

Zur spezifischen Schaltungstechnik von Röhrengitarrenverstärkern

Alexander Potchinkov

TU-Kaiserslautern, FBEIT, Digitale Signalverarbeitung E-Mail: potchinkov@eit.uni-kl.de

Einleitung

Nach wie vor werden Röhrenverstärker als Gitarrenverstärker für ihren "coolen sound" geschätzt [1], auch wenn sie ihres Gewichts, ihrer Herstellungskosten, der hohen Leistungsaufnahme und der Alterung von Verstärkerröhren wegen längst schon obsolet sein müßten.

Gitarrenverstärker unterscheiden sich weniger in ihren elementaren Schaltungsstrukturen, sondern vielmehr in ihrer Auslegung und Rudimentarität erheblich von Linearverstärkern wie Studioverstärker oder Verstärker für hohe Wiedergabetreue. Nichtlineare Verzerrung und niedriger Dämpfungsfaktor eines Gitarrenverstärkers beeinflussen entscheidend die Klangeigenschaften des Musikinstruments, bestehend aus Gitarre, Gitarrenverstärker und Lautsprecher. Mit diesem Beitrag sollen nicht, wie an vielen anderen Stellen bereits geschehen, die Verzerrungsspektren von Verstärkerröhren mit denen von Bipolar- oder Feldeffekttransistoren verglichen werden, sondern die Schaltungstopologien und die Auslegung von Verstärkerstufen im Vergleich zu Röhrenverstärkern für hohe Wiedergabetreue und zu Transistorgitarrenverstärkern angesprochen werden. Gitarrenröhrenverstärker werden so zum einen als typische Audioverstärker unter weitgehenden Wegfalls linearisierender Maßnahmen positioniert und zum anderen wird aufgezeigt, daß sie für das Erzielen vielfältigster Nichtlinearität im Gegensatz zum Transistorverstärker besonders gut geeignet sind.

Begriffsklärungen

Ein Gitarrenverstärker besteht i.a. aus einem Vor- und einem Endverstärker. Hinzu kommen Effektkomponenten wie Tremolo-Modulatoren und (Feder-)Nachhallsysteme. Der Vorverstärker umfaßt die Signalkonditionierung an den Tonabnehmer der Gitarre, Pegelsteller, Klangregelnetzwerk und die Schnittstellen für das Einschleifen von Effektgeräten. Der Endverstärker, gespeist vom Ausgangssignal des Vorverstärkers, muß den oder die Lautsprecher antreiben können und enthält hierzu eine Gegentaktendstufe mit Ausgangsübertrager zur Signaldifferenzbildung und Impedanzanpassung sowie eine Stufe, die das asymmetrische Signal des Vorverstärkers verstärkt und in ein symmetrisches Ansteuersignal für die Endstufe wandelt. Oft ist dieser Endverstärker in eine Gegenkopplungsschleife eingebunden, die vor allem der Linearisierung dient. Die Aufteilung in Vor- und Endverstärker ist auch für Studio- und HiFi-Verstärker üblich, wobei beide Teilverstärker als Geräte zusammen oder auch separat ausgeführt sein können. Schaltungstechnisch und betrieblich handelt es sich in allen Fällen um Audioverstärker für den Hörfrequenzbereich. Gitarrenverstärker sind konstruktiv weniger linear und werden auch außerhalb des sogenannten linearen Aussteuerbereichs betrieben. In diesem Beitrag wird die nichtlineari-

tätenverursachte Klangbildung der Gitarrenverstärker als "Musikalität" bezeichnet, die der Linearität gegenübergestellt wird. Im weiteren Text werden die Begriffe "Gitarrenverstärker" und "Linearverstärker" zur Abgrenzung gegeneinander verwendet.

