

10.10.4 Vergleich: Klirrdämpfungen

Transistoren verzerren kubisch (= schlecht), Röhren hingegen quadratisch (= gut), richtig? Quatsch. Es mag ja Dinge geben, die quadratisch, und damit praktisch und gut sind, Röhren gehören nicht dazu – die sind zylindrisch. Sowohl Röhre, als auch Bipolar- und Feldeffekt-Transistor besitzen eine progressiv gekrümmte Übertragungskennlinie, und erzeugen damit quadratische *und* kubische Verzerrungen (und viele weitere). Während sich aber beim kleinen Transistor sehr bald Schaltungen etablierten, die über mehrere Stufen gegengekoppelt waren, dominierte beim Röhrenverstärker die wenig (oder sogar überhaupt nicht) gegengekoppelte Einzelstufe. Ausnahmen gab es (die Endstufe z.B.), in der Eingangsstufe findet man aber so gut wie immer eine einzelne Röhre, meist mit kapazitiv überbrücktem Kathodenwiderstand, also praktisch gar nicht gegengekoppelt. Ganz anders in einem **Operationsverstärker (OP)**: Da sitzen 20 (oder mehr) Transistoren auf engstem Raum – mit Röhren völlig unmöglich, beim "integrierten Verstärker" auf 1 mm² herstellbar. Die in typischen OP-Schaltungen realisierte hohe Gegenkopplung ergibt eine symmetrische Signalbegrenzung, und deshalb starke Verzerrungen ungerader Ordnung (k_3, k_5, k_7, \dots). Wie ein Verstärker verzerrt, hängt folglich nicht primär von seinen Verstärkerelementen ab, sondern von seiner Schaltung.

Die Übertragungseigenschaft eines Bipolartransistors lässt sich von der Basis-Emitter-Spannung (U_{BE}) bis zum Kollektorstrom (I_C) durch eine Exponentialfunktion annähern:

$$I_C = K \cdot e^{(U_{BE}/26\text{mV})} \quad \text{vereinfachte Transistor-Kennlinie}$$

Die Konstante K ist hierbei eine Größe, die vom Sperrverhalten des Transistors abhängt. Mit zunehmender Basis-Emitter-Spannung steigt der Kollektorstrom progressiv an, und da in dieser Funktion keine dominanten Punktsymmetrien enthalten sind, überwiegen auch nicht die kubischen, sondern die quadratischen Verzerrungen (**Abb. 10.10.15**).

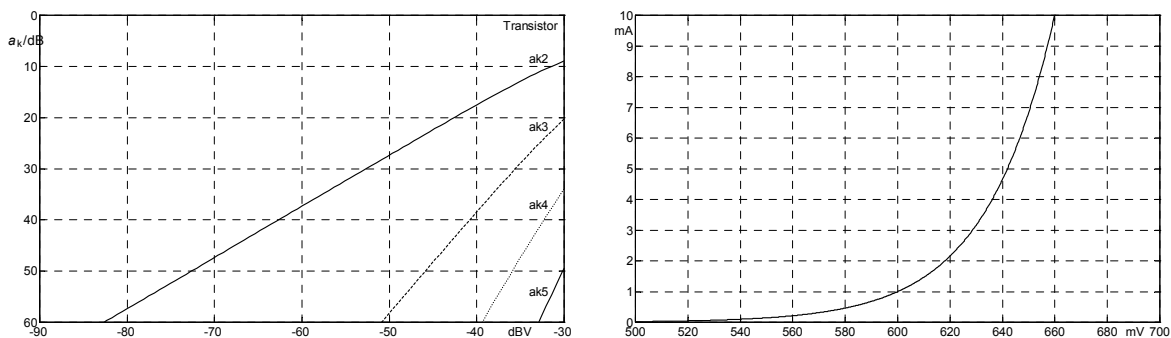


Abb. 10.10.15: Klirrdämpfungen beim Bipolartransistor (links), Übertragungskennlinie (rechts).

