

Gitterstrom bei Trioden

Manfred Zollner

In vielen Gitarrenverstärkern werden die Röhren oft übersteuert, d.h. außerhalb ihres lehrbuchmäßigen Bereichs betrieben. Das oft zitierte Dogma, Verstärkerröhren seien in ihrem Eingangskreis sehr hochohmig, verliert in diesem Betriebszustand seine Gültigkeit: Der Eingangswiderstand bemisst sich dann nicht mehr nach $M\Omega$, sondern kann Werte um (oder sogar kleiner als) $1\text{ k}\Omega$ erreichen. Die Folge sind einseitige Signalbegrenzungen (Verzerrungen, deshalb macht man's ja), sowie Potentialverschiebungen bei Koppelkondensatoren, und als deren Konsequenz Sperrverzerrungen (Blocking Distortion). Reihenuntersuchungen an 74 Trioden (ECC83 bzw. 12AX7) zeigten allerdings, dass die Röhreneigenschaften bei dieser Betriebsform starke Streuungen aufweisen – die einsetzenden Gitterströme sind sehr unterschiedlich, die damit einhergehenden Verzerrungen auch. Es verwundert deshalb nicht, dass Gitarristen einzelnen Röhren einen speziellen Sound zuschreiben. Dessen Ursache ist jedoch nicht im Frequenzgang zu suchen ("druckvolle Bässe, jede Menge Treble"), sondern in der individuellen Verzerrungscharakteristik der Röhren. Die fertigungsbedingt stark streut – und zu wenig kontrolliert wird.

Als wichtigste Triodenparameter werden üblicherweise genannt: Steilheit, Innenwiderstand, Leerlaufverstärkung, sowie Anodenstrom und Gitterspannung im Arbeitspunkt. Eventuell auch noch Heizspannung und -strom, und Grenzparameter wie maximale Anodenverlustleistung und maximale Anodenspannung. Der Gitterstrom gehört nicht zu den als wichtig erachteten Parametern. Nur ganz selten findet man hierzu in Datenblättern Hinweise, und dann auch nur in der Form $I_g < 0.2\ \mu\text{A}$. Daraus könnte man den Schluss ziehen, dass bei $U_{gk} \approx 1\text{V}$ der Eingangswiderstand der Röhre mindestens $5\text{ M}\Omega$ beträgt, und folglich als ausreichend hochohmig angesehen werden darf. Bei Gitarrenverstärkern, deren Röhren stark ausgesteuert werden, ist diese Betrachtung aber unzuverlässig – hier können auch viel kleinere Eingangswiderstände auftreten.

Gängige Triodenmodelle gehen von der Annahme aus, dass von der glühenden Kathode Elektronen durch das Steuergitter zur Anode fliegen. Statt "durch das Gitter" kann man auch sagen: "an den Gitterdrähten vorbei". Einige Elektronen treffen dabei aber direkt auf die Gitterdrähte, freunden sich mit ihrer neuen Umgebung an, und fließen als Elektronenstrom aus dem Gitter heraus. Mit üblicher Vorzeichendefinition (technische Stromrichtung) bedeutet das: in das Gitter fließt ein positiver Gitterstrom hinein. Solange das Gitterpotential negativ gegenüber der Kathode ist, versuchen die Elektronen zwar, diesem Hindernis auszuweichen; sie fliegen lieber zur positiven Anode, die den weitaus größten Teil des Kathodenstroms aufnimmt. Doch sobald (bei Aussteuerung) Kathoden- und Gitterpotential ungefähr gleich groß werden, gewinnt das Gitter als Landeplatz an Attraktivität. Je positiver das Gitter, desto mehr Elektronen landen auf ihm. Mag der Gitterstrom unter irgendwelchen Datenblattbedingungen auch kleiner als $0.2\ \mu\text{A}$ sein, bei positiver Aussteuerung kann er auch größer als $500\ \mu\text{A}$ werden. Und unter diesen Bedingungen ist der Röhreneingang nicht mehr hochohmig, sondern überraschend niederohmig.