Die Endstufen der Gitarrenverstärker mit Ausgangsleistungen größer als 10W sind alle Gegentaktendstufen mit Pentoden bzw. Beam-Power-Röhren. Nur so lassen sich unter hinnehmbaren Bedingungen, das betrifft die Verwendung weit verbreiteter Consumer-Röhren wie z.B. 6L6G, 6V6, EL34, 6550, EL84, moderate Betriebsspannungen, geringe Steuerspannungen, unkritische Treiberstufen, Verwendung von einem bis drei Röhrenpaaren usw. erreichen. Die bei modernen HiEnd-Linearverstärkern gern benutzte Leistungstriode scheidet aus eben diesen Gründen aus.

Stufenstrukturell unterscheiden sich Gitarren- und Linearverstärker mit Röhren nur wenig voneinander. Dem Gitarrenverstärker erlaubt aber der Wegfall vieler linearisierender Maßnahmen seine einzigartige Musikalität bzw. seine musikalische Vielfalt. Dieser Wegfall wird aber durch das Bauelement Verstärkerröhre ermöglicht und so gibt es auch heute noch kaum bedeutende Transistorverstärker für Gitarren. Ein paradoxes Schlagwort wäre, daß die Linearisierung Feind der Musikalität ist. Auch für Neuentwicklungen von Röhrengitarrenverstärkern gibt es noch Potential in der einstellbaren Nichtlinearcharakteristik, sei es durch Verstärkungsverteilungen in der Kette der Verstärkerstufen, vgl. die Master-Volume-Technik, oder durch Verschieben von Arbeitspunkten der Endröhren mit Hilfe einstellbarer Gittervorspannung. Voraussetzung hierfür ist es, nichtlineare Charakteristik zu verstehen und als Entwurfsziel zu sehen.

Typische Techniken zur Linearisierung von Röhrenverstärkerschaltungen

Um unter den Audioverstärkern Linear- von Gitarrenverstärkern abzugrenzen, werden im folgenden die üblichen Linearisierungsmaßnahmen bei Röhrenverstärkern aufgelistet.

- Wirkungsstarke Gegenkopplungen mit aufwendiger Frequenzkompensation im Tief- und im Hochtonbereich,
- Wahl der Arbeitspunkte hinsichtlich geringer Verzerrungen, d.h. Vorsehen von Aussteuerungsreserven,
- *Ultralinear*, Betrieb der Endröhre zwischen Triode und Schirmgitterröhre, was eine recht lineare Kompositcharakteristik ergibt,
- verschachtelte Gegenkopplungen,
- Symmetrische Schaltungstechnik auch in den Vorstufen. So kann die Rückwirkung über die endliche Impedanz der Spannungsversorgung klein gehalten werden,

- Kathodenfolger zur Ansteuerung der Endröhren, womit die Amplitudenkompression bei Einsatz des Gitterstroms reduziert werden kann,
- gering ausgesteuerte Ausgangsübertrager durch Verwendung eines übergroßen Eisenkerns,
- *unity coupling* über Kathoden der End- und Treiberröhren am Ausgangsübertrager,
- weitreichender A-Betrieb auf Kosten des Wirkungsgrads und der erzielbaren Sprechleistung,
- spezielle aufwendige Verstärkerstufen wie *ring of three*, *μ-Follower*, *Kaskodenschaltung* u.s.w.,
- Verwendung hochwertiger Röhren und Übertrager mit aufwendigen Wickeltechniken, z.B. Scheibenwicklungen, zur Reduktion von Streuinduktivität und Erhöhung der magnetischen Kopplung

