

Die meßtechnische Erfassung von Qualitätskriterien bei Leistungsverstärkern im Zusammenhang mit den klanglichen Eigenschaften der Geräte

Anselm Goertz ; Audio & Acoustics Consulting Aachen
 Robensstraße 62 ; D-52070 Aachen
<http://home.t-online.de/home/anselm.goertz/info.htm>

Beurteilung von Leistungsverstärkern

Grundlage dieses Artikels sind ausführliche Messungen an ca. 60 verschiedenen Endstufen für Audio-Anwendungen in allen Leistungsklassen. Neben diversen PA Verstärkern mit Leistungen von 500 Watt bis zu 12 kW waren auch einige Studio- und HiFi-Endstufen im Testfeld vertreten. Die Bewertung innerhalb der Tests basiert dabei auf den Meßergebnissen und einigen anderen Faktoren wie Betriebssicherheit, Verarbeitung, Servicefreundlichkeit und nicht zuletzt auch Wirtschaftlichkeit. Eine klangliche Beurteilung fand zunächst nicht statt. Andererseits führten abseits der Tests gemachte Hörversuche immer wieder zu teilweise verblüffenden und auch sehr widersprüchlichen Ergebnissen. Auf der einen Seite wird von deutlich vernehmbaren Klangunterschieden bei Endstufen berichtet, auch wenn sich alle Geräte meßtechnisch auf gleichem hohen Niveau befinden, auf der anderen Seite wird diesem Aspekt, wenn überhaupt, nur eine äußerst untergeordnete Rolle beigemessen. Letzteres wird in der Regel damit begründet, dass alle Arten von Frequenzgangfehlern und Verzerrungen bei Lautsprechern um Zehnerpotenzen höher liegen als bei Endstufen.

Im Folgenden soll daher der Versuch unternommen werden, die Messreihen im Zusammenhang darzustellen und ein Konzept für Hörvergleiche zu entwickeln sowie mögliche Ursachen für klangliche Unterschiede zu ergründen. Während aus meßtechnischer Sicht bereits umfangreiche Datensammlungen und Auswertungen vorliegen, befinden sich die Hörversuche noch in einem experimentellen Stadium. Wie weit sich die bisher getesteten Geräte meßtechnisch voneinander abheben, zeigen einige Beispiele. Es handelt sich hier nicht um insgesamt besonders positive oder negative Ausreißer, sondern lediglich um Endstufenmodelle, die sich besonders gut eignen, die Unterschiede bei bestimmten Messungen aufzuzeigen.

Lineares Übertragungsverhalten

Jede Endstufe wurde in den Testreihen zunächst in ihrem linearen Übertragungsverhalten gemessen. Die resultierenden Frequenzgänge wiesen im Hörbereich in der Regel nur kleine Abweichungen vom ideal geraden Verlauf auf, die sich aber dennoch in Größenordnungen bis zu 1,5 dB abspielten. *Abbildung 1* zeigt ein Beispiel für zwei Endstufen, deren unterschiedliche Hoch- und Tiefpaßfilter in den Eingängen einen Unterschied von 0,4 dB bei 20 kHz und 1,5 dB bei 30 Hz verursachen. Während bei der ersten Endstufe die Eckfrequenzen weit außerhalb des Meßbereiches oberhalb von 100 kHz und unterhalb von 2 Hz liegen, wird beim zweiten Modell der Audiobereich recht scharf abgegrenzt. Das findet bei tiefen Frequenzen seine Begründung im Schutz der Lautsprecher vor Infraschall und bei hohen Frequenzen zur Vermeidung transienter Verzerrungen in der Endstufe durch extrem steile Signalfanken sowie zur Unterdrückung hochfrequenter Einstrahlung. Insbesondere das extreme HP-Filter führt im noch relevanten Frequenzbereich gleichzeitig zu erheblichen Phasendrehungen und Laufzeiten, die klanglich nicht immer zu vernachlässigen sein dürften.

Größere Unterschiede waren auch durch den frequenzabhängigen Innenwiderstand der verschiedenen Endstufen zu beobachten. Während fast alle Schaltungskonzepte zu den hohen Frequenzen hin bei Belastung geringe Pegelverluste durch den ansteigenden Innenwiderstand verursachten, zeigten Endstufen mit Senseleitungen, welche die Gegenkopplung bis an die Lautsprecherklemmen bzw. sogar bis an den Lautsprecher führen, bisweilen einen gegenteiligen Effekt. Durch eine geringfügige Überkompensation

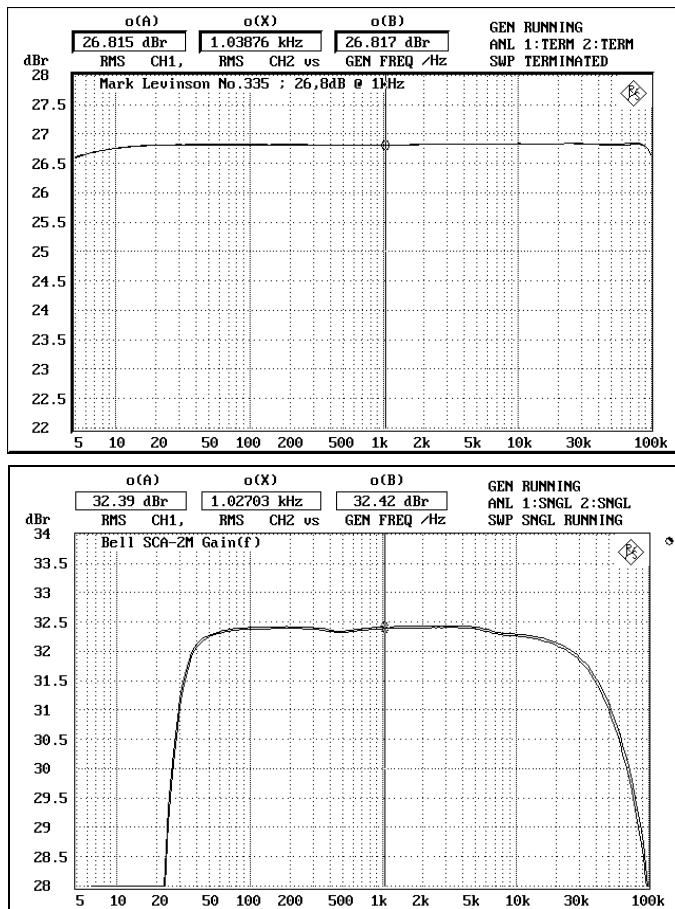


Abb.1 Frequenzgangmessung an zwei Endstufen

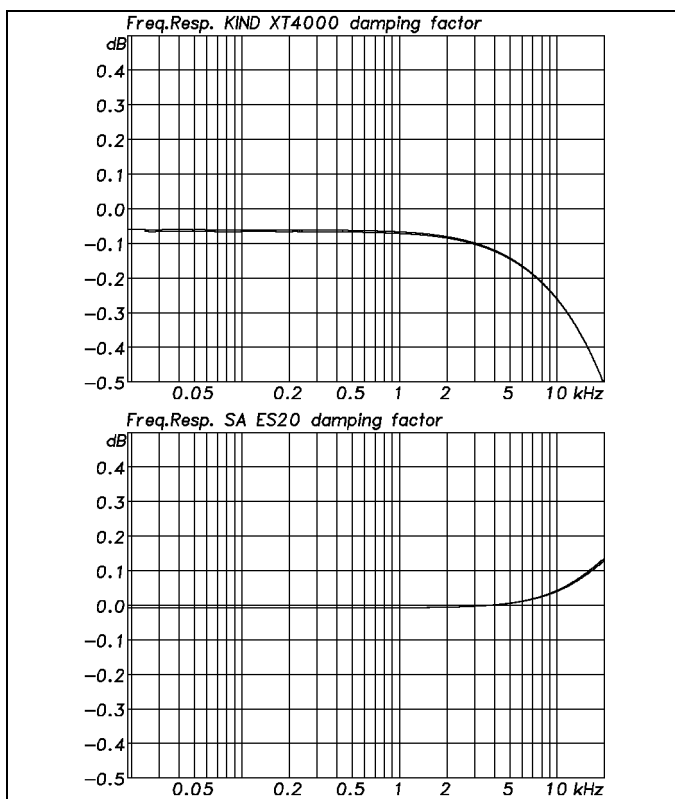


Abb.2 Pegeländerung an einer 4 Ohm Last gegenüber Leerlauf bei zwei verschiedenen Endstufen

entsteht in diesen Fällen ein virtueller negativer Innenwiderstand, der bei Belastung dann sogar zu einer Pegelerhöhung führt. Das Beispiel in *Abbildung 2* stellt die Änderung des Ausgangspegels von zwei Endstufen an einer 4 Ohm Last gegenüber der Leerlaufspannung dar. Die Differenz bei 20 kHz beträgt hier 0,6 dB. Aus vielen anderen Hörvergleichen weiß man, dass breitbandige Pegeldifferenzen auch in Größenordnungen von 0,5 dB und weniger für einen hörbaren Unterschied entscheidend sein können, so dass eine Endstufe mit einer, wenn auch minimalen Höhenbetonung, bei ansonsten gleichen Eigenschaften evtl. den Vorzug findet. Im Hörversuch stellt sich somit die Frage, wie weit solche Frequenzgangunterschiede mit zu bewerten oder auch vorab zu korrigieren sind.

Verzerrungswerte

Bei den Verzerrungswerten wurden die harmonischen Verzerrungen bei 1 kHz in Abhängigkeit vom Pegel und über der Frequenz bei konstantem Pegel 3 dB unterhalb der Clippgrenze gemessen. Weitere Meßreihen betrafen die transienten Verzerrungen, die Intermodulationsverzerrungen und die Differenttonverzerrungen, auf die hier nicht im Detail eingegangen werden kann. Die Bandbreite der Ergebnisse erstreckte sich dabei über einen sehr großen Bereich. Für die harmonischen Verzerrungen konnten bei den besten Geräten Werte von -100 dB und weniger gemessen werden, wogegen weniger gute Kandidaten Werte von lediglich -70 dB aufwiesen (siehe *Abbildung 3*). Betrachtet man den Klirrfaktor bei höheren Frequenzen, so fallen die Unterschiede von Fall zu Fall noch größer aus. Das Beispiel in *Abbildung 4* zeigt für den ersten Verstärker THD-Werte von -45 dB bei 10 kHz und für das Vergleichsmodell -85 dB bei der gleichen Frequenz.

Ähnlich kraß gestalteten sich die Ergebnisse bei den transienten Verzerrungen (siehe *Abbildung 5*), bei denen das Testsignal steile Rechteckflanken aufweist, wie sie vergleichbar bei kurzen Impulsen in Musiksignalen vorkommen. Auch hier finden sich zwischen den besten Vertretern und den eher mäßigen Modellen Unterschiede von über 30 dB.

Neben den transienten Verzerrungen haben sich die Klirrspektren als besonders aussagekräftig herausgestellt. Hier werden die Klirranteile einzeln aufgezeigt, so dass man neben der Grundwelle die Oberwellen mit ihrem Betrag sieht. Geradzahlige Oberwellen wirken sich im Höreindruck weniger kritisch als ungeradzahlige aus, und Oberwellen höherer Ordnung sind grundsätzlich problematischer als die niedrigen Ordnungen k2 oder k3.

Ein Beispiel zeigt *Abbildung 6*, wo deutlich zu erkennen ist, wie bei der oben abgebildeten Endstufe recht heftige Klirranteile auftreten, die allerdings zu höheren Ordnungen schnell kleiner werden. Der größte Anteil liegt bei den Verzerrungen 2.Ordnung mit -63 dB gegenüber der nächst höheren Oberwelle 3.Ordnung, die nur noch mit -73 dB auftritt. Sehr vorbildlich stellt sich die zweite Endstufe dar, deren Klirrspektrum in *Abbildung 6* unten dargestellt ist. k2 und k3 treten hier nur noch mit -92 bzw. -97 dB auf und die noch höheren Oberwellen verschwinden nahezu völlig mit Werten von -110 dB und weniger. Auch der Frequenzbereich unterhalb von 1 kHz ist in diesem Fall nicht völlig uninteressant, wo man hier sehr gut die Störeinflüsse aus dem Netzteil beobachten kann. Da das Nachladen der Siebelkos abhängig von ihrem Ladezustand in mehr weniger langen Pulsen im 100 Hz Takt erfolgt, sind die Störungen vom Netzteil stark mit Oberwellen behaftet, die sich dann im Ausgangssignal wiederfinden. Auch hier sollten die Einflüsse natürlich so gering wie möglich sein.

Leistungsverteilung

Für den Beschallungsbereich dürfte neben dem regulären Betrieb einer Endstufe noch von besonderer Bedeutung sein, wie sich eine Endstufe im Grenzbereich an der Clippgrenze oder auch darüber klanglich verhält. Wann diese Grenze erreicht wird, hängt natürlich von der maximalen Ausgangsleistung und hier primär von der Peakleistung ab. Da übliche Musiksignale stark impulsbehaftet

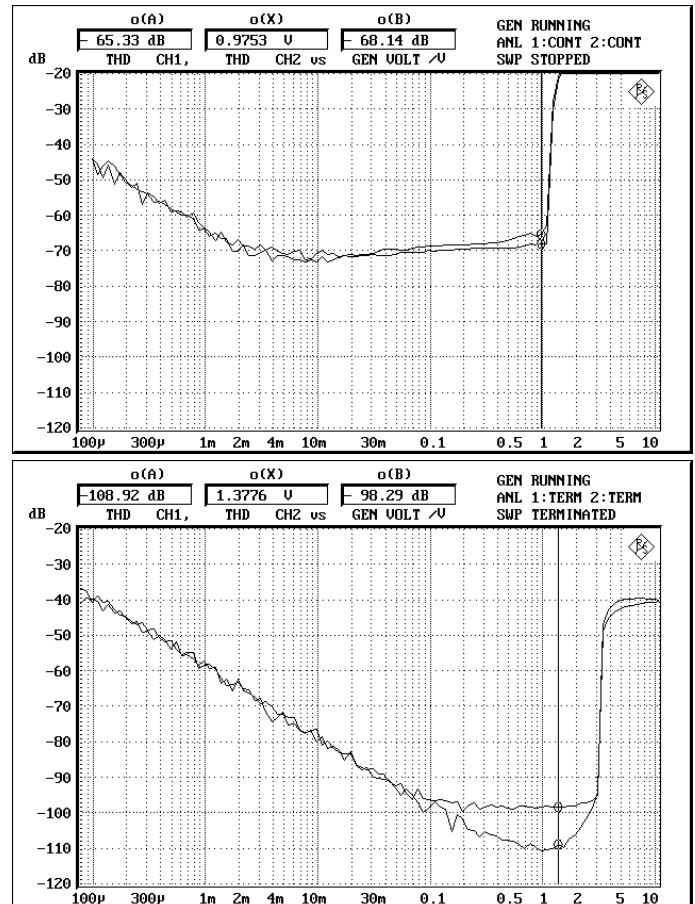


Abb.3 THD Werte bei 1 kHz für zwei verschiedene Endstufen aufgetragen über der Eingangsspannung in V (zwei Kurven pro Grafik für den jeweils linken und rechten Kanal einer Endstufe)

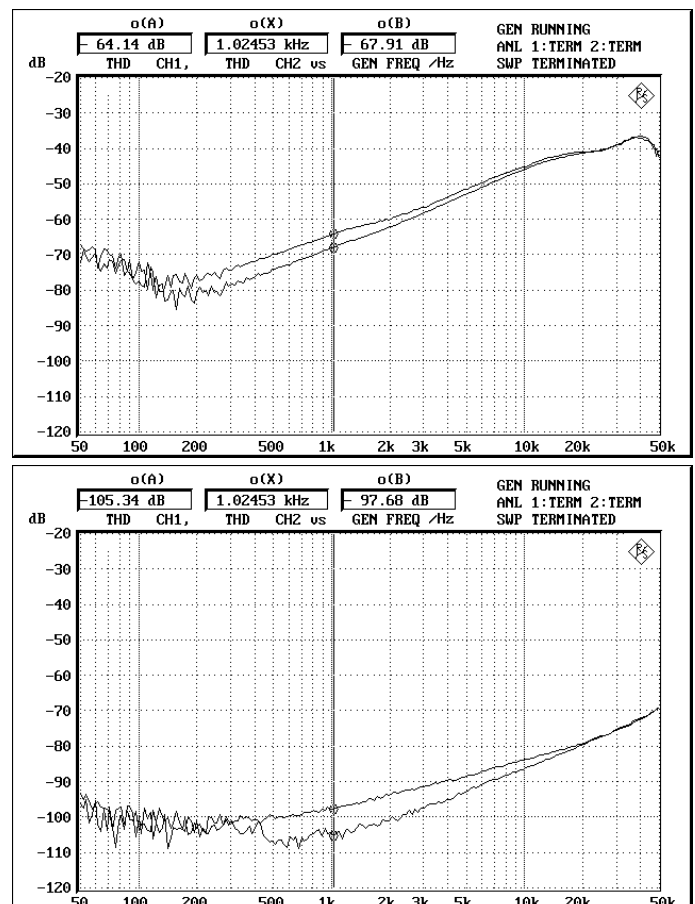


Abb.4 THD Werte über der Frequenz 3 dB unterhalb der Clippgrenze für zwei verschiedene Endstufen

sind, erreichen einzelne kurze Peaks immer zuerst das Limit der Peakleistung, lange bevor der Mittelwert des Signales die Endstufe an ihre Grenzen der Dauerleistung treibt. Dieses trifft selbst für stark komprimierte Signale in den Basskanälen aktiver Systeme zu. Als Maßstab für die unverzerrte Lautstärke, die ein Amp an einem entsprechenden Lautsprecher zu liefern in der Lage ist, sollte daher immer die Leistung bei 6, 12 oder sogar 18 dB Crestfaktor gelten.

Abbildung 7 zeigt eine Leistungsübersichten für zwei sehr unterschiedliche Endstufen an Belastungen von 2, 4, 8 und 16 Ohm bei Signalen mit Crestfaktoren von 3, 6, 12 und 18 dB sowie die absolute Peakleistung. Für die obere Endstufe läßt sich erkennen, dass die Leistung insbesondere bei niederohmigen Belastungen von 2 oder 4 Ohm recht große Unterschiede in Abhängigkeit von der Signalform aufweist. Die untere Endstufe verhält sich dagegen fast unabhängig vom Crestfaktor des Testsignals. Lediglich bei einem Sinussignal und einer 2 Ohm Last greift eine Strombegrenzung limitierend ein.

Bestimmt wird das Verhalten dieser beiden Endstufe primär durch deren Netzteile. Abbildung 8 verdeutlicht dieses Verhalten noch mit der Reaktion der Verstärker auf einen Sinusburst. Die oben abgebildete Endstufe verfügt über ein herkömmliches Netzteil mit einer recht hohen Spannung, so dass der Sinusburst zunächst auf über 150 Volt Spitzenspannung ansteigt und dann nach ca. 30ms zusammensinkt, wenn das Netzteil nicht in der Lage ist, den entsprechend hohen Strom für eine 4 Ohm Last über längere Zeit zu liefern. Sehr gut zu erkennen sind hier auch die 100 Hz Ladezyklen der Netzteilkelkos. Das andere Extrem stellt die untere Endstufe mit einem hart geregelten Schaltnetzteil dar, das die Spannung so lange wie möglich absolut konstant hält. Die Peakleistung dieser Verstärker liegt dann oft nur unwesentlich über der Dauerleistung.

Grundsätzlich sollte ein konventionelles Netzteil daher möglichst so ausgelegt sein, dass kurzzeitig sehr hohe Leistungen geliefert werden können, die aber nicht als Dauerleistung verlangt werden. Ein solches Verhalten kommt einer unverzerrten Wiedergabe von kurzzeitigen Impulsen sehr entgegen, wobei Netztrafo und Siebkondensatoren in vertretbaren Größenordnungen bleiben.

Wird die Clipgrenze überschritten, so tritt bei manchen Endstufen ein Peaklimiter in Aktion, der ein völliges Übersteuern der Schaltung vermeidet. Ohne diesen Schutz führt die Übersteuerung zu einem mehr oder weniger starkem Sättigungsverhalten der Halbleiter, das sich nur langsam wieder abbaut. Die Endstufe verzerrt damit nicht nur den eigentlichen zu großen Impuls, sondern auch noch für eine kurze Zeit danach jedes andere Signal. Den Cliplimitern kommt damit eine besondere Bedeutung auch in klanglicher Hinsicht zu, wenn eine Endstufe in ihrem Grenzbereich betrieben werden soll. Dass ein Limiter sauber begrenzen kann und trotzdem keinerlei Verzerrungen erzeugt, wenn er nicht in Aktion ist, zeigt das untere Endstufenmodell in Abbildung 3 und 5, wo die Verzerrungswerte beim Überschreiten der Clipgrenze auf einem geringen Level von -40 dB gehalten werden und unterhalb der Clipgrenze die Werte schlagartig auf -100 dB abfallen.

Höreindruck

Es stellt sich nun die zentrale Frage, wie gut eine Endstufe sein muß und welche meßtechnischen Unterschiede sich klanglich bemerkbar machen. Zweifelsohne sind z.B. die Frequenzgangabweichungen bei Endstufen um Dimensionen geringer als bei Lautsprechern. Ähnliches gilt für die Verzerrungswerte. Ebenso kann aber auch beobachtet werden, dass klangliche Unterschiede bei Endstufen in bestimmten Fällen hörbar und reproduzierbar sind. Für ein weiteres Vorgehen ist es nun wichtig zu wissen, wie diese verschiedenen Höreindrücke geprüft und verglichen bzw. bewertet werden können. Schon die erste Entscheidung, mit welchem Lautsprecher die Hörversuche gemacht werden könnten, liefert quasi unbegrenzten Diskussionsstoff. Der nächste Streitpunkt wäre der Abhörpegel. Leiser oder lauter abgehört würde der Lautsprecher

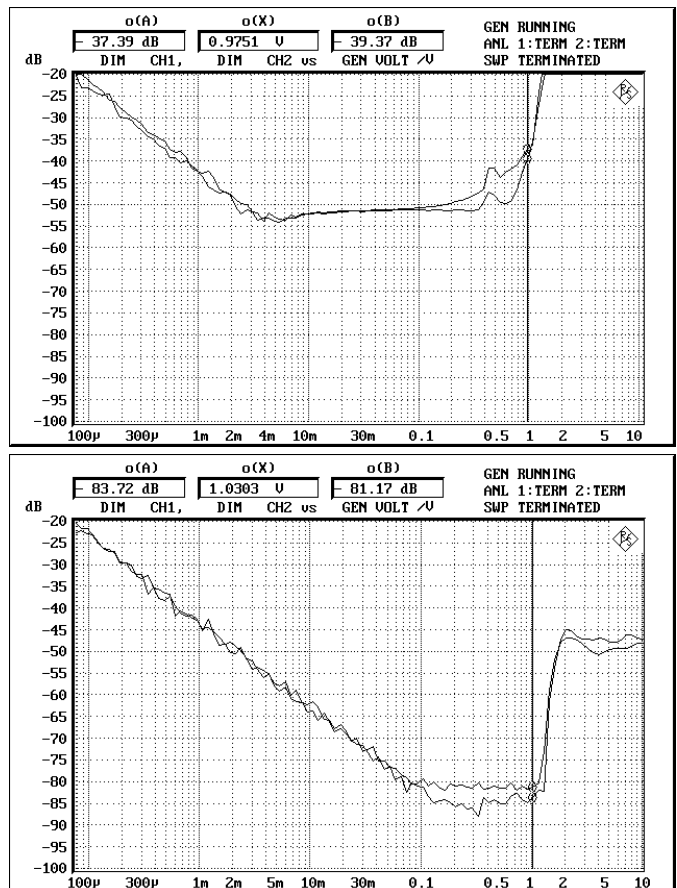


Abb.5 Intermodulationsverzerrungen DIM100 für zwei verschiedene Endstufen aufgetragen über der Eingangsspannung in V (zwei Kurven pro Grafik für den linken und rechten Kanal einer Endstufe)