Es gibt mehrere Ursachen für den Gitterstrom – seine quantitative Beschreibung ist kompliziert. Eine grundsätzliche Unterscheidung in Elektronenstrom und Ionenstrom ist hilfreich: Außer den o.a. Elektronen können auch positive geladene Teilchen (Ionen) auf das Gitter aufreffen. Sie entstehen durch Stoßionisation, wenn (bei unzureichendem Vakuum) **Gasreste** in der Röhre vorhanden sind. Auf diese Gasmoleküle treffen die von der Kathode zur Anode fliegenden Elektronen, und schlagen beim Aufprall ein Elektron aus dem Gasmolekül heraus. Die derart erzeugten positive geladenen Gasmolekül-Reste (Ionen) können zum Gitter gelangen, und erzeugen dort einen aus dem Gitter heraus fließenden Strom (technische Stromrichtung). Somit entstehen zwei Ströme mit unterschiedlichen Vorzeichen, die sich zu dem gesamten Gitterstrom summieren: der **Elektronenstrom**, und der **Ionenstrom**. Bei sehr negativem Gitter gehen beide Ströme gegen null, bei schwach negativem Gitter kann der Ionenstrom überwiegen, und bei Gitterspannungen um null und größer überwiegt der Elektronenstrom.

Bei Röhren mit sehr gutem **Vakuum** ist der vom Ionenstrom verursachte Anteil gering, er kann ignoriert werden. Der verbleibende Elektronenstrom ist immer noch kompliziert genug: Er hängt ab von der Gitterspannung, der Anodenspannung, der Elektrodengeometrie, und von Effekten, deren quantitatives Ausmaß nicht genau genug bekannt ist. Das ist z.B. der in der Röhre verteilte Getter, die räumliche Verteilung des Kathodenmaterials (auf der Kathode, aber auch davon abgedampft und in der Röhre verteilt), Emissionen von aufgeheizten Gitterdrähten, auf der Kathode gebildeten "Inseln", und durch den Raum schwirrenden Sekundärelektronen. Diese Effekte unterliegen starken Streuungen, und vermutlich ist das der Grund, weshalb in Datenblättern auf ihre Spezifizierung verzichtet wird.

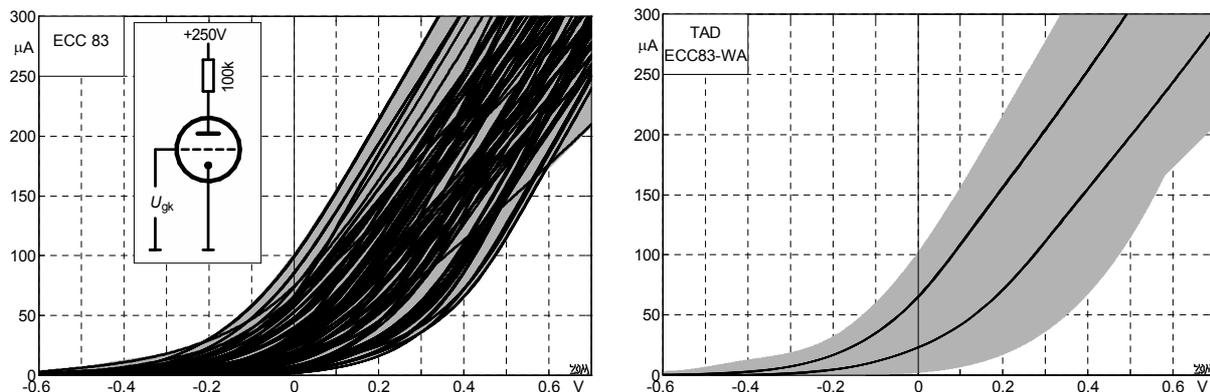


Abb. 1: Gitterstrom in Abhängigkeit von der Gitter/Kathode-Spannung (div. ECC83).

Abb. 1 zeigt im linken Bild 74 Messkurven, ermittelt an 37 verschiedenen ECC83 (=12AX7), (jede Röhre enthält in einem Glaskolben *zwei* Triodensysteme). Im rechten Bild sind die Gitterströme *einer* ECC83 dargestellt. Das Vakuum scheidet als Ursache für diese großen Unterschiede aus, denn naturgemäß muss das für beide Trioden identisch sein. Bei $U_{gk} = 0$ V unterscheiden sich die Gitterströme der gemessenen ECC83 um den Faktor 40 – das ist schon ein sehr erheblicher Effekt. **Fazit:** Der Röhreneingang ist nicht unendlich hochohmig (wie das gerne vereinfachend angenommen wird), sondern niederohmig. Unterschiedlich niederohmig, je nach Herstellung. Es ist zweckmäßig, bei der Betrachtung des Eingangswiderstandes zwei Größen zu unterscheiden: Den **statischen Eingangswiderstand** R_{stat} , und den **dynamischen** R_{dyn} . Der statische wird für einen Arbeitspunkt aus dem Quotient der Gitter/Kathode-Spannung und des Gitterstroms gebildet: $R_{stat} = U_{gk} / I_g$; der dynamische (differentielle) aus deren Änderung (z.B. einer kleinen überlagerten Wechselspannung): $R_{dyn} = dU_{gk} / dI_g$.

