

### 10.5.8 Der Endstufen-Ruhestrom (Bias-Einstellung)

Der Endstufen-Ruhestrom ist der Strom, der "in Ruhe" durch eine Endröhre fließt. "In Ruhe" bedeutet, dass alle Betriebsspannungen anliegen (also nicht Standby-Betrieb), dass aber kein Signal anliegt (Volume = 0). Bei einigen Schaltungen stellt sich dieser Ruhestrom automatisch ein (Kathodenwiderstand, Kap. 10.5.1, 10.5.2), bei anderen kann er in gewissen Grenzen an einem Potentiometer (Bias-Poti) eingestellt werden. Hierzu muss es natürlich Richtlinien geben: Was ist die optimale Einstellung, und vor allem: wie (und was) wird gemessen?

Was wird gemessen? Der Ruhestrom natürlich, die Bias! "*Wenn die Netzspannung von 230 V auf 220 V einbricht, verändert sich die Bias um ein paar Milliampere, und das klingt dann schon anders.*" Ja natürlich, die Bias – nur wenn die genau eingestellt ist, klingt's richtig. Die Bias, das ist anscheinend der Endstufen-Ruhestrom. Aber welcher – der Anoden- oder der Kathodenstrom? Da wird's für die meisten Experten schon eng. Empfehlung 1: *Die Bias misst man, indem man die Verbindung zwischen Anode und Ausgangsrafo auftrennt, und ein Amperemeter dazwischenklemmt.* Der meint den Anodenstrom, ganz klar. Und falls bei dieser Messung plötzlich Mr. Hendrix um die Ecke kommt und zum Mitspielen einlädt: Dann war die Isolierung unzureichend, denn Anodenspannungen können – und nun ganz ohne Ironie – **absolut tödlich sein!** Derartige Messungen sind nichts für den Laien, das erfordert Fachwissen. Empfehlung 2: *Die Bias misst man, indem man ein Amperemeter parallel zur Primärwicklung des Ausgangsrafos schaltet.* Der meint auch den Anodenstrom, und hält 5 – 10% Messfehler (wg. Kupferwiderstand) für unbedenklich. Denn so extrem hochohmig sind diese Primärwicklungen nicht, u.U. nur 30  $\Omega$ . Für eine Orientierungsmessung reicht's aber schon. Empfehlung 3: *In die Kathodenleitung jeder Endröhre lötet man einen 1- $\Omega$ -Widerstand, daran misst man den Spannungsabfall.* Jetzt ist plötzlich der Kathodenstrom gemeint, also die Summe aus Anoden- und Schirmgitterstrom. Bei 35 mA Anodenstrom kann der Schirmgitterstrom durchaus 5 mA betragen – der Kathodenstrom ist dann 40 mA. Wenn man 5% Netzspannungsänderung für wesentlich hält, sollte man bei Strommessungen nicht 14% Fehler einbauen. Seriöse Datenblätter spezifizieren meistens den **Anodenstrom** im Arbeitspunkt, Messungen am Kathodenwiderstand ergeben demgegenüber den **Kathodenstrom**. Kein Problem, wenn das Schirmgitter ( $g_2$ ) über einen Gitter-Vorwiderstand (z.B. 470  $\Omega$ ) betrieben wird; dann lässt sich aus seinem Spannungsabfall ganz leicht der Schirmgitterstrom berechnen. Aber Vorsicht: Auch diese Messung kann (wie jede Messung am geöffneten Verstärker) tödlich enden. Vorschriften beachten!

Anstelle von Empfehlungen zum (Anoden- oder Kathoden-) -Ruhestrom findet man auch Hinweise zur optimalen **Gittervorspannung**: *Am Gitter ( $g_1$ ) der Endröhre –42 V einpegeln.* Ja, auch das ist ein Weg: Mit einem hochohmigen Voltmeter ( $\geq 10\text{ M}\Omega$ ) misst man "in Ruhe" (ohne Aussteuerung) an der Endröhre die Spannung zwischen Steuergitter und Kathode; je negativer dieser Wert, desto kleiner ist der Anodenstrom. Also: Bei –50 V fließt weniger durch die Röhre als bei –40 V. Den Strom-Absolutwert erfährt man damit aber nicht.

Und was ist nun die richtige Spannung, bzw. der richtige Strom? Die Antworten hierzu füllen viele tausend Seiten im Internet, das ist eine Wissenschaft für sich. Korrektur: Das ist ein Käfig voller selbsternannter Experten, von Wissenschaft im üblichen Sinn sollte man da nicht sprechen. Sucht man im Internet nach dem Ohmschen Gesetz, findet man einheitlich  $U = RI$ . Sucht man nach Regeln zum Einstellen des (oder der) Bias, findet man Widersprüchliches. Da empfiehlt der eine ein Oszilloskop, und dann "*aufdrehen bis die Knicke in den Kurven verschwinden*". Klingt glaubwürdig, korrekter Dativ, muss ein "studierter Physiker" sein. Der nächste hält aber genau diese Methode für "*couldn't be further from the truth*". Noch glaubwürdiger, weil in Englisch.

Nun denn, lasset uns den 1000 Versionen eine 1001-te hinzufügen. Doch wie immer, ganz im Goetheschen Sinne, alle Freuden, alle Leiden, bzw. per *Aspera ad Astra*: erst die Grundlagen. In **Gegentakt-Endstufen** (und eigentlich geht's nur um diese) wird das Audiosignal zuerst in zwei Teile zerlegt, getrennt verstärkt, und dann wieder zusammengesetzt. Dieses Teilen-und-Zusammensetzen ist fehlerbehaftet, und hier greift die Ruhestromeinstellung an: Durch Verändern des Ruhestroms lässt sich der Klang verbessern. Oder verschlechtern, wenn man's falsch macht. Ist der Ruhestrom zu klein, entstehen unschöne Verzerrungen, gleichzeitig wirkt die Endstufe als Expander: Bei schwach angezupfter Gitarrensaite ist's zu leise, langt man fester in die Saiten, brüllt der Verstärker los. Bei großem Ruhestrom (hot biasing) ist der Klang gut, wenn nicht gerade andere Defizite vorliegen. Also möglichst großen Ruhestrom einstellen? Nein, denn das reduziert die sowieso schon recht kurze Lebensdauer der Endröhren, und zerstört u.U. das knapp dimensionierte Netzteil. Soweit die Haupteffekte.

