Starthilfe vieler Tubefreaks.

Mächtig erschrocken? Gemach, es gibt schon Unterschiede zum Transistoramp, aus der Ähnlichkeit zweier Verzerrungskurven darf nicht auf generelle Äquivalenz geschlossen werden. In **Abb. 10.5.52** ist die **Ausgangsleistung** für zwei verschiedene Belastungen dargestellt, und da beginnen Unterschiede sichtbar zu werden: Eine Transistorendstufe ist eine ziemlich perfekte Spannungsquelle, unabhängig von der Lastimpedanz (die natürlich nicht unzulässig klein werden darf). Wegen $P = U^2 / R$ halbiert sich deshalb die Ausgangsleistung, wenn der Lastwiderstand von 8Ω auf 16Ω verdoppelt wird. Bei der Röhrendstufe ist das anders: *Ohne Gegenkopplung* ist die Spannungsverstärkung im linearen Bereich näherungsweise proportional zur Last, an 16Ω also ungefähr doppelt so groß wie an 8Ω , sodass an 16Ω gegenüber 8Ω die doppelte Leistung abgegeben wird. *Mit perfekter Spannungs-Gegenkopplung* wäre die Ausgangsspannung lastunabhängig, und somit wird im linearen Bereich an 16Ω gegenüber 8Ω die halbe Leistung abgegeben (wie im rechten Bild blau eingezeichnet). Eine perfekte Spannungsquelle ist die *JTM-45-Endstufe* allerdings nicht, und deshalb ist die $16\text{-}\Omega$ -Leistung etwas mehr als die Hälfte der $8\text{-}\Omega$ -Leistung. **Abb. 10.5.54** kann entnommen werden, dass bei der Lautsprecherresonanz und bei hohen Frequenzen die Lastimpedanz größer als die Nennimpedanz wird, deshalb betont ein nicht gegengekoppelter Röhrenverstärker diese Frequenzbereiche. Bei der ziemlich stark gegengekoppelten JTM-45-Endstufe fällt diese Betonung wesentlich dezenter aus, ist aber gleichwohl noch bemerkbar.

Bei Übersteuerung ändern sich die Zustände grundlegend: Durch die starke Belastung bricht die Betriebsspannung des Verstärkers etwas zusammen, die Leistung steigt auch bei der Transistorendstufe nicht auf den theoretischen Maximalwert, der dem Doppelten der maximalen Sinusleistung entsprechen würde. Hinzu kommen Effekte, die ihre Ursache in der Polarisation der Koppelkondensatoren haben (Gitterstromfluss). Sie führen zu einer deutlichen Änderung des Tastverhältnisses, als deren Folge bei starker Übersteuerung die Ausgangsleistung sogar wieder abnimmt – insbesondere bei der gegengekoppelten Röhren-Endstufe. Dass hierbei der quadratische Klirrfaktor (k_2) gegenüber dem kubischen (k_3) zu dominieren beginnt, ist ebenfalls typisch für diese Art Endstufenschaltung – aber keinesfalls Marshall-exklusiv. In der gesamten JTM-45-Endstufe ist keine Zutat erkennbar, die auf spezielles Distortion-Design schließen lassen würde, und auch die Messdaten offenbaren nirgends Unübliches. Dass gerade der JTM-45 Kultstatus errungen hat, dürfte – neben der Tatsache, dass er gut klingt – vor allem Eric Clapton zu verdanken sein, der auf dem Cover von John Mayalls Bluesbreakers-LP mit eben diesem Verstärker abgebildet ist. In Doyles Marshall-Buch ist zu lesen, dass die Unterschiede zum 5F6A-Bassman im Wesentlichen auf den andersartigen Lautsprechern, der andersartigen Eingangsröhre (12AX7 ./ 12AY7), und der höheren Endstufen-Gegenkopplung des JTM-45 beruhen. Der RS-Ausgangsübertrager ist nicht Ursache eines speziellen Sounds, wie Doyle Marshall's Design-Director zitiert. Und dass ein Stahl-Chassis den Verstärker im Gegensatz zu einem Alu-Chassis anders klingen lässt, glaubt ja hoffentlich niemand mehr.

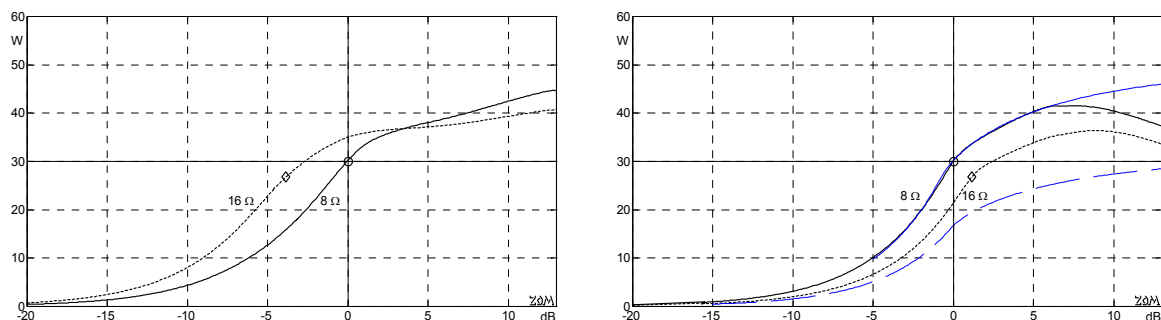


Abb. 10.5.52: JTM-45, Ausgangsleistung am $8\text{-}\Omega$ -Ausgang, $f = 500 \text{ Hz}$, ohne (links) bzw. mit Gegenkopplung. Der Beginn der Signalbegrenzung ist markiert. Die blauen Kurven wurden an einer Transistorendstufe gemessen.

Wäre die im JTM-45 anzutreffende relativ starke Endstufen-Gegenkopplung der Stein der Weisen, man hätte sie ja wohl bei Nachfolgemodellen beibehalten. Aber eben das passiert nicht, der Abgriffpunkt für die Gegenkopplung wandert von der 16- Ω - zur 8- Ω -Wicklung, und später sogar noch zur 4- Ω -Wicklung, gleichzeitig vergrößert Marshall den Rückführungs-Widerstand von 27 k Ω auf 47 k Ω , und sogar noch weiter bis auf 100 k Ω . Beide Maßnahmen reduzieren die Gegenkopplung (auch wenn die EL-34 wegen ihrer größeren Steilheit etwas mehr verstärkt). Wie auch immer, der JTM-45 war ein guter Verstärker, der aber keine unentdeckten Geheimnisse birgt. Dass nicht alle Nachbauten exakt so klingen wie das Original, das der G&B-Kolumnist vor 28 Jahren einmal gehört hat, kann mehrere Ursachen haben: Zum einen gibt es Marshall-Reissues mit abweichenden Schaltplänen, dann ist bei Röhren und Lautsprechern natürlich mit Toleranzen zu rechnen, und schließlich: Es wäre zumindest vorstellbar, dass sich Erinnerungen im Lauf von 28 Jahren verklären. Oder auch nicht, was soll's.

