

10.5.9 Röhren-Belastung und -Alterung

Die Endröhren eines Gitarrenverstärkers werden im regulären Betrieb sehr heiß: am Glaskolben durchaus 250 °C, im Innern noch viel mehr. Und genau diese Hitze lässt die verwendeten Materialien altern, zerstört Beschichtungen, und verschlechtert so die Betriebsdaten. Natürlich können Röhren auch zerbrechen, aber das ist nicht die übliche Ausfallursache. Häufige Ursachen sind:

- Die Kathodenbeschichtung dampft von der Kathode ab und schlägt sich auf anderen Elektroden nieder; Überlastung beschleunigt diesen Vorgang.
- In der Kathode kann sich zwischen dem Träger (z.B. Nickel) und der Emissionsschicht (v.a. Bariumoxid) eine isolierende Zwischenschicht bilden.
- Aus den Elektrodenmetallen ausgelöste Gase verschlechtern das Vakuum.
- Mechanische Erschütterungen verbiegen oder zerstören die Elektroden.

Im MOV-Datenblatt der GEC-KT-66 wird die Lebensdauer mit "mindestens **8000 Stunden**" angegeben. Der Amateur, der 10 Stunden pro Woche laut spielt, bräuchte sich somit 15 Jahre lang keine Sorgen zu machen, und selbst der Profi (8 Stunden pro Tag) käme noch auf fast 3 Jahre. Zu völlig anderen Zeiten kommt Helmuth Lemme [1995]: Seine Empfehlung ist, nach **100 Stunden** probeweise neue Röhren einzusetzen. Noch rigoroser Van Halen: Er lässt angeblich nach jedem Auftritt alle Endröhren wechseln. Die 8000-Stunden-Euphorie erfährt einen ersten Dämpfer, wenn man sich die MOV-Definition vom "Röhren-Lebensende" genauer anschaut: Da steht, dass die Ausgangsleistung auf 50% zurückgegangen sein muss. Solange also mehr als 50 W aus dem 100-W-Verstärker kommen, sind die Röhren in Ordnung. Mit der halben Verstärkerleistung wird sich aber kaum ein Gitarrist zufrieden geben, diese Angabe ist praxisfern. Mit welcher Charakteristik die Leistung über der Zeit abnimmt, wird von MOV nicht spezifiziert, nur ein Hinweis findet sich noch: Wenn man die Röhrenbelastung um 40% reduziert, verlängert sich die Lebensdauer um 25%. Leider lassen sich daraus keine Schlüsse ziehen, wie die Lebensdauer bei Überlastung abnimmt. Und ganz offensichtlich werden im Gitarrenverstärker die Endröhren in vielen Fällen außerhalb ihrer Spezifikationen betrieben – die Empfehlung, nach 100 Stunden probeweise neue Endröhren einzusetzen, ist nicht aus der Luft gegriffen. Dass man gelegentlich liest, Röhren müssten erst ca. 100 Stunden eingespielt werden, bevor sie richtig klingen, wollen wir ganz geschwind übergehen, und stattdessen lieber die Frage klären, welcher Betriebszustand die Röhren denn am stärksten belastet.

Schon das Einschalten des Verstärkers kann sich nachteilig auswirken: Wenn an der noch kalten Röhre sofort die volle Anodenspannung anliegt, lösen sich u.U. Teile der Kathodenbeschichtung ab. Das war der Vorteil der **Gleichrichterröhre**: Erst wenn sie heiß war, gab's die volle Betriebsspannung, und dann waren in der Regel auch alle anderen Röhren aufgeheizt. Heizen ohne Kathodenstromfluss ist aber auf Dauer auch zu vermeiden, denn das fördert den Aufbau der störenden Zwischenschicht (Ausnahmen sind die sog. Langlebensdauererrohren). Ob nun in den Spielpausen der Verstärker mit Anodenspannung weiterlaufen soll, oder ohne (= Standby), oder ganz abzuschalten ist, wird kontrovers diskutiert. Abschalten reduziert die Betriebsstundenzahl, die damit verbundenen häufigen und starken Temperaturschwankungen reduzieren aber auch die Lebensdauer – also lieber eingeschaltet lassen. Zum Standby-Betrieb gibt's nur Vermutungen: Vor- und Nachteile halten sich in etwa die Waage. Bei Verstärkern mit hohem Ruhestrom (hot Bias) kann der Standby-Betrieb sinnvoll sein, da ihre Röhren ohne Aussteuerung am stärksten belastet werden. Der VOX AC-30 ist so ein Fall: In Ruhe wird die Anoden-Grenzbelastung der EL-84 zumeist schon überschritten – nur hat gerade dieser Verstärker keinen Standby-Schalter.

