

Der Kompressionseffekt (engl. „Sagging“)

oder

Das Geheimnis des Schirmgitters

Von Helmuth Lemme

Eine Röhrenendstufe nur mit Sinusgenerator und Oszilloskop zu testen, führt nicht weit. Es gibt einige Effekte, die auf diese Weise nicht zu erkennen sind, sich klanglich aber sehr wohl bemerkbar machen. Dazu zählt vor allem die Kompression bei hohen Ausgangsleistungen. Sie tritt nur in Gegentakt-AB-Endstufen auf, nicht in echten Klasse-A- und nicht in Eintakt-A-Endstufen. Wer versteht, wie sie zustande kommt, kann sie gezielt als klangbildendes Element einsetzen.

Es ist schon unendlich viel über die Unterschiede zwischen Röhren- und Transistorverstärkern geschrieben worden. Während das anfänglich noch viel Schwadronieren in leeren Worthülsen war, so ist in den letzten Jahren die Zahl der technisch fundierten Artikel deutlich gestiegen. Die meisten Effekte wie Verzerrungen, Innenwiderstand und Dämpfungsfaktor sind mittlerweile gut verstanden. Nur einer ist immer noch wenig erforscht, weil er messtechnisch schwierig zu erfassen ist: die Kompression. Es handelt sich um eine Verfälschung der Hüllkurve eines Signals, die beim simplen Test mit Dauersinus nicht erkennbar ist. Sie zeigt sich nur bei kurzen Impulsen, auch Bursts genannt, wie sie in der realen Musik häufig vorkommen und sich auch mit einfachen Mitteln elektronisch erzeugen lassen. Verwendet man diese für den Test, kommt ans Tageslicht, was sich hier abspielt.

Eingehendere Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet sind noch dünn gesät. Eine Grundlage hatte 2007 Henry Westphal an der TU Berlin gelegt. Der von seinem Team entwickelte Gitarrenverstärker „Wildcat“ basierte weitgehend auf dem weltweit bekannten Fender „Bassman“, der ursprünglich für E-Bässe gedacht war, sich aber auch sehr gut für E-Gitarren eignet

(https://www.emsp.tu-berlin.de/menue/studium_und_lehre/mixed_signal_baugruppen_alt/das_projekt_wildcat/bassman_plus/) .

Die entscheidende Ursache ist, dass die Netzteile von Röhrenverstärkern üblicherweise nicht stabilisiert sind, sondern einen nicht zu vernachlässigenden Innenwiderstand haben. **Bild 1** zeigt den gebräuchlichsten Aufbau. Am Ladekondensator C1 ist die Gleichspannung noch von einer starken 100-Hz-Brummspannung überlagert, im Verlauf sägezahnartig mit steilem Anstieg und langsamerem Abfall. Theoretisch sollte bei einer Gegentaktendstufe davon nichts zum Lautsprecher durchkommen, weil sie symmetrisch aufgebaut ist. Doch weil in der Praxis die Symmetrie nicht immer perfekt ist, kann es passieren, dass doch ein gewisser Brumm zu hören ist. Die Kunst des Entwicklers besteht unter anderem darin, diesen auf ein Minimum zu drücken.

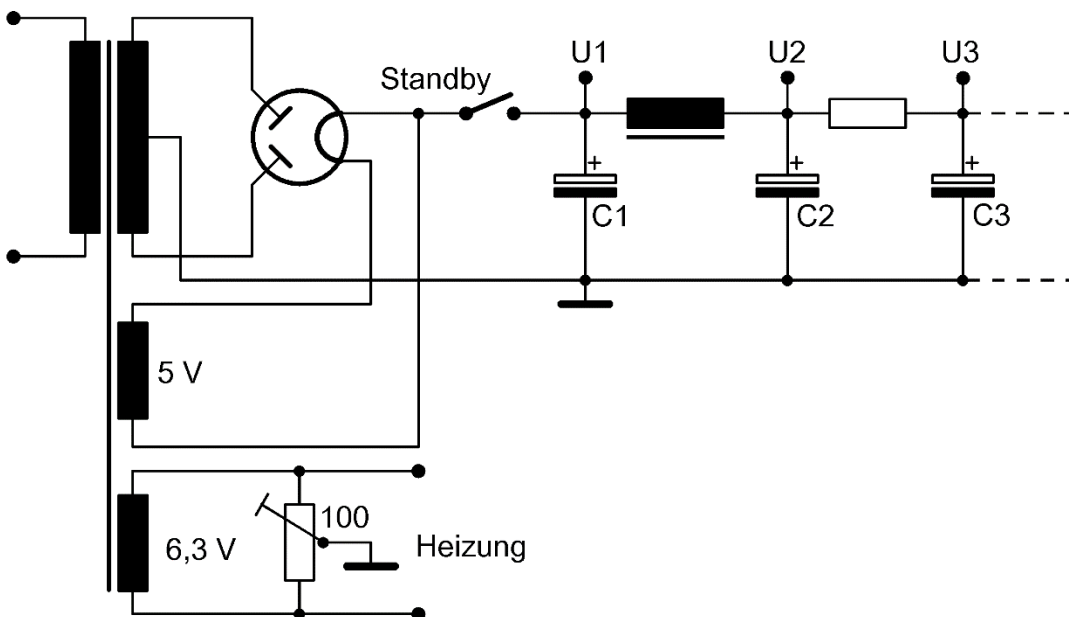


Bild 1 Typische Netzteilschaltung mit Röhrengleichrichter

Der Kondensator C2 ist meist über eine Drossel mit einer Induktivität von z.B. 10 H angeschlossen, seltener über einen Widerstand von einigen hundert Ohm bis einigen Kiloohm. Hier ist die Brummspannung wesentlich vermindert, aber noch nicht ganz verschwunden. Über Widerstände im ein- bis zweistelligen Kiloohmbereich gelangt die

Spannung dann zu weiteren Elkos, von denen aus die Vorstufen versorgt werden. Hier ist praktisch kein Brumm mehr nachweisbar.

