

10.1.2 Der Röhren-Eingangswiderstand

Der Eingangswiderstand des Gitarrenverstärkers liegt (zusammen mit der Kabelkapazität) parallel zum Quellwiderstand des Tonabnehmers. Vereinfacht betrachtet stellt der Verstärkereingang einen hochohmigen Widerstand dar. Bei Röhrenverstärkern sind Werte um $1\text{ M}\Omega$ üblich. Die hierdurch verursachte Tonabnehmerbedämpfung ist gering. Falls der Verstärkereingangswiderstand jedoch deutlich niederohmiger ist, tritt eine merkliche Bedämpfung auf, die sich im Bereich der Tonabnehmerresonanz als Brillanzverlust äußert. Ganz andere Verhältnisse können sich bei Vorschalt-Effektgeräten (Treble-Booster, Verzerrer, Wah-Wah, etc.) ergeben. Ihre Eingänge sind häufig ziemlich niederohmig, was aber als Teil des Effekts zu interpretieren ist.

Viele der klassischen Röhrenverstärker boten neben dem Standard-Eingang (mit 1 oder Hi bezeichnet) auch noch einen unempfindlicheren zweiten Eingang (2 bzw. Lo) an. Wegen seines kleineren Eingangswiderstandes (typisch $136\text{ k}\Omega$) klingt die Gitarre hier nicht ganz so brillant, außerdem erfolgt eine Signalabschwächung auf die Hälfte, wodurch die Vorstufe weniger verzerrt. Die zwei zur Signalteilung verwendeten $68\text{-k}\Omega$ -Widerstände liegen bei Verwendung des **Standard-Eingangs** (1) parallel zueinander, und in Reihe zum Röhren-Eingang. Sie bewirken damit eine Tiefpass-Filterung, die aber nur im Hochfrequenzbereich Radio-Sender abschwächt – für den Hörfrequenzbereich ist die Tiefpass-Wirkung vernachlässigbar.

Die **Eingangskapazität** üblicher Gitarren-Verstärker ist gering, aber im Vergleich zur Kabelkapazität nicht immer vernachlässigbar. Beim Röhrenverstärker ist wegen des **Millereffekts** als Eingangskapazität der Vorstufentriode ca. $80 - 150\text{ pF}$ anzusetzen. Hinzu kommen – je nach Leitungsführung im Verstärker – Leitungskapazitäten von ca. 50 pF . Bei der Standard-Röhrenschaltung ist die Gitarre galvanisch mit dem Gitter der ersten Röhre verbunden – ohne Koppel-Kondensator. Nur wenige (vor allem ganz alte) Verstärkerschaltungen erzeugen die Gittervorspannung über den Anlaufstrom und trennen Gitarre und Röhre über einen Koppel-Kondensator ($10 - 20\text{ nF}$). Dessen Wirkung ist im linearen Modell vernachlässigbar, der Röhrenarbeitspunkt dieser Schaltung ist aber ziemlich labil.

Das Röhrengitter ist weder mit der Anode noch mit der Kathode verbunden, und da der Glaskolben gut isoliert, könnte man tatsächlich einen sehr hochohmigen Röhreneingangswiderstand vermuten. Allerdings: Auch Anode und Kathode sind nicht verbunden, und trotzdem fließt zwischen ihnen elektrischer Strom, weil die glühende Kathode Elektronen emittiert, die durch das Vakuum des Glaskolbens zur positiven Anode fliegen. Elektronenfluss ist elektrischer Strom: Ein Fluss negativer Ladungen von der Kathode zur Anode wird mit technischer Stromrichtung als positiver Strom von der Anode zur Kathode bezeichnet. Dass die von der Kathode kommenden Elektronen auf der Anode landen, und nicht auf dem Gitter, liegt daran, dass die Anode gegenüber der Kathode positiv geladen ist, während das Gitter gegenüber der Kathode negativ ist. Zumindest im üblichen **Arbeitspunkt**: Ohne Eingangssignal fließt ein Kathodenstrom von z.B. $0,8\text{ mA}$ (Abb. 10.1.1), das Gitterpotential ist damit $1,2\text{ V}$ negativer als das Kathodenpotential. Ist jedoch das Gitter positiv gegenüber der Kathode, finden die von der Kathode kommenden Elektronen *zwei* anziehende Landeplätze: Die stark positive Anode, und das schwach positive Gitter. Weil die Anodenfläche viel größer als die Gitterfläche ist und die Anodenspannung viel größer als die Gitterspannung, fliegen die meisten Elektronen zur Anode; ein kleiner Teil landet aber auf dem Gitter und verursacht einen **Gitterstrom**. Der als (negativer) Elektronenstrom aus dem Gitter herauskommt, d.h. als technischer Strom zum Gitter hineinfließt.