Im Detail zeigen sich dann auch noch Effekte zweiter Ordnung: Bei kleinem Ruhestrom laden sich die Sieb-Elkos der Betriebsspannung auf höhere Spannungswerte auf, was den Vor- und Zwischenverstärkerstufen u.U. ein anderes Betriebsverhalten gibt. Große Effekte sind diesbezüglich zwar nicht zu erwarten, aber der Vollständigkeit halber sei's erwähnt. Ein kleiner Effekt kann auch bei der Impulsleistung auftreten, also der Leistung, die beim Toneinsatz gemessen wird: Sind die Kondensatoren auf höhere Spannungswerte aufgeladen, ist die Impulsleistung etwas höher. Es macht aber keinen Sinn, allein deswegen den Ruhestrom zu erniedrigen, weil die damit einhergehenden Verzerrungen in aller Regel inakzeptabel sind. Wenn man nicht mit den Kleinigkeiten beginnt, sondern die Haupteffekte betrachtet, lautet die einfache Regel: **Kleiner Ruhestrom = Verzerrungen, großer Ruhestrom = Röhrentod.**

Nun liebt man aber auch: Große Bias = Verzerrungen, kleine Bias = Röhrentod. Wie dieses? Ganz einfach: Die selbsternannten Experten, die in Gitarren- (und Bass-) -Magazinen ihre Kolumnen über Verstärker schreiben (dürfen), haben bezüglich Schaltungstechnik sehr unterschiedliche Ausbildungen\*. Der englische Begriff "**Bias**" wird in Fachkreisen mit "Vorspannung" übersetzt – zumindest im o.g. Zusammenhang. In Magazin-Kolumnen wird er nicht übersetzt. Das ist obercool, bzw. overcool, das versprüht Kompetenz. Nichts gegen deutsch-englischen Wortmix, wer Oszillografen-Trigger mit Schwingschreiber-Auslöser übersetzt, macht sich lächerlich. Trotz offensichtlicher Griechisch-Kenntnisse. Ob man jedoch eine "Wiring-Harness" in die ES-335 einfädeln muss, ist schon ein anderes Kaliber, da könnte man auch vom Kabelbaum reden. Könnte man nicht? Auch gut. Also *Bias* und *Wiring-Harness* und *Guitar & Bass*. Nein, das doch nicht, das heißt vorerst immer noch Gitarre & Bass. Wenn sich nun "*die Bias um ein paar Milliampere verändert*", schiebt man dem Leser die Verantwortung für die korrekte Übersetzung zu, und der vermutet dann Bias = Ruhestrom. Also: Mehr Bias = mehr Ruhestrom. Der Amerikaner schreibt in seinen Amplifier-Lessons aber: Less Bias = mehr Ruhestrom. Na klar, der meint "eine kleinere negative Vorspannung". So ganz korrekt ist das auch nicht, denn "less than" bedeutet in der Mathematik "kleiner als"; demnach ist  $-50 < -40$ , bzw. "minus fifty is less than minus forty". In der Mathematik ist das so. Außer man meint den Betrag, dann gilt wieder " $\text{abs}(-50)$  is greater than  $\text{abs}(-40)$ ". Und so meint der eine dieses, und der andere jenes, und mit jeder neuen Bias-Erklärung wird der hell strahlende Kolumnenschreiber eine Kometenklasse größer, und sein Schweif länger – und trotzdem scharf er nur einen undurchschaubaren Staubhaufen um sich. Per *Aspera ad Astra*, bzw. das also ist des Doodles Kern. Schon wieder Goethe – das sollte nicht überhand nehmen, obwohl man den Alten von Zeit zu Zeit ..., aber halt nicht von Zeile zu Zeile. Deshalb zurück zum Ruhestrom, zur Gitter-Vorspannung, nicht aber zur Bias: Dieser Begriff ist zu unpräzise.

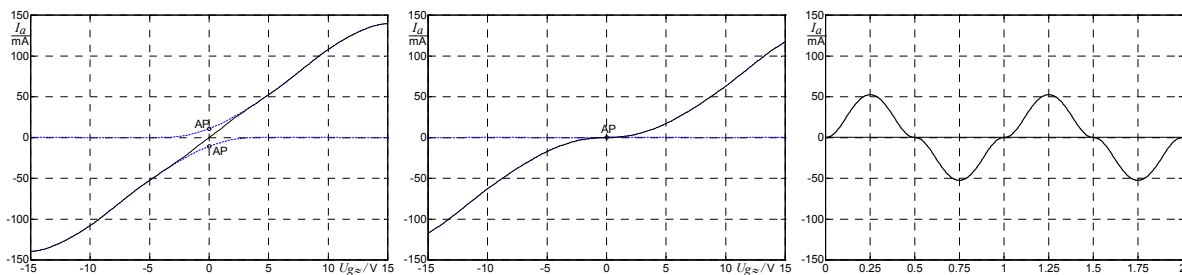
---

\* Diese nach unten offene Bewertungsskala enthält auch das Prädikat "absolut überhaupt gar keine Ahnung".

Im Folgenden steht **Ruhestrom** für den Anodenstrom, der in *einer* Endröhre ohne Aussteuerung fließt. Die englisch/amerikanische Literatur spricht hier von "quiescent plate current", oder "idle current", aber in einigen Fällen auch von "bias current". Das wäre korrekt, solange noch "current" dabei steht – oft ist aber nur mehr von "bias" die Rede, und das ist unpräzise. Denn die andere Größe, die in diesem Zusammenhang wichtig ist, heißt "grid bias voltage", oder abgekürzt nur "bias", und damit ist das Durcheinander perfekt. "Grid bias voltage" ist die ohne Aussteuerung an einer Endröhre anliegende Gitter/Kathode-Spannung, die im Folgenden **Vorspannung** genannt wird; sie ist immer negativ. Also z.B.: "Bei einer Vorspannung von  $-50\text{ V}$  stellt sich ein Ruhestrom von  $38\text{ mA}$  ein". Sofern die Kathode der Endröhre über einen Widerstand (ggf. mit parallelem Elko) mit Masse verbunden ist, muss klar gesagt werden, ob die Gitter/Masse- oder die Gitter/Kathode-Spannung gemeint ist. "Vorspannung" meint im Folgenden immer die Gitter/Kathode-Spannung.

