Verzerrungen: gerade oder ungerade?

Manfred Zollner

Verstärkerröhren wurden von Halbleitern weitgehend verdrängt – nur im Gitarrenverstärker halten sie sich hartnäckig. Der Grund: Übersteuerte Röhrenverstärker klingen angenehmer als übersteuerte Transistorverstärker. Auch wenn das jetzt nicht für alle Vertreter ihrer Art gilt, bei nicht wenigen ist es so. Warum? *Weil Röhren hauptsächlich geradzahlige Verzerrungen erzeugen, und die sind mit dem Original stärker verwandt als die vom Transistor produzierten ungeradzahligen Verzerrungen*. Kronzeugen dieses Statements sind die Orgelbauer, die mit Oktavregistern *strahlende* Klänge erzeugen, und mit Aliquoten *hohle*. Netter Versuch, doch völlig daneben. Geradzahlige Verzerrungen sind etwas ganz anderes als geradzahlige Harmonische. Die über viele Jahrzehnte bemühten angeblich guten *even-order harmonics* werden bezüglich der Verzerrungen falsch interpretiert, sie erzeugen keinesfalls nur eng verwandte Verzerrungstöne.

Angeblich erzeugen Verstärkerröhren vorwiegend geradzahlige Verzerrungen, die "offen, singend, strahlend" klingen, während ungeradzahlige Verzerrungen "gedeckt, hohl, weich" klingen. Die Theorie der nichtlinearen Verzerrungen wurde bereits in Kap. 5, 10, und 11 erläutert (Zollner [1]), sie soll hier nicht wiederholt werden. In aller Kürze: Beim nichtlinearen Verzerren eines *Sinustones* von z.B. 1 kHz entstehen zusätzliche Töne bei ganzzahligen Vielfachen der Grundtonfrequenz. Also bei 2, 3, 4, 5, 6, 7... kHz. Die bei 2, 4, 6... kHz entstehenden Verzerrungstöne nennt man **geradzahlige Harmonische**, die bei 3, 5, 7... kHz entstehenden entsprechend **ungeradzahlige Harmonische**. Unter bestimmten Bedingungen können bei Röhren tatsächlich geradzahlige Verzerrungstöne überwiegen, und somit scheint ein Unterschied zum Transistorverstärker gefunden, bei dem (unter gewissen, jedoch anderen Bedingungen) die ungeradzahligen Verzerrungstöne überwiegen. Um den Klang dieser Verzerrungen nicht nur mathematisch, sondern auch verbal beschreiben zu können, wurde schon vor Jahrzehnten eine Anleihe beim **Orgelbau** gemacht. Ein fataler Fehler, der sich fortan durch die Verstärkerliteratur ziehen wird. Schon 1973 schreibt R. O. Hamm: "*Perhaps the most knowledgeable authorities in this area are the craftsmen who build organs and musical instruments. Through many years of careful experimentation these artisans have determined how various harmonics relate to the coloration of an instrument's tonal quality [JAES 21/4]"*. Das Fachwissen der Orgelbauer soll gar nicht in Frage gestellt werden – der Fehler war, es unkritisch auf Verstärker-Verzerrungen zu übertragen.

Die Schallerzeugung der **Pfeifenorgel** ist komplex: Da gibt es Zungenpfeifen, Lippenpfeifen, die eng oder weit oder offen oder geschlossen (gedackt) sein können, und beim Drücken der Taste einzeln oder in Kombination erklingen. *"Bei der Gedackten sind die geradzahligen Harmonischen weitgehend unterdrückt. Die Schwingungsform ähnelt daher einem Rechteck, und die Klangfarbe wird als typisch hohl empfunden"*. Das wusste R. Böhm schon 1966, und natürliche wussten es die Orgelbauer noch viel früher, denn die Orgelvorläufer kommen aus vorchristlicher Zeit. Dem Orgelton lassen sich gezielt Obertöne hinzufügen, z.B. die Oktave (4') und die Superoktave (2'), oder die Aliquoten (Register, die nicht in Oktavrelation stehen). Die Obertonstruktur ist bekannt, der damit erzeugte Klang auch. Beim verzerrten **Sinuston** ist die Situation noch einfacher: Punktsymmetrische (ungerade) Übertragungskennlinien ergeben ungeradzahlige Verzerrungen, achsensymmetrische (gerade) Kennlinien ergeben geradzahlige Verzerrungen. Beim **Gitarrenton** beginnen die Probleme, denn er ist kein Sinuston.

