

Welche ECC83 darf's denn sein?

Manfred Zollner

Zur ECC83 (sowie zu den Vergleichstypen 12AX7 und 7025) nennen die Datenblätter identische Betriebs- und Grenzdaten. Trotzdem fördern sowohl Messungen als auch Hörversuche Unterschiede zutage. Nicht nur zwischen Röhren verschiedener Hersteller, sondern auch innerhalb der Röhren eines Herstellers – trotz angeblicher Selektion. Die Ursache ist darin zu sehen, dass bei der Selektion zu wenig Wert auf das Großsignalverhalten gelegt wird, dass Aussteuergrenzen und Gitterstrom nicht hinreichend kontrolliert werden. Insbesondere im Kathodenfolger kommt es dann zu wesentlichen Unterschieden im Betriebsverhalten, d.h. im Klang.

Welche Röhre steckt man in den Plexi? Die 7025-Highgrade mit druckvollen Bässen und seidigen Höhen? Oder die 12AX7A-C mit tighten Bässen und seidigen, detaillierten Höhen? Die 12AX7LPS mit tighten Bässen und jeder Menge Treble? Oder doch die Siemens ECC83? Bzw. Mullard, Philips, Telefunken, Sovtek, JJ, EH, SED..., oder wie sie sonst heißen mögen. Fragen wir doch einfach die Experten, die müssten uns das ja sagen können. Können sie: "*Völlig wurscht*", schreibt uns da etwa der pragmatische Praktiker, "*jede Röhre hat ihren eigenen Sound*", meint hingegen der allmonatlich dichtende Kolumnist. Ja was denn nun?

Beide haben unrecht! Beschränken wir uns zunächst auf die Eingangsröhre, um die Vielfalt in Grenzen zu halten. Sie verstärkt, so sie eine 12AX7 (bzw. ECC83, bzw. 7025) ist, ungefähr 50fach, und beginnt zu verzerren, wenn die Eingangsspannung ungefähr 1 V überschreitet. Das vom Halstonabnehmer einer Standard-Strat abgenommene Rhythmusspiel wird sie fast nicht verzerren, den vom Brachial-Motoriker mit dem Super-Humbucker erzeugten Power-Chord schon. Verzerrt die Röhre nicht, ist sie sehr einfach zu beschreiben; verzerrt sie, muss man etwas genauer hinsehen. Solange die Eingangsröhre ohne wesentliche (d.h. hörbare) Verzerrung arbeitet, ist ihre Verstärkung der wichtigste Parameter. Dass sie mikrofonisch ist, und Rauschen, Brummen oder Knistern produzieren kann, sei angemerkt, aber hier nicht vertieft. Alle Röhren können laut Datenblatt ab 0 Hz bis in den MHz-Bereich arbeiten, das sollte reichen. Dass im Gitarrenverstärker der Übertragungsbereich dann doch viel kleiner ist, liegt an der peripheren Beschaltung (Koppel-C, Widerstandsniveau, Röhren- und Aufbaukapazitäten), und nicht primär an der Röhre. Die Verstärkung der 12AX7 streut aufgrund fertigungsbedingter Toleranzen um ungefähr ± 1 dB, das kann man im ersten Schritt ignorieren. Und weil auch die Röhrenkapazitäten etwas toleranzbehaftet sind, wird die obere Grenzfrequenz geringfügig variieren – und das war's. Zumindest bei annähernd verzerrungsfreiem Betrieb.

Bei Übersteuerung ändert sich die Situation: Mit zunehmend (positiver) Eingangsspannung beginnt Gitterstrom zu fließen, und deshalb wird der Eingangswiderstand immer kleiner. In der "Physik der Elektrogitarre" [<https://hps.hs-regensburg.de/~elektrogitarre>] sind hierzu viele Details erläutert, die Kurzfassung lautet: Je positiver die Eingangsspannung, desto niederohmiger der Röhreneingang, und desto mehr wird der Tonabnehmer belastet und seine Spannung verzerrt. Mag der Pickup mit seinen 5.8 k Ω auch niederohmig erscheinen, bei seiner Resonanz (um 3-4 kHz) wird er hochohmig. Entsprechende Messungen dürfen folglich nicht mit dem 50- Ω -Laborgenerator durchgeführt werden, sie erfordern einen Spezialgenerator mit Pickup-typischem Innenwiderstand.

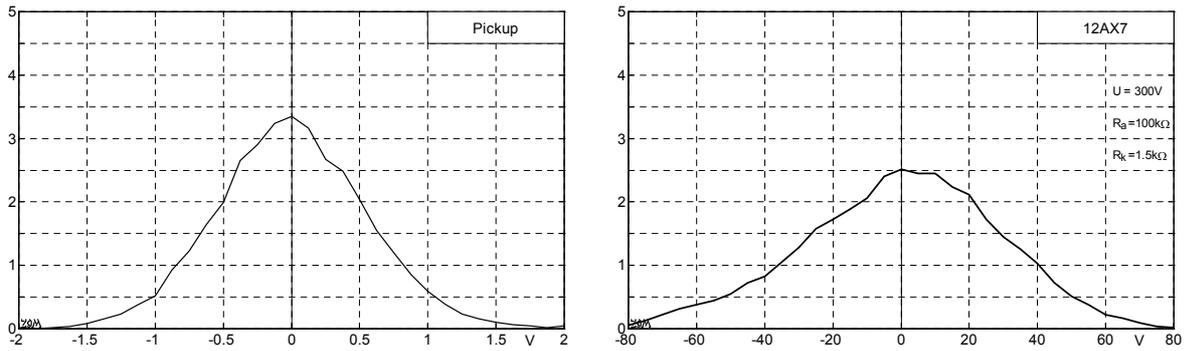


Abb.1: Histogramm der Pickup-Leerlaufspannung (links) und der Anodenwechselspannung (rechts).

Für die folgenden Messungen wurde eine Les Paul (R9) verwendet, auf der ein Akkord in schneller Folge 7mal gespielt wurde. Die Häufigkeitsverteilung (das Histogramm) der mit dem Rhythmus-Pickup aufgenommenen Gitarrensprechung ist in **Abb.1** links dargestellt. Die Höhe der Kurve zeigt die Häufigkeit, mit der die am unteren Bildrand skalierten Spannungen vorkommen. Die absoluten Zahlen (0 – 5) haben keine Bedeutung, es geht nur um die Verhältnisse: Spannungen um 0 V sind häufig, Spannungen über +1.5 V bzw. unter –1.5 V sind selten. Rechts daneben die Anodenwechselspannung: Von 0 V bis +80 V mit abnehmender Häufigkeit, ebenso von 0 V bis –80 V. Die Röhrenbeschaltung ist Fender-typisch, könnte aber auch aus anderen Verstärkern stammen: 100 k Ω Anodenwiderstand, 1.5 k Ω Kathodenwiderstand (mit 25 μ F überbrückt).