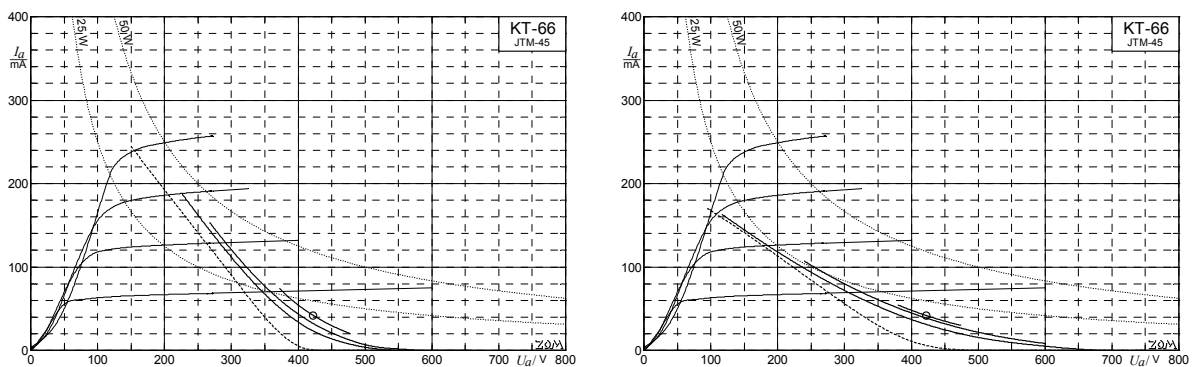


Abb. 10.5.53: JTM-45, Ausgangskennlinien, 8- Ω -Ausgang; Last = 8 Ω (links), bzw. 16 Ω (rechts). TAD-KT-66.

In Abb. 10.5.53 ist der prinzipielle Verlauf der Ausgangskennlinien dargestellt, wobei aber zu berücksichtigen ist, dass die Betriebsspannung eine sehr starke Welligkeit aufweist – diese Kurven wandern mit 100 Hz hin und her (Kap. 10.7). Die in den Bildern erkennbare Horizontalverschiebung* hat ihre Ursache nicht in dieser Welligkeit, sondern in der Polarisation der Koppelkondensatoren – sie verschieben den Arbeitspunkt, selbst wenn er so "heiß" liegt wie in diesem Beispiel. Mit 16 Ω Last macht sich die untypisch hohe Anoden-Restspannung der TAD-KT-66 bemerkbar, deshalb ist hier die Ausgangsleistung kleiner als mit MOV-Daten zu erwarten wäre. In Abb. 10.5.54 ist der Endstufen-Frequenzgang unter Lautsprecherbelastung dargestellt. Bei zugeordnetem Presence-Poti ergibt sich (wg. Gegenkopplung) ein nahezu frequenzunabhängiger Verlauf, trotz der frequenzabhängigen Belastung. Übersteuert man die Endstufe (Kurven um 30 dBV), verliert das Presence-Poti seine Wirkung, während die Lautsprecherimpedanz an Bedeutung gewinnt und den Frequenzgang etwas stärker formt.

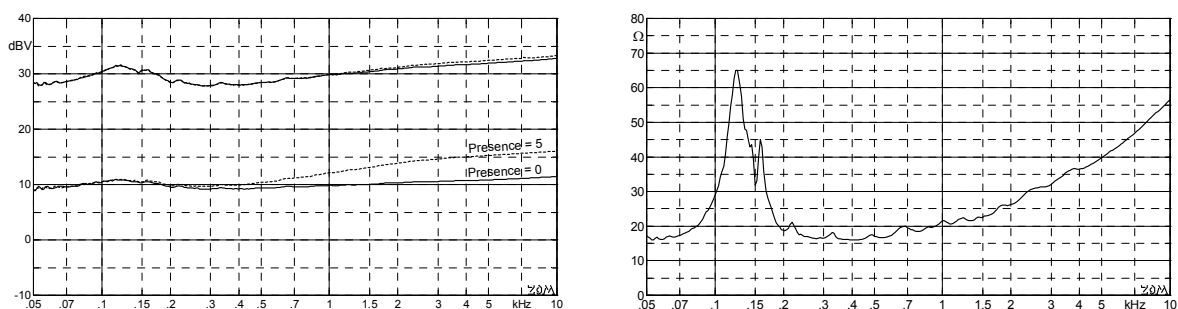


Abb. 10.5.54: Übertragungsfrequenzgang einer JTM-45-Endstufe, 16- Ω -Ausgang mit 1960-AX belastet (links). Rechts: Betrag der Lautsprecher-Impedanz (1960-AX im reflektierenden Raum).

* Bei den beiden Endröhrenströmen ist die Verschiebung bzw. Polarisation unterschiedlich, Kap. 10.4.

Die Endröhrenbelastung zeigt **Abb. 10.5.55** für reelle Belastung am 8- Ω -Ausgang. Mit zunehmender Aussteuerung sinkt die Anodenbelastung zunächst für beide Endröhren, steigt bei einer Röhre für starke Übersteuerung aber wieder an. Nach dem Abschalten des Signals entsteht eine hohe Belastungsspitze, deren Ursache der Ladungsausgleich in den Koppelkondensatoren ist. Da diese Überlastung nur kurzzeitig auftritt, stellt sie keine besondere Gefahr für die Röhren dar. Anders beim Schirmgitter: Sobald die Endstufe übersteuert wird, übersteigt die Schirmgitter-Verlustleistung den erlaubten Grenzwert – bei dauernder Übersteuerung wird die Röhre dauerhaft überlastet, und die Röhren-Lebensdauer verkürzt.

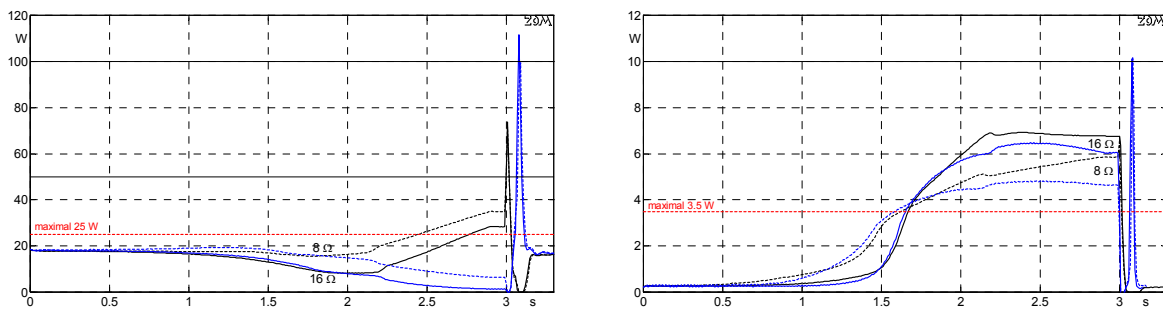


Abb. 10.5.55: JTM-45: Anodenverlustleistung (links), Schirmgitterverlustleistung (rechts). Von 0...3 s steigt der Pegel des ansteuernden Sinustones linear um 30 dB an, bei $t = 1.5$ s wird an 8 Ω Nennleistung (30W) erreicht. Bei $t = 3$ s wird das Steuersignal abgeschaltet, danach folgen Ausgleichsvorgänge in den Endstufen-Kapazitäten. Die Verlustleistungen der einen Endröhre (TAD-KT-66) sind schwarz gezeichnet, die der anderen blau.