Die stärkste Maßnahme zur Linearisierung ist die Gegenkopplung, die vor bald 100 Jahren erfunden wurde. Gegenkopplungen können lokal zu den Verstärkerstufen oder global zu mehrstufigen Verstärkern genutzt werden. Um wirkungsstarke Gegenkopplungen zu ermöglichen, muß zum einen ein großes Verstärkungsreservoir (Schleifenverstärkung) vorgehalten werden und zum anderen zur Sicherung von Stabilität eine sorgfältige Frequenzgangskompensation ausgeführt werden. Hochwertige Endverstärker verwenden hierzu bis zu vier Verstärkerstufen, oft kommt noch eine Kathodenfolgerstufe ohne Spannungsverstärkung zur Ansteuerung der Endröhren hinzu. Letzte Stufe ist auch dann sinnvoll, wenn parallelgeschaltete Endröhren verwendet werden, die eine entsprechend große kapazitive Last darstellen. Endverstärker in Gitarrenverstärkern sind hingegen meist nur zweistufig, da eine wirkungsstarke Gegenkopplung unerwünscht ist. Es ist hier auch anzumerken, daß Gegenkopplungen den Verstärkerröhren und den Verstärkern selbst elektrische Eigenschaften „aufzwingen“ und so beispielsweise ein Röhrentausch nur recht geringen Einfluß auf die Eigenschaften eines Verstärkers als ganzes hat. Das ist im besonderen für mehrkanalige Verstärker von großer Bedeutung.

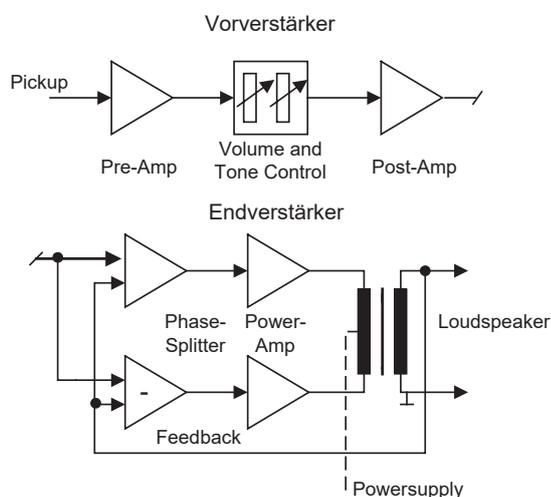


Abbildung 1: Blockbild eines Gitarrenverstärkers.

Schaltungscharakteristika von vier typischen Gitarrenverstärkern mit Röhren

Für diesen Beitrag sind vier Röhrengitarrenverstärker ausgewählt worden, für die im folgenden stichpunktartige Angaben zur eingesetzten Schaltungstechnik notiert sind: (F) Fender Bassman AC568¹, (G) Gibson GA75, (M) Marshall 1987 und (V) Vox AC30. Gegebenenfalls wird auf Besonderheiten hingewiesen. Die Schaltbilder zu diesen Gitarrenverstärkern findet man entweder im Internet oder bei [2]. In der Literatur hat sich ein Aufbau mit den Teilschaltungen Pre-Amp, Volume/Equalization, Post-Amp, Phase-Splitter und Power-Amp eingebürgert. Abb. 1 repräsentiert typische Anordnungen von Verstärkerstufen in Gitarrenverstärkern.

Pre-Amp: High- μ -Triode Typ ECC83, Kathodenbasischaltung ohne Gegenkopplung, (G) Shelving Equalizer

Post-Amp: High- μ -Triode Typ ECC83, (F) Anodenbasischaltung mit Gegenkopplung, (M) Tone-Stack, Zwei Trioden mit Kathodenfolgerausgang, (V) Tremolo-Modulator

Phase-Splitter: (F,M,V) Cathode-Coupled, (G) Katodyne mit nachgeschalteten Kathodenbasischaltungen

Power-Amp: Gegentaktendstufen, konstante Schirmgitterspannung, Betrieb an der Aussteuerungsgrenze (F,G) 2 Beampowerröhren 6L6GC, AB mit Betonung auf B, (M) 2 Pentoden EL34, AB mit Betonung auf B, (V) 4 Pentoden EL84, AB mit Betonung auf A, (F) Kombination von Fixed- und Cathode-Bias, Einstellung Teilstrom auf Brumminimum, (G) Fixed-Bias ohne Einstellmöglichkeit, (M) Fixed Bias, Summenstrom einstellbar, (V) Cathode Bias, (F) Globale Gegenkopplung mit NF- und HF-Frequenzkompensation [3], LF- über klein dimensionierten Cathode-Bias-Brücken-Kondensator, (G,V) Ohne Gegenkopplung, (M) Gegenkopplung