Was belastet die Endröhren im Betrieb? Die Erwärmung bzw. Überhitzung der Elektroden! Ohne technische Ausbildung würde man vermuten, dass ein vollausgesteuerter Verstärker die Endröhren an ihre Belastungsgrenze bringt, Übersteuerung bewirkt dann **Überlastung**. Das stimmt so aber nicht: Maßgeblich für die Anodenverlustleistung ist das Produkt aus Anodenstrom und Anodenspannung. In Ruhe liegen z.B. 450 V zwischen Anode und Kathode*, der Ruhestrom ist z.B. 40 mA, die Anodenverlustleistung ist dann 18 W. Hält die Röhre maximal 30 W aus, ist diese Ruhebelastung unkritisch. Bei Aussteuerung ändern sich sowohl U_a als auch I_a . Allerdings gegenläufig: Wenn I_a zunimmt, nimmt U_a ab. An der Aussteuerungsgrenze geht – zumindest unter Idealbedingungen – die Anodenverlustleistung sogar gegen null: Entweder leitet die Röhre, dann fließt zwar Anodenstrom, aber der Spannungsabfall an der Röhre ist null; oder die Röhre sperrt, dann liegt zwar eine hohe Spannung an der Röhre, aber der Strom ist null. So ideal ist jedoch keine reale Endröhre: Bei maximalem Anodenstrom fallen zwischen Anode und Kathode ca. 50 V ab, oder sogar noch mehr. Aber selbst mit $I_a = 0.3$ A ergäbe das erst 15 W, also immer noch völlig unkritisch. Im Zwischenbereich wird's gefährlich, so ungefähr bei halber Aussteuerung: $225\text{V} \cdot 0.15\text{A} = 34\text{W}$. Mit einer 30-W-Röhre wäre man nun schon jenseits der **Belastungsgrenze**. Die aber als Mittelwert aufzufassen ist – in diesem Betriebszustand wird die Röhre nicht auf Dauer betrieben, die Steuerspannung ändert sich ja. Hier setzen nun Belastungsberechnungen an, die für sinusförmige Aussteuerung die Anodenverlustleistung ermitteln. Nicht ganz unsinnig, aber auch nicht ganz typisch: Das von einer E-Gitarre gelieferte Signal ist nicht sinusförmig. Alternative Berechnungen nehmen rechteckförmige Aussteuerung an und erhalten eine 23% größere Anodenbelastung – aber rechteckförmig ist das Gitarrensinal ja auch nicht immer. Doch selbst wenn man den Worst-Case als Dauerzustand ansetzt: In aller Regel hält das Anodenblech die thermische Belastung ganz gut aus, zumindest, solange die Abschlussimpedanz passt.

Wäre da nicht das **Schirmgitter**! Seine Spannung nimmt – im Gegensatz zur Anodenspannung – bei Aussteuerung nur unwesentlich ab, und deshalb ist es bei kleinen Anodenspannungen für die Elektronen ein idealer Landeplatz. Mit abnehmender Anodenspannung nehmen Schirmgitterstrom und Schirmgitterverlustleistung deshalb zu, und da die maximal erlaubte Schirmgitterverlustleistung kleiner ist als die maximal erlaubte Anodenverlustleistung, kann das Schirmgitter sehr leicht zum **Glühen** gebracht werden. Weil es aber vom Anodenblech umschlossen wird, ist ein glühendes Schirmgitter sehr viel schlechter zu sehen als ein glühendes Anodenblech. Als Zahlenbeispiel: Bei der 6L6-GC ist $P_{a,max}$ mit 30 W angegeben, $P_{g2,max}$ mit 5 W. Bei Vollaussteuerung ($U_B = 400$ V, $U_{g2} = 350$ V) wird die Anode mit 19 W belastet, das Schirmgitter aber mit 15 W! Eine derart hohe Überlastung darf nur sehr kurzzeitig bestehen bleiben, sonst schmelzen die Schirmgitterdrähte, und die Röhre ist kaputt. Bei der Schaltungsentwicklung misst man deshalb auch die Schirmgitterverlustleistung, und sieht ggf. Maßnahmen zu deren Begrenzung vor. Ein probates Mittel ist der **Gitter-Vorwiderstand**, der aber zwei Funktionen hat: Er soll HF-Schwingungen verhindern, und er kann u.U. (je nach Dimensionierung) die Schirmgitterspannung bei großem Gitterstrom verringern. Bei einigen alten **Marshall-Verstärkern** fehlt der Schirmgitter-Vorwiderstand völlig, da ist die Röhren-Lebensdauer dann manchmal extrem kurz. Insbesondere, wenn die **EL 34** zum Einsatz kommt. Denn die ist eine echte Pentode, deren Schirmgitterstrom leicht 2 – 3mal so groß wie derjenige der 6L6-GC werden kann. Ist ein Schirmgitter-Vorwiderstand vorhanden, hat er häufig 1 k Ω . Das wird gegen HF-Schwingungen als ausreichend empfohlen, reduziert die Schirmgitterverlustleistung aber u.U. nicht weit genug. Ehe man nun jedoch 5 k Ω einlötet, sollte man daran denken, dass dies Auswirkungen auf die Leistung und den Klang haben wird. Sound or Safety – make your choice.

* Gegentakt-AB-Betrieb; im A-Betrieb ist in Ruhe die Röhren-Belastung am größten.

Einen übersichtlichen Zusammenhang zwischen Strömen und Spannungen erhält man mit dem Ausgangskennlinienfeld (Abb. 10.5.30). Veränderung der Aussteuerung verschiebt den Arbeitspunkt auf der Arbeitsgeraden, und verändert die Anodenverlustleistung. Dass bei dieser Dimensionierung die Arbeitsgerade die Leistungshyperbel schneidet, und ein Spitzenwert von 44 W entsteht, ist unkritisch, weil der Arbeitspunkt nur während einer Halbwelle in das Gebiet hoher Verlustleistungen vordringt. Im schlimmsten Fall (Rechteck) wird die Röhre mit 22 W belastet, das ist immer noch deutlich unter der Grenzbelastbarkeit von 30 W.