Der Abbildung kann entnommen werden, dass der quadratische Klirrfaktor proportional zur Aussteuerung zunimmt, der kubische proportional zum Quadrat der Aussteuerung. Bei etwa $U_{BE} \approx 2.5$ mV überschreitet der quadratische Klirrfaktor schon 3%, der kubische Klirrfaktor beträgt hingegen erst 0.1%. Nun muss man allerdings noch bedenken, dass die o.a. Gleichung für das Kleinsignalverhalten gilt, und das endet allerspätestens, wenn sich die Kollektorspannung der Restspannung nähert (wenn der Transistor bestmöglich leitet). Der Kollektorstrom kann ja nicht beliebig groß werden, irgendwann ist Schluss, und dann biegt die zunächst linksgekrümmte Kennlinie nach rechts ab. Als Folge der Krümmungsänderung wird der Kollektorstrom *beidseitig* begrenzt, ungerade Funktionsordnungen gewinnen an Bedeutung, ungerade Verzerrungen bekommen Gewicht. Bei starker Übersteuerung wird i.A. also nicht mehr der quadratische Klirrfaktor dominieren, sondern der kubische.

Ähnlich verzerrt die **Triode**, auch wenn die funktionalen Zusammenhänge unterschiedlicher Art sind (Abb. 10.1.12). Und ihr, nicht dem Transistor, gelten die folgenden Analysen. Das grundsätzliche Verhalten wurde schon in Kap. 10.1.4 vorgestellt, hier kommen nun spezielle Gitarrenverstärker. Fenders **Super-Reverb** (AB 763) hat im Eingang die 7025 (ECC83) in typischer Beschaltung, bei geringer Aussteuerung dominieren die quadratische Verzerrungen (**Abb. 10.10.16**). Dass die Aussteuerungsabhängigkeit der einzelnen Klirrdämpfungen röhrenspezifisch variiert, hatte schon Abb. 10.1.13 demonstriert, bei kleinen Eingangspegeln (z.B. -20 dBV entspr. 0,1 V) überwiegen aber immer die quadratischen Verzerrungen. Röhrentypisch, könnte man denken, doch gilt das nur für die erste Röhre. Das rechte Bild zeigt die an der 2. Anode gemessenen Verzerrungen, und da überwiegen die kubischen Verzerrungen, die doch – glaubt man Fachzeitschriften – dem Transistor vorbehalten sind. Einzeln betrachtet erzeugt jede Triode bei kleiner Aussteuerung vor allem quadratische Verzerrungen. Da aber vom Gitter zur Anode die **Phase invertiert** wird, kompensieren sich die quadratischen Verzerrungen weitgehend. Anders gesagt: Die erste Triode erzeugt eine rechtsgekrümmte Kennlinie, die zweite eine linksgekrümmte, beide hintereinandergeschaltet erzeugen folglich eine S-Kurve – und bei der dominieren die kubischen Verzerrungen (ungerade Funktionen ergeben ungerade Verzerrungen).

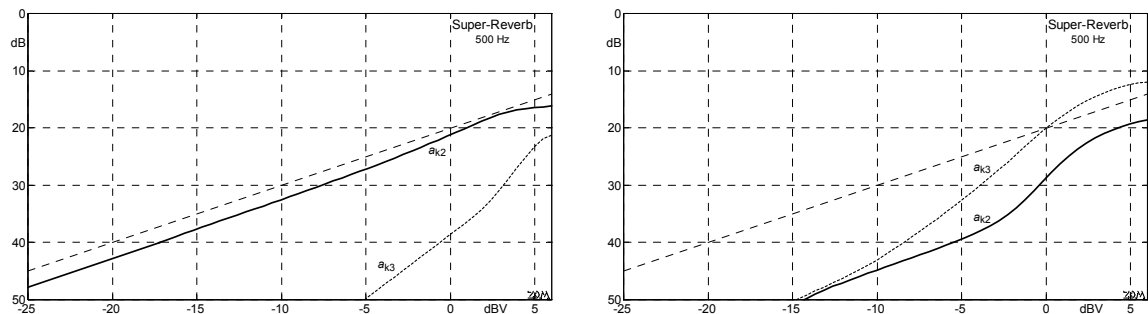


Abb. 10.10.16: Super-Reverb, Klirrdämpfungen: Eingang bis 1. Anode (links), Eingang bis 2. Anode (rechts).

