Verzerrungen: gerade oder ungerade?

Manfred Zollner

Verstärkerröhren wurden von Halbleitern weitgehend verdrängt – nur im Gitarrenverstärker, dem hier das besondere Interesse gilt, 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.

Harmonics: even-order or odd-order?

Solid-state devices have largely superseded amplifier tubes – it is only in the area of guitar amplifiers, which are of particular interest here, where the tube tenaciously persists. The reason is that overdriven tube amplifiers are said to sound more pleasant than overdriven transistor amplifiers. While that may not be the case for all representatives of their respective kind, for many amplifiers this assertion holds true. Why is that? Because tubes predominantly generate even-order harmonics – the latter are more closely related to the original signal than the odd-order harmonics generated by transistor amplifiers. Chief witnesses to this statement are organ builders; with their instruments, they generate brilliant sounds using octave stops, and hollow sounds using aliquots. Nice try, but still a total miss. "Even-order distortion" is something completely different than "even-order harmonics". Called upon for many decades as allegedly "good", even-order harmonics have been misinterpreted when it comes to distortion: by no means do they exclusively generate closely related distortion components.

Einleitung

Angeblich erzeugen Verstärkerröhren vorwiegend geradzahlige Verzerrungen, die „offen, singend, strahlend" klingen, während ungeradzahlige Verzerrungen „gedeckt, hohl, weich" klingen. Beim nichtlinearen Verzerren eines Sinustones von z. B. 1 kHz entstehen zusätzliche Töne bei ganzzahligen Vielfachen der Grundtonfrequenz [1]. Also bei 2, 3, 4, 5, 6, 7, ... kHz. Die bei 2, 4, 6, ... kHz entstehenden Verzerrungstöne werden geradzahlige Harmonische, die bei 3, 5, 7, ... kHz entstehenden entsprechend ungeradzahlige Harmonische genannt. 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."* [2]. 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 natürlich 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.

Im Hörbeispiel V1 ist eine kleine Tonfolge zu hören: Zuerst aus reinen Sinustönen gespielt, dann unter Zusatz der 2. und 4. Harmonischen, und dann unter Zusatz der 3. und 5. Harmonischen (Phasenlage für Crestfaktor optimiert; $L_1 = 0$ dB, $L_2 = -1{,}2$ dB, $L_4 = -2{,}5$ dB; $L_3 = -2{,}5$ dB, $L_5 = -4$ dB.). Es könnte auch heißen: 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: Es werden Schalle durch additive Synthese (ähnlich wie bei Orgeln) verändert, und die hierbei gefundenen Klangattribute auf nichtlineare Verzerrungsmechanismen übertragen. 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“* [3]. 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“* [4].

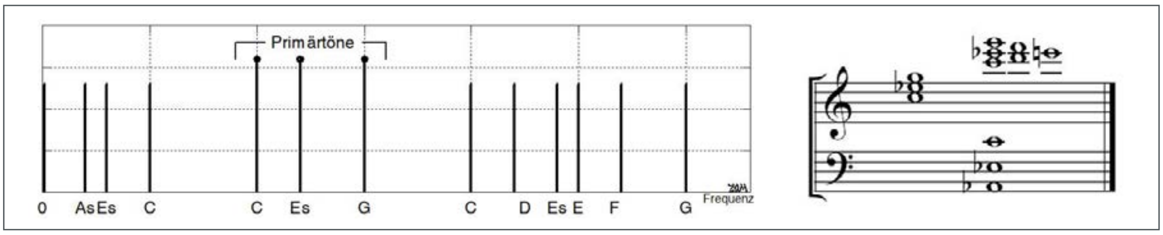
Und auch im Internet wird man hierzu fündig. Da schreibt etwa ein begeisterter Musiker, den besten Artikel über Röhrenverzerrungen habe er bei Jack Endino gefunden. Und, ja, da wird die harmonische Obertonstruktur sauber erklärt, und ein Fazit lautet: *„So what do we have? Even harmonic (tube) distortion 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) [5]. In der englischsprachlichen Literatur findet sich 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-order harmonics besser klingen als die odd-order harmonics?