Als Gleichrichter dienten in alten Zeiten Röhren wie GZ34 (= 5AR4), 5U4, EZ81 und ähnliche. Bei den hier fließenden Strömen entstehen Spannungsabfälle von einigen zehn Volt, und durch die auftretende Verlustleistung wird erhebliche Abwärme erzeugt. Für ihre Heizung brauchen sie auf dem Netztrafo eine separate Wicklung. Wegen ihrer Aufheizzeit beginnen sie nach dem Einschalten des Verstärkers erst mit einiger Verzögerung zu leiten, dadurch ist der Einschaltstromstoß abgemildert. Im Laufe der Betriebszeit verschleifen sie, d.h. die Emission der Kathode nimmt ab, der Durchgangswiderstand steigt, die Versorgungsspannung der Schaltung sinkt. Heute sind sie weitgehend durch Siliziumdioden abgelöst. Diese sind nicht nur wesentlich kostengünstiger, kleiner und bruchsicherer, sie haben auch einen sehr viel niedrigeren Spannungsabfall von unter 1 V und erzeugen deshalb praktisch keine Abwärme. Sie altern nicht und die Heizwicklung auf dem Netztrafo entfällt. In damit bestückten Verstärkern ist ein „Standby-Schalter“ vor C1 sehr sinnvoll, der erst eingeschaltet wird, wenn die Röhrenheizungen ihre volle Temperatur erreicht haben. So treten statt einem starken zwei schwächere Einschaltstromstöße auf; man kann die Gerätesicherung knapper bemessen, was die Betriebssicherheit erhöht.

Bei den meisten Verstärkern ist der Mittelpunkt des Ausgangsübertragers an C1 angeschlossen, die Schirmgitter der Endröhren gehen über Widerstände von z. B. 470 Ω bis 1 k Ω an C2. Seltener sind beide an C2 angeschlossen. In diesem Fall muss die Drossel für hohe Gleichstrombelastbarkeit ausgelegt sein, damit ihr Kern nicht in die magnetische Sättigung gerät. Ganz vereinzelt hängen auch Anoden und Schirmgitter an C1 und die Drossel fehlt.

Test mit zerhacktem Sinus

Ohne Aussteuerung wird dem Hochspannungsteil des Netzteils nur wenig Strom entnommen, nämlich der Ruhestrom der Endröhren durch Anoden und Schirmgitter und der Betriebsstrom der Vor- und Phasenumkehrstufen. In diesem Fall ist die Gleichspannung an C1 am höchsten und die Brummspannung am niedrigsten. Steigert man die Aussteuerung kontinuierlich, dann erhöht sich die Stromaufnahme, und die

Versorgungsspannung sinkt. Gleichzeitig steigt die Brummspannung an. Um wieviel jeweils, hängt sehr stark von der Größe der Elkos und vom Innenwiderstand des Netzteils ab. Letzterer ist bei Röhrengleichrichtern sehr viel höher als bei Siliziumgleichrichtern. Durch den Versorgungsspannungseinbruch, der bis zu einigen zehn Volt betragen kann, nimmt die Spannungsverstärkung der Endstufe ab. Das heißt, laute Töne werden geringer verstärkt als leise. Der Unterschied zwischen beiden, also die Dynamik, vermindert sich. Eben dies ist die Kompression.

Nun wächst die Lautstärke von Tönen in der Praxis aber selten kontinuierlich an. Sehr häufig, gerade bei E-Gitarren, setzt der Ton sehr hart ein und klingt dann entweder ungefähr exponentiell aus, oder wird fast ebenso abrupt wieder abgestoppt. In diesem Fall verhält sich der Verstärker anders. Nach einer Aussteuerungspause sind die Kondensatoren des Netzteils wieder auf maximale Spannung aufgeladen. Bei plötzlich einsetzender starker Aussteuerung sinkt die Spannung an C1 exponentiell ab, bis sie sich auf einen niedrigeren Wert einstellt. An C2 folgt sie mit einer gewissen Verzögerung. Bei den Vorstufen kommt der Spannungseinbruch noch später an. Wird ein Verstärker mit einem zerhackten Sinus angesteuert, dann sieht sein Ausgangssignal, zumindest theoretisch, so aus wie in **Bild 2**.