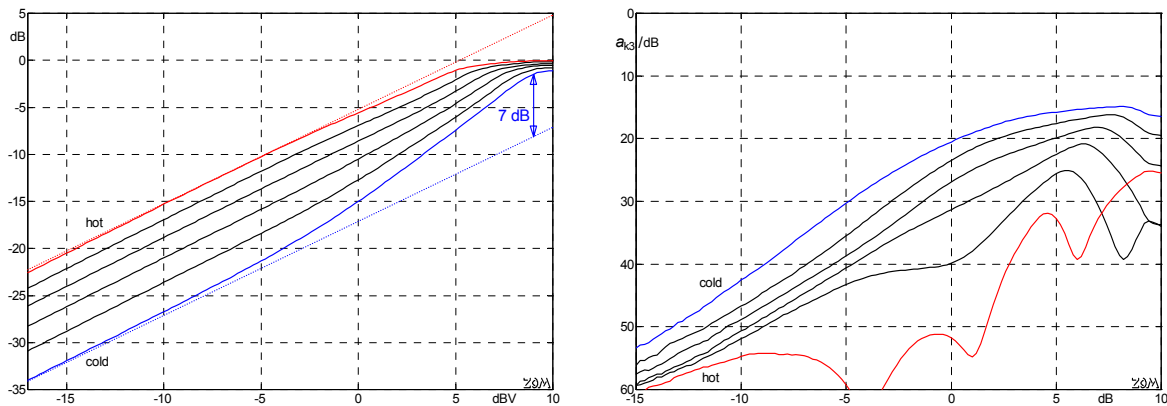
**Cold Biasing** bedeutet, dass der Ruhestrom relativ niedrig eingestellt ist, was einer "sehr negativen" Vorspannung entspricht. Es ist problematisch, von "kleiner" Vorspannung zu sprechen, weil nicht jeder versteht, dass  $-50\text{ V}$  kleiner ist als  $-40\text{ V}$ . Beim Thermometer wär's klar:  $-20\text{ C}^\circ$  ist kälter als  $-10\text{ C}^\circ$ , deshalb ist  $-20\text{ C}^\circ$  die (kältere) kleinere Temperatur. Aber trotz klarer Trennung in topologische und metrische Skalen: Die Internetgemeinde hat ihre eigenen Intervallskalen gefunden, und so liest man dann "Gitterspannung aufdrehen", wenn's von  $-40\text{ V}$  nach  $-50\text{ V}$  geht. Es ist eben ein Unterschied, ob man die Spannung oder den Betrag der Spannung vergrößert. **Hot Biasing** ist das andere Extrem: Hoher Ruhestrom, und eine "weniger negative" Vorspannung. Anders ausgedrückt, damit ja keine Zweifel bleiben: Je kleiner der Betrag (d.h. der Zahlenwert) der (negativen) Vorspannung, desto heißer wird die Röhre betrieben.  $10\text{ mA} / -60\text{ V}$  ist cold,  $80\text{ mA} / -40\text{ V}$  ist hot. Als Beispiel! Denn wie im Folgenden gleich ausführlich dargelegt wird: Diese Zahlen sind schaltungsspezifisch; was bei der einen Schaltung noch unter "cold biasing" läuft, ist bei der anderen schon "relatively hot".

In **Abb. 10.5.21** sind sowohl (gestrichelt) die Einzelkennlinien der Endröhren dargestellt, als auch die durch Überlagerung gebildete Summenkennlinie. Das mittlere Bild zeigt einen "kalten Arbeitspunkt", also "**cold Biasing**", das im Folgenden englisch bleibt, weil der kalte Arbeitspunkt ähnlich absurd ist wie der kalte Krieger. Ändert sich hierbei die Aussteuerung (also die als Abszisse aufgetragene Spannung) nur wenig, so fühlt sich keine der beiden Röhren zu großen Aktivitäten animiert – beide sperren noch, und der Gesamtstrom bleibt klein. Erst bei größerer Steuerspannung beginnen die Röhren abwechselnd zu leiten, und der Strom steigt. Die Folge sind sattelförmige Nulldurchgangsverzerrungen (Übernahmeverzerrungen). Anders im linken Bild: Die Ruheströme im Arbeitspunkt (AP) sind hier höher, die Summenkennlinie behält über weite Bereiche ihre Steigung, und krümmt sich erst an der Aussteuerungsgrenze deutlich.



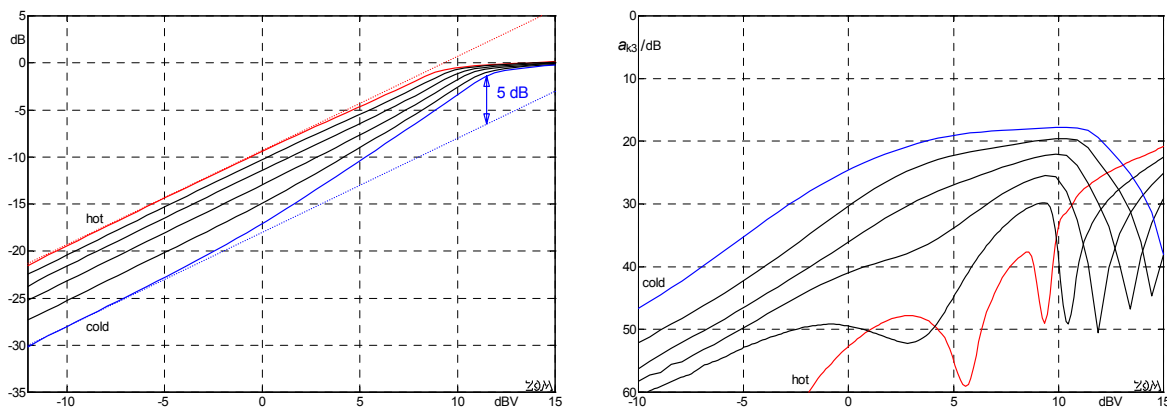
**Abb. 10.5.21:** Übertragungskennlinien bei zwei unterschiedlichen Ruhestromereinstellung. Rechts sind die zum mittleren Bild gehörenden Verzerrungen eines Sinussignals dargestellt ("Übernahmeverzerrungen").