Im Detail hängt diese k_2 -Kompensation natürlich von dem zwischen erster und zweiter Röhre liegenden Netzwerk ab (in diesem Fall Klangfilter und Vol-Poti), die Messung erfolgte bei 500 Hz mit der nicht untypischen Einstellung $B = 2$, $T = 7$, $V = 7$.

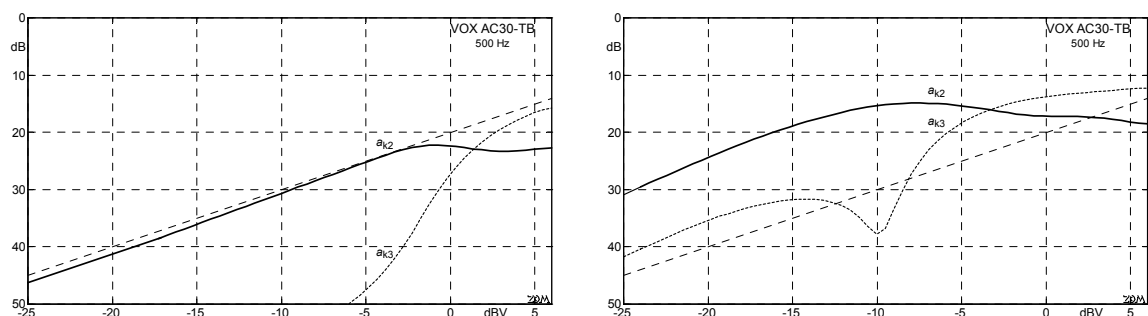


Abb. 10.10.17: VOX AC30-TB, Klirrdämpfungen: Eingang bis 1. Anode (links), Eingang bis 2. Anode (rechts).

Ein gänzlich anderes Klirrverhalten offenbart der **VOX AC30-TB** (**Abb. 10.10.17**): Während (insbesondere bei geringer Aussteuerung) die erste Röhrenstufe noch Ähnlichkeiten mit dem Super-Reverb hat, steigen in der zweiten Stufe (Kathodenfolger, Kap. 10.2.2) die Verzerrungen dramatisch an – Auswirkung einer sehr ungewöhnlichen Schaltungs-Dimensionierung, die einen nichtlinearen Betrieb bei starkem Gitterstrom bewirkt ($V = 12^{00}$, $B = 10^{00}$, $T = 12^{00}$).

Wieder andere Verhältnisse zeigen sich am Lautsprecherausgang (**Abb. 10.10.18**). Beim VOX überwiegen bei starker Aussteuerung die kubischen Verzerrungen (Röhrenverstärker, also k_3 ☺), beim Fender sind k_2 und k_3 in ähnlicher Größenordnung. Im Detail hängen diese Kurven von den verwendeten Röhren und beim Fender auch noch vom Ruhestrom ab, und zusätzlich von der Symmetrie des Phaseninverters: Ändert man dessen Anodenwiderstände (100 k Ω bzw. 82 k Ω), so ändert sich auch k_2 . Alles in allem also: "multivariat".