Das erste **Beispiel** sei eine kleine Tonfolge: Zuerst aus reinen Sinustönen gespielt, dann unter Zusatz der 2. und 4. Harmonischen, und dann unter Zusatz der 3. und 5. Harmonischen♣. Man könnte auch sagen: unverzerrt, geradzahlig verzerrt, ungeradzahlig verzerrt. Eindeutig: Zwischen gerad- und ungeradzahligen Verzerrungen bestehen große Klang-Unterschiede. Aus diesem kurzen Schallbeispiel ist die Entwicklung dieses epochalen Missverständnisses ersichtlich: Man verändert Schalle durch additive Synthese (ähnlich wie bei Orgeln), und überträgt die hierbei gefundenen Klangattribute auf nichtlineare Verzerrungsmechanismen. Z.B.: *"The 2nd and 4th harmonics are two and four times the fundamental frequency respectively, or one or two octaves higher. They are therefore musically related to the original sound and tend to make it fuller and richer. Odd harmonics (and high-orders in general) are often not musically related to the fundamental and so are dissonant" [Blencowe, Designing Valve Preamps for Guitar and Bass]*. Oder etwa Aspen Pittman: *When the transistor amp clips, it produces more odd-order harmonics (and in its worst case can sound hollow and dry), whereas tube distortion produces even-order harmonics. Tube distortion generally sounds warmer [A. Pittman, The Tube Amp Book]*.

Und auch im www wird man fündig. Da schreibt etwa ein begeisterter Musiker, den besten Artikel über Röhrenverzerrungen habe er bei Jack Endino gefunden. Und, ja, da wird die harmonische Obertonstruktur sauber erklärt, und ein Fazit lautet: *"So what do we have? Even harmonic (tube) distortion as stacked octaves, odd harmonic (tape) distortion as a chord"*. In dem Artikel geht es um Röhren- und Tonbandverzerrungen; die einen produzieren hauptsächlich die 2. und 4. Harmonische (*stacked octaves*), die anderen die 3. und 5. Harmonische (Quinte und Durterz, also *a chord*) [www.Endino.com]. In der englischsprachlichen Literatur findet man auch noch eine weitere Begründung: ***odd*** heißt z.B. 'wenig gefragt', 'seltsam', während ***even*** mit z.B. 'ausgeglichen', 'regelgemäß' übersetzt wird. Verwundert es da noch, dass die *even harmonics* besser klingen als die *odd harmonics*?

Die klassische Argumentation ist so einfach wie falsch: *Bei geradzahligen Verzerrungen entstehen Verzerrungstöne, die mit dem Primärton nah verwandt sind*. Also: eine rein quadratische Verzerrung erzeugt einen Verzerrungston eine Oktave über dem Primärton. Das wäre in der Tat eine sehr nahe Tonverwandtschaft ([1], 8.1), doch die gilt nur für die Verzerrung einzelner Sinustöne. Jetzt nehmen wir als Beispiel einen aus drei Sinustönen aufgebauten **Molldreiklang**, und erzeugen damit eine rein quadratische Verzerrung. Seine drei Frequenzen f_1, f_2 und f_3 stehen (bei reiner Stimmung) im Verhältnis 1: 1.2 : 1.5, die drei Primärtöne seien C – Es – G. Verzerrungstöne entstehen bei $2f_1, 2f_2, 2f_3$, das sind die Oktaven zu den Primärtönen. Und bei $f_2 - f_1$, $f_3 - f_1$, $f_3 - f_2$, das sind die **Differenztöne**. Und dann gibt es noch die **Summentöne** bei $f_2 + f_1$, $f_3 + f_1$, $f_3 + f_2$. Bezüglich des Akkord-Grundtons (C) liegen die Differenzfrequenzen beim 0.2-, 0.3- und 0.5-fachen, das entspricht einem tiefen As, Es, C. C und Es sind mit dem Akkord nah verwandt, das As ist sehr dissonant. Die Frequenzen der Summentöne liegen beim 2.2-, 2.5- und 2.7-fachen. Der mittlere Wert (2.5) ergibt eine Durterz♣, also ein E, 2.7-fach ist eine Quart♣ (F), und 2.2-fach liegt zwischen einem Halb- und einem Ganzton♣. Und das alles soll mit einem Mollakkord nah verwandt sein? Sicher nicht! Die Mathematik hinter diesem "Phänomen" ist relativ simpel: Das Quadrat einer Summe ist nicht gleich der Summe der Quadrate. Oder als Formel: $(x + y)^2 \neq x^2 + y^2$. Vielmehr muss das 'doppelte Produkt' hinzugefügt werden: $(x + y)^2 = x^2 + 2xy + y^2$. Mit $x = \sin(\omega_1 t)$, $y = \sin(\omega_2 t)$ erkennt man schnell, dass das doppelte Produkt für unharmonische Summen- und Differenztöne sorgt: $2 \cdot \sin(\omega_1 t) \cdot \sin(\omega_2 t) = \cos[(\omega_1 - \omega_2)t] - \cos[(\omega_1 + \omega_2)t]$.