Das im mittleren Bild dargestellte cold Biasing bewirkt zweierlei: Unerwünschte nichtlineare Verzerrungen, und eine ebenfalls unerwünschte Expansion. Im Gegensatz zum Kompressor vergrößert ein **Expander** mit zunehmender Aussteuerung seine Verstärkung – ein Stilmittel, das die Mehrheit der Gitarristen ablehnt. **Abb. 10.5.22** zeigt hierzu Messdaten eines Super-Reverb, dessen Endstufen-Ruhestrom ( $I_a$ ) zwischen 10 mA und 53 mA variiert wurde. Bei einer Eingangspegel-Zunahme um 20 dB nimmt der Ausgangspegel um 27 dB zu, wenn die Ruhestrom auf 10 mA eingestellt ist – das ist schon eine merkliche Expansion. Das rechte Bild zeigt die zugehörigen kubischen Klirrdämpfungen, auch hier deutliche Unterschiede.



**Abb. 10.5.22:** Fender Super-Reverb (2x 6L6-GC), Endstufen-Vorspannung von  $-65V$  bis  $-40V$  variiert. Links: Ausgangspegel vs. Eingangspegel; rechts: Klirrdämpfung vs. Eingangspegel. **Ohne** Gegenkopplung.

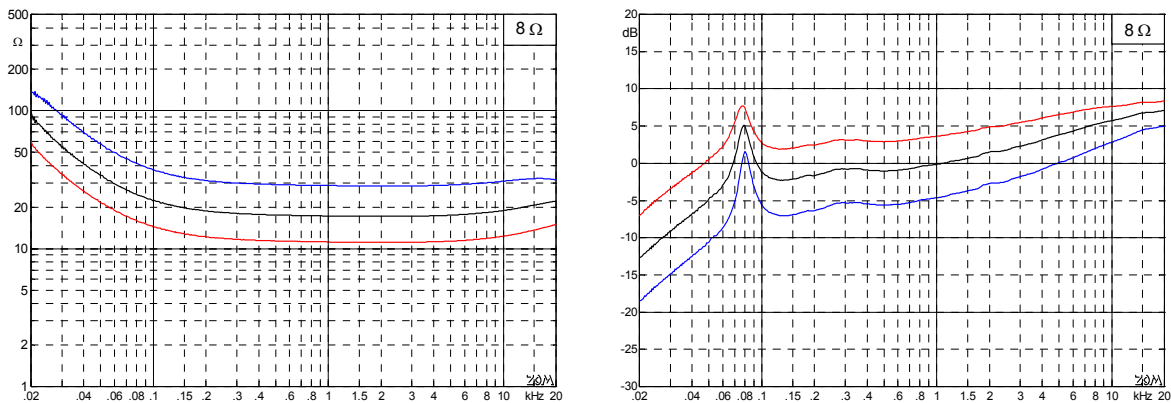
Die Messungen zu **Abb. 10.5.22** erfolgten bei aufgetrennter Gegenkopplungsschleife, um die Auswirkungen des Ruhestroms auf den Vorwärtszweig zu dokumentieren. Mit Gegenkopplung (**Abb. 10.5.23**) ergeben sich ähnliche Kurven, die Expansion ist minimal schwächer, die Verzerrungen sind etwas geringer. Bei den "heißeren" Betriebsarten ist der Unterschied in den Verzerrungen offensichtlich, beim Betrieb mit kleinem Ruhestrom muss berücksichtigt werden, dass sich für gleiche Eingangspegel die Ausgangspegel doch deutlich unterscheiden.



**Abb. 10.5.23:** Fender Super-Reverb (2x 6L6-GC), Endstufen-Vorspannung von  $-65V$  bis  $-40V$  variiert. Links: Ausgangspegel vs. Eingangspegel; rechts: Klirrdämpfung vs. Eingangspegel. **Mit** Gegenkopplung.

In aller Regel wird man den Super-Reverb nicht mit einem so kleinen Ruhestrom betrieben, wie er zur Messung der blauen Kurven eingestellt war. Üblich ist ein größerer Ruhestrom, ca. 35 – 45 mA. Viel größer sollte der Ruhestrom allerdings nicht werden, da dann die Anodenbelastung der Endröhren in kritische Bereiche kommen kann (siehe ab **Abb. 10.5.26**).

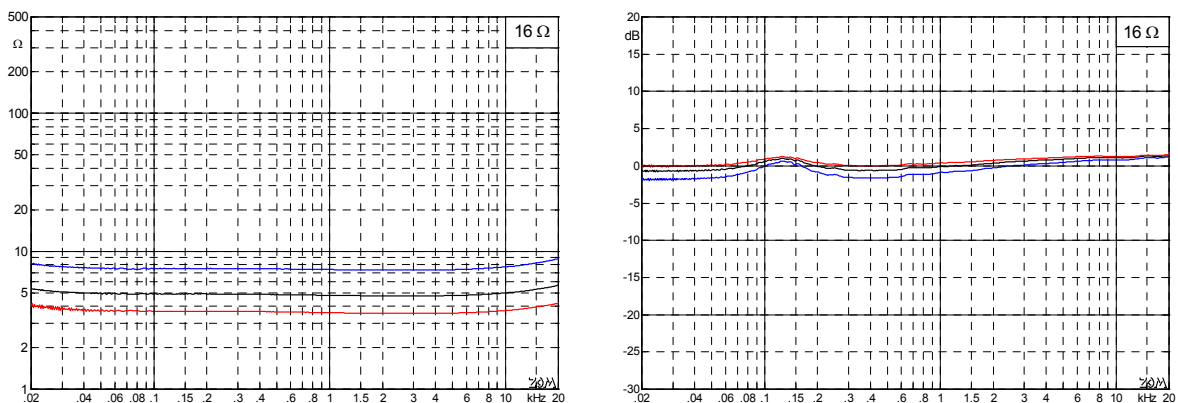
Mit Änderung des Endstufen-Ruhestroms ändern sich Klirrfaktor, Verstärkung und Dynamik, aber auch der Endstufen-Innenwiderstand. Schon Kap. 10.5.7 hatte gezeigt, dass der Röhren-Innenwiderstand keine Konstante ist, sondern vom Arbeitspunkt abhängt. Auch der durch den Ausgangsübertrager transformierte Innenwiderstand ist folglich arbeitspunktabhängig. Ist der **Endstufen-Innenwiderstand** hoch, wird der Lautsprecher wenig bedämpft, und Resonanzen haben einen stärkeren Einfluss auf das Übertragungsverhalten. Und weil die Lautsprecher-Impedanz zu hohen Frequenzen hin ansteigt (Kap. 11), bedeutet ein hoher Innenwiderstand auch Höhenanhebung. In **Abb. 10.5.24** sind für einen Super-Reverb Messkurven dargestellt:



**Abb. 10.5.24:** Super-Reverb. Links = Betrag der Ausgangsimpedanz; rechts = Endstufen-Übertragungsfunktion. Mit Gegenkopplung, Verstärker mit Lautsprecher (4xPR-10, Jensen) belastet. Verschiedene Ruheströme.

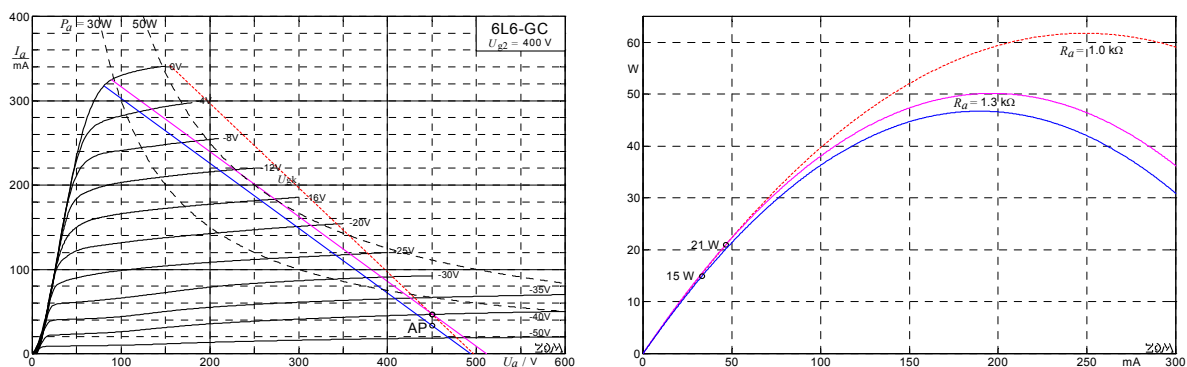
Im Betrieb mit kleinem Ruhestrom (cold Biasing,  $I_a = 15$  mA) beträgt der Innenwiderstand des gegengekoppelten Verstärkers um  $30 \Omega$ , das ist relativ hochohmig gegenüber dem Lastwiderstand – Resonanzüberhöhung und Höhenanhebung sind hierbei stärker ausgeprägt als bei dem rot dokumentierten "hot Biasing" ( $I_a = 50$  mA).

Bei der stärker gegengekoppelten Marshall-Endstufe ergibt sich ein ganz anderes Bild: Der Ausgang ist wesentlich niederohmiger, und deshalb bildet sich die Lautsprecherimpedanz viel weniger auf die Ausgangsspannung ab (**Abb. 10.5.25**). Bei üblicher RuhestromEinstellung ist der  $16\text{-}\Omega$ -Ausgang des JTM-45 ungefähr um den *Faktor vier* niederohmiger als der  $8\text{-}\Omega$ -Ausgang des Super-Reverb! Daraus aber nun den Schluss zu ziehen, der JTM-45 könnte/müsste mit einem niederohmigen Lautsprecher betrieben werden (oder der Fender mit einem höherohmigen), wäre falsch: Der optimale Lastwiderstand ergibt sich nicht direkt aus dem Innenwiderstand, sondern aus den Grenzwerten der Röhrendaten.



**Abb. 10.5.25:** JTM-45. Links = Betrag der Ausgangsimpedanz; rechts = Endstufen-Übertragungsfunktion. Mit Gegenkopplung, Verstärker mit Lautsprecher (Marshall 1960-AX) belastet. Verschiedene Ruheströme.