Der statische Eingangswiderstand kann dem Kennlinienfeld von Abb. 1 leicht entnommen werden, z.B. $0.2 \text{ V} / 200 \mu\text{A} = 1 \text{ k}\Omega$, der dynamische Eingangswiderstand ist in **Abb. 2** dargestellt. In der Eingangsstufe eines typischen Gitarrenverstärkers beträgt das Kathodenpotential einer ECC83 häufig 1.3 V , einer Gitter/Kathode-Spannung von -1.3 V entsprechend. Hier ist der Röhreneingang tatsächlich sehr hochohmig – bei allen gemessenen Röhren. Doch sobald sich U_{gk} (bei Aussteuerung) an 0 V annähert, nimmt R_{dyn} auf Werte um $2 \text{ k}\Omega$ ab. Die Folge ist eine einseitige **Signalbegrenzung** im Gitterkreis. Diese wirkt um so stärker, je größer der Gittervorwiderstand R_g ist. Der Gittervorwiderstand ist häufig der Quellwiderstand der vorhergehenden Stufe, im Verstärkereingang also: der Quellwiderstand der Gitarre. Er kann im Bereich der Tonabnehmerresonanz leicht Werte bis zu $250 \text{ k}\Omega$ erreichen.

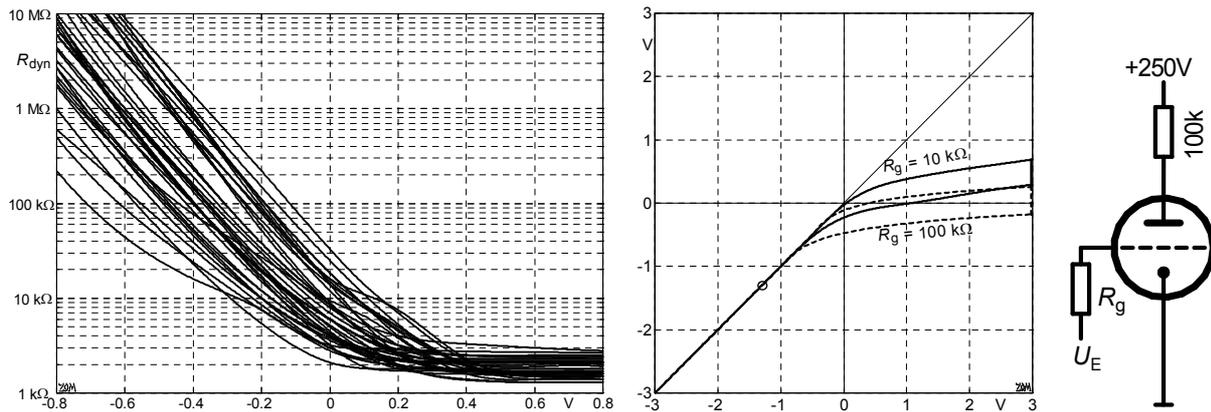


Abb. 2: Dynamischer Eingangswiderstand über der Gitter/Kathode-Spannung (links); Gitter/Kathode-Spannung über der Eingangsspannung U_E mit dem dazugehörigen Schaltbild (rechts). Der durch zwei Linien begrenzte Bereich ist die Streuung über alle gemessenen ECC83.