♣ Phasenlage für Crestfaktor optimiert; L_1 = 0dB, L_2 = -1.2dB, L_4 = -2.5dB; L_3 = -2.5dB, L_5 = -4dB.
♣ um eine Oktave höher

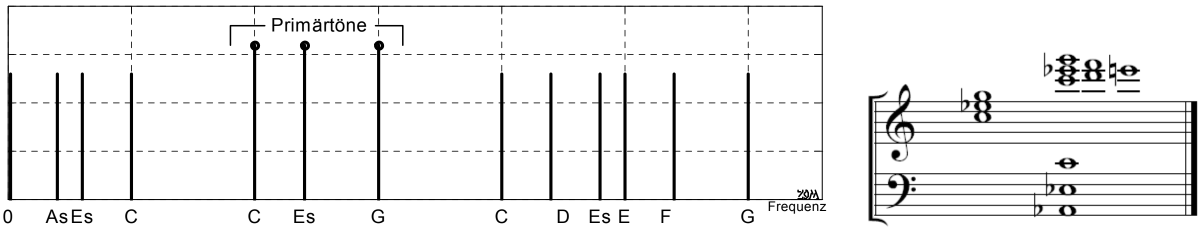

Abb. 1: Spektrum und Notenbild der quadratischen Verzerrung des C-Moll-Dreiklangs. Die 3 Differenztöne sind im Bassschlüssel notiert, Oktaven und Summentöne sind im Violinschlüssel angegeben.

In **Abb. 1** ist links das Verzerrungsspektrum dargestellt, zur Vereinfachung mit identischer Linienhöhe. Bei nicht allzu starker Verzerrung würde man die *über* den Primärtönen liegenden (höherfrequenten) Verzerrungen nicht hören (Verdeckung, [1], [2]). Die drei tieffrequenten Töne haben zum C$^{\text{Moll}}$-Dreiklang einen so großen Frequenzabstand, dass sie als zusätzlicher Dreiklang wahrgenommen werden können. Als As$^{\textbf{Dur}}$-Dreiklang! Und hebt man die hochfrequenten Anteile so stark an, dass sie hörbar werden, stellen auch sie keine nahe Verwandtschaft zu C$^{\text{Moll}}$ dar, sondern bilden einen dissonanten Tonhaufen.

Ein nur aus Grundtönen aufgebauter Moll-Akkord klingt etwas ungewohnt, ist aber leicht erzeugbar. Wer derartige Versuche selbst durchführt, sollte einen hochwertigen Kopfhörer verwenden, und die Schalle mit mittlerer Lautstärke abhören. Bei einer rein quadratischen Verzerrung entsteht, *musically related (?)*, im Bass ein zusätzlicher Dur-Dreiklang. Mit etwas Harmonielehre-Grundkenntnissen findet man tatsächlich eine Verwandtschaft: Einen Maj7-Akkord! In Abb. 1 ist es mit As-Es-C-C-Es-G ein As$^{\text{maj7}}$ – diese Relation hatten Endino und Kollegen aber nicht im Sinn, die dachten an die über dem Primärakkord liegenden Oktaven. Die es schon auch gibt, aber eben verdeckt. Um sie zu Gehör zu bringen, müsste man die drei tieffrequenten Verzerrungstöne entfernen bzw. mit einem Hochpass abschwächen, und die sechs hochfrequenten verstärken. Ein großer Unterschied zu der o.a. verzerrten Sinustonfolge, und leicht erklärlich: es kommen eben nicht nur Oktaven hinzu.

