Workshop

Audio-Röhrenverstärker

Referent: Menno van der Veen

www.mennovanderveen.nl

Begleitheft zum Workshop

Kapitel 1 Festlegung von Zielen und Forderungen

Meist ist es ein automatischer Prozess: Bevor man einen Verstärker-Entwurf angeht, haben sich die Ziele bereits im Kopf geformt. In diesem Abschnitt werden wir uns diesen Zielen und Forderungen genauer widmen. Das Kapitel kann man sozusagen als eine Checkliste bei der Planung verwenden, um sich Klärung zu verschaffen.
Auf jeden Fall beugen wir auf diese Weise dem Risiko vor, dass man auf dem halben Wege der Entwicklung des Verstärkers die Ziele wieder aufgreifen und erneut korrigieren muss.

1.1 Die Ausgangsleistung

1.1.1 Leistung und Kosten

Wenn von Ausgangsleistung gesprochen wird, hört man sehr oft: „100Watt sind besser als 60Watt und klingen viel beeindruckender....“
Ist es nicht häufig das erste, was man fragt: „Wieviel Watt hat dieser Verstärker?“ Und dennoch hat Leistung kaum etwas mit der erreichbaren Lautstärke zu tun, denn die wird überwiegend vom Wirkungsgrad der Lautsprecher bestimmt. Dazu ein Beispiel:

Wirkungsgrad des Lautsprechers: $\eta = 90$ dB/W,m
Verstärker mit $P_{aus} = 100$W.
Maximallautstärke in einem Meter Abstand = $\eta + 10\log(P_{aus}) = 110$ dB_{spl} .

Bei $P_{aus} = 50$W wird die Lautstärke 107dB_{spl} , also 3 dB weniger als mit 100W. Dieser Unterschied ist kaum wahrzunehmen.

Schlussfolgerung: Die doppelte Ausgangsleistung liefert gerade mal +3dB mehr Lautstärke. Aber doppelte Leistung macht hinsichtlich der Kosten beim Röhrenverstärker einiges aus (schwerere Trafos, kräftigere Röhren). Man muss also einen günstigen Kompromiss zwischen erträglichen Kosten und gewünschter Maximallautstärke finden.

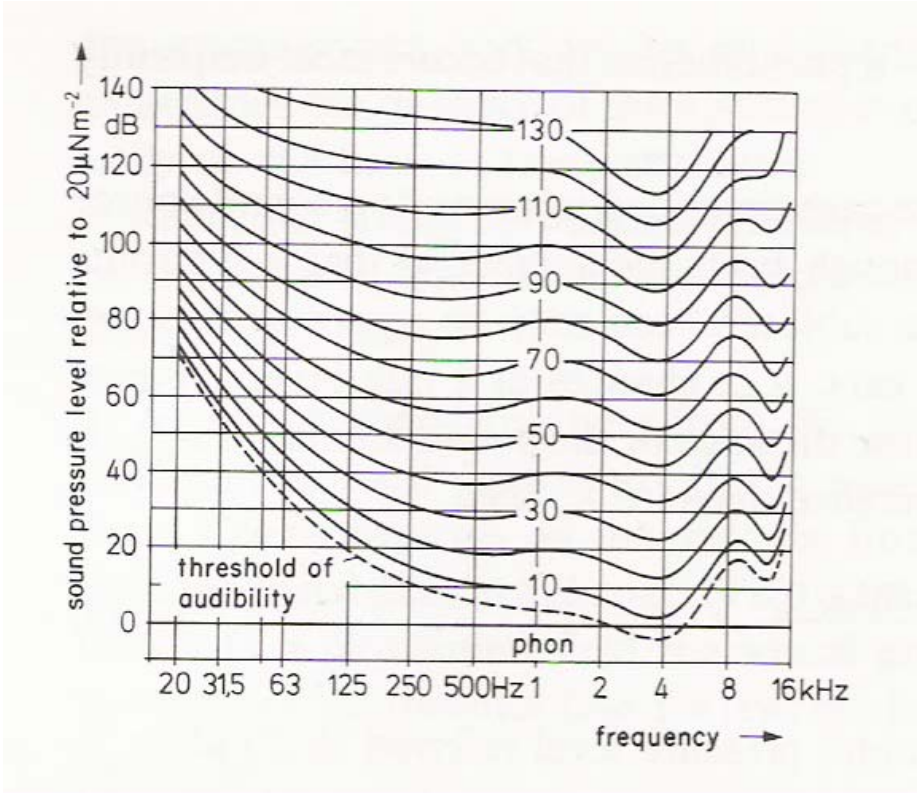
1.1.2 Die Lehre aus der „japanischen Schule“

Man bevorzugt kleinere Leistungen und Lautsprecher mit hohen Wirkungsgraden, beispielweise Hörner mit 105 dB/W.m. Dann sind nur wenige Watt erforderlich, um ausreichende Lautstärken zu erreichen. Natürlich kann es sein, dass meine Kunden nicht über solche Hörner verfügen oder will ihnen irgendjemand solche Lautsprecher gerade verkaufen?

1.1.3 Im Bereich von 1Watt und darunter geschieht es:

Gute Wiedergabe wird nur in geringem Maße durch die maximale Lautstärke bestimmt. Maximale Lautstärke ist vielleicht nötig für die Wiedergabe von Signalspitzen und Transienten. Im Mittel hören wir im Bereich von 1W Ausgangsleistung, denn 90dB_{spl} sind laut genug für angenehmes Hören.

Betrachten wir eine CD-Aufnahme, eine gute selbstverständlich. Dann liegt das mittlere Niveau bei ungefähr 12dB unterhalb der maximalen Aussteuerung. Die CD hat einen Dynamikbereich von 94dB. Wir hören mit einer „Signaltiefe“ von 94 - 12 = 82dB unterhalb des oben genannten 1 Watt-Level bzw. der 90dB_{spl}. Der Verstärker muss äußerst korrekt über einen Bereich von 82dB unterhalb von 1 Watt arbeiten, das sind $6{,}3.10^{-9}$ Watt (6,3 Nanowatt).
Zum Glück gibt es einen Umstand, der das Problem etwas mildert, nämlich die sog. Hörschwelle (s. dazu folgende Grafik)



Untere Grenze des Hörvermögens: Bei tiefen und hohen Frequenzen wird das Ohr unempfindlicher. Dadurch wird die Forderung, dass der Verstärker bis hinunter zu 6,3nW einwandfrei arbeiten muss, etwas weniger streng.

Schlussfolgerung: Die strengen Forderungen gelten unterhalb von 1Watt, in diesem Bereich wird die Klangqualität entscheidend bestimmt. Das ist häufig wenig bekannt. Der Kunde denkt eher: Große Leistung muss gut sein, eine ärgerliche Folge gängigen Marketings.

1.1.4 Röhrenverstärker klingen lauter als Transistorverstärker

Peter van Willenswaard, ein bekannter niederländischer Top-Entwickler, hat untersucht, wieviel Leistung ein Transistorverstärker erbringen muss, um genauso laut zu klingen wie ein Röhrenverstärker. Er muss vier Mal soviel Leistung abgeben können, d.h., ein 10W-Röhrenverstärker ist letztlich genauso laut wie ein 40W-Transistorverstärker. Die folgenden Links führen zu weiteren Details dieser Untersuchung:

http://www.stereophile.com/reference/357/index.html
http://www.audionote.co.uk/articles/tech_amp_peak_01.shtml

Meine Erklärung für diesen Unterschied ist, kurz gesagt, die folgende:

- Lautsprecher besitzen eine nicht konstante Impedanz Z(f);
- Belastung der Röhre $(Np/Ns)^2 \cdot Z(f) = Za(f)$;
- im I_a/U_{ak}-Kennlinienfeld verändert sich die Steigung der Lastgerade mit (f);
- Folglich ist auch der maximale Spannungshub von der Frequenz abhängig;
- bei konstanter 8-Ω-Belastung nimmt man das nicht wahr;
- mit Transistorverstärker und Widerstand von 3Ω in Serie mit der Lautsprecherimpedanz treten vergleichbare Phänomene auf, da bei höherem Wert von Z(f) der „Verlust“ über dem Widerstand geringer ist.

Schlussfolgerung: Gehe davon aus, dass ein Röhrenverstärker lauter ist, als ein Transistorverstärker.

1.1.5 Leistung und Betriebsweise des Verstärkers

Man kann zwischen Single Ended und Push-Pull wählen. SE wird immer in Klasse-A betrieben, bei PP ist Klasse-A, -AB oder -B möglich. Klasse-A besitzt den Vorteil einer konstanten mittleren Stromentnahme aus dem Netzteil. Klasse-AB kann hohe Spitzenleistung abgeben (gute Transientenwiedergabe). Klasse-C erfordert für korrekte Wiedergabe eine starke Gegenkopplung, was eine eigene Betrachtung erfordert.
Für PP wählt man meist Klasse-AB mit einem angemessen großen A-Bereich (etwa 5 bis 10W). Für die meisten Anwendungen ist das eine vorzügliche Wahl. Abhängig von der Versorgungs-Hochspannung lassen sich bei voller Aussteuerung 50 bis 100W erzielen, für die Signalspitzen verbleibt ausreichend Reserve. Beim Übergang von Klasse-A nach Klasse-B treten hörbare Übernahmeverzerrungen auf, da dann jeweils eine der beiden Endröhren sperrt. Dies äußert sich unter anderem in einer Veränderung des Dämpfungsfaktors. Ich wähle dafür den Begriff dynamic damping factor distortion (DDFD).

Schlussfolgerung: Strebe nach ausreichender Klasse-A Leistung und benutze den AB-Bereich für die Transienten-Wiedergabe.

1.1.6: Der Lautsprecher als bestimmender Faktor

Der Wirkungsgrad des Lautsprechers bestimmt zusammen mit der Verstärkerleistung die letztlich erreichbare Lautstärke. Ich gehe in der Regel von einem mittleren Lautsprecherwirkungsgrad von 90 dB/W,m aus und lege auf dieser Grundlage die erforderliche Ausgangsleistung fest.
Wie bereits gesagt: Hörner erfordern weniger Leistung. Dagegen habe ich auch Lautsprecher mit geringerem Wirkungsgrad von z.B. 83dB/W,m. Für den Betrieb solcher Lautsprecher ist einige Leistung erforderlich.
Daneben sind noch weitere Punkte zu beachten: Wie weit bin ich vom Lautsprecher entfernt, und wie groß ist der Abhörraum? In meinen Untersuchungen lege ich von Raumgrößen von etwa 30 bis 40m^2 zugrunde. Dann sitzt man ungefähr drei Meter vor den Boxen, hört Stereo. Ich gehe von folgendem aus: Am Abhörort hat man dank Stereowiedergabe und der Wandreflexionen gerade den gemittelten Lautsprecherwirkungsgrad zur Verfügung.

Schlussfolgerung: Für welchen Lautsprechertyp ist der Verstärker bestimmt?

1.2: Der Frequenzbereich

In aller Deutlichkeit: Ich bestimme den Frequenzgang des Verstärkers bei einer gemittelten Ausgangsleistung von 1W. Später gehe ich gesondert auf den Leistungsbereich ein, hier ist das noch nicht wichtig.

1.2.1: Der Hörbereich unseres Ohrs

Junge Menschen hören zwischen 20Hz und 20kHz. Mit zunehmendem Alter geht der Hörbereich zurück. Ich bin jetzt 59 und höre zum Glück noch bis 15kHz. Auch habe ich in meinem Leben nur wenigen lauten Konzerten beigewohnt, weswegen ich nicht an Taubheit leide. Meine Situation ist ganz anders als diejenige vieler junger Menschen von heute, die wegen MP3-Playern und Kopfhörern und lauten Konzerten Sorgen erweckende Hörschädigungen zeigen. Die Fotos zeigen beschädigte Sinneshärchen, die nicht repariert werden können.

Gesunde und beschädigte Sinneshärchen im Ohr, eine Lärmschädigung, die nicht reparabel ist.

Aufgrund des Gesagten könnte man zu dem Schluss kommen, dass für mich ein Verstärker mit einer oberen -3dB-Grenze bei 15kHz ausreicht. Meine Erfahrung ist aber eine andere: Bei größeren Lautstärken kann ich höhere Töne besser wahrnehmen. Meine Ohren sind auch unterschiedlich empfindlich, auf dem rechten höre ich z.B. etwas schlechter. Um das festzustellen, gibt es einen einfachen Test: Sprich mit jemandem über das Handy und halte das Gerät abwechselnd an das linke und an das rechte Ohr. Der Klang, eventuell die Lautstärke des Handys wird wahrscheinlich in beiden Fällen unterschiedlich sein. Unser Gehirn gleicht diese Unterschiede automatisch aus, ohne dass wir uns dessen bewusst sind.

Schlussfolgerung: Sorge in jedem Fall für eine ungeschwächte Wiedergabe von 20Hz bis 20kHz.

1.2.2: Frequenzbereich und Gegenkopplung

Wird einen Verstärker gegengekoppelt, läuft man gegen die Phasendrehung des Ausgangsübertragers an. Diese wird durch die interne Wicklungs-Kapazität C_{ip} und die primäre Streuinduktivität L_{sp} verursacht. Beide Größen bilden ein Filter 2. Ordnung mit 180° Phasendrehung. Dann wird die Gegenkopplung zur Mitkopplung, der Verstärker wird instabil. Um dies zu verhindern, baut man in den Verstärker ein Filter 1. Ordnung ein, dessen Wirkung bei einer tieferen als der erregten Frequenz einsetzt.
(Einzelheiten dazu in meinem Buch High-End-Röhrenverstärker, ISBN 978-3-89576-182-9, Elektor-Verlag GmbH, Kap. 5.4)

Der Startpunkt dieses Filters muss vorsorglich oberhalb von 20kHz liegen, um unerwünschte Klangbeeinflussungen zu verhindern. Für die meisten Ausgangsübertrager ist das eine schwer zu erfüllende Forderung, da oben Gesagtes beinhaltet, dass die -3dB-Eckfrequenz des

Übertragers weit oberhalb von 20kHz liegen muss. Weitere Details im oben genannten Buch, ich fasse das Wichtigste hier kurz zusammen: Für eine stabile 6dB Gegenkopplung (Faktor 2) muss die f_{-3dB}- Grenzfrequenz des Übertragers mindestens bei 2 x 20 = 40 kHz liegen. Für 12dB Gegenkopplung wären demnach 4 x 20 = 80 kHz zu fordern usw.

Schlussfolgerung: Falls Extrafilter für Stabilität bei Gegenkopplung erforderlich sind, sollte deren Einsatzfrequenz oberhalb von 20kHz liegen, um Klangeinbußen zu verhindern.

1.2.3: Frequenzbereich und Zeitverhalten

Frequenzbereich und Phase sind direkt aneinander gekoppelt. Bei hohen Frequenzen kann die Phasendrehung so groß werden, dass die Gegenkopplung zur Mitkopplung wird. Bei den tiefsten Frequenzen verursachen die Koppelkondensatoren und die Selbstinduktion des Übertragers eine Zeitverzögerung, die oft als Gruppenlaufzeit beschrieben wird. Zu starke Abweichungen verursachen eine schlechtere Räumlichkeit und mäßige Basswiedergabe. Über die Hörbarkeit solcher Erscheinungen geht es in meinem Buch in Kapitel 4.16.

Schlussfolgerung: Der tieffrequente Übertragungsbereich sollte soweit als möglich nach unten ausgeweitet werden, um Einbußen bei der räumlichen Wiedergabe zu vermeiden.

1.3: Leistungsbereich

Angenommen, ein Verstärker erbringt bei einer Leistung von 1kHz eine maximale Leistung von 100W. Man erhöht die Frequenz auf 38kHz und stellt fest, dass die Leistung auf die Hälfte absinkt. Im unteren Frequenzbereich werden 50W bei einer Frequenz von 32Hz erreicht. Die -3dB-Leistungsbandbreite erstreckt sich dann von 32Hz bis 38kHz.

1.3.1: Hochfrequenter Leistungsbereich

Bei hohen Frequenzen wird die Leistung hauptsächlich durch C_{ip} und L_{sp} begrenzt, wie das auch bei 1W passiert. Auch durch Messung wird man herausfinden, dass der Frequenzbereich bei den oberen Frequenzen bei 1 Watt mit dem der Leistungsbandbreite übereinstimmt. Um C_{ip} und L_{sp} zu verringern, müssen äußerst aufwendige Wickeltechniken angewendet werden, die letztlich sehr kostspielig sind. Für mich ist die Frage, ob es sinnvoll ist, C_{ip} Und L_{sp} extrem zu verringern, da dann die Kosten sehr hoch werden. Im Zusammenhang mit Gegenkopplung können minimale Werte erforderlich werden. Das ist unabhängig von der Leistung, aber wichtig für Stabilität und Klang.

Schlussfolgerung: Hochfrequent wird die maximale Leistung durch C_{ip} und L_{sp} begrenzt. Dieser Frequenzbereich ist nahezu unanhängig von der Ausgangsleistung.

1.3.2: Tieffrequenter Leistungsbereich

Bei tiefen Frequenzen wird die Leistung durch die Größe des Übertragerkerns bestimmt. Dieser gerät bei hohen Amplituden nämlich in die Sättigung, was bei hohen Frequenzen nicht auftritt. Tieffrequent ist also die Kerngröße bestimmend.
Welches sind sinnvolle Richtwerte für die Wahl des Kerns? Ich selbst dimensioniere sie für eine Frequenz von 20Hz, wobei ich festlege, dass der Übertrager bei dieser Frequenz die Hälfte der Maximalleistung verarbeiten kann. D.h., dass der Kern bei $20 \cdot \sqrt{2} = 28Hz$ bereits die volle Leistung übertragen muss. Auf diese Weise beginnt die -3dB Leistungsbandbreite bei 20Hz.
Angesichts des spektralen Inhalts bei der am häufigsten gehörten Musik ist es durchaus angemessen zu erwarten, dass etwa ab 30Hz die Maximalleistung des Verstärkers zur Verfügung stehen muss. So gesehen ist es wenig sinnvoll, diese Leistung bei 20Hz erwarten zu wollen, das würde teuer, der Kern unnötig groß.

Schlussfolgerung: Setze die Grenze für die Kernsättigung auf halbe Leistung bei 20Hz. In der Praxis kann man dann mit voller Leistung nahezu jede Musikrichtung einwandfrei wiedergeben.

1.4: Eingangsempfindlichkeit und Verstärkungsfaktor

Angenommen, ich habe eine Ausgangsleistung von 40W an 4Ω. Das entspricht einer Ausgangsspannung von $\sqrt{40 \cdot 4} = 12{,}65 V_{RMS}$. Weiterhin angenommen, man will Signalquellen mit 250mV Ausgangsspannung ausreichend verstärken. Dann muss der Verstärkungsfaktor mindestens 12,65/0,25 = 51 mal betragen. Zusätzlich möchte man noch eine Reserve von 2 (= 6dB) sicherstellen, dann summiert sich der Verstärkungsfaktor auf 102. Wenn man jetzt noch 6 oder 12 dB gegenkoppeln möchte, benötigt man 204 bzw. 408 mal. Dieses Beispiel macht deutlich, dass man vorher gut kalkulieren und zusätzlich bedenken muss, dass höhere Verstärkungsfaktoren auch zu höherem Rauschen und zur Gefahr des Auftretens von Instabilitäten führen können.

1.4.1: Verstärkungsfaktor bei Endverstärkern

Meist liegt die Eingangsempfindlichkeit bei Endverstärkern im Bereich von 1 bis $2V_{RMS}$. Ich bevorzuge $2V_{RMS}$, weil dann der Verstärkungsfaktor niedriger werden kann. Ein weiteres Beispiel: 40W an 4Ω; Eingangsempfindlichkeit von $2V_{RMS}$. Der erforderliche Verstärkungsfaktor ergibt sich dann zu 12,65/2 = 6,4. Das ist ein ausgezeichnet niedriger Wert und vereinfacht den Entwurf, garantiert ausreichende Stabilität. Bei 6dB Gegenkopplung ist dann ein zusätzlicher Verstärkungsfaktor von 2 erforderlich, was aber noch immer gut zu handhaben ist.

Schlussfolgerung: Wähle einen möglichst niedrigen Verstärkungsfaktor des Endverstärkers aus Gründen der Stabilität und Einfachheit des Entwurfs.

1.4.2: Verstärkungsfaktor beim Vorverstärker

Ich gehe von $0{,}5V_{RMS}$ Ausgangsspannung heutiger Signalquellen aus (= -12dB einer vollständig ausgesteuerten CD). Um damit $2V_{RMS}$ Ausgangsspannung zu erzielen, ist ein effektiver Verstärkungsfaktor von 8 mehr als ausreichend, was für einen Vorverstärker kein Problem darstellt. Kommerzielle Geräte besitzen oft noch geringere Verstärkungsfaktoren, meist im Bereich von 4.

Schlussfolgerung: Es gibt Vorverstärker, bei denen durch leichte Drehung des Volumereglers plötzlich große Lautstärken auftreten. Das ist nicht mein Ziel, eine solche Regelung ist viel zu empfindlich. Ich ziehe es vor, dass der Regler bei üblicher Zimmerlautstärke ($90dB_{spl}$) auf ungefähr 12 oder 13 Uhr steht. Dann können höhere oder niedrigere Pegel innerhalb eines angemessenen Drehwinkes vernünftig eingestellt werden. Solche Regelbereiche entsprechen zwar nicht dem weitverbreiteten Standard, kommen aber den in Studios gebräuchlichen Abhör-Verhältnissen recht nahe, bei denen dann der Schieberegler im Bereich von 90% der Gesamtregelstrecke steht. Dann kann man angemessen einstellen und optimal regulieren. Zudem ist in diesem Bereich der Gleichlauf zwischen rechter und linker Potentiometerbahn besonders gut. Dass diese Bedingungen auf den erforderlichen Verstärkungsfaktor Einfluss haben, versteht sich von selbst.

Schlussfolgerung: Eine weniger empfindliche Regelung beim Lautstärkesteller begünstigt praxisgerechtes Einstellen.

1.4.3: Eingangsimpedanz
Diese sollte vorzugsweise größer als 10kΩ sein, ich wähle 50 bis 100kΩ, um die Belastung der Spannungsquelle möglichst klein zu halten.

1.5: Dämpfungsfaktor
Darunter wird das Verhältnis zwischen Lautsprecherimpedanz und Verstärker-Ausgangsimpedanz verstanden. Beträgt die Lautsprecherimpedanz beispielsweise 4Ω, die verstärkerseitige Ausgangsimpedanz 1Ω, wird der Dämpfungsfaktor $DF_4 = Z_L / Z_{aus} = 4/1 = 4$.

1.5.1: Elektrostat oder dynamischer Lautsprecher?
Elektrostatische Lautsprecher (ESL) besitzen intern einen Step-Up-Transformator, was eine ordentliche Dämpfung erfordert. In meinem Buch untersuche ich diese Materie in Kapitel 14 sehr ausführlich und komme dort zu dem Schluss, dass ein Dämpfungsfaktor von 10 oder mehr eine Minimalanforderung darstellt.
Für dynamische Lautsprecher gelten flexiblere Vorschriften. Einige Typen benötigen minimale Dämpfung, andere arbeiten ausgezeichnet mit einem Dämpfungsfaktor von 4. Dynamische Lautsprecher mit geringem Wirkungsgrad verlangen große Dämpfungsfaktoren. Auf jeden Fall sollte man vorher über die Höhe des Dämpfungsfaktors nachdenken, da Röhrenverstärker prinzipbedingt ein vergleichsweise schlechtes Dämpfungsverhalten zeigen. Mit Gegenkopplung kann einiges erreicht werden, doch dann muss wieder die dann u.U. erforderliche höhere Open-Loop-Verstärkung mitberücksichtigt werden.

Schlussfolgerung: Für welchen Lautsprechertyp ist der Verstärker vorgesehen? Diese Entscheidung hat großen Einfluss auf den Verstärkungsfaktor und die Frage, ob gegengekoppelt wird oder nicht.

1.5.2: Direkter Einfluss des Dämpfungsfaktors
Je größer der Dämpfungsfaktor, umso strammer die Basswiedergabe. Das heißt nicht, dass eine höhere Dämpfung zu einer lauteren Basswiedergabe führt, die tiefen Töne klingen aber weniger verschwommen und detailreicher.
Der Dämpfungsfaktor beeinflusst ebenfalls die Richtungswahrnehmung beim Hören. Je mehr Dämpfung, umso exakter ist die Ortung einer Schallquelle möglich.
Je niedriger der Dämpfungsfaktor, umso mehr wird der Klang „umhüllt“, ein hoher Dämpfungsfaktor sorgt dagegen für Offenheit und Klarheit bei der Wiedergabe.

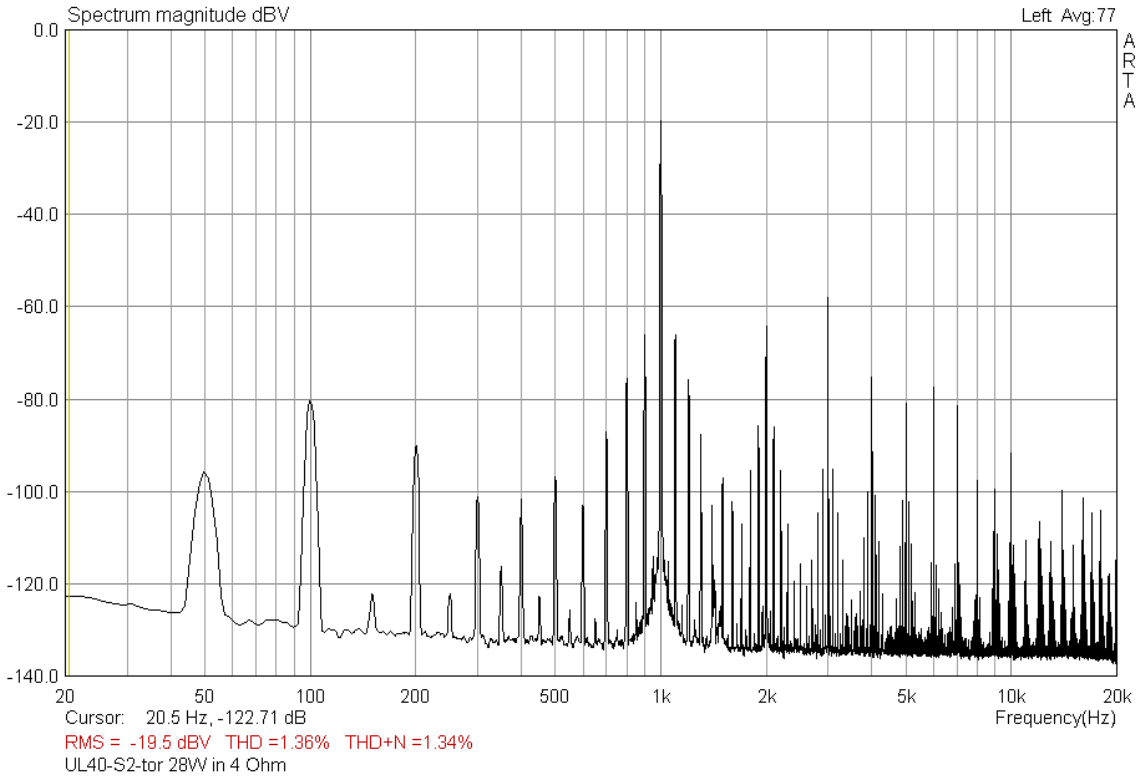
Schlussfolgerung: Der Dämpfungsfaktor hat einen wesentlichen Einfluss auf das entstehende Klangbild, von „rund“ und „offen“ bis „strack“ und „detailliert“. Durch Beeinflussung des Dämpfungsfaktors lässt sich der „musikalische“ Charakter des Klangbildes verändern.

Für dynamische Lautsprecher gelten etwa folgende Richtlinien:
DF < 2: sehr räumlich, rund, mild, offen
2 < DF < 4: räumlich, umhüllend
DF > 4: detailreich, strack, tief, gute Ortung möglich, weniger umhüllend.
Bei ESL gilt, dass DF > 10 sein muss.

1.6: Verzerrung
Man unterschiedet zwischen zwei Formen: Lineare Verzerrung (z.B. Abnahme der Verstärkung bei hohen Frequenzen) und nicht-lineare Verzerrung (Auftreten von im ursprünglichen Signal nicht vorhandenen Obertönen). Im Folgenden geht es zunächst um nicht-lineare Verzerrungen.

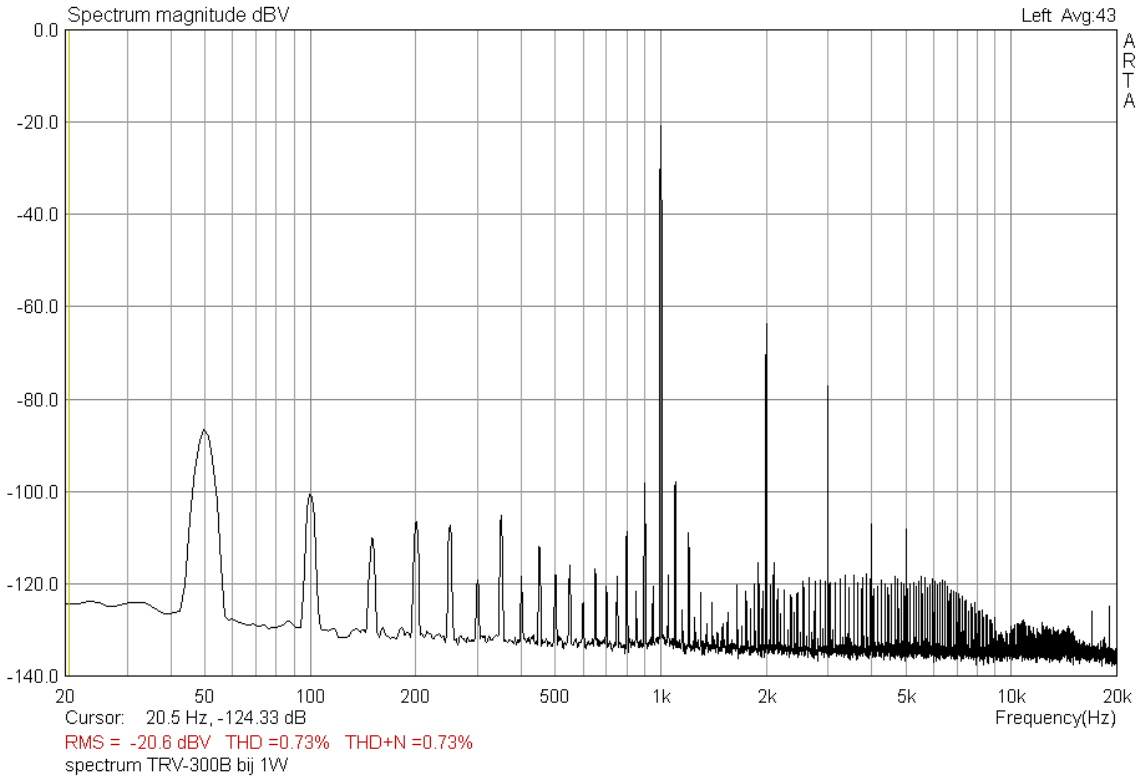
1.6.1: Harmonische Verzerrung

Es soll ein Signal von 1kHz verstärkt werden. Am Ausgang erscheinen auch 2kHz (2. Harmonische), 3kHz (3. Harmonische) usw. Ohne jede Gegenkopplung lässt sich die Verzerrung bei den meisten Endstufen durch sorgfältige Dimensionierung auf etwa 5% THD (total *harmonic distortion*) mindern. Ich selbst strebe immer nach 1% THD bei voller Ausgangsleistung, bei 1kHz lässt sich dieses Ziel meist auch erreichen.
Das unten stehende Bild zeigt das Ergebnis einer Klirrfaktormessung an einem UL40-S2 bei 28W Ausgangsleistung.



Deutlich sichtbar ist die 2. Harmonische, die mit 42dB schwächer auftritt als der 1kHz-Grundton. Die 3. Harmonische ist ungefähr um 39dB geringer. Die Gesamt-THD beträgt 1,36%, was mein Hauptziel, 1% THD bei voller Leistung zu erreichen, nicht ganz erfüllt. Bei Gegentaktverstärkern tritt die 2. Harmonische meist schwächer als die 3. Harmonische auf, wenn beide Endröhren optimal gepaart sind. Es ist die Frage, ob das gehörmäßig angenehm ist, die 2. Harmonische wird nämlich als musikalischer, weniger störend empfunden. Wenn gewünscht, kann man der Treiberstufe der Endröhren ein wenig der 2. Harmonischen „mitgeben“.

Bei SE-Verstärkern tritt vordringlich die 2. Harmonische auf, siehe dazu die folgende Messung.