Eine sehr niederohmige Gitteransteuerung – wie sie z.B. ein Laborgenerator erzeugt – kommt im Gitarrenverstärker nicht vor. Bei ihm ist der Quellwiderstand immer hochohmig, deshalb können keine großen Gitterströme entstehen. Bis zu ca. 1 mA sind aber möglich, insbesondere im Kathodenfolger (Physik der Elektrogitarre, Kap. 10.2.2). Im linken Bild der **Abb. 3** sind für stärkere Aussteuerung die Gitterstromkurven mehrerer ECC83 dargestellt, das rechte Bild zeigt den fertigungsbedingten Streubereich der Ausgangskennlinien. Der VOX-Kathodenfolger benötigt zur Aussteuerung positive Gitterspannungen, die durchaus $+1 \text{ V}$ überschreiten können – die Toleranzen sind in diesem Bereich schon sehr erheblich. Bei Berechnungen beachten: Das Ausgangskennlinienfeld stellt den Anodenstrom dar, der Ausgang des Kathodenfolgers ist aber die Kathode; Anoden- und Kathodenstrom sind nicht gleich groß.

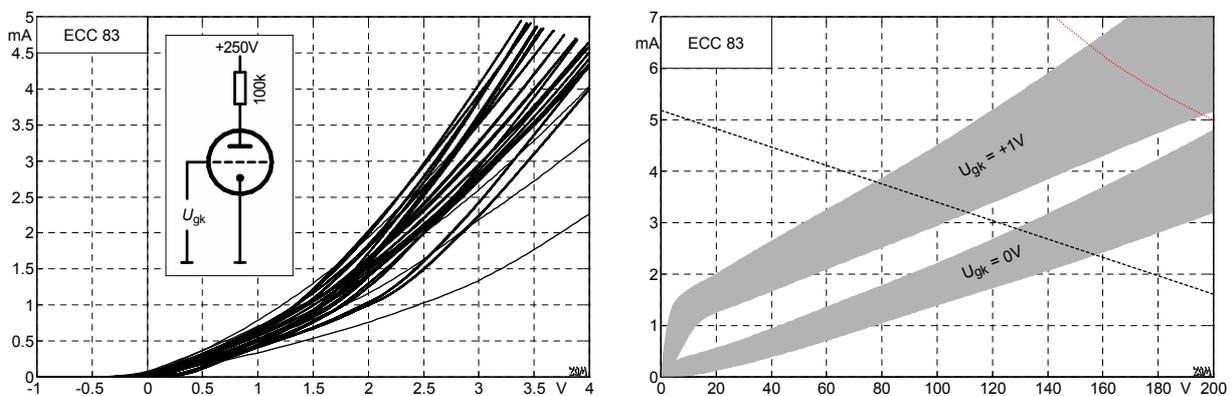


Abb. 3: Gitterstrom über der Gitter/Kathode-Spannung (links), Ausgangskennlinien (rechts). Die gestrichelt eingezeichnete Arbeitsgerade ist typisch für den VOX-AC30-Kathodenfolger (290 V , $56 \text{ k}\Omega$).

Die meisten Gitterstromkennlinien lassen sich in drei Bereiche einteilen: Einen exponentiellen Anstieg bei negativer Gitter/Kathode-Spannung, und zwei schwach progressive Abschnitte, die durch einen Knick getrennt sind. Der Knick liegt ungefähr bei $U_{gk} \approx 1.5 \dots 3V$. Er entsteht, wenn mit steigender Aussteuerung die Anodenspannung ihren finalen Minimalwert erreicht. Im ersten Bereich ($U_{gk} < 0V$) ist der Röhreingang hochohmig, im zweiten Bereich ($U_{gk} = 0 \dots 2V$) ungefähr $2\text{ k}\Omega$, im dritten Bereich kann der differentielle Eingangswiderstand sogar auf bis zu $400\ \Omega$ abnehmen. **Abb. 4** zeigt Messkurven von drei ausgewählten ECC83. Wie schon in Abb. 3 ist deutlich die fertigungsabhängige Streuung zu erkennen. Wenn also eine derartige Triode determiniert übersteuert werden soll, ist hierfür die übliche "Selektion", die bestenfalls die Kontrolle *eines* Punktes der Kennlinie beinhaltet, unzureichend. Vor allem, wenn dieser Punkt bei einer negativen Gitter/Kathode-Spannung liegt. Nötig ist vielmehr eine Kontrolle des ganzen Kennlinienfeldes. Das ist Aufwand, ja, aber in Zeiten computergesteuerter Messplätze leicht realisierbar. Alternativ könnte man auch die Fertigungstoleranzen reduzieren, doch das dürfte der wesentlich größere Aufwand sein.