Man erkennt, daß es neben vielen Gemeinsamkeiten auch im Detail Unterschiede gibt. Zwar sind alle Verstärker sehr sparsam ausgestattet, aber im besonderen enthält der Fender-Verstärker einige Schaltungsdetails, die eher bei Linearverstärkern zu finden sind. In keinem der vier Verstärker werden Spezial-Röhren verwendet. So hat die Industrie beispielsweise mit der Pentode 7189A eine gegenüber der Röhre EL84 leistungsgesteigerte Variante hergestellt. Die Doppeltriode ECC803S ist eine besonders mikrophoniearme Langlebe-Variante der ECC83 oder 7025. Letzteres ist bei Gitarrenverstärkern von Bedeutung, da die räumliche Nähe zum Lautsprecher zu akustischen Rückkopplungen führt. Die angesprochenen Spezial-Röhren sind allerdings erheblich teurer als die korrespondierenden Consumer-Röhren.

Wegen der weitreichenden Konsequenzen, soll im folgenden vertieft auf die Bias-Schaltungstechnik von Röhrenendverstärkern eingegangen werden. In den Hochzeiten des Röhrenverstärkerbaus verwendete man zwei Techniken zur Arbeitspunkteinstellung der Endröhren. Die Technik *Fixed-Bias* nutzt eine separate Gleichspannung als Gittervorspannung und die Technik *Cathode-Bias* einen gemeinsamen

¹ Der Fender 5F6-A ist den Gitarristen bekannter, aber der AC568 zeigt eine im Detail interessantere Schaltung.

oder separate Widerstände an den Kathoden, die i.a. mit Elektrolytkondensatoren gebrückt sind, um Gegenkopplung für die Signale zu vermeiden. In wenigen Verstärkern hat man beide Techniken kombiniert, aber den Brückenkondensator weggelassen, um eine Signalgegenkopplung an dieser Stelle zu erhalten. Cathode-Bias hat zwei wichtige Eigenschaften. Zum einen muß die Gittergleichvorspannung von der Spannungsversorgung der Endstufe aufgebracht werden (daher scheidet diese Technik für Triodenendstufen aus) und zum anderen verschiebt sich der Arbeitspunkt bei hoher Aussteuerung, da die geradzahigen nichtlinearen Verzerrungen additive Gleichströme verursachen, was ein Kompressionseffekt ist. Der große Vorteil von Cathode-Bias ist der Wegfall von Ruhestromeinstellung, was vor allem beim Tausch der Endröhren wichtig ist. Und letzteres wäre ja gerade für Gitarrenverstärker ein Pluspunkt, da die meisten Nutzer keine technische Vorbildung haben, und "Einstellarbeiten" auf der Bühne in Form längerer Spielpausen indiskutabel sind.

Fixed-Bias sollte idealerweise Einstellmöglichkeiten für die Ruhestrome vorsehen. Man nutzt zwei Varianten, separate Einstellung für jede Endröhre oder Einstellung von Summen- und Teilströmen. Die meisten Gitarrenverstärker nutzen für Leistungen größer als 25W Fixed-Bias. Bei den betrachteten Gitarrenverstärkern findet man entweder keine Einstellmöglichkeit oder eine Einstellmöglichkeit für den Summenstrom. Dies hat zur Konsequenz, daß ein Röhrentausch der Endröhren erheblichen Einfluß auf die Verstärkercharakteristik hat. So ist man letztlich darauf angewiesen, selektierte Röhren zu verwenden. Ein Händler muß eine große Menge von Röhren individuell ausmessen und spezifizieren. So wurde es auch früher bei Geräten der Meßtechnik gehandhabt, wie man es auch beispielsweise in der Geschichte von Tektronix nachlesen kann. Für Gitarrenverstärker ist das ein nicht unüblicher Weg. Beispielsweise verfolgt die Firma "Groove Tubes" (www.groovetubes.com) dieses Geschäftsmodell. Allerdings macht sich dieser Service auch in der Preisgestaltung bemerkbar. Heute hat man wenigstens zwei weitere praktikable Methoden. Man kann z.B. einen Typ-317 Spannungsregler auch als Stromkonstanter für den Endröhrensummenstrom verwenden oder mit einem preiswerten Microcontroller eine automatische Stromeinstellung aufbauen, wofür bei Betriebsbeginn eine Einmeßphase abzuwarten ist.

