

10.1.6 Zeitvarianz

Viele Theoreme der Systemtheorie gelten nur für das lineare und zeitinvariante System. Der Gitarrenverstärker ist weder das eine, noch das andere. Er verzerrt nichtlinear, und seine Systemeigenschaften sind zeitvariant: Sie ändern sich durch Alterung der Bauteile, (was bekannt ist), und sie ändern sich durch kurzzeitige Arbeitspunktverschiebungen, was eher unbekannt ist. Die trivialen Zeitvarianzen betreffen Bauteile, die ihre Daten temperaturabhängig ändern, oder schnell alternde Bauteile, wie z.B. Röhren. Sie sind hier nicht gemeint, alle Bauteile werden für diese Betrachtung als zeitinvariant angenommen. Arbeitspunktverschiebungen können im Kurzzeitbereich trotzdem auftreten, weil nichtlineare Prozesse zu Umladungsvorgängen in Kondensatoren führen. Gäbe es keine Kondensatoren, würde dieses Kapitel entfallen. Im Umkehrschluss: Jeder Kondensator ist eine potentielle Quelle für Varianzen.

In Gitarrenverstärkern werden Röhren übersteuert, sie sind nichtlineare Systeme. Selbst bei vermeintlich unverzerrtem Spiel (Clean-Sound) kann der Anschlag leicht verzerrt sein*. Alle geradzahigen Verzerrungen ($k_2, k_4, k_6 \dots$) erzeugen einen zusätzlichen **Gleichanteil**, der den **Arbeitspunkt** kurzzeitig verstellt – das Übertragungsverhalten wird somit zeitvariant. Beispielsweise wird der **Kathodenwiderstand** häufig durch einen Elektrolytkondensator überbrückt, um die Gegenkopplung zu reduzieren. Die durch geradzahige Verzerrungen im Kathodenstrom erzeugte DC-Komponente verändert zeitvariant die Kathodenspannung, und somit den Arbeitspunkt. Eine weitere Variable ist die **Betriebsspannung**, die in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung schwankt. Diese Schwankungen werden zwar tiefpassgefiltert, aber nicht ausgegletet; sie wirken auf die Anodenspannungen der Vor- und Zwischenstufenröhren zurück (engl. SAG oder SAGGING). **Abb. 10.1.28** zeigt Messwerte der Betriebsspannung eines Fender-Verstärkers (Deluxe). Von $t = 0,3$ bis $1,7$ s wird der Verstärker voll angesteuert, die Betriebsspannung U_B bricht von 247 V auf 210 V ein. Als Konsequenz ändern sich maximaler Signalpegel und Klirrdämpfungen, wie schon in **Abb. 10.1.12** dargestellt. Viele Gitarristen verlangen nach diesem Effekt, da er den Gitarrenton lebendiger macht – es gibt aber auch Maßnahmen, die durch Ändern der Siebkondensatoren und -widerstände dieses Sagging abschwächen. Ganz unterbinden ließe es sich nur mit dem Einbau einer Stabilisatorröhre, abschwächen durch Vergrößern des Siebkondensators (C_B), der bei frühen Verstärkern eher klein dimensioniert war ($8 \mu\text{F}$), bei späteren bis auf $50 \mu\text{F}$ vergrößert wurde. Das Sagging wird nicht primär durch den größeren Stromverbrauch der Vorröhre verursacht, sondern durch den Endstufenstrom, der die Netzteilspannung verringert. Der genaue Verlauf von U_B hängt deshalb von vielen Parametern ab.

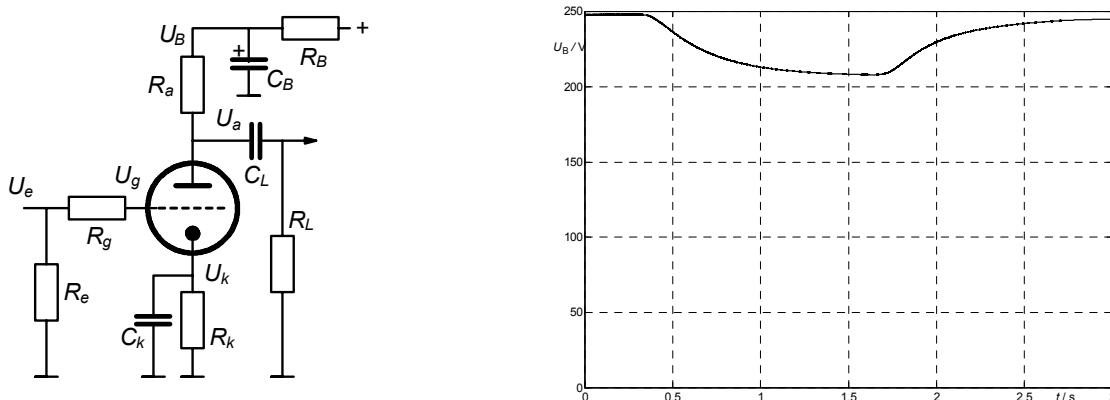


Abb. 10.1.28: Röhren-Eingangsstufe (links); aussteuerungsbedingtes Einbrechen der Betriebsspannung (rechts).