Jetzt wird die Röhre gewechselt: Anstelle der für Abb. 1 verwendeten Mazda-ECC83 kommen nun: Brimar, Valvo, Siemens, Sovtek, TAD-12AX7AC, TAD-ECC83WA, Ultron, RSD. Verschiedene ECC83 (bzw. 12AX7), deren Histogramme in **Abb. 2** links dargestellt sind. Hier werden Unterschiede sichtbar – aber noch nicht hörbar. Egal, welche Röhre man einsteckt, sie klingen alle gleich. Doch daraus jetzt abzuleiten, dass zwischen all diesen Röhren *generell* kein Unterschied besteht, das wäre zu kurz gesprungen. Denn nicht in jedem Verstärker wird die ECC83 mit 1.5 k Ω Kathodenwiderstand betrieben.

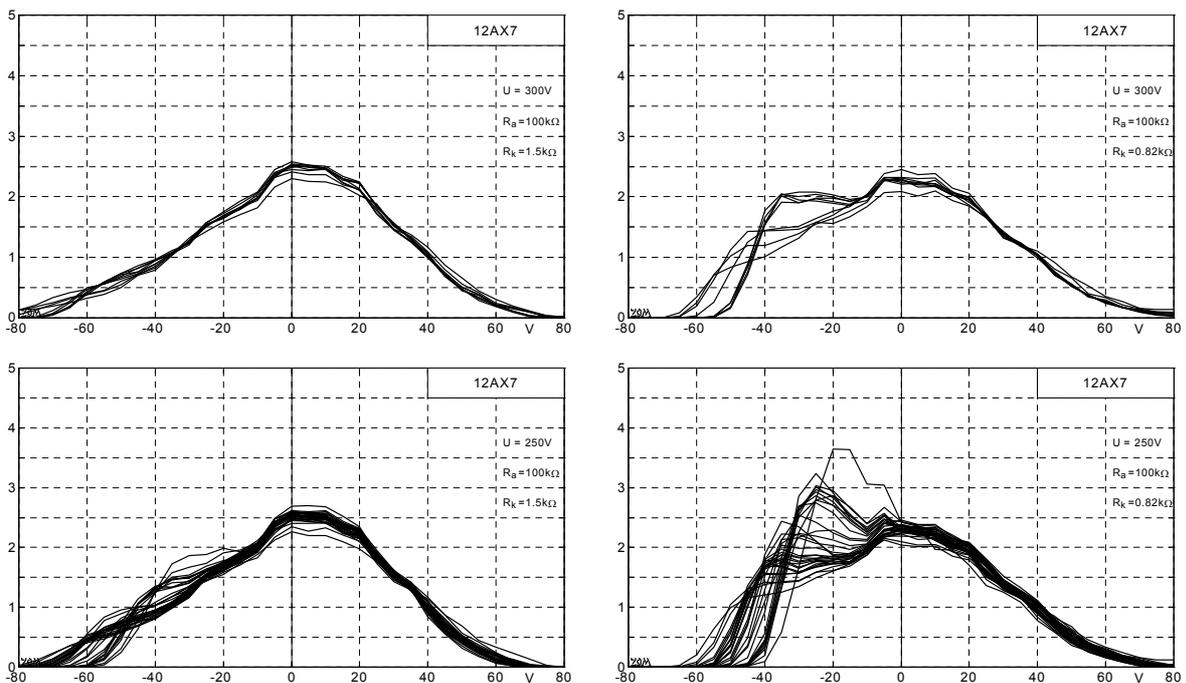


Abb. 2: Histogramm der Anodenwechselspannung für $R_K = 1.5 k\Omega$ (links) und 820Ω (rechts).

In einem **Marshall** z.B. gibt es für die ECC83 drei verschiedene Schaltungsvarianten: Mit Kathodenwiderständen von 1.5 k Ω , 820 Ω , und 2.7 k Ω . Ändert man den Kathodenwiderstand von 1.5 k Ω auf 820 Ω , wie im rechten Bild der Abb. 2 dargestellt, so erkennt man deutlichere Begrenzungen zu negativen Anodenwechselspannungen hin, und die sind stark röhrenabhängig, und letztlich auch hörbar. Typspezifische Ergebnisse zeigt **Abb. 3**: Die TAD ECC83-WA begrenzt die negativen Anodenwechselspannungen früher (verzerrt mehr), die TAD 12AX7-AC verzerrt weniger (streut aber etwas mehr). Die Brimar ECC83 ähnelt der TAD 12AX7-AC, die Ruby 7025 streut sehr stark.

Die Frage "Hat nun jede Röhre ihren eigenen Klang?" darf man folglich weder mit nein, noch mit ja beantworten. Sondern mit: Unverzerrt gespielt nein, verzerrt gespielt u.U. ja. Was uns sofort zur nächsten Frage führt: "Und welche der Röhren verzerrt am stärksten"? Bei dieser Stichprobe ist es die Ruby 7025. Bei dieser Stichprobe! Nicht jede Ruby-7025 reagiert auf diese Weise, die Streuungen sind groß – und der Händler spezifiziert seinen Testmodus nicht. Doch es gibt eine billige Methode, von den Herstellungstreuungen unabhängig zu werden: Anstelle des Kathodenwiderstandes ein Poti einbauen (Sicherheitsvorschriften beachten!). Sehr alte Röhren haben oft einen erhöhten Gitterstrom – auch das ist kein Grund, viel Geld auszugeben, das kann auch mit einer zusätzlichen Diode (und ggf. ein paar Widerständen) erreicht werden. Und schon verzerrt die Schaltung in gewünschter Weise.