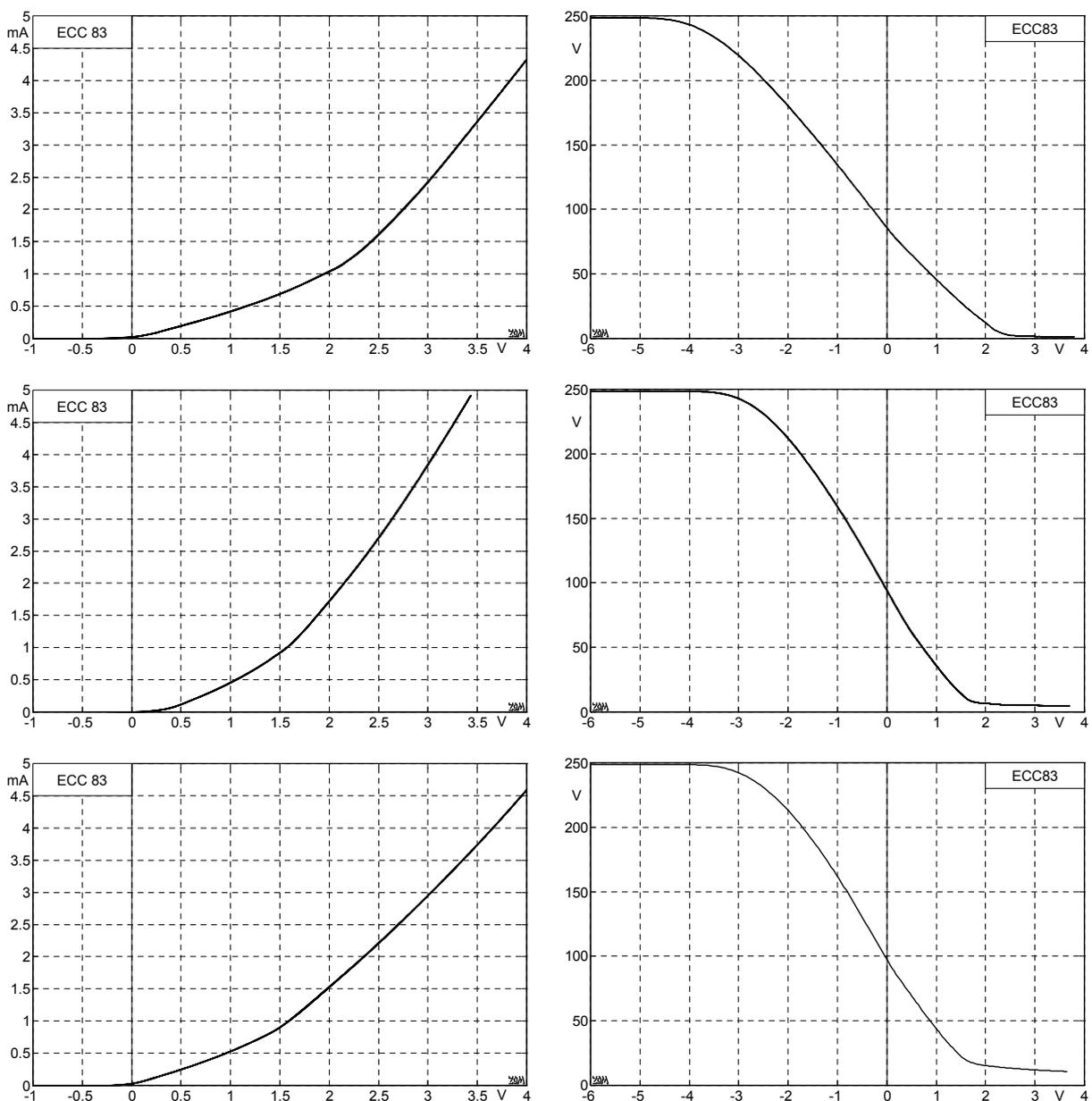


Abb. 4: Gitterstrom (I_g vs. U_{gk} , links), Übertragungskennlinie (U_a vs. U_{gk} , rechts). $U = 250\text{ V}$, $R_a = 100\text{ k}\Omega$.

In **Abb. 5** sind die Übertragungskennlinien verschiedener ECC83 dargestellt; links für alle gemessenen Röhren, rechts für 7 TAD-Röhren. Das rechte Bild zeigt, dass selbst bei selektierten Röhren mit merklichen Streuungen zu rechnen ist – diese Selektion ist offenbar zu großzügig.