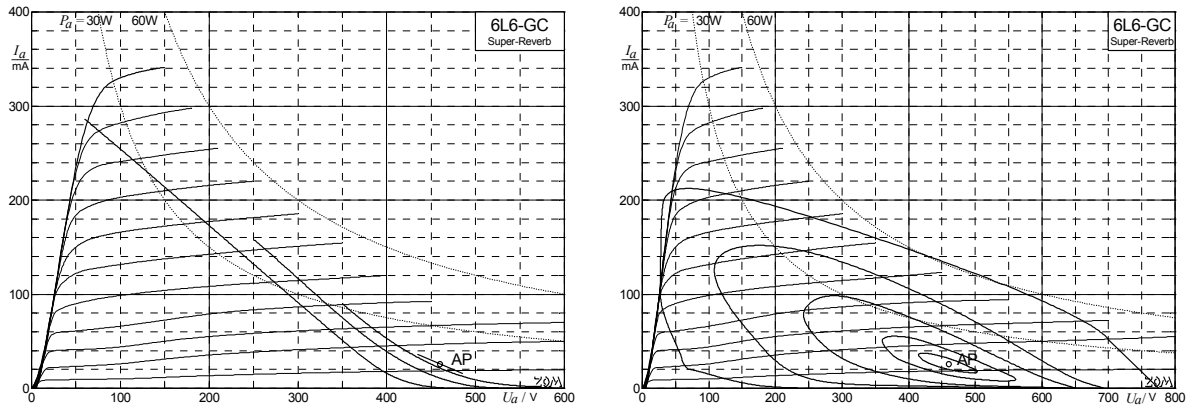
Die o.a. Bilder zeigen, dass die Übertragungseigenschaften (und damit der Klang) einer Endstufe von der Ruhestromeinstellung abhängen. Aber auch die **Röhrenverlustleistung** ist von der Ruhestromeinstellung abhängig – ihr gelten die folgenden Untersuchungen. Je weniger negativ die Vorspannung, desto größer der Anodenstrom, desto größer die Anodenverlustleistung. Häufig ist zu lesen, die ohne Aussteuerung auftretende Anodenverlustleistung soll 70% der maximal zulässigen Anodenverlustleistung betragen. Als Beispiel: Bei der 6L6-GC, die für 30 W spezifiziert ist, wären das 21 W (z.B. 450 V, 47 mA). Es macht wenig Sinn, nach den Ursprüngen der 70%-Regel zu suchen – das wird viel zu spekulativ. Besser ist es, an einem Beispiel die Röhrenbelastung zu erläutern. In **Abb. 10.5.26** sind im Ausgangskennlinienfeld der 6L6-GC drei Lastgeraden dargestellt. Für die oberen Geraden wurden 47 mA Ruhestrom angenommen, für die untere 33 mA, woraus sich mit 450 V Anodenspannung eine Ruheverlustleistung von 21 W (70%) bzw. 15 W (50%) errechnet. Aussteuerungsabhängig ergeben sich die im rechten Bild dargestellten Momentanleistungen, die für Wechselsignale zu halbieren sind. Obwohl sich die Ruheleistungen um immerhin 40 % unterscheiden ( $21 = 1.4 \cdot 15$ ), differieren für  $R_a = 1.3 \text{ k}\Omega$  die Maximalleistungen nur um 7 %; erst die Änderung des Lastwiderstandes von  $1.3 \text{ k}\Omega$  auf  $1.0 \text{ k}\Omega$  bewirkt größere Unterschiede in der Anodenbelastung. Und die Mittelwerte dieser Kurven? Die hängen von der individuellen Aussteuerung ab. Worst-Case ist ein rechteckförmiger Anodenstrom mit 200 mA Amplitude ( $1.3 \text{ k}\Omega$ ), die hierfür ermittelten Momentanleistungen sind zu halbieren, weil jede Endröhre nur während einer Halbwelle leitet. Mit  $R_a = 1.3 \text{ k}\Omega$  wird die maximal erlaubte Anodenverlustleistung noch nicht erreicht, mit  $R_a = 1.0 \text{ k}\Omega$  wird sie bereits leicht überschritten.



**Abb. 10.5.26:** Ausgangskennlinienfeld der 6L6-GC. AP = Arbeitspunkt ohne Aussteuerung. Im rechten Bild ist die Anodenverlustleistung in Abhängigkeit vom Anodenstrom angegeben. Lastwiderstand =  $1.3 \text{ k}\Omega / 1.0 \text{ k}\Omega$ .

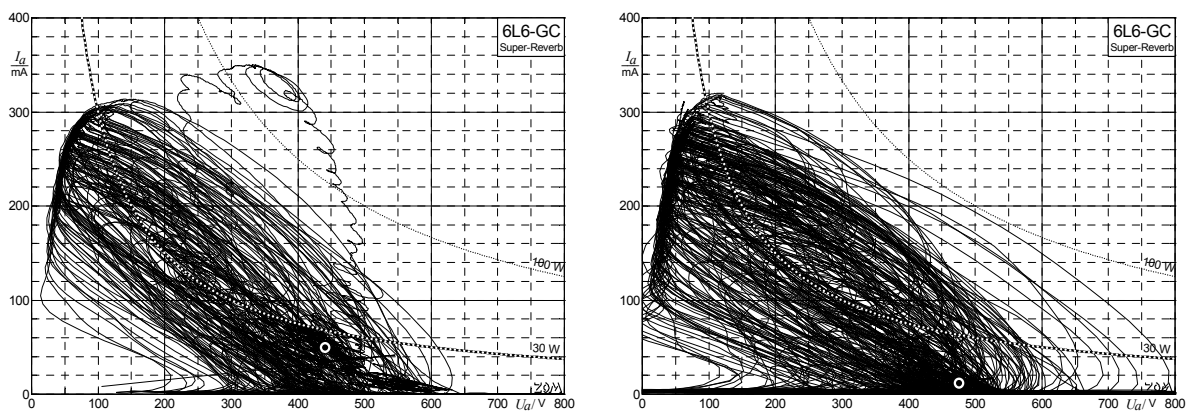
**Fazit:** Viel wichtiger als eine prozentgenaue Ruhestromeinstellung ist für die Anodenbelastung der Lastwiderstand; ist er zu klein, wird die Anode überlastet. Und natürlich spielt auch die Art der Ansteuerung bzw. Übersteuerung eine Rolle. Und die Schirmgitterspannung. Und die Anodenspannung. Also: So ziemlich alles, was sich ändern kann, ändert sich auch. Und deshalb kann es zwar nicht schaden, einmal eine Belastungskennlinie zu berechnen, aber nur, wenn man sich danach nicht sklavisch an die Rechenergebnisse hält. In Abb. 10.5.26 wurde der Arbeitspunkt mit 450 V angenommen. Die vom Netzteil gelieferte Spannung bleibt aber bei Aussteuerung nicht konstant – sie kann sich lastabhängig ohne weiteres um 50 V ändern, und damit ändert sich auch die Anodenbelastung. Noch viel mehr weicht aber die Lastkurve von der üblicherweise angenommenen Geraden ab. Kein **Lautsprecher** hat einen konstanten, reellen Widerstand (Kap. 11). Vielmehr ist die Lautsprecherimpedanz komplex (Strom und Spannung sind phasenverschoben), und ihr Betrag kann sich frequenzabhängig leicht um den Faktor zehn ändern. Berechnungen mit Lastgeraden sind sehr idealisierende Modelle – nicht weniger, aber auch nicht mehr. Die Realität ist ganz anders.

In der Realität wird ein Gitarrenverstärker weder mit Sinustönen angesteuert, noch mit einem realen Widerstand belastet; weder seine Betriebsspannung, noch seine Schirmgitterspannung sind konstant. Einen ersten Schritt in Richtung Realität zeigt **Abb. 10.5.27**: Diese Ausgangskennlinien wurden nicht im Prüfgerät ermittelt, sondern an einem realen Gitarrenverstärker.