Die Übertragungskennlinie vom Differenzverstärker-Eingang zum Leistungsausgang ist in **Abb. 10.5.56** dargestellt. Sobald die Endstufe übersteuert wird, verliert die Kurve ihre Punktsymmetrie, und das Tastverhältnis ändert sich. Ursachen hierfür sind Potentialverschiebungen im Differenzverstärker (Phaseninverter) und Gitterstromfluss in den Endröhren. Bis knapp unter die Aussteuerungsgrenze ist das Ausgangssignal proportional zum Eingangssignal, wie im linken Bild gestrichelt dargestellt. Bei Übersteuerung wird die Ausgangsspannung begrenzt, aber zunehmend unsymmetrisch, wodurch sich die Kennlinie verschiebt (der Mittelwert muss null bleiben). Da das begrenzte Signal nicht mehr mono-, sondern polyfrequent ist, beginnen sich Phasendrehungen des als Hochpass wirkenden Ausgangsübertragers auszuwirken, die Übertragungskennlinie ist nicht mehr gedächtnisfrei, sondern zerfällt in einen auf- und einen absteigenden Ast. Im linken Bild der Abb. 10.5.56 sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht diese Hystereseschleifen gezeichnet, sondern Mittelwerte. Würde man anstelle eines realen Lastwiderstandes einen Lautsprecher anschließen, ergäben sich wegen dessen komplexer Impedanz noch kompliziertere Verläufe.

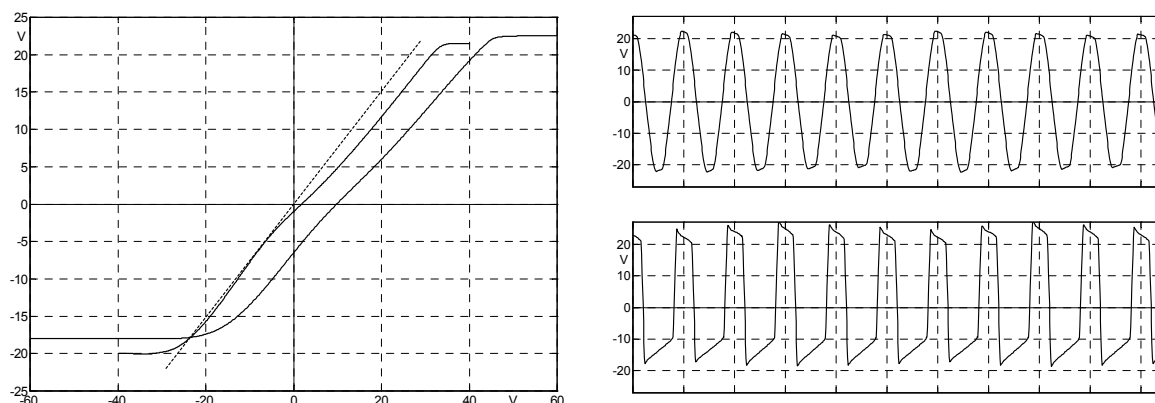


Abb. 10.5.56: Idealierte Übertragungskennlinie (links), Ausgangs-Zeitfunktionen an reeller Nenn-Last (rechts).

Was ist nun das Besondere der JTM-45-Endstufe, was macht den legendären Sound? Der, wie in G&B 07/06 ausnahmsweise nicht onomatopoetisch, sondern tribopoetisch[⊕] beschrieben, ein *"fetter und cremiger Crunch-Ton"* ist, und *"niemals ein Marshall-typischer Zerr-Sound"*. Nanü, kein Marshall-Sound aus dem Marshall? Wo man doch beim JTM-45 *"sämtliche Zutaten sieht, die auch für den später zur Legende gewordenen Plexi-Sound* verantwortlich waren"*. Vermutlich sieht man sie nur, aber hört sie nicht. Eineinhalb Jahre vorher war der JTM-45 *"noch aggressiver und heißer"* (G&B 02/05), ein halbes Jahr vorher *"klar und fett, mit weichem Mittenspektrum"* (G&B 02/06).

Klar kann Fett auch heiß sein, warum nicht. Wie dieser heiß-fette Sound entstand, ist Gegenstand unzähliger Spekulationen. Das beginnt bei **Claptons Les Paul**, die in der einschlägigen Literatur wahlweise als '58er, '59er oder '60er-Les-Paul bezeichnet wird. Könnte das nicht egal sein? Nein – das macht einen Riesen-Unterschied, haben sich doch in diesen Jahren die Bündel geändert (breiter), und der Halswinkel (größer), und der Halsquerschnitt (schmäler), und all das war natürlich "tone-affecting". Und so müsste E.C. auf die Frage, welches Modell er denn damals [im Juni 1965, G&B 9/08] gekauft hat, spontan antworten: Natürlich die '58er, wegen des dicken Halses, der – wie wir doch alle wissen – Klangfülle und Sustain verbessert [G&B Gibson-Special]. Sagt er so aber nicht, er meint nur: *"Keine Ahnung"*. Keine Ahnung? Mensch Eric, das müsstest Du (unter Musikern ist man per Du) doch wissen: Allein der vergrößerte Halswinkel der '60er Paula (so heißt dieser Gitarrentyp in Fachkreisen) hätte doch das Sustain kaputt gemacht, und der dünne Hals einer '60er *"hat keinerlei akzeptables Schwingungsverhalten [G&B 3/97]"*. Und der Eric weiß das nicht mehr – seltsam. Eric sei Dank sind aber aus jener "Clapton-is-God-Zeit" Aufnahmen erhalten, Beano etc., da wird man doch leicht heraushören können, was Sache war. Neuester Erkenntnisstand: *"Man glaubt heute jedoch, dass es sich um ein 60er Modell handelte, denn sowohl Clapton als auch Peter Green beschrieben in verschiedenen Interviews den 'slinky' Hals dieser Gitarre [G&B 9/08]."* Ja, so schwer haben's die Gitarren-Experten: Einerseits müssen sie andauernd erklären, dass kleinste Details einer Paula (Lack, Bündel, Hals, Potis oder Tone-Caps) einen immensen Einfluss auf den Klang haben, andererseits findet sich weltweit kein einziger, der beim Anhören der Bluesbreaker-LP eindeutig aufgrund dieser Klangspezifika den Gitarrentyp erkennen kann, sodass als letzte Notlösung nur bleibt, aus Erinnerungen an das Halsprofil auf den Typ zu schließen. In dieser Scheinwelt ist man offensichtlich nicht nur per Du, sondern auch perdu.

Nun gut, über die Gitarre weiß man nichts Genaues, aber der Verstärker, der ist bekannt: Ein **JTM-45, 2x12-Combo Typ II**, vermutlich Alnico-Lautsprecher. Vermutlich? Jetzt geht das schon wieder los, was heißt da vermutlich? Alnicos bringen *"besonders süße und obertonreiche Höhen"*, das ist spätestens seit G&B 8/05 bekannt, und deshalb müsste man der Beano-LP doch anhören können, ob da Alnicos oder Keramikwerkeln. Aber wieder verschließt sich die LP jeglicher Analyse, und obwohl Keramik-Speaker *"ganz anders"* klingen als Alnicos, hört keiner der Platte an, was da für Lautsprecher aufgenommen wurden – magic, isn't it? Dummerweise begann Marshall gerade in jenen Tagen mit der Umstellung auf die Keramik-Celestions, sodass da sowohl, als auch in Frage kommt. Dann fragen wir doch mal den Herrn Clapton, der müsste doch ... nicht? Auch daran keine Erinnerungen?? Also mein lieber Eric, das mit dem Alk und den Drogen, das musste ja Ausmaße angenommen haben ... hat es?, ... ach so, dann sollte man da nicht weiter insistieren. Also ein Blick in die Fachliteratur: *"Because Clapton ran the amplifier at full volume, the Alnicos may have been damaged. He may have replaced them with the higher wattage, ceramic magnet Celestion Greenbacks."* Soweit Premier Guitar (Februar 2008). Clapton ersetzte seine Alnicos durch Ceramics? Seine

[⊕] Tribologie = Lehre von Reibung und Schmierstoffen

* Der Plexi klingt aber hoffentlich schon nach Marshall, oder etwa auch nicht??