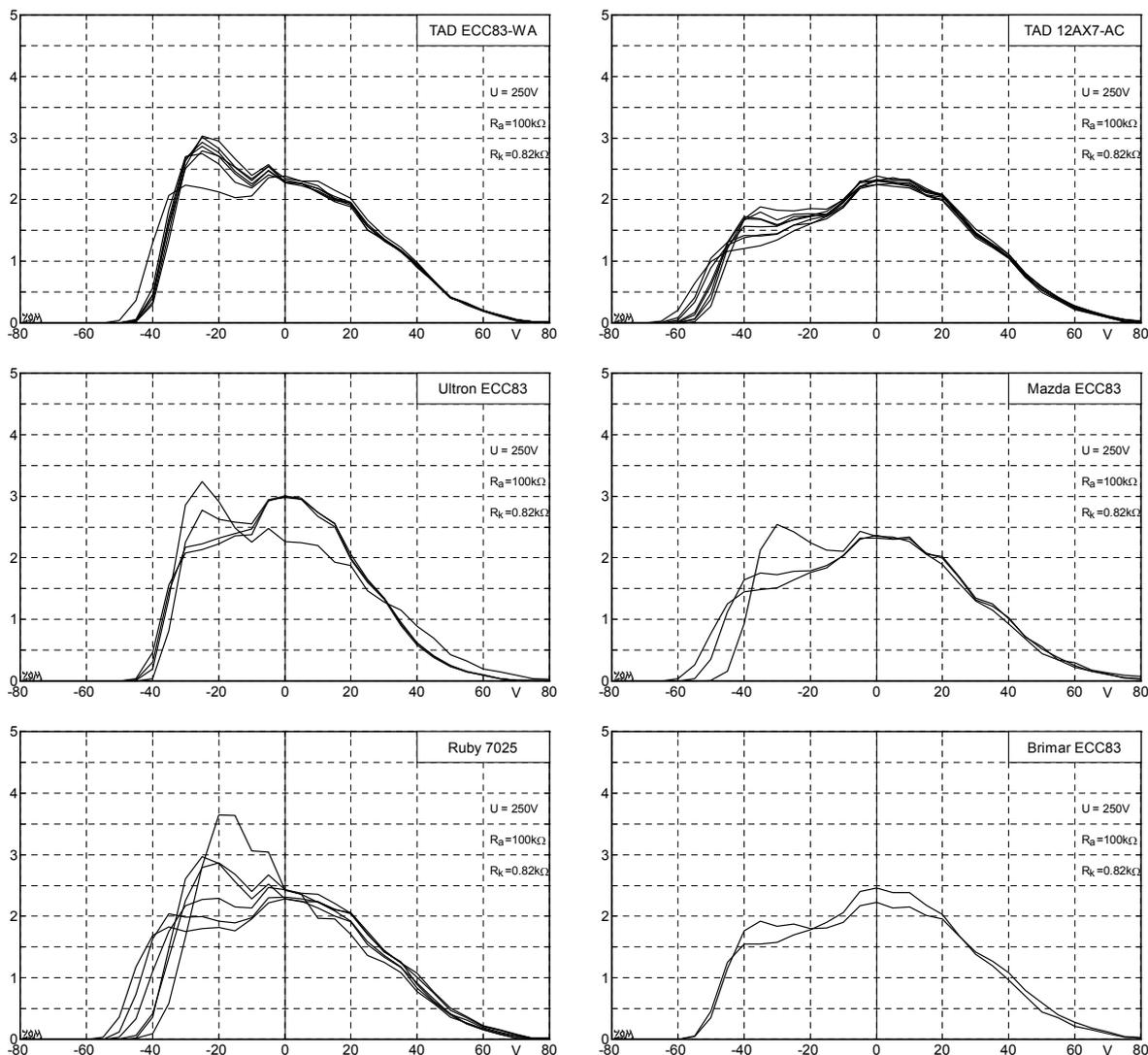


Abb. 3: Serienstreuungen der Röhren jeweils eines Herstellers (bzw. Labels).

Fazit: Für cleane Sounds taugt jede fehlerfreie Röhre (desselben Typs), im Verzerrungsverhalten können sich typgleiche Röhren aber wesentlich unterscheiden, dann muss ggf. der Arbeitspunkt nachjustiert werden. Es ist deshalb wünschenswert, dass die Röhrenhändler nicht nur "premium selected" draufschreiben, sondern das nichtlineare Verhalten der Röhre quantitativ spezifizieren.

Natürlich wäre es ein Leichtes, die Nichtlinearitäten der Röhre (z.B. durch Gegenkopplung) zu verringern, doch das ist nicht erwünscht. Die Röhre verzerrt, sie begrenzt die Tonabnehmerspannung. Auf beiden Seiten, aber unterschiedlich: Zu positiven (Eingangs-) Spannungen hin durch Gitterstromfluss, zu negativen Spannungen hin durch das Anstoßen der Anodenspannung an der Betriebsspannung – mehr geht nicht. Je nach Arbeitspunkt kann dieses Begrenzen ungefähr symmetrisch erfolgen, oder unsymmetrisch. Eine perfekte Symmetrie kann nicht erreicht werden, weil die Übertragungskennlinie immer etwas krumm ist. **Abb. 4** stellt die an 37 ECC83 gemessenen Übertragungskennlinien übereinander gezeichnet dar, normiert auf den Punkt, der sich für 0 V Eingangsspannung ergibt.