**Abb. 10.5.27:** Ausgangskennlinienfeld, Super-Reverb mit reeller Last (links), bzw. mit komplexer Last (rechts).

Für die im linken Bild dargestellten Messkurven wurde der Verstärker mit einem realen 8- $\Omega$ -Widerstand belastet. Mit kleiner Aussteuerung ergibt sich eine kleine, gerade Linie durch den Arbeitspunkt, mit zunehmender Aussteuerung wächst diese Linie, krümmt sich und verschiebt sich nach links. Selbst bei reeller Belastung darf also nicht generell von einer durch den AP gehenden Geraden ausgegangen werden, weil zum einen die Betriebsspannung sinkt, zum anderen wegen Gitterstromfluss die Koppelkondensatoren polarisiert werden (Kap. 10.4). Mit komplexer Lautsprecherlast ( $f = 3$  kHz) ergeben sich die im rechten Bild dargestellten Kurven. Bei kleiner Aussteuerung erhält man arbeitspunkt-umschließende Ellipsen, bei großer Aussteuerung entstehen Knickkurven, die auch in den Bereich jenseits der als Grenze spezifizierten 30 W vordringen. Da dieser Leistungsgrenzwert aber als Kurzzeit-Mittelwert aufzufassen ist, bedeuten diese Überschreitungen nicht generell eine Röhrenüberlastung (Kap. 10.5.9).

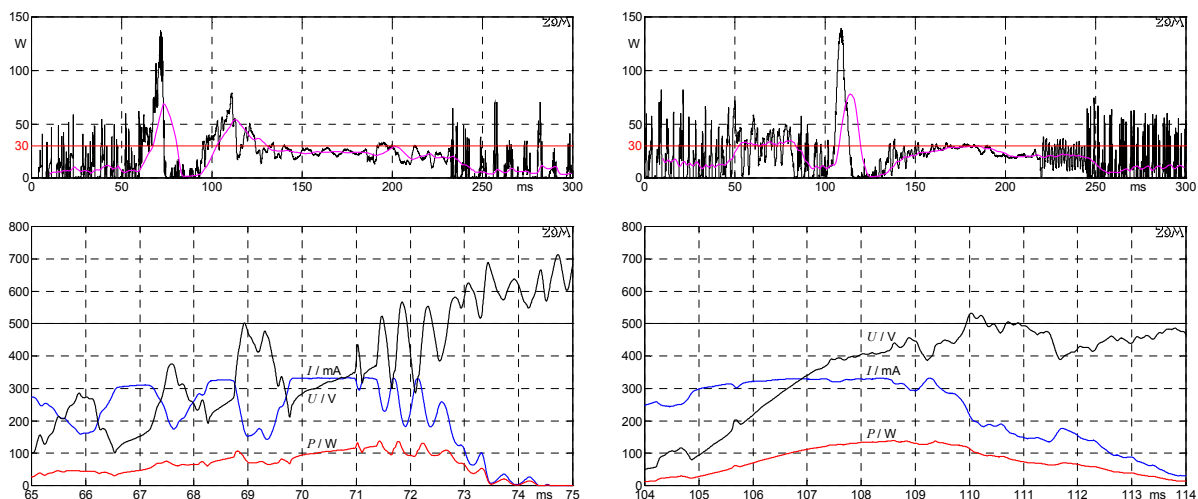


**Abb. 10.5.28:** Ausgangskennlinienfeld, Super-Reverb mit Lautsprecherbelastung, Gitarrentöne (Stratocaster).

Noch näher an der Realität sind die in **Abb. 10.5.28** dargestellten Messkurven: Der mit seinem Lautsprecher belastete Super-Reverb wurde mit einer Gitarre bespielt – keine Spur mehr von einer Arbeitsgeraden! Stattdessen eine Vielzahl unterschiedlichster Schleifen, die nur mit Mühe einen Rückschluss auf die Ruhestromeinstellung (weißer Kreis) ermöglichen. Wenn folglich Zusammenhänge zwischen Ruhestrom und Röhrenbelastung hergestellt werden sollen, sind Arbeitsgeraden untauglich – nötig sind echte Verlustleistungsmessungen.



Um die Anodenverlustleistung zu messen, müssen Anodenspannung und Anodenstrom aufgezeichnet werden. Es reicht nicht, den Effektivwert der Anodenspannung mit dem Effektivwert des Anodenstroms zu multiplizieren, denn damit wird die *Scheinleistung* [20] ermittelt! Also: Wer ein Voltmeter an die Anode klemmt, und ein Amperemeter in die Anodenzuleitung, misst zwar  $U_a$  und  $I_a$ , aber deren Produkt sagt nur bei Gleichspannung (bzw. Gleichstrom) etwas über die Röhrenbelastung aus – mit Aussteuerung entstehen aber Wechselgrößen, und da ist zwischen Wirk-, Blind- und Scheinleistung zu unterscheiden. Was das Anodenblech erhitzt ist die **Wirkleistung**, das zeitlich gemittelte Produkt aus Anodenspannung und -strom. Die Reihenfolge darf hierbei nicht vertauscht werden! Es ist ein Unterschied, ob zuerst multipliziert wird und dann gemittelt (richtig), oder zuerst gemittelt und dann multipliziert (falsch). Abb. 10.5.28 hatte eindrucksvoll gezeigt, dass bei dieser 6L6-GC kurzzeitig 100 W Anodenverlustleistung überschritten wurden – das ist mehr als das Dreifache des erlaubten Maximalwertes. Kurzzeitig muss das eine Endröhre aushalten können – sonst ist sie in einem Gitarrenverstärker fehl am Platz. Wenn man den Anodenstrom einschaltet, beginnt die Temperatur des Anodenblechs zu steigen, ihm wird Wärmeenergie zugeführt. Durch Strahlung wird gleichzeitig **Wärmeenergie** abgeführt, und wenn man lange genug wartet, stellt sich ein stationärer Gleichgewichtszustand ein, d.h. eine konstante Anodentemperatur. Ist die zu hoch (helles Glühen), geht die Röhre kaputt. Wartet man nicht so lange, bleibt die Temperatur unter dem stationären Endwert. Das ist wie beim Auto: Tritt man für nur 2 Sekunden aufs Gaspedal, erreicht man noch nicht die Maximalgeschwindigkeit. Bei einer Röhre wären 2 s allerdings schon relativ lange – aber so lange dauern die typischen Kurzzeitüberlastungen nicht.