Dem **Gitterstromfluss** liegen mehrere Ursachen zugrunde: Endliche Isolationswiderstände zwischen Gitter/Anode bzw. Gitter/Kathode, Ionisation des Restgases (schlechtes Vakuum), thermische Gitteremission wegen hoher Gittertemperatur, und das schon erwähnte Auffangen eines Teils der von der Kathode emittierten Elektronenwolke. Die einzelnen Effekte überlagern sich (mit z.T. unterschiedlichem Vorzeichen) und ergeben eine nichtlineare Eingangskennlinie: Der Gitterstrom hängt nichtlinear von der Gitter/Kathode-Spannung U_{gk} ab. Für Eingangsspannungen* U_e über ca. $+0,7\text{ V}$ ($U_{gk} > -0,5\text{ V}$) fließt ein merklicher Gitterstrom, der zu einem Spannungsabfall am Gitter-Vorwiderstand R_g führt. Als Folge davon wird die Gitterspannung U_g verringert. Vor allem bei stark positiver Eingangsspannung macht sich dieser Effekt bemerkbar: Z.B. liegen dann statt $+4\text{ V}$ nur ca. $+1,2\text{ V}$ am Gitter (**Abb. 10.1.2**).

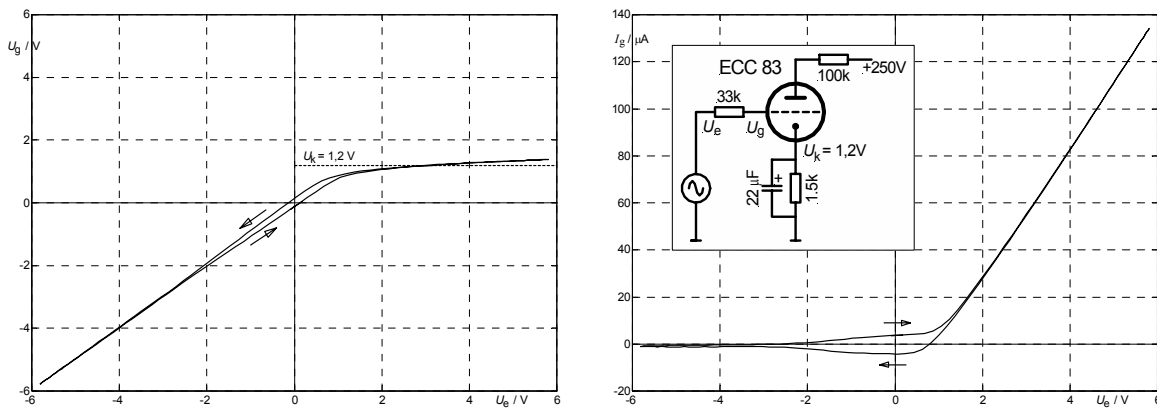


Abb. 10.1.2: Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Eingangsspannung U_e , Gitterspannung U_g und -strom I_g .

Messungen der realen Röhrenspannungen und -ströme zeigen ein Hystereseverhalten, das von kapazitiven Kopplungen zwischen Anode und Gitter verursacht wird. In der Röhre wirkt die Gitter/Anode-Kapazität (ca. $1,6\text{ pF}$), außerhalb sind aufbaubedingte Schaltungskapazitäten wirksam. Zusammen mit dem Gittervorwiderstand ergibt sich im Rückkopplungszweig ein Hochpass, d.h. die Anodenspannung wird (näherungsweise) differenziert der Generatorspannung überlagert. Da bei der im Bild dargestellten Aussteuerung die Anodenspannung stark begrenzt ist (Kap. 10.1.3), wirkt sich diese Rückkopplung vor allem in Nullpunktnähe aus. Idealisierte Kennlinien sind in **Abb. 10.1.3** dargestellt: U_{gk} ist die zwischen Gitter und Kathode liegende Spannung, also die eigentliche Steuerspannung der Röhre; sie beträgt im Arbeitspunkt (d.h. ohne Aussteuerung) für dieses Beispiel ca. $-1,2\text{ V}$.