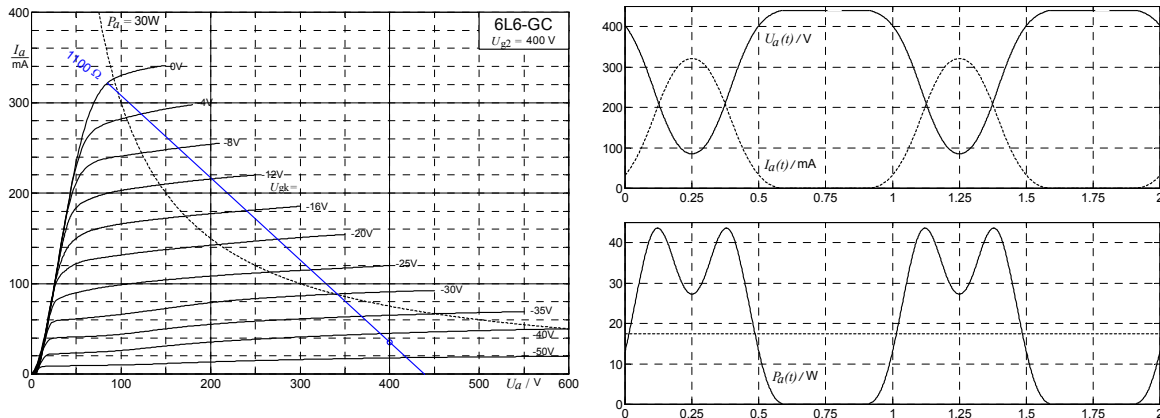


Abb. 10.5.30: Ausgangskennlinienfeld der 6L6-GC für 1.1 k Ω Lastwiderstand, sowie Zeitfunktionen für sinusförmige Aussteuerung. Bei einer Gegentakt-Endstufe mit Ausgangsübertrager würde die Anodenspannung nicht (wie hier angedeutet) auf 440 V begrenzt werden, sondern bis auf ca. 700 V ansteigen (Kap. 10.5.3).

In Abb. 10.5.30 wird ein reeller 1.1-k Ω -Lastwiderstand zugrunde gelegt (vergl. Kap 10.6). Ändert man diesen Wert, ändert sich die Steigung der Arbeitsgeraden, und damit die Röhrenbelastung. Vergrößern des Lastwiderstandes (flachere Arbeitsgerade) reduziert Anodenstrom und Anodenverlustleistung, Verkleinern erhöht die Anoden-Belastung: Eine für 8 Ω spezifizierte Endstufe sollte deshalb nicht über längere Zeit an 4 Ω betrieben werden!

Ganz andere Funktionen findet man beim **Schirmgitterstrom** (Abb. 10.5.31). Unter der Annahme, dass die Schirmgitterspannung konstant bleibt, erreicht die maximale Schirmgitter-Verlustleistung 125 W – das ist (wenn überhaupt) nur im Impulsbetrieb erlaubt, denn lt. Datenblatt sollen 8 W nicht überschritten werden. Auch mit 1.5 k Ω zwischen der Spannungsquelle (wieder 350 V) und Schirmgitter wird für $U_a = 0$ die maximal zulässige Schirmgitter-Verlustleistung erheblich überschritten: 20 W. Ähnliches gilt für die 6L6-GC (Abb. 10.5.32). Die Frage ist allerdings: Kann im realen Einsatz dieser Zustand überhaupt erreicht werden?

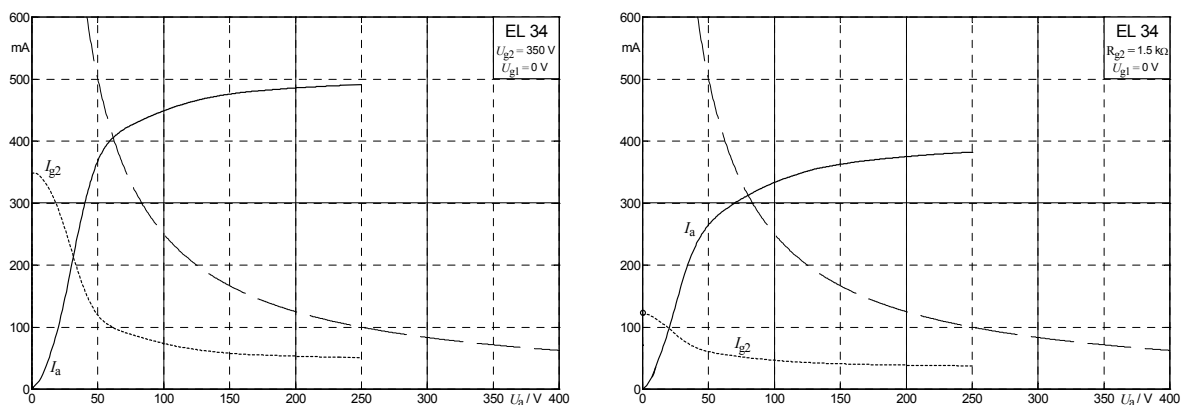


Abb. 10.5.31: Anoden- und Schirmgitterstrom in Abhängigkeit von der Anodenspannung.