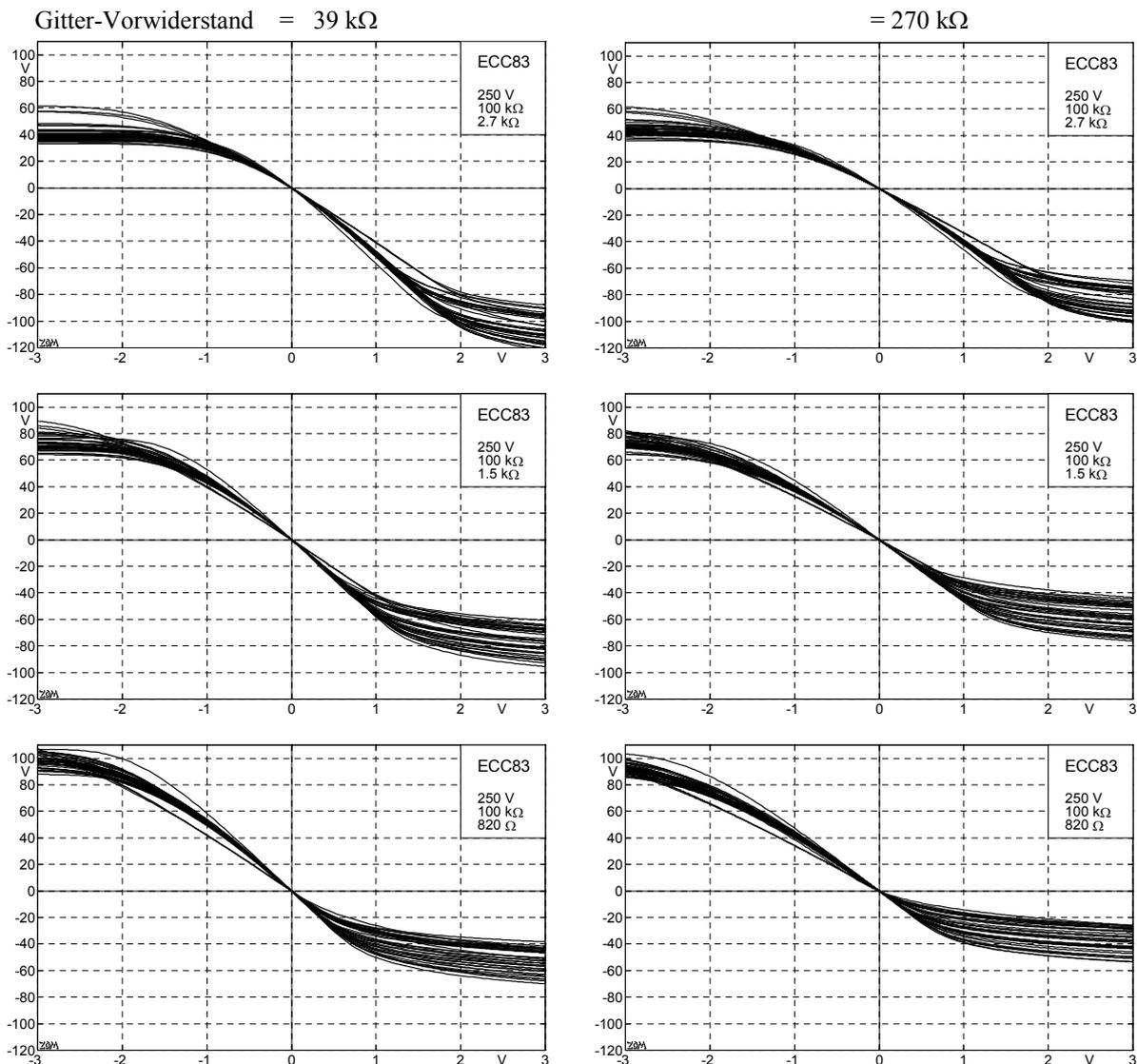


Abb. 4: Normierte Übertragungskennlinien von der Quellenspannung bis zur Anodenspannung. Die Betriebsspannung (250 V) ist stabilisiert. 100 kΩ Anodenwiderstand, 0.82 kΩ – 2.7 kΩ Kathodenwiderstand. Mit 1.5 kΩ sind die Kurven ungefähr symmetriert, mit 820 Ω werden sie unten stärker begrenzt, mit 2.7 kΩ oben.

Diese Übertragungskennlinien offenbaren nicht, dass die Begrenzungen durch unterschiedliche Prozesse und an unterschiedlichen Stellen der Schaltung hervorgerufen werden: Für positive Tonabnehmerspannungen am Röhreneingang, für negative Tonabnehmerspannungen am Röhrenausgang. Sie zeigen aber sehr deutlich, wie stark Fertigungsstreuungen einerseits und Schaltungsmodifikationen andererseits das Verzerrungsverhalten beeinflussen. Die Nichtlinearitäten, die *alleine im Eingang* (am Röhrgitter) entstehen, sind in **Abb. 5** dargestellt. Abszisse ist die Quellenspannung (Generatorspannung vor dem Längswiderstand), Ordinate ist die gegen Masse gemessene Gitterspannung. Diese Nichtlinearitäten wirken auf die Gitarre zurück, und weil deren Tonabnehmer (passive Schaltung!) eine komplexen Quellimpedanz aufweist, entstehen schon am Verstärkereingang Interaktionen zwischen linearen und nichtlinearen Verzerrungen. Will man in einem Modeling-Amp "alle" Röhrenverzerrungen nachbilden, muss man auch der nichtlinearen Eingangsimpedanz der ersten Röhre gedenken.

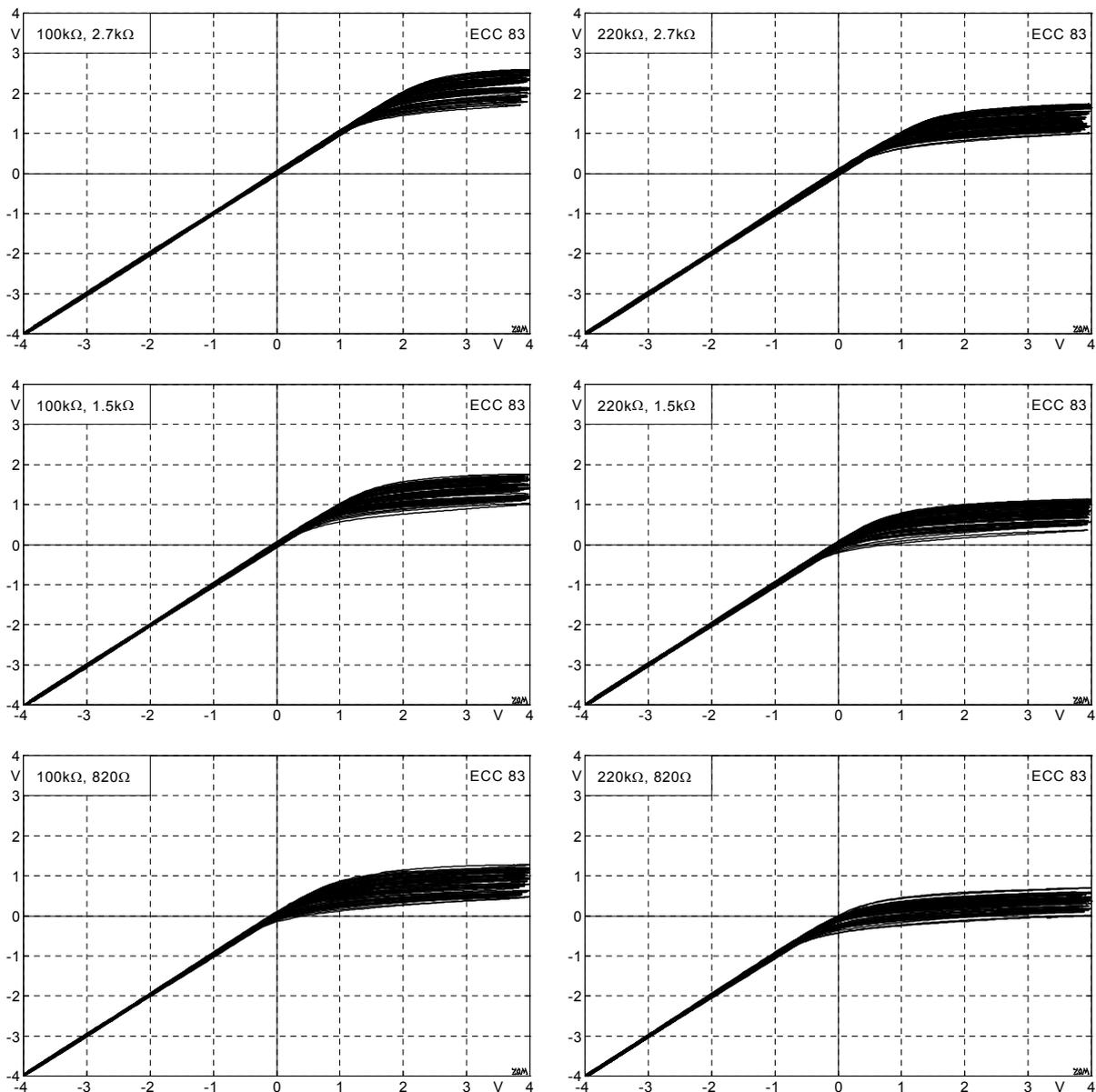


Abb. 5: Übertragungskennlinie von der Quellenspannung bis zur Gitterspannung. Längswiderstand 270 k Ω . Die Betriebsspannung (250 V) ist stabilisiert. $R_a = 100$ k Ω oder 220 k Ω , $R_k = 0.82$ k Ω – 2.7 k Ω . Verwendete Röhren (ECC83 bzw. 7025 bzw. 12AX7): 1x Siemens, 1x Valvo, 1x RSD, 8x TAD 12AX7-AC, 7x TAD ECC83-WA, 3x Mazda, 5x Ultrion, 6x Ruby (= Sovtek), 2x Brimar, 3x China.