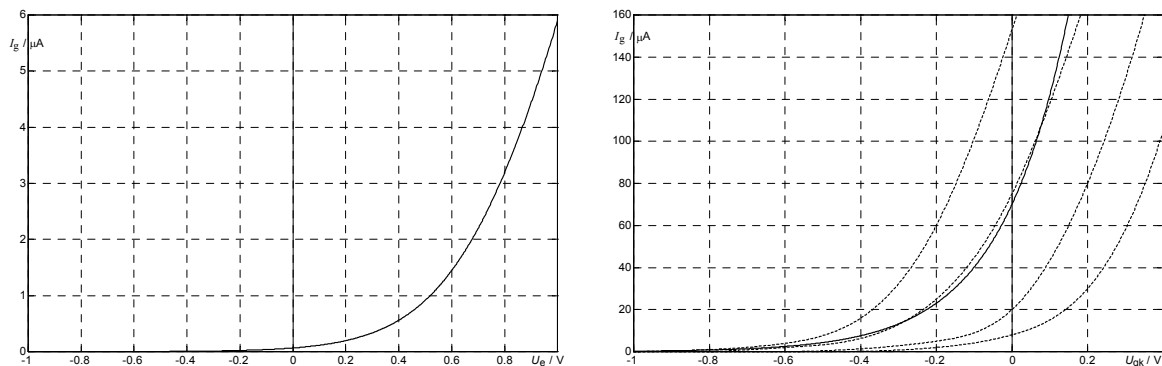


Abb. 10.1.3: Gitterstrom in Abhängigkeit von der Eingangsspannung bzw. von der Gitter/Kathode-Spannung. Im rechten Bild sind zusätzlich zum idealisierten Verlauf auch Messkurven (----) eingezeichnet.

* U_e zwischen Eingang/Masse, U_g zwischen Gitter/Masse, U_{gk} zwischen Gitter/Kathode.

Für eine Bewertung des nichtlinearen Verhaltens ist natürlich die Größe der tatsächlichen Eingangsspannung zu berücksichtigen: Wäre diese maximal 100 mV, die Nichtlinearität könnte ignoriert werden. Tatsächlich können übliche Magnettonabnehmer aber leicht Spannungen über 0,5 V erzeugen, und selbst 4 V sind nicht unmöglich – die Nichtlinearität verdient deshalb Beachtung. In **Abb. 10.1.4** ist die Häufigkeits-Verteilungsfunktion einer Tonabnehmerspannung dargestellt. Sie lässt sich (wie übrigens auch Sprache) sehr gut durch eine Laplace-Verteilung beschreiben: Je größer der Betrag der Tonabnehmerspannung, desto seltener kommt sie vor*. Mit "lauten" Tonabnehmern (Kap. 5.4), dicken Saiten und starkem Anschlag können erhebliche Spannungen erzeugt werden. Der Verteilungsfunktion dieses speziellen Beispiels kann entnommen werden, dass 95% aller Spannungswerte kleiner als 1V sind, 98% sind kleiner als 2V. Aus der relativ geringen Überschreitungswahrscheinlichkeit darf aber nicht geschlossen werden, dass die Nichtlinearität deshalb vernachlässigt werden kann; große Amplituden treten vor allem beim Anzupfen der Saite auf (**Abb. 10.1.5**), und der darauf folgende Einschwingvorgang (Attack) wird vom Gehör besonders genau analysiert. Die beiden in **Abb. 10.1.5** dargestellten Signale klingen unterschiedlich. Überraschenderweise klingt das amplitudenbegrenzte Signal aber nicht verzerrter, sondern höhenärmer als das Original. Die Anodenspannung sieht dann aber wieder gänzlich anders aus (Kap. 10.1.3), und wie immer gilt: Die isolierte Darstellung einzelner Nichtlinearitäten sagt wenig über das Verstärker-Ausgangssignal aus.