In **Abb. 10.5.32** sind in Abhängigkeit von einer Rechteck-Aussteuerung die mittlere Anoden- und Schirmgitterverlustleistung aufgetragen. Die höchste Anodenverlustleistung P_a entsteht bei $U_{g1,max} = -14$ V, für $R_a = 1100 \Omega$ ergibt sich als Leistungsmittelwert $P_a = 22$ W, das ist noch sicher unter der Belastungsgrenze. Mit größerem Lastwiderstand (1500Ω) erniedrigt sich die Anodenbelastung, so dass generell gilt: **Höherohmige Lasten entlasten die Anode**. Die maximale Schirmgitterverlustleistung P_{g2} wird bei $U_{g1,max} = 0$ erreicht, also bei voll übersteuerter Endröhre. Für 1100Ω Last ergibt sich P_{g2} damit zu 8 W, für 1500Ω Last entstehen bereits 14.5 W – das ist nun fast das Dreifache der erlaubten Schirmgitterbelastung. Bei Übersteuerung gilt also: **Höherohmige Lasten belasten das Schirmgitter**.

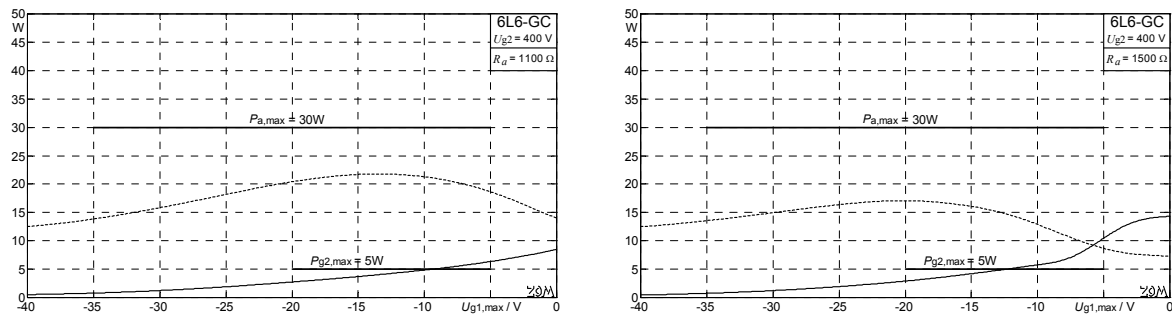


Abb. 10.5.32: Symmetrische Rechteck-Aussteuerung um den Arbeitspunkt -45 V / 30 mA, Anoden- und Schirmgitter-Verlustleistung (zeitliche Mittelwerte). Kein Schirmgitterwiderstand.

Der Röhrenverstärker ist also keinesfalls völlig immun gegen **Fehlanpassung**: An den $8\text{-}\Omega$ -Ausgang sollte auch ein $8\text{-}\Omega$ -Lautsprecher angeschlossen werden! Bei einem zu kleinen Lastwiderstand (z.B. zwei $8\text{-}\Omega$ -Boxen parallel = 4Ω) würde sich die Anodenbelastung vergrößern, ohne dass es allerdings zum sofortigen Ausfall kommt. Denn zum einen bestehen hier Reserven, zum andern verringert sich durch die erhöhte Belastung (je nach Netzteil) die Betriebsspannung, wodurch die Zunahme der Anodenbelastung nicht ganz so groß ist. Ein zu großer Lastwiderstand (z.B. $16\text{-}\Omega$ -Box an $8\text{-}\Omega$ -Ausgang) vergrößert die Schirmgitterbelastung, insbesondere, wenn die Endstufe häufig übersteuert wird. Und dabei gibt es nur wenig Spielraum, wie jeder gleich bemerkt, der die Endstufe unter **Lautsprecherbelastung** mit einem Sweep durchmisst: Jeder Lautsprecher wird bei hohen Frequenzen nämlich hochohmig, auch wenn er nominell richtig angepasst ist (Kap. 11). An einer derartig hochohmigen Last kann schon eine einzige Messung zum sofortigen Ausfall der Endröhren führen. Dem Datenblatt kann man für einen gegenüber dem Optimalfall verdoppelten Lastwiderstand die statische Schirmgitter-Verlustleistung mit 40 W entnehmen: $P_{g2} = 0.1 \text{ A} \cdot 400 \text{ V}$ (bei $U_{g1} = 0$ V). Weil die Röhre nur während einer Halbwelle leitet, verbleiben im Mittel 20 Watt – maximal zulässig sind 5 Watt. Und natürlich sollte man daran denken, dass die Lautsprecherimpedanz nicht nur auf das Doppelte des Nennwertes steigen kann: Auch das Zehnfache ist möglich.

Angesichts dieser Daten bestätigt sich der Eindruck, dass die klassischen Endstufenschaltungen nicht für Hardrock, sondern für Radioprogramme entwickelt wurden. Kann ja auch gar nicht anders sein: Vor 70 Jahren war der Einsatzort einer $6L6$ in den allermeisten Fällen ein Radioapparat (oder ein Kinoverstärker), und nur ganz selten wurde sie in einen der ersten Gitarrenverstärker gesteckt. Und auch dort hatte sie ein eher beschauliches Leben, weil der Rocker, der "alle Regler auf 10 " dreht, zu diesen Zeiten noch gar nicht geboren war. Der kam erst später – und spielte dann auf Verstärkern, deren Schaltungen mit unglaublicher Beharrlichkeit (bzw. Ignoranz) weiterhin so gebaut wurden, als müssten sie moderate Tanzmusik unverzerrt wiedergeben. In einem Marshall 1987 stecken 2 EL34 – aber keine Schirmgitterwiderstände. Wohl dem, der nach jedem Auftritt für 50 – 100 Euro neue Röhren kaufen kann.