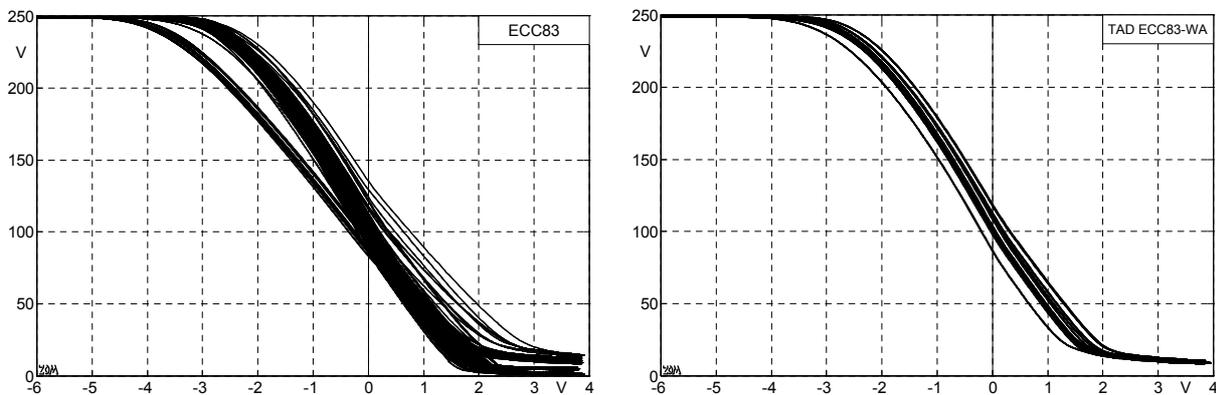


Abb. 5: Übertragungskennlinien (U_a vs. U_{gk2}) verschiedener ECC83. $U = 250$ V, $R_a = 100$ k Ω .

Der bei positiver Gitteransteuerung auftretende Gitterstrom belastet die vorhergehende Stufe, er erzeugt aber noch einen weiteren Effekt: Sperrverzerrungen (Blocking Distortion). Fast alle Stufen eines Gitarrenverstärkers sind kondensatorgekoppelt, um die großen Potentialunterschiede zu handhaben. Sobald Gitterstrom fließt, ändert sich die Ladung und damit die Polarisationsspannung des Koppelkondensators. **Abb. 6** zeigt einen zweistufigen Verstärker mit Kondensatorkopplung. Zunächst sei das Potentiometer voll aufgedreht, der Schleifer also am oberen Anschlag. Mit stark ausgesteuerter V1 wird bei V2 Gitterstrom fließen. Nicht dauernd, aber immer, wenn die Anodenspannung von V1 im Bereich der Maximalwerte ist. Dieser Gitterstrom, ein pulsierender Gleichstrom, erhöht die Polarisationsspannung des Koppelkondensators (22 nF), mit der Konsequenz, dass beim Abschalten des Steuersignals das Gitter von V2 auf negativerem Potential liegt. Das kann soweit gehen, dass V2 völlig gesperrt wird (deshalb Sperrverzerrungen). Natürlich nicht für alle Zeit, über den Gitterableitwiderstand der zweiten Röhre (in diesem Fall das Potentiometer) fließt dann ein Ausgleichsstrom, der das ursprüngliche Potential wieder herstellt. Doch das dauert. Beim Laden des Koppel-Cs (auf ein höheres Potential) sind zwei Widerstände maßgeblich: Der Ausgangswiderstand der ersten Röhrenstufe, und der Eingangswiderstand der zweiten Röhre. Weil der Röhreneingang bei Gitterstromfluss niederohmig ist, kann das Potentiometer vernachlässigt werden. Bei der Rückkehr zum Ruhezustand ändert sich die Situation: Jetzt ist der Röhreneingang hochohmig, das Umladen des Koppel-Cs muss über das hochohmige Potentiometer erfolgen. Kleine Potentialverschiebungen beim Koppel-C sind normalerweise vorteilhaft, sie beleben den Sound, große Verschiebungen klingen unschön – sie sind zu vermeiden.