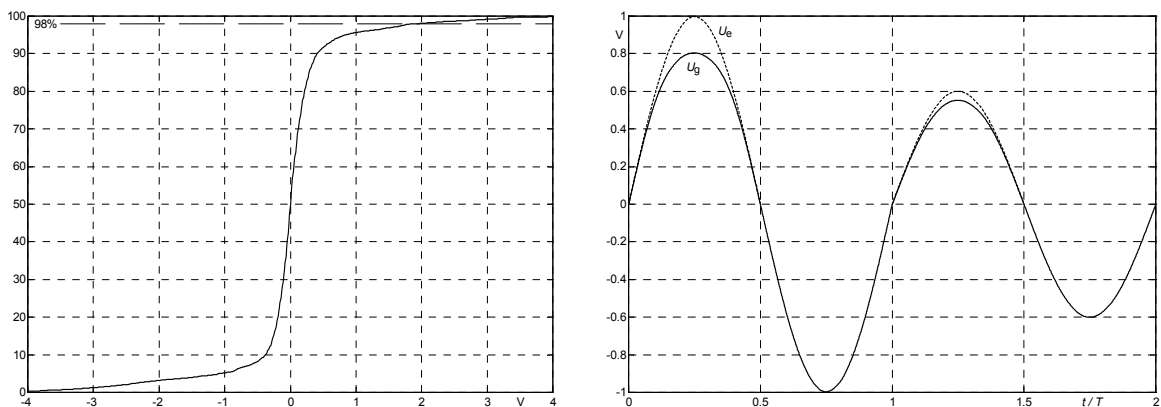


Abb. 10.1.4 links: Verteilungsfunktion (Kumulation) der Tonabnehmerspannung (Strat, SDS-1 in Stegposition). Rechts: Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Eingangsspannung U_e und Gitterspannung U_g beim Sinussignal.

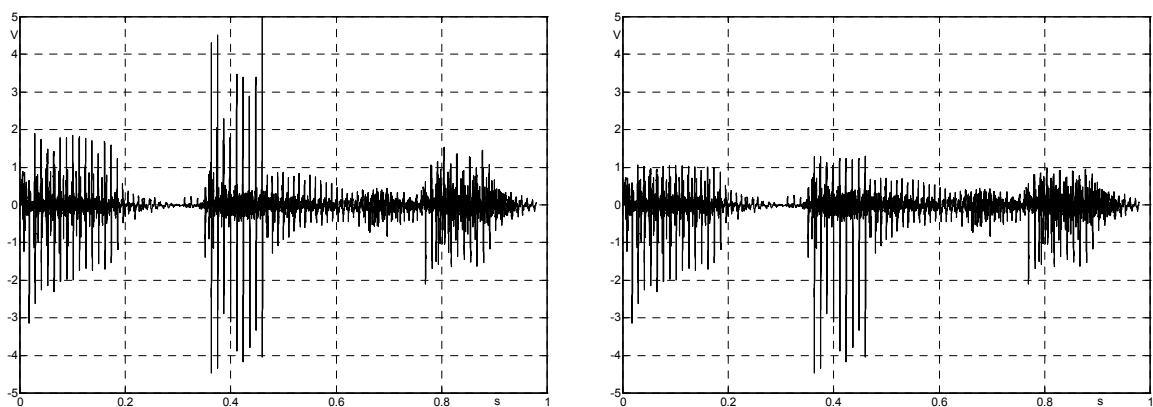


Abb. 10.1.5: Spannungsverlauf am SDS-1-Tonabnehmer (links) bzw. mit röhrenähnlicher Begrenzung (rechts).

* Streng genommen ist die Wahrscheinlichkeitsdichte für diskrete Werte der kontinuierlich verteilten Spannung null; um eine (von null verschiedene) Wahrscheinlichkeit zu bekommen, ist über einen Bereich zu integrieren.