Man kann unterstellen, dass die Entwickler früher "Urschaltungen" bestrebt waren, zumindest im Leerlauf die Röhren nicht allzu sehr zu überlasten. Aber nur wegen des Leerlaufbetriebs wird kein Gitarrist einen Verstärker kaufen, irgendwann wird aufgedreht. Wie sich dabei dann die Belastung der Röhren ändert, hängt von mehreren Parametern ab: Von der Aussteuerung, von der Lautsprecherimpedanz, von den verwendeten Röhren, und von der Schaltungsvariante. Um mit dem letzten Punkt zu beginnen: Die meisten Verstärkerschaltungen durchlebten eine Weiterentwicklung, die oft von der Forderung nach größerer Leistung getrieben war. Als Fenders Twin Amp 1952 auf den Markt kam, war er mit 18 W spezifiziert. Nur 3 Jahre später wurden daraus 30 W, dann 60 W, 80 W, und schließlich über 100 W. Im 5C8-Twin liegen 370 V an den Anoden, im AC568-Twin 470 V. Ein VOX AC-30 mutet seinen EL-84 in Ruhe je ca. 14 W zu, sofern er mit der in Anfangszeiten üblichen Gleichrichterröhre betrieben wird. Tauscht man diese gegen Siliziumdioden aus, steigt die Anoden-Ruhebelastung auf 17 W. Marshall-Verstärker gibt es sowohl ohne, als auch mit Schirmgitterwiderständen (250 Ω , oder 470 Ω , oder 1 k Ω), als Röhren kamen KT-66, 6L6-GC, EL-34, KT-88 oder 6550 zum Einsatz; die Röhrenbelastung scheinbar gleicher Verstärker kann deshalb deutlich differieren.

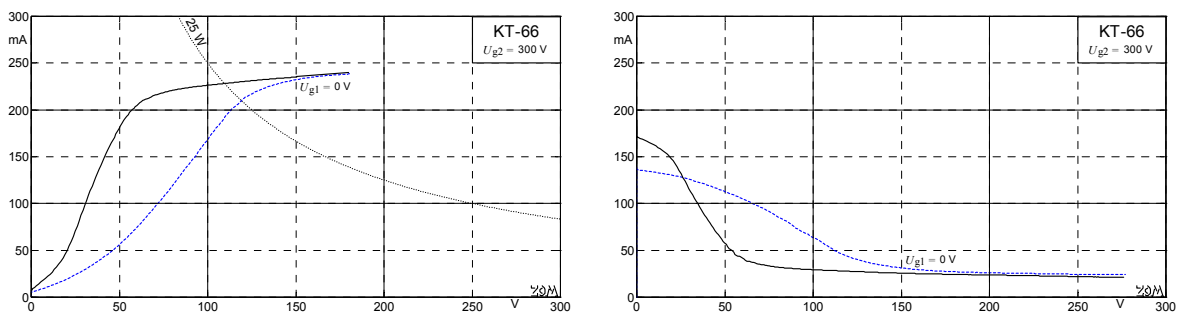


Abb. 10.5.33: Kennlinien zweier als KT-66 verkaufter Röhren; Anodenstrom (links), Schirmgitterstrom (rechts).

Genauso unspezifisch sind gelegentlich Röhrenbezeichnungen: Die in **Abb. 10.5.33** dargestellten Messkurven wurden an zwei neuen KT-66 ermittelt. Sowohl bei den maximal erreichbaren Verstärker-Ausgangsleistungen, als auch bei den Röhrenbelastungen zeigen sich hier wesentliche Unterschiede, obwohl es sich doch um denselben Röhrentyp handeln sollte. Die meisten der heute verkauften Röhren kommen mit ihren Daten zwar schon in die ungefähre Nähe ihrer Datenblattangaben, die Menge des vorsätzlich verkauften "selektierten" Ausschusses ist aber leider nicht unbedeutend. Konziliant formuliert.

Dass die Röhrenbelastung auch von der Lastimpedanz abhängt, bedarf keiner großen Worte: Lautsprecherwiderstände sind stark frequenzabhängig und komplex (Kap. 11.2), die Arbeitsgerade verformt sich deshalb im realen Betrieb zu einer Ellipse, und alle für Nennbelastung berechneten Verlustleistungen verlieren ihre Bedeutung. Hinzu kommt, dass die Ansteuerung so gut wie nie der lehrbuchmäßigen Sinusform entspricht: Gitarrenendstufen werden häufig übersteuert. Nicht immer, zugegeben, aber selbst bei vermeintlich "cleanem Sound" kann der Saitenanschlag die Endstufe kurzzeitig in die Begrenzung treiben. Nicht wenige Gitarristen schätzen ihren Röhrenverstärker gerade wegen seiner Endstufenbegrenzung – die ist, im Gegensatz zur Vorstufenverzerrung, nämlich nicht mit kleinen Effektgeräten nachzumachen. Nun fließt bei Übersteuerung aber Gitterstrom, wodurch die Koppelkondensatoren polarisiert werden, und deshalb driftet der Arbeitspunkt aussteuerungsabhängig hin und her – ein Effekt, der typischerweise nicht im Schaltungstechniklehrbuch steht. Dort findet man Maßnahmen, um den Klirrfaktor unter 1% zu drücken, dort wird die komplette Dimensionierung einer HiFi-Endstufe vorgerechnet – kontinuierliche Übersteuerung ist hingegen kein Thema. Und es war auch keins anno 1940, bei den Verstärker-Ahnen. Nur im Bühnenalltag ist es heute eines.