Im weiteren hat der Einsatz schwach ausgelegter oder gänzlich entfallender Gegenkopplungen kritischen Einfluß auf Verstärkung, Frequenzgang, Verzerrungscharakteristik und Dämpfungsfaktor. Vor allem der Dämpfungsfaktor ist bei Röhrenverstärkern meist ohnehin (sehr) niedrig, was dann für Gitarrenverstärker im besonderen Maße zutrifft. So ist auch die Ankopplung des Verstärkers an den Lautsprecher besonders lose und manche meinen, daß hier einer der wichtigsten Unterschiede zum Transistorverstärker zu finden ist.

Studioröhrenverstärker zum Vergleich

Abb. 2 repräsentiert typische Anordnungen von Verstärkerstufen von Studioverstärkern mit zwei separaten Systemen, die über die studiogebräuchlichen Übertragerschnittstellen

verfügen. Als typischer Vorverstärker wurde der Studioverstärker V72 der Firma Maihak von 1952 gewählt [4]. Ein Verstärker V72 wird mit zwei Verstärkerröhren, Pentoden vom Typ EF804S, gebildet. Es finden sich wirkungsstarke linearisierende Maßnahmen. Über beide Stufen wirkt eine Gegenkopplung, die wegen der sehr hohen Schleifenverstärkung auch wirkungsstark ist. Besondere Sorgfalt wurde auf die Auslegung des Ausgangsübertragers gelegt, der bei dieser Eintaktschaltung auch den Gleichstrom der Endröhrenanode nun unausgeglichen aufnehmen muß.

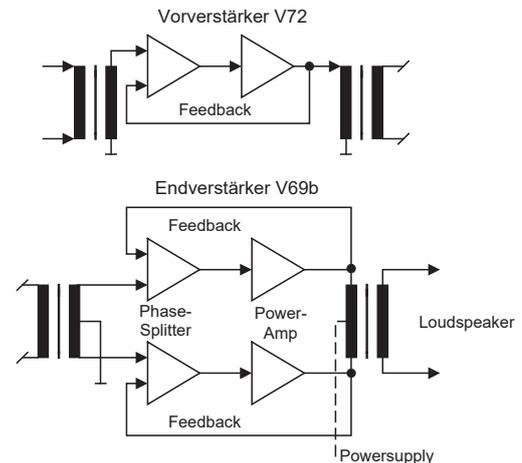


Abbildung 2: Blockbild einer Studioverstärkerkombination.

Als typischer Endverstärker wurde der Studioverstärker V69 von Telefunken gewählt, dessen Schaltung 1952 vom NWDR konzipiert wurde [5]. Der V69 verwendet keine Ultralinear-Technik, da die Schaltung bereits vor der Veröffentlichung der Ultralinear-Technik mit einer Patentschrift von Hafler und Keroes entworfen wurde. Die Schirmgitter führen daher kein Signal. Dies wäre eine weitere mögliche Linearisierung gewesen. Die Endröhren arbeiten im A-Betrieb, was die geringsten Verzerrungen auf Kosten des Wirkungsgrads zusichert. Der Verstärker ist zweistufig und vollsymmetrisch. Als Phasenumkehrstufe dient ein sorgfältig gewickelter Eingangübertrager. Eine solche Lösung ist jeder gebräuchlichen Röhrenschaltung hinsichtlich der Symmetrieeigenschaften überlegen und man bekommt eine professionelle erdfreie symmetrische Eingangsschnittstelle geschenkt. Der Ausgangsübertrager ist ebenfalls sehr sorgfältig gewickelt und verfügt über einen übergroßen Kern, was geringe Aussteuerung und deswegen geringe nichtlineare Verzerrungen gewährleistet. Die starke Gegenkopplung wird an der Ausgangsübertrager-Primärwicklung symmetrisch abgegriffen und der symmetrischen Pentodenvorstufe zugeführt. Diese Vorstufe hat einen aussteuerungsunabhängigen Stromverbrauch, was die Rückwirkung über die Spannungsversorgung minimiert. Mit einem Symmetriesteller in der Vorstufe kann auf ein Klirrminimum k_2 abgeglichen werden, wofür das eingebaute Instrument genutzt wird. Mit diesem Instrument sind auch die einstellbaren Ruhestrome der beiden Endröhren abzugleichen. Komplettiert wird der Verstärker um eine aufwendige Frequenzkompensation. Das letzte Qualitätsmerkmal ist die Auswahl der Röhrentypen. Die Vorstufenröhre EF804S ist eine engtoleriertere Spezialröhre, die als