Geradzahlige Verzerrungen

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, 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. 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 $f_2 + f_1, f_3 + f_1, f_3 + f_2$ (Erklärung weiter unten!). 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* (* = um eine Oktave höher). 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 $x = \sin(\omega_1 t)$, $y = \sin(\omega_2 t)$ wird schnell erkennbar, dass das doppelte Produkt für unharmonische Summen- und Differenztöne sorgt:
$2\sin(\omega_1 t) \cdot \sin(\omega_2 t) = \cos[(\omega_1 - \omega_2)t] - \cos[(\omega_1 + \omega_2)t]$.

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 Abbildung 1 ist links das Verzerrungsspektrum dargestellt, zur Vereinfachung mit identischer Linienhöhe. Bei nicht allzu starker Verzerrung wären die über den Primärtönen liegenden (höherfrequenten) Verzerrungen aufgrund von Verdeckungseffekten nicht hörbar [1, 6]. Die drei tieffrequenten Töne haben zum C-Moll-Dreiklang einen so großen Frequenzabstand, dass sie als zusätzlicher Dreiklang wahrgenommen werden können. Als As-Dur-Dreiklang! Werden die hochfrequenten Anteile so stark angehoben, dass sie hörbar werden, stellen auch sie keine nahe Verwandtschaft zu C-Moll dar, sondern bilden eine dissonante Ansammlung von Tönen.
V2 bietet ein Hörbeispiel zum verzerrten Moll-Akkord. Zunächst für 400 Hz Grundfrequenz, dann für 600 Hz. Das Beispiel sollte mit einem hochwertigen Kopfhörer abgehört werden, nicht mit einem Miniatur-Computermonitor. Und nicht zu laut, um die im Gehör produzierten Nichtlinearitäten in Grenzen zu halten. Der Moll-Akkord klingt etwas ungewohnt, weil nur aus drei Sinustönen aufgebaut. Bei der danach folgenden Verzerrung, die rein quadratischer Natur ist (also musically related), entsteht, wie schon erwähnt, im Bass ein zusätzlicher Dur-Dreiklang. Mit etwas Harmonielehre-Grundkenntnissen findet man tatsächlich eine Verwandtschaft: Einen Maj7-Akkord! In Abbildung 1 ist es mit As-Es-C-C-Es-G ein As^{maj7} – diese Relation hatten Endino und Kollegen aber nicht im Sinn, die dachten an die über dem Primärakkord liegenden Oktaven. Die es schon gibt, aber eben verdeckt. Um sie zu Gehör zu bringen, wurden in V3 die drei tieffrequenten Verzerrungstöne entfernt und die sechs hochfrequenten verstärkt. Ein großer Unterschied zu V1, und leicht erklärlich: es kommen eben nicht nur Oktaven hinzu.

Ungeradzahlige Verzerrungen

Zunächst nur als rein kubische Verzerrung stellt Abbildung 2 das Verzerrungsspektrum eines Moll-Dreiklangs dar. Ein Notenbild ist da nicht mehr sinnvoll. Die vielen sehr „leiterfremden" Töne können nicht