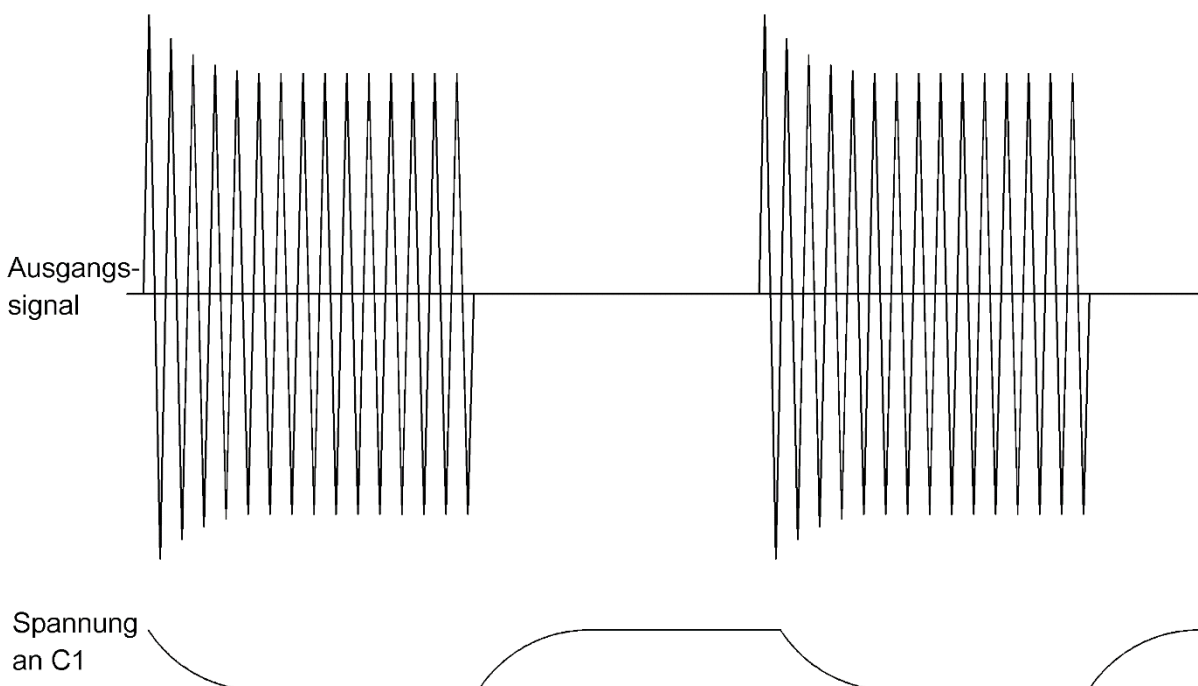


Bild 2 Der Kompressionseffekt theoretisch

Der Anschlag des (Gitarren-)Tones wird also überbetont. Stoppt man den Ton abrupt, steigt die Spannung U_1 an C1 wieder bis auf den unbelasteten Wert an, und damit auch die Verstärkung wieder auf ihren Anfangswert, aber davon hört man nichts. Etwas verzögert folgt auch U_2 . Sitzt eine Drossel zwischen den beiden Elkos, so kann es unter Umständen zu leichten Schwingungen kommen, die dem Klang auch noch ein „Gewisses Etwas“ hinzufügen. Hier bildet sich ein Schwingkreis. Seine Frequenz und seine Bedämpfung hängen von der Schaltungsdimensionierung ab. Beim „Bassman“ liegt sie bei etwa 13 Hz. Lässt man den Ton allmählich ausklingen, steigt die Spannungsverstärkung der Endstufe langsam wieder an. Das Sustain, also das Ausklingen des Tons, wird scheinbar verlängert.

Zusätzlich tritt noch ein anderer Effekt auf. Wegen der Brummüberlagerung der Spannung an C1 ist das Ausgangssignal mehr oder weniger stark mit einer 100-Hz-Sägezahnkurve amplitudenmoduliert. Auch dies hat Einfluss auf den Klang. Henry Westphal hat versuchsweise ein modifiziertes Netzteil entwickelt, bei dem der Kompressionseffekt im Vergleich zu einem herkömmlichen unverändert bleibt, die Modulation aber beseitigt ist. Es zeigte sich, dass dadurch dem Klang gegenüber dem echten „Bassman“ etwas fehlt.

Verhalten je nach Schaltungsauslegung

Eingehende Untersuchungen an einer größeren Zahl von Verstärkern führen zu der Erkenntnis, dass die Stärke der beiden Effekte bei jedem Typ äußerst unterschiedlich ist. Entscheidend sind dafür nicht nur die Eigenschaften des Netzteils, sondern auch die grundsätzliche Konzeption und die Dimensionierung der eigentlichen Verstärkerschaltung. Es ist ein höchst komplexes Zusammenspiel von vielen verschiedenen Teilen.

Als allererstes hängt die Kompression entscheidend davon ab, wie stark die Endstufe gegengekoppelt ist. Das Ausgangssignal an der Sekundärseite des Übertragers wird üblicherweise über einen geeignet dimensionierten Spannungsteiler auf die Treiberstufe zurückgeführt. Der Gegenkopplungsfaktor ist definitionsgemäß das Verhältnis der

Spannungsverstärkungen ohne und mit Gegenkopplung. Ist er hoch, dann ist die Spannungsverstärkung niedrig, ebenso der Innenwiderstand. Daraus folgt, dass der Dämpfungsfaktor hoch ist. Exemplarstreuungen der Röhren werden weitgehend ausgeglichen, die Ruhestromeinstellung ist relativ unkritisch und der Frequenzgang glättet sich. Die Klirrverzerrungen sind unterhalb der Aussteuerungsgrenze niedrig und steigen bei Übersteuerung steil an. Eine solche Endstufe ist ein geschlossener Regelkreis, der Kompressionseffekt ist hier schwach. Es gilt in guter Näherung die Formel: Ausgangsspannung = Eingangsspannung x Verstärkungsfaktor. Derartige Schaltungen sind im HiFi-Bereich üblich, wo eine verfälschungsfreie Wiedergabe gefordert ist.

Ganz anders ist die Sachlage bei schwacher oder überhaupt nicht vorhandener Gegenkopplung. Die Endstufe verstärkt dann mehr oder weniger unkontrolliert ins Blaue hinein. Spannungsverstärkung und Innenwiderstand sind sehr viel höher. Der Dämpfungsfaktor ist niedrig oder Null, so dass die Eigenresonanz des Lautsprechers hervorgehoben wird und den Klang hörbar einfärbt. Exemplarstreuungen der Röhren haben starke Auswirkungen, weshalb hier eine Selektion und eine sorgfältige Justierung des Ruhestroms wichtig sind. Der Frequenzgang hängt stark von den Eigenschaften des Ausgangsübertragers ab. Die Klirrverzerrungen sind höher, sie steigen mit zunehmender Aussteuerung kontinuierlich an, das klingt „musikalischer“. Der Kompressionseffekt ist sehr viel stärker. Solche Schaltungen sind für HiFi-Wiedergabe nicht zu gebrauchen, sind aber sehr häufig in Gitarrenverstärkern anzutreffen.