Alnicos, die lt. Premier Guitar "sweet warm tones and a smooth midrange" produzieren? Und die lt. Gitarre & Bass "besonders süße und obertonreiche Höhen" erzeugen, und "harmonisch und bissig klingen". Ganz anders also als die darauffolgenden Keramik-Celestions, die zwar "plenty of midrange crunch" produzieren, aber "...sounded very different from the Alnico type speakers used in other Marshalls [David Szabados]." Natürlich weiß niemand, ob Eric wirklich hat: "He may have", und er selbst erinnert sich ja leider nicht mehr daran. Sollte nicht so schlimm sein, denn da gibt's doch die LP, auf der müsste man das doch hören, wg. "sounded very different." Schwierig, echt, denn einerseits klingen die Ceramics schon ganz anders, aber andererseits anscheinend auch wieder nicht, sonst tät man's ja heraushören. Fazit: Über die berühmten Lautsprecher weiß man auch nichts Genaues.

Doch eines weiß man: Der **Ausgangstrafo** war entweder von Radio-Spares, oder von Drake. Das weiß man sicher: Entweder / oder. Dass die beiden Trafos nicht äquivalent waren, das weiß man auch sicher: Die Drakes waren rauer und zerrfreudiger, mittiger, dunkler als die RS. Leider hört man nicht sicher heraus, welcher Trafo für Herrn Clapton Dienst hatte, deshalb bietet der Retrofitter sicherheitshalber Nachbauten für beide an. So um die 250.-- USD (für einen, nicht für alle beide), zzgl. Zoll und Transport, und schon ist man wieder einen Schritt näher mein Gott bei Dir. Dass diese Trafos so teuer sind, muss man verstehen: Handgefertigt! Erfreulicherweise werden die Kernbleche nicht auch noch mit der Laubsäge ausgeschnitten, sonst wär's doch langsam überteuert. Aber rund 300 USD, das geht schon in Ordnung, ist ja eine detailgenaue Kopie vom Clapton-Gear. Höchstwahrscheinlich – denn genau weiß man immer noch nicht, ob Drake oder RS, und Herr Pipper, der G&B-Experte, bietet noch eine Variante an: Herr Clapton könnte auch an seines Trafos 16-Ω-Ausgang ein 8-Ω-Lautsprecherpaar betrieben haben, was ja nun schon einen Faktor zwei, um nicht zu sagen ca. 100% Mismatching ausmacht. Oder 50 Prozent? Diese Dinge lassen sich theoretisch leider nicht so genau in den Griff kriegen, fassen wir einfach mal zusammen: Claptons JTM-45-Sound ist legendär, da sind sich alle einig. Wer diesen Sound kopieren möchte, beschaffe sich eine '58er oder '59er oder '60er-Les-Paul (die sich im Klang angeblich hörbar unterscheiden), bestücke seinen JTM-45 mit einem Drake- oder RS-Tranny (die sich im Klang angeblich hörbar unterscheiden), und installiere zwei Alnico- oder Keramik-Celestions (die sich im Klang angeblich hörbar unterscheiden), und hat dann den amtlichen Beano-Ton. Uff!

Hierher passt ein kurzer Exkurs in die Welt der **Werbepsychologie**: Was macht man als be-gnadeter Trafospulen-Bewickler, um seinen Umsatz anzukurbeln? Man schreibt "Wir sind die besten?" Nein – das sagen ja alle. Besser, man motiviert einen unabhängigen Fachjournalist zu einem redaktionellen Beitrag über sagen wir "Marshall-Restaurierung". Dann braucht man nur noch einen bekannten Musiker, der mit dem Sound seines Marshalls nicht zufrieden ist, und los geht's. Bestandsaufnahme: Langweiliger Sound, odd Harmonics (!), der schlimmste Marshall, seit man hören kann. Nach dieser Diagnose die Therapie: Komponenten auswechseln! Man nehme: Echte Kohlewiderstände, gelbe oder orange Kondensatoren (je nachdem, welcher Kondensator-Disti mehr Zuschuss zahlt), und natürlich: Einen neuen Netztrafo (von dem kommt schließlich die ganze Leistung), einen neuen Ausgangstrafo (da muss schließlich alles durch), und weil wir schon dabei sind, gleich noch eine neue "Choke", und schon geht die kalifornische Sonne auf: Der beste Marshall, den man je gehört hat. Zu guter Letzt lässt man den bekannten Musiker noch von der unglaublichen Soundverbesserung schwärmen, und dass er nur jedem empfehlen kann, auch diese Wahnsinnstrafos einbauen zu lassen. Und dann muss man nur noch hoffen, dass niemand die www.tone-lizard.com/lesson liest, in denen genüsslich erläutert wird, wie bei Reparaturen immer wieder der kaputte Marshall-Trafo gegen einen billigen Noname-Trafo ausgetauscht wurde, und keiner hat sich je beklagt (*not a single complaint*). Herrlich.

Wenn man einen 8- Ω -Lautsprecher nicht an den vorgesehenen 8- Ω -Ausgang einer Röhrendstufe anschließt, sondern an den 16- Ω -Ausgang, kann sich einiges ändern. Bei einer nicht-gegengekoppelten Endstufe verdoppelt sich hierbei der Innenwiderstand (= geringere Lautsprecherbedämpfung), und gleichzeitig erhöht sich die Endstufenverstärkung um 41%. Im linearen Modell! Bei nichtlinearem Betrieb ist's komplizierter. Mit Gegenkopplung (und die JTM-45-Endstufe ist stark gegengekoppelt) fällt der Gewinn an Verstärkung schon wesentlich moderater aus, und auch beim Innenwiderstand greift die Regelschleife ein. **Abb. 10.5.57** zeigt im linken Bild den Betrieb mit 8- Ω -Belastung am 8- Ω -Ausgang (—) bzw. am 16- Ω -Ausgang (---). Solange die Endstufe nicht übersteuert wird, erhöht sich lediglich die Verstärkung um ca. 1 dB, bei Übersteuerung (die oberen beiden Kurven) wird am 16- Ω -Ausgang an eine 8- Ω -Last weniger Leistung abgegeben (Fehlanpassung). Da der Lautsprecher aber bei Resonanz und bei höheren Frequenzen etwas hochohmiger wird, profitieren diese Bereiche (am 16- Ω -Ausgang), die Gitarre klingt brillanter und bekommt gleichzeitig etwas mehr Bassfundament. Im direkten Vergleich werden diese Unterschiede hörbar sein, ein Absoluturteil im Sinne von gut/schlecht lässt sich daraus aber nicht ableiten.