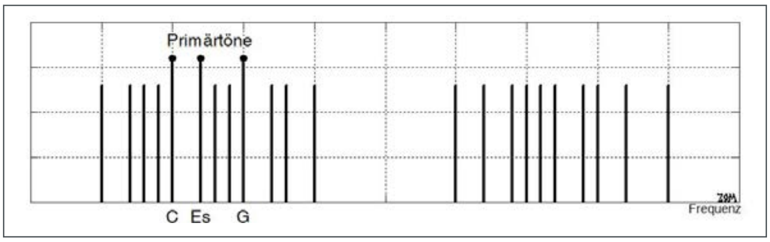
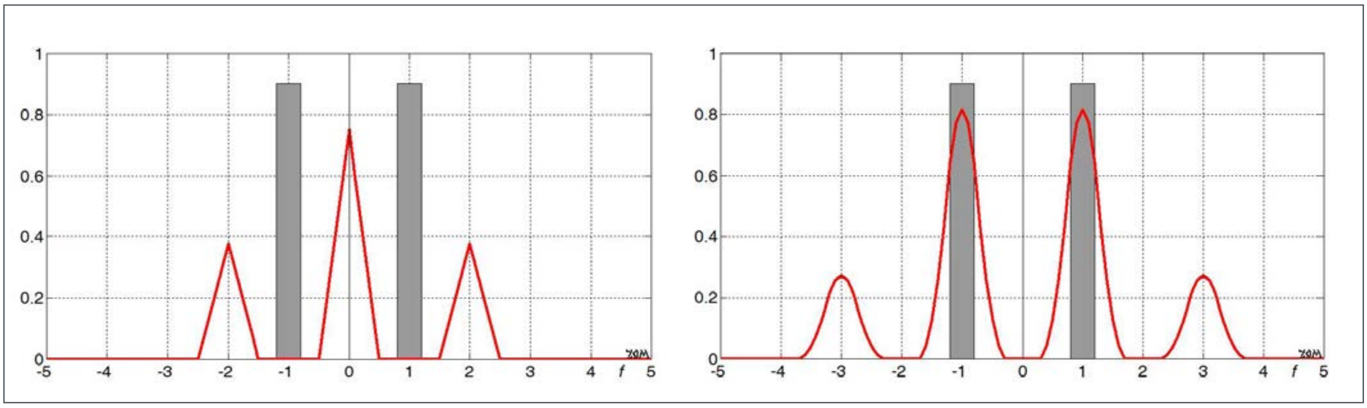


Abb. 2: Rein kubische Verzerrung

mehr als Akkord spezifiziert werden. Die Amplituden der Verzerrungstöne hängen von den Primärtonamplituden ab, im Bild sind alle Verzerrungslinien vereinfachend gleich lang dargestellt.
V4 bietet den Vergleich zwischen den beiden Verzerrungsarten. Zuerst ist der aus Sinustönen aufgebaute Moll-Akkord unverzerrt zu hören; danach wird dieser quadratisch verzerrt, danach kubisch. 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 Abbildung 3 ist das zweiseitige Spektrum einer Tongruppe (hier: mehrere Sinustöne, deren Frequenzen innerhalb des grau markierten Bereichs liegen) 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 $x^3 = x^2 * x$). 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.

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



Verzerrungen bei Gitarren

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 es könnte auch noch breitbandiger Klang von nicht ganz so breitbandigem Klang getrennt werden. Sehr informativ ist der harmonische Grundton, also der größte gemeinsame Teiler (ggT: die größte Zahl, zu der die betrachteten Zahlen ganzzahlige Vielfache sind; als Beispiel: $1{,}0 = 10 \cdot 0{,}1$, $1{,}2 = 12 \cdot 0{,}1$, $1{,}5 = 15 \cdot 0{,}1$; $0{,}1 = \text{ggT}$ der Zahlen 1,0, 1,2, 1,5.) 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 $\text{ggT} = 0{,}1$, und genau dieser Abstand wäre sowohl in Abbildung 1 als auch in Abbildung 2 als kleinster Linienabstand zu finden. 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 (Anm.: 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. Die von einer E-Gitarre produzierten Töne sind nur bei idealisierter Betrachtung harmonisch – in der Realität sind sie inharmonisch.

Quadratische und kubische Verzerrungen

Im Hörbeispiel V5 wurde wieder ein Moll-Akkord verzerrt, doch nun enthält jeder der drei primären Akkordtöne (C, Es, G) zwei zusätzliche Obertöne: die Oktave, und die darüber liegende Quinte (Duodezime). Im File erklingt der Moll-Akkord zuerst unverzerrt, dann quadratisch verzerrt, danach kubisch verzerrt. Außerdem handelt es sich jetzt nicht mehr um einen rein gestimmten Akkord, sondern um einen gleichschwebend temperierten. Damit treffen an einigen Frequenzstellen zwei sehr eng benachbarte Töne aufeinander, was zu hörbaren Schwebungen führt. Der Klangeindruck? Nun ja – irgendwie verzerrt. Und sicher nicht mit „strahlend“ vs. „hohl“ beschreibbar.