In **Abb. 6** ist die Streuung aller (über 270 k Ω) gemessenen ECC83 als graues Feld dargestellt, in das die Übertragungskennlinien zweier Röhren eingezeichnet wurden. Das letzte Bild zeigt die aus den Datenblättern berechneten Kurven. Für negative Eingangsspannungen liegt die Sollkurve im grauen Bereich, für positive Eingangsspannungen verlässt sie ihn – die Datenblätter gelten nicht für den durch Gitterstromfluss verursachten Spannungsrückgang.

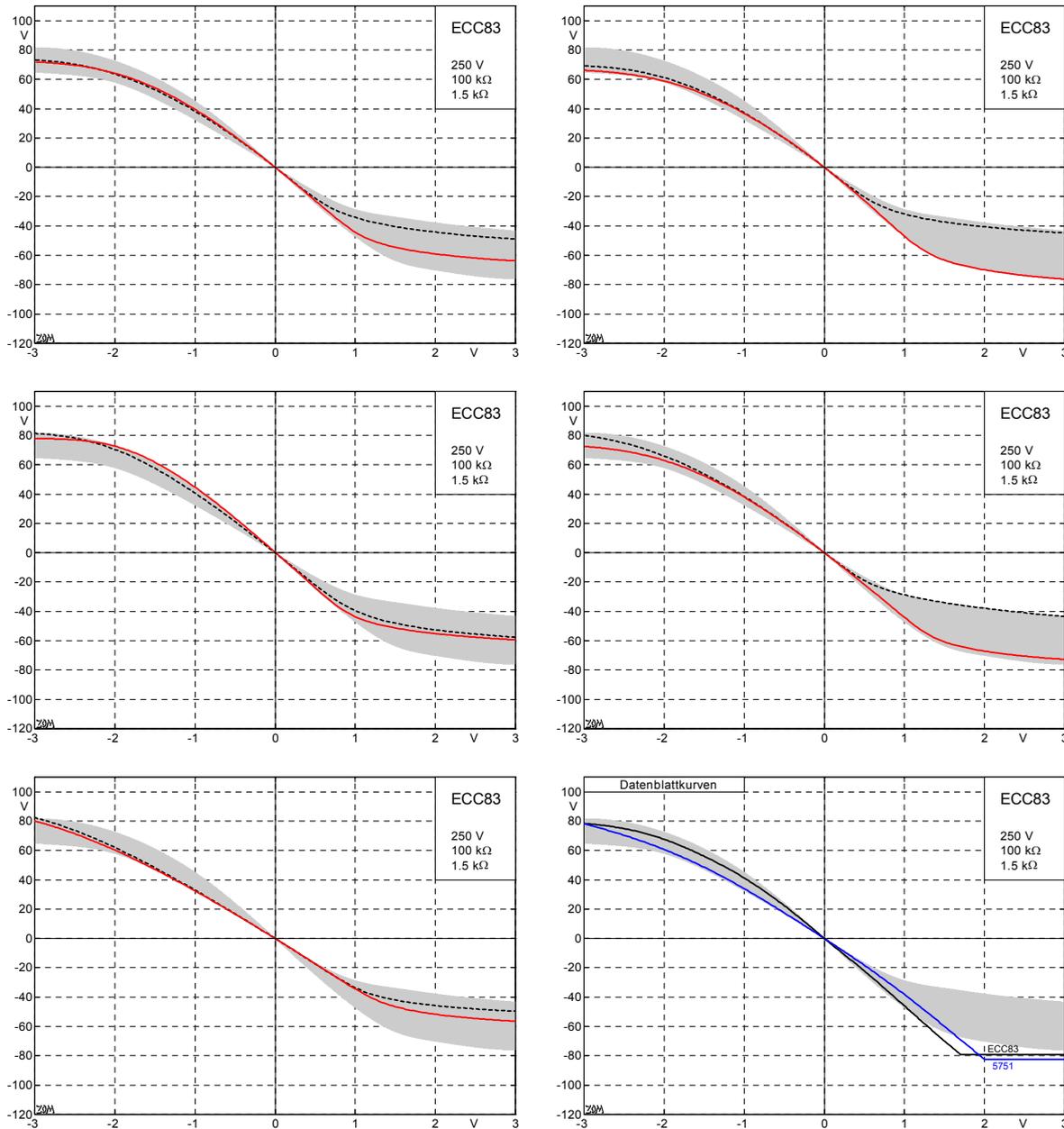


Abb. 6: Übertragungskennlinien. Streuung aller Messkurven (grau), sowie je zwei einzelne Messkurven. Rechts unten die aus Datenblättern abgeleiteten Sollkurven.

Mehrere der gemessenen Röhren zeigen im 2. Quadrant (negative Eingangsspannung) einen ungewöhnlich flachen Anstieg der Übertragungskennlinie. Der Verdacht liegt nahe, dass es sich hierbei um Röhren des Typs 5751 handelt, die jedoch als ECC83 beschriftet und verkauft wurden. Es fand sich sogar eine Verpackungsschachtel mit der Aufschrift ECC83 = 5751. Ein Thema, das Beachtung verdient: **Wann sind Röhren äquivalent?** Hier hilft ein Blick in die Geschichte: Um 1947 bot RCA erstmals die Doppeltriode 12AX7 an. In das europäische Be-

zeichnungssystem wurde sie als ECC83 übernommen (E = 6.3 V Heizung, CC = Doppel-Triode, 8 = Novalsockel, 3 = laufende Nummerierung). Beim Vergleich 12AX7 ./ ECC83 findet man in den Betriebs- und Grenzdaten keine Unterschiede, diese Röhren kann man als äquivalent ansehen. Genau dieselben Nenn- und Grenzdaten hat die **7025**, aber für sie werden (gegenüber der 12AX7) verringerte Rausch- und Brummwerte angegeben.

Scheinbar identische Daten hat auch die **12AX7-A**, bis man dann doch einen Unterschied entdeckt: Bei der 12AX7-A findet man für die Heizspannung die Angabe $6.3\text{ V} \pm 10\%$, bei der 7025 fehlt diese Toleranz. Dafür steht bei der 7025: "*For amplifier applications critical as to noise and hum. In other respects, the 7025 is similar to the 12AX7*". Soweit Angaben aus RCA-Datenblättern. Bei der General Electric 12AX7-A findet man: "*.. applications that require low hum and microphonic output*".