"kling- und brummarme" Langleberöhre ausgelegt ist. Die Endröhre F2A11 (Poströhre) ist ebenfalls eine Langleberöhre. Solche hochwertigen und auch teuren Röhren sind in Gitarrenverstärkern nicht verwendet worden. Eine Gegenüberstellung von Gitarren- und Linearverstärker zeigt, daß Gitarrenröhrenverstärker in jeder Hinsicht auch kostengünstiges Produkt sind. Kurz gesagt, Linearität hat ihren Preis. Man könnte aber auch für Gitarrenverstärker, ohne Verzicht auf die gewünschte Nichtlinearität, wenigstens höherwertige Endröhren verwenden, wie sie z.B. mit der russischen Type GU50 (Leistungsklasse ähnlich KT88), eine Senderöhre, heute in großer Stückzahl zur Verfügung steht. Dann sinken sogar die Kosten des Gitarrenverstärkers, und die Endröhren sind robuster und längerlebig.

Die oben angesprochene Ruhestromeinstellung wäre auch für Gitarrenverstärker mit Fixed-Bias wünschenswert. Allerdings sind die Benutzer in den meisten Fällen von solchen Einstellungen überfordert. Im konkreten hat das zur Folge, daß ein Austausch von Endröhren gleichen Typs nahezu zwangsläufig zu einer geänderten Klangcharakteristik führt.

Gitarrenverstärker verwenden auch "knapp dimensionierte" Verstärkerstufen, was Musikalität zufolge Stufenübersteuerung mit sich bringt. Knapp dimensionierte Stufen in hochwertigen Linearverstärkern sind allerdings ein unverzeihlicher Konstruktionsfehler. Auch in den Vorverstärkerstufen im Studiobereich finden sich wirkungsstarke linearisierende Maßnahmen.

Transistorgitarrenverstärker zum Vergleich

Es werden zwei treffende Zitate aus [6] vorangestellt: *Transistorverstärker klingen steril, unpersönlich, leblos, sie sägen, prasseln, kratzen, und dann sind sie, trotz gleicher Wattangabe, auch noch leiser als Röhrenverstärker. Diese subjektiven Wertungen entziehen sich einer schaltungs-technischen Analyse.*

Nach einigen Jahrzehnten der Suche nach dem richtigen Klang sind transistorisierte Gitarren-Verstärker heute so ausgereift, dass die Akzeptanz als gut zu bezeichnen ist. Gleichwohl sind immer noch unzählige Röhrenverstärker am Markt, und viele Gitarristen werden wohl auch in den nächsten Jahrzehnten nichts anderes kaufen...