Um nicht auch der Versuchung zu erliegen, das Betriebsverhalten eines Gitarrenverstärkers nur im linearen Bereich zu diskutieren, wird nun aufgedreht – proud and loud. Messobjekt ist ein Fender Super-Reverb, dessen zwei 6L6-GC so ungefähr 40 W produzieren. Oder mehr, wenn man übersteuert. Man übersteuert: **Abb. 10.5.34**.

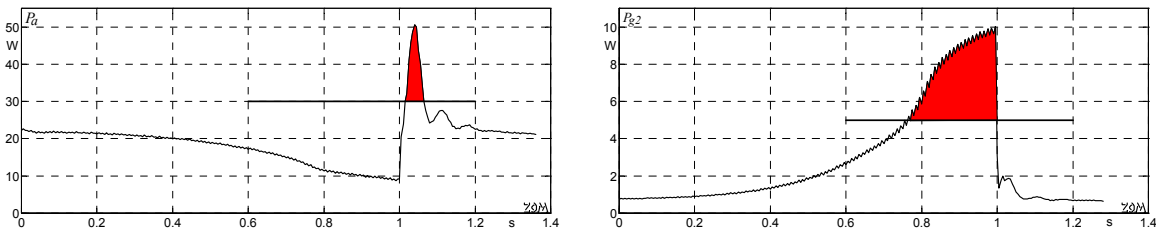


Abb. 10.5.34: Gemittelte Anoden- und Schirmgitter-Verlustleistung einer 6L6-GC, Super-Reverb. $I_{\text{Bias}} = 50 \text{ mA}$. 1-kHz-Sinuston, dessen Pegel von 0 – 1 s um 20 dB zunimmt; bei $t = 1 \text{ s}$ wird abgeschaltet. Reelle Belastung: 8Ω bei der Anoden-Verlustleistungsmessung, 16Ω bei der Schirmgitter-Verlustleistungsmessung.

Ausgesteuert wird mit einem Sinuston, dessen Pegel von 0 – 1 s linear um 20 dB anwächst, bei $t = 1 \text{ s}$ wird abgeschaltet. Im letzten Viertel der Messung ist die Endstufe übersteuert, was der **Anode** nichts ausmacht: Ihre Belastung sinkt mit zunehmender Aussteuerung auf Werte um 10 W. Nach (!) dem Ausschalten des Sinustones entsteht allerdings eine kurzzeitige Anodenbelastung von 50 W – jetzt wird die Polarisierung der Koppelkondensatoren ausgeglichen. Die Röhre geht deswegen nicht sofort kaputt, da diese Überlastung nur für kurze Zeit stattfindet. Aber: Wenn derartige Kurzzeit-Überlastungen zu schnell hintereinander auftreten, stellen sie u.U. schon ein Problem für die Röhre dar. Und mit 50 W ist's nicht getan: Entsprechende Messungen mit realer Lautsprecherbelastung ergaben Leistungsspitzen von über 100 W!

Die Schirmgitter-Verlustleistung zeigt ein ganz anderes Verhalten: Sie nimmt mit wachsender Aussteuerung zu, und überschreitet in etwa am Übersteuerungspunkt den zulässigen Höchstwert von 5 W. Sobald also die Endstufe übersteuert wird, ist das **Schirmgitter** in Gefahr. Könnte man einen der Schaltungs-Urväter zu diesem Problem befragen, würde er vermutlich sagen: "Die Endstufe übersteuert man auch nicht!" Doch, heutzutage schon. Und dem Gegenargument, der Super-Reverb sei doch ein unverzerrt zu spielender Rhythm-Amp, kann man locker entgegentreten: Seine Endstufenschaltung entspricht dem Fender-Standard der 60er-Jahre – die Bassman-Endstufe (als Beispiel) ist in keiner Weise übersteuerungsfester. Und damit war Fender nicht etwa im Ramsch-Sektor gelandet: Das war lehrbuchmäßig. Damals.

Gemeinsame Ursache für Anoden- und Schirmgitterüberlastung ist die Übersteuerung, die genauen Wirkmechanismen sind aber elektrodenspezifisch. Im Regelfall nimmt bei der Endröhre mit steigendem Anodenstrom die Anodenspannung ab; bei Vollaussteuerung ($U_{g1} = 0$) ist die Anodenspannung minimal. Damit wird die Anode aber zu einem unattraktiven Landeplatz für die (von der Kathode kommenden) Elektronen – diese fühlen sich von dem auf hohem Potential (auf hoher Spannung) liegenden Schirmgitter mehr angezogen, sie landen (bei Vollaussteuerung) auf den dünnen Schirmgitterdrähten, die sich ob dieses Bombardements prompt erhitzen und zu glühen beginnen. Selbst Datenblätter scheuen sich ja nicht, für $U_a = 0$ Schirmgitter-Verlustleistungen von 100 W und mehr anzugeben – und gleichzeitig dessen Maximalbelastbarkeit mit 5 W zu spezifizieren. Dies ist kein Widerspruch, denn bei Impulsbelastung ist die Leistungsgrenze höher. Wie hoch, wird allerdings nicht angegeben. Ganz andere Prozesse sind für die Anode maßgeblich: Solange der Lastwiderstand nicht allzu niederohmig ist, droht ihr auch während starker Übersteuerung keine Gefahr. Jedoch verändern die Koppelkondensatoren während einer Übersteuerung ihre mittlere Gleichspannung, und beim anschließenden Ausgleichsvorgang kann's gefährlich werden.