Jetzt sind die **ungeradzahligen Verzerrungen** an der Reihe, zunächst nur als rein kubische Verzerrung. **Abb. 2** stellt das Verzerrungsspektrum des Moll-Dreiklangs dar. Ein Notenbild ist da nicht mehr sinnvoll, die vielen sehr "leiterfremden" Töne können nicht mehr als Akkord spezifiziert werden. Die Amplituden der Verzerrungstöne hängen von den Primärtonamplituden ab, im Bild sind alle Verzerrungslinien gleich lang dargestellt.

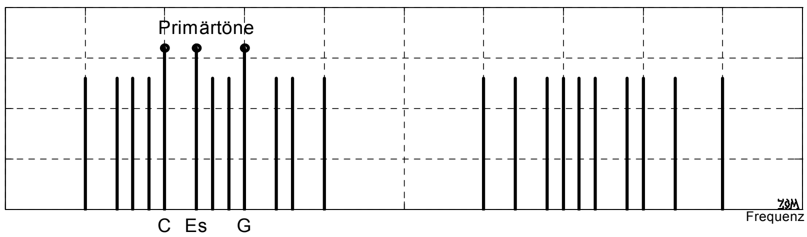

Abb. 2: Rein kubische Verzerrung.

Während man ungeradzahlig verzerrten Sinustönen tatsächlich einen 'hohlen' Klang attestieren könnte (im Gegensatz zum 'Strahlen' der geradzahligen Verzerrungen), lassen sich derartige Attribute beim Verzerren von Klängen nicht mehr zuordnen. Sowohl der quadratisch wie der kubisch verzerrte Mollakkord klingt, nun ja, verzerrt; der Klangunterschied ist gar nicht mehr so groß. Der Hauptunterschied kommt von den Differenztönen, die bei quadratischen Verzerrungen tiefer klingen.

Der mathematische Algorithmus zur Beschreibung der Verzerrungsspektren ist die **Faltung** (engl. Convolution). Wenn eine Zeitfunktion $x(t)$ quadriert, also mit sich selbst multipliziert wird, so ist die dazu korrespondierende Operation die Faltung des Spektrums $X(j\omega)$ mit sich selbst; des zweiseitigen, komplexen Spektrums. In **Abb. 3** ist das zweiseitige Spektrum einer Tongruppe♣ grau eingezeichnet, die Verzerrungshüllkurve rot. Bei den quadratischen Verzerrungen sind die Formen sehr einfach: Aus den Rechtecken werden doppelt so breite Dreiecke, im Bereich um 0 Hz und um die doppelte Frequenz. Für kubische Verzerrungen muss das Spektrum der quadratischen Verzerrungen nochmals mit dem Signalspektrum gefaltet werden (weil $x^3 = x^2 \cdot x$). Damit entfallen die Bereiche um 0 Hz und um die doppelte Signalfrequenz; sie werden ersetzt durch Verzerrungen im Bereich der Signalfrequenz (Tongruppe) und der dreifachen Signalfrequenz. Das ist ein Schlüssel für das Verständnis – und nicht Tonverwandtschaften aus der Obertonreihe.

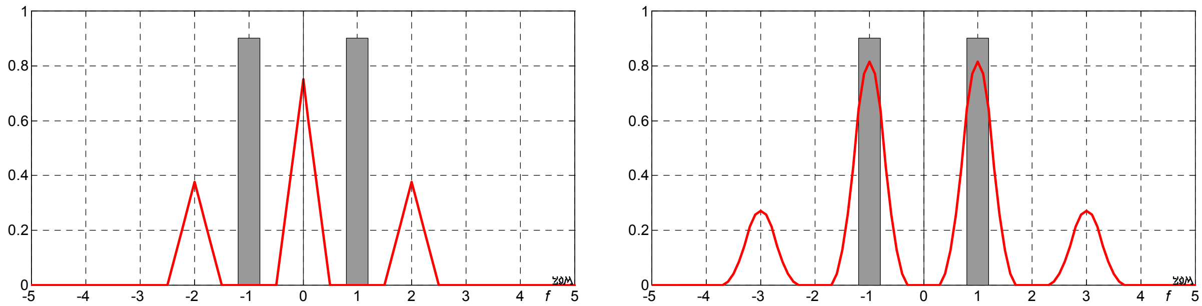

Abb. 3: Quadratische Verzerrung (links) und kubische Verzerrung (rechts) einer Tongruppe (grau).

Natürlich sind Gitarrentöne weder Sinustöne, noch aus Sinustönen aufgebaute Moll-Akkorde. Die Klangvielfalt ist groß, Klassifizierung unumgänglich. Es ist sinnvoll, einsaitiges Spiel von mehrsaitigem zu trennen, und man könnte auch noch Breitbandiges (Strat, "alles voll auf") von nicht ganz so Breitbandigem (Strat, Tone-Poti zugedreht) trennen. Sehr informativ ist der **harmonische Grundton**, also der größte gemeinsame Teiler⊗ (**ggT**) aller Teiltöne. Das ist nicht zwingend der tiefste Primärton! Für den untersuchten Mollakkord mit den relativen Frequenzen 1.0, 1.2 und 1.5 ist der ggT = 0.1, und genau diesen Abstand findet man sowohl in Abb. 1 als auch in Abb. 2 als kleinsten Linienabstand. Die Verzerrungslinien entstehen bei ganzzahligen Vielfachen des ggT, mit Amplituden, die auch null sein dürfen. Bei Verzerrungen niedriger Ordnung werden viele dieser ggT-Vielfachen so gut wie null sein, mit zunehmender Ordnung nimmt die Anzahl der hörbaren Verzerrungstöne rapide zu. Das ist schon beim Vergleich quadratisch / kubisch (Abb. 1 / Abb. 2) zu sehen, und gilt erst recht für höhere Ordnungen.

Bei einem streng **harmonischen** Ton (dessen Teiltonfrequenzen ganzzahlig vielfach zum Grundton sind) ist der ggT der Grundton, Verzerrungsfrequenzen und Teiltonfrequenzen sind identisch (nochmals: einzelne Amplituden können auch null sein).

Beim **inharmonisch** gespreizten Spektrum tendiert der ggT gegen null, es entstehen sehr nahe beisammen liegende Verzerrungslinien, die einen schwebenden, rauschenden, kreischenden oder prasselnden Ton erzeugen ([1], Abb. 10.8.23). Die von einer E-Gitarre produzierten Töne sind nur in der Gymnasial-Physik harmonisch – in der Realität sind sie inharmonisch.

♣ Tongruppe bedeutet hier: mehrere Sinustöne, deren Frequenzen innerhalb des grau markierten Bereichs liegen.

⊗ ggT = die größte Zahl, zu der die betrachteten Zahlen ganzzahlige Vielfache sind;
Als Beispiel: 1.0 = 10*0.1, 1.2 = 12*0.1, 1.5 = 15*0.1; 0.1 = ggT der Zahlen 1.0, 1.2, 1.5.

Für grundlegende Betrachtungen ist es zweckmäßig, zunächst die Wirkung rein quadratischer bzw. rein kubischer Verzerrungen zu analysieren. Die in Gitarrenverstärkern (und insbesondere -verzerrern) erzeugten nichtlinearen Verzerrungen sind aber immer von höherer Ordnung, da entsteht eine unüberschaubare Vielzahl zumeist inharmonischer Verzerrungskomponenten. Wir müssen uns von der Vorstellung verabschieden, Röhren würden geradzahlige (gute) Verzerrungen produzieren, und Transistoren ungeradzahlige, schlechte. Auch wenn das im Einzelfall durchaus mal so sein mag, als generelle Theorie taugt dieses Statement nicht. Dass es Röhrenschaltungen gibt, deren Verzerrungen besser klingen als die von Transistorschaltungen, ist unbestritten – die Ursache sind aber nicht die (guten) geradzahligen Obertöne.

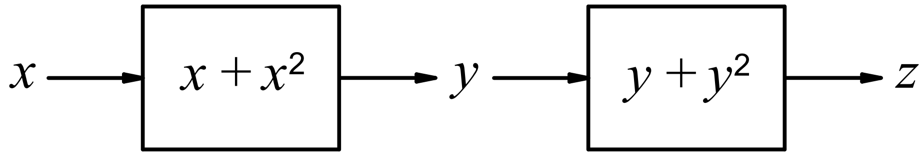

Abb. 4: Kettenschaltung zweier quadratisch verzerrender Systeme.

Ein einfaches Beispiel zeigt, was passiert, wenn man quadratisch verzerrende Systeme hintereinanderschaltet (**Abb. 4**). Man könnte beim quadratischen Glied noch einen Faktor einführen, aber das würde nichts an der grundsätzlichen Aussage ändern. Beim ersten System gilt: $y = x + x^2$, beim zweiten: $z = y + y^2$. Eingesetzt folgt daraus: $z = x + 2x^2 + 2x^3 + x^4$. Ein interessantes Ergebnis: Obwohl beide Systeme nur quadratisch verzerren, enthält das Gesamtsystem auch kubische Verzerrungen. Ändert man die Übertragung des zweiten Systems in: $z = y - y^2$, fallen sogar die quadratischen Verzerrungen ganz weg: $z = x - 2x^3 - x^4$. Und typische Gitarrenverstärker enthalten drei, manchmal sogar bis zu fünf hintereinandergeschaltete Röhrenstufen! Die Konsequenz: Auch wenn ein Verstärker nur quadratisch verzerrende Röhren enthielte, er würde trotzdem kubische (d.h. ungeradzahlige) Verzerrungen produzieren.

Es stimmt folglich nicht, dass:
- Röhrenverstärker vor allem geradzahlige Verzerrungen produzieren, und dass
- geradzahlige Verzerrungen strahlend, offen und singend klingen.

Vielmehr ist für den Verzerrungsklang wichtig, mit welchem Pegel die einzelnen Harmonischen erzeugt werden, und deshalb sind auch die linearen Filterungen wichtig, die in den und zwischen den Stufen wirken. Röhrenstufen, insbesondere wenn hochohmig angesteuert, begrenzen manchmal schon auf wenige Kilohertz Bandbreite (Miller-Effekt), und ihre Signalbegrenzung erfolgt mit einer eher runden Übertragungskennlinie. Demgegenüber können Operationsverstärker sehr breitbandig arbeiten, und durch ihr scharfes Clipping auch Verzerrungen sehr hoher Ordnung erzeugen. Zwischen einem übersteuerten Röhrenverstärker und einem übersteuerten OP-Amp-Verstärker können deshalb sehr wohl erhebliche Klangunterschiede bestehen ... die aber nicht einfach mit "gerade/ungerade" erklärbar sind. Und dann ist bei vielen Röhrenverstärkern die Lautsprecheransteuerung relativ hochohmig (dem hohen Röhren-Innenwiderstand geschuldet), während Transistorendstufen häufig sehr niederohmig sind. Wegen der stark frequenzabhängigen Lautsprecherimpedanz entstehen dabei (durchaus erwünschte) Frequenzgang-Filterungen bis über 10dB. Aussteuerungsabhängige Arbeitspunktverschiebungen sind beim Röhrenverstärker weitere Charakteristika, die bei geeigneter Ausprägung dem Klang mehr "Leben" (Modulationen) verleihen können.

Eine nicht zu unterschätzende Besonderheit der Verstärkerröhre ist ihr **Gitterstrom**. Wenn sich (bei positiver Ansteuerung) die üblicherweise negative Gitter-Kathode-Spannung dem Wert null nähert, beginnt ein wesentlicher Gitterstrom zu fließen ([1], 10.1.2). Eine Konsequenz daraus ist der nichtlineare Gitterspannungs-Teiler (Gitter-Vorwiderstand vs. Röhren-Eingangswiderstand), der aber nur bei typischen Röhrenschaltungen seine Wirkung entwickelt – nicht bei Betrieb am niederohmigen Laborgenerator. Eine weitere Konsequenz sind **Potentialverschiebungen** an den Koppel-Kondensatoren. Der bei starker Aussteuerung einsetzende Gitterstrom fließt nur in eine Richtung: in die Röhre hinein (technische Stromrichtung). Dies verändert die Polarisation des eingangsseitigen Koppel-Cs in der Weise, dass sein gitterseitiges Potential sinkt – das Gitter wird (im Mittel) negativer, die Steuerspannung wird von der gitterseitigen Begrenzung "weggedrückt", die Eingangsverzerrung verringert.

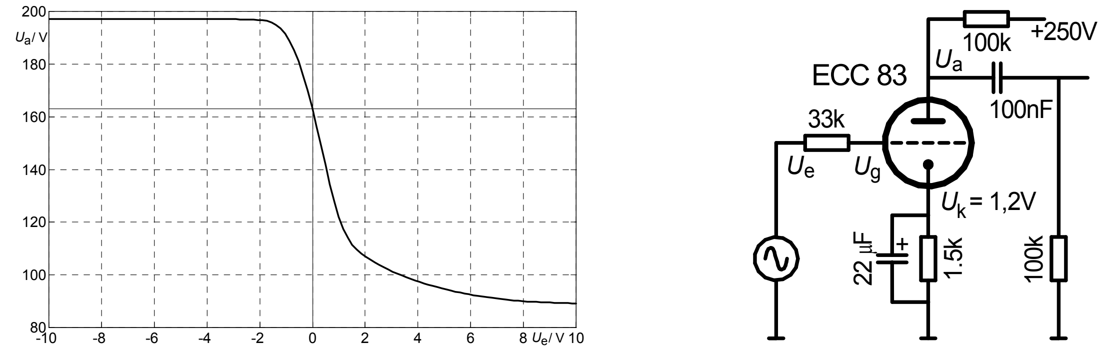

Abb. 5: Anodenspannung vs. Eingangsspannung (vgl. [1], Abb. 10.1.9); rechts die zugehörige Schaltung.

In **Abb. 5** ist im linken Bild die Übertragung vom Eingang zur Anode dargestellt (die Eingangsspannung ist auf Masse bezogen, nicht auf die Kathode). Bei diesem Bild ist nur ein ausgangsseitiger Koppel-C vorhanden, kein eingangsseitiger. Nimmt man diesen hinzu, wie in **Abb. 6** dargestellt, ändert sich für kleine Aussteuerungen nichts. Bei größerer Aussteuerung verschiebt sich das mittlere Gitterpotential, der Arbeitspunkt wandert an das obere Ende der Übertragungskennlinie, die Begrenzung (das Clipping) wird unsymmetrisch.

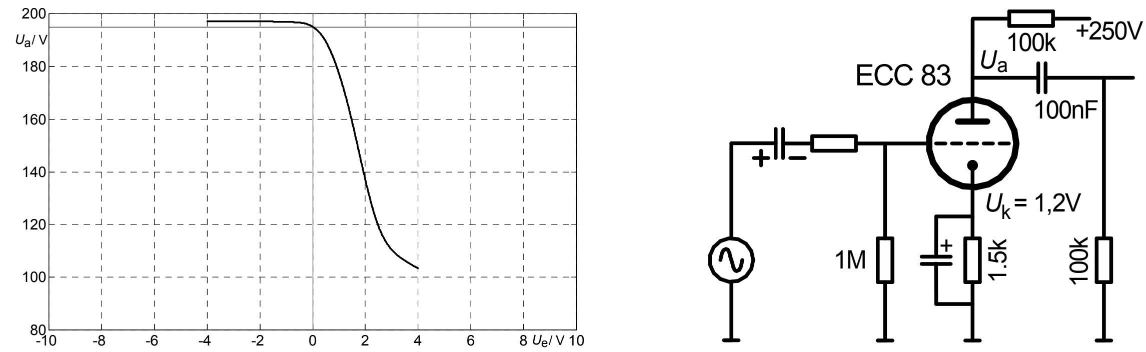

Abb. 6: wie Abb. 5, aber zusätzlich mit eingangsseitigem Koppel-C. Bei Übersteuerung der Röhre wird der Eingangs-Koppel-C in der angegebenen Weise polarisiert.

Unsymmetrische Verzerrungen, dazu gehören tatsächlich geradzahlige Harmonische. Die aber nur bei mäßiger Übersteuerung eine Rolle spielen. Bei geringer Übersteuerung sind sie unhörbar, bei starker Übersteuerung, wenn das Signal beidseitig begrenzt wird, dominieren wieder die ungeradzahligen Verzerrungen. Welche Verzerrungen entstehen hängt somit von der verwendeten Röhre ab, aber eben auch von deren Beschaltung. Ob die Ansteuerung hoch- oder niederohmig und mit oder ohne Koppel-C erfolgt, macht einen großen Unterschied.

Schaltet man mehrere Röhren in Kette – und das ist beim typischen Gitarrenverstärker die Regel – überlagern sich die nichtlinearen Effekte. Und weil (bei Kathodenschaltung) die Röhre invertiert, wirkt sich die Arbeitspunktverschiebung auf beide Halbwellen des Signals aus. Nicht in identischer Weise, aber prinzipiell.

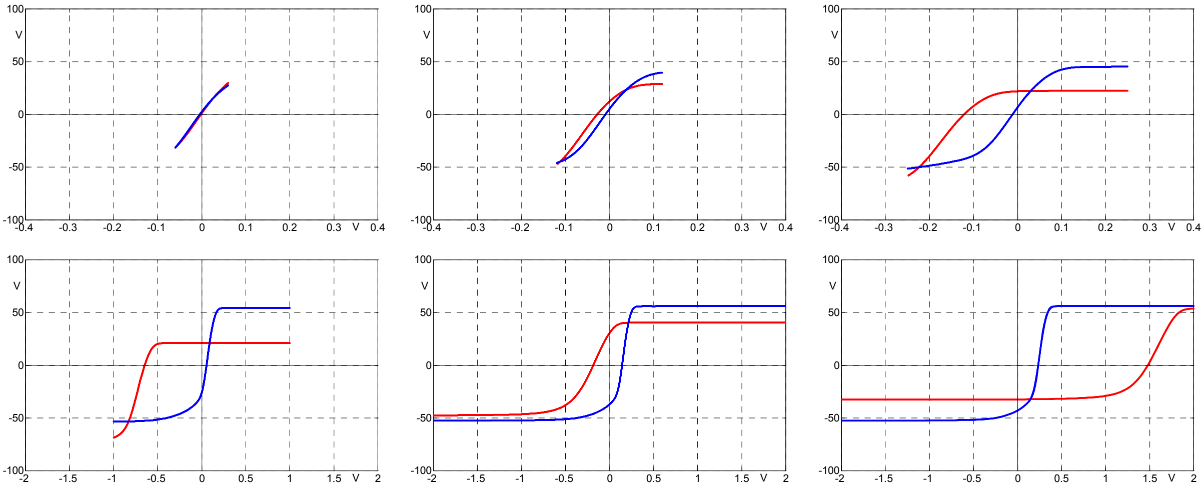

Abb. 7: Übertragungskennlinie einer zweistufigen Röhrenschaltung. Ohne Koppel-C (blau), mit (rot).

Abb. 7 zeigt, wie sich bei einem zweistufigen Röhrenverstärker (Kathodenschaltung) die Übertragungskennlinie bei Aussteuerung verschiebt. Die roten Kurven gehören zur üblichen Kondensatorkopplung, für die blauen Kurven wurde galvanische Kopplung zugrunde gelegt (hierfür ist eine entsprechende Stromversorgung erforderlich). Die absolute Lage der einzelnen Kurven hängt von mehreren Parametern ab – sie ist hier unwichtig. Wichtig ist, dass sich durch Einfügung zweier *linearer* Bauteile (Kondensatoren) das *nichtlineare* Verhalten ändert. Und wie man sieht: dieser Effekt ist viel wichtiger als das millimetergenaue Reproduzieren der individuellen Röhrenkennlinie. Dummerweise hängt diese Kurvenverschiebung vom Gitterstrom ab – und der streut bei typgleichen Röhren beträchtlich.

Zum Abschluss sei noch kurz erwähnt, dass der aussteuerungsabhängige Röhren-Eingangswiderstand auch Auswirkungen auf die untere **Grenzfrequenz** der kapazitiven Ankopplung hat. Üblicherweise berechnet man die Hochpass-Grenzfrequenz mit dem Gitter-Ableitwiderstand (z.B. 1 MΩ). Das stimmt für kleine Aussteuerung. Bei Übersteuerung wird der Röhren-Eingangswiderstand aber partiell niederohmig, die Hochpass-Grenzfrequenz steigt auf höhere Werte an. Mit exakter Systemtheorie wird's noch komplizierter: Nichtlineare Systeme haben nämlich weder Übertragungsfunktionen, noch Grenzfrequenzen; da wären dann nichtlineare Differentialgleichungen erforderlich.

Literatur:

[1] Zollner M.: Physik der Elektrogitarre, www.gitarrenphysik.de
[2] Fastl H., Zwicker E.: Psychoacoustics, Springer, 2007.
[3] Blencowe M.: Designing Valve Preamps for Guitar and Bass, WEM Publishing, 2012.
[4] Böhm R.: Elektronische Orgeln und ihr Selbstbau, Franzis 1966.
[5] Pittman A.: The Tube Amp Book, 4.1th Edition, 1995.
[6] Zur Linde R.: Röhrenverstärker für Gitarre und HiFi, Elektor 1992.