An erster Stelle ist anzugeben, daß ein Gitarrenverstärker mit Transistoren preisgünstiger ist als einer mit Röhren. Auch der Tausch „ausgespielter“ Röhren entfällt. Wegen der höheren Parameterstreuung und der thermischen Abhängigkeit des Arbeitspunktes von Transistoren sind ein höherer Schaltungsaufwand und eine stärkere globale Gegenkopplung nötig. Dies sorgt u.a. für abrupteren Einsatz der Nichtlinearitäten in Abhängigkeit der Aussteuerung, was von Nutzern der Gitarrenverstärker oft nicht gewünscht ist. Wegen zusätzlicher DC-Kopplung hat man weniger Freiheiten in der Formung von Nichtlinearitäten. Transistorverstärker verfügen meist über eine Begrenzungsschaltung für den Ausgangsstrom. Röhrenverstärker hingegen sind kurzschlußfest. Auch in diesem Fall zeigt sich ein abrupter Einsatz der Nichtlinearitäten.

Warum ist der Röhrenverstärker prinzipiell geeigneter? Für das Ziel der Musikalität und der dafür geeigneten Schaltungsaufbauten muß zwischen Transistor und Verstärkeröhre unterschieden werden. Sofern hochwertige Verstärkeröhren verwendet werden, kann man von kleineren Exemplarstreuungen ausgehen, als dies bei Transistoren der Fall ist. Man muß diese Exemplarstreuungen dann auch nicht mit (lokalen) Gegenkopplungen ausgleichen. Schließlich vereinfacht die stromlose Steuerung am Röhrengitter, wir vernachlässigen die Röhrenkapazitäten und gehen nicht von Übersteuerung aus, die Schaltungstechnik erheblich. Ein sehr wichtiger Aspekt bei der Verwendung von Transistoren ist die Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften, die mit aufwendiger Schaltungstechnik in den Griff zu bekommen ist. Bei Röhrenendstufen spielt das Problem eine untergeordnete Rolle. Röhren werden ohnehin bei hohen Temperaturen betrieben. Ein zweiter Aspekt ist, daß bei den üblichen AB-Einstellungen das Verhältnis der Röhrenströme ohne Aussteuerung und bei Vollaussteuerung recht gering ist. Transistorverstärker werden aus thermischen Gründen i.a. mit größeren Stromverhältnissen, Betonung auf B, betrieben.

Fazit

Ein Gitarrenröhrenverstärker ist aus Sicht einer linearen Audiosignalverarbeitung ein Paradoxon. Man konstruiert ihn „mehr schlecht als recht“ und erhält so eine zentrale Komponente eines Musikinstruments, die aus Sicht vieler Nutzer Halbleiter-Verstärkern überlegen ist. Eine Verbesserung in Form von Linearisierung würde die Musikalität verschlechtern. Gerade die Simplizität der Schaltungen und die Eigenschaften der Verstärkeröhren geben die Möglichkeit, nichtlineare Charakteristik vielfältig zu formen. Hier soll repräsentativ die Master-Volume-Technik erwähnt werden, die das Nutzen von Vorstufenverzerrungen auch bei geringen Lautstärken ermöglicht. Im weiteren ist zu erwähnen, daß auch stark gegengekoppelte Verstärker übersteuert werden können. Deren Verzerrungen setzen dann aber unerwünscht abrupt ein. Man kann soweit gehen und beim Röhrengitarrenverstärker von *kunstvoller Ellipse* sprechen.

Literatur

- [1] Barbour, E.: The Cool Sound of Tubes, IEEE Spectrum, 4. Januar 1999
- [2] Pittman, A.: The Tube Amp Book, Volume 3, Groove Tubes, Symar, CA91342, USA, erhältlich bei Amazon
- [3] Potchinkov, A.: Simulation von Röhrenverstärkern mit SPICE: PC-Simulationen von Elektronenröhren in Audioverstärkern, Springer Vieweg, 2. Auflage, 15. Juli 2015
- [4] IRT-Braunbuch, Verstärker V72, URL: <https://www.irt.de/IRT/publikationen/braunbuch/V72.PDF>
- [5] Diciol, O.: Röhren-NF Verstärker Praktikum, Reprint-Ausgabe, Franzis-Verlag, Poing, 2008
- [6] Zollner, M.: Physik der Elektrogitarre, URL www.gitec-forum.de