In V5 hat die quadratische Verzerrung mehr Bassfundament, wie bei Abb. 3 erläutert. Der kubischen Verzerrung fehlt dieses Fundament, sie klingt mittiger, und etwas rauer. Ist das der zweite Schlüssel: ungeradzahlige Verzerrungen produzieren mehr Rauigkeit? Nein, so einfach ist es nicht. V6 entspricht V5, mit dem Unterschied, dass am Ende ein biquadratisch (Eine biquadratische Verzerrung ist eine Verzerrung 4. Ordnung) verzerrter Molldreiklang angehängt wurde. Und auch der klingt rau. 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 geradzahligen Obertöne.

Ein einfaches Beispiel zeigt, was passiert, wenn quadratisch verzerrende Systeme hintereinander geschaltet werden (Abb. 4). Es könnte beim quadratischen Glied noch einen Faktor eingeführt werden, 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. Wäre die Übertragung des zweiten Systems $z = y - y^2$, fielen sogar die quadratischen Verzerrungen ganz weg: $z = x - 2x^3 - x^4$. Die Konsequenz: Auch wenn ein Verstärker nur quadratisch verzerrende Röhren enthielte, er würde trotzdem kubische (d.h. ungeradzahlige) Verzerrungen produzieren.

Abb. 4: Kettenschaltung zweier quadratisch verzerrender Systeme.

$$x \longrightarrow \boxed{x + x^2} \longrightarrow y \longrightarrow \boxed{y + y^2} \longrightarrow z$$

Es stimmt folglich nicht, dass:

- Röhrenverstärker vor allem geradzahlige Verzerrungen produzieren, und dass
- geradzahlige Verzerrungen strahlend, offen und singend klingen.

Röhrenverstärker und ihre Verzerrungen

Für den Verzerrungsklang ist es wichtig, mit welchem Pegel die einzelnen Ordnungen erzeugt werden, und deshalb sind auch die linearen Filterungen wichtig, die in den und zwischen den Stufen wirken. Operationsverstärker können sehr breitbandig arbeiten, und durch ihr scharfes Clipping auch Verzerrungen sehr hoher Ordnung erzeugen; Röhrenstufen, insbe-