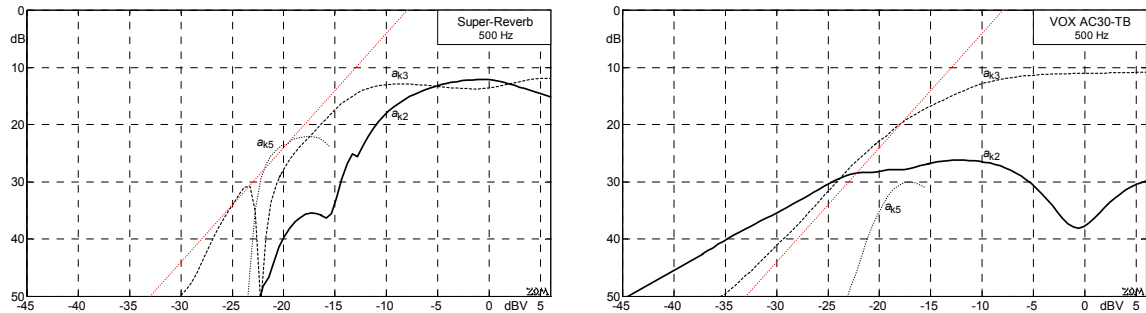


Abb. 10.10.18: Klirrdämpfungen, Eingang bis Lautsprecher: Super-Reverb (links), AC30-TB (rechts).

Was ist der Grund der prinzipiellen Unterschiede? Der Fender arbeitet mit der **6L6-GC**, der VOX mit der **EL84**. Die Gitter-Vorspannung der EL84 beträgt ca. -10 V, die der 6L6-GC ca. -45...-50 V. Der Phaseninverter muss beim Fender also fast die fünffache Spannung liefern können, und das kann er bei hoher Aussteuerung nicht mehr so gut wie beim VOX. Deswegen verschieben sich die Arbeitspunkte (Kap. 10.4.3, 10.4.4, 10.5.12), deswegen ändert sich beim Fender das Teilverhältnis (duty cycle), deswegen unterscheiden sich die quadratischen Klirrfaktoren. Fassen wir zusammen: Mit einem typischen Singlecoil erzeugt der Fender eine reine Endstufenverzerrung, mit dominantem k_3 . Demgegenüber verzerren beim VOX sowohl der Kathodenfolger (k_2), als auch die Endstufe (k_3). Der Verzerrungsanstieg verläuft beim Fender etwas steiler als beim VOX, aber immer noch gemächlicher als beim Clipping einer stark gegengekoppelten Transistor-Endstufe (Abb. 10.10.19, links unten).