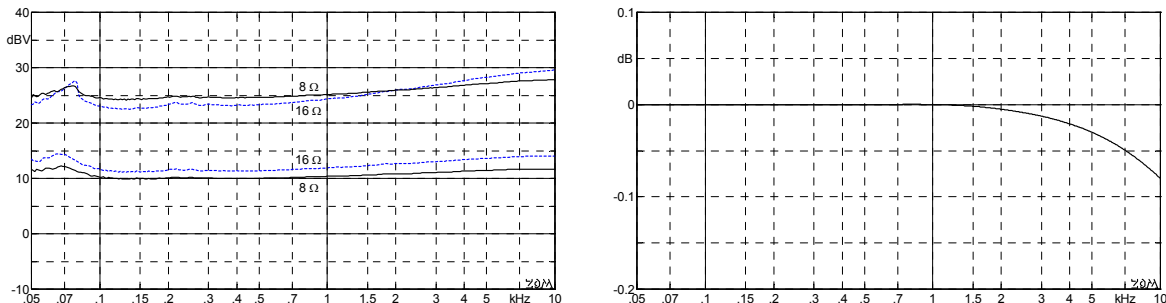


Abb. 10.5.57: Links: Betragsfrequenzgang bei Lautsprecherbelastung (8 Ω), am 8- Ω - bzw. 16- Ω -Ausgang. Rechts: Änderung der Übertragungsfunktion bei Parallelschaltung von je 500 pF zur Primärwicklung.

Der wichtigste Parameter beim Vergleich zweier Ausgangsübertrager ist das Übersetzungsverhältnis. Wenn zwei hochwertige Übertrager zu hörbaren Klangunterschieden führen, ist mit großer Wahrscheinlichkeit das **Übersetzungsverhältnis** unterschiedlich. Da sich Windungszahlen aber sehr leicht und sehr genau festlegen lassen, sind exorbitante Preise allein wegen eines speziellen Übersetzungsverhältnisses nicht gerechtfertigt. Das Übersetzungsverhältnis ändert sich um 41%, wenn vom 8- Ω - auf den 16- Ω -Ausgang umgeschaltet wird, aber dennoch vermag keiner der selbsternannten Experten sicher zu sagen, ob Claptons Amp wirklich mit 8 Ω Last am 16- Ω -Ausgang betrieben wurde – sie können's nicht raushören, und deshalb muss man selbst derartig große Unterschiede als klanglich irrelevant bezeichnen.

Der zweite Parameter, an den man beim Ausgangsübertrager denkt, ist die **Wicklungskapazität**. Die lässt sich nun nicht so leicht wie das eben erwähnte Übersetzungsverhältnis mit jedem Wunschwert realisieren, und auch nicht mit einfachen Formeln berechnen. In einem einfachen Versuch wurde deshalb parallel zu jeder der beiden Primärwicklungen des Ausgangsübertragers ein 500-pF-Kondensator geschaltet. Dem rechten Bild von Abb. 10.5.57 kann entnommen werden, dass sich die davon hervorgerufenen Effekte in Bereichen bewegen, die ebenfalls keine Bedeutung haben. Am anderen Ende des Übertragungsbereichs (d.h. in den Bässen) entstehen (wegen **Flussättigung**) kernblechtypische nichtlineare Verzerrungen (Kap. 10.6), worüber in der Musikerwelt aber so gut wie nie berichtet wird. Somit bleibt das einfache Fazit: Ausgangsübertrager sind beim Röhrenverstärker klangformend, sie sind aber keine geheimnisvollen Gebilde, für die Liebhaberpreise bezahlt werden müssten. Natürlich werden sie trotzdem bezahlt – wie bei Alufelgen, deren Mehrwert ja auch eher gefühlt als physikalisch begründet ist.

Fender, VOX, Marshall, die heilige Trinität, nötigt sicher nicht jedem Gitarrist Ehrfurcht ab, aber der immer wiederkehrende Refrain der Vintage-Kolumnen hat bei vielen die Meinung geprägt, der Urvox (oder Ur-Bassman, oder Ur-JTM) sei klanglich unerreicht und rechtfertige locker die 10000 oder 20000 \$, die für alte Originale heute gefordert werden. Und natürlich ist es verlockend, den Primus dieser Troika zu küren: *"Im Vergleich mit seinem Vorbild, dem 1959er Fender Bassman, spielt der JTM sein Alter Ego locker an die Wand (G&B, 7/06)." Ab aufs Treppchen, lang lebe die Legende.*

Wie muss man sich den Beginn der 60er-Jahre vorstellen, als diese Verstärker-Legende zum Leben erwachte? Vielleicht so: Da sitzt der 39-jährige Jim hinter seinen Trommeln, haut verzinkte Triolen zwischen die aufbrüllenden Gitarren-Arpeggios, und denkt sich *'das klingt aber noch nicht nach Hardrock, dem bau ich jetzt einen neuen Amp mit richtigem Brat-Sound'*. Und dann sagt er zum Ken *'mach mal'*, und heraus kommt der JTM-45 mit seinem unerreichten Distortion-Sound? Könnte es so gewesen sein, Jim als Hard-Rocker? Das passt so gar nicht zu dem im Marshallbuch abgebildeten Foto, das einen Herrn mit Anzug und Fliege zeigt, der seine Stöckchen vermutlich eher dezent über die Felle tanzen lässt. Laut Wikipedia beginnt die **Hardrock**-Era 1969, aber nicht 1962. Dass Ritchie Blackmore, Jimi Hendrix, Pete Townshend und viele andere mit Marshall-Amps berühmt wurden, ist bekannt, dass sie Wünsche nach noch mehr Verstärkerleistung äußerten, ist gut vorstellbar, aber war das wirklich vor 1962? Townshend spielte (lt. Wikipedia) noch 1959 in einer Dixieland-Band, danach in einer Skiffle-Band, und erst 1964 geht's mit den Who los. Deep Purple gründen sich 1968, Hendrix startet mit seiner Experience 1966, Clapton spielt 1963 bei den Yardbirds und ist noch meilenweit vom Beano-Ton entfernt. Und dass Brian Poole mit seinen Tremeloes kein früher Hardrock war, ist auch hinlänglich dokumentiert.

Keine Frage: Jim Marshall hat seinen Orden als Verstärker-Pionier redlich verdient. Summa cum laude, ohne Diskussion. Das heißt aber noch nicht, dass der JTM-45 als Distortion-Amp entwickelt und optimiert wurde, auch wenn das die Fangemeinde so kolportiert. Leute, lest genau, was Ken Bran im Marshallbuch sagt: *"It was a bass amp, we originally wanted ... but the guitar sound was too good to pass up."* Die Unterschiede, die bei den ersten Marshall-Verstärkern zwischen der Bass-, der Gitarren- und der PA-Variante bestanden, betreffen nur zwei kleine Überbrückungskondensatoren zur Höhenanhebung. Wäre diese Schaltung zur Erzeugung spezieller Verzerrungen entwickelt worden, sie hätte auch den über die PA verstärkten Gesang verzerrt – bis auf die unterschiedliche Höhenwiedergabe waren dieses Verstärker ja alle identisch. Dass der JTM-45 bei Übersteuerung gut klingt, finden und fanden viele Gitarristen, aber schon bei der Beschreibung des verzerrten Sounds beginnen die Unterschiede: Laut Wikipedia entstand mit dem Bluesbreaker-Combo (Typ 1962) ein Verstärker, *"welcher erstmals dem typischen Marshall-Klang zum Durchbruch verhalf."* Laut Udo Pipper (G&B 07/06) kommt aus eben diesem Combo jedoch *"niemals ein Marshall-typischer Zerr-Sound"*. Der Herr Pipper ist quasi der Nostradamus der Röhrenverstärker, allerdings nicht zukunfts-, sondern vergangenheitsorientiert (Vintage!), aber in punkto Interpretationsbedarf kongenial. Kostprobe: *"Und das Endergebnis (JTM-45) unterschied sich letztlich sehr stark von einem Fender Bassman"* (Pipper, G&B 7/06). **Aber:** *"Die ersten sogenannten JTM-Modelle waren somit recht authentische Kopien (des Fender Bassman)"* (Pipper, G&B 2/05). Wie bei Nostihalt: Auf die Jahreszahlen kommt es an. Als Münchner stört man sich daran natürlich nicht, ist man doch mit Karl Valentin vertraut: *"Fachmännisch wurde genau berechnet, dass der Starnberger See tief, seicht, lang, kurz, schmal und breit zu gleicher Zeit ist."*