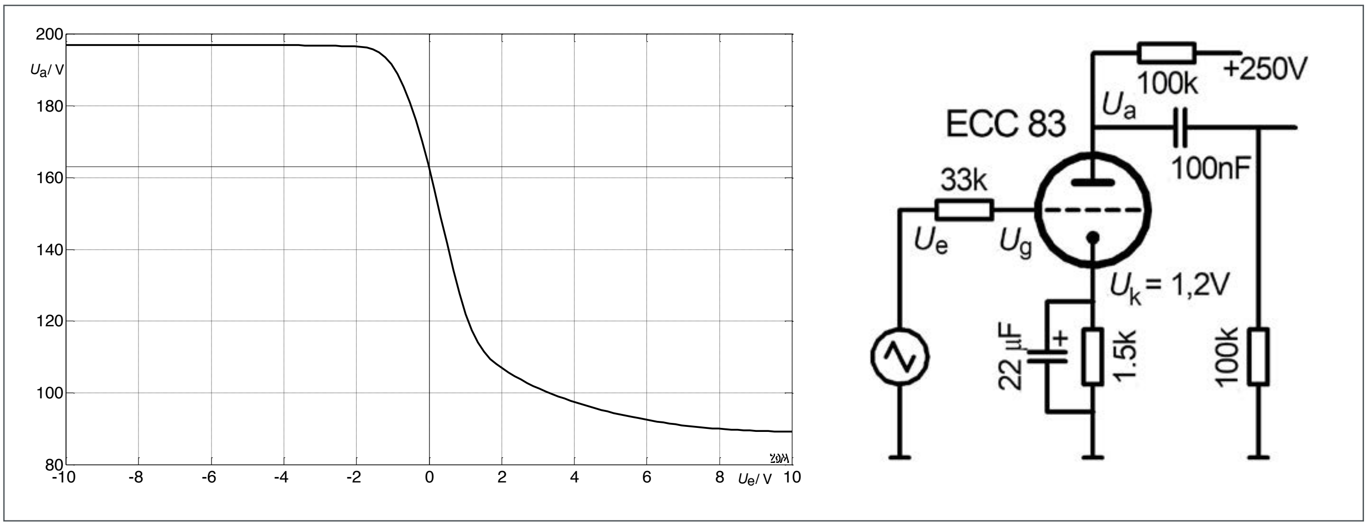


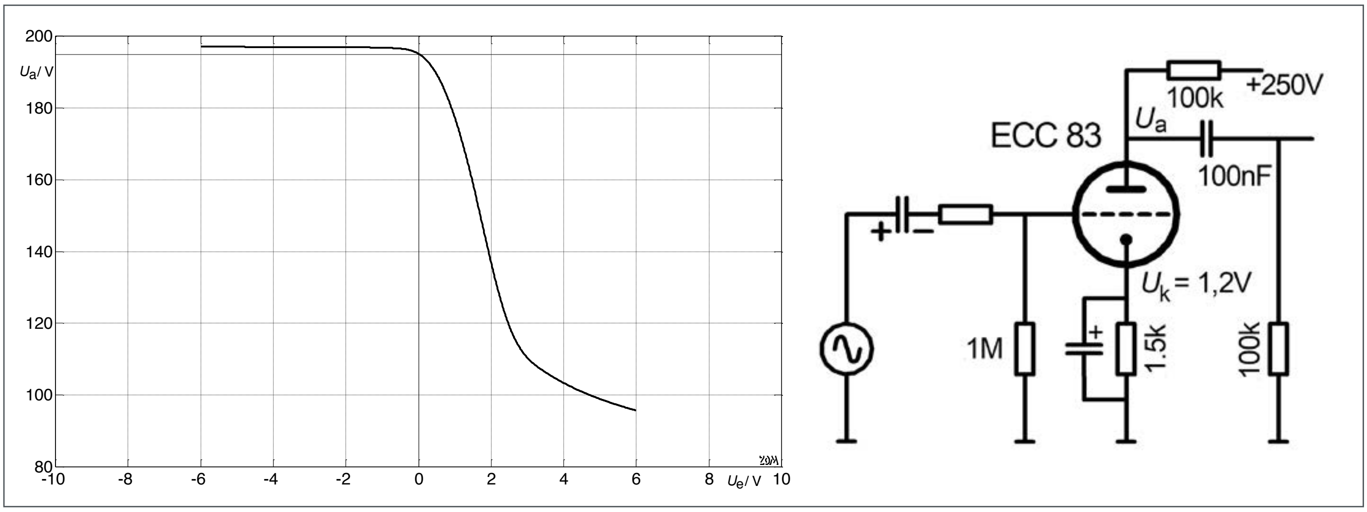
Abb. 5: Anodenspannung vs. Eingangsspannung ; rechts die zugehörige Schaltung.

sondere wenn hochohmig angesteuert, begrenzen manchmal schon auf wenige kHz Bandbreite (Miller-Effekt), und ihre Signalbegrenzung erfolgt mit einer eher abgerundeten Charakteristik. 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. Arbeitspunktverschiebungen und die relativ hochohmige Lautsprecheransteuerung können weitere klangformende Charakteristika sein.

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. 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.

In Abbildung 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. Wird dieser hinzugenommen, wie in Abbildung 6 dargestellt, ändert sich für kleine Aussteuerungen nichts. Bei größerer Aussteuerung verschiebt sich das mittlere Gitterpotential, der Arbeitspunkt wandert an

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.