Dieser Ausgleichsvorgang hat seine Ursache im Phaseninverter (Kap. 10.4). Nur bei mäßiger Aussteuerung sind die beiden vom Phaseninverter produzierten Signale betragsgleich und gegenphasig. Bei starker Aussteuerung verschieben sich die Arbeitspunkte im Phaseninverter, und die Koppelkondensatoren verändern ihre mittlere Gleichspannung. Schaltet man das Steuersignal ab, kehren die Kondensatorpotentiale* innerhalb von ca. 2 s auf ihren Ruhewert zurück, und hierbei entsteht eine endröhrenspezifische Belastungsspitze.

Ein weiteres Problem kann an den Grenzen des Übertragungsbereichs auftreten: Auch bei sehr tiefen bzw. hohen Frequenzen sind die beiden Ausgangssignale des Phaseninverters nicht mehr exakt gegenphasig. Der Ausgangsübertrager kann sein widerstandstransformierendes Magnetfeld aber nur dann effizient aufbauen, wenn sich die Anodenströme unterstützen. Leiten beide Endröhren gleichzeitig, wirkt der Übertrager als bifilar gewickelte Spule – mit dem Ergebnis, dass die Induktivität null wird, und als Anodenlastwiderstand nur noch der Kupferwiderstand der Primärwicklung übrigbleibt (z.B. 50 Ω): Die Anode wird u.U. überlastet.

In **Abb. 10.5.35** ist nochmals das Ausgangskennlinienfeld der 6L6-GC dargestellt, mit einer an einer JJ-6L6-GC gemessenen I_a/U_a -Kennlinie. Mit 1200 Ω Lastwiderstand wird ziemlich genau das "Knie" der Kurve getroffen, die zugehörige Schirmgitterbelastung beträgt in diesem Punkt 350 V \cdot 46 mA = 16 W. Vergrößert man den Lastwiderstand auf 6000 Ω , erhöht sich die maximale Schirmgitterbelastung auf 54 W. Unter der Annahme, dass diese Maximalbelastung nur während einer Halbwelle auftritt, ist dieser Wert zu halbieren, aber die verbleibenden 27 W überschreiten den erlaubten Maximalwert (5 W) immer noch erheblich. 1200 Ω ist der ungefähre Lastwiderstand für Nenn-Abschluss, also 8 Ω beim Super-Reverb. Die Lautsprecher-Messungen zeigen aber, dass sowohl bei Resonanz, als auch hochfrequent, der Betrag der Impedanz größer ist als die Nennimpedanz. Einer primären Belastung von 6000 Ω entspricht ein ausgangsseitiger Lastwiderstand von 40 Ω , das ist mit Lautsprecherbelastung erreichbar. 15-kHz-Dauertöne wird eine Gitarre üblicherweise zwar nicht erzeugen, lang ausgehaltene Töne im Bereich der Resonanz sind hingegen möglich – und gefährlich.

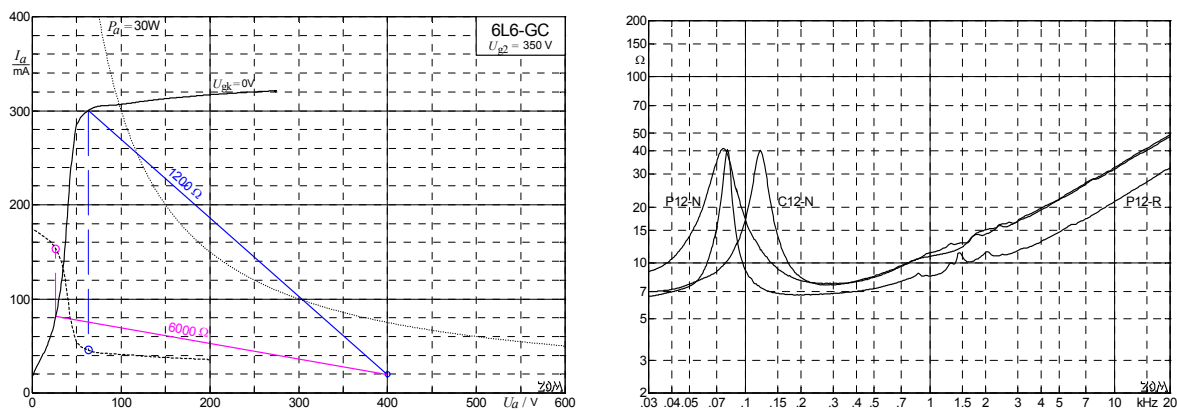


Abb. 10.5.35: Ausgangskennlinienfeld einer 6L6-GC (JJ) für zwei verschiedene Anodenbelastungen (links), Lautsprecherimpedanzen (Jensen, rechts). Anodenstrom (—) bzw. Schirmgitterstrom (---) für $U_{g1} = 0$.