Versuche mit einer Experimental-Endstufe

Für die Kompression kommt es also darauf an, wie die Spannungsverstärkung einer Endstufe von ihrer Versorgungsspannung abhängt. Um die verschiedenen hier ablaufenden Vorgänge im Detail zu untersuchen, diente eine Endstufe in der grundsätzlichen Art der Fender-Verstärker als Experimentierplattform, wobei Dimensionierung und Anordnung einzelner Bauelemente immer wieder geändert wurden (**Bild 3**). Zunächst einmal ist die Gegenkopplung mit einem Drehschalter mit fünf Stellungen wählbar gemacht, eine davon ist eine Leerstellung für ungebremsten Betrieb. Als Endröhren kamen EL34 und 6L6GC zum Einsatz, wobei die negative Steuergittervorspannung jeweils passend nachgestellt werden musste. Das Verhalten von

beiden zeigte sich in den Details als geringfügig verschieden, grundsätzlich aber ähnlich. Mit den folgenden Experimenten lässt sich der Kompressionseffekt in allen Details gründlich studieren. Zur Erzeugung der Sinus-Bursts diente die im **Anhang** beschriebene Schaltung.

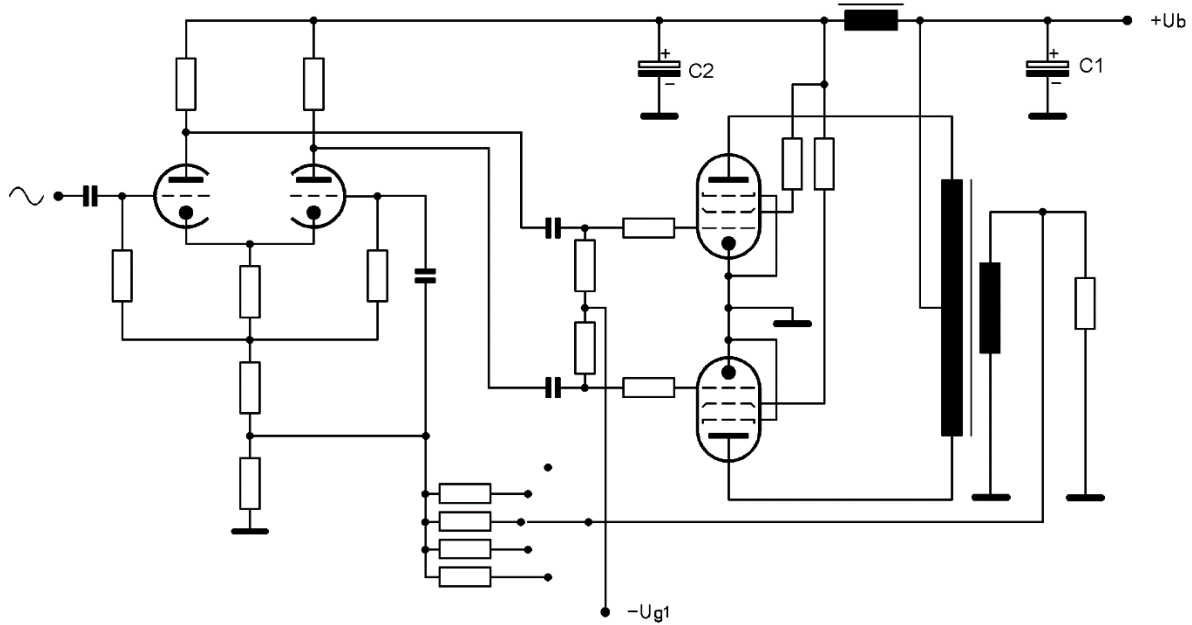


Bild 3 Experimentier-Endstufe mit umschaltbarer Gegenkopplung

1) Variation der Gegenkopplung: Ganz ohne diese ist die Spannungsverstärkung am höchsten und die Kompression am stärksten. Die 100-Hz-Amplitudenmodulation setzt bereits unterhalb der Vollaussteuerung ein. Zieht man die Gegenkopplung Stufe für Stufe an, dann kann man beobachten, wie die Spannungsverstärkung sinkt und Kompression und Modulation zurückgehen. Die letztere tritt dann nur noch auf, wenn die Endstufe stark in die Übersteuerung getrieben wird und so der geschlossene Regelkreis nicht mehr wirkt. Bei schwächerer Aussteuerung ist von ihr praktisch nichts zu merken. Weil also die Gegenkopplung die hier zu untersuchenden Effekte unterdrückt, ist sie in allen weiteren Experimenten außer Betrieb gesetzt.

2) Messung der Abhängigkeit der Spannungsverstärkung der Endstufe in Bezug zur Versorgungsspannung U_1 . Eine Erhöhung lässt sich sehr einfach mit einem zum internen Netzteil in Serie geschalteten zusätzlichen externen erreichen. Dadurch steigt die

Verstärkung an. Eine Erniedrigung ist so nicht möglich, ein entsprechendes Absinken der Verstärkung darf aber angenommen werden.

3) Es wird nur die Anodenspannung U_1 , d. h. die am Mittelpunkt der Primärwicklung des Ausgangsübertragers liegende Spannung erhöht, jedoch nicht die Spannung U_2 , von der aus die Schirmgitter gespeist werden (**Bild 4**). Jetzt ist das Ergebnis ganz anders. Bei Steigerung von anfänglich 360 V bis auf 440 V steigt die Verstärkung nur um wenige Prozent. Das kommt daher, dass Pentoden im Prinzip spannungsgesteuerte Stromquellen sind, d.h. ihr Ausgangsstrom ändert sich kaum bei variierender Anodenspannung, wohl aber bei Änderung der Schirmgitterspannung.