Fender Super-Reverb

In einem typischen Fender der mittleren Leistungsklasse stecken zwei 6L6-GC, und so ist es auch beim Super-Reverb. Die Endröhrenkathoden liegen direkt auf Masse, im Netzteil erzeugt eine eigene Diode die negative Vorspannung – da können keine Zweifel aufkommen, das ist lehrbuchmäßiger AB-Betrieb. Vor den Endröhren der Differenzverstärker, nach ihnen der Ausgangsübertrager mit Abgriff für die Gegenkopplung, so sahen in den Sechzigerjahren die Fender-Endstufen aus. Und doch gibt es individuelle Besonderheiten: Mal ändert sich die Treiberröhre (12AT7 statt 7025), mal die Koppel-Kondensatoren, dann fallen kleine Abblock-Kondensatoren weg, dann kommen sie wieder, sogar ein Presence-Poti gab's beim 'Super' kurzzeitig. Der im Folgenden untersuchte Super-Reverb hat eine AB-763-Schaltung, die aus der 'Blackface-Era' stammt, also aus den goldenen 60ern.

In **Abb. 10.5.59** sind für reelle Belastung des 8- Ω -Ausgangs die Arbeitskennlinien in das Ausgangskennlinienfeld eingetragen. Für Nennbelastung (links) wird ziemlich genau das "Knie" der 0-V-Kurve getroffen, was auf optimale Übertragerdimensionierung hinweist. Mit zunehmender Aussteuerung verschieben sich die Kurven zu kleineren Spannungen.

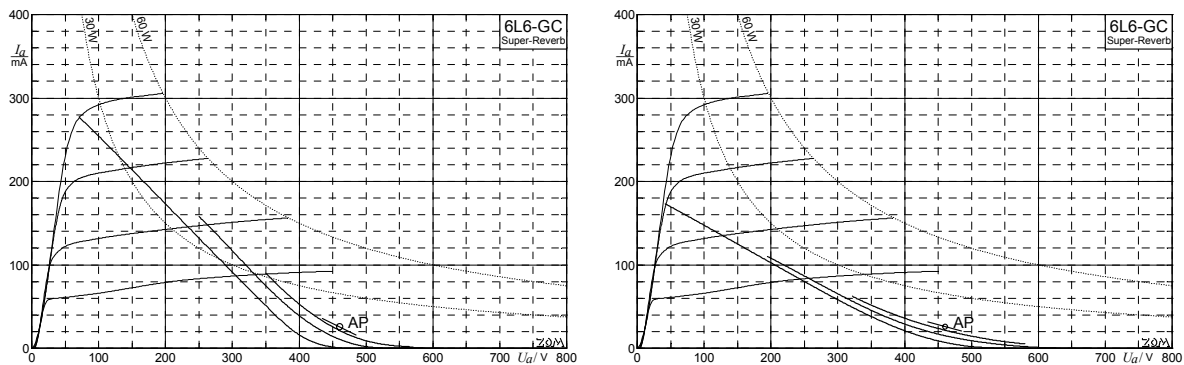


Abb. 10.5.59: Arbeitskennlinien für reelle 8- Ω -Belastung (links) bzw. für reelle 16- Ω -Belastung (rechts).

Die Endstufe ist nicht so stark gegengekoppelt wie die des JTM-45, deshalb bildet sich die Lautsprecherimpedanz im Übertragungsfrequenzgang stärker ab (**Abb. 10.5.60**). Bei allen diesen Diagrammen ist zu berücksichtigen, dass der genaue Verlauf von den jeweiligen Lautsprechern abhängt: Die Lautsprecherresonanz, die in diesem Beispiel bei ca. 75 Hz liegt, kann bei anderen Lautsprechern auf über 100 Hz ansteigen, was natürlich klangliche Unterschiede zur Folge hat (vergl. Kap. 11). Übersteuert man die Endstufe – wie im linken Bild in der oberen Kurve dargestellt – schwächt sich der Einfluss der Resonanz ab, die Charakteristik nähert sich der einer Spannungsquelle an.

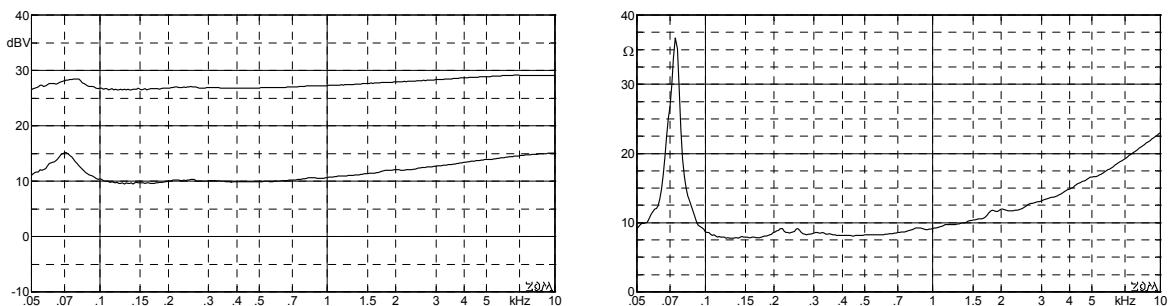


Abb. 10.5.60: Übertragungsfrequenzgang einer Super-Reverb-Endstufe, 8- Ω -Ausgang mit 4xP10R belastet (li.). Rechts: Betrag der Lautsprecher-Impedanz (4xP10R, Gehäuse in- reflektierender Umgebung).

Die Übertragungskennlinie der Endstufe ist für 8- Ω -Belastung in **Abb. 10.5.61** dargestellt. Mit zunehmender Aussteuerung zerfällt die Kurve in zwei Äste, die sich auseinanderschieben. Ursache ist, wie schon erläutert, die Polarisation der Koppelkondensatoren.

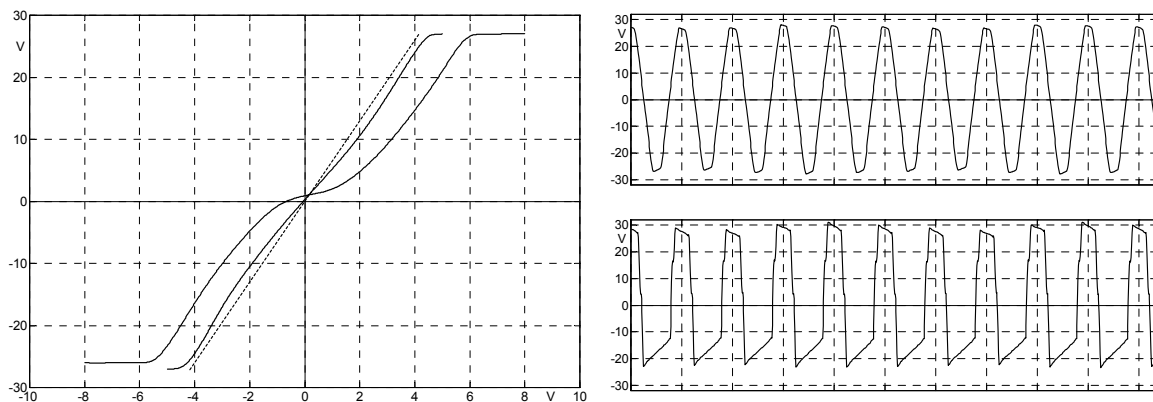


Abb. 10.5.61: Idealisierte Übertragungskennlinie (links), Ausgangs-Zeitfunktionen an reeller Nenn-Last (rechts).