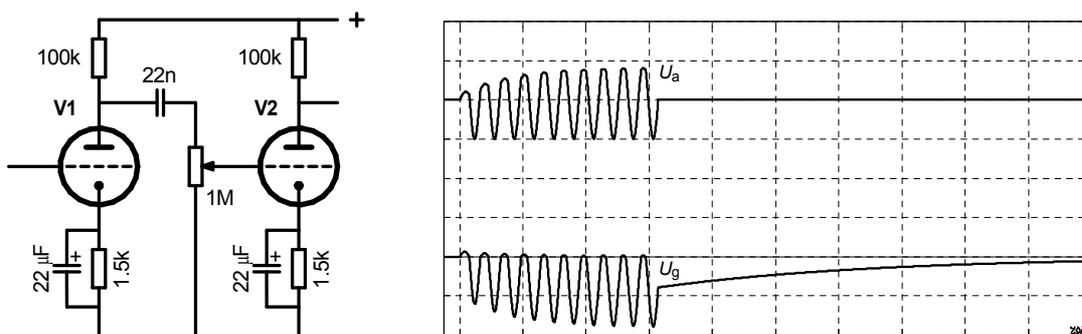


Abb. 6: Kapazitiv gekoppelte Röhrenstufen, Potentialverschiebung durch Gitterstromfluss.

Die Situation ändert sich, wenn der Schleifer des Potentiometers zurück gedreht wird: Damit reduziert sich der Ladestrom, die Lade- und Entladezeitkonstante bekommen ähnliche Werte, und der Gitterstrom von V2 wird reduziert. Einen ähnlichen Effekt bewirkt ein Gittervorwiderstand. Der ist z.B. bei der in Gitarrenverstärkern üblichen passiven Kanaladdition immer vorhanden, manchmal ziemlich hochohmig (**Abb. 7**). Große Gitterströme können dabei nicht mehr entstehen, Sperrverzerrungen auch nicht. Doch nun schließt sich der Kreis: Mit großem Gittervorwiderstand kommt es zu Gitterverzerrungen, und die sind, wie Abb. 1 gezeigt hatte, stark röhrenabhängig.

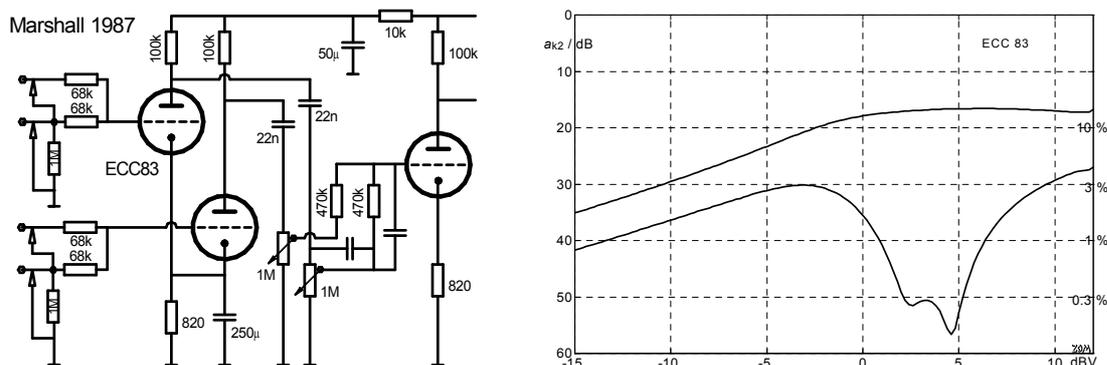


Abb. 7: Kanaladdition über hochohmige Gittervorwiderstände in einem Marshall-Verstärker (links). Klirrdämpfungsverläufe bei zwei verschiedenen ECC83 (rechts).

Im rechten Bild von Abb. 7 sind die quadratischen Klirrdämpfungen von zwei verschiedenen ECC83 dargestellt [Physik der Elektrogitarre, Abb. 10.1.13]. Während bei der einen ECC83 der quadratische Klirrfaktor mit zunehmender Aussteuerung einem sehr flachen Maximum zustrebt, nimmt k_2 bei der anderen Röhre wieder auf Werte ab, die kleiner als 0.3% sind – die quadratischen Klirrfaktoren der beiden Röhren unterscheiden sich (in derselben Schaltung) fast um den Faktor 100! Und dies bedeutet nicht etwa, dass eine dieser Röhren defekt ist. Nein, das sind fertigungsbedingte Streuungen.

Weitere Details in: Zollner M.: Physik der Elektrogitarre, 2014, www.gitarrenphysik.de