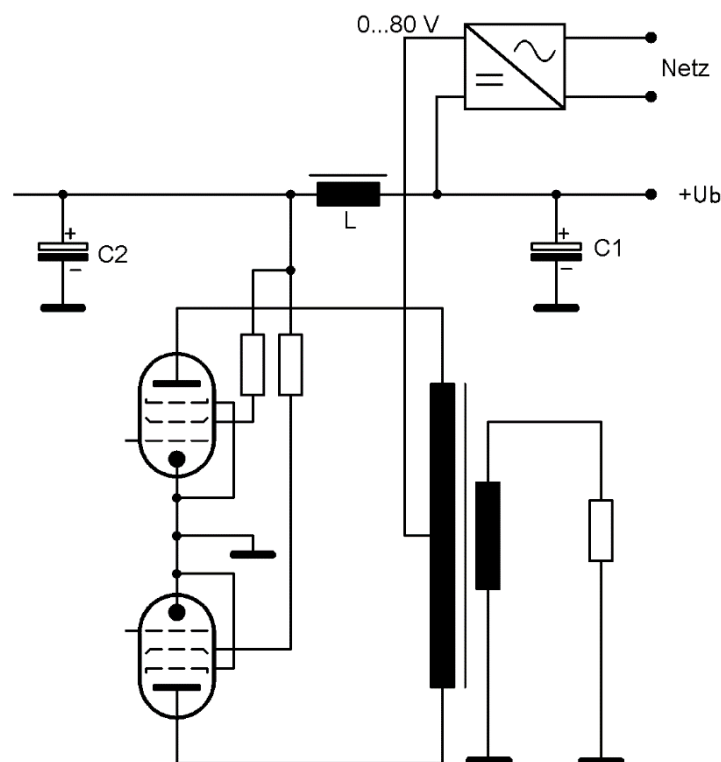


Bild 4 Anodenspannung erhöht, Schirmgitterspannung unverändert

Man vergegenwärtige sich noch einmal wie die Pentode einst entstanden ist, nämlich als praxistauglichere Verbesserung der Tetrode, und diese wiederum aus der Serienschaltung von zwei Trioden in Form der „Kaskoden“-Schaltung. Das ist kein Druckfehler, sondern ein Kunstwort für „kaskadierte Kathoden“ (**Bild 5**). Der hier durchfließende Strom hängt stark von den Spannungen an den beiden Gittern ab, aber kaum von der Spannung an der

oberen Anode. Demnach bestimmt die Schirmgitterspannung die Verstärkung sehr viel stärker als die Anodenspannung. Das nächste Experiment bestätigt das ebenfalls.

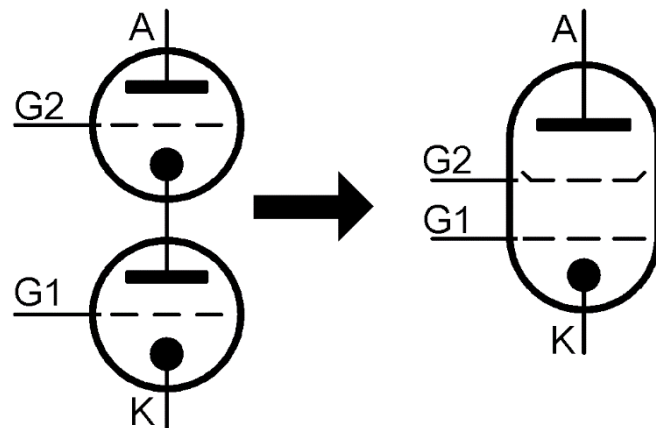


Bild 5 „Kaskoden“-Schaltung: So entstand einst die Tetrode aus zwei in Serie geschalteten Trioden.

4) Die Schirmgitter werden von der internen Versorgungsspannung abgetrennt und von einem externen Netzteil versorgt, das von den Spannungsschwankungen des internen garantiert nichts mitbekommt. Es zeigt sich, dass die Kompression jetzt praktisch verschwunden ist. Eine Variation der Schirmgitterspannung wirkt sich massiv auf die Spannungsverstärkung aus. Macht man sie allzu niedrig, dann treten allerdings Übernahmeverzerrungen auf wie bei zu niedrig eingestelltem Ruhestrom. Um sie zu beseitigen, muss man die Steuergitterspannung entsprechend nachstellen. Das beweist: Der Kompressionseffekt nimmt seinen Weg nicht über die Anoden- sondern über die Schirmgitterspannung. Eine nicht gegengekoppelte Endstufe ist demnach eine Art spannungsgesteuerter Verstärker.

5) Der Ladekondensator C1 wird umschaltbar gemacht. Der interne, ursprünglich mit 100 μF sehr groß dimensionierte Ladekondensator wird abgetrennt. Dafür wird außen provisorisch eine Box mit Drehschalter und sechs kleineren Elkos (10, 15, 22, 33, 47, 68 μF) angeschaltet. Es zeigt sich deutlich: Je kleiner C1 ist, desto stärker wird die 100-Hz-Modulation. Sie macht sich vor allem bei Übersteuerung bemerkbar. Die Kompression nimmt mit kleineren Kondensatoren etwas zu. **Bild 6** zeigt den Effekt mit C1 = 68 μF , die Versorgungsspannung U1 (oben) ist von sehr schwachem 100-Hz-Brumm überlagert. Von

Modulation ist praktisch nichts zu sehen. Mit $C1 = 10 \mu\text{F}$ (**Bild 7**), ist die Kompression geringfügig stärker, die Modulation aber deutlich erhöht.

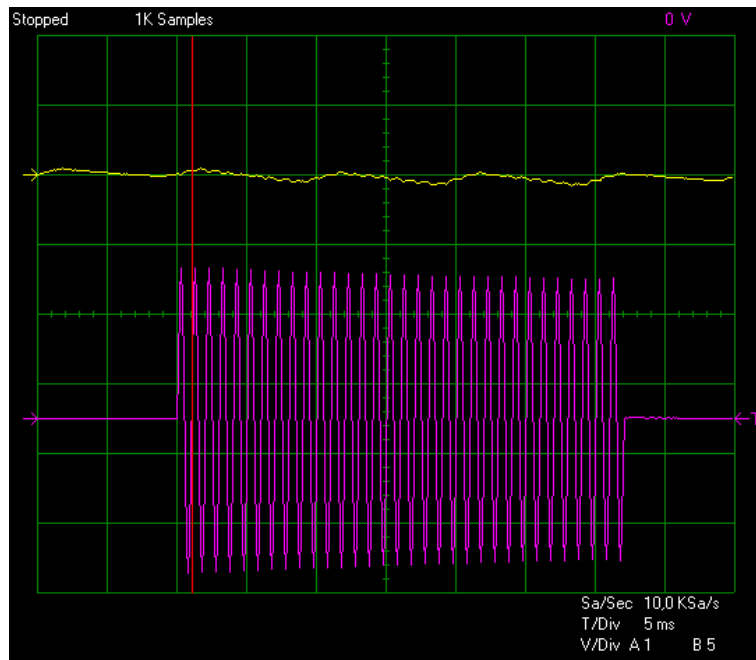


Bild 6 Ausgangssignal bei $C1 = 68 \mu\text{F}$, $C2 = 10 \mu\text{F}$, $R = 0$, oben U1

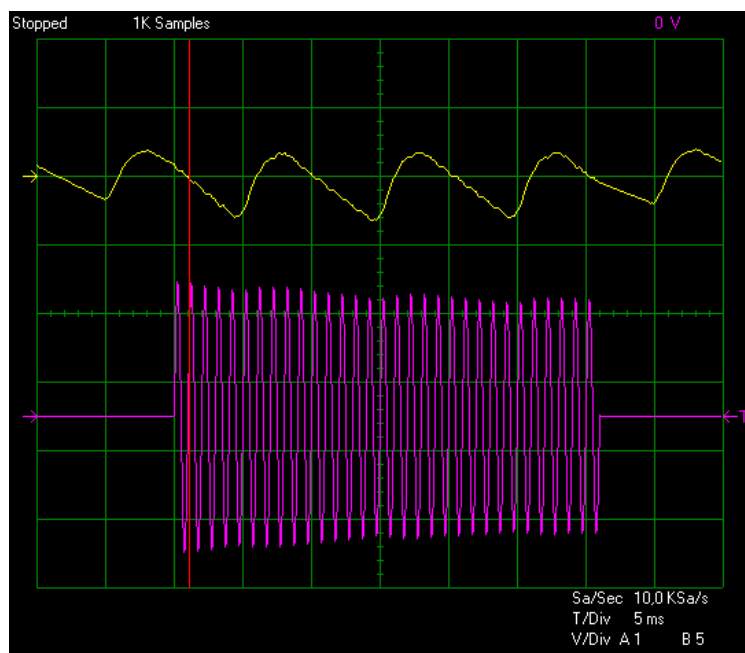


Bild 7 Ausgangssignal bei $C1 = 10 \mu\text{F}$, $C2 = 10 \mu\text{F}$, $R = 0$, oben U1

6) Mit einer zweiten solchen Box wird jetzt auch C2 umschaltbar gemacht. Das hat sehr viel mehr Wirkung. Zu kleineren Werten hin nimmt die Kompression deutlich zu. Ist sie beim Originalwert 100 μF kaum zu spüren, so wird sie bei 10 μF schon spürbar. Noch stärker wird sie im nächsten Versuch.

7) Zwischen Siliziumgleichrichter und C1 wird ein Hochlastpotentiometer von 500 Ω /50 W gelegt (**Bild 8**), aus Platzgründen ebenfalls extern angeschlossen.

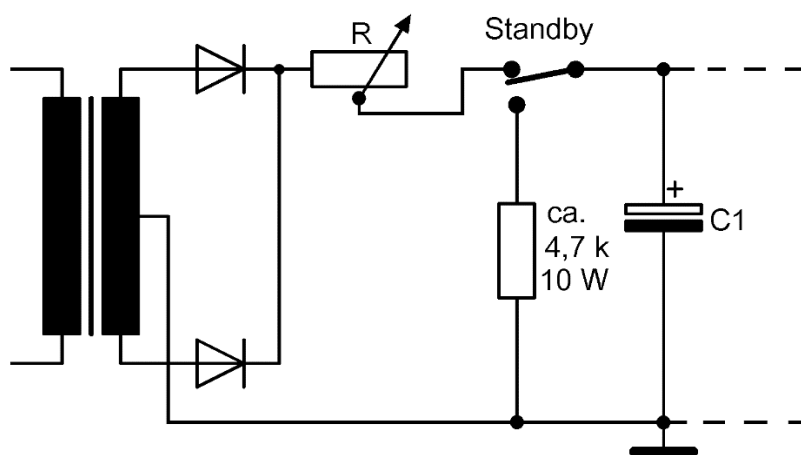


Bild 8 Ein variabler Hochlastwiderstand vor dem Ladeelko simuliert einen Röhrgleichrichter

Damit lässt sich der Innenwiderstand des Netzteils stufenlos variieren und so das Verhalten von Röhrgleichrichtern annähernd imitieren. Beim Hochdrehen nimmt die Kompression deutlich zu (**Bild 9**).

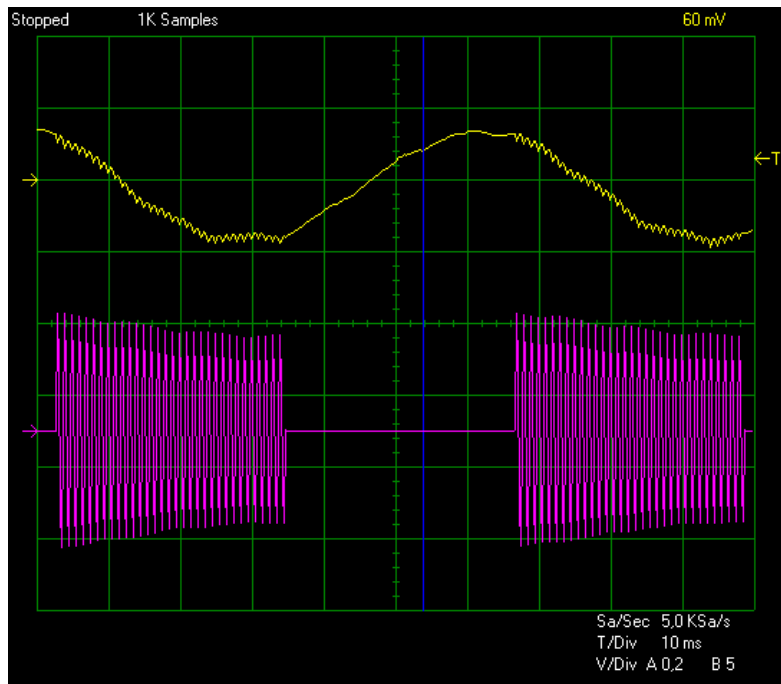


Bild 9 Ausgangssignal bei $C1 = 10 \mu\text{F}$, $C2 = 10 \mu\text{F}$, $R = 200 \text{ Ohm}$, oben U2

8) Die Schirmgitter werden versuchsweise an die Spannung U1 angeschlossen. Wieder zeigt sich ihr Einfluss, die 100-Hz-Modulation wird extrem, der Verstärker ist unbenutzbar (**Bild 10**, oben U1). Also schnell wieder zurück nach U2.

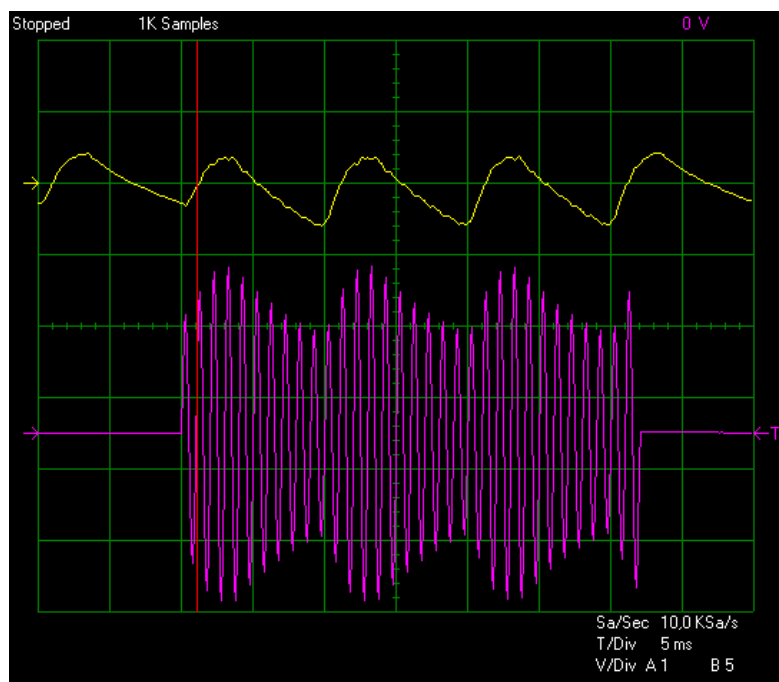


Bild 10 Schirmgitter versuchsweise an U1:100 Hz-Modulation extrem, Verstärker unbenutzbar. C1 = 10 μ F, C2 = 10 μ F, R = 0, oben U1

Die Kompression gezielt verändern

Bisher ist die Stärke der Kompression praktisch bei jedem Verstärker eine feste charakteristische Eigenschaft. Die Idee liegt nahe, sie veränderbar zu machen. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten. Man kann den Innenwiderstand des Netzteils umschaltbar machen, indem man beim Gleichrichter zwischen Röhre und Siliziumdioden hin und her schaltet. Dies erlaubt beispielsweise der „Dual Rectifier“ von Mesa Boogie, der Name sagt es schon. Nun ist es allerdings schwierig, nachträglich noch eine zusätzliche Röhre in vorhandene Verstärker einzubauen. Praktisch genauso gut tut es auch ein Leistungswiderstand von z. B. 100 bis 300 Ω zwischen den Dioden und C1, belastbar mit etwa 10 bis 20 W. Ein entsprechendes Potentiometer dürfte wahrscheinlich schwer unterzubringen sein. Außerdem kann man die Elkos austauschen oder evtl. umschaltbar machen, insbesondere C2. Man muss nur sehen, wie weit der Platz im Verstärker ausreicht.

Für Experimentierfreudige, die an ihren Verstärkern viel herumlöten, hier noch ein Tipp zur Sicherheit. Nach dem Ausschalten des Verstärkers halten die Elkos noch lange Zeit ihre Hochspannung. Diese zu berühren macht überhaupt keinen Spaß. Eine schnelle Entladung lässt sich erreichen, indem man den Standby-Schalter als Umschalter ausführt, der den Kondensator C1 über einen Widerstand von z. B. 4,7 k Ω /10 W kurzschließt, wie in **Bild 8** schon mit eingezeichnet. So ist die Stromschlaggefahr nach wenigen Sekunden gebannt.

Die Gretchenfrage, wie klingt es**?

Sounds mit Worten zu beschreiben, ist immer etwas problematisch. Zumindest lässt sich so viel sagen: Mit starker Kompression wirkt er eher lebendiger, spritziger, mit schwächerer oder gar keiner dagegen eher steril, leblos, ohne das „gewisse Etwas“. Auch die 100-Hz-Modulation steuert einiges dazu bei; sie wirkt, sehr dezent bemessen, durchaus nicht als Störung, sondern als klangbildendes Element.

Wie soll man jetzt einen Verstärker dimensionieren? Der Autor maßt sich nicht an, hier die absolute Patentlösung anzubieten. Die Geschmäcker, besonders von Gitarristen, sind nun einmal sehr verschieden. Die Absicht dieses Artikels sollte vielmehr sein, aufzudecken was in diesem Verstärkerbereich passiert, und zum eigenen Experimentieren anzuregen. Je nach Schaltung und Dimensionierung lassen sich Kompressionseffekt und 100-Hz-Modulation in ihrer Stärke innerhalb weiter Grenzen einstellen. Wer einmal verstanden hat, was die entscheidenden Einflussgrößen sind, nämlich vor allem die Elkos C1 und C2, der Innenwiderstand des Netzteils, gegeben durch die Gleichrichterart und einen eventuell eingebauten Zusatzwiderstand, die Gegenkopplung, in geringerem Maße auch die Drossel, der kann gezielt forschen, statt wie früher lange im Nebel herumzustochern, bis er seinen Traumsound gefunden hat.

*Dieser Text ist erstmals im Elektor-Sonderheft „Röhren“, Nr.8, erschienen

**GITEC-Mitglied Vera Erbes hat in Ihrem Vortrag beim GITEC-Jahresmeeting 2015 über Hörversuche zum „Sagging“ berichtet: [https://my.hidrive.com/share/mk40ucf1hm#\\$/Vera](https://my.hidrive.com/share/mk40ucf1hm#$/Vera) (nur für GITEC-Mitglieder)

Anhang

Einfache Tone-Burst-Schaltung

Damit auf dem Oszilloskop ein stehendes Bild erscheint, muss die Schaltfrequenz mit der Sinusfrequenz synchronisiert sein. Das ist leicht zu erreichen, **Bild 11** zeigt die Schaltung. Das Sinus-Eingangssignal mit 1 kHz gelangt auf einen Komparator LM311. Die Dioden schützen ihn vor Überspannung. An seinem Ausgang erscheint es als Rechtecksignal. Dieses geht auf einen CMOS-Frequenzteiler CD4024, von dem die Ausgänge Q5, Q6 und Q7 verwendet werden, die mit einem Drehschalter wählbar sind. Das entspricht Teilungsverhältnissen von 32, 64 und 128, womit zwei Elemente des nachfolgenden Analogschalters CD4066 gegenphasig angesteuert werden. Bei diesem wird Pin 7 mit der negativen und Pin 14 mit der positiven Versorgungsspannung verbunden, in **Bild 11** nicht mit eingezeichnet. Bei Schaltung auf Q5 erscheinen am Ausgang immer abwechselnd 16 Sinuswellen Signal und eine ebenso lange Pause, in den anderen Stellungen 32/32 bzw. 64/64. Bei den hier wiedergegebenen Oszillogrammen wurde immer Ausgang Q6 verwendet. Am Oszilloskop muss die Synchronisation auf „extern“ geschaltet werden. An diesen Eingang wird die Schaltfrequenz gelegt (Ausgang „Synchr“).

Damit das Bild auch in Relation zur 100-Hz-Amplitudenmodulation still steht, bräuchte man eigentlich einen Sinusgenerator, der mit der Netzfrequenz synchronisiert ist. Das würde eine aufwändige PLL-Schaltung erfordern. Die Praxis zeigt aber, dass es auch mit einem quarzstabilisierten 1-kHz-Generator funktioniert, da die Netzfrequenz sehr präzise konstant gehalten wird.

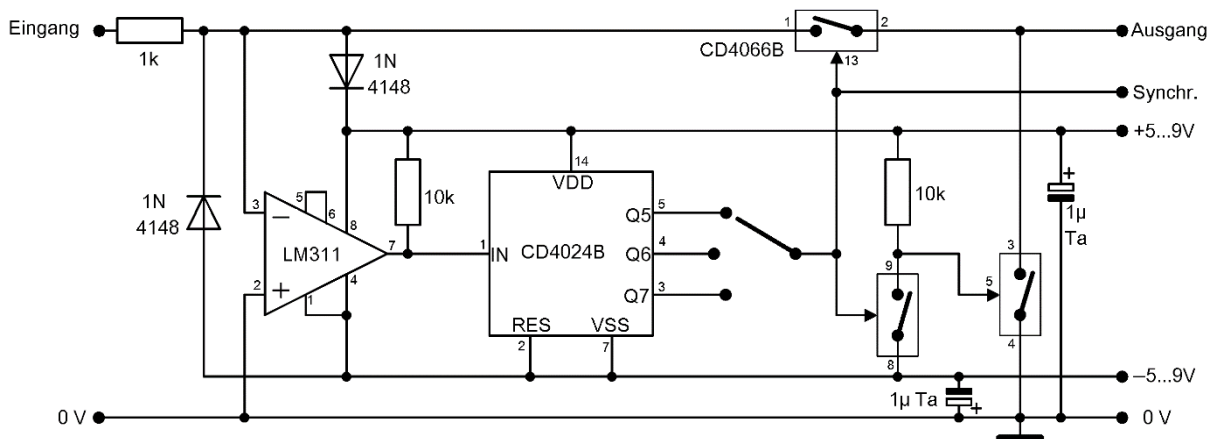


Bild 11 Einfache Schaltung zur Erzeugung von zerhackten Sinuswellen

Dieser Artikel wurde zuerst veröffentlicht in
Elektor "Special Project Röhren 8" (Juni 2012)

Mit freundlicher Genehmigung erneut veröffentlicht von:
Forum E-Gitarrentechnik e.V. (GITEC)
<https://gitec-forum.de/>

Alle Rechte liegen beim Autor

GITEC hat sich zum Ziel gesetzt, das Wissen (wie in Wissenschaft) rund um E-Gitarre, Amps und alles was dazugehört unter die Menschheit zu bringen. Sozusagen als Gegengewicht zur allgegenwärtigen Voodoo-Magic Marktschreierei. GITEC will die Magie wieder dahin bringen, wo sie hingehört: raus aus der Technik, die wir erklären können, zurück in die Köpfe und Hände der Musiker.

GITEC: Keep the magic - cut the BS