Abb. 10.5.62 kann entnommen werden, dass die (im 1968er Fender-Prospekt) mit 40 W angegebene Endstufenleistung tatsächlich erreicht wird – ganz im Gegensatz zum JTM-45, dessen Nachbau (anno 2008) von TAD mit "ca. 45 Watt" beworben wird, aber nur 30 W leistet. Das Klirrfaktorminimum hat seine Ursache in der progressiv gekrümmten Übertragungskennlinie, die ihre Krümmungsrichtung bei beginnender Übersteuerung ändert. Die Endröhrenbelastung ist ähnlich wie beim JTM-45, das Schirmgitter wird bei Übersteuerung und hochohmiger Last überlastet (**Abb. 10.5.63**). Ein wesentlicher Unterschied ist beim Eingangskondensator zu finden: Beträgt er nur 1 nF (AB-763), wird die Anode weniger überlastet (vergl. Abb. 10.5.55). Es gibt allerdings auch Fender-Verstärker mit größerem Eingangskondensator (z.B. 10 nF).

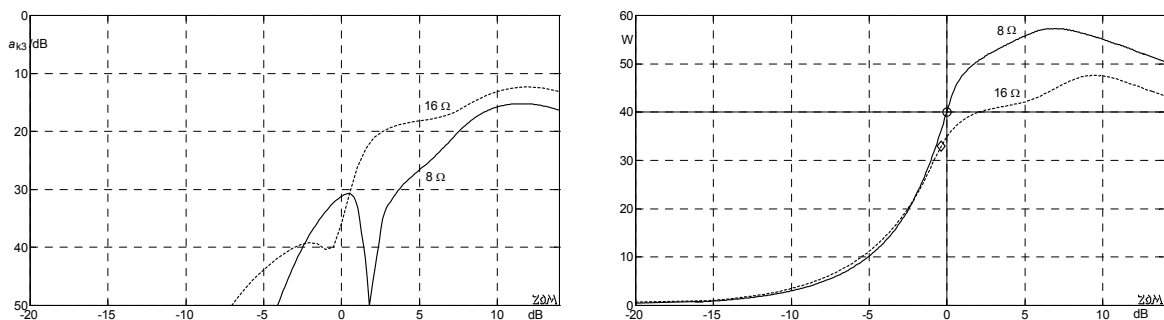


Abb. 10.5.62: Super-Reverb: Klirrdämpfung, Ausgangsleistung am 8- Ω -Ausgang; 8- Ω - bzw. 16- Ω -Belastung.

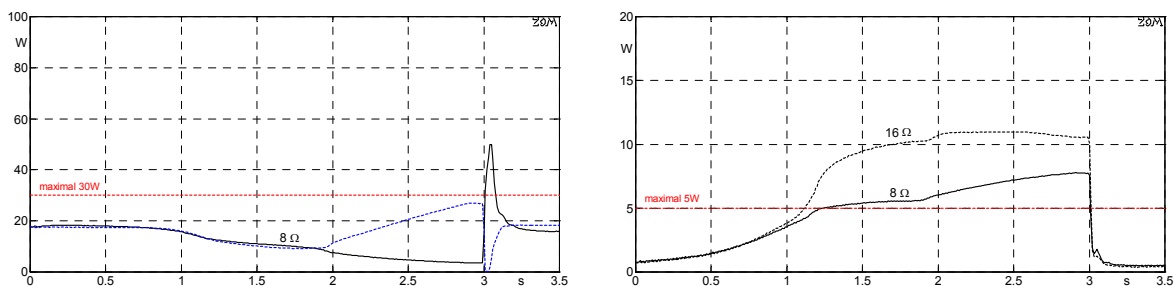


Abb. 10.5.63: Anoden-Verlustleistung für beide Endröhren (links), Schirmgitter-Verlustleistung für zwei verschiedene Lastwiderstände (rechts). Der Pegel des aussteuernden Sinustones (500 Hz) nimmt von 0 – 3 s linear zu, bei $t = 3$ s wird abgeschaltet. Ab $t = 1.3$ s ist die Endstufe übersteuert.

Vergleich

VOX, Marshall, Fender – die heilige Dreifaltigkeit der Sechzigerjahre. Natürlich gab es auch noch Gibson, Ampeg, Hiwatt u.v.a.m., aber die erstgenannten hatten schon Protagonistenstatus. Was unterscheidet diese Verstärker, oder, um diesem Kapitel gerechter zu werden, diese Endstufen? Das ist in dieser Allgemeinheit gar nicht zu beantworten, weil es ja nicht nur *einen* Marshall- bzw. Fender-Verstärker gibt. Selbst bei VOX durchlief der AC-30 mehrere Produktionsvarianten, bei Fender listet Dave Funk 250 Schaltplanseiten auf, und hat immer noch nicht alle Fender-Verstärker erfasst. Praktisch jeder Verstärkertyp (z.B. der Bassman) wurde über die Jahre in vielen Varianten gebaut, und daneben gab's (und gibt's) ja noch viele weitere Modelle. Somit kann weder von einer fendertypischen Schaltung, noch von einem fendertypischen Sound gesprochen werden. Ähnlich ist es bei Marshall, lediglich der AC-30 blieb sich in etwa treu. Doch selbst da gab es Modifikationen, z.B. die für die USA entwickelten Modelle, die nur scheinbare Ähnlichkeit mit dem UK-Standard hatten.

Selbst wenn man sich auf drei spezielle Endstufen konzentriert, nämlich die auf den vorhergehenden Seiten untersuchten, fällt der Vergleich schwer, weil viele kleine Detailunterschiede bestehen. Am bedeutendsten sind: Die Leistungsklasse, die Gegenkopplung und damit der Innenwiderstand, und Ausgleichsvorgänge bei Übersteuerung. Sogar der Lautsprecher muss berücksichtigt werden, auch wenn er selbst gar nicht zur Endstufe gehört: Denn seine Impedanz bestimmt die Endstufenbelastung, und somit den Übertragungsfrequenzgang der Endstufe. Und dann spielt noch die der Endstufe vorhergehende Schaltung eine große Rolle: Ist sie hoch- oder niederohmig, welche Spannung kann sie unverzerrt zur Verfügung stellen? Wäre die Endstufe ein lineares und zeitinvariantes System, man könnte ihren Frequenzgang aufnehmen und hätte einen guten Ausgangspunkt für Vergleiche. Gitarrenverstärker-Endstufen werden aber übersteuert, sind also nichtlineare Systeme, und deshalb ergeben Kleinsignalmessungen nur einen sehr beschränkten Hinweis auf ihr Verhalten.