In Abb. 10.5.35 ist der Schirmgitter-Vorwiderstand zu 0 angenommen, um datenblattkonform zu bleiben, dafür ist die Schirmgitterspannung mit nur 350 V angesetzt. Ein fendertypischer Widerstandswert wäre 470 Ω , allerdings an ca. 400 – 450 V angeschlossen. In erster Näherung erhält man damit ähnliche Schirmgitterbelastungen, im Detail findet man Unterschiede, die aber nicht mehr aufs Watt genau berechenbar sind.

* Theoretisch dauert diese asymptotische Annäherung unendlich lange; 2 s ist ein spezifischer Richtwert.

Häufig sind die Schirmgitter-Widerstände am ersten oder zweiten Netzteil-Elko angeschlossen. Diese Kondensatoren laden sich ohne Aussteuerung auf 400 – 450 V auf; mit Aussteuerung nimmt die Spannung etwas ab (bricht zusammen). Wie stark die Spannung abnimmt, hängt vom Lastwiderstand und vom Netzteil-Innenwiderstand ab: Stärker bei Netzteilen mit Gleichrichterröhre, weniger bei Siliziumdioden. Ein Netzteil mit Gleichrichterröhre und klein dimensionierten Elkos (20 μF) schont die Schirmgitter, Siliziumdioden und 100 μF fordern sie. Leider geben die Datenblätter der üblichen Endröhren keinerlei Hinweise zu den thermischen Zeitkonstanten der Schirmgitter, jegliche Impulslast-Berechnung bleibt somit spekulativ. Erst mit dem Siegeszug (?) der Leistungstransistoren halten Impulsdigramme Einzug in die Datenblätter. So wird z.B. beim 2N3055 (aka BD-130) für 20°C Gehäuse Temperatur die Dauerbelastbarkeit mit 100 W angegeben, die 1-ms-Belastbarkeit mit 320 W, bei 30 μs sind's gar 900 W. Bei der 6L6-GC findet man als Schirmgitterbelastungs-Grenzwert 5 W, ohne weitere Einzelheiten. Bei Halbleitern gibt es zumindest (so man nicht viel rechnen möchte) die grobe Richtlinie, dass sich die Lebensdauer verdoppelt, wenn die Betriebstemperatur um 10°C gesenkt wird. Bei Verstärkerröhren ist man auf völlig unzuverlässige Spekulationen angewiesen. Wie lange hielt eine Mullard 100% Schirmgitter-Überlastung aus, und was schafft ihr modernes chinesisches Remake? Bei dem man den bösen Verdacht haben könnte, dass vor allem die Optik wichtig ist (brown base!). Aber Obacht: Mit derartigen Vorurteilen könnte man den Sinofaktoren auch sehr Unrecht tun: Nicht alles, was aus China kommt, ist schlecht. Aber halt auch: ... ist gut – eben wie bei jedem anderen Land. Hat die Tungsol-Entwickler (USA) der 5881 in den Vierziger Jahren wirklich interessiert, wie stark das Schirmgitter im Gitarrenverstärker überlastet wird, und wurde deshalb diese Röhre als "die bessere 6L6" vermarktet? Noch 1962 spezifiziert ihr Datenblatt: "*Maximum Grid #2 Dissipation: 3 Watts*". So richtig viel ist das aber auch nicht, oder?

Kauft man heute einen handverdrahteten Edel-Verstärker, legt man 4000 oder 5000 oder noch mehr Euros auf den Tisch. Ohne Lautsprecher, natürlich. Vielleicht rühmt sich der Hersteller, dass er nur Ausgangstrafos verwendet, die Original-Isolierpapiere (mit eher schlechter Durchschlagsfestigkeit) und leicht angerostete Trafobleche haben – wegen des 'braunen' Klangs? Vielleicht baut er eine 2-A-Sicherung in die Netzzuleitung (wie im Fender-Original) – ohne zu wissen, dass beim Wechsel von 110 V auf 220 V der Sicherungswert zu halbieren ist? Hauptsache: Original. Oder er rühmt sich, genau dieselbe Schaltung zu verwenden, die den Bassman (Deluxe, Twin, JTM, oder wie sie alle heißen mögen) berühmt gemacht hat. Mit all ihren gitterzerstörenden Eigenschaften. Es ist schon erstaunlich, dass die ältesten Kühe die heiligsten sind. Vielleicht waren es ja die CBS-Ingenieure, die mit dem Einbau ihrer Schutzschaltungen eben diese in Misskredit brachten. Ein Gitarrenverstärker klingt am besten, wenn er pro Abend einen Satz Endröhren verbraucht – unumstößliches Credo.

Rating Systems [Langford-Smith & RCA-Receiving-Tube-Manual]:

The **absolute maximum system** originated in the early days of valve development and was based on the voltage characteristics of battery supplies. Battery voltages could fall below their nominal values but seldom appreciably exceeded them, so that valve maximum ratings set on the basis of specified battery voltages were absolute maximum ratings that should not be exceeded under any condition of operation.

The **design center system** was adopted in the U.S.A. by the Radio Manufacturers Association in 1939 for the rating of receiving valves and since then has become the standard system for rating most receiver types of American design. Under the design center system ratings are based on the normal voltage variations which are representative of those experienced with [...] power lines. Design center ratings should not be exceeded under normal operation. These ratings allow for normal variations in both tube characteristics and operating conditions.

The **design maximum system** was adopted for receiving tubes in 1957. Design maximum ratings should not be exceeded under any condition of operation. These ratings allow for normal variations in tube characteristics, but do not provide for variations in operating conditions.