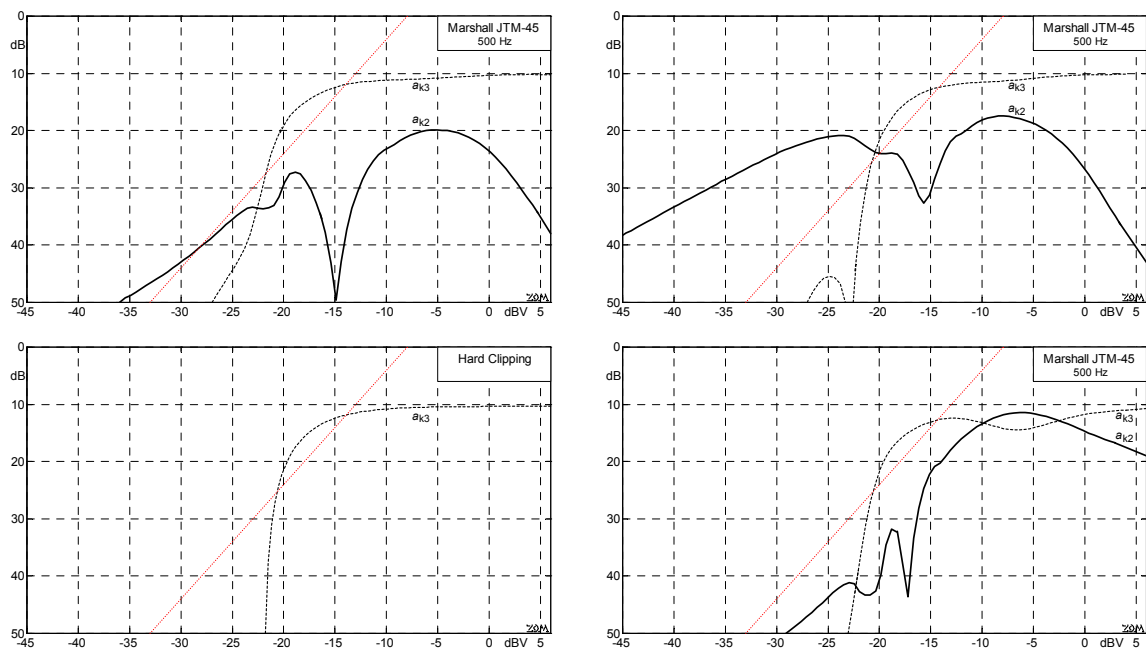


Abb. 10.10.19: Klirrdämpfungen, Eingang bis Lautsprecher: Marshall JTM-45 (KT-66, $R_{aa} = 8$ k Ω). Messungen mit unterschiedlichen Röhren im Impedanzwandler (Kathodenfolger).

In Kap. 10.5.2 wurde schon darauf hingewiesen, dass die **JTM-45**-Endstufe stark gegengekoppelt ist, und der aussteuerungsabhängige Anstieg des kubischen Klirrfaktors (k_3) deshalb Ähnlichkeiten zu einer Transistor-Endstufe offenbart. **Abb. 10.10.19** zeigt hierzu nun Messungen "über alles", d.h. vom Verstärker-Eingang bis zu Lautsprecher-Ausgang. Bei symmetrischer Begrenzung dürften nur ungerade Verzerrungs-Ordnungen entstehen, die Messung zeigt aber auch gerade Ordnungen (insb. die quadratische Klirrdämpfung a_{k2}). Diese quadratischen Verzerrungen werden von der Endstufe, aber auch von allen vorhergehenden Röhren verursacht, und hier kommt nun der **Impedanzwandler** ins Spiel. Sein seltsamer Arbeitspunkt mit unüblich hohem Gitterstrom kann für starke Verzerrungen sorgen. Kann – muss aber nicht. Tauscht man (bei der 2. Röhre) eine ECC83 gegen eine andere ECC83, kann sich der quadratische Klirrfaktor um den Faktor 10 (oder mehr) ändern. Und hier ist nicht von kapputten Röhren die Rede, nein, fabrikneu. Oder 100 Stunden eingespielt, mondbeschieden, oder wie auch immer. Röhre raus, andere Röhre rein, 10mal so viel Verzerrung. Bzw. 1/10, wenn man's in umgekehrter Reihenfolge macht. Schon seltsam, oder? Dieser Schaltungs-Murks wurde nicht etwa seinem Entwickler um die Ohren gehauen, nein, davon schwärmen unzählige "Fach"-Journalisten weltweit. Kann ja auch verdammt gut klingen. Kann ...

Eine kleine Episode aus längst vergangenen Tagen: Bei Siemens gab's einen gefürchteten Abteilungsleiter, der immer, wenn eine Röhrenschaltung fertig war (lang her, wie gesagt), für jede Röhre zwei Grenzexemplare aus seinem Schrank holte. Und höchstpersönlich einsteckte, und nachmaß. Und wenn dabei die tolle Neuentwicklung nicht mehr so toll aussah, bekam der Entwickler einen tollen Anschiss und musste nacharbeiten. Marshall&Son war offenbar nicht Siemens. Gott sei Dank, werden viele sagen, sonst wären diese zerrwütigen Monster nie entstanden. Über 50 Jahre alte Entwicklungen darf man auch gerne die Gnade der frühen Geburt ausbreiten, aber wieso gibt's heute, anno 2012 noch immer keine Röhren, die für eben diesen seltsamen Impedanzwandler selektiert werden? Stattdessen verbreiten sich die Herren Experten über Trafoaustausch (RS ./ Drake), gelbe oder doch orange Kondensatoren, Metall- oder Kohle-Widerstände, 250 oder 330 μF , ja sogar Draht oder Litze. Aber keinem kommt je in den Sinn, einmal die Nichtlinearitäten der Impedanzwandlerröhre genauer zu spezifizieren.