Zur **12AX7-WA** schreibt Tung-Sol: "*for military applications*". Bezüglich ihrer Abmessungen, Stiftbelegungen und Grenzwerte sind alle diese Röhren identisch. Identisch spezifiziert werden Steilheit, Innenwiderstand, Leerlaufverstärkungsfaktor, Kapazitäten, Anodenverlustleistung. Üblicherweise nennen die alten Datenblätter nur Solldaten, ohne Toleranz. Dass für die 12AX7-A die Heizleistung mit $\pm 10\%$ angegeben wird, ist schon eine Ausnahme. Noch ungewöhnlicher ist, dass Sovtek bei der **12AX7-WA** für den Leerlaufverstärkungsfaktor eine Einschränkung angibt: $\mu = 85 \dots 110$; bei der **12AX7-WB** steht: $\mu = 95 \dots 110$; und für die Steilheit (für beide Röhren) $S = 1.4 \dots 2.65\text{ mA/V}$. In den meisten anderen Datenblättern steht bei der Steilheit nur $S = 1.65\text{ mA/V}$, ohne Grenzwertangabe. Das verleitet einige Röhrenhändler, den letzten Buchstaben als Maß für die Verstärkung zu interpretieren. Das liest sich dann z.B. so: "*Die 12AX7-WA verstärkt 80fach, die 12AX7-WB verstärkt 90fach, die 12AX7-WC verstärkt 100fach*". Mag sein, dass das heute bei irgendeinem Hersteller für den Leerlaufverstärkungsfaktor μ gilt, aber erstens ist diese Aussage nicht allgemeingültig, und zweitens besteht zwischen μ und der Betriebsverstärkung ein großer Unterschied. Bei üblichen Schaltungen (z.B. $R_a = 100\text{ k}\Omega$) hängt die Betriebsverstärkung vom μ und von der Steilheit ab.

Beispiel: Die 12AX7-WA ($\mu = 85$ und $S = 2.65\text{ mA/V}$) wird durch die (angeblich) höher verstärkende 12AX7-WB ($\mu = 95$ und $S = 1.4\text{ mA/V}$) ersetzt; die Betriebsverstärkung nimmt dabei von 64 auf 57 ab. Hätte die 12AX7-WA gar $\mu = 110$, die Abnahme wäre von 78 auf 57 noch stärker ausgeprägt.

Kurz zusammengefasst: ECC83, 12AX7 und 7025 (incl. phantasievoller Zusatzbuchstaben) sind pinkompatibel und damit austauschbar. Ihre Verstärkungen *sollten* gleich sein, unterliegen aber herstellungsbedingten Schwankungen. Einige dieser Röhren werden etwas weniger Störgeräusche produzieren als andere, deren Überwachung und Spezifizierung wird vom Hersteller (bzw. vom Vertrieb) aber sehr individuell gehandhabt. Die **5751** ist hingegen eine zu den o.a. nicht datenkonforme Röhre. Zwar pinkompatibel, aber mit geringerem μ , kleinerer Steilheit, und kleinerem Innenwiderstand.

In **Abb. 7** ist die Verteilung der gemessenen Verstärkungsfaktoren dargestellt. Zum Mittelwert 52 gehört das Verstärkungsmaß 34.3 dB, die Streuung ist mit $\pm 1\text{ dB}$ durchaus erträglich. Lediglich vier der gemessenen fünf Ultron ECC83 fallen aus dem Rahmen, ihre Verstärkung ist geringer. Diese vier unterscheiden sich auch optisch von der fünften Ultron-Röhre, obwohl alle die Aufschrift ECC83 tragen. Der Verdacht liegt nahe, dass es sich hierbei um 5751 handelt. Generelle Unterschiede zwischen der TAD ECC83-WA und 12AX7-AC treten bei dieser Messung nicht zutage, lediglich die Streubreiten differieren.

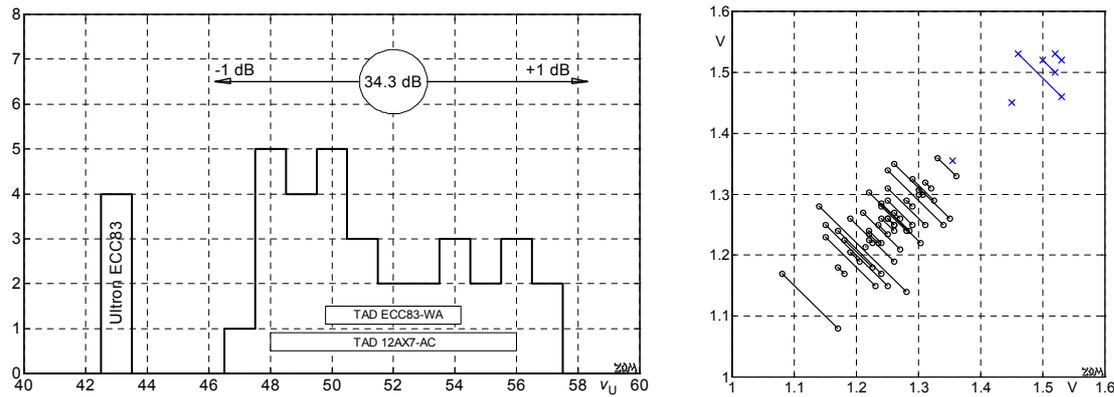


Abb. 7: Verstärkungsfaktoren der gemessenen ECC83 (links), U_k -Paarung (rechts); Ultron = x.

Das rechte Bild in **Abb. 7** zeigt die zwischen den beiden Kathodenspannungen einer Röhre auftretenden Unterschiede. Der Sollwert lt. Datenblatt ist 1.32 V, das erreichen einige Röhren, viele liegen deutlich darunter. Die Ultron-Röhren fallen auch hier wieder aus der Reihe. Die größten Unterschiede findet man bei der TAD ECC83-WA, dieser Parameter scheint beim Selektionsprozess keine Rolle zu spielen.

Waren die bisher gezeigten Unterschiede schon deutlich, so wird es nun noch schlimmer: Jetzt kommen Messungen am **Kathodenfolger**, Zentrum vieler Marshall-, Vox und Fender-Verstärker (und einiger mehr...). Der im Kathodenfolger fließende Gitterstrom ist derart hoch, dass von einem lehrbuchmäßigen Betrieb keine Rede mehr sein kann (Physik der Elektrogitare, Kap. 10.2.2). Die in **Abb. 8** dargestellten Einzelkurven offenbaren deshalb sehr unterschiedliche Krümmungen und Symmetrien, die Röhren unterscheiden sich bzgl. Verstärkung und Verzerrung wesentlich.