**Abb. 10.5.29:** Momentane Anodenverlustleistung (schwarz), gleitender Mittelwert über 10 ms (magenta). Im unteren Bild sind Ausschnitte aus dem Verlauf von Anodenspannung, -strom und -verlustleistung dargestellt.

In **Abb. 10.5.29** zwei Beispiele eines lautsprecherbelasteten Super-Reverb dargestellt. Die mit 48 kHz abgetasteten Momentanwerte der Anodenverlustleistung erreichen ca. 140 W, die über 10 ms gemittelten Werte liegen ebenfalls erheblich über der für Dauerbelastung spezifizierten 30-W-Grenze. Die untere Bildzeile zeigt, dass diese Belastung in einem für Gitarrentöne ungewöhnlich tiefen Frequenzbereich stattfindet: Interpretiert man 10 ms als halbe Periodendauer, erhält man 50 Hz. Mit der Netzfrequenz hat diese Belastung allerdings nichts zu tun, das sind Auswirkungen von übersteuerungsbedingten Umladevorgängen in Phaseninverter (Kap. 10.4) und Endstufe. Weil derartig hohe Kurzzeit-Belastungen wiederholt auftreten können, ist es sinnvoll, den Ruhestrom nicht zu hoch einzustellen, damit die Röhre in der Zeit zwischen den Hochleistungsphasen möglichst wenig Wirkleistung zugeführt bekommt. Bleibt nur noch die Antwort auf die Frage, wie hoch ein 'nicht zu hoch' eingestellter Ruhestrom ist.



Was ist nun die richtige Ruhestromeinstellung ("**Bias-Einstellung\***")? Eine allgemeingültige Formel hierfür gibt es nicht – zu unterschiedlich können Schaltung, Röhren, Lautsprecher und Spielweise sein. Allgemeine Empfehlungen lassen sich gleichwohl aussprechen:

Zur **Gruppe 1** gehören Laien, also Personen ohne Elektrotechnik-Ausbildung. Wer nicht sicher weiß, wo und warum in einem 40-W-Verstärker Spannungen von über 800 V vorkommen können, wer nicht sicher weiß, wie er sich gegen diese tödlichen Gefahren schützen kann und muss, darf einen Verstärker nicht öffnen. Das Durchlesen der Bedienungsanleitung eines Multimeters ist noch nicht als Elektrotechnik-Ausbildung zu verstehen, der sichere Umgang mit einem Schraubenzieher auch nicht. Aus der Tatsache, dass nicht jeder, der einen Verstärker aufschraubt, sofort tot umfällt, darf nicht geschlossen werden, dass dies nie vorkommt. Wenn man den Verstärker nicht öffnen darf, bleiben nur Messungen am Sockel-Adapter. Der aber, da mit denselben hohen Spannungen betrieben, nach den Regeln der Technik aufgebaut sein muss, das VDE-Prüfzeichen o.ä. tragen sollte, und zusätzlich nach anerkannten Vorschriften regelmäßig überprüft werden muss. Solchermaßen ausgerüstet, wähnt man sich natürlich sofort in Gruppe 2:

Zur **Gruppe 2** gehören sachgemäß ausgebildete Personen (z.B. Elektromeister), die über einfache Messgeräte verfügen. Sie sollten den Ruhestrom gefahrlos messen und einstellen können, sie sollten erkennen können, ob eine Endstufe im echten A-Betrieb arbeitet (große Ausnahme), und mit einem Oszillograph die Mitte der Arbeitskennlinie finden können. Beim AB-Betrieb hilft nur eine Mischung aus Hörtest und einfacher Messung der Ruheleistung: Klingt der Verstärker schon gut, wenn die Endröhre ohne Aussteuerung nur 50% der erlaubten Anodenverlustleistung aufnimmt (z.B. 450V, 33 mA bei der 6L6-GC), sollte man's gut sein lassen. Fordert das Gehör (bzw. der danebenstehende Musiker) mehr, kann man etwas heißer fahren, aber ab 70% heben viele Praktiker warnend den Finger, auch wenn's für diese Grenze keine theoretische Begründung gibt. In jedem Fall müssen die Endröhren im Dunkeln begutachtet werden, ob in irgendeiner Phase des ausgiebigen und vielseitigen Tests glühende Gitter und/oder glühende Anodenbleche zu sehen sind. Dass dieser Test nicht mit dem Sinusgenerator am Leistungswiderstand erfolgen darf, müsste inzwischen klar sein.

Zur **Gruppe 3** gehören Personen der Gruppe 2, die über spezielle Messgeräte verfügen. Z.B. über eine Stromzange, die von 0 – 10 kHz mit einer Auflösung von 1 mA oder besser messen kann. Die 0 Hz sind ernst gemeint, 1 Hz als untere Grenze ist unbrauchbar, weil ja auch der Gleichanteil mitgemessen werden muss. Geeignet ist z.B. Tektronix AM305B/A6302, der Offset muss allerdings ständig kontrolliert werden. Mit einem derartigen Strommessgerät und einem Hochspannungstastkopf für die Spannungsmessung kann man dann die Faktoren der Anodenverlustleistung erfassen, im kalibrierten Frontend digitalisieren, im Rechner abspeichern, und daraus die tatsächliche Belastung ermitteln. Ist man erst einmal so weit gekommen, landet man zwangsläufig bei der Frage, ob sich heutige Röhrenhersteller wirklich noch an die aus den 50er-Jahren stammenden Röhrendaten halten, und ihren Produkten z.B. 8000 Stunden MTBF zusichern. Und bei der Frage, ob wirklich jeder Röhrengroßhändler, der angeblich bei der Entwicklung "seiner" Spezialröhren mitwirkt, derartigen Aufwand treibt.

Verneint man diese Frage, kommt man schnell in **Gruppe 0**. Hierzu gehören all jene, die einmal festgestellt haben, dass alte Marshall- oder Fender-Verstärker überhaupt keine Möglichkeit zur Ruhestromeinstellung hatten, und trotzdem ihren Zweck erfüllten. Und dann tauscht man lediglich die Endröhren, und das war's.

---

\* Bias = Basis. Merke: Eine gute Grundlage ist die beste Voraussetzung für eine solide Basis.