* Es ist die hohe Kunst des Verstärkerbaus, dass derartige Verzerrungen gut klingen.

Eine weitere Varianz zeigt sich bei **Koppelkondensatoren**: Die Röhren-Ansteuerung ist nur bei negativer Gitterspannung ausreichend leistungslos. Typischerweise findet man bei Vorstufentrioden $U_{gk} = -1,2V$, und somit können Tonabnehmer mit großem Übertragungskoeffizient die Röhre in den Gitterstrombereich aussteuern. Erst recht ist bei den nachfolgenden Röhren mit Gitterströmen zu rechnen. Im Verstärkereingang wird meistens kein Koppel-Kondensator verwendet, der Tonabnehmer liegt über $34\text{ k}\Omega$ direkt am Gitter der ersten Röhre. Wäre er über einen Kondensator gekoppelt, könnte der (nur unipolar fließende) Gitterstrom diesen Kondensator aufladen (Minus am Gitter), und hierdurch würde der Arbeitspunkt in Richtung auf einen kleineren Anodenstrom verschoben. Nicht dauerhaft, natürlich, denn über den Gitterableitwiderstand und den Gitarren-Innenwiderstand könnte er sich wieder entladen, aber genau diese Lade- und Entladevorgänge hat der klassische Gitarrenverstärker (Fender, VOX, Marshall) in der Eingangsstufe nicht (bzw. nur bei ganz alten Anlaufstrom-Varianten).

Ganz anders bei der Kopplung zwischen den einzelnen Röhren: Die erfolgt fast immer über einen Koppelkondensator (Ausnahmen sind eigentlich nur die galvanischen Kopplungen bei Kathodenfolgern). Da Anodenwechselspannungen viel größer sein können als die für gitterstromfreien Betrieb zulässigen Spannungen, ist ein vorübergehendes Umladen der Koppel-Kondensatoren fast zwangsläufig. Die Gitterströme selbst werden zwar nicht grundsätzlich zu hörbaren Effekten führen, die zeitvariante Verschiebung des Arbeitspunktes kann aber hörbare Änderungen im Obertongehalt bewirken. Mit welchen Zeitkonstanten die Umladevorgänge ablaufen, kann in etwa abgeschätzt werden: Für das "Aufladen" (Gitterstromfluss) erhält man einen nichtlinearen Vorgang, weil der Röhren-Eingangswiderstand nichtlinear wird. Als Näherung kann man den Arbeitswiderstand der vorhergehenden Röhre verwenden, zusammen mit der Kapazität des Koppel-Kondensators. Je nach Verstärker sind das Werte im unteren Millisekundenbereich. Die "Entladung" kann nicht über das Gitter erfolgen, sondern nur über den Ableitwiderstand (gerne $1\text{ M}\Omega$). Hiermit kann man schon 20 ms erreichen, also Zeiten, die auch bei schnell eingestellten Kompressoren zur Anwendung kommen. Auch wenn die Kapazität des Koppel-Kondensators so groß ist, dass der von ihm gebildete Hochpass weit unterhalb üblicher Gitarrenfrequenzen angreift: Die Umladezeiten werden von dieser Kapazität (und den Widerständen) definiert.

Bei der Vielzahl der am Markt vorhandenen Röhrenverstärker ist es schwierig, die typischen Ursachen des "Röhrensounds" anzugeben. Selbst bei der Frage nach typischen Charakteristiken bekommt man unterschiedliche Meinungen zu hören – erst recht bei der Frage nach deren Ursachen. Häufig ist zu hören: *Der Röhrenverstärker lebt, atmet, spielt sich dynamischer, klingt lebendiger, reagiert besser auf Änderungen im Ausdruck*. Im Gegensatz dazu klingt der Transistorverstärker: *Steril, klinisch, unpersönlich, analytisch, tot*. Dieses der Röhre attestierte Eigenleben könnte seine Ursache durchaus in den o.a. Arbeitspunktverschiebungen haben. Fließt für nur 1 ms ein unipolarer $10\text{-}\mu\text{A}$ -Strom durch einen 22-nF -Kondensator, so ändert sich dessen Spannung um $0,45\text{ V}$. Eine derartige Arbeitspunktverschiebung würde das Übertragungsverhalten einer ECC 83 schon total verändern. Nicht, dass ein derartiges Verhalten mit einem Halbleiterverstärker nicht erreichbar wäre – die "zeitgemäße" Schaltungstechnik sieht aber gerade in der kondensatorlosen Kopplung der einzelnen Verstärkerstufen einen Vorteil. Und hat zweifellos Recht, wenn es um Artefaktminimierung geht. Doch gerade darum geht es beim Gitarrenverstärker eben nicht, bzw. nicht in erster Linie.

P.S.: Der hier gewählte Begriff *zeitvariant* gilt für Kurzzeit-Betrachtungen; langfristig gesehen sind die o.a. Arbeitspunktverschiebungen schon *zeitinvariant*, d.h. laufen bei identischer Anregung in identischer Form ab. Diese Unterscheidung ist aber nur bei streng systemtheoretischer Betrachtung wichtig.