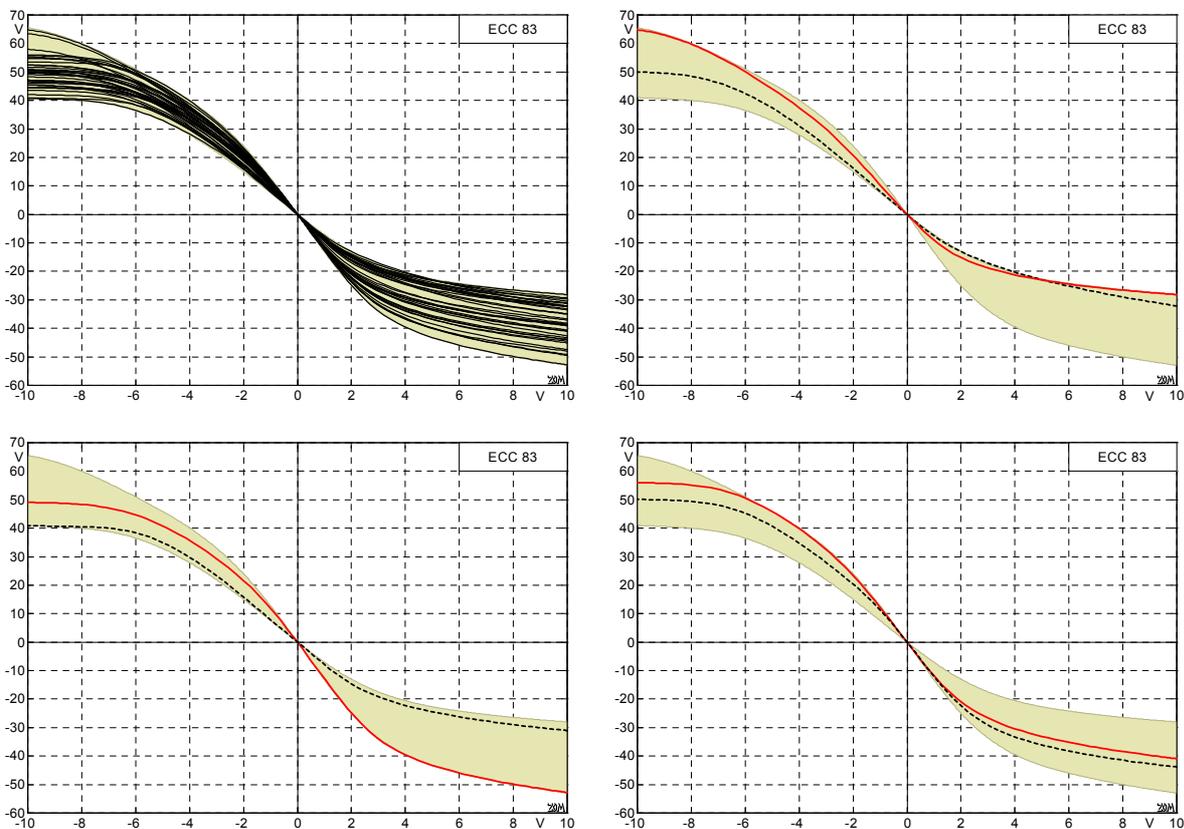


Abb. 8: Marshall-Kathodenfolger (820 Ω , 100 k Ω , 100 k Ω), Übertragungskennlinien über beide Röhren gemessen. Alle 37 gemessenen ECC83 (links oben), bzw. je zwei ausgewählte.

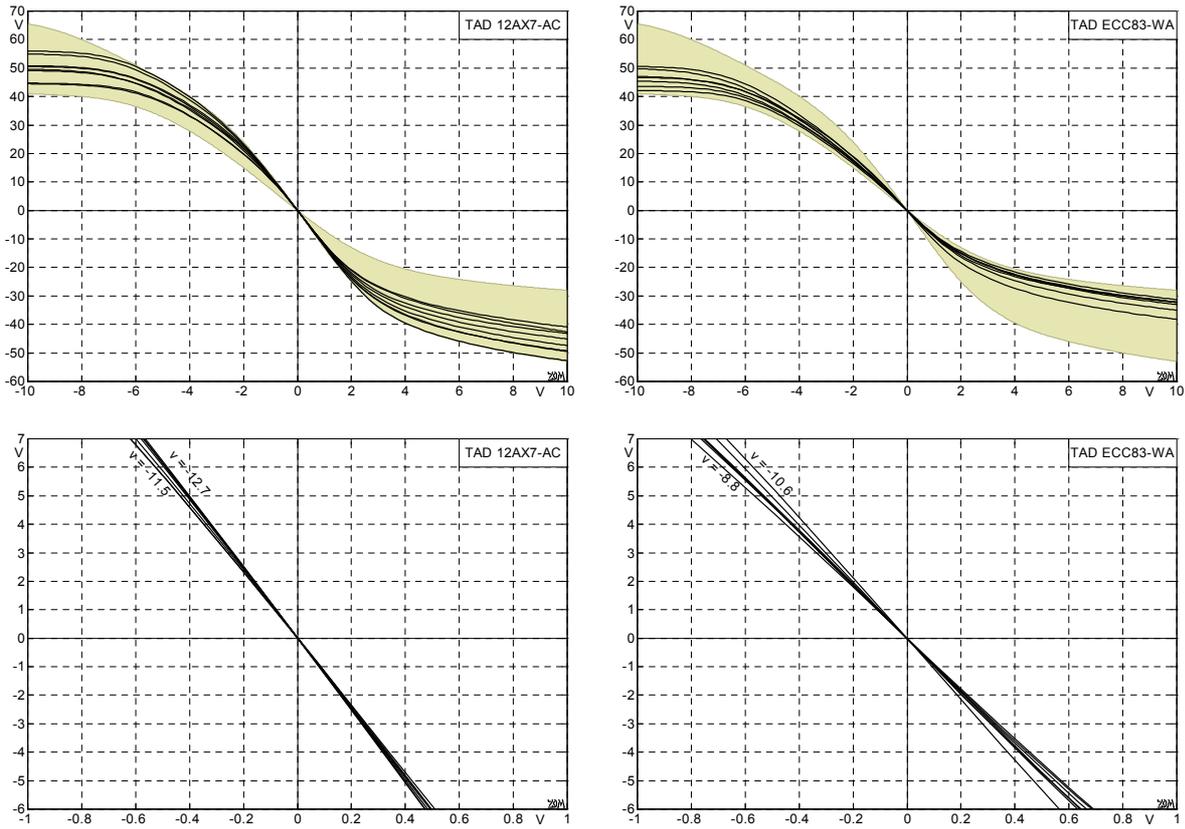


Abb. 9: Marshall-Kathodenfolger, Übertragungskennlinien über beide Röhren gemessen (→ Abb. 11).