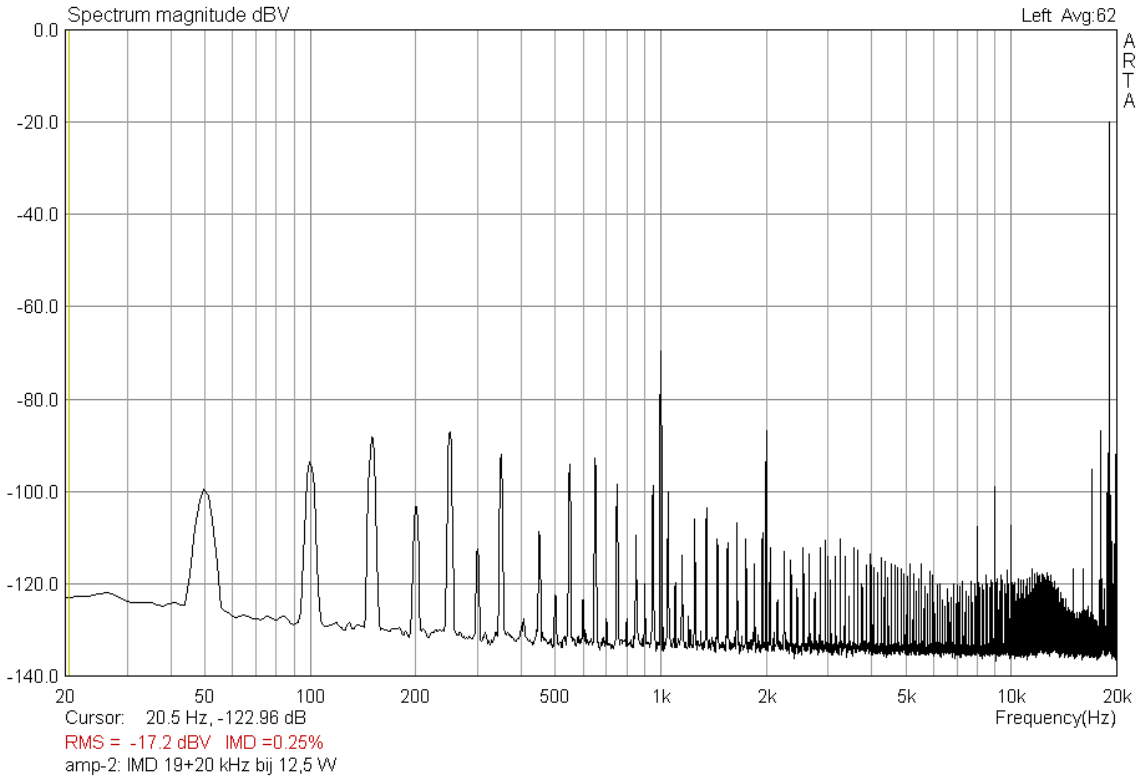
Hier beträgt die 2. Harmonische ungefähr -40dB, die 3. etwa -57dB, das resultiert in einem Gesamtklirrfaktor von 0,72%.

Meine Erfahrung ist, dass ein solch geringer Gesamtklirrfaktor nicht bewusst wahrgenommen wird. Andere finden vielleicht, dass man Klirrfaktoren von 0,001% oder gar weniger anstreben sollte. Aber wenn man solche Werte erreichen will, kommt man um eine starke Gegenkopplung nicht herum, was dann wieder auf Kosten der Natürlichkeit des Klangbildes geht. Die Nachteile werden dann u.U. größer als die zahlenmäßigen Vorteile. Deshalb .....

Schlussfolgerung: Strebe ein THD von 1% bei 1kHz und voller Leistung ohne Gegenkopplung an, dann ist man auf der sicheren Seite. Anschließend kann mit Hilfe von Gegenkopplung der Klirrfaktor auf den gewünschten Wert gebracht werden.

1.6.2: Intermodulationsverzerrung

Der Verstärker wird beispielsweise mit einem Signal von 19kHz und einem weiteren mit 20kHz angesteuert. Am Ausgang erscheinen dann beide Frequenzen und ihre Differenzfrequenz von 1kHz bzw. Vielfache davon. Das kann man gut auf dem folgenden Bild erkennen.



Es tritt ein ungefähr 50dB schwächeres 1kHz-Signal auf, die IMD beträgt 0,25%.
Auch hier gilt, dass diese Verzerrung durch Gegenkopplung unschwer vermindert werden kann, allerdings muss, wie bereits oben gesagt, sorgfältig zwischen Vor- und Nachteilen abgewägt werden. Deshalb ...

Schlussfolgerung: Strebe nach einer IMD<1% bei maximaler Aussteuerung ohne irgendwelche Gegenkopplung. Dann ist man auf der sicheren Seite.

1.6.3: Weitere Verzerrungen

Es existieren noch weitere Verzerrungsarten, aber für alle gilt der Grundsatz, schon während der Entwicklungsphase möglichst große Linearität, Aussteuerbarkeit und Bandbreite bei hoher Ausgangsleistung anzustreben. Eventuell kann hinterher das eine oder andere Problem durch Gegenkopplung mehr oder weniger eliminiert werden.

1.7: Zusammenwirken

Alle in diesem Abschnitt besprochenen Verstärkereigenschaften müssen im Zusammenhang gesehen werden, sie beeinflussen sich nämlich gegenseitig. Darum ist es von vorneherein, bevor man tatsächlich mit der konkreten Umsetzung anfängt, von Bedeutung, sich ungefähr im Klaren darüber zu werden, welche Ziele man genau im Auge hat und zu untersuchen, ob ein Forderung auf der einen Seite womöglich eine andere wieder zunichte macht. Ein einfaches Beispiel soll das zeigen:
Gesetzt, ich wünsche einen Verstärker mit extrem geringem Klirrfaktor (vielleicht 0,01%THD), der einen Dämpfungsfaktor von ungefähr 2 besitzt. Der Konflikt besteht dann darin, dass zwar einerseits die Gegenkopplung für niedrige Verzerrungen sorgt, andererseits aber gleichzeitig der Dämpfungsfaktor ansteigt. Beide Forderungen stehen zueinander in Widerspruch, da wird man in der Praxis sicher auf Probleme stoßen. Darum ist ein vorheriges gegeneinander Abwägen notwendig, um Zielkonflikte möglichst auszuschließen.

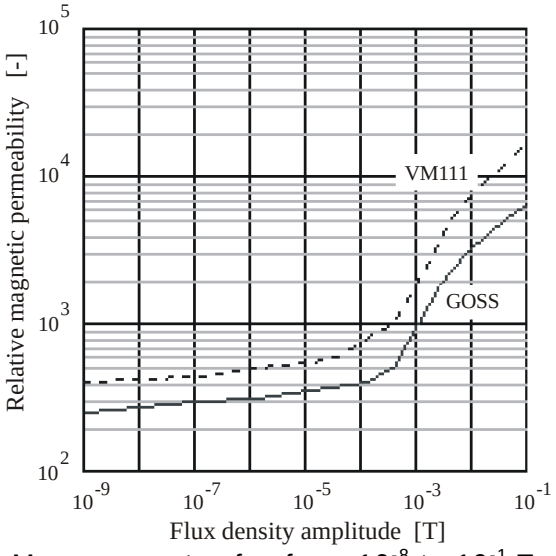
Kapitel 2
Das Verhältnis von subjektiver Wahrnehmung und objektiven Messwerten

Nach vielen Jahren Verstärkerentwicklung und unzähligen Hörproben habe ich einige Zusammenhänge zwischen subjektiver Wahrnehmung eines reproduzierten musikalischen Ereignisses und objektiver Messung von Verstärkerdaten entdeckt. Darauf gehe ich in diesem Kapitel ein.

2.1: Richtungshören
Darunter verstehe ich die Fähigkeit, genau zu entscheiden, aus welcher Richtung (links, rechts, aus der Mitte) ein Schallereignis kommt. Meine Erfahrung ist, dass bei zunehmendem Dämpfungsfaktor die Ortung einer Quelle stets besser wird. Warum das so ist, konnte ich bislang noch nicht schlüssig herausfinden, vielleicht gelingt mir das irgendwann einmal – in jedem Fall trifft diese Beobachtung zu.

2.2: Details hören
Um feine Details bei der Wiedergabe voneinander unterscheiden zu können, sind an erster Stelle geringe Verzerrungen (Auftreten von Harmonischen) und niedrige Intermodulationsverzerrungen von Belang. Meine Orientierungswerte sind: THD und IMD weniger als 1% bei voller Ausgangsleistung.

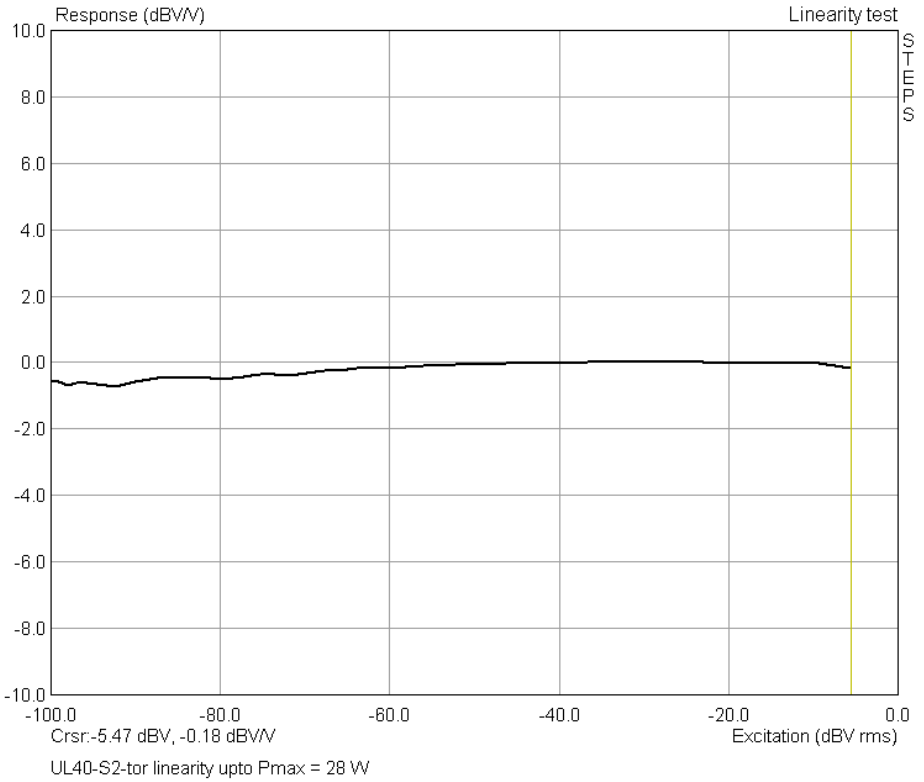
Der Ausgangsübertrager spielt für die Wahrnehmbarkeit von klanglichen Einzelheiten eine überaus wichtige Rolle. Das gilt vor allem für Mikrodetails, die in der Nähe des Rauschens liegen. Die erste Ursache dieses Phänomens liegt in der Abnahme der Permeabilität des Übertragerkerns bei geringer Durchflutung. Die Grafik verdeutlicht diese Erscheinung.



Measurements of μ_r from 10^{-8} to 10^{-1} T;
extrapolation below 10^{-8} T.
The maximum error below 10^{-3} T is 20 %.

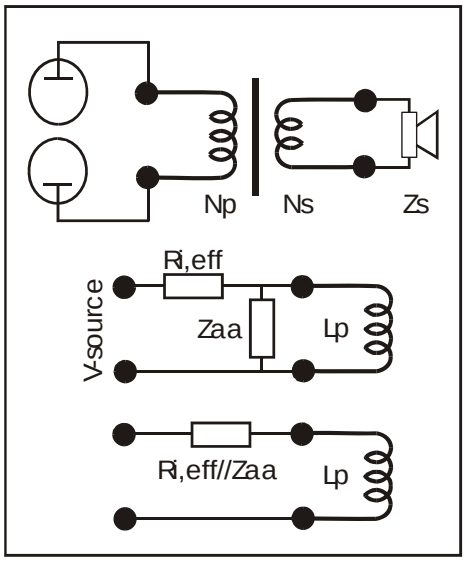
Durch den Einfluss der Permeabilität bei geringen Lautstärken, da, wo die Mikrodetails hörbar sind, wird die Selbstinduktion der Primärwicklung des Ausgangsübertragers kleiner. Die Wicklung wird sich tendenziell wie ein Kurzschluss verhalten. Das bedeutet, dass die Signalanteile geringer Amplitude nicht mehr ausreichend übertragen werden und am Ausgang nur noch abgeschwächt auftreten. Die unten gezeigte Linearitätsmessung erhellt die Zusammenhänge. Es wurde ein gebrauchter UL40-S2-Endverstärker messtechnisch überprüft,

der mit einem alten Übertrager mit GOSS-Kern (*grain oriented silicon steel*) ausgestattet war. Bei dieser Messung wird aufgedeckt, ob der Verstärkungsfaktor konstant bleibt. Wie man sieht, nimmt bei sinkendem Eingangssignal (horizontale Achse) die relative Verstärkung ab (auf 0dB genormt), gerechnet vom Eingang zum Ausgang des Verstärkers.



Abnehmende Verstärkung bei sinkendem Eingangssignal durch den Einfluss der Permeabilität des Kerns.

Bei einem vorhandenen Ausgangsübertrager ist dieser Erscheinung nur über den Weg der Verringerung des Endröhren-Innenwiderstandes durch die Verwendung von Trioden oder durch Gegenkopplung zu begegnen. Der Grund liegt darin, dass bei niedrigen Röhreninnenwiderständen und abnehmender Selbstinduktion der Wicklung noch ausreichend ausgesteuert werden kann, ohne dass merkliche Verluste auftreten.
Das folgende Bild zeigt die Hintergründe des oben Gesagten. Alle Details dieses Phänomens werden übrigens tiefgehend betrachtet in: Menno van der Veen: "Low level audio signal transfer through transformers conflicts with permeability behavior inside cores"; AES paper 7125, 2007 Vienna.

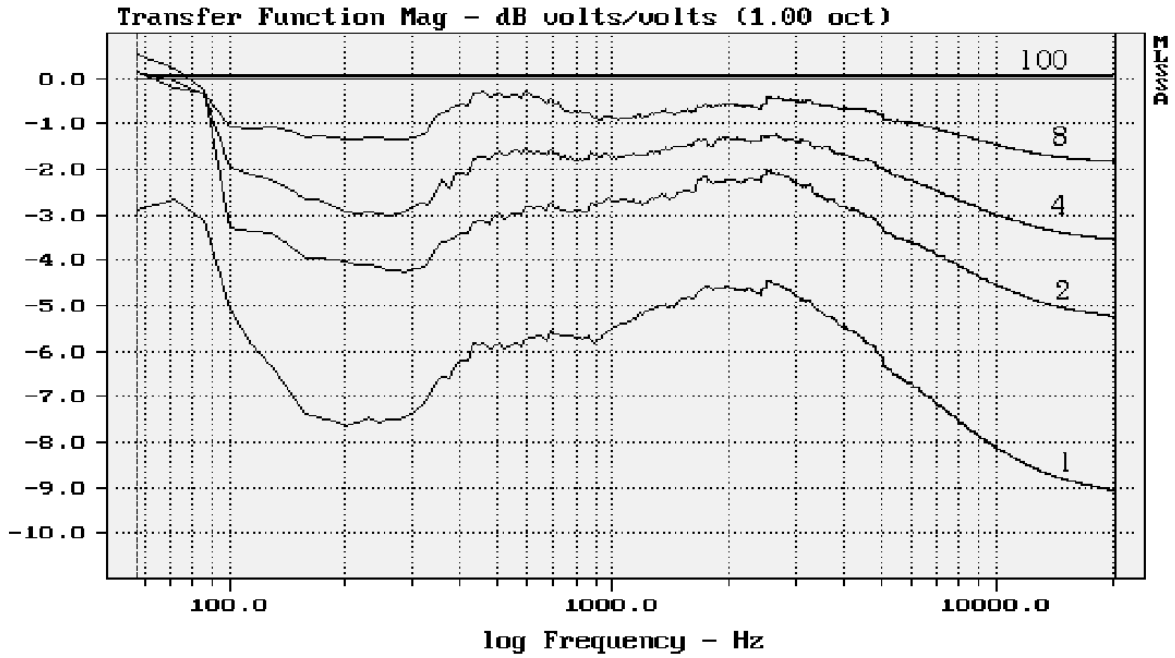


Equivalent circuit of valve amp driving a loudspeaker Zs.

Zusammenfassung zum Problem “Detailwiedergabe”: Geringe THD und IMD, hohe Permeabilität des Kernmaterials und niederohmige Ansteuerung des Ausgangsübetragers.

2.3: Klangbalance

Die Hauptforderungen für eine ausreichende klangliche Balance liegen in einem angemessenen Frequenzgang und einem ausreichend hohen Dämpfungsfaktor (weil sonst Z_{aus} des Verstärkers Einfluss auf die Frequenzabhängigkeit der Lautsprecherimpedanz besitzt). Das folgende Bild gibt den Zusammenhang wieder.

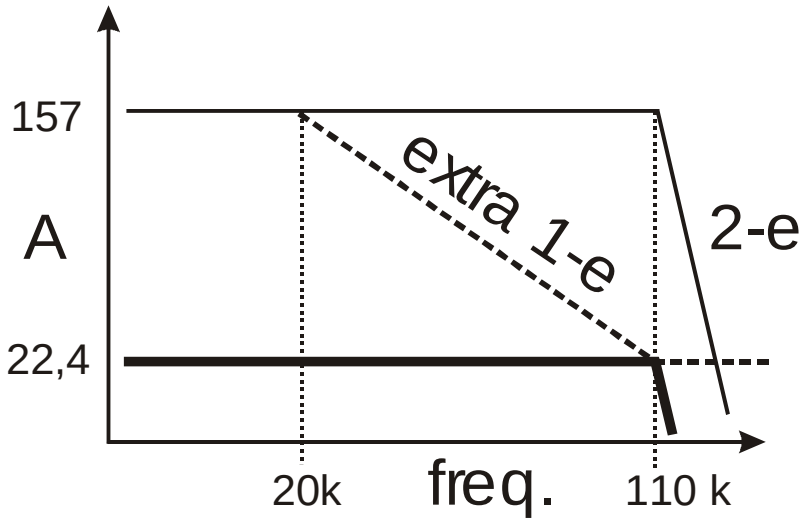


Messung auf der akustischen Hauptachse des Lautsprechers. Veränderung des Frequenzganges in Anhängigkeit von der Variation des Dämpfungsfaktors.

Ich selbst arbeite meist mit einem Dämpfungsfaktor DF < 2 und weiß aus Erfahrung, dass sich das Ohr extrem schnell an die beschriebenen Abweichungen vom geradlinigen Frequenzgang gewöhnt. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, auf folgendes hinzuweisen: Der korrekte

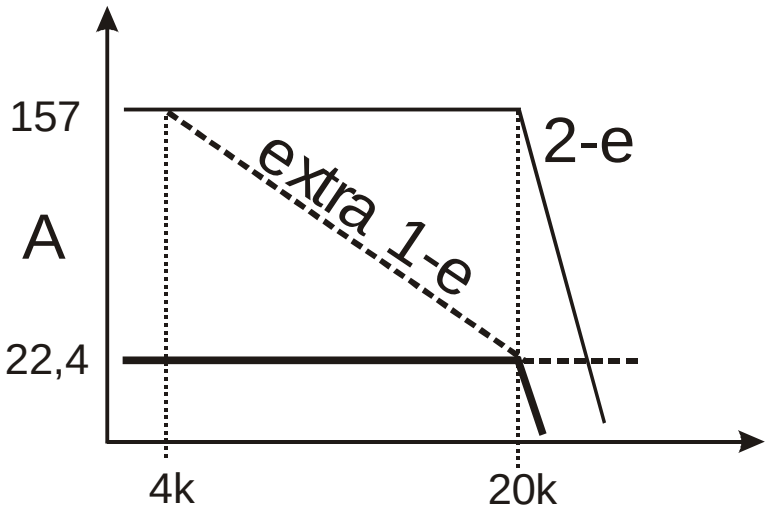
Frequenzgang ist auf der akustischen Hauptachse des Lautsprechers zu überprüfen, seitlich werden ungleichmäßig unterschiedliche Frequenzen abgestrahlt. Dann werden aufgrund von Wandreflexionen Klangverfärbungen auftreten. Aber ... wir haben es hier mit Verstärkern, und nicht mit Lautsprechern zu tun.

Ein zweiter wesentlicher Faktor für eine nicht korrekte Klangbalance liegt in der denkbaren Verfälschung des Signals durch den Verstärker selbst.
Gehen wir von einem nicht gegengekoppelten Verstärker mit einer Bandbreite von 110kHz aus. Weiterhin benutzen wir Gegenkopplung mit dem erforderlichen Filter 1. Ordnung, dessen Grenzfrequenz oberhalb von 20kHz liegt. Dann werden alle Verzerrungskomponenten bis 20kHz gleichermaßen mit dem Faktor 157/22,4 abgesenkt. Siehe dazu untenstehendes Bild.



Bis 20kHz werden alle Verzerrungsprodukte mit dem Faktor 157/22,4 gleichmäßig unterdrückt.

Ganz anders stellt sich die Situation dar, wenn der Ausgangsübertrager nur eine begrenzte Bandbreite besitzt und das zusätzliche Filter beispielsweise schon bei 4kHz wirksam wird. Das folgende Bild zeigt den Sachverhalt.



Hier werden die Verzerrungsprodukte breits ab 4kHz abgeschwächt.

Die geschilderte Situation kann dazu führen, dass Harmonische höherer Ordnung zunehmend weniger unterdrückt werden, was zu einem „harscheren“ Klangbild führt.

Zusammenfassung: Sorge für einen geraden Frequenzgang, für einen hohen Dämpfungsfaktor und für eine ausreichende Open-Loop-Verstärkung für den Fall, dass eine Gegenkopplung vorzusehen ist.

2.4: Abbildung räumlicher Tiefe

Wie weit, wie tief breitet sich das Klangbild vor den Lautsprechern aus? Hauptsächlich hängt das von der verwendeten Aufnahmetechnik ab, aber der Verstärker hat, ausgehend von einer Aufnahme mit ausreichender räumlicher Tiefenabbildung, darauf einen wesentlichen Einfluss. Dazu noch einmal meine Erfahrungen: wenn die THD zu groß wird, wird die Wiedergabe räumlicher Tiefe diffus. In diesem Zusammenhang ist noch einmal an meinen oben formulierten Anspruch zu erinnern, dass die THD selbst bei voller Leistung kleiner als 1% bleiben soll. Zum zweiten beeinflusst der Dämpfungsfaktor nicht nur die Richtungs-Wahrnehmbarkeit, sondern auch die räumliche Tiefe des Klangereignisses. Je mehr Dämpfung, umso mehr Tiefe wird erreicht. Ob der Grund nun in stärkerer Gegenkopplung, die den DF vergrößert, oder im Dämpfungsfaktor allein liegt, habe ich bis jetzt noch nicht sicher herausfinden können.

2.5: Zwischenstand

Bei allen oben untersuchten Zusammenhängen zwischen objektiver und subjektiver Wahrnehmung ließe sich insgesamt vereinfacht festhalten: Starke Gegenkopplung garantiert eine qualitativ hochwertigere Wiedergabe.
Es folgt eine Zusammenstellung von Eigenschaften eines Verstärkers, die sich bei starker Gegenkopplung verschlechtern. Konsequenterweise wird der Entwickler versuchen, ein Gleichgewicht zu finden unter Berücksichtigung der Tatsache, dass nicht ausschließlich nackte Messergebnisse, sondern auch der persönliche Hörgenuss von Bedeutung ist.

2.6: Abbildung „nach vorn“

Das Klangfeld breitet sich nicht nur unmittelbar vor dem Lautsprecher aus, sondern es kommt auch „nach vorn“, auf den Hörer zu. Den grundlegenden Zusammenhang, den ich dazu herausgefunden habe, lautet: „Je weniger gegengekoppelt wird, um so mehr rückt das Klangbild nach vorne.“ Ich habe auch eine Vermutung, womit dies zusammenhängen könnte. Geringe oder fehlende Gegenkopplung bewirkt eine niedrigere Lautsprecherdämpfung, der Konus des Lautsprechers kann sich frei bewegen und strahlt dadurch den Klang leichter rundum ab, Gehäusevibrationen werden ebenso weniger bedämpft wie Eigenresonanzen des Konus, die Abstrahlung erfolgt frei in alle Richtungen. Bei dem im Folgenden beschriebenen Problem scheint das aber nicht so zu sein.

2.7: Umhüllung

Unter Umhüllung verstehe ich den Effekt, dass sich das Klangereignis um mich herum ausbreitet, ich das Gefühl habe, mitten drin zu sitzen. Das heißt nicht, dass der Schall, etwa wie bei Surround-Systemen, von hinten kommt, das heißt nur, dass der Eindruck entsteht, man sitze mitten unter den Musikern. Auch dabei spielt die Gegenkopplung eine zentrale Rolle. Je stärker gegengekoppelt wird, umso weniger wird man vom Klang „eingeschlossen“, er scheint weiter entfernt zu sein. Dies stellt einen der Hauptgründe dar, warum ich versuche, möglichst wenig gegenzukoppeln. Ich strebe danach, mitten im Klangfeld zu sitzen. Die Erklärung geht für mich in die folgende Richtung: Ungedämpfte Lautsprecher und ungedämpfte Verstärker, die beide ungebremst (na ja, innerhalb gewisser Grenzen) ihre Aufgaben auf eine natürliche und leichte Weise verrichten können.

2.8: Akustische Struktur des Aufnahmefelds

Bei der Herstellung einer Aufnahme, einer CD beispielsweise, werden nicht ausschließlich die Klänge der Instrumente aufgenommen, sondern auch die Hallanteile und Reflexionen, die am Aufnahmeort entstehen (Kirche, Saal, im Freien usw.). All diese Klangkomponenten zusammen liefern ein Bild der Aufnahmeumgebung, des klanglichen Feldes.
Danach hört man die Aufnahme zuhause, wodurch dann das Abstrahlverhalten der Lautsprecher und das Reflexionsverhalten des Hörraumes der ursprünglichen Aufnahmeumgebung gewissermaßen hinzugefügt wird. Auf diese Weise vermischen sich zwei Klangräume, der der Aufnahme und der der Wiedergabe.
Ich habe das folgende, überraschende Phänomen wahrgenommen: Je weniger gegengekoppelt wird, um so mehr dominiert das Aufnahmefeld, verhältnismäßig weniger machen sich dagegen die Gegebenheiten des Abhörraumes bemerkbar. Van der Heide, Techniker beim Rundfunk, hat sich intensiv mit dieser Erscheinung auseinandergesetzt und erklärte sie durch das Vorhandensein des in nur „homöopathischer Dosis“ konservierten Klangfeldes. Er behauptete, dass Gegenkopplung Wirkungen hervorrufe, die die ungehinderte Entfaltung der akustischen Information des Aufnahmefeldes blockiere (wie dies beim Menschen in Stresssituationen auch auftritt). Diese Erklärungen bewegen sich aber alle hart am Rande nicht messtechnisch überprüfbarer Bereiche, so dass dem kaum ernsthaft etwas hinzuzufügen ist. Ich kann nur bestätigen, dass ich den beschriebenen Effekt durchaus ernst nehme und deutlich heraushören kann, ob ein Verstärker die klanglichen Elemente das Aufnahmefeldes partiell unterdrückt, wodurch der Abhörraum stärker klangprägend wirkt. Arbeitet der Verstärker ohne Gegenkopplung, dann überwiegt bei der Wiedergabe die Akustik des Aufnahmeraums. Ich berücksichtige diese Erfahrungen in meinen Entwürfen.

2.9: Betroffenheit und Konzentration

Ich veranstalte oft Hör-Demonstrationen, in meinem Abhörraum halten sich dann so um die dreißig Personen auf. Während wir zusammen sitzen und hören, beobachte ich die Körpersprache der Anwesenden. Handelt es sich um konzentrierte Zuhörer und hören sie gezielt, bewegen sie sich unruhig und tendieren dazu, sich miteinander zu unterhalten?
Mir fällt immer wieder auf, dass Menschen ruhiger und konzentrierter zuhören, wenn der eingesetzte Verstärker ohne Gegenkopplung betrieben wird. In darauf folgenden Gesprächen berichten Hörer, dass sie den Klang als „natürlich“ und angenehm erfahren haben. Dieser Eindruck verschwindet, wenn der Verstärker gegengekoppelt betrieben wird.
Da ich selbst auch gerne ungestört und entspannt Musik höre, bevorzuge auch ich Verstärker ohne Gegenkopplung.

2.10: Zusammenfassung

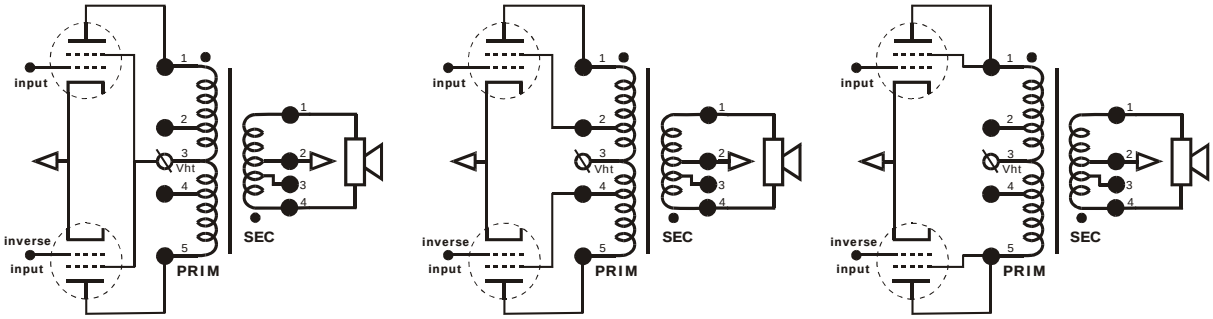
Es bestehen unzählige wissenschaftlich belegbare Gründe dafür, Verstärker mit Gegenkopplung zu betreiben. Detailwiedergabe, Ortung und klangliche Tiefe nehmen zu. Dagegen stehen aber auch viele Argumente dafür, auf Gegenkopplung zu verzichten: Mehr mitten im Klangfeld, mehr „nach vorne“, Hingabe und Konzentration, Dominanz des Aufnahmefeldes....
Für mich ist schon während der Entwurfsphase eines Verstärkers die Frage von Bedeutung, ob gegengekoppelt werden soll oder nicht. Sind objektive Messwerte oder eher meine positiven Empfindungen maßgeblich? Diese Frage muss letztlich jeder für sich selbst beantworten, aber man kann das Ergebnis auf jeden Fall gezielt beeinflussen. Alles hängt ab vom Maß der Gegenkopplung, welche sehr schlicht durch wenige Widerstände leicht einstellbar gemacht werden kann.

Kapitel 3
Schaltungen und ihre Wirkungen

In jüngster Zeit ist es zu einer weit verbreiteten Mode geworden, mittels verschiedner Baukomponenten das Klangverhalten eines Verstärkers zu beeinflussen. Da werden „Superwiderstände“ und „Superkondensatoren“ und angeblich besonders selektierte Röhren gewählt, solche Bauteile bestimmen dann die Kosten und das letztendliche Resultat.
Diesen Weg gehe ich bewusst nicht. Nach meiner Erfahrung wird der Klang eines Verstärkers viel stärker durch das Schaltungskonzept selbst bestimmt, die Qualität der Bauteile liefert nur einen verhältnismäßig geringen Beitrag zum Endergebnis.
Eine nahezu vollständige Übersicht über Wahlmöglichkeiten hinsichtlich von Endstufenkonfigurationen findet der Interessierte in meinem zweiten Buch (1) und auf meiner Internetseite (2). Ich werde an dieser Stelle nur die wesentlichen Punkte ansprechen.

(1) Menno van der Veen: "High-End Röhrenverstärker", Elektor, ISBN 978-3-89576-182-9, Kapitel 9
(2) www.mennovanderveen.nl ; the project

3.1 Gegentaktverstärker
Zwei Endröhren steuern den Ausgangsübertrager im Gegentakt. Meist werden Endpentoden eingesetzt, durch unterschiedliche Beschaltung des Schirmgitters können folgende Varianten realisiert werden: Gegentakt-Pentode, Ultra-Linear und Gegentakt-Triode.



C-10 : Push-Pull-Pentode **C-11 : Push-Pull-Ultra-Linear** **C-12 : Push-Pull-Triode**

Durch Variation der Schirmgitterbeschaltung sind unterschiedliche Konfigurationen realisierbar.

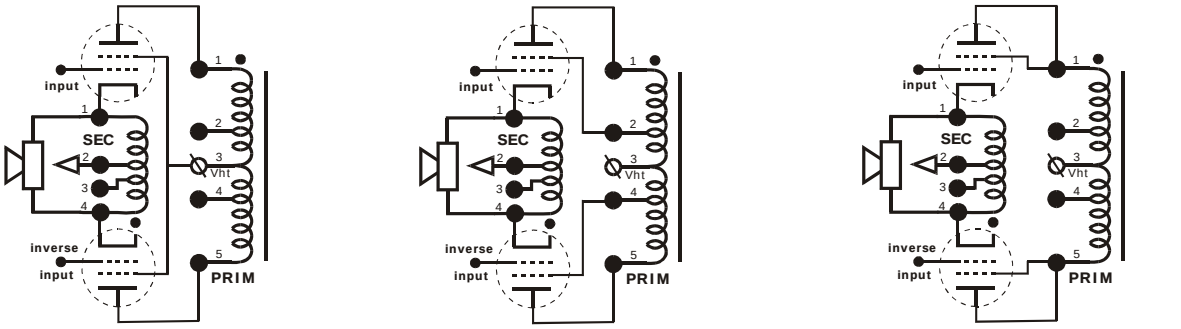
3.1.1: Gegentakt-Pentode
Hohe Ausgangsleistung, warmes Klangbild, sehr niedriger Dämpfungsfaktor, Mikrodetails werden nicht besonders gut reproduziert, ziemlich hohe THD (5% bei voller Leistung), erstklassig für Gitarrenverstärkung geeignet, durch Gegenkopplung können THD reduziert und der Dämpfungsfaktor erhöht werden, was jedoch auf Kosten der „Leichtigkeit“ der Wiedergabe geht.

3.1.2: Ultra-Linear
Ungefähr 20% weniger Ausgangsleistung als bei reiner Pentodenschaltung, transparentes Klangbild, vertretbarer Dämpfungsfaktor (etwa 2), THD kann bei voller Leistung auf 2% gedrückt werden, bessere Wiedergabe von Mikrodetails.

3.1.3: Triode-Gegentakt
Erreicht etwa die Hälfte der Ausgangsleistung einer Pentoden-Gegentaktendstufe, detailreiches, transparentes Klangbild, geringe THD (weniger als 1%), Dämpfungsfaktor im Bereich von 4, Wiedergabe von Mikrodetails.

3.2: Erweiterungen von Gegentaktschaltungen

Durch die Möglichkeit zusätzlicher lokaler Gegenkopplung können die Eigenschaften der Endstufe weiter verbessert werden. Gegenkopplung über die Katode der Endröhren beispielsweise trägt zu deutlicher Verminderung des Klirrfaktors, Verbesserung des Dämpfungsfaktors und einer Erweiterung des Übertragungsbereiches bei. Das folgende Bild zeigt die drei möglichen Grundkonfigurationen.



Zusätzliche Gegenkopplung auf die Katoden der Endröhren.

Eine weitere Variante zum Thema Gegenkopplung stellt die von der Anode zum Steuergitter dar, die zweite Version der sogenannten Super-Trioden-Schaltung.

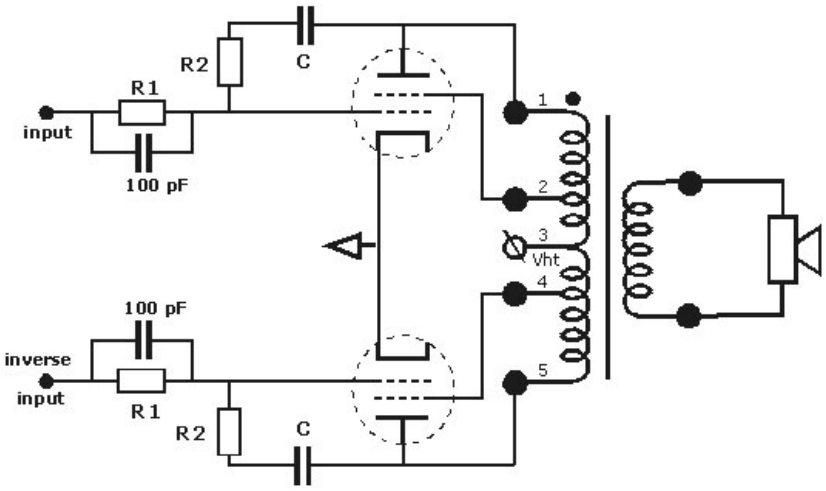


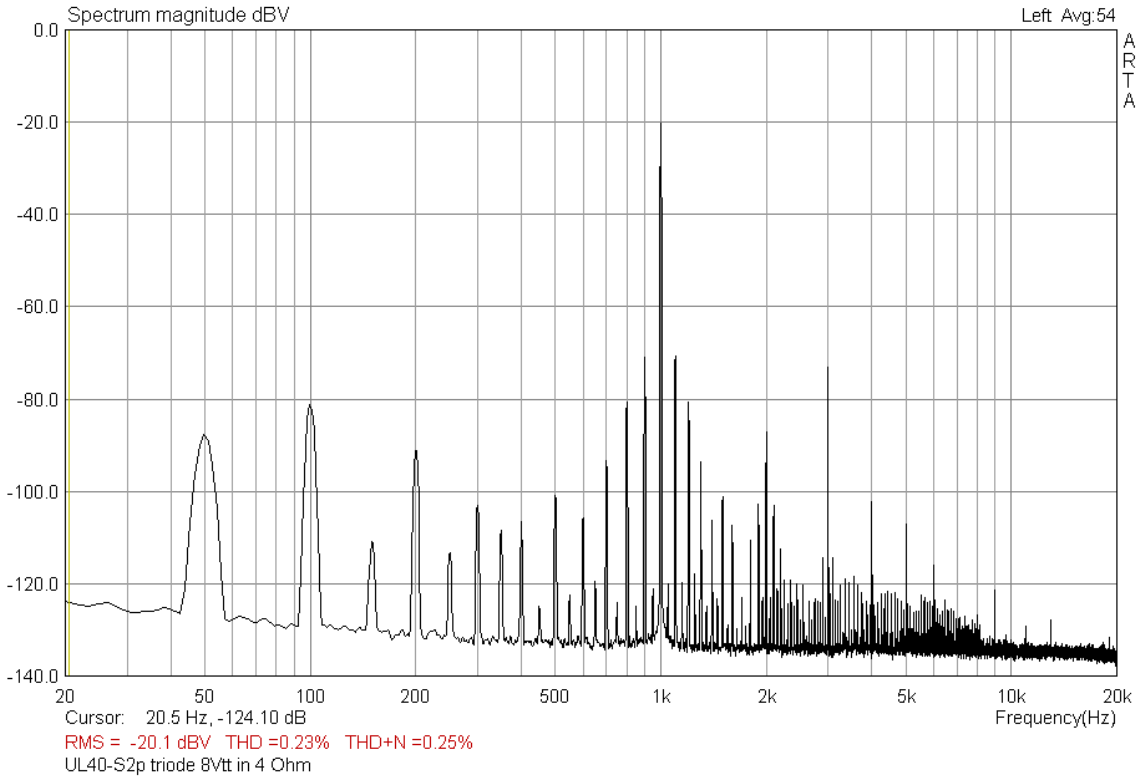
Fig. 3 : Basis Super-Triode schakeling met externe tegenkoppeling. Copyright 2004 Vanderveen

Bemerkenswert bei diesen Schaltungen mit lokaler Gegenkopplung ist die Tatsache, dass das Klangbild nicht oder nur wenig „verdichtet“ wird, seine „Offenheit“ behält. Ein solches „Verdichten“ des Klanges tritt besonders bei Über-alles-Gegenkopplung auf, d.h. bei Gegenkopplung zwischen Aus- und Eingang des Verstärkers. Zudem darf man Über-alles-Gegenkopplung und lokale Gegenkopplung möglichst nicht miteinander kombinieren, sie vertragen sich nicht. Das Ergebnis ist ein wenig lebendiges Klangbild.

3.3: Charakteristische Kennzeichen von Gegentakt-Endstufen

3.3.1: Klirrverhalten

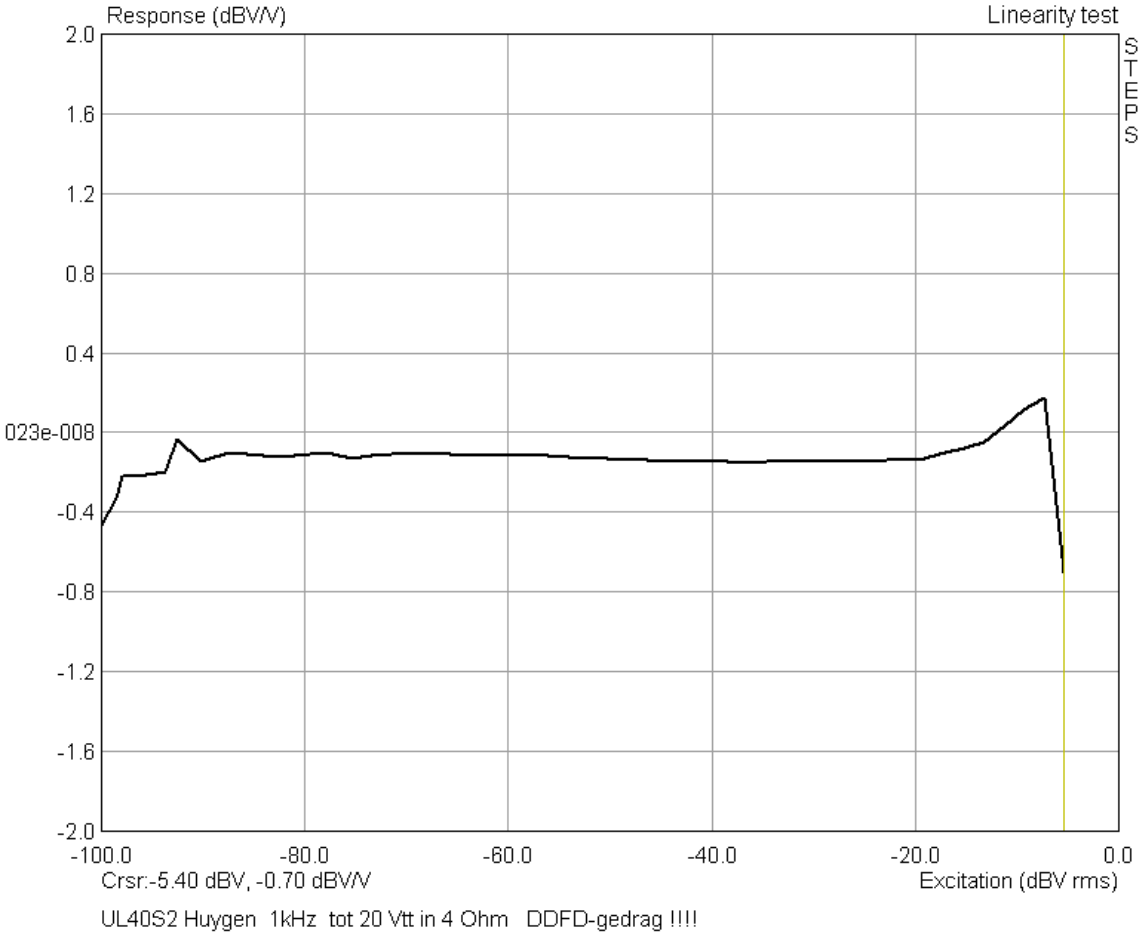
Bei gut abgeglichener Balance dominiert die 3. Harmonische.



Dominanz der 3. Harmonischen,

3.3.2: Konstante Verstärkung, DDFD

Bei in Klasse-AB betriebenen Gegentaktverstärkern sperrt bei höheren Signalamplituden abwechselnd die eine bzw. die andere Endröhre. Dieses Verhalten ruft zwei Erscheinungen hervor: Es werden sowohl der Verstärkungsfaktor als auch die effektive Ausgangsimpedanz verändert. Das folgende Bild zeigt diesen Sachverhalt beispielhaft.

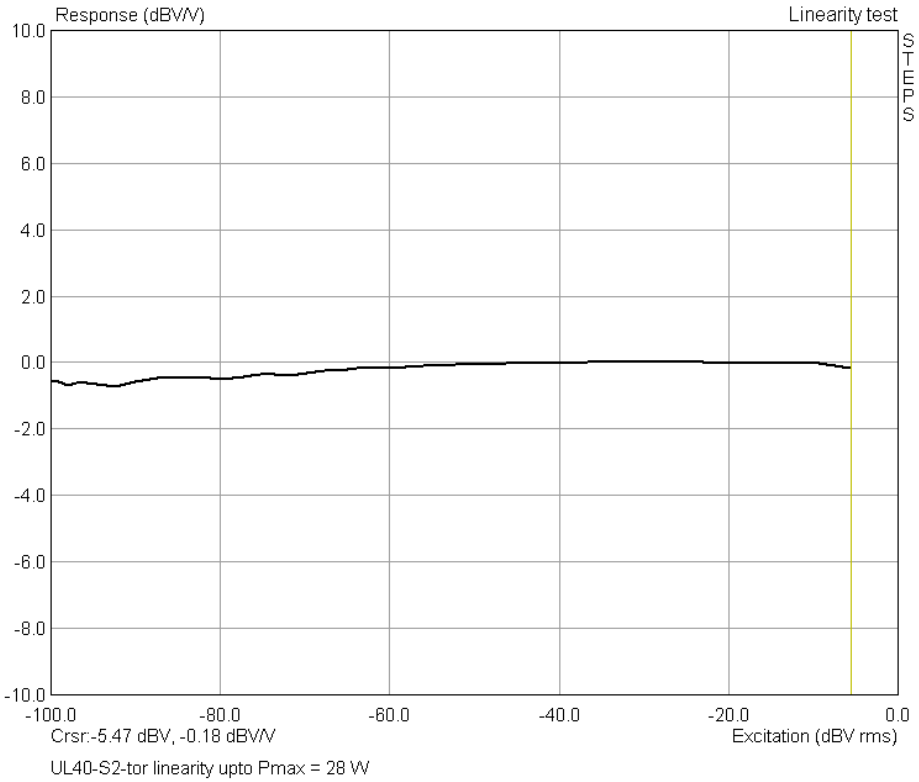


Beim Übergang von Klasse-A nach Klasse-B verändern sich Verstärkung und Dämpfung.

Die Veränderung des Verstärkungsfaktors lässt sich durch lokale oder Über-alles-Gegenkopplung unterbinden. Den inkonstanten Dämpfungsfaktor nenne ich DDFD (= Dynamische Dämpfungsfaktor Distortion). Auch dieser kann durch Gegenkopplung eliminiert werden.

3.3.3: Wiedergabe von Mikrodetails

Die Innenwiderstände der Endröhren sind bei Gegentaktschaltung merklich hoch. Das führt, wie wir bereits wissen, zu Problemen bei der Übertragung von Mikrodetails, da der Übertragerkern in diesem Signalbereich eine nur noch geringe Permeabilität besitzt. Die im folgenden Bild dargestellte Messung zeigt diesen Effekt.

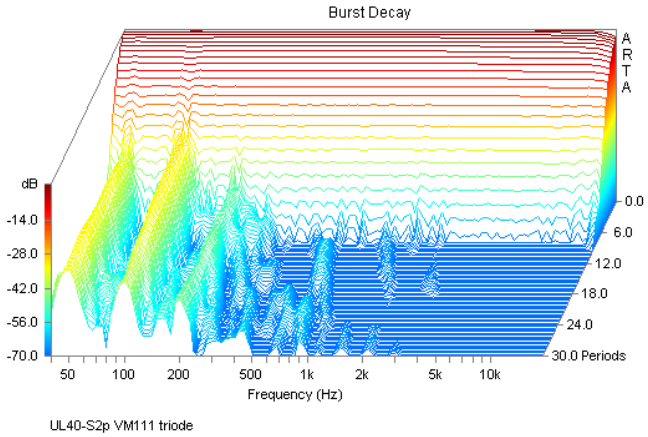


Abnahme der Verstärkung bei Mikrosignalen.

Diese Erscheinung lässt sich nur verhindern, indem man die Endröhren niederohmiger macht, wofür zwei Möglichkeiten existieren: Gegenkopplung über Katode oder Steuergitter, oder Betrieb der Endröhren als Trioden. Der Rückgang der Verstärkung im angesprochenen Bereich kann also durch Gegenkopplung kompensiert werden.

3.3.4: Modulation durch die Versorgungsspannung

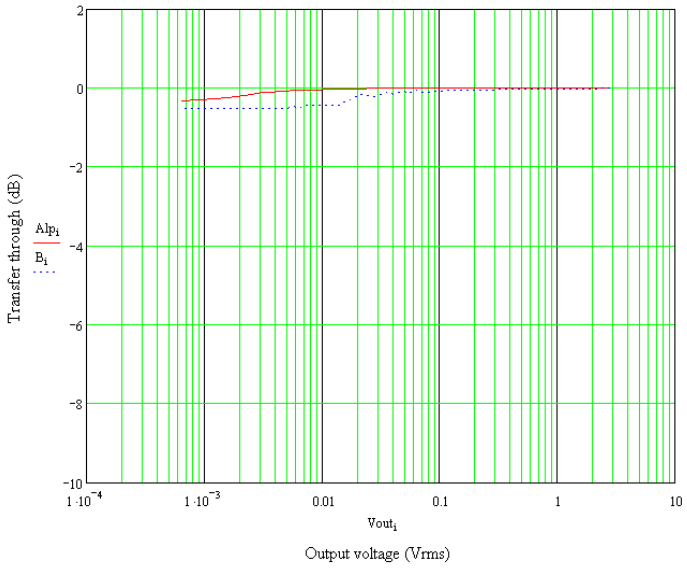
Die Stromentnahme aus dem Netzteil ist nicht konstant, sie steigt bei zunehmender Leistung an. Das führt zu einem Anstieg der Rippelspannung, der der Gleichspannung überlagerten Restwelligkeit. Das erhöhte Brummen ist zwar nicht hörbar, aber durchaus messbar. Die folgende Darstellung zeigt die Zusammenhänge.



Modulation durch die Versorgungsspannung nach einem Signalburst.

3.3.5: Konstanz und Gleichheit des Ruhestromes

Die Ruheströme durch die Endröhren müssen auf die eine oder andere Weise eingestellt werden, um zu einem vernünftigen Verhältnis zwischen Betrieb in Klasse-A und Lebensdauer der Röhren zu kommen. Die Erzeugung der negativen Gittervorspannung und damit die Einstellung des Ruhestromes kann entweder über kapazitiv entkoppelte Katodenwiderstände (R_k-C_k-Methode), durch die Zuführung einer einstellbaren Vorspannung auf die Steuergitter oder über die sogenannte aktive Autobias-Schaltung erfolgen. Detaillierte Informationen dazu können auf meiner Internetseite abgerufen werden (3). Bei Ungleichheit der Ruheströme brummt der Verstärker, der Ausgangsübertrager kommt in die Sättigung, wodurch die Wiedergabe von Mikrodetails negativ beeinflusst wird. Die folgende Figur zeigt, dass bei ungleichen Ruhströmen (blaue, punktierte Kurve) der Trafokern bei der einwandfreien Übertragung von Mikrodetails Probleme bereitet.



Bei ungleichen Ruheströmen verschlechtert sich die Detailwiedergabe.

Der Nachteil der R_k-C_k-Methode liegt darin, dass sich der Ruhestrom mit der Größe der Signalamplitude verändert, und dass die Gleichheit der Ruheströme (wegen interner Toleranzen der Endröhren) bei verschiedenen Ausgangsleistungen nicht zu garantieren ist.

(3) www.mennovanderveen.nl ; valve amplifiers ; Auto-bias largely improves base and micro detail reproduction.

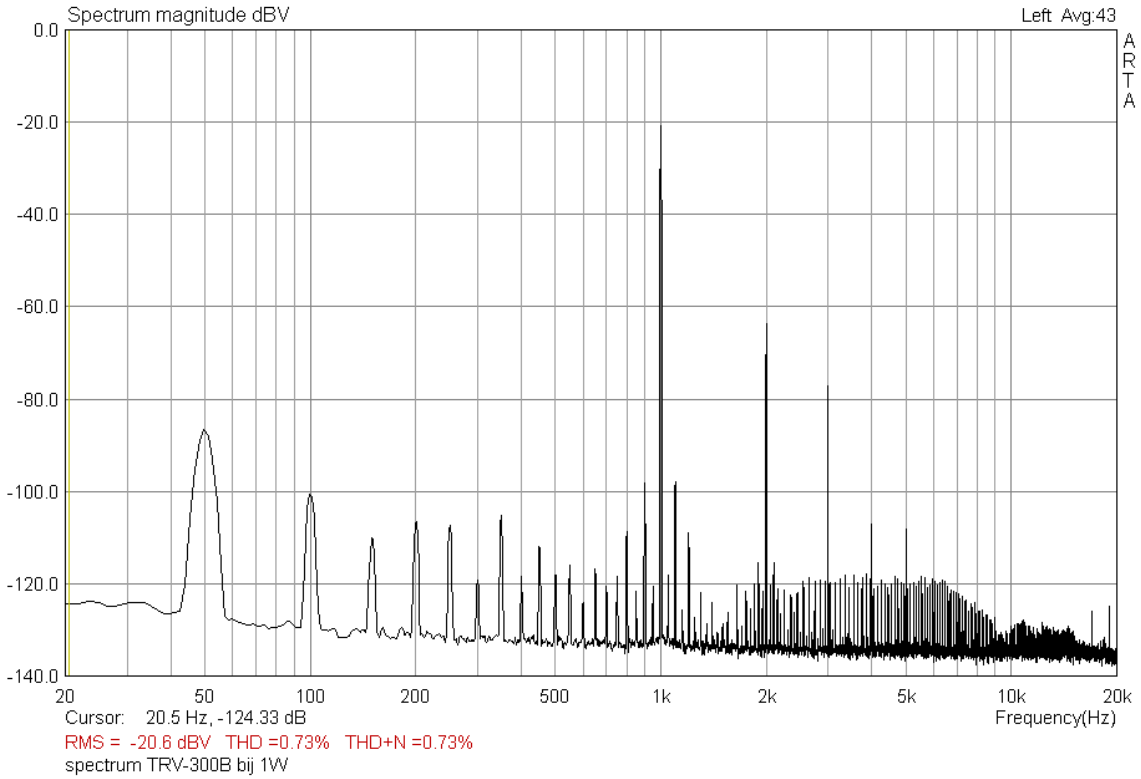
3.4: Eintakt-Endstufen (Single ended)

Der Ausgangsübertrager wird durch eine einzelne Endröhre angesteuert. Dann wird keine Phasenumkehrstufe benötigt, die Röhre arbeitet vollständig im Klasse-A-Betrieb. Vom magnetischen Aussteuerbereich des Übertragerkerns wird lediglich die Hälfte benötigt, weshalb der Übertrager einen vier Mal so großen Kern haben muss als ein Gegentaktverstärker mit gleicher Leistung. Um Kernsättigung durch den Ruhestrom zu verhindern, muss der Kern mit einem Luftspalt versehen sein. Da nicht im Gegentakt verstärkt wird, wird die der Betriebsspannung überlagerte Rest-Brummspannung nicht ausreichend unterdrückt. Die Siebung muss also aufwendiger ausgeführt werden als bei einer Gegentaktendstufe. Beim Eintaktverstärker kommt man netzteilseitig deshalb nicht ohne Siebdrossel aus. Bei direkt geheizten Endtrioden dient der Glühdraht gleichzeitig als Katode, was erhöhte Anforderungen an eine saubere Heizspannungsversorgung stellt. Der Wirkungsgrad dieser Endstufen liegt bei etwa 25% (mit PP sind dagegen bis zu 75%

erreichbar). All dies zeigt uns, dass SE-Endstufen viel Eisen erfordern (Netztrafo, Drossel, Übertrager) und man sehr sorgfältig vorgehen muss, um letztlich doch nur relativ bescheidene Ausgangsleistungen zu erzielen. Dennoch ... SE-Endstufen genießen ein hohes Ansehen, sie klingen außerordentlich gut, und man weiß auch, warum sie so hervorragende Eigenschaften besitzen.

3.4.1: Harmonische Verzerrungen

Hauptsächliches Auftreten und dauerhaftes Überwiegen der 2. Harmonischen. Siehe dazu folgendes Bild.



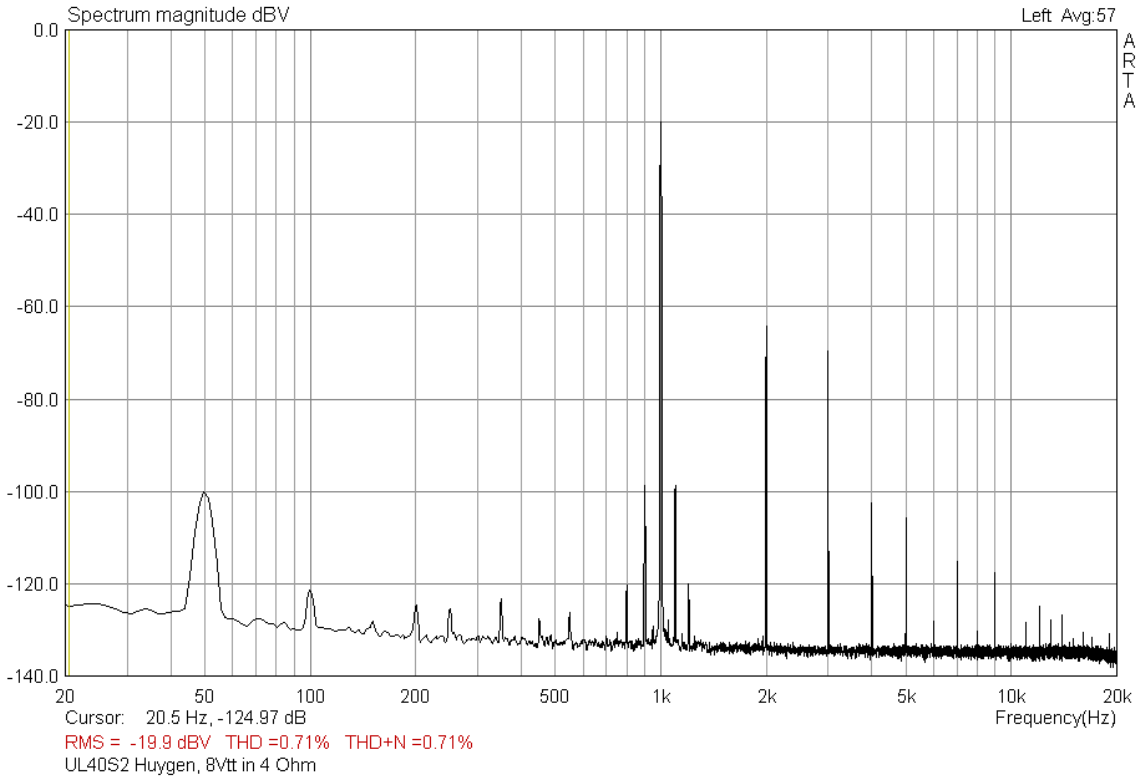
Beim SE-Verstärker dominiert die 2. Harmonische.

3.4.2: Konstante Belastung des Netzteils

Wird eine Eintaktverstärker nicht übersteuert, dann schwankt mit dem Signal der Anodenstrom zwischen I_0 und $2 \cdot I_0$ und I_0 und 0mA. Der Mittelwert ergibt I_0, der dem Netzteil entnommene Strom bleibt demnach konstant.

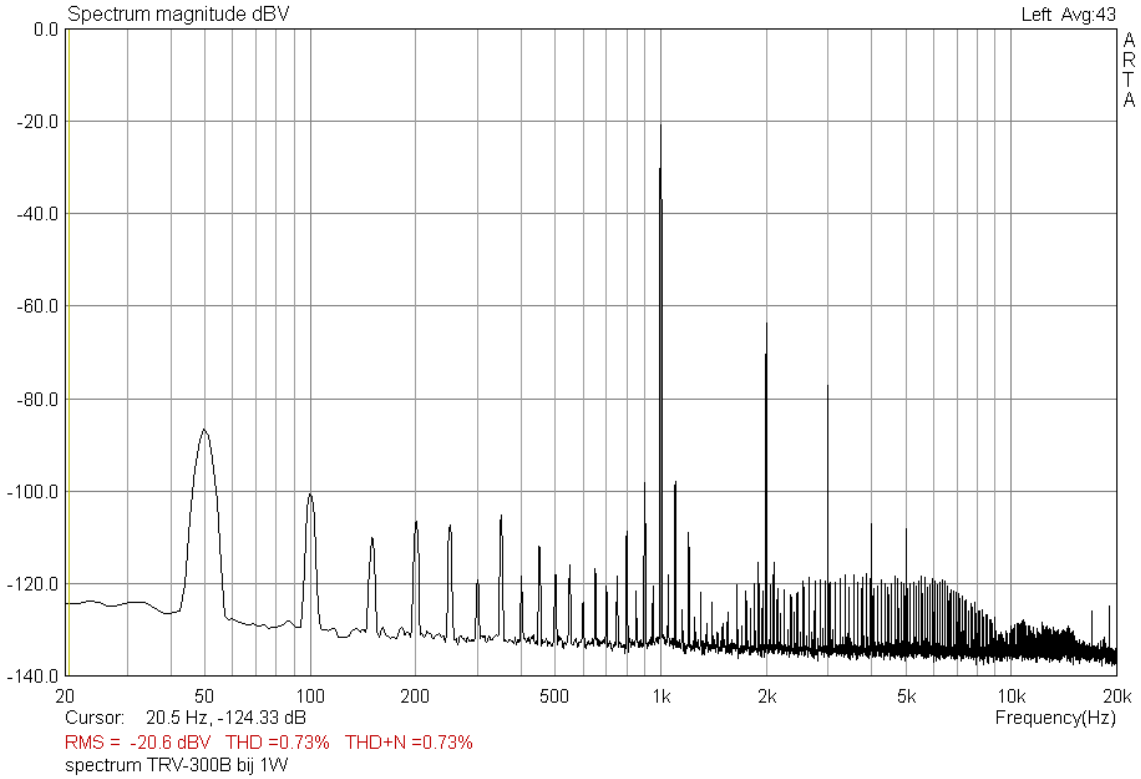
3.4.3: Brummspannungs-Empfindlichkeit

Bei Eintaktendstufen finden wir meistens Siebdrosseln im Netzteil, die für Gleichspannung einen sehr niedrigen Widerstand, für Wechselspannungen demgegenüber eine große Impedanz ($2\pi \cdot f \cdot L_{Drossel}$) aufweisen. Wegen dieser hohen Impedanz werden 50Hz und höhere harmonische Komponenten der Netzwechselspannung wirksam unterdrückt. Dazu liegt mir keine spezielle Grafik vor, aber ich zeige unten das Ergebnis eines modifizierten UL40-S2-Verstärkers, bei dem versuchsweise eine Drosselspule in den Versorgungsspannungsteil eingefügt wurde. Deutlich sichtbar sind die höheren Harmonischen der Netzspannung.



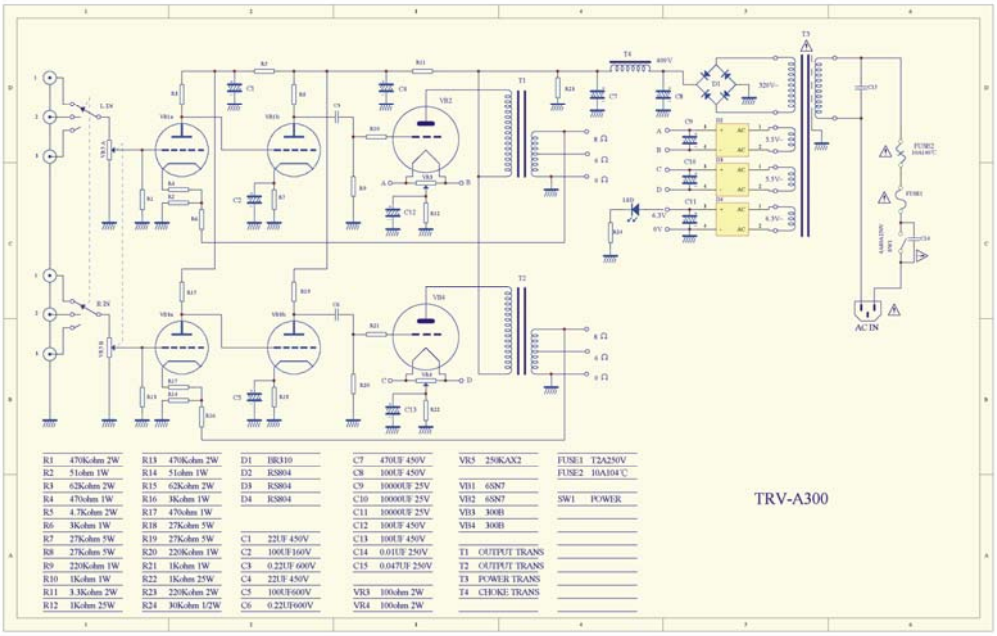
Durch eine Siebdrossel werden die höheren Harmonischen der Netzwechselspannung ausgefiltert.

Das folgende Bild zeigt einen echten 300B SE-Verstärker mit Drosselspule im Netzteil, und dennoch treten höhere Harmonische der Netzspannung in Erscheinung. Woher kommen die?



Auftreten von Oberwellen aus dem Netz trotz Siebdrossel.

In diesem Fall stammen die Oberwellen aus dem Heizdraht der 300B-Endröhre, die mit 5V Gleichspannung versorgt wurde. Das Beispiel zeigt, dass ein besserer Weg darin besteht, die Heizung aus einer Konstantstromquelle zu versorgen (Näheres siehe dazu www.tentlabs.com).

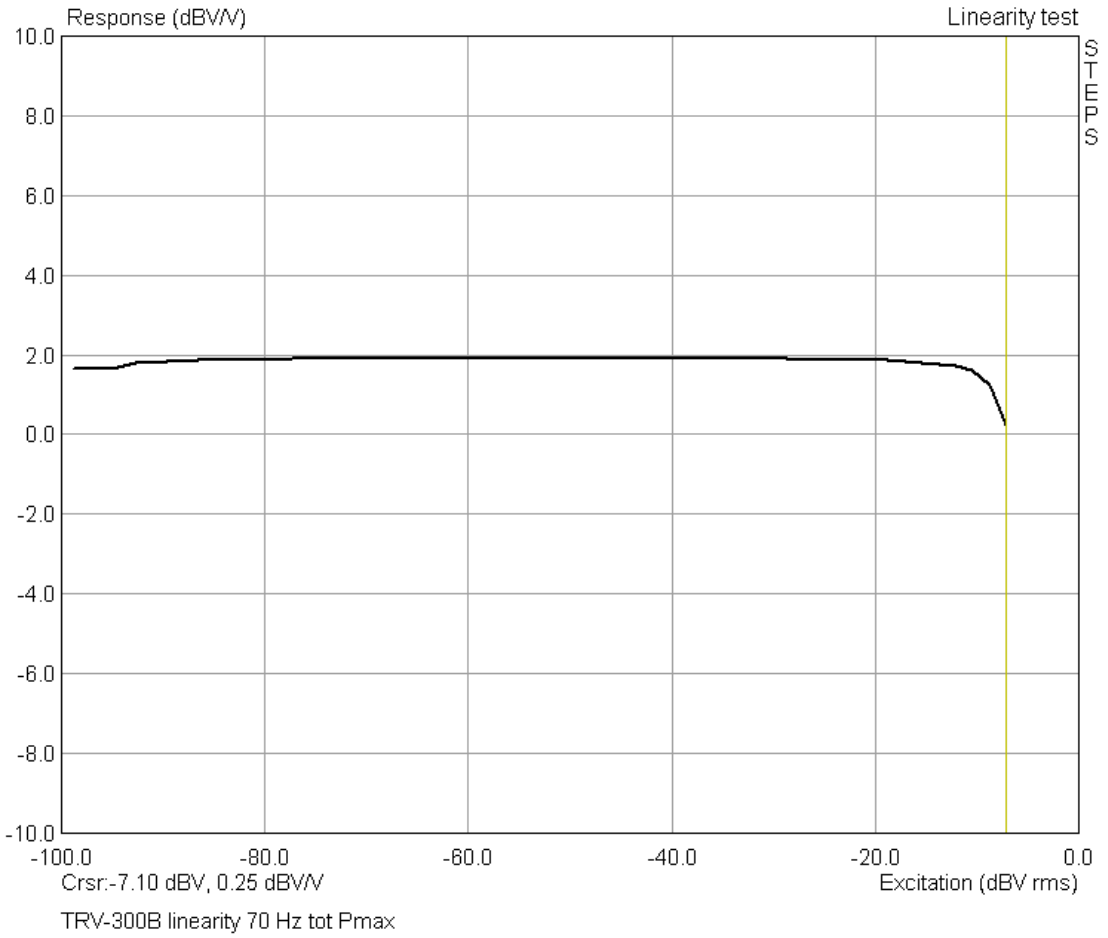


Beispiel für eine 300B SE-Endstufe. Die Heizung wird hier mit gleichgerichteter Spannung versorgt, der jedoch noch höhere Harmonische der Netzfrequenz überlagert sind.

Wer sich für die Dimensionierung von CLC-Spannungsversorgungen genauer interessiert, den verweise ich auf die Internetseite von Ben Duncan, dort befinden sich auch einige sehr nützliche Programme, die man herunterladen kann. Ich selbst habe in meinen Untersuchungen die Vorzüge von die Siebdrossel ersetzenden elektronischen Schaltungen erkannt. Nachteilig bei Drosseln ist nämlich deren Luftspalt, durch den recht störende magnetische Leckfelder verursacht werden, die dann an anderen Stellen der Schaltung neue Probleme verursacht.

3.4.4: Wiedergabe von Mikrodetails

Endröhren in SE-Konfiguration sind meist recht niederohmig und deshalb gut geeignet, einen Ausgangsübertrager anzusteuern. Diese besitzen einen Luftspalt, der die Beweglichkeit der Elementarmagnete innerhalb der sogenannten Weiss'schen Bezirke günstig beeinflusst. Das heißt nichts anderes, als dass die Primärinduktion des Übertragers unabhängig von der Signalstärke weitgehend konstant bleibt. Die im Folgenden gezeigte Messung erhellt den beschriebenen Sachverhalt (und lässt auch die abnehmende Verstärkung kurz vor dem Übersteuerungseinsatz der Endröhren erkennen). Beachten Sie, dass ich diese Linearitätsmessung bei einer Frequenz von 70Hz durchgeführt habe, eine ideale Frequenz, die sich in dem Gebiet befindet, in dem abweichende Detailwiedergabe auftreten kann.



Hervorragende Mikrolinearität eine SE-Verstärkers durch den Luftspalt im Ausgangsübertrager. Beachten Sie die Begrenzung kurz vor der Übersteuerung.

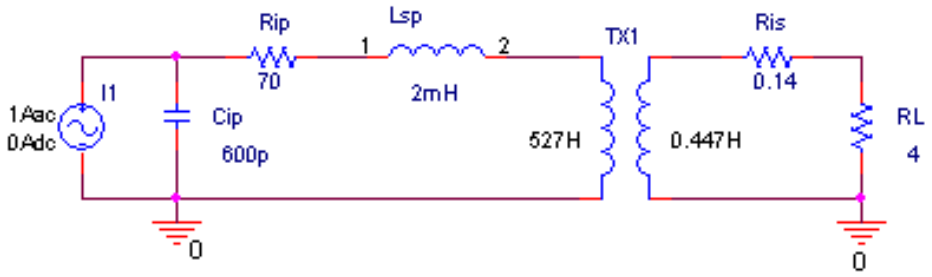
3.5: Spannungs- oder Stromsteuerung?

Die Endröhren müssen ihre Energie an den Ausgangsübertrager liefern. Sie können als Spannungs- oder Stromquellen oder in einen Zustand zwischen diesen beiden Extremen eingestellt werden. Die gewählte Betriebsweise hat deutliche Auswirkungen auf den Übertragungsbereich, den Klirrfaktor, die Wiedergabe von Mikrodetails und den Dämpfungsfaktor. Darauf wollen wir im Folgenden eingehen.

3.5.1: Spannungssteuerung

Soll die Röhre als Spannungsquelle arbeiten, muss ihr Innenwiderstand so gering wie möglich sein. Dies lässt sich erreichen mit: a) einer Triode oder einer als Triode geschalteten Pentode; b) lokaler Gegenkopplung über die Katode durch Anschluss an eine Zusatzwicklung am Ausgangsübertrager; c) lokaler Gegenkopplung von der Anode zum Steuergitter (ST-Schaltung). In allen Fällen wird durch diese Maßnahmen der Innenwiderstand der Endröhre deutlich vermindert.

Eine (oder zwei) Endröhre(n) „sehen“ anodenseitig die Primärwicklung des Ausgangsübertragers. Dieser besitzt nicht nur eine primäre Selbstinduktion und einen ohmschen Kupfer-Widerstand (R_{ip}, R_{is}), sondern auch zwei weitere frequenzbestimmende Elemente: Die primäre Wicklungs-Kapazität C_{ip} und das primäre Streufeld L_{sp}. Nachfolgend sehen Sie das Ersatzschaltbild meines Ringkernübertragers VDV-6040.



Ersatzschaltbild des Ringkernübertragers VDV-6040.

Wenn der Innenwiderstand der Endröhren gering ist, ist der Einfluss von C_{ip} zu vernachlässigen, die parasitäre Kapazität wird gewissermaßen kurzgeschlossen. Dagegen ist der Einfluss der Streuinduktivität L_{sp} dominant. Gemeinsam mit dem Innenwiderstand bildet L_{sp} ein Tiefpassfilter 1. Ordnung, das selbst bei Gegenkopplung stabil bleibt (Herangehensweise von Vanderveen). Wegen des niedrigen Innenwiderstandes stellt sich ein hoher Dämpfungsfaktor ein, der sich ausgesprochen günstig auf die Übertragung von Mikrodetails auswirkt.

3.5.2: Stromsteuerung

Werden die Endröhren als Pentoden oder mit nicht kapazitiv überbrückten Katodenwiderständen betrieben, steigt der Innenwiderstand der Röhren deutlich an. Sie verhalten sich dann wie Stromquellen mit (theoretisch) annähernd unendlich hohem Innenwiderstand. Dann reagieren die Röhren hauptsächlich auf das C_{ip} des Übertragers und bilden mit diesem ein Filter 1. Ordnung, das unter der Voraussetzung korrekter Einstellung auch bei starker Gegenkopplung stabil bleibt (nach Putzeys). Unter diesen Voraussetzungen ist der Dämpfungsfaktor gering, die Wiedergabe von Mikrodetails nicht optimal. Um das zu verbessern, ist zusätzlich eine Über-alles-Gegenkopplung vorzusehen.

3.5.3: Kombination von Strom- und Spannungssteuerung

In Wirklichkeit treten die beiden oben geschilderten idealisierten Extremfälle so nicht auf, die Innenwiderstände der Endröhren besitzen natürlich endliche Werte, d.h., man wird bei der tatsächlichen Schaltung von einer Kombination von Strom- und Spannungssteuerung sprechen müssen, bei die eine oder die andere überwiegt. Von dieser Vorstellung ausgehend, werden die Röhren sowohl mit C_{ip} als auch mit L_{sp} ein Tiefpassfilter 2. Ordnung bilden. Bei Gegenkopplung tritt dann allerdings ein schwerwiegendes Problem auf: Bei einer bestimmten Frequenzen beträgt die Phasenverschiebung genau 180° und die Gegenkopplung wird zur Mitkopplung. Dann beginnt der Verstärker auf dieser Frequenz zu schwingen, er wird zum Oszillator. Bereits weiter oben wurde darauf hingewiesen, dass durch Hinzufügung eines gesonderten Filters 1. Ordnung (das für eine niedrigere Einsatzfrequenz dimensioniert sein muss) diese Gefahr verhindert werden kann, um die notwendigen Stabilitätskriterien zu erfüllen. Dann bewegen wir uns hinsichtlich des Dämpfungsfaktors allemal noch in akzeptablen Bereichen, auch die Wiedergabe von Mikrodetails wird nicht wesentlich behindert.

3.5.4: Empfehlungen

Auf die oben in der gebotenen Kürze geschilderten Wirkungen von Strom- bzw. Spannungssteuerung wird selten hingewiesen. Dank der hervorragenden Untersuchung von Bart van der Laan, der im Rahmen seines Studiums diese Problematik genauer analysiert hat, sind die tieferen Zusammenhänge der unterschiedlichen Herangehensweisen deutlich geworden. Weil sich der Entwickler zwischen überwiegender Strom- oder

Spannungssteuerung entscheiden kann, möchte ich Ihnen eine kurze Übersicht über einige schaltungstechnische Möglichkeiten nicht vorenthalten.

3.6: Alternative Schaltungskonzepte

Um alles in der erforderlichen Tiefe zu besprechen, bleibt leider zu wenig Zeit, aber das Internet bietet dazu reichlich Material. Man denke an PPP (parallel push pull), Brückenschaltungen, Circlotron und Joe Rasmussens Vorschlag zu Stromquellen-Versorgungen anstelle von Spannungsversorgungen usw. Glücklicherweise decken die meisten Entwickler ihre eigenen Erfindungen ausreichend auf, um selbständig damit weiterarbeiten zu können.

Kapitel 4
Überlegungen zu den einzelnen Schaltungsbestandteilen eines Verstärkers

In dem vorliegenden Teil wollen wir mit ein wenig Abstand auf die Konsequenzen schauen, die in den vorherigen Kapitel bezüglich der zu treffenden Entscheidungen formuliert wurden. Welche Vorgaben müssen die einzelnen Baugruppen der Schaltung erfüllen? Wie dieses und jenes im Detail umgesetzt werden kann, wird im folgenden Abschnitt untersucht werden. Zunächst werden einleitend die Forderungen und Konsequenzen besprochen.

4.1 Spannungsversorgung

Welche Forderungen gelten für den Netztrafo, welche für Versorgungsspannungen und die Unterdrückung der ihnen überlagerten Brummspannungen, was gibt es bei hochfrequenten Störspannungen und eindringenden Störfeldern zu beachten ...?

4.1.1 SE-Netzteile

a) Ein Eintaktverstärker arbeitet in Klasse A, der dem Netzteil entnommene Strom bleibt konstant, weshalb auch die Belastung des Netztrafos konstant bleibt. Dann ist der innere Widerstand des Trafos nur von nachrangiger Bedeutung, da sich die an diesem internen Widerstand abfallende Spannung während des Betriebes nicht ändert. Allerhöchstens dem Kupferwiderstand der Wicklung und der damit zusammenhängenden Wärmeentwicklung sollte man sicherheitshalber einige Aufmerksamkeit schenken.

b) Nach Gleichrichtung ist die Anoden-Betriebsspannung von Brummspannungsresten überlagert (Rimpelspannungen). Da ein SE-Verstärker unsymmetrisch arbeitet, werden die Brummanteile im Ausgangsübertrager nicht kompensiert und erscheinen als hörbarer Brumm im Lautsprecher. Mithilfe einer Siebdrossel lassen sich dieser Störspannungen wirkungsvoll unterdrücken. Auch eine elektronische Simulation der Drossel funktioniert hervorragend (siehe folgenden Abschnitt). Da, wie gesagt, dem Netzteil ein konstanter Strom entnommen wird, sind zusätzliche Stabilisierungsmaßnahmen überflüssig. Einzig die Brummfreiheit ist von herausragender Bedeutung.

c) HF-Störsignale aus dem Netz müssen abgeblockt werden, weil sie sich nachteilig auf die Mikrowiedergabe auswirken. Dazu dient eine geerdete Abschirmung. Gleichrichterröhren besitzen eine geringe Kapazität zwischen Anode und Katode, die HF-Signale meist ausreichend unterdrückt. Dies kann annähernd durch Hinzufügung eines zusätzlichen Serienwiderstandes bei Halbleiterdioden simuliert werden.

d) Bei einer Versorgung von SE-Endstufen müssen bisweilen mehrere Heizwicklungen vorgesehen werden für die indirekte Heizung der Vorröhren (6,3V) und für direkt geheizte Endröhren (beispielsweise 5V für eine 300B). Immer häufiger geht man dazu über, die Spannungen für die Vorröhren gleichzurichten und zu stabilisieren, oder eine Kombination von Konstantspannungs- und Stromquelle vorzusehen. Die Konstantstromquelle ist erforderlich, um die bei direkter Heizung auf dem Heizfaden liegenden Audiosignale hochohmig mit dem Netztrafo, der die Quelle von Verunreinigungen darstellt, zu verkoppeln. Bemerkenswert sind in diesem Zusammenhang die Heizungsmodule von Tentlabs (www.tantlabs.com).

e) Die Ruhestromeinstellung der Endröhren kann über einen kapazitiv entkoppelten Katodenwiderstand erfolgen. Desgleichen kann aber auch dem Steuergitter eine feste negative Vorspannung zugeführt werden, für die eine zusätzliche Wicklung auf dem Netztrafo

erforderlich ist. Außerdem existiert noch die Möglichkeit, die Bias-Spannung bei Röhrengleichrichtung aus der Hochspannung zu gewinnen.

4.1.2 Netzteile für Push-Pull-Endstufen

a) Der vom Netzteil zu liefernde Strom ist bei Gegentaktverstärkern nicht konstant, in Klasse-A-Betrieb zwar noch innerhalb eines gewissen Rahmens, bei Klasse-B aber steigt der Strom mit zunehmender Aussteuerung schnell an. Wenn jetzt der Innenwiderstand von Netztrafo und Gleichrichter hinreichend groß ist, dann bricht bei steigender Ausgangsleistung die Spannung mehr oder weniger zusammen. Bei Gitarrenverstärkern ist diese Erscheinung häufig ein durchaus gewünschter Effekt, bei High-End sollte dieser Mangel allerdings vermieden werden. Dennoch kann es sein, dass ein Netztrafo mit merklichem Innenwiderstand in High-End-Geräten zufriedenstellend funktioniert, weil dort bloß kurzzeitige Ausgangs-Spitzenleistungen verlangt werden.

b) Bei Gegentaktverstärkern werden Brummanteile auf der Versorgungsspannung im Ausgangsübertrager unterdrückt. Sie erscheinen phasengleich auf den beiden Anodenanschlüssen und verursachen deshalb keine Differenzspannung über der Primärwicklung. Voraussetzung allerdings ist, dass beide Endröhren exakt identische Innenwiderstände aufweisen, was nicht immer zu garantieren ist. Um auch bei unterschiedlichen Innenwiderständen der Röhren eine ausreichende Brummkompensation zu erzielen, werden in guten Gegentaktendstufen in jedem Falle Drosselspulen oder eine elektronische Simulierung (Gyratorschaltungen) derselben vorgesehen. Meine eigenen Untersuchungen haben gezeigt, dass mit einer Drosselspule Störspannungen in Folge von Harmonischen aus dem Netz drastisch zurückgehen, wodurch die Mikrowiedergabe des Verstärkers deutlich verbessert wird.

c) Hochfrequente Störsignale wirken sich bei Gegentaktstufen in der gleichen störenden Weise wie bei SE-Endstufen aus, alles was bereits dort gesagt wurde, gilt ebenso auch hier.

d) Gesonderte Wicklungen für Heizung und negative Vorspannung sind erforderlich, wobei man bei Gegentaktstufen meist mit indirekt geheizten Röhren arbeitet. Allenfalls bei den empfindlichsten Verstärkerstufen sollte Heizspannungsgleichrichtung erwogen werden.

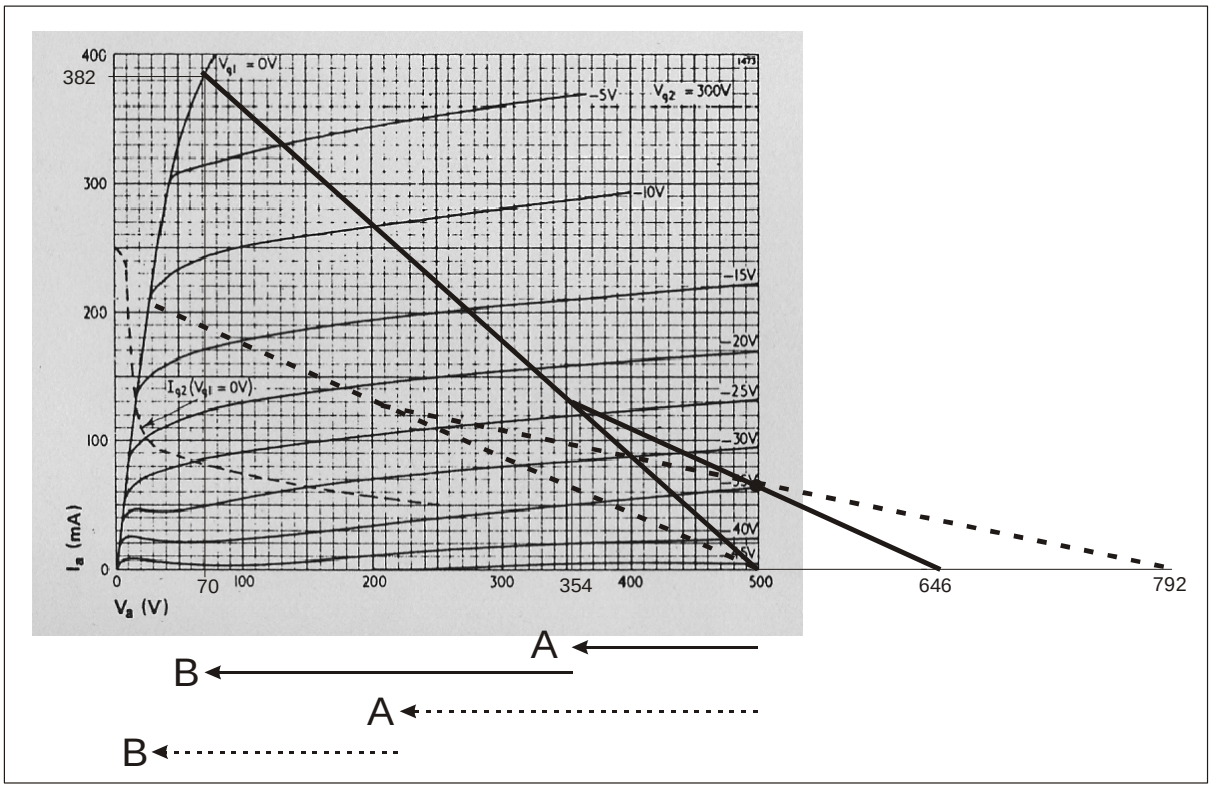
4.2 Endstufen

In meinen beiden Büchern (1,2) werden Endstufen in aller Ausführlichkeit behandelt, ich möchte das hier nicht alles wiederholen. Sinnvoll ist es, bei den Einstellungen der Röhren von deren Datenunterlagen auszugehen, weil man dann direkt einschätzen kann, wieviel Ausgangsleistung erreicht werden wird und welcher Klirrfaktor bei Maximalaussteuerung zu erwarten ist. Dann kann man festlegen, ob zusätzliche Gegenkopplung nötig ist, um die Verzerrungen zu verringern, oder ob die Vorgaben auf andere Weise erreicht werden können (andere Arbeitspunkt-Einstellung). Dabei geht meistens Leistung verloren, aber das ist nicht so unbedingt entscheidend.

1) Moderne High-End-Röhrenverstärker; E-book; Elektor
2) High-End-Röhrenverstärker; ISBN 987-3-89576-182-9; Elektor.

In diesem Zusammenhang möchte ich auf die folgenden Punkte hinweisen, die oft nicht bekannt sind. Meistens wünscht man wegen der Klangreinheit einen möglichst großen Klasse-A-Bereich. Das kann man durch Erhöhung des Ruhestromes leicht erreichen, nachteilig ist, dass die Lebensdauer der Endröhren dadurch stark eingeschränkt wird. Die zweite, wenig bekannte Methode ist: Erhöhe Z_{aa} (bei Gegentakt) oder Z_a (bei SE), dann arbeitet der Verstärker auch bei höherer Aussteuerung länger im A-Betrieb. Beispiel: Angenommen, man

verfügt über einen Ausgangsübertrager mit 4-, 8- und 16Ω-Sekundäranschlüssen. Weiter angenommen, es soll ein Lautsprecher mit 8Ω Impedanz betrieben werden. Wenn man diesen an die 4Ω-Wicklung anschließt, dann wird Z_{aa} um den Faktor 2 größer, die Lastgerade wird horizontaler verlaufen und der Verstärker arbeitet länger im A-Betrieb. Dazu einige Erläuterungen zur B.J. Thomson-Konstruktion.

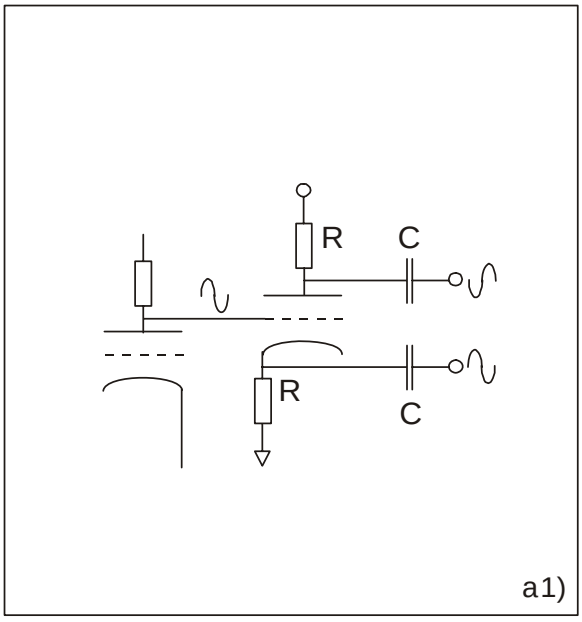


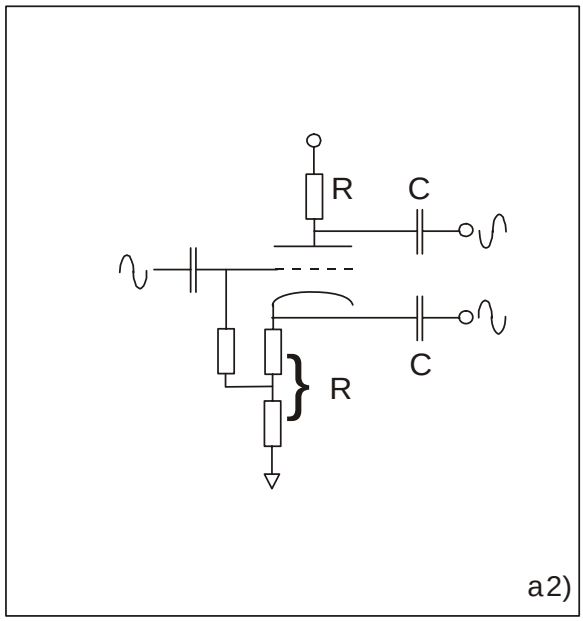
B.J. Thomson-Konstruktion eines 6550-Gegentaktverstärkers. Wenn Z_{aa} verdoppelt wird, dann arbeitet der Verstärker von 208 bis 792V in Klasse-A.

4.3 Phasenumkehr

Im folgenden Abschnitt möchte ich verschiedene Phasenumkehrschaltungen vorstellen und auf ihre jeweiligen Vor- und Nachteile eingehen. Die Aspekte können natürlich nicht erschöpfend behandelt werden, für eine generelle Übersicht reichen sie aber aus.

4.3.1 Split Load

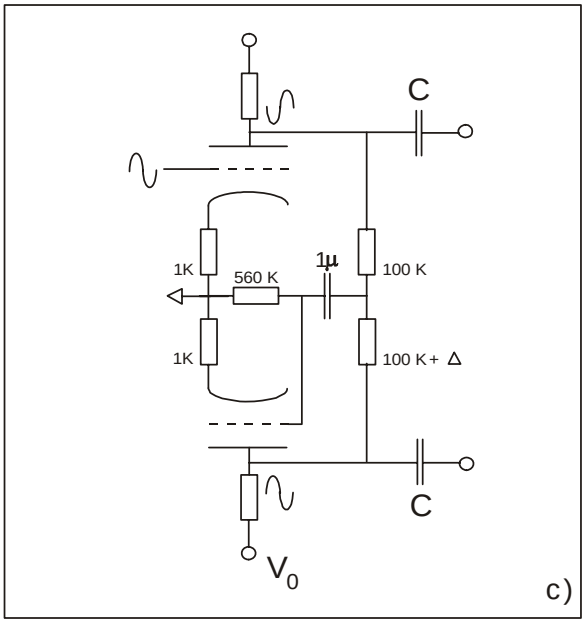


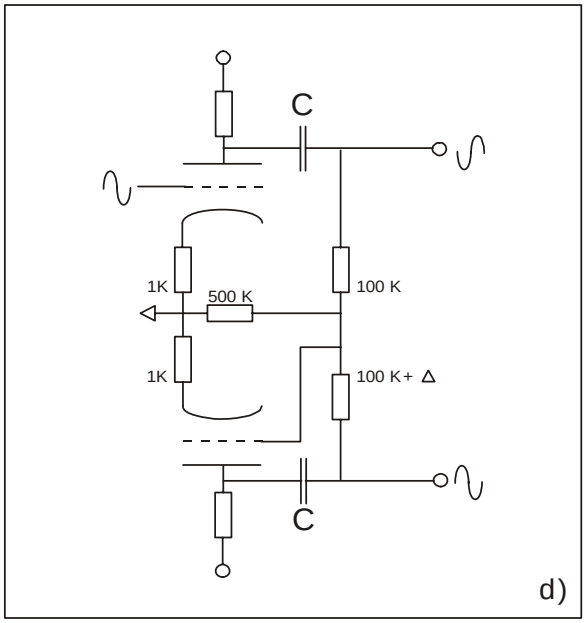


Die Schaltung des Concertina-Splitters

Diese äußerst einfache Variante von Phasenumkehrstufen ist unter verschiedenen Bezeichnungen bekannt: Split-Load, Katodyn-Schaltung, Concertina-Splitter. Der Aussteuerungsbereich ist beschränkt, diese Schaltung ist für Endstufen mit geringer oder allenfalls mittlerer Ausgangsleistung geeignet (z.B. EL84 oder 6V6). Da die Ausgangsimpedanzen an Anode und Katode unterschiedlich sind, können aufgrund der Millerkapazität der folgenden Stufe im hochfrequenten Signalbereich Unsymmetrien bei der Ausgangsspannung auftreten. Außerdem ist die Schaltung hinsichtlich überlagerter Brummanteile auf der Anodenspannung sehr empfindlich.

4.*3.2 Phase-Inverter-Splitter*

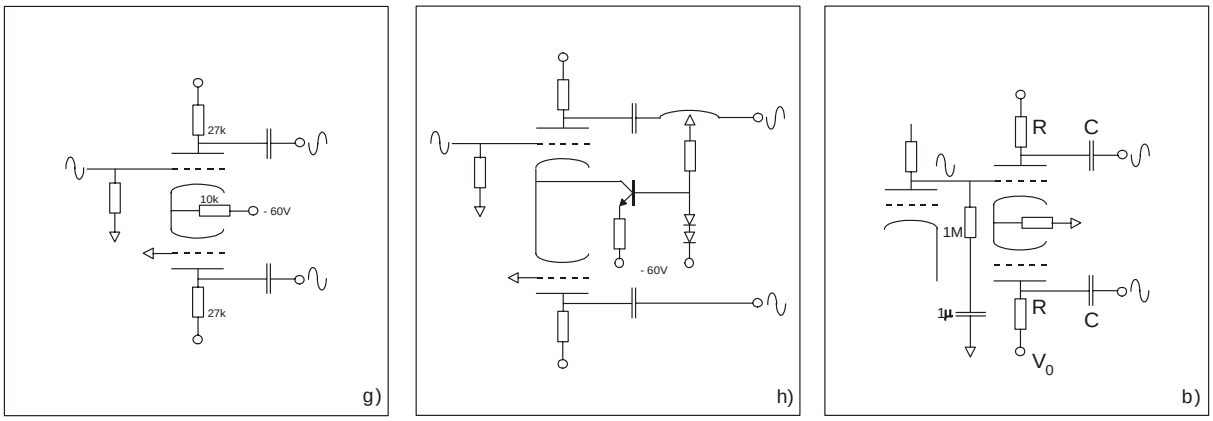




Der Phase-Inverter-Splitter.

Der Aussteuerungsbereich ist groß, die Ausgangsimpedanz an der oberen Anode ist höher als die an der unteren. Zur Korrektur dieser Differenz kann der untere Katodenwiderstand kapazitiv überbrückt werden. Auch diese Schaltung erweist sich als brummempfindlich.

4.3.3 Long Tailed Pair; Differenzverstärkerprinzip

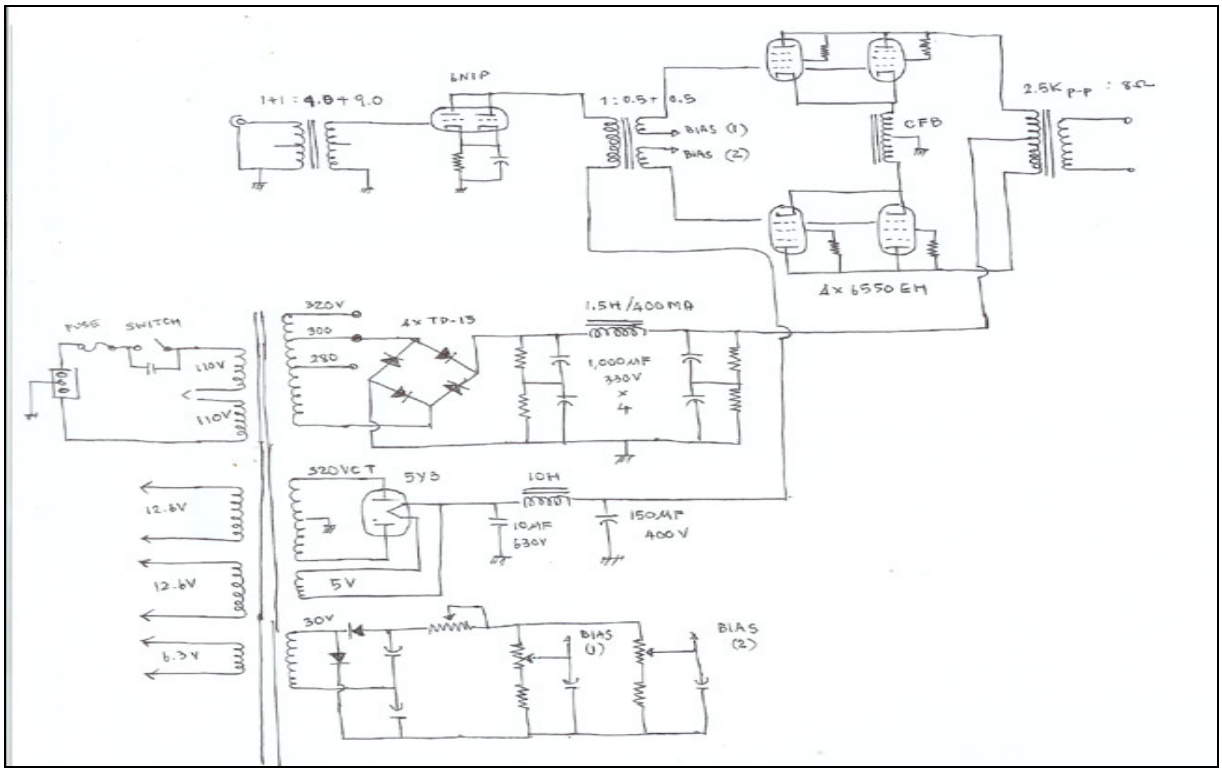


Long Tailed Pair-Phasendreher.

Dieser Phasendrehertyp, eine Kombination aus Katodenbasis- und Gitterbasisschaltung, besitzt einen großen Aussteuerungsbereich, reagiert unempfindlich auf Brummspannungsreste auf der Versorgungsspannung und die Ausgangsimpedanzen an den beiden Ausgängen sind gleich groß.

4.3.4 Phasenumkehr mit Zwischenübertrager

Man kann auch mit einem Übertrager, der zwei gleiche Sekundärwicklungen besitzt, die Gitter der beiden Endröhren ansteuern. An den äußeren Wicklungsenden tritt das Signal je nach Polung in Gegenphase auf. Bei getrennten Wicklungen ist der Bias (Ruhestrom) jeder Röhre separat einstellbar. Wenn ein Luftspalt vorgesehen ist, kann die Primärwicklung durch eine einzelne Röhre angesteuert werden. Vorteilhaft bei dieser Variante sind die fehlenden Koppelkondensatoren, allerdings stellt die Frequenzabhängigkeit eines solchen Zwischenübertragers auch einen entscheidenden Mangel dar. Außerdem können im Kern klangliche Mikrodetails verloren gehen. Das unten abgedruckte Schaltbild zeigt ein Beispiel dieser Lösung.

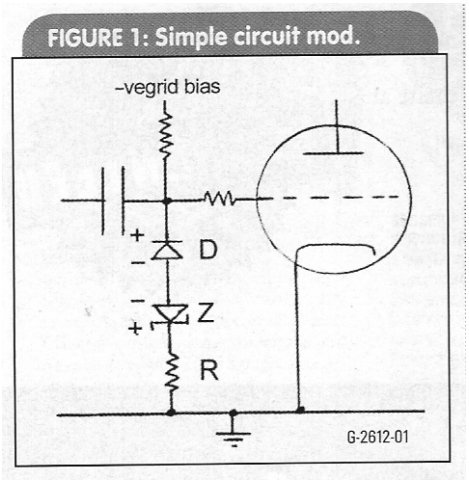


Beispiel für Phasenumkehr über einen Zwischenübertrager.

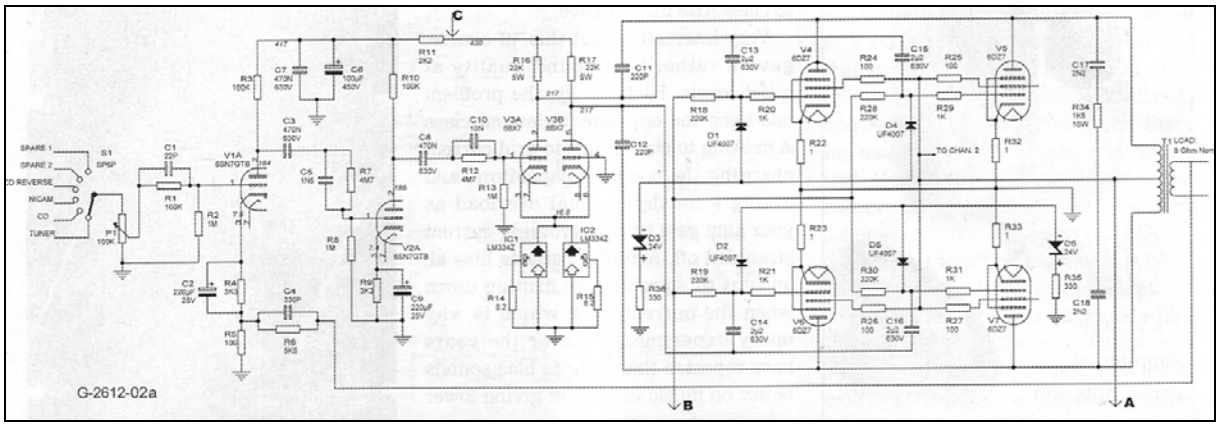
4.4 Steuerstufen

In den meisten Fällen werden die Endröhren über Kondensatoren an den Phasendreher gekoppelt. Wenn die Endröhren bei positiver Ansteuerung in den Sättigungsbereich, in die Übersteuerung gelangen, dann kann Gitterstrom auftreten, wodurch an den Koppelkondensatoren eine zusätzliche Spannung entsteht und die Endröhren dadurch eine Verschiebung des Arbeitspunktes erfahren. Sie sperren dann früher und gehen in den Klasse-B-Betrieb über. Dies zeigt sich bei lang anhaltender Übersteuerung als eine Art Cross-Over-Verzerrung (Übernahmeverzerrung) bei den Nulldurchgängen des Eingangssignals. Im High-End-Bereich wird diese Situation nur selten auftreten, allenfalls kurzzeitig bei Anwesenheit von Signalspitzen. Es muss deshalb dafür gesorgt werden, dass die Steuerstufe nicht in die Begrenzung gerät. Aus diesem Grund muss die Steuerstufe so ausgelegt werden, dass sie in der Lage ist, die doppelte Spannung zu liefern, als für Vollaussteuerung erforderlich ist. Die zusätzlichen 6dB Headroom garantieren, dass die Steuerstufe nicht festläuft, sondern allenfalls die Endröhren in die Sättigung geraten.

Eine Lösung für dieses Problem wurde von Jim Carlyle entwickelt, die er im Februar 2006 in AudioXpress unter dem Titel „Clamped Bias, AB2, RG Coupled Amp“ veröffentlichte. Das folgende Schaltbild zeigt seine Herangehensweise, die er wie folgt beschreibt: „ In fast allen Gegentaktverstärkern verursacht die negative Signalamplitude keine störenden Auswirkungen, da die Röhre dadurch gesperrt wird. Verbinde das Steuergitter über eine passende Zenerdiode mit Masse, dann können die Elektronen, die während der positiven Signalflanke auf das Steuergitter gelangt sind und im Koppelkondensator sitzen, während der negativen Flanke der Signalperiode über die Zenerdiode und den Widerstand nach Masse abfließen.“



Methode von Carlyle, das Abdriften des Arbeitspunktes bei Übersteuerung zu verhindern.



Anwendung dieses Vorschlages in seinem Verstärkerentwurf.

4.6 Vorverstärkung

Die Höhe der Vorverstärkung wird durch die erforderliche Eingangsempfindlichkeit und das Ausmaß der Gegenkopplung festgelegt. Vergleiche dazu meine früheren Hinweise.

Hinsichtlich der Bandbreite ist folgendes zu sagen: Die Steuerstufe sollte einen deutlich größeren Frequenzbereich verarbeiten können, als die Endstufe gemeinsam mit Ausgangsübertrager. Dann ist garantiert, dass allein der Übertrager das den Frequenzbereich bestimmende Schaltelement darstellt und dadurch Gegenkopplung nicht zu unerwünschten Instabilitäten führt.
Noch eine letzte Anmerkung zur Gegenkopplung: Meist wird das verstärkte Ausgangssignal abgeschwächt auf den Gitter-Katodenkreis der ersten Verstärkerröhre zurückgeführt. Da aber die Spannung zwischen diesen beiden Elektroden aufgrund der Veränderung des Eingangsignals nicht konstant ist, kann die Gegenkopplung nicht linear arbeiten. Wünscht man ein höheres Maß an Linearität bei der Gegenkopplung, sollte man die Gegenkopplung über zwei Widerstände in Erwägung ziehen, wobei der Verstärker dann invertierend arbeitet.

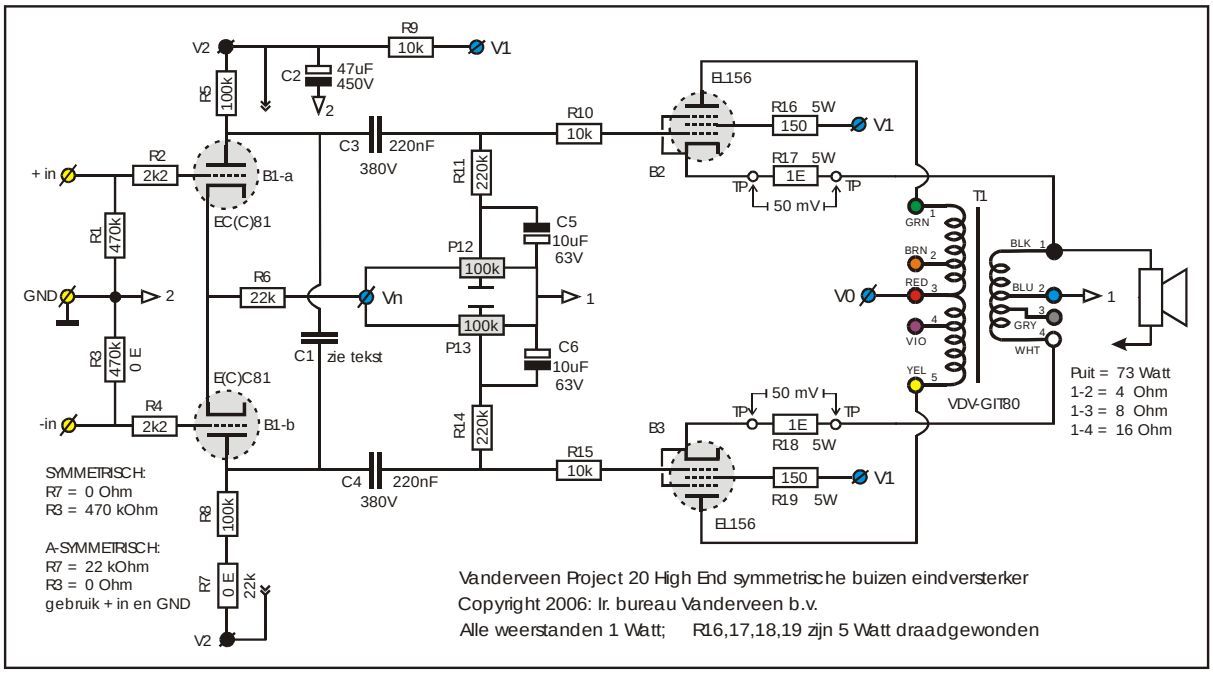
Kapitel 5
Verstärkerdetails

In diesem Kapitel werden wichtige Bestandteile von Verstärkerschaltungen besprochen, wobei ich im Wesentlichen auf meine eigenen Entwürfe zurückgreifen werde.

5.1 Gegentaktverstärker

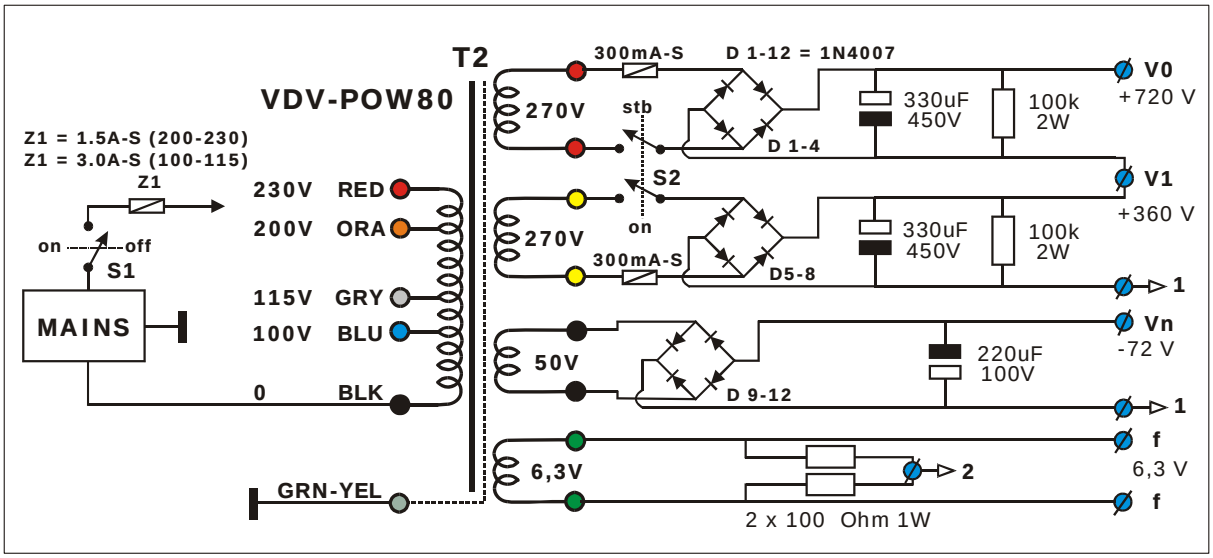
5.1.1 Der PR20HE

Einer meiner neuesten Entwürfe verfügt über eine Ausgangsleistung von ungefähr 70 Watt und einen Ausgangsübertrager, der universell für mehrere Impedanzen einsetzbar ist. Die auffälligsten Kennzeichen dieses Verstärkers sind seine hohe Versorgungsspannung von rund 720V, eine hohe Primärimpedanz (Z_{aa}=8kΩ) und eine lokale Gegenkopplung von der Sekundärseite des Ausgangsübertragers. Die sekundärseitigen Anzapfungen sind 0 – 4 – 8 und 16Ω. Dabei wird die 4Ω-Anzapfung an Masse, die 0- und 16Ω-Anschlüsse werden an die Katoden zurückgeführt. (Der 4-Ω-Anschluss bildet deshalb die „Mitte“, da die Wurzel aus 16 als Ergebnis 4 liefert, Impedanzen verhalten sich wie das Verhältnis der Windungszahlen zum Quadrat)



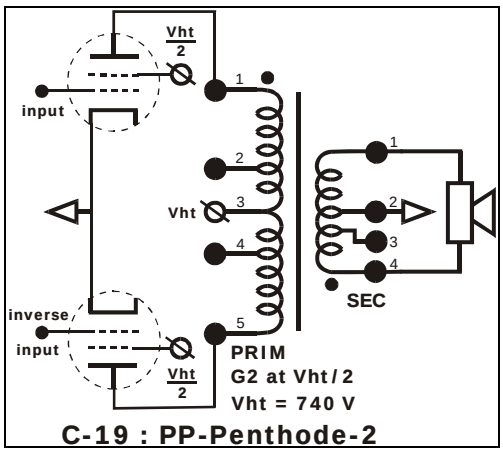
Audioteil des PR20HE-Endverstärkers

Dieser Verstärker ist aus einem Studienprojekt heraus entstanden, das im Kapitel 9 meines letzten Buches ausführlich besprochen wird. Darüber hinaus wurde dieser Entwurf in allen Einzelheiten im „Elektor Special Projekt Audio 1“ ab S. 16 vorgestellt. Weiterführende Informationen sind aber auch auf meiner Webseite *www.mennovanderveen.nl* zu finden. Im Übrigen ist der Verstärker ab sofort auch als Bausatz erhältlich.
Da bereits so viele Informationen verfügbar sind, möchte ich Ihnen diesen Entwurf auf eine etwas andere Art näherbringen, seine Genese aus dem Blickwinkel des Entwicklers darstellen.



Netzteil des PR20HE

Ausgangspunkt war ein älteres Datenblatt der EL34-Endröhre, die in einem Verstärker von Philips mit 800V Versorgungsspannung und einer Ausgangsleistung von 100W eingesetzt waren. Neben anderen hat auch die Firma Dynacord bei ihrem Eminent II von diesem Schaltungsvorschlag Gebrauch gemacht. Ich erinnere mich, dass ich als junger Mann in meiner damaligen Band von diesem Kraftpaket ungeheuer beeindruckt war. Für die Umsetzung meines Projektes waren alle wichtigen Bauelemente vorhanden, so dass eine Realisierung in enger Anlehnung an den Vorschlag von Philips möglich war. Bei der messtechnischen Überprüfung des ersten Prototyps (s. weiter unten Verstärker 19) fiel mir auf, dass die Linearität der Schaltung alles andere als zufriedenstellend sein konnte. Der Übergang von Klasse-A nach Klasse-B war bei den EL34 deutlich zu bemerken, und der einzige Weg, diesen Mangel zu beheben, lag in der Erhöhung des Ruhestromes auf einen nicht zulässigen Wert von 50mA (PA_{max} = 720V · 0,05A = 36W; damit liegen wir weit oberhalb der maximalen 25W Anodenverlustleistung, die für die EL34 vorgeschrieben ist).



Konzept des Verstärkers 19

Der Schritt, der folgen musste, war, leistungsfähigere Endröhren wie die EL156 oder die 6550 einzusetzen, die über eine maximale Verlustleistung von 40W verfügen. Tatsächlich war der

Übergang von Klasse-A nach Klasse-AB nun zwar merklich linearer, aber auf dem Oszilloskop im XY-Betrieb (Lissajoux-Figur) noch immer deutlich sicht- und auch hörbar. Andererseits hätte die Linearität über eine Gegenkopplung noch verbessert werden können, wobei allerdings die Ultra-Linear-Variante mit Gegenkopplung auf die Schirmgitter ausgeschlossen war, da diese dann mit 720V weit oberhalb der maximal zulässigen 500V überlastet worden wären. Da der Ausgangsübertrager sekundärseitig über eine Mittenanzapfung von 4Ω verfügt, bot sich eine Katodengegenkopplung als Lösung an. Diese Möglichkeit war mir von Audio Research her bekannt, und ich wusste, dass diese Option zu hervorragenden klanglichen Ergebnissen führt. Damit war das Konzept für diesen Verstärker geboren.
Die durchgeführten Messungen zeigten eine exzellente Linearität, so dass sich weitere Gegenkopplungsmaßnahmen erübrigten; die Grundkonzeption für diesen Gitarrenverstärker lag damit endgültig fest. Überrascht war ich von der Erkenntnis, dass dieser Verstärker ebenfalls alle Anforderungen eines High-End-Gerätes ohne Einschränkungen erfüllte: Er klang ausgesprochen dynamisch, detailreich, ein sehr ausgewogenes Klangbild war das zufriedenstellende Resultat.
Wenn man die Aufmerksamkeit auf den Leistungsteil des Verstärkers (Endröhren und Ausgangstrafo) richtet, wird auch erklärbar, warum das Gerät so überragend klingt.

Da ist zunächst die regelbare Einstellung des Bias (Ruhestrom) für eine feste negative Vorspannung der Steuergitter. Diese garantiert, dass der Arbeitspunkt der Endröhren auch unter dynamischen Bedingungen nicht driftet. Bei Vorspannungserzeugung über einen kapazitiv überbrückten Katodenwiderstand wird sich der Arbeitspunkt während der Aussteuerung verschieben, die Ausgangsleistung verringert sich und es treten Cross-Over-ähnliche Verzerrungen bei maximaler Ausgangsleistung auf.

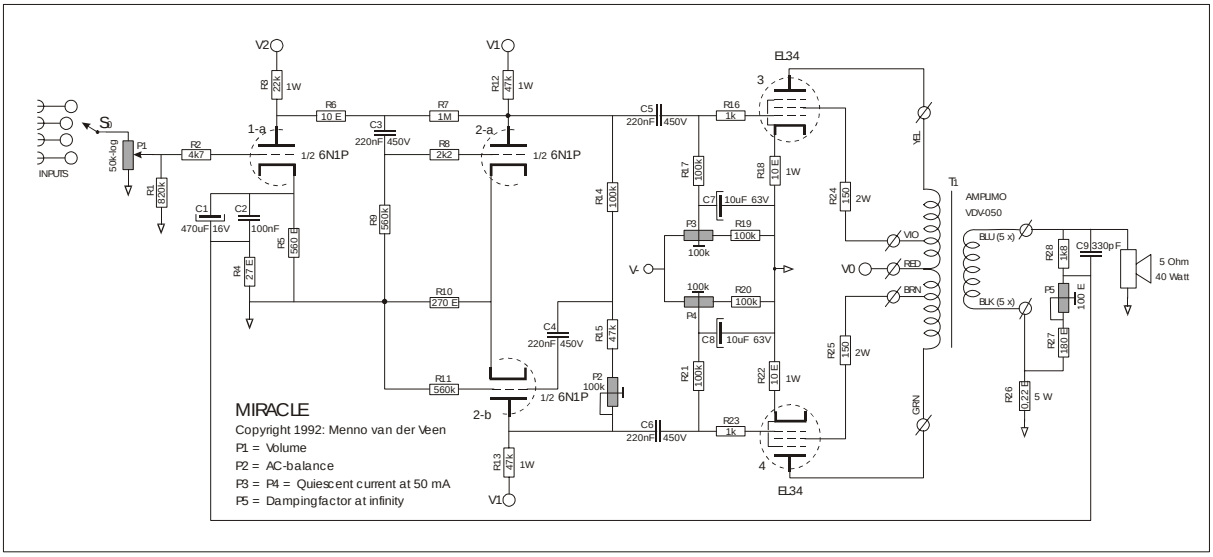
Zum zweiten wird bei Katodengegenkopplung der effektive Innenwiderstand der Endröhren abnehmen, der Ausgangsübertrager kann niederohmiger angesteuert werden, wodurch die Wiedergabe von klanglichen Mikrodetails nicht behindert wird.

Drittens wird durch die Katodengegenkopplung die Linearität der Endröhren deutlich gesteigert, was die geringen Verzerrungen dieses Verstärkers erklärt.

Nach heutigen Erkenntnissen kann dieser Verstärker durch den Einsatz der sogenannten Carlyle-Schaltung noch weiter verbessert werden (s. dazu das vorherige Kapitel). Für den High-End-Einsatz ist eine solche Optimierung nicht unbedingt notwendig, für die Verwendung als Gitarrenverstärker scheint mir das durchaus wünschenswert.

5.1.2 Der Miracle

Auch dieser Verstärker wird in meinem Buch ausführlich beschrieben (s. Kapitel 7). In der gleichen Weise wie oben möchte ich diesen Entwurf aus dem Blickwinkel des Entwicklungsprozesses vorstellen.



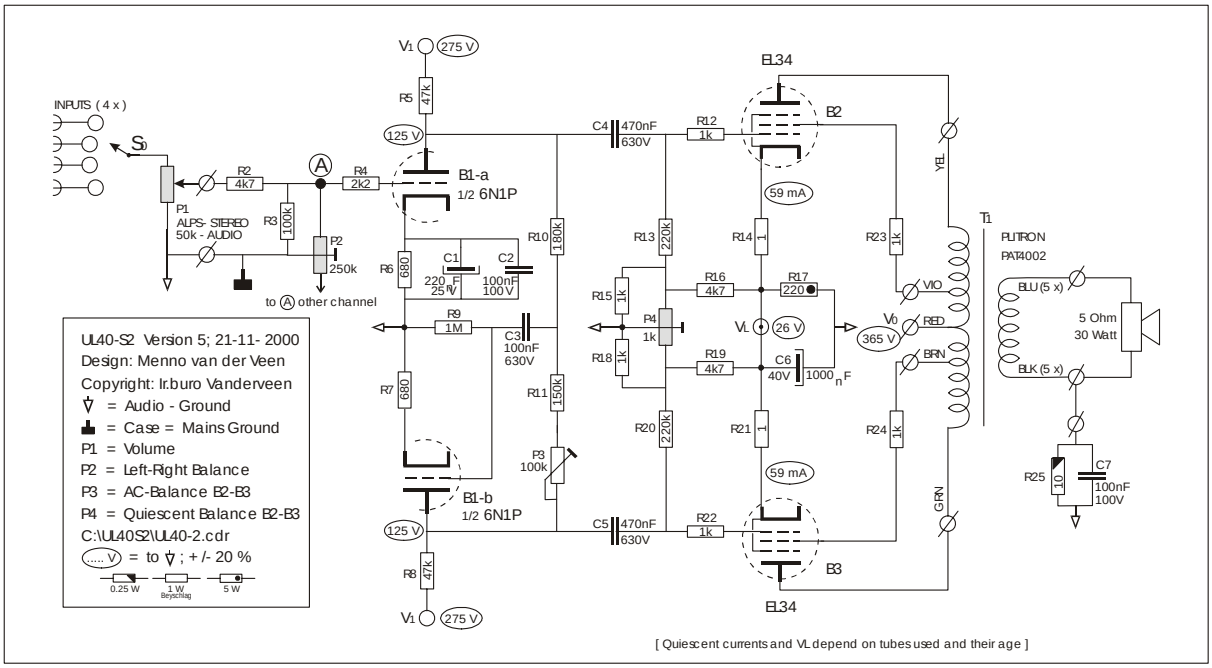
Le Miracle

Dieser Verstärker ist unter der Vorgabe dreier Hauptziele entstanden. An erster Stelle stand die Verwendung eines ausgesprochen breitbandigen Ringkernübertragers mit exakt bekanntem Frequenzabfall 2. Ordnung oberhalb von 150kHz. Zweitens sollte dieser Verstärker für meine Untersuchungen zu Übertragungsfunktionen von außergewöhnlichen Verstärkerstufen und in Verbindung mit einer Studie über Stabilitätsbedingungen im Zusammenhang mit Gegenkopplung verwendet werden. Das dritte Ziel war die Erreichung erstklassiger Messwerte bezüglich sehr geringer THD und IMD bei gleichzeitig unendlich hohem Dämpfungsfaktor. Die exakten theoretischen Zusammenhänge werden in meinem zweiten Buch in den Kapiteln 4, 5 und 7 ausführlich dargestellt. Insbesondere Kapitel 5.3 verdient hier Beachtung, in dem es insbesondere um die Erreichung eines hohen Dämpfungsfaktors geht, und wie sich ein solcher praktisch realisieren lässt

Aber blicken wir zunächst auf einige konzeptionelle Besonderheiten dieses Verstärkers. Wir finden keinerlei den Frequenzgang korrigierende, die interne Bandbreite bestimmende Schaltelemente, um die Gegenkopplung stabil zu halten. Wie ist das zu erklären? Beim Durchrechnen und während des Aufbaus bemerkte ich, dass eine Kombination von Spannungs- und Stromgegenkopplung exakt die Instabilitäten der reinen Spannungsgegenkopplung durch die gegenläufigen „Fehler“ der Stromgegenkopplung korrigiert, sie sich gegenseitig kompensieren. Ich weiß nicht, ob das allgemein bekannt ist, und deshalb weise ich an dieser Stelle auf die beschriebene Wirkung aufmerksam. Das einzig notwendige Korrekturglied besteht in $C_9 = 330pF$, dessen Wert durch C_{ip} und L_{sp} des Ausgangsübertragers und die Open-Loop-Verstärkung bestimmt wird, wobei übrigens die Übereinstimmung zwischen theoretisch ermitteltem und tatsächlichem Wert bemerkenswert gut ist.

5.1.3 Der UL40-S2

Das folgende Bild zeigt die Schaltung eines Verstärkers, den ich durch Amplimo als Bausatz produzieren lasse.



Der UL40-S2 in Basisausführung

Eine vollständige Beschreibung des Gerätes finden Sie in Kapitel 16 meines in der Zwischenzeit leider vergriffenen ersten Buches; es ist aber als E-Book auf Deutsch erhältlich. Aus diesem Grund beschränke ich meine Darstellung hier auf das Wesentliche, das diesen Verstärker auszeichnet.

Ziel war ein Bausatz, bei dem der von mir entwickelte Ringkernübertrager große Bedeutung zukommen sollte. Auf diesem Wege konnten Amplimo und ich bei vergleichsweise geringen Kosten den Röhrenliebhabern die unbestreitbaren Vorzüge von Ringkern-Ausgangsübertragern nahebringen. Eigentlich alles an diesem Verstärker ist auf größte Einfachheit hin konzipiert: Minimale Abgleicharbeiten, maximale Stabilität und einfacher und sicherer Aufbau garantieren die zuverlässige Funktion. Ich kann natürlich nicht wissen, wer meinen Bausatz kauft, das kann womöglich jemand sein, der nicht gewohnt ist, besonders sorgfältig zu arbeiten, und trotzdem ist es auch dann mein Ziel, dass der Verstärker zuverlässig funktioniert. Die Funktionsgarantie muss bei Selbstbauprojekten dieser Art 100%ig sein. Darin liegt der Grund, warum dieser Entwurf so einfach als irgend möglich gehalten wurde.

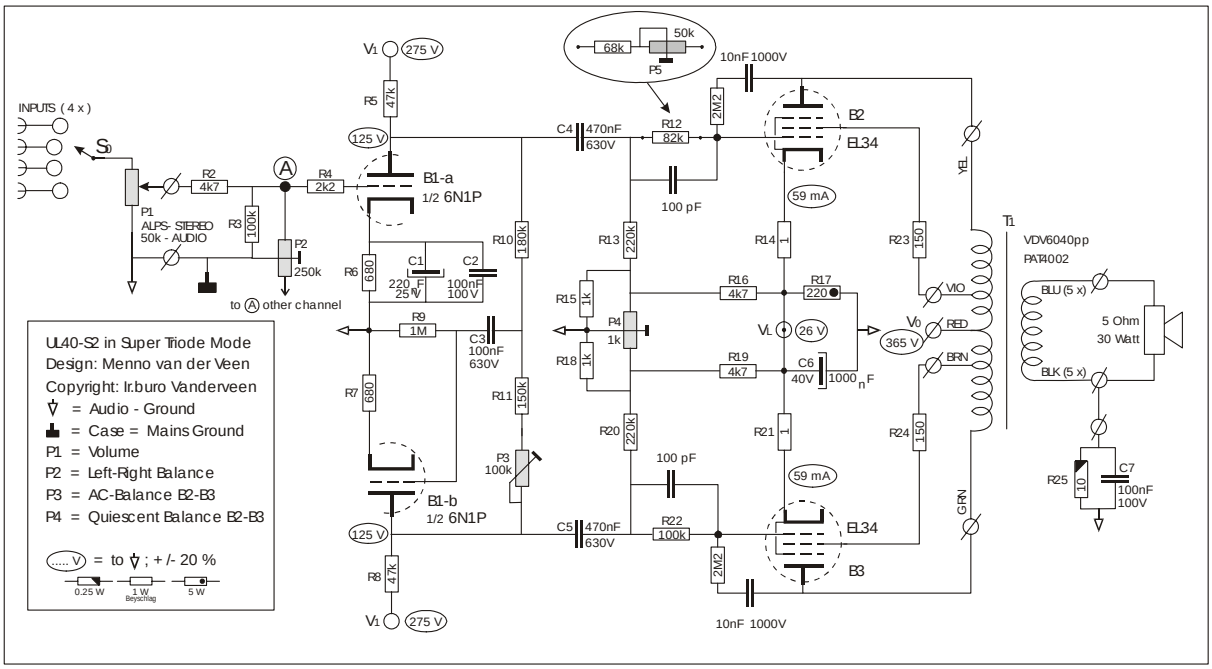
Die Daten von Endröhren sind nie exakt identisch, und dennoch darf kein Brummen auftreten. Deshalb ist der Trimmer P_4 vorgesehen, mit dessen Hilfe ohne weitere Messgeräte, sondern ausschließlich nach Gehör ungleiche Ruheströme kompensiert werden können.

Eine Einstellung der Symmetrie erfolgt über P_3. Streng genommen ist für diesen Abgleich eigentlich eine recht aufwendige Messapparatur notwendig, um eine exakte Justage auf minimales Auftreten der 2. Harmonischen vorzunehmen, aber die Gesamtschaltung wurde so sorgfältig dimensioniert, dass bei Mittelstellung des Trimmers fast vollständige Symmetrie erreicht wird.

Das Einstellpoti P_2 regelt die Lautstärkebalance zwischen linkem und rechtem Kanal, auch dieser Abgleich kann nach Gehör erfolgen.
Aus diesen Hinweisen wird deutlich, dass ich einiges unternommen habe, um Selbstbauern ohne Messgeräte zu einem optimal arbeitenden Produkt zu verhelfen. Darin liegt ein entscheidender Unterschied zu einer kommerziellen Verstärkerentwicklung, bei der ich viel differenzierter vorgehen kann.

Das Interesse an diesem Verstärker war extrem groß, und als ich während eines späteren Stadiums Verbesserungsoptionen entdeckte und diese als Modifikationen des Ursprungsgerätes veröffentlichte, entstand eine Art Kult um weitere Optimierungsmöglichkeiten, was die Nachfrage nach diesem Gerät nochmals deutlich steigerte. Ohne weiteres Zutun entstand die einträgliche Geschäftsidee, auf diesen Verstärker aufmerksam zu machen und das Interesse daran auf Seiten der Kunden zu bewahren.

Das folgende Bild zeigt eine von vielen Modifikationen: Meine Super-Trioden-Schaltung, bei der die ursprüngliche, mit Pentoden erreichbare Ausgangsleistung nicht zurückgeht und trotzdem die klanglichen Eigenschaften einer Trioden-Endstufe erreicht werden.

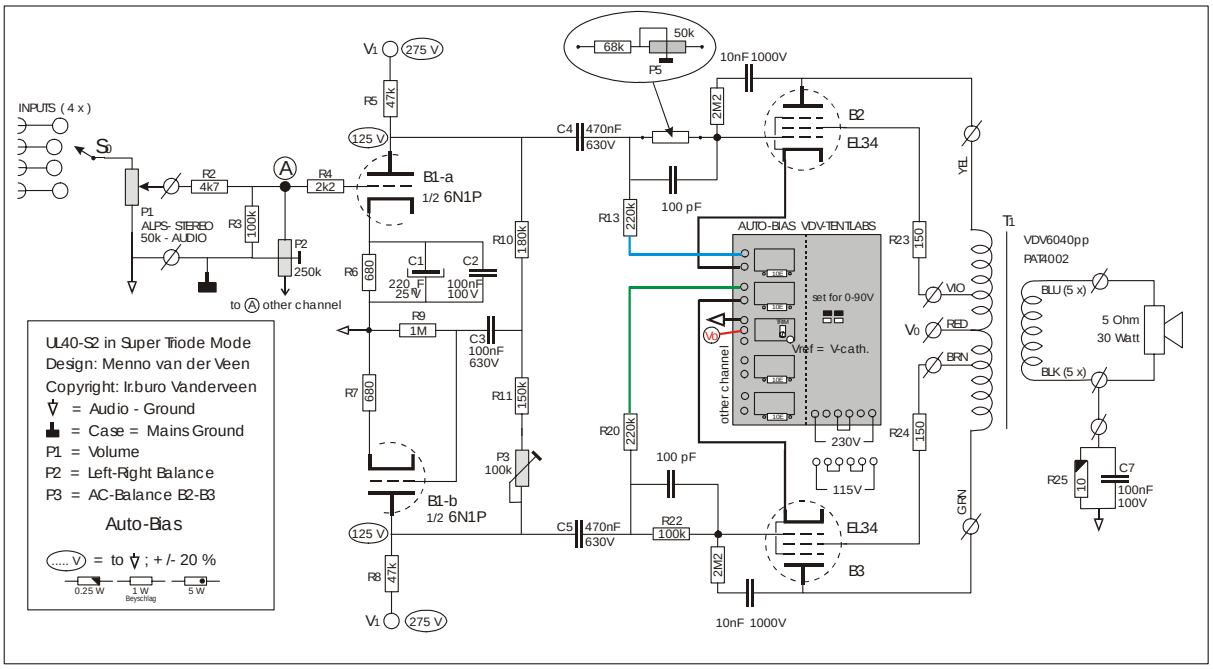


Der UL40-S2 im Super-Trioden-Modus

Durch den Einsatz einer lokalen Gegenkopplung zwischen Anode und Steuergitter jeder Endröhre wird deren Innenwiderstand soweit verringert, dass sie die Eigenschaften der Triode annimmt, während gleichzeitig die Ausgangsleistung einer Endpentode erreicht wird. Zudem wird durch die beschriebene Gegenkopplungsmaßnahme die Linearität der Röhre deutlich verbessert. Details zu dieser Schaltung werden im Kapitel 9.9 meines zweiten Buches ausführlich behandelt.

Eine weitere wichtige Modifikation und Optimierungsmaßnahme des Verstärkers liegt in der Verwendung einer verfeinerten Autobias-Schaltung, deren Funktion ebenfalls in meinem

zweiten Buch (Kapitel 12) besprochen wird. In Zusammenarbeit mit Tentlabs entstand ein interessantes Komplettmodul, das vielseitig und auch in anderen Verstärkern einsetzbar ist. Siehe dazu das folgende Bild, das den Verstärker in einer wegen des Moduls nochmals vereinfachten Form wiedergibt.



Der UL40-S2 als ST-Ausführung und mit VDV-Tentlabs-Autobias-Unit.

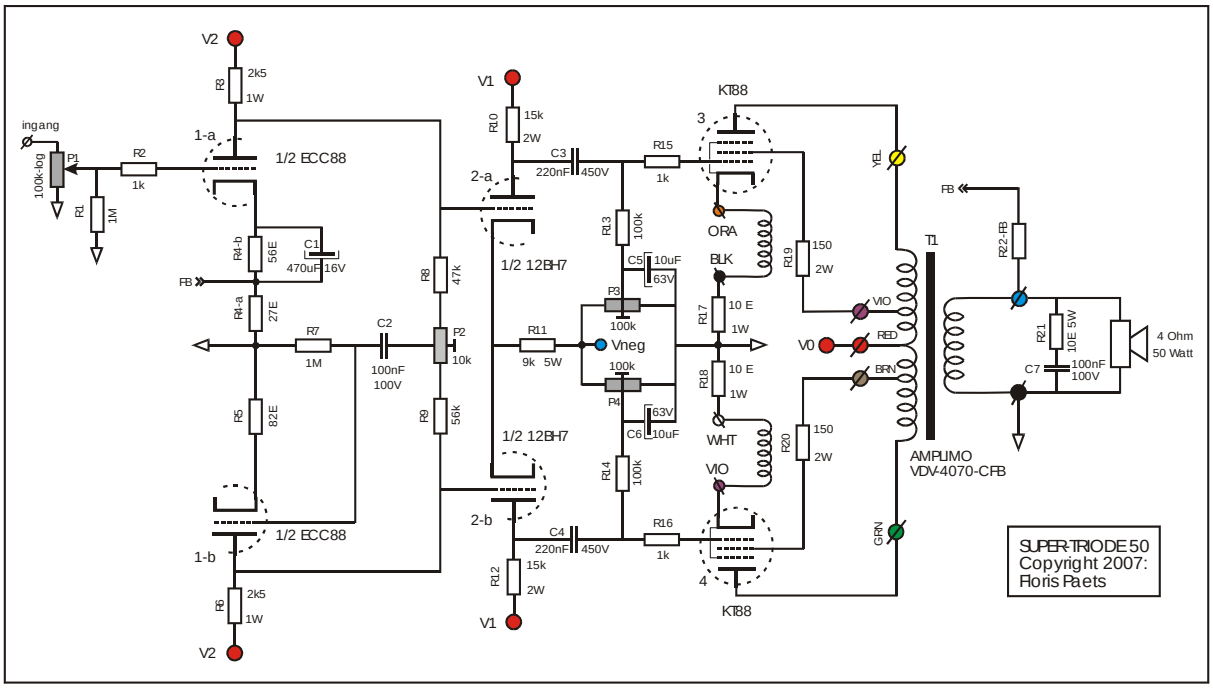
Die Autobias-Schaltung garantiert identische Ruhströme und verbessert deutlich die Wiedergabe von klanglichen Mikrodetails (darauf sind wir schon weiter oben eingegangen).

Eine zusätzliche Modifikation, die im Moment in Vorbereitung ist, wird durch eine elektronisch simulierte Drosselspule (E-Choke) gebildet, um die Hochspannung zusätzlich von Störspannungen zu befreien. Die zugehörige Schaltung ist noch nicht bis ins letzte Detail entwickelt, das soll uns aber an dieser Stelle nicht stören. In jedem Fall sinkt mithilfe dieses E-Choke die der Versorgungsspannung überlagerte Brummspannung von $8V_{pp}$ auf niedrige $80mV_{pp}$ in der für Klasse-A/B-Betrieb der Endstufe erforderlichen („schnellen“) Einstellung. Es bleiben nur noch einige wenige mV_{pp} Brummspannung bei der für Klasse-A-Betrieb erforderlichen „trägen“ Einstellung des E-Choke.
Der hörbare Effekt dieser Modifikation ist deutlich ausgeprägter, als jemals erwartet habe. Ich konnte noch einige Details mehr hören, der Verstärker arbeitet zudem vollkommen störgeräuschfrei. Ergebnisse der Maskierungstheorie und Untersuchungen zur Ruhehörschwelle aus der Psychoakustik bestätigen diese subjektive Wahrnehmung nicht, aber solcherlei Abweichungen zwischen Theorie und Praxis habe ich während meiner Arbeit schon häufiger festgestellt. Oft sind sie Anlass zur Weiterentwicklung bestehender Theorien und Modelle und bilden die Grundlage für die Konzeption neuer Produkte.

5.1.4 Ein einfacher SPT-Verstärker

Einer der Teilnehmer meiner TubeSociety-Schulung fand, dass ich einen viel zu komplexen Verstärker entwickelt hatte, welcher in Kapitel 8 meines zweiten Buches besprochen wird. In

diesem Entwurf werden alle nur denkbaren und sinnvollen Vorgaben aufgenommen, um den Verstärker optimal arbeiten zu lassen. Das Ergebnis stellt einen außerordentlich komplexen Entwurf dar mit einer Reihe zusätzlicher Ausstattungsmerkmale. Ich wies in diesem Buch darauf hin, dass dieses Gerät nicht ganz einfach nachzubauen sei. Der besagte Teilnehmer entschlackte den komplexen Entwurf und reduzierte ihn auf das Wesentliche. Das Schaltungsergebnis zeigt die folgende Abbildung.

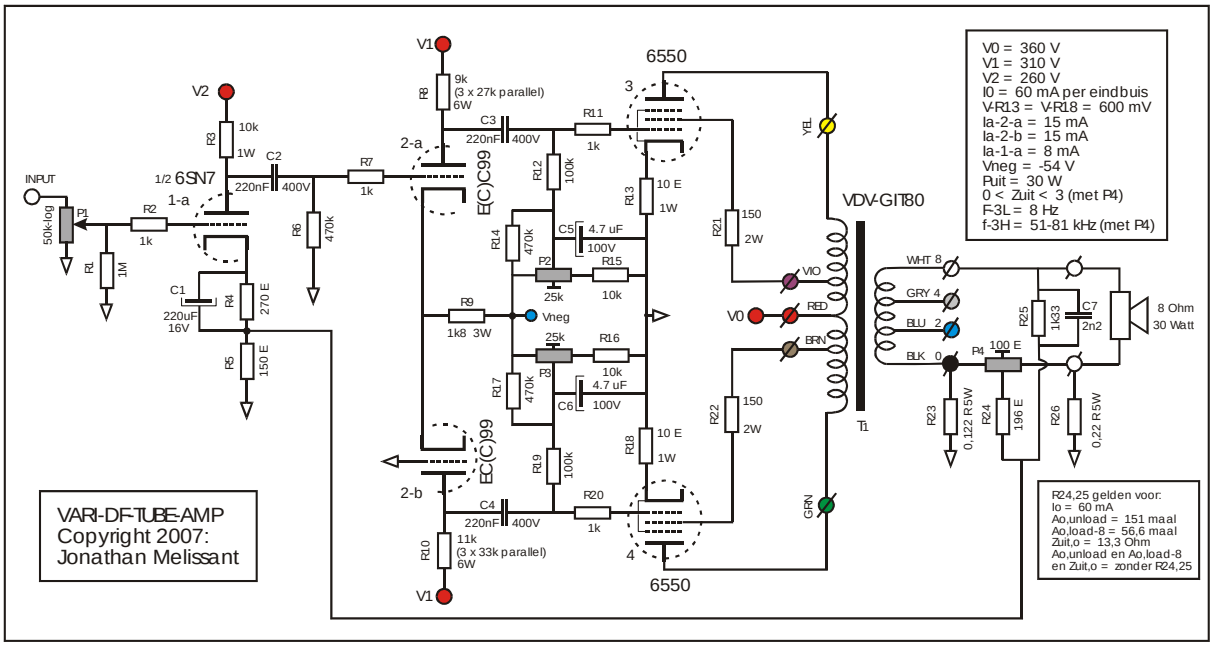


Der SPT-Verstärker nach dem Vorschlag von Floris Paets.

Das Entscheidende an diesem Verstärker ist, dass die Endröhren durch die Katodengegenkopplung einen deutlich geringeren Innenwiderstand aufweisen und ausgesprochen linear arbeiten. Im Übrigen spricht der Schaltungsvorschlag für sich. Die Schaltung wird in „Röhren-4“, der deutschsprachigen „Audio-Spezial“ ausführlich besprochen; die holländische Version findet der Interessierte in „Audio-Spezial 2, 2007.

5.1.5 Verstärker mit variablem Dämpfungsfaktor

Ein zweiter Teilnehmer meines Kurses wies auf die Tatsache hin, dass man mit einigen Widerständen in der Gegenkopplungsschleife den Dämpfungsfaktor beeinflussen könne. Sein Vorschlag sah folgendermaßen aus:

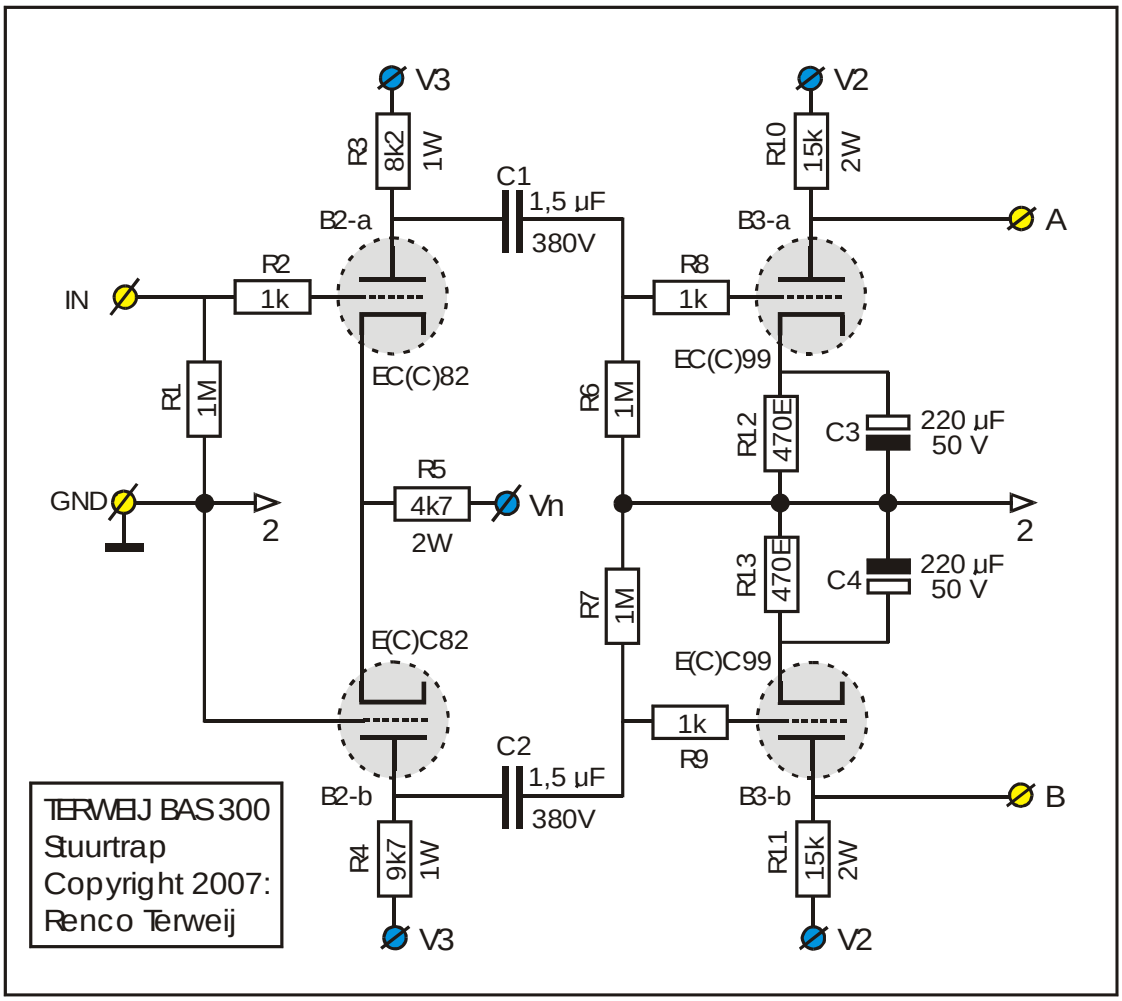


Variabler Dämpfungsfaktor nach einem Vorschlag von Jonathan Melissant

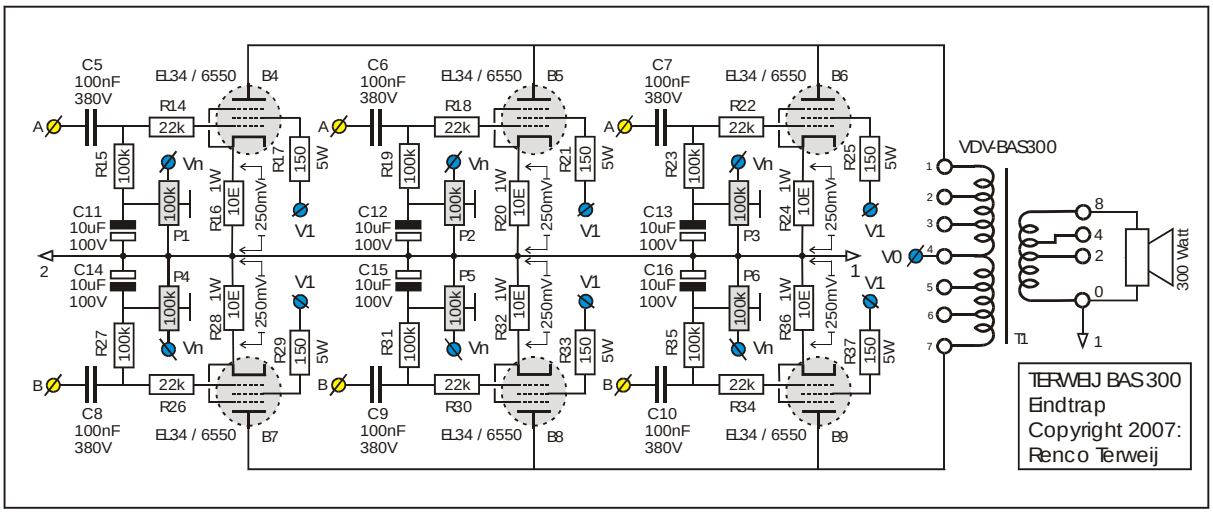
Die Schaltung ist gängiger Standard, das eigentlich interessante Detail befindet sich auf der Sekundärseite des Ausgangsübertragers. Dort sieht man zwei Leistungswiderstände R_{23} und R_{24}, die vom Lautsprecherstrom durchflossen werden. Die Spannung über R_{23} tritt jedoch in Gegenphase zu der über R_{26} auf. Zwischen beiden Widerständen liegt das Potentiometer P_4, mit dem man festlegen kann, ob man mehr über R_{23} oder R_{26} „hört“. Mit anderen Worten: Es kann entweder mehr Stromgegenkopplung oder mehr Strommittkopplung eingestellt werden. Im ersten Fall steigt der Dämpfungsfaktor, im zweiten Fall sinkt er (regelbar zwischen 0 bis 3Ω). Überzeugend an dieser Idee ist, dass sie exakt die Theorie bestätigt, die in meinem zweiten Buch beschrieben wird, Theorie und Praxis stimmen vollständig überein. Das ist doch ein überzeugendes Ergebnis, das lohnt, umgesetzt zu werden

5.1.6 Bassverstärker mit hoher Ausgangsleistung

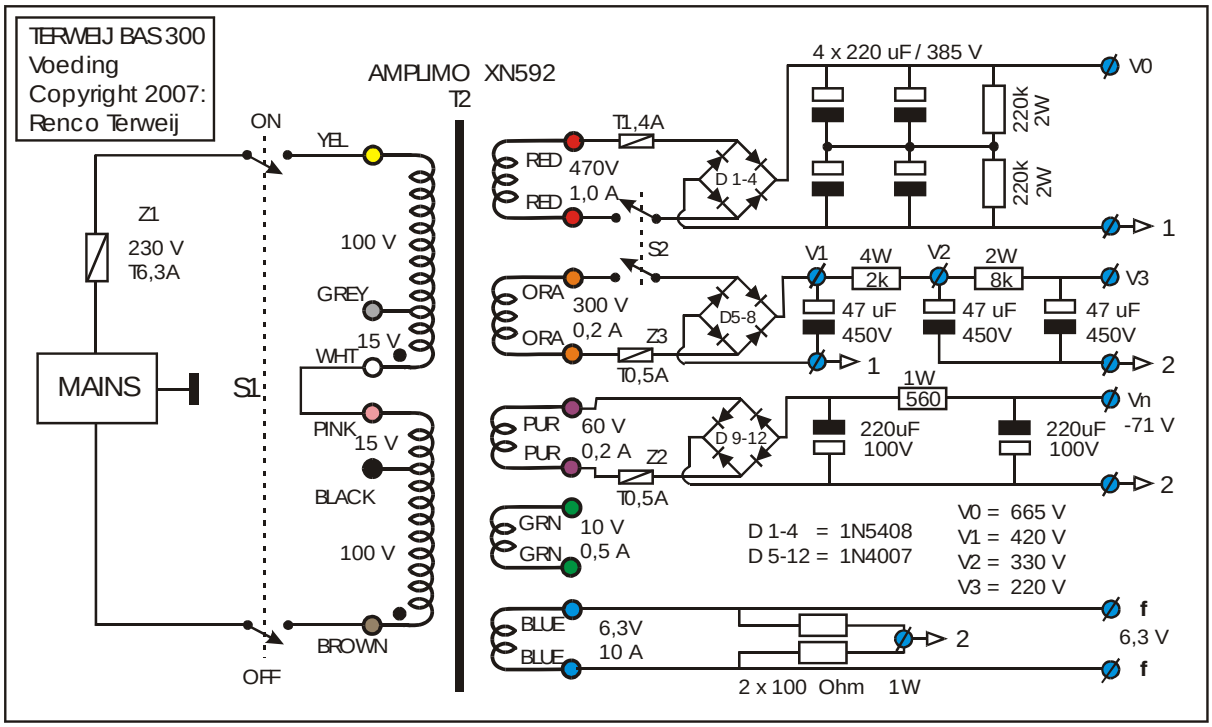
Ein dritter Teilnehmer aus dem Lehrgangsjahr 2007 ist Bassist und forderte mindestens 200W Ausgangsleistung. Nur darauf kam es ihm an. Die Schaltung, die diese Forderung erfüllt, zeigt das nächste Bild.



Schaltung der Steuerstufe für den 200W Bassverstärker



Die zugehörige Endstufe.



Das Netzteil für den Bassverstärker

Das eigentliche Geheimnis dieses Verstärkers liegt in der Steuerstufe mit einer ECC99 als letzte Röhre, die von einem erheblichen Strom durchflossen wird, so dass sie in der Lage ist, ausreichend niederohmig ohne Probleme die sechs Endröhren linear und mit genügend Headroom (6dB zusätzlich) anzusteuern.

Aber Renco hatte später einige Probleme mit der Stabilität dieses Verstärkers. Hochspannungsüberschläge waren nur eines der Probleme, mit denen er zu kämpfen hatte. Wird der Verstärker nämlich ohne versehentlich ohne Lautsprecher im Leerlauf betrieben und über eine Bassgitarre angesteuert, schaukeln sich die Spannungen am Übertrager auf gefährlich hohe Werte auf, was zu Spannungsüberschlägen an den Röhrensockeln führt. Fatalerweise schlug die Spannung bis zu den Heizfäden durch und zerstörte diese. Letztendlich wurde als Lösung des Problems gefunden, dass ohne angeschlossenen Lautsprecher die Sekundärwicklung automatisch kurzgeschlossen wird. Auch liegen an den beiden äußeren Anodenschlüssen der Primärwicklung jeweils drei Dioden in Serie mit zusätzlichen 220kΩ-Widerständen, die für eine gleichmäßige Spannungsaufteilung sorgen. Unter normalen Betriebsbedingungen leiten diese Dioden nicht. Erst, wenn die Spannung über der Primärwicklung sich selbst aufschaukelt und negativ wird, beginnen die Dioden zu leiten und verhindern auf diese Weise einen gefährlichen Spannungsanstieg und Durchschlag.

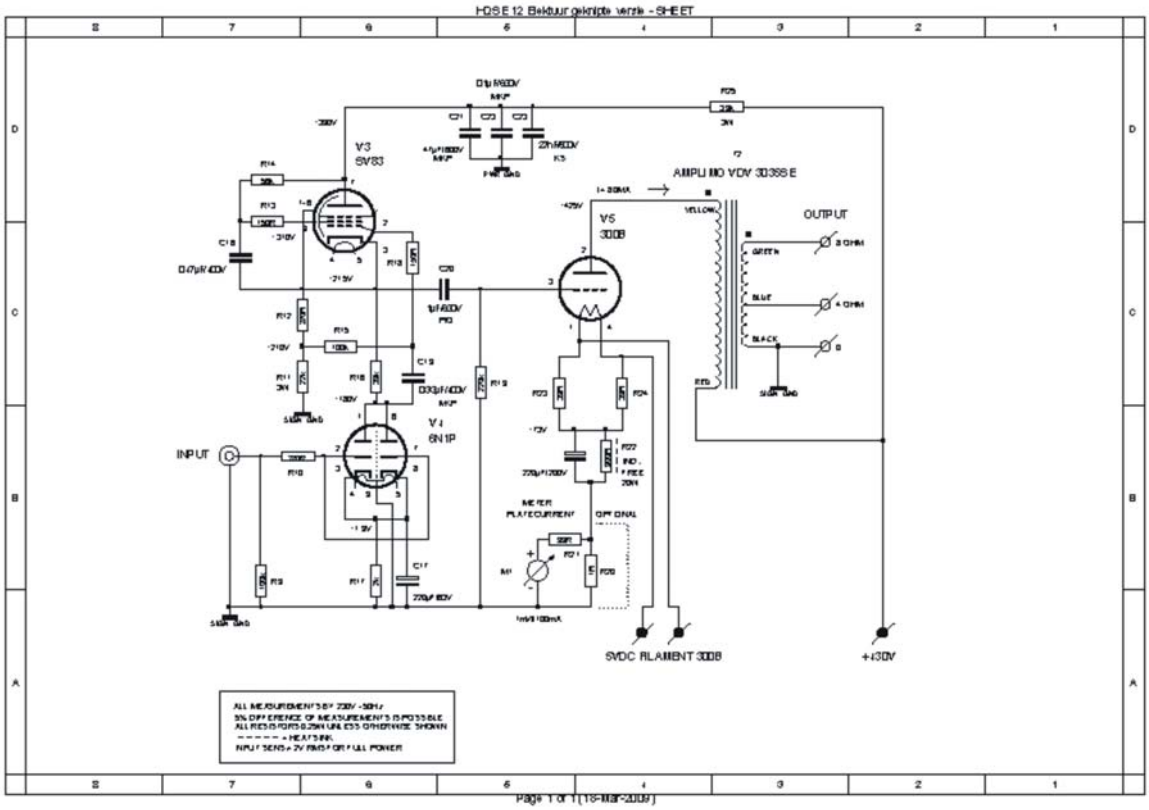
5.2 SE-Verstärker

In diesem Teil möchte ich zwei Verstärker vorstellen: Einen SE-Vorschlag von Bert Fruitema und einen nach Ari Polosois.

5.2.1 Eintakt-Endstufe nach Bert Fruitema

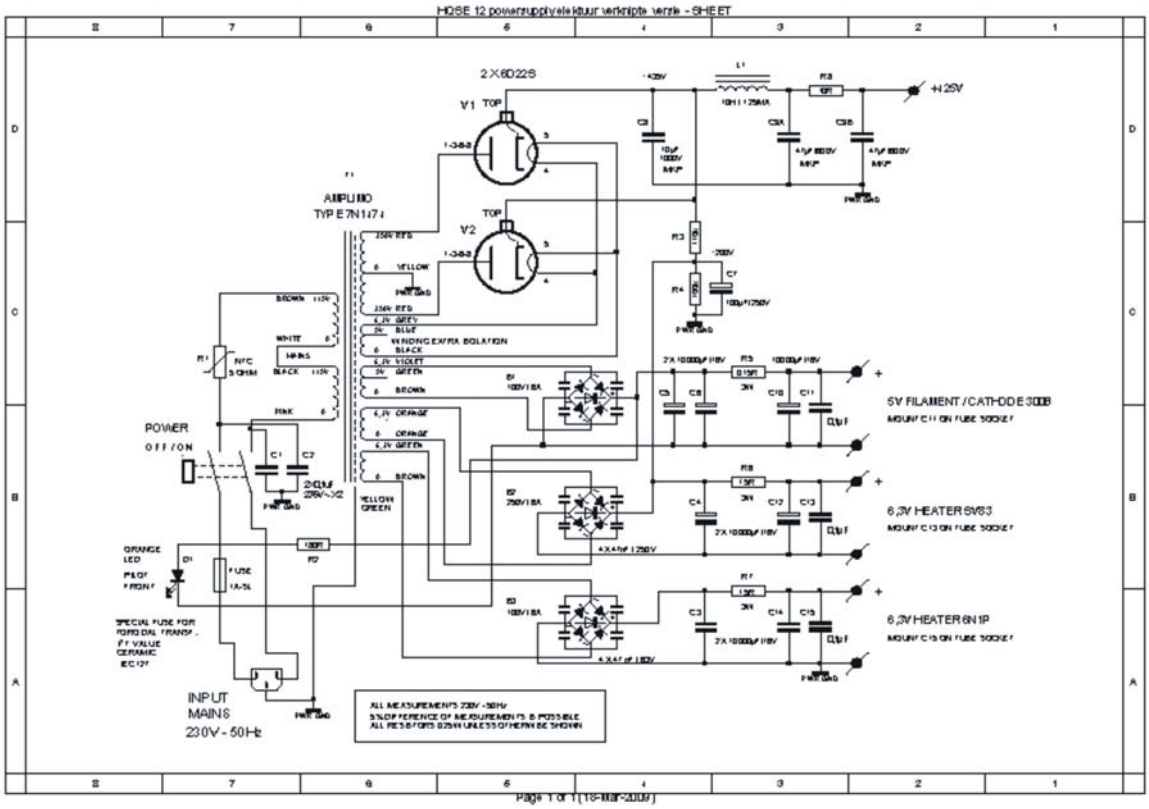
Während unserer Zusammenarbeit zwischen Bert und mir bei Amplimo haben wir viel Mühe dafür aufgewendet, meine Ringkernübertrager an sicher nachbaubare Verstärkerentwürfe

anzupassen. Bert arbeitete an SE-Übertragern, ich an solchen für Gegentaktendstufen. Unten sehen Sie eine Schaltung eines SE-Verstärkers von Bert aus dem Jahr 2006, der im Dezember in „Audio Spezial“ von Elektor und ein Jahr darauf im deutschsprachigen „Audio Spezial“ veröffentlicht wurde.



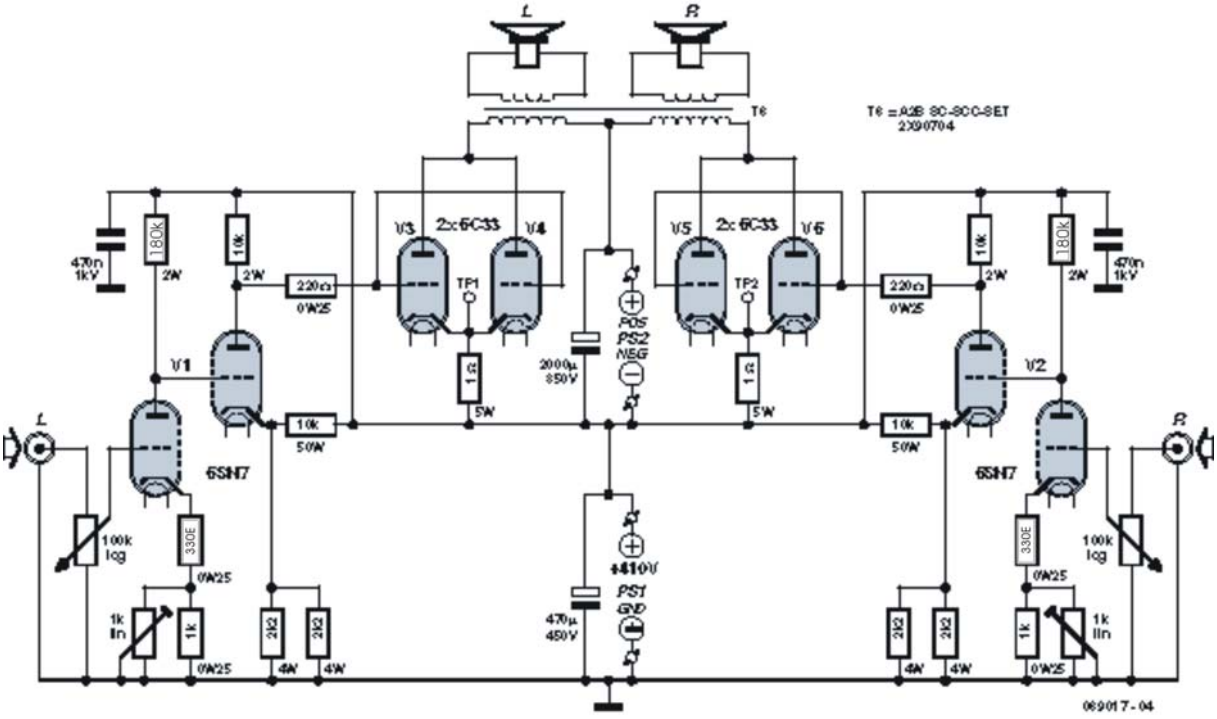
SE-Entwurf von Bert Fruitema.

Kennzeichnend für diesen Verstärker sind die große Einfachheit, die als µ-stage konzipierte Treiberstufe, die geringe Verzerrung und schließlich die berühmte 300B-Endtriode. Mit dieser Röhre wird eine Ausgangsleistung von ungefähr 10W erzielt. Der Ausgangsübertrager ist eine Ringkernausführung, die speziell für SE-Anwendungen entwickelt wurde in der Weise, dass der Ruhestrom durch die Endröhre den Übertrager zu keiner Zeit in die Sättigung bringt. Gegenkopplung ist überflüssig, da die Steuerröhren selbst auf minimale Verzerrung eingestellt sind.
Die Schaltung des unten abgedruckten Netzteils ist selbsterklärend.



Netzteil des SE-Verstärkers von Bert Fruitema.

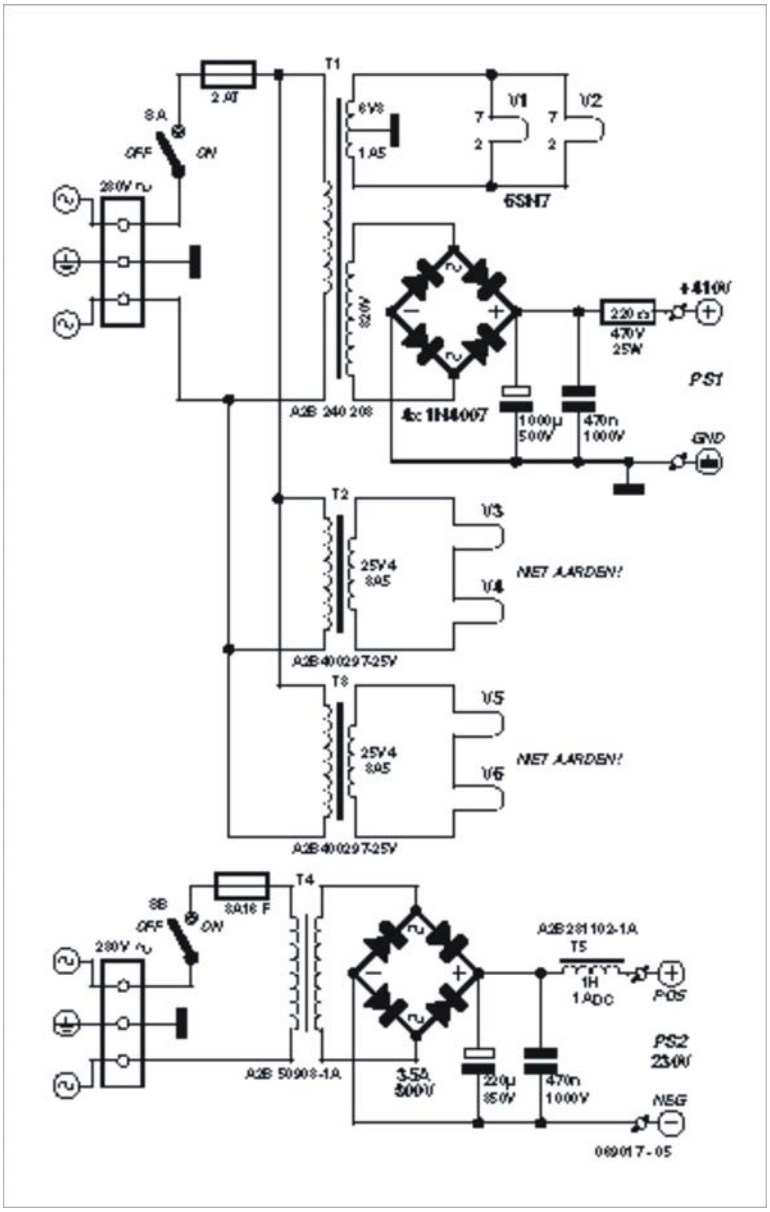
5.2.2 SE-Verstärker nach einem Vorschlag von Ari Polisois



Eintakt-Endstufe nach Ari Polisois

Der Stereoverstärker von Ari Polisois beinhaltet zwei bedeutende Ansatzpunkte. Der erste ist, dass im Signalweg keine Koppelkondensatoren liegen. Dies konnte dadurch erreicht werden,

dass sowohl die Vorstufe, als auch die parallel geschalteten Endröhren einen jeweils eigenen Versorgungsteil erhielten.
Zum Zweiten fällt auf, dass der Stereo-Ausgangsübertrager auf einen einzigen Kern gewickelt ist. Die Primärwicklung des linken Kanals sitzt auf dem linken Schenkel eines U-Kerns, darüber liegt direkt die Sekundärwicklung. Für den rechten Kanal wird ganz analog der rechte Schenkel des Übertragers genutzt. Zwischen beiden Wickelpaketen liegt ein gewisser räumlicher Abstand, so dass die gegenseitige in jedem Fall Verkopplung gering bleibt. Gegenseitiges Übersprechen beider Kanäle wird auf diese Weise in ausreichendem Maße unterdrückt. Zudem führen beide Kanäle identische Gleichströme, die im Kern eine gleiches, aber entgegengesetzt gerichtetes Feld induzieren, wodurch die störende Gleichstromvormagnetisierung vollständig unterbunden wird.
Das zugehörige Netzteil sehen Sie im Folgenden Bild.



Doppelnetzteil für den Polisois SE-Verstärker.

Kapitel 6 Gegenkopplung

Über Gegenkopplung ist viel bekannt und dementsprechend existiert eine große Zahl von Veröffentlichungen, u.a. auch von mir selbst (vergleiche dazu Kapitel 6 meines ersten, und Kapitel 5 meines zweiten Buches). Ich möchte die Ausführungen dort an dieser Stelle nicht noch einmal alle wiederholen, sondern mich hier auf einem etwas anderen Weg mit dem Thema Gegenkopplung auseinandersetzen.

6.1 Gegenkopplung und Nichtlinearität

Es dürfte allgemein bekannt sein, dass bei Rückführung eines Teils β des Verstärker-Ausgangssignals auf seinen Eingang und Subtraktion dieser Teilspannung vom Eingangssignal sich die resultierende Verstärkung nach

$$A_{eff} = \frac{A_0}{(1 + \beta \cdot A_0)}$$

ergibt. Auf die gleiche Weise wird die wirksame Ausgangsimpedanz durch

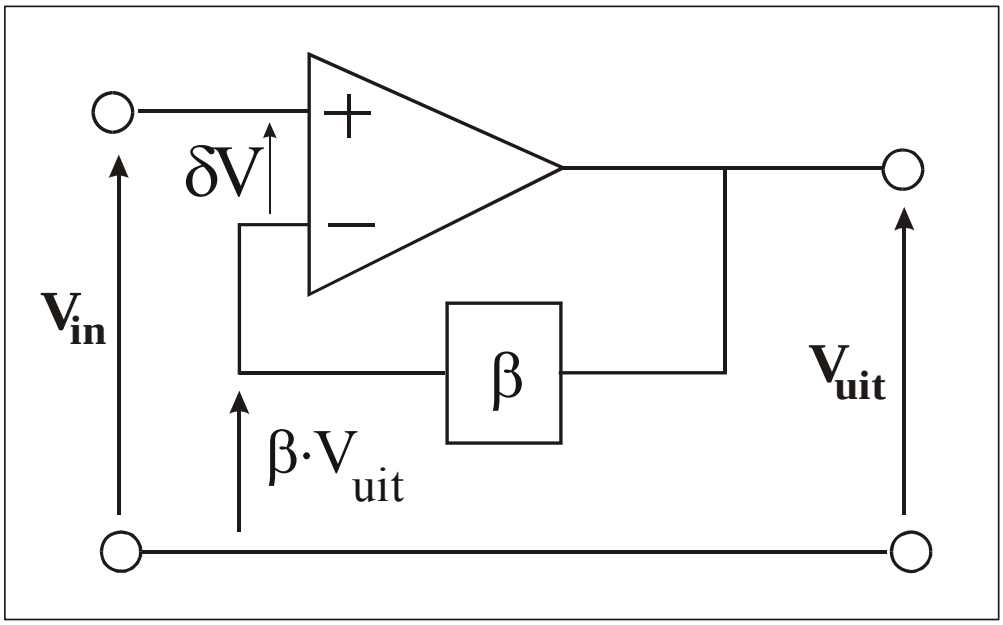
$$Z_{eff} = \frac{Z_{aus}}{(1 + \beta \cdot A_0}$$

gegeben sein, und die Verzerrungen gehen um den Faktor

$$(1 + \beta \cdot A_0)$$

zurück. Bei den genannten Zusammenhängen wird üblicherweise vorausgesetzt, dass A_0 konstant ist und die Verstärkung vollkommen linear verläuft.

Ich möchte nun einige weitere Fragen aufwerfen. Nehmen wir einmal an, der Verstärker arbeite nicht linear, und der Verstärkungsfaktor hänge von der Eingangsspannung ab. Dieses Problem tritt bei Röhrenverstärkern in der Tat nicht selten auf, insbesondere dann, wenn wir uns in den Sättigungsbereich hinein bewegen. Die Frage ist jetzt, wie die Gegenkopplung diese Nichtlinearität korrigiert. Das folgende Bild zeigt prinzipiell die bei Gegenkopplung auftretenden Spannungen.



Die bei einem gegengekoppelten Verstärker auftretenden Spannungen

Wir gehen davon aus, dass die Verstärkung bei offener Schleife durch

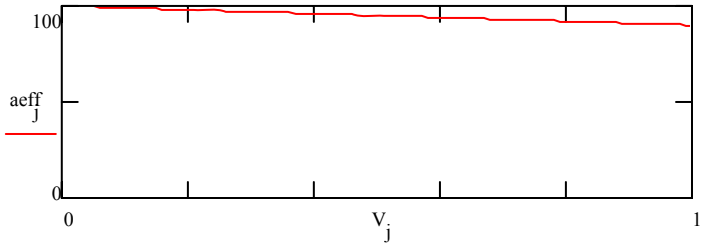
$$A_0 + A_1 \cdot |\delta V|$$

gegeben ist, wobei A_1 die Dimension [V^{-1}] hat. Nehmen wir beispielsweise an, dass $A_0 = 100$ und $A_1 = -10\ V^{-1}$. Dann wird bei 1V Eingangsspannung die Verstärkung von 100 auf 90 zurück gehen, eine Begrenzung, wie sie für Röhrenverstärker nicht ungewöhnlich ist.

Anschließend führen wir den Teil β der Ausgangsspannung zum Eingang zurück und ziehen diesen Teil entsprechend den Gesetzen der Gegenkopplung von der Eingangsspannung ab. Dann gelten die folgenden Zusammenhänge:

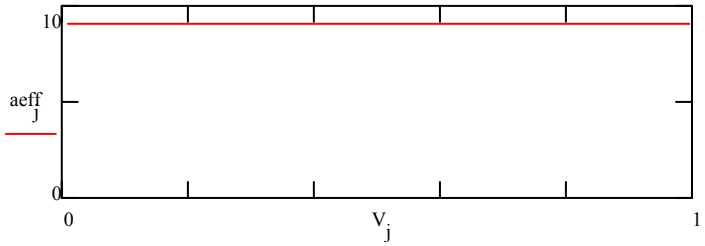
$$A = A_0 + A_1 \cdot \delta U$$
$$\delta U = U_{in} - \beta \cdot A \cdot \delta U$$
$$\delta U = U_{in} - \beta \cdot (A_0 + A_1 \cdot \delta U) \cdot \delta U$$
$$\delta U = \frac{\left[-(1 + \beta \cdot A_0) + \sqrt{\left[(1 + \beta \cdot A_0)^2 + 4 \cdot \beta \cdot A_1 \cdot U_{in} \right]} \right]}{(2 \cdot \beta \cdot A_1)}$$
$$U_{aus} = (A_0 + A_1 \cdot \delta U) \cdot \delta U$$
$$A_{eff} = \frac{U_{aus}}{U_{in}}.$$

Diese Formeln zeigen, dass die Nichtlinearität von A_1 der Grund für Fehlerspannungen am Ausgang ist. Das System ist übrigens wegen seiner Einfachheit mathematisch lösbar; schwieriger wird es allerdings, wenn die Abweichungen etwas komplexer werden.
Das nächste Bild zeigt deutlich die Verstärkungsabnahme bei einem ohne Gegenkopplung betriebenen Beispielverstärker.



Abnehmende Verstärkung A_{effi} bei steigendem Eingangssignal

Wie zu erwarten, wird der Rückgang der Verstärkung deutlich sichtbar. Angenommen, wir wollen 10fach gegenkoppeln (β = 0,1), die Verstärkung geht dann überschlägig gerechnet um den Faktor 10 zurück. Wird dann die durch A_1 verursachte Abweichung noch auftreten? Das folgende Bild gibt die Antwort.



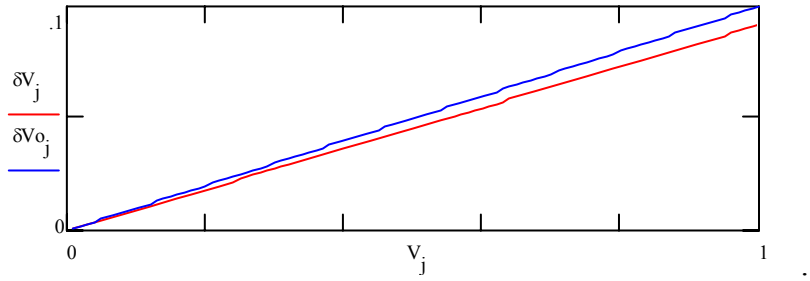
Durch Gegenkopplung wird die Verstärkung konstant

Man erkennt sofort, dass die durch A_1 bedingte Abnahme durch die Gegenkopplung korrigiert und die Verstärkung konstant wird, diese kaum noch von der Höhe des Eingangssignals beeinflusst wird.

Verallgemeinern wir unsere Beobachtung, dann kommen wir zu dem Schluss: „Gegenkopplung korrigiert die durch Nichtlinearitäten verursachten Fehler, dieser Sachverhalt wird durch die bekannten Formel $A_{eff} = \frac{A_0}{(1+\beta \cdot A_0)}$ ausreichend beschrieben.“

6.2 Mit welcher Spannung ist der Verstärker „beschäftigt“?

Wenn ein Verstärker gegenkoppelnd betrieben wird, ist er dann noch mit der Übertragung von Musik „beschäftigt“, oder mehr mit der Korrektur der eigenen Übertragungsfehler?
Bleiben wir zur Untersuchung dieser Frage beim gleichen Beispiel wie vorher. Wir betrachten jetzt die Spannung zwischen den + und –Eingängen, erhöhen diese Spannung soweit, dass sichtbar wird, ob der Verstärker mit der Verarbeitung von U_{in} oder mehr mit der durch die Nichtlinearität von A_1 verursachten Fehler beschäftigt ist. Wir sehen im folgenden Bild die Situation, die sich für β = 0,1 einstellt



Blau-punktiert: Eingangssignal bei einem idealen Verstärker mit $A_1 = 0$ und $\beta = 0$;
Rot (durchgezogen): Eingangssignal bei einem nichtlinearen Verstärker mit $A_1 = -10^{-1}$ und $\beta = 0{,}1$

Die Schlussfolgerung auf Basis dieser Ergebnisse lautet: „Der Verstärker bleibt überwiegend mit der Verarbeitung von Musik beschäftigt."

6.3 Wie wirken sich die Laufzeitverzögerungen auf den Verstärkungsvorgang aus?

Eine häufig geäußerte Bemerkung lautet sinngemäß: „Der Verstärker verzögert das Signal um eine bestimmte Zeit. Wenn ein Fehler im Verstärker auftritt, dann bewirkt die Verzögerung doch, dass die Korrektur durch die Gegenkopplung zu spät kommt." Auch diese Annahme wird rechnerisch zu überprüfen sein, was wir im folgenden durchführen wollen.

Wir setzen, dass die Laufzeit eines Signals durch den Verstärker die Zeit τ betrage. Wir führen dem Verstärker als Eingangssignal einen Rechteckimpuls von der Dauer $3\cdot\tau$ zu und teilen das Signal in drei gleich lange Teile von jeweils τ. Weiterhin nehmen wir an, dass vor und nach der Rechteckschwingung das Eingangssignal 0V betrage. Der Verstärker soll mit A_0 linear verstärken, der Gegenkopplungsfaktor betrage β. Es tritt keine Laufzeitverzögerung bei der Rückführung des auf den invertierenden Eingang geführten Gegenkopplungssignals auf. In der Tabelle sind die sich theoretisch ergebenden Spannungen im Zeitbereich aufgeführt.

Zeit x τ	U_{in}	δU	U_{aus}
0	0	0	0
1	Uo	Uo	0
2	Uo	Uo - βAoUo	AoUo
3	Uo	Uo - βAo·(Uo-βAoUo)	Ao·(Uo-βAoUo)
4	0	0 - β· Ao·(Uo-βAo·(Uo-βAoUo))	Ao·(Uo-βAo·(Uo-βAoUo))
5	0	0 - β^2· Ao^2·(Uo-βAo·(Uo-βAoUo))	- β· Ao^2·(Uo-βAo·(Uo-βAoUo))

Rechnen wir das einmal mit einem Zahlenbeispiel durch. Es sei: $A_0 = 100$; $\beta = 0{,}1$; $U_0 = 1$V. Dann stellen während der gesetzten Zeitintervalle zahlenmäßig die folgenden Spannungen ein:

Zeit x τ	U_{in}	δU	U_{aus}
0	0	0	0
1	1	1	0
2	1	1-1000 = -999	100
3	1	1-(-999000) = 999001	-99900
4	0	0-999001000 = -999001000	99900100
5	0	9990010000	-999001000

Das Beispiel macht unmittelbar deutlich, dass diese Vorgehensweise zu fehlerhaften Ergebnissen führt. Die Teilung des Gesamtimpulses in Zeitintervalle, die jeweils der Laufzeit

des Verstärkers entsprechen, zeigt offenkundig, dass wir irgendwo irgend etwas Entscheidendes übersehen haben müssen. Wo liegt der Denkfehler?

Die Tatsache, dass der Verstärker eine Verzögerungszeit von τ besitzt, ist gleichbedeutend mit einem beschränkten Übertragungsverhalten im höheren Frequenzbereich. Wir bieten dem Verstärker ein Rechtecksignal mit unendlich schneller Anstiegszeit an, der Übergang von τ nach 2τ erfolgt demnach unendlich schnell. Dieser Vorgang entspricht einem Eingangssignal, das Anteile sehr hoher Frequenzen besitzt. Diese hohen Frequenzen werden nun nicht mit A_0, sondern sehr viel geringer verstärkt, weswegen die oben theoretisch ermittelte Spannungs-Aufschaukelung in der Praxis überhaupt nicht auftreten kann. Die Anstiegszeit (slew rate) des Eingangssignals mag vielleicht unendlich hoch sein, die slew rate am Ausgang des Verstärkers ist es sicher nicht, da das Übertragungsverhalten des Verstärkers im Hochtonbereich beschränkt ist (der Verstärker zeigt hier ein Verzögerungsverhalten).
Also: Die Überlegungen zeigen, dass man sowohl den Zeitbereich, als auch den Frequenzgang berücksichtigen muss, beide Faktoren sind eng miteinander verknüpft, miteinander verkoppelt.

Bringen wir unsere Erkenntnisse in einen formelmäßigen Zusammenhang. Wir gehen von einem Verstärker mit einer Open-Loop-Verstärkung von A_0 im tieffrequenten Bereich aus. Der Verstärker besitzt ein Tiefpassfilter 1. Ordnung, wodurch eine Laufzeitverzögerung von τ entsteht. Dann ist die Open-Loop-Verstärkung als Funktion der Frequenz durch

$$A(f) = A_0 \cdot \frac{1}{(1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau)}$$

gegeben. Dieser Zusammenhang macht die direkte Verknüpfung von Zeit- und Frequenzdomäne noch einmal deutlich, beide lassen sich nicht voneinander trennen.

6.4 Die Gegenkopplung fügt Harmonische hinzu

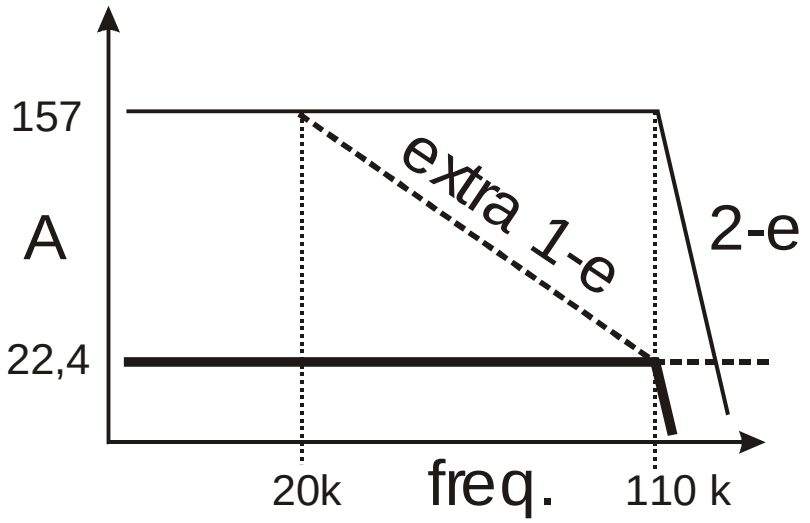
Nehmen wir einmal an, ein Verstärker besitze eine solche Nichtlinearität, die zum Auftreten ausschließlich der 2. Harmonischen führt. Das ist zwar nicht realistisch, aber zur Durchführung unserer Überlegungen gehen wir der Anschaulichkeit halber einmal davon aus. Wenn wir jetzt gegenkoppeln, dann gelangt ein gewisser Anteil der 2. Harmonischen zurück auf den Eingang, durchläuft wiederum den Verstärker, wodurch neben der 2. zusätzlich auch die 4. Harmonische auftritt, zwar abgeschwächt, aber sie ist vorhanden. Es wird deutlich, dass die Gegenkopplung einerseits für eine Abschwächung der 2. Harmonischen sorgt, gleichzeitig aber auch für das Auftreten höherer Harmonischer verantwortlich ist. Beim nicht gegengekoppelten Verstärker tritt ausschließlich die 2. Harmonische auf, im gegengekoppelten dagegen entstehen zusätzlich die 2., die 4., die 8. und höhere Harmonische und darüber hinaus weitere Intermodulationsprodukte.
Ein realer Verstärker produziert aber nicht nur die 2., sondern auch die 3. und weitere Harmonische höherer Ordnung. Abhängig von der Stärke der Gegenkopplung werden also mehr oder weniger zusätzliche Verzerrungsprodukte generiert, die Klangveränderungen hervorrufen, die sich meist in einer deutlich wahrnehmbaren klanglichen Schärfe bemerkbar machen.

6.5 Gegenkopplung und Klangverfärbungen

Die folgenden Überlegungen wurden bereits in Kapitel 2 – 3 dargestellt, ich möchte diese aber noch einmal aufgreifen, weil in folgenden Zusammenhang noch einmal erläutert wird, warum Gegenkopplung zu Klangverfärbungen führt.

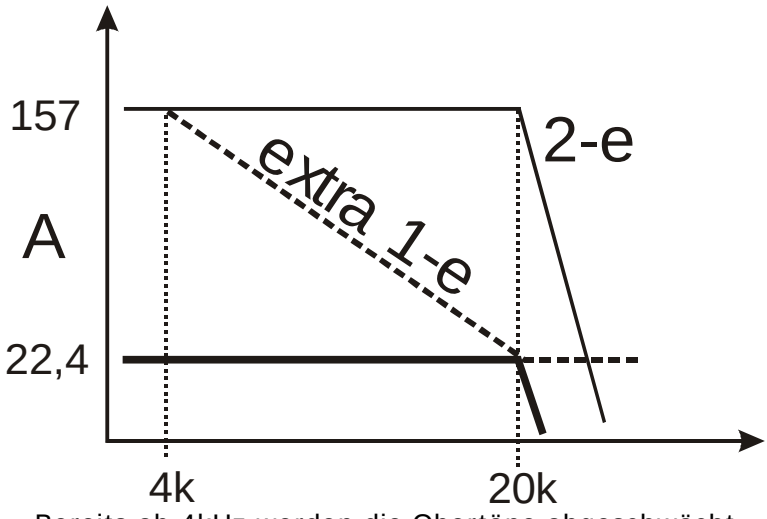
Neben dem in 6.4 genannten Grund liegt ein zweiter entscheidender Faktor für die die korrekte Klangbalance beeinträchtigende Klangverfärbung im Verzerrungsverhalten eines Verstärkers.

Gehen wir einmal von einem nicht gegengekoppelten Verstärker mit einer Bandbreite bis 110kHz aus. Wir fügen nun eine Gegenkopplung und ein dadurch notwendig werdendes Filter 1. Ordnung mit einer Eckfrequenz von 20kHz. ein. Dann werden alle Verzerrungsprodukte bis 20kHz mit dem Faktor 157/22,4 abgeschwächt; die Zusammenhänge zeigt das folgende Bild.



Bis 20kHz werden alle Verzerrungsprodukte (Obertöne) um den Faktor 157/22,4 abgeschwächt.

Ganz anders stellt sich die Situation dar, wenn der Ausgangsübertrager eine beschränkte Bandbreite aufweist und das Filter bei bereits 4kHz einsetzt. Dann ergeben sich die im anschließenden Bild dargestellten Verhältnisse.



Bereits ab 4kHz werden die Obertöne abgeschwächt

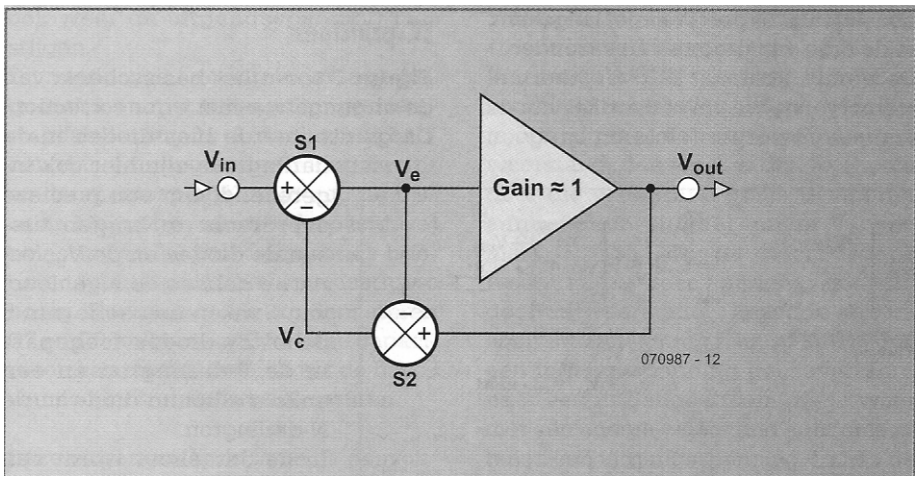
Diese Situation kann dazu führen, dass höhere harmonische Verformungsprodukte weniger stark abgeschwächt werden, was notwendigerweise zu Klangverfärbungen führen muss.

6.6 Gegenkopplung und Stabilität

Man kann so stark gegenkoppeln wie man will, solange die Tief- und Hochtonübertragungs-Charakteristik einer solchen 1. Ordnung genügt. Sobald Übertragungs-Charakteristiken 2. oder höherer Ordnung in der Gegenkopplung auftreten, haben wir mit Instabilitäten zu kämpfen.
Im Vorangegangenen und in meinen Büchern ist auf diesen Sachverhalt bereits ausführlich eingegangen worden.

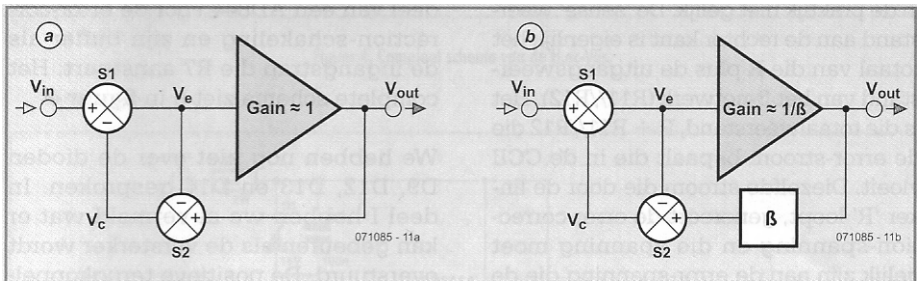
6.7 „Vorwärts-Gegenkopplung“ (error correction)

Angenommen, wir haben einen Endverstärker ohne Gegenkopplung mit einem Verstärkungsfaktor von ungefähr 1. Die Ein- und Ausgangssignale sollen voneinander abgezogen werden. Dann wird das Differenzsignal ausschließlich die Fehler enthalten, die zwischen Ein- und Ausgang des Verstärkers auftreten. Weiter angenommen, man führt dieses Differenzsignal nach Phasenumkehrung auf eine Vorverstärkerstufe, so dass diese das Audiosignal und das Fehlersignal des Endverstärkers verarbeitet. Dann müsste am Lautsprecherausgang im Prinzip ein fehlerloses Signal auftreten. Das nächste Bild zeigt die prinzipiellen Zusammenhänge.

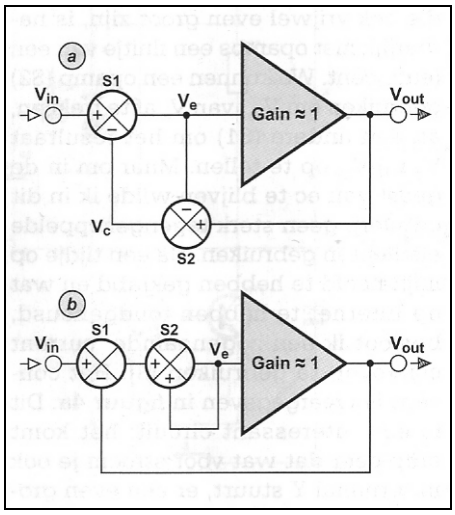


„Vorwärts-Gegenkopplung“ (Nach Jan Didden, Elektor NL; April 2008, S. 24 ff)

Es ist nicht Bedingung, dass die Endstufe exakt 1 x verstärkt. Das folgende Bild zeigt die notwendige Herangehensweise, wenn die Endstufe eine Verstärkung von 1/β aufweist (mit $0<\beta<1$).



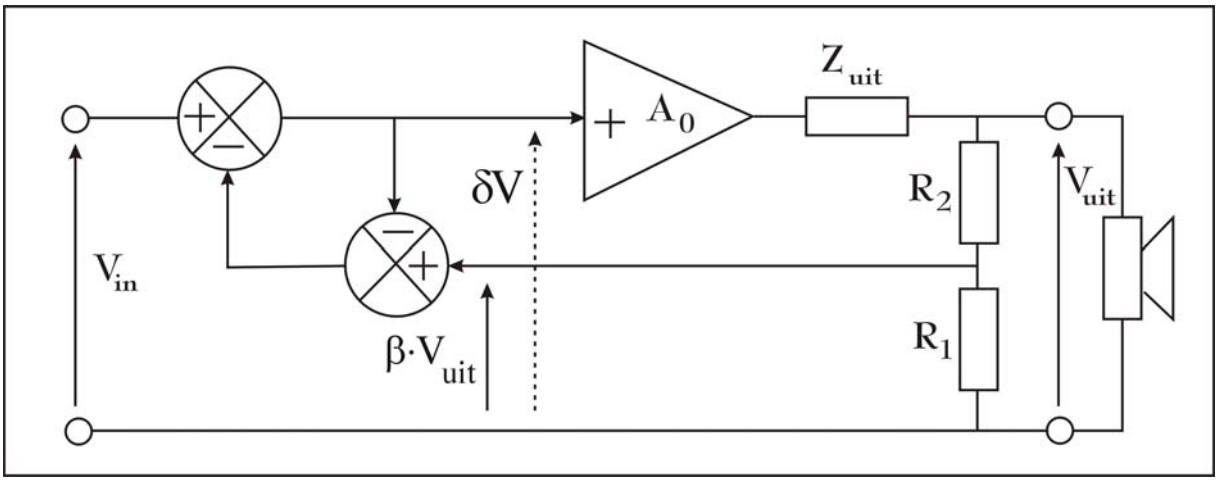
Konzeption der Fehlerkorrektur, wenn der Endverstärker eine höhere Verstärkung als 1 aufweist (Nach Jan Didden, Elektor NL; April 2008, S. 38 ff)



Zwei Möglichkeiten der Fehlerkorrektur: a) und b) sind identisch (Nach Jan Didden, Elektor NL; April 2008, S. 38 ff)

Ich bin dieser Möglichkeit der Fehlerkorrektur bei Röhrenverstärkern noch nicht begegnet, aber vielleicht habe ich dabei etwas versäumt. In jedem Fall verschiebt diese Herangehensweise die Problematik der Linearität nach fehlerloser, exakter Arbeitsweise der erforderlichen Differenzstufen, bei denen die Spannungen voneinander abgezogen werden.

Die Abbildung zeigt die Prinzipschaltung noch einmal, um die rechnerischen Zusammenhänge zu verdeutlichen.



Die bei der Fehlerkorrektur auftretenden Spannungen

Am Eingang des Verstärkers tritt die Spannung

$$\delta U = U_{in} + \delta U - \beta \cdot U_{aus}$$

auf. In dieser Gleichung treten A_0 und Z_{aus} gar nicht auf. Auf der linken und der rechten Seite des Gleichheitszeichens kann δU eliminiert werden, so dass wir erhalten

$$U_{in} = \beta \cdot U_{aus} .$$

Das Ergebnis dürfte überraschen, da jetzt die effektive Verstärkung ausschließlich durch β bestimmt wird. Damit eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten, vor allem deshalb, weil bei Röhrenverstärkern diese beiden Größen ziemlich variabel sein und Anlass zu Verzerrungen geben können. Tiefergehende Analysen zeigen, dass die Differenz- und Summationsschaltkreise für einen guten Erfolg dieses Konzepts von ausgesprochen hoher Qualität sein und mit großer Regelgenauigkeit arbeiten müssen – und dies über einen extrem breiten Frequenzbereich. Das letzte Wort zu diesem Fehlerkorrektur-Konzept ist noch nicht gesprochen und ich hoffe, dass viele Interessierte sich damit beschäftigen werden. Ich sehe ausreichend Möglichkeiten, diesen Entwurf im Zusammenhang mit Röhrenverstärkern erfolgreich einzusetzen.

Wer sich tiefergehend mit der Materie auseinandersetzen möchte, den möchte ich auf die allgemeine Untersuchung dieser interessanten Methode durch Malcolm Hawksford hinweisen:
Hawksford M.J.: "Distortion correction in audio power amplifiers", JAES, Vol.29, S. 27-30, Jan/Feb 1981.

Kapitel 7
Der Bau eines Prototyps

In diesem Kapitel werden einigen Themen angesprochen, die dann zu berücksichtigen sind, wenn man mit der Entwicklung und dem Bau des Prototyps eines neuen Verstärkerkonzepts beginnen möchte. Die meisten Dinge sprechen für sich selbst, aber dennoch scheint es wichtig, dies kurz dazustellen, weil man immer wieder mit den gleichen oder ähnlichen Problemen zu tun haben wird. Wir gehen von der Situation aus, dass man bei der Konzeption des Schaltplanes alles bedacht und durchgerechnet, eventuell sogar mit PSpice eine Simulation durchgeführt hat. Wir wollen hier unseren Schwerpunkt auf die praktische Realisation richten.

7.1 Mit einer gedruckten Schaltung zu beginnen, schränkt zu sehr ein

Nach meiner Erfahrung ist der sicherste Weg, mit Lötleisten und freier Verdrahtung einzusteigen. Ein Aufbau auf einer Platine birgt den Nachteil, dass die Bauteile und ihre Anordnung festliegen und wenig Möglichkeit für Schaltungsvariationen und Experimente besteht.

7.2 Montagestationen

Zunächst müssen die Röhrensockel, die Transformatoren und große Elkos auf einem großzügig bemessenem Chassis Platz finden. Anschließend werden die Heizungszuleitungen verlegt. Es folgen Netzschalter und Netzsicherung. Im nächsten Schritt wird die Hochspannungsversorgung installiert. Über den Anschlüssen der Hochvoltelkos werden sicherheitshalber Entladewiderstände montiert, so dass sich die Kondensatoren nach dem Ausschalten schnell auf ungefährliche Spannungen entladen können und man gefahrlos experimentieren kann.

7.3 Erdung

Ganz wichtig ist, das Chassis zu erden. Dieses muss unbedingt mit Erde des Lichtnetzes verbunden werden. Die Signalmasse kann man zwar mit verschiedenen Punkten des Chassis verbinden, was allerdings in den meisten Fällen zu unangenehmen Brummschleifen führt. Sehr viel besser ist es, für die Signalmasse einen einzigen Verbindungspunkt zum Chassis zu wählen, und von dort aus die notwendigen Masseleitungen zu den einzelnen Stufen isoliert zu verlegen (Sternmasse).

7.4 Erster Betrieb ohne Gegenkopplung

Zunächst sollte der Verstärker ohne Gegenkopplung betrieben werden. Dabei wird seine grundsätzliche Arbeitsweise überprüft, indem die Ausgangsleistung, das Klirrverhalten und die Phase zwischen Ein- und Ausgangssignal überprüft werden. Erst dann wird die Gegenkopplung angeschlossen. Damit wird verhindert, dass Fehler, die durch die Gegenkopplung verdeckt werden, unentdeckt bleiben.

7.5 Interne Verkopplungen

Es ist unbedingt darauf zu achten, dass Eingang und Ausgang des Verstärkers so weit als irgend möglich voneinander entfernt angeordnet werden.

7.6 Logisches Aufbaukonzept

Die Bauteile müssen in der Weise angeordnet werden, dass sie dem Signalweg folgen. Unerwünschte Schwingneigung des Verstärkers wird damit von vorneherein wirksam unterbunden.

7.7 Messungen in den einzelnen Stufen

Jede Verstärkerstufe muss einzeln in Hinblick auf maximale Aussteuerung und Verzerrung ohne Gegenkopplung messtechnisch überprüft werden, um sicher zu stellen, dass nicht schon in den Vorstufen unerwünschte Signalbegrenzungen auftreten.

7.8 Anschließend: Gesamtüberprüfung von Ein- zu Ausgang

Die Ausgangsleistung, der Frequenzbereich, die Ausgangsimpedanz und der Open-Loop-Verstärkungsfaktor werden zuerst ohne Gegenkopplung gemessen. Anschließend führen wir die gleichen Messungen mit Gegenkopplung durch. Wenn diese korrekt arbeitet, dann muss in allen Messungen der Faktor $(1 + \beta A_0)$ auftreten. Sollte diese nicht der Fall sein, dann tritt unter Umständen eine unerwünschte Phasendrehung auf, die aus der Gegenkopplung eine Mitkopplung macht.

7.9 Stabilität

Die Überprüfung des Frequenzbereiches darf sich nicht auf den Bereich zwischen 20Hz und 20kHz beschränken, sondern muss von einigen Hertz bis in den MHz-Bereich hinein erfolgen. Niederfrequent lässt sich auf diese Weise leicht überprüfen, ob die Eckfrequenzen der Koppelkondensatoren und die Primärimpedanz des Ausgangsübertragers ausreichend aufeinander abgestimmt sind und keine tieffrequente Oszillation auftritt (Motorboating). Im hochfrequenten Bereich wird zu kontrollieren sein, ob keine zu unerwünschtem Überschwingen führenden Resonanzen auftreten. Meistens werden solche Überschwinger durch den Ausgangsübertrager verursacht. Verhindern lässt sich das durch Einfügung eines Tiefpassfilters 1. Ordnung in einer der vorhergehenden Stufen der Verstärkerkette. Selbst bei kapazitiver Belastung muss der Verstärker stabil arbeiten. Um dies zu überprüfen, verwende ich einen 8Ω-Lastwiderstand mit parallel geschaltetem 1µ-Kondensator, um einen elektrostatischen Lautsprecher zu simulieren.

7.10 Hörtests

Nachdem alle wichtigen technischen Eigenschaften überprüft worden sind, folgt ein ausgiebiger Hörtest. Wenn die erste Freude über das Funktionieren und den freien Klang verflogen ist, sollte man etwas Abstand gewinnen und den Hörtest mit einer Gruppe erneut durchführen. Dieser Vorgang wird einige Zeit in Anspruch nehmen, die anfängliche Euphorie muss nach vier Wochen immer noch spürbar sein. Meist beginnt erst ab diesem Zeitpunkt die wirklich kritische Evaluation, die sorgfältige Überprüfung, ob der Entwurf auch optimal gelungen ist.

7.11 Der Optimierungszirkel

Nach meiner persönlichen Erfahrung bildet sich nach ausführlichen Hörproben eine kreisähnliche Aktivität, bei der jeder Bestandteil des Verstärkers nochmals einer kritischen

Betrachtung unterzogen wird. Alle Einzelheiten werden aufs Neue genauer unter die Lupe genommen, eventuell werden Schaltungsteile noch etwas korrigiert – der gesamte Entwurfsprozess wird gewissermaßen noch einmal durchlebt. Und was ist das Endresultat? Man wird sehr wahrscheinlich wieder dort ankommen, wo man begonnen hat. Folglich könnte ich annehmen, dass man sich diesen ganzen Aufwand hätte sparen können, er hat kaum Ergebnisse erbracht und war zudem ausgesprochen zeitintensiv.
Über dieses Problem habe ich lange nachgedacht und komme doch immer wieder zu dem Schluss, in genau dieser (kreisähnlichen) Weise zu arbeiten, weil ich nur dann wirklich sicher sein kann, dass ich meine „Hausaufgaben" zu aller Zufriedenheit erledigt habe. Geht es um den optimalen Verstärker oder meine innere Sicherheit? Ich denke, es geht um das Letzte.

7.12 Was folgt?

Der Entwurf wurde sorgfältig untersucht, ausgiebigen Hörtests unterworfen und für gut befunden. Erst jetzt ist es sinnvoll, über die Entwicklung einer Platine nachzudenken, über den Einkauf und die Erhältlichkeit von Bauteilen, Preiskalkulationen durchzuführen und ähnliche Dinge mehr. Jetzt beginnt der Prozess der Professionalisierung und es werden Entscheidungen geschäftlicher Natur zu treffen, Designfragen zu klären sein usw. Im folgenden Kapitel werden wir auf diese Probleme näher eingehen.

Kapitel 8
Geschäftliche Fragen

In diesem Kapitel werde ich auf geschäftliche Fragen und Vermarktungsaspekte eingehen. Wie hoch sind die Kosten, wie hoch mein Gewinn, reicht er aus, um meine Familie zu ernähren usw.? Ausgangspunkt aller diese Erwägungen ist der Wunsch, den entwickelten Verstärker auf den Markt zu bringen, zu verkaufen und natürlich auch einen Gewinn zu erwirtschaften. Bei solchen betriebsmäßigen Aktivitäten spielen die folgenden Überlegungen eine zentrale Rolle.

8.1 Investition von Zeit

Um einen Verstärker zu entwickeln und auf den Markt zu bringen, muss sehr viel Zeit investiert werden. Ist die zur Verfügung stehende Zeit ausreichend?

8.2 Investitionen in die Hardware

Es muss ein Chassis hergestellt, Bauteile müssen auf Vorrat eingekauft werden, es muss dafür ausreichend Lagerraum vorhanden sein. Folglich muss Geld investiert werden. Ist überhaupt ausreichend Kapital vorhanden?

8.3 Vertriebskanäle

Angenommen, meine Verstärker stehen in einer sicheren Kiste sorgfältig verpackt, sie arbeiten zuverlässig, an alles ist gedacht. Auf welchem Wege soll der Verstärker nun in den Handel kommen? Vertreibe ich die Geräte selbst, über einen Zwischenhandel, über das Internet oder über HiFi-Geschäfte im Lande? Alles das hat Einfluss auf die Preisgestaltung und die verkaufte Menge.

8.4 Möglicher Umsatz

Wieviel Verstärker können vernünftigerweise verkauft werden? Ist die kalkulierte Verkaufsmenge realistisch oder basieren die Zahlen mehr auf Annahmen und Hoffnungen? Stehen Investitionen und erwarteter Umsatz in einem gesunden Verhältnis?

8.5 Der Zwischenhandel

Auch der Handel muss auch Geld verdienen, üblicherweise rechnet man mit 50% des letztendlichen Verkaufspreises. Natürlich kann ein Handelsvertreter nicht umsonst arbeiten. Wieviel Zeit muss ich selbst aufbringen, um den Verkauf zu fördern oder bin ich bereit, Verkaufsförderung umsonst zu betreiben?

8.6 Zeitvorgaben

Wie lange dauert es vom anfänglichen Entwurf zum endgültigen, verkaufsfertigen Produkt? Wie bestreite ich in der Zwischenzeit meinen Lebensunterhalt?

8.7 Entwickler oder Geschäftsmann?

Betrachte sehr genau Deine eigenen Fähigkeiten: Bist Du ein Schaltungsentwickler oder eher ein Verkäufer, ein Geschäftsmann oder alles zusammen? Vor allem meine starken Eigenschaften muss ich kultivieren und für die schwächeren muss ich jemand anders

beauftragen. Auch das kostet wieder Geld, aber es eröffnet vielleicht den Weg zum Erfolg. Eine gesunde Selbsteinschätzung halte ich für besonders wichtig.

8.8 Werbung

Wie lege ich jedem nahe zu glauben, dass mein Verstärker ein Gottesgeschenk für die gesamte Menschheit ist? Normalerweise muss man dazu konventionelle Werbung betreiben, andererseits kann eine informativ gestaltete Website gleichfalls zu überzeugenden Erfolgen führen, wie ich aus eigener Erfahrung bestätigen kann. Ebenso erfolgversprechend sind an Audio-Magazine gesendete Presseberichte. Worauf es in jedem Falle ankommt ist, genügend Aufmerksamkeit zu erregen. Soll ich auf Fachmessen ausstellen? Gibt es Audio-Vereinigungen, bei denen ich meine Geräte demonstrieren kann, oder soll ich Aktionstage in meinem eigenen Betrieb veranstalten und dazu auch die Presse einladen?

8.9 Vorteile herausstellen

Warum ist gerade Dein Verstärker etwas Besonderes? Welche fantastischen Eigenschaften weist er auf, so dass ein Kunde nicht umhin kann, genau dieses Gerät zu kaufen? Wie schneidet mein Verstärker im Vergleich zu anderen auf dem Markt ab? Liefere ich für das Geld mehr oder weniger als meine Konkurrenten? Welche besonderen Merkmale meines Gerätes will ich gegenüber der Presse und in der Werbung betonen?

8.10 Wirkung auf Kunden

Kunden sehen nicht nur allein ein Foto des Verstärkers oder den Verstärker selbst. Sie nehmen gleichzeitig den Hersteller, seinen Betrieb und was dahinter steht, die Zuverlässigkeit und Solidität, mit der ein Hersteller arbeitet, wahr. Nach Gründung einer neuen Firma dauert es oft viele Jahre, bis man einen guten Namen erlangt und hoffentlich als solide und zuverlässig anerkannt wird. Darauf hat vieles einen Einfluss, ein paar Punkte möchte ich nennen: Persönliche Ausstrahlung, das Produktselbst, die Betriebsräume, das Auto, deine Fähigkeiten, Kontakte zu knüpfen, der Produktionsort, deine Mitarbeiter, die Kleidung, das Firmenlogo, Briefpapier und Visitenkarten, die Art und Weise, wie man ein Telefonat entgegennimmt, dein Briefwechsel, deine Ruhe oder Ausgeglichenheit usw....

8.11 Service und Kundendienst

Selbstverständlich geht dein Verstärker nie kaputt. Wenn etwas nicht funktioniert, dann liegt es sicher an den Bauteilen oder an den Röhren. Allerdings interessiert es den Kunden überhaupt nicht, worin die Ursache des Fehlers liegt. Er oder sie weiß nur, dass der Verstärker nicht läuft, und das macht den Kunden sehr unruhig, da er viel Geld ausgegeben hat. Daraus ergibt sich: Wie sind Service und Kundendienst organisiert? Wie zügig kann das Problem gelöst werden, gibt es Garantie, wer zahlt und wieviel Zeit wird für eine Reparatur erforderlich sein?

8.12 Die Lebensdauer eines Gerätes und Folgeaktionen

Was muss ich unternehmen, dass einem Modell ausreichend lang Aufmerksamkeit zukommt? Ich möchte ein Beispiel geben: Mein UL40-S2- Bausatz wird vielleicht noch einige Jahre aktuell sein, danach wird das Interesse abnehmen. Der Verkauf wird nach einiger Zeit zurückgehen, und das liegt eigentlich nicht in meinem Sinne. Was kann ich tun, um für den

Verstärker wieder Aufmerksamkeit zu wecken? Bei diesem Modell habe ich mich für das Angebot schaltungstechnischer Modifikationen entschieden, mit denen der Verstärker schrittweise aufgewertet werden kann. Meine Kunden können für wenig Geld Zusatzmodule erwerben, mit denen sie diesen Verstärker verbessern können. er wird qualitativ hochwertiger und die Kunden sind wieder ausreichend beschäftigt. Welche Ideen hast Du, um das Interesse an deinem Gerät wachzuhalten, um den Verkauf nicht beenden zu müssen? Bringe neue Produkte auf den Markt, beispielsweise einen Vorverstärker oder eine CD-Spieler oder....

8.13 Brauche ich Partner?

Kann ich alle notwendigen Aufgaben allein erledigen? Wenn nicht, muss ich mit Partnern zusammenarbeiten, vielleicht sogar mit solchen, die bereit sind zu investieren. Wie dem auch sei, bei jeglicher Zusammenarbeit gibt es Positives und Negatives. Ausgesprochen wichtig sind dann gute, gemeinsam getroffene Absprachen, die übrigens nicht statisch sein müssen. Der Markt und die Gesellschaft entwickeln sich ständig weiter, die Zusammenarbeit folglich auch. Ich arbeite mit Verträgen, und wenn sich etwas ändert, dann werde ich entsprechende Änderungen durchführen. Alles ist schwarz auf weiß festgehalten und das ist auch gut so, denn sonst kann es mir selbst passieren, dass ich vergesse, wie dies oder jenes im Einzelnen abgesprochen war.

8.14 Merkmale der Ökonomie

Die wirtschaftliche Entwicklung schwankt, wie wir alle wissen. Vor allem im Abschwung werden wir mit Investitionen vorsichtig, die Kunden kaufen weniger, sind viel weniger bereit, Geld auszugeben. Beobachte z.B. in der gegenwärtigen Rezession einmal, wie es auf dem Automarkt aussieht. Wie positionierst Du dann preislich dein Produkt, das an sich schon relativ teuer ist? Dann wirst Du in solchen Zeiten sicher weniger verkaufen. Oder vertreibe ich dann eher günstigere Produkte, die nicht so extrem teuer sind, wie z.B. meine Modifikationsangebote.

8.15 Was macht die Konkurrenz?

Es gibt eine ganze Reihe von Herstellern, die Audioverstärker anbieten, auch solche, die Röhrenverstärker produzieren. Wie gelingt es denen, Gewinne zu erwirtschaften und was haben sie dafür eingesetzt?

8.16 Nur im Inland oder in der ganzen Welt?

Die Frage an sich ist einleuchtend. Meistens beginnt man mit einem kleinen Vertrieb, kommt dann das Ausland als Ansatzmarkt hinzu, dann passiert etwas Besonderes. Plötzlich entdeckt man, wie schwierig Kommunikation sein kann, wie auch alles andere schwieriger wird, weil naturgemäß die Distanz zwischen Hersteller und Kunde extrem groß geworden ist. Dann kann ich nicht gerade eben mal vorbeikommen, um ein Problem zu lösen. Angenommen, ich habe eine ausreichende Repräsentanz meines Geschäftes organisiert. Wie kann ich hinlänglich unterstützen, so dass etwaige Probleme vor Ort gelöst werden können? Welche Absprachen existieren mit meinen Geschäftspartnern, die mein Produkt anbieten, ist die Kommunikation sichergestellt? Das ist offenbar ein neues, ein fremdes Gebiet, das eigentlich wenig mit Elektronik zu tun hat, aber all das bestimmt, ob das Produkt auch im Ausland verkauft werden kann.

8.17 Kosten

Alles hat seinen Preis, und du wirst budgettieren müssen, überprüfen, ob du alles allein finanzieren kannst oder Kredite benötigst. Banken wollen dann einen sehr genauen Geschäftsplan haben (was übrigens sehr hilfreich ist), und außerdem wollen die Banken auch Geld verdienen. Auch wenn all diese Punkte oft klar und eindeutig erscheinen, kann ein überlegtes Geschäftsmodell ein finanzielles Debakel verhindern.

8.18 Fabrikationsstätte

Kann ich alle Geschäfte von meinem heimischen Studierzimmer aus erledigen, oder benötige ich ein Firmengebäude? Wo darf das Gebäude stehen, etwa in einem Industriegebiet, oder will ich eher im Zentrum einer Stadt arbeiten, in einem angemessen gestalteten Verkaufsraum? Will ich in dem Gebäude auch Kunden empfangen, kann man meinen Betrieb leicht finden, ist es ein ansprechendes Gebäude und...? Und schon wieder ein nachvollziehbares Problem, das gelöst werden muss!

Zusammenfassung

Es konnten natürlich nicht alle Punkte erschöpfend behandelt werden. Das Ziel war zu zeigen, dass die Fähigkeit, gute Verstärker zu entwerfen, allein nicht ausreicht, um erfolgreich Geschäfte zu tätigen. Wenn Geld ins Spiel kommt, sind weitere Anstrengungen unterschiedlichen Ausmaßes erforderlich. Immer auch besteht die Frage, ob ich alles alleine kann und tun muss. Daher auch meine Einsicht, dass ich speziellen Bereichen nicht allein fachkundig sein muss, zuvörderst aber muss ich meine Stärken und Fähigkeiten genau erkennen.

Kapitel 9
Eine ganzheitliche Betrachtung

In diesem letzen Kapitel wird der Mensch mit seinen Emotionen, seinem Herzen, und seiner Persönlichkeit im Mittelpunkt stehen. Die Sichtweise, die hier anklingt, versteht den Menschen als ein lebendiges Wesen mit Träumen und Zielen, nicht als seelenlose Maschine.

9.1 Was sagt das Herz?

Es wird davon zu sprechen sein, dass ich als Entwickler fleißig damit beschäftigt bin, neue Verstärker zu entwerfen. Ich persönlich nenne diesen Vorgang immer „den Traum“. Ich habe auf die eine oder andere Weise in meinem Herzen und in meinem Gefühl und im Denken ein Bild vor mir von einem Produkt, das zu erschaffen möglich ist. Entweder, dieses Produkt existiert noch nicht, oder ich möchte etwas Vorhandenes verbessern. Ich erschaffe etwas aus dem „Nichts“. Und doch existiert von diesem „Nichts“ bereits ein Bild: Der Verstärker soll diese oder jene Eigenschaften aufweisen, er soll so und so aussehen, dieses Design besitzen und in einer bestimmten Weise klingen.
Denk einmal nach – wie ist diese Vision entstanden? Irgendwo im Kopf, es ist eine Art Traum, ein Herzenswunsch. Und weil es aus dem Herzen kommt, bist Du von dem Vorhaben begeistert und bereit, Energie aufzuwenden, um genau dieses Projekt zu realisieren, „dein Kind“ zu erschaffen.

Ist es dann überraschend, dass du zufrieden bist, wenn Dein Vorhaben geglückt ist? Oder dass Du verärgert bist, wenn jemand dein Ergebnis nicht sieht oder erkennt oder sogar zunichte macht? Die starken emotionalen Reaktionen allein aber zeigen schon, wie Dein Schaffen und Du selbst miteinander verwoben sind. Dein Verstärker ist keine tote Sache, keine nur leblose Materie, er ist angefüllt mit Deinem Schaffensdrang und mit Deiner Energie.

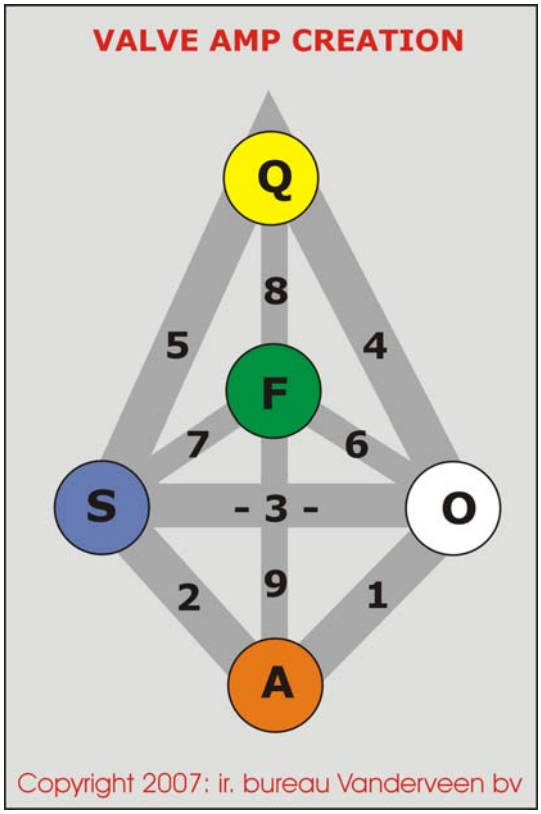
Wenn solche Träume nicht existieren, dann entsteht ein völlig anders Produkt. Wenn jemand Dir den Auftrag erteilt, etwas zu machen, was ganz und gar nicht mit deinem Gefühl übereinstimmt, dann distanziere Dich davon, lehne es womöglich sogar ganz ab.

Eine kurze Geschichte als anschauliches Beispiel: Einer meiner Studenten kommt zu mir mit dem Plan, einen Betrieb aufzubauen, in dem er Röhrenverstärker zu produzieren gedenkt. Wir sprechen über geschäftliche Angelegenheiten (s. Kapitel 8) und im Verlauf unseres Gespräches blickt er immer verdrießlicher drein. Ich bemerke, dass ihm die Energie verlorengeht, und ich frage: „Was willst Du eigentlich genau machen? Wie soll das Produkt aussehen, welche Röhren sollen Verwendung finden?“ Sogleich merkt er auf, seine Augen beginnen zu leuchten und enthusiastisch beginnt er, von seinem Traum zu erzählen, stundenlang kann er davon berichten. Nach einer gewissen Zeit beende ich seine Ausführungen und sage zu ihm: „Fühlst Du jetzt Deine neuen Energien, bemerkst Du Deine Begeisterung?“ Anschließend lege ich ihm nahe, dass seine erste geschäftliche Aktion das Erkennen seines Traumes sein muss, er buchstäblich aufgehen muss in Visionen und Phantasien. Erst, wenn ihm der Traum bewusst geworden ist, erst dann können weitere Überlegungen gewerblicher Art folgen.

Das bedeutet: Wenn Du kreativ tätig sein willst (Entwickeln *ist* ein äußerst kreativer Vorgang), dann wird Dein Traum eine Erleuchtung sein. Alles, was zusätzlich vonnöten ist, ergibt sich aus Deiner Vision und umgekehrt.

9.2 Denken und Handeln in Sphären

Die folgende Figur verwende ich gern, um den angesprochenen kreativen Prozess zu verdeutlichen. Dieses Bild basiert auf einem kabbalistischen, mystischen Ansatz des Schaffensprozesses. Ich habe das Modell hier etwas vereinfacht, um die Sache nicht unnötig kompliziert zu machen, sondern um den kreativen Prozess zu veranschaulichen.



Modell des kreativen Schaffensprozesses

Jeder der Kreise verkörpert eine bestimmte Eigenschaft oder eine Handlung, stellt nichts Anderes als eine Ansammlung von bestimmten Merkmalen dar.

Die Kreise O und S verkörpern uns selbst, dabei zielt O auf unsere objektiven Eigenschaften und Merkmale, S dagegen auf unsere subjektiven Eigenschaften. Denke bei O z.B. an Messen und Löten, denke bei S an Hören, Genießen und Fühlen.

Der Kreis A symbolisiert das Produkt, unseren Traum, den endgültigen Verstärker (A = Amplifier).

Ganz oben in der Figur befindet sich das Q. Damit meine ich die Quelle der Inspiration, unseren Traum, der durch etwas Außergewöhnliches genährt wird. Wir wollen ja etwas Neues schaffen und höchsten Qualitätsansprüchen genügen (Q = Quality). Woher stammt die hohe

Qualitätsanforderung, warum wollen wir das erfüllen, warum wollen wir etwas Neues, etwas Besseres erschaffen? Manche Menschen glauben, das sei ein Urtrieb des Menschen, andere behaupten, solche Ziele seien göttlichen Ursprungs, wieder andere...

In der Mitte finden wir noch einen weiteren Kreis, mit dem Buchstaben F bezeichnet. Dessen Bedeutung wird sofort deutlich.

Anhand eines Beispiels möchte ich zeigen, wie das gesamte Modell den kreativen Schaffensprozess verkörpert. Dabei erhebe ich keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit, es geht vorrangig nur darum, sich auf eine bestimmte Weise damit auseinanderzusetzen.

Du hast den Traum Q, der das Handeln (O) und das Gefühl (S) hervorruft und damit die Stimulans, den Verstärker (A) zu schaffen. Die Verbindungspfade 1, 2, 4 und 5 sind geöffnet, und darüber strömen Energie, Aktivität und Intensität. Als bewusst handelnder Mensch steht auch der Weg 3 offen, denn du bist objektiv und subjektiv in Dir selbst vereinigt und hörst in beide Richtungen.

Du arbeitest intensiv an Deinem Verstärker und es entsteht ein phantastisches Produkt. Alles verläuft wunschgemäß, und Dein Ergebnis könnte vermarktet werden. Aber es kann auch schlecht laufen in der Weise, dass Du ein messtechnisch und klanglich zwar hervorragendes Produkt hergestellt hast, aber Du gleichzeitig spürst, dass irgendetwas nicht stimmt. Diese Form der Sensibilität nenne ich ein tiefes, inneres Fühlen und Wissen, das im Modell mit dem Buchstaben F (F = Deep Feeling) symbolisiert wird. Das F weist Dich darauf hin, exakt die Erscheinungen zu beachten, die Du mit Messungen nicht ergründen und mit Hören nicht erkennen kannst. Das fühlende F nähert Dich Deiner Schöpfung auf eine andere, nicht messbare, nicht vordergründig fühlbare Weise, sondern nur als in der Tiefe spürbar. Aufgrund dessen entscheidest Du Dich, doch noch weitere Messungen durchzuführen, noch einmal genau und intensiv zu hören oder vielleicht einen Marken-Kondensator eines bestimmten Herstellers einzusetzen. Die Verbindungslinien 6, 7, 8 und 9 kommen jetzt in Aktion. Sie sind mehr verdeckt, als die anderen, Du erkennst das nicht so unmittelbar, Du kannst es auch nicht rational messend erfassen. Doch ich denke, dass die F-Pfade von allergrößter Bedeutung sind, um eine hohe Qualität Deines Produktes zu erreichen.

Ich möchte hinsichtlich dieses „F-Prozesses“ ein Beispiel anführen. Ich habe einen prächtigen Verstärker entwickelt, alle Überprüfungen wurden erfolgreich erledigt, er klang ausgesprochen überzeugend. Alles klar? Mitnichten, es blieb trotz allem ein Gefühl von Unbehagen. Die räumliche Abbildung der Musik bleibt schwammig, undifferenziert, unendlich, wenig durchsichtig, nicht offen genug. Ich war zu diesem Zeitpunkt nicht in der Lage, die eigentliche Ursache herauszufinden, und schließlich fest davon überzeugt, dass mein eigenes Produkt mitnichten die Bezeichnung „High End“ verdiente. Selbst nach Monaten des sich Abmühens war ich weit davon entfernt, den Grund für den schlechten Klang herauszufinden. Bis ich eines Tages den Verstärker vor mir auf den Boden stellte, nichts weiter mehr nachmessen und auch nichts mehr hören mochte. Ich betrachtete und berührte das Gerät. Meine Aufmerksamkeit richtete sich in diesem Moment auf die Eingangsverdrahtung, und als ich genauer hinschaute, bemerkte ich, dass ich einen qualitativ

minderwertigen Schaltdraht benutzt hatte. Ich erkannte schwarze Punkte auf der Oberfläche des verwendeten Silberdrahtes, die offenbar durch Oxydation entstanden waren. Nachdem ich die Verbindung durch hochqualitativen Silberdraht ersetzt hatte, klang plötzlich der Verstärker so, wie er klingen sollte: Räumlich, offen, alle Details abbildend. Das fühlende Herangehen an das Problem und meine sensible Aufmerksamkeit hatten mir den Weg zu einer Lösung gewiesen.
Ich könnte natürlich noch weitere solcher Beispiele berichten. Gegenwärtig jedenfalls gehe ich bewusst den Weg der sensiblen Einfühlung. Es ist eine brauchbare Methode geworden dann, wenn das Messen und das Hören allein nicht weiterhelfen.

9.3 Deine eigene Persönlichkeit

Als Entwickler kannst Du intensiv beschäftigt sein, Deine Arbeit und Deine Kreationen genießen. Diesen Genuss kannst Du allein oder mit Freunden erleben, auch in Deinem kleinen „Kämmerlein“ oder sogar in einem vollständig ausgestatteten Laboratorium.
Sobald Du aber gewerblich tätig bist, erlangt Deine Persönlichkeit eine ganz besondere Bedeutung. Bist Du depressiv, dann klappt womöglich gar nichts, niemand wird Dir etwas abkaufen. Bist Du andererseits maßlos von Dir selbst überzeugt, wirkt das auf andere oft anstoßend und befremdlich.
Was ich damit sagen will, ist folgendes: Vor allem im geschäftlichen Bereich wirst Du als Mensch auf ganz unterschiedlichen Ebenen angesprochen, nicht nur Dein technisches Wissen allein ist maßgeblich. Wenn Deine Stärken allein im Entwickeln von Schaltungen liegen, dann zeige das auch. Bist Du dagegen ein guter Geschäftsmann, dann beweise, dass Du gut verkaufen kannst usw. Werde Dir über Deine Stärken und Schwächen bewusst.

9.4 Eine Herausforderung

Entwerfen von Verstärkern einerseits und gleichzeitig geschäftlich tätig sein andererseits stellt eine große Herausforderung dar. Du kannst vorher nie wissen, welchen Problemen Du im Einzelnen begegnen wirst, in jedem Fall ist das eine Herausforderung und Du betrittst ein unbekanntes Terrain, das es zu erkunden gilt, möglicherweise wird es auch eine Reise mit Unwägbarkeiten. Du kannst Dich damit auseinandersetzen, Warnungen beachten und genau solange an Dir selbst zweifeln, bis schließlich gar nichts mehr passiert.
Ich werde an dieser Stelle meine Überlegungen und die Ausbreitung meiner Betrachtungen beenden. Ich bin sehr zufrieden damit, dass ich alle die geschilderten Erfahrungen selbst erlebt habe. Bei manchen Herausforderungen bin ich grandios gescheitert – sei’s drum! Andere dagegen habe ich erfolgreich bestanden, so dass ich die Niederlagen unschwer wegstecken kann, und ich habe daraus auch viel gelernt. Wie dem auch sei – es ist *Dein* Traum, oder er ist nicht.