Abschließend noch zwei Verstärker, die keinen Impedanzwandler besitzen: Fenders **Tweed Deluxe** (Kathodyn, 6V6-GT), und der **Deluxe Reverb** (Differenzverstärker, 6V6-GT). Die Tweed-Endstufe ist nicht gegengekoppelt, deshalb ist der k_3 bei kleiner Aussteuerung stärker als beim gegengekoppelten AB763.

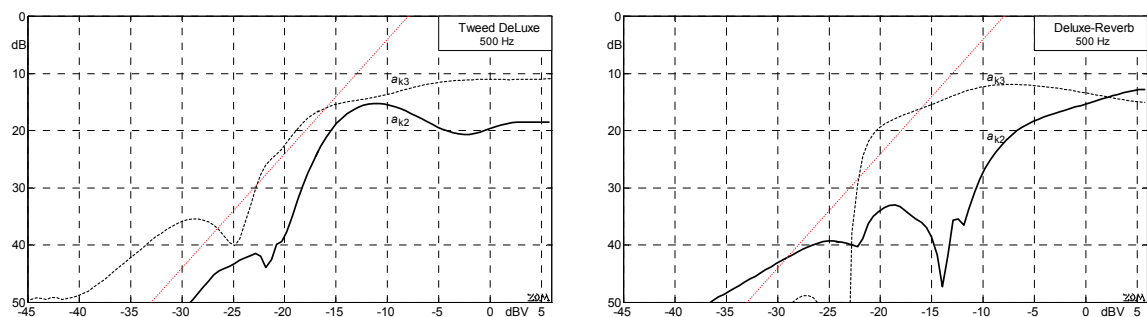


Abb. 10.10.20: Klirrdämpfungen, Eingang bis Lautsprecher: Tweed Deluxe (5E3), Deluxe Reverb (AB763).

Fazit: Zweiseitiges Clipping muss Verzerrungen ungerader Ordnung erzeugen. Mit zunehmender Endstufen-Gegenkopplung versteilert sich der k_3 -Anstieg, die großen Unterschiede zeigen sich aber beim k_2 : Hier findet man sowohl unterschiedlich starke Kompensation der Vorröhren-Verzerrung, als auch extreme Röhrenabhängigkeit beim Impedanzwandler. Und natürlich spielt auch die individuelle Gegentakt-Antimetrie eine Rolle.

Besondere Beachtung verdient eine Filterschaltung, die bei VOX als **Cut-Circuit** bekannt wurde. Es war guter Brauch, bei dem als Phasen-Splitter verwendeten Differenzverstärker (Kap. 10.4.3) einen kleinen Kondensator zwischen die beiden Anoden zu setzen (das reduzierte im obersten Frequenzbereich die Verstärkung etwas). Vergrößert man diese Kapazität bis in den nF-Bereich, schneidet man die Höhen rigoros ab. Cut! Im Gegensatz zu den sonst verwendeten Treble-Potis ist dies aber ein **nichtlinearer Tiefpass!**

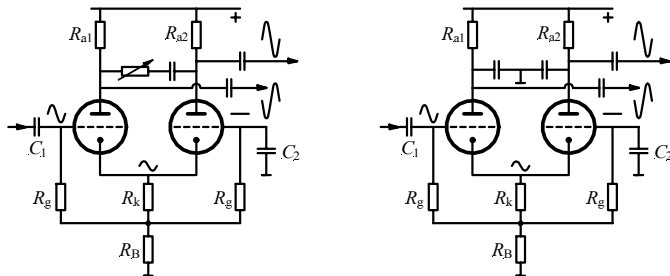


Abb. 10.10.21: Cut-Schaltung. Bei zugedrehtem Potentiometer kann die verbleibende Kapazität als Reihenschaltung mit dazwischenliegender Masse interpretiert werden (Abb. 10.4.8).