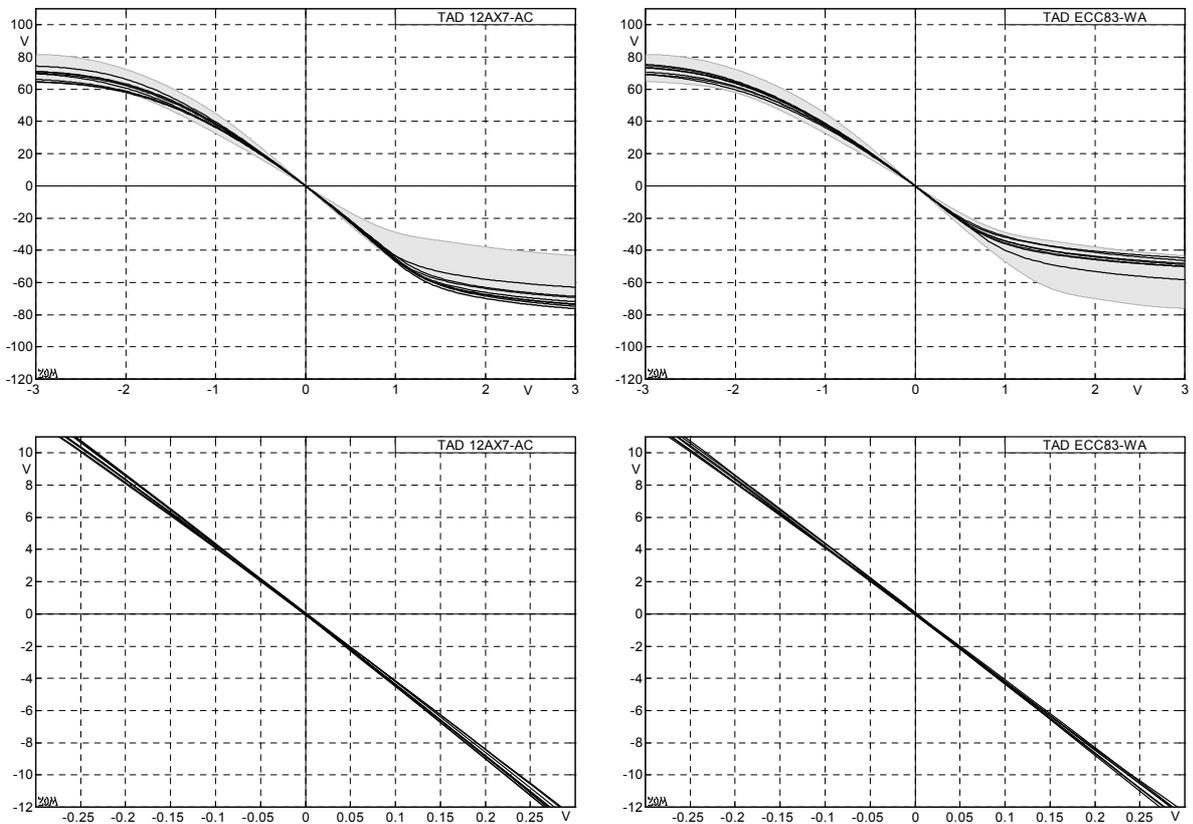


Abb. 10: Zum Vergleich: Dieselben TAD-Röhren in der Eingangsstufe (1.5 kΩ, 100 kΩ).

Die Stichprobe der analysierten 37 ECC83 umfasst Röhren sehr unterschiedlicher Hersteller, sodass vermutet werden darf, die Streuungen innerhalb der Röhren *eines* Typs (desselben Herstellers) seien kleiner. Diesbezüglich wurden mehrere **TAD-Röhren** genauer untersucht. Was weder bedeutet, dass diese Röhren besonders gut sind, noch, dass sie besonders schlecht sind. Sie waren einfach die einzigen, die (wenig gebraucht) in ausreichender Anzahl vorhanden waren. Zur Verfügung standen 7 TAD ECC83-WA, und 8 TAD 12AX7-AC; dieselben Röhren, die auch schon bei den bisher dargestellten Messkurven im Einsatz waren.

Abb. 9 entspricht Abb. 8, zeigt aber nur mehr die Kurven der TAD-Röhren. In der oberen Reihe stark ausgereut, darunter die Kleinsignalübertragung. Beim Kathodenfolger streuen die Kleinsignalverstärkungen der 12AX7-AC betragsmäßig zwischen 11.5 – 12.7, die der ECC83-WA zwischen 8.8 – 10.6. In der Eingangsstufe arbeiten jedoch alle diese Röhren mit praktisch derselben Kleinsignalverstärkung (**Abb. 10**, unten). Der Grund ist schnell gefunden: Die vor dem Kathodenfolger sitzende Triode wird durch dessen Eingangsimpedanz nicht-linear belastet, während die Eingangsröhre (V1) eine lineare Anodenlast sieht. Die Übertragung der Kathodenfolgerstufe wird dadurch stark röhrenabhängig, die Klirrfaktoren können sich von Röhre zu Röhre um mehr als den Faktor 10 unterscheiden! Auch in der Eingangsröhre hängt der Klirrfaktor stark von der individuellen Röhre ab, dies wirkt sich aber nur bei Tonabnehmern mit hoher Ausgangsspannung hörbar aus.

In **Abb. 11** sind die für die Messungen verwendeten Schaltungen dargestellt. Gemessen wurde die Wechselspannungsübertragung vom Eingang bis zum Ausgang.

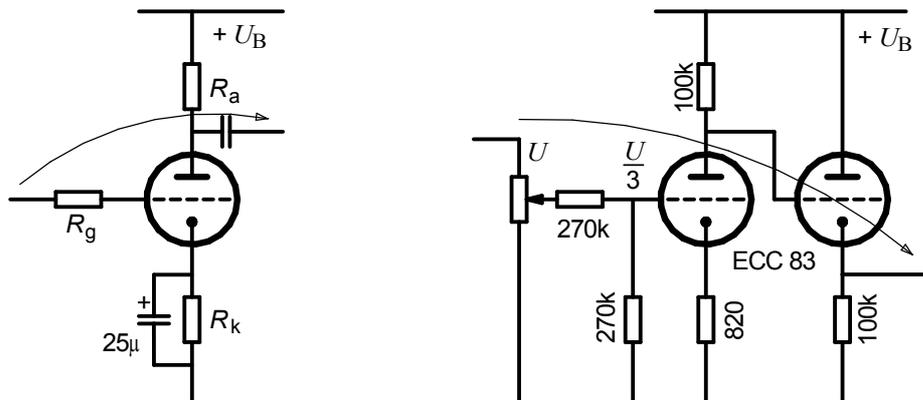


Abb. 11: Die verwendeten Schaltungen. Links die Eingangsstufe (nur eine der beiden Trioden wurde gemessen), rechts der Kathodenfolger (Messung über Teiler und beide Röhren).

Weitere Details in: www.gitarrenphysik.de