Als Beispiel für die beim Verstärkervergleich auftretenden Probleme möge ein Vergleich von VOX AC-30 und Fender Super-Reverb dienen. Der VOX leistet 30 W, der Fender 40 W. Im VOX-Gehäuse sitzen zwei 12"-**Lautsprecher**, im Fender vier 10-Zöller. Belässt man jeder Endstufe ihre Original-Lautsprecher, vergleicht man nicht nur Endstufen, sondern auch Lautsprecher. Schließt man die VOX-Lautsprecher an den Fender an, riskiert man deren Zerstörung, weil Celestion nur je 15 W Belastbarkeit angibt. Ganz im Übrigen: Die typische Impedanz der Super-Reverb-Lautsprecher ist 2 Ω , beim VOX sind's 16 Ω . Man kann die VOX-Lautsprecher auf 4 Ω umlöten, hat damit aber eine andere Konfiguration. Und beide Verstärker mit den Fender-Lautsprechern betreiben? Bezüglich der Belastbarkeit wäre das möglich, es bleibt aber die unterschiedliche Leistung, die unterschiedliche Lautsprecherverzerrungen zur Folge haben könnte (und Subharmonische sind sehr pegelabhängig).

Weil somit nur ein und derselbe Lautsprecher als Last für alle zu vergleichenden Verstärker infrage kommt: Was bliebe als endstufenspezifischer Unterschied übrig? Zuerst der **Innenwiderstand**. Weil der beim VOX hoch, beim Fender mittel und beim JTM niedrig ist, formt die Lautsprecherimpedanz den Übertragungsfrequenzgang mehr oder weniger. In der Resonanz kann die Lautsprecherimpedanz auf 40 Ω oder auf 150 Ω ansteigen, und das bedeutet bei hochohmiger Quelle einen Spannungspegel-Unterschied von fast 12 dB, bei niederohmiger Quelle hingegen einen fast unveränderten Pegel – ein gewaltiger Unterschied, der weder der Endstufe alleine, noch dem Lautsprecher alleine zuzuordnen ist. Auch wenn Endstufen weder reine Stromquellen, noch reine Spannungsquellen sind – der Unterschied zwischen z.B. einem AC-30 (R_i ist ca. 80 Ω) und einem JTM-45 (ca. 3 Ω) ist diesbezüglich erheblich.

Ursache des unterschiedlichen Innenwiderstandes ist die **Endstufen-Gegenkopplung**: Der JTM-45 ist stark gegengekoppelt, der Super-Reverb etwas weniger stark, der AC-30 gar nicht. Neben dem Innenwiderstand beeinflusst die Gegenkopplung auch die nichtlinearen Verzerrungen der Endstufe, die beim AC-30 größer sind als beim Super-Reverb und insbesondere beim JTM-45. Auch in der Art der Verzerrungen bestehen Unterschiede: Bei stärkerer Übersteuerung verändert sich das Tastverhältnis bei JTM-45 und Super-Reverb, und damit nehmen (bei Sinusaussteuerung) die quadratischen **Verzerrungen** zu. Demgegenüber bleibt das Ausgangssignal beim AC-30 weitgehend halbwellen-antimetrisch, mit dominantem k_3 .

 **Text in Bearbeitung**

10.5.13 Pentode/Triode/Ultralinear

In der Endstufe eines typischen Gitarrenverstärkers arbeiten Pentoden: EL-34 im Marshall, EL-84 im VOX, 6L6-GC im Fender. Oder vergleichbare Röhren (5881, KT-66, KT-88), aber immer Pentoden, und keine Trioden. Dass einige dieser Röhren eigentlich Strahl-Tetroden sind, soll hier nicht stören, denn ihre Leitbleche sind ja auch eine Art fünfte Elektrode, auch wenn in der strengen Theorie noch immer Unterschiede zu einem echten Bremsgitter verbleiben. Da diese Unterschiede im Folgenden aber keine Bedeutung haben, möge Pentode synonym zu Strahl-Tetrode stehen.

In einer Triode beschleunigt die aussteuerungsabhängige Anodenspannung die Elektronen, deshalb ist die Röhren-Verstärkung bei kleiner Anodenspannung klein. Bei der Pentode hat demgegenüber die Anodenspannung nur wenig Einfluss auf den Emissionsstrom, weil das Schirmgitter – unabhängig von der Aussteuerung – auf hohem Potential liegt. Die Ausgangskennlinien der Pentode verlaufen deshalb (außer im anfänglichen Verteilungsgebiet) fast horizontal, der Innenwiderstand ist größer als bei Trioden. Bei der Gesamtbetrachtung von Wirkungsgrad, Innenwiderstand und Klirrfaktor bemerkten nun die HiFi-Entwickler, dass sowohl die Pentode, als auch die Triode einen suboptimalen Randbereich belegten, und suchten nach einem Kompromiss. Dieser fand sich in der **Ultralinear-Schaltung**: Hierbei liegt das Schirmgitter der Endröhren weder auf konstantem Potential (Pentodenbetrieb), noch auf Anodenspannung (was in etwa Triodenbetrieb entspricht), sondern dazwischen. Da am Ausgangsübertrager ja alle Spannungen zwischen Betriebsspannung und Anodenspannung zur Verfügung stehen, muss man nur eine geeignete "Anzapfung" aus der Primärwicklung herausführen. Deshalb hat ein Ultralinear-Ausgangsübertrager nicht drei, sondern fünf Primäranschlüsse. Die Signalarückführung auf die Schirmgitter (g_2) bewirkt eine Gegenkopplung, was beim HiFi-Verstärker als Vorteil angesehen wurde. Beim Gitarrenverstärker anscheinend nicht, denn nur wenige Versuche schafften den Sprung in die Produktion, z.B. der 79er Twin-Reverb. Oder, man höre und staune, der 200-Watt-Marshall: Ultralinear-Endstufe, für geringste Verzerrungen. Bei der JCM-800-Serie geht's dann aber wieder ohne Ultralinearisation zur Sache.

Durch das Verringern der Schirmgitterspannung sinkt die erreichbare Maximalleistung. Das kann man ausnutzen, um einen 100-W-Verstärker in einen 50-W-Verstärker umzuwandeln: Umschalter an beide Schirmgitter, sodass entweder die volle Betriebsspannung, oder die Anodenspannung an die Schirmgitter gelangt. Natürlich könnte man auch die Verstärkung reduzieren, wenn's zu laut wird, aber Endstufenverzerrungen entstehen erst bei Übersteuerung. Sind die Schirmgitter mit den (zugehörigen) Anoden verbunden, arbeiten die Endpentoden in einer Art **Triodenbetrieb**: Mit kleinerer Maximalleistung, aber auch mit kleinerem Innenwiderstand. Der Wechsel vom Pentoden- in den Triodenbetrieb ändert deshalb nicht nur die Maximalleistung (Lautstärke), sondern auch den Klang. Bei Betrieb mit hohem Innenwiderstand werden Lautsprecher-Resonanzen und Höhen betont, im Triodenbetrieb verliert der Sound an Brillanz und Volumen. In welchem Ausmaß es tatsächlich zu hörbaren Änderungen kommt, hängt (neben der Schirmgitterspannung) auch von der Endstufen-Gegenkopplung ab: Änderung der Schirmgitterspannung bedeutet Änderung der Verstärkung, also der Schleifenverstärkung, und somit Änderung des Gegenkopplungsfaktors. Gegebenenfalls muss deshalb beim Umschalten der Schirmgitterspannungen auch die Gegenkopplungsschleife umgeschaltet werden. Auf den **Arbeitspunkt** hat die Pentoden/Trioden-Umschaltung hingegen keine Auswirkungen, weil sich in Ruhe die Anodenspannung fast nicht von der Betriebsspannung unterscheidet (die Primärwicklung ist für Gleichstrom niederohmig).