Abb. 10.10.21 zeigt, wie die zwischen den Anoden liegende Kapazität als Reihenschaltung aufgefasst werden kann (dies funktioniert auch mit einem RC-Zweipol, wenn das Potentiometer nicht ganz auf null gedreht ist). Die beiden Anodenspannungen sind näherungsweise betragsgleich, aber gegenphasig, sodass "dazwischen" null Volt liegen. Die stark kapazitive Anodenbelastung reduziert nun aber die **Slewrate** dramatisch, und deshalb wirkt dieser Tiefpass nichtlinear. Mit einer weiteren Konsequenz: Die verlorengegangene Höhenverstärkung kann in keiner weiteren Zwischenstufe mehr aufgeholt werden, die Endstufe erzeugt deshalb *auch bei Übersteuerung* (!) weniger Höhen. 'Cut zudrehen' ist deshalb etwas anderes als 'Treble zudrehen'.

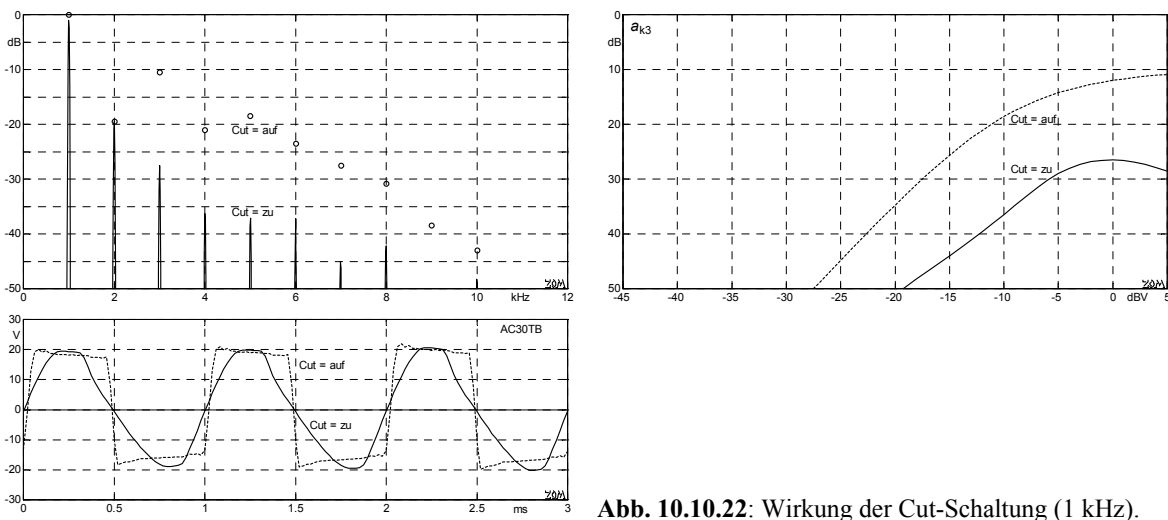


Abb. 10.10.22: Wirkung der Cut-Schaltung (1 kHz).

In **Abb. 10.10.22** sind Messergebnisse dargestellt, die an einem AC30-TB ermittelt wurden (vom Normal-Eingang zum Leistungs-Ausgang). Auch bei starker Übersteuerung kann (bei zugedrehtem 'Cut') die Endstufe nicht hart begrenzen, der Kurvenverlauf ist verrundet, die Höhen abgesenkt. Würde man z.B. bei einem Fender den Treble-Knopf zudrehen, aber gleichzeitig (mit großer Verstärkung) die Endstufe übersteuern, ergäbe sich am Ausgang ein Rechtecksignal. Der VOX ermöglicht hierzu eine interessante Alternative.