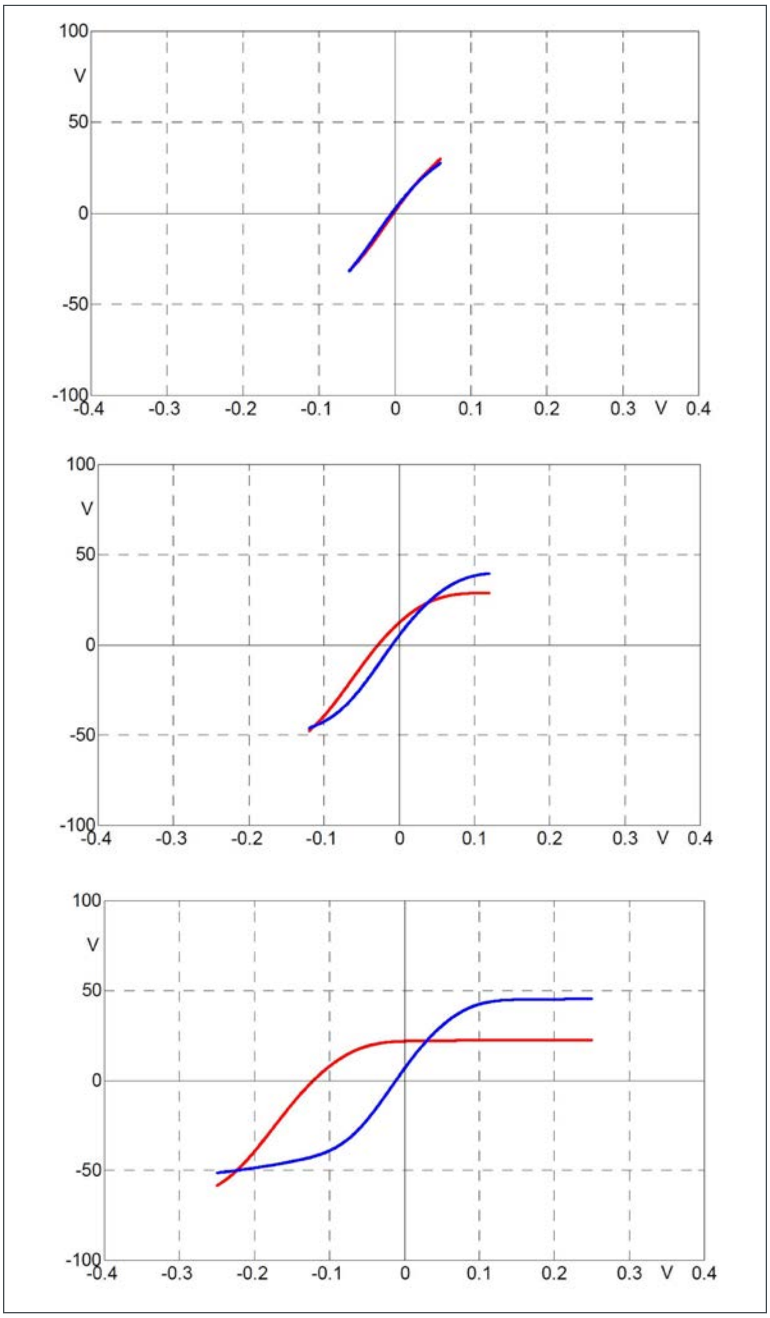


Abb. 7: Übertragungskennlinie einer Röhrenschaltung bei steigender Aussteuerung und unterschiedlicher Beschaltung: ohne Koppel-C (blau), mit (rot). (Anm.: Invertierende Kathoden-Schaltung).

das obere Ende der Übertragungskennlinie, die Begrenzung (das Clipping) wird unsymmetrisch.
Zu unsymmetrischen Verzerrungen 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 (siehe Abb. 7).

Prof. Dr. Manfred Zollner
GITEC e. V.

Bei mehreren 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.

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

Fazit

Die aus der additiven Klangsynthese gewonnenen Erkenntnisse über das Hinzufügen gerad- oder ungeradzahliger Obertöne dürfen nicht generell auf die Klangformung nichtlinear verzerrender Systeme übertragen werden. Es trifft nicht generell zu, dass geradzahlige Verzerrungen angenehmer klingen als ungeradzahlige.

Literatur

[1] Zollner, M.: Die Physik der Elektrogitarre, 2014. *http://www.gitec-forum.de*
[2] Hamm, R.: Tubes Versus Transistors – Is There an Audible Difference. Journal of AES, 21, Issue 4, pp. 267–273, 1973.
[3] Blencowe, M.: Designing Valve Preamps for Guitar and Bass. WEM Publishing, 2012.
[4] *http://www.Endino.com*
[5] Böhm, R.: Elektronische Orgeln und ihr Selbstbau. Franzis, 1966.
[6] Fastl, H.; Zwicker, E.: Psychoacoustics. Springer, 2007.

Hörbeispiele V1 bis V6 herunterzuladen unter: *https://www.dega-akustik.de/publikationen/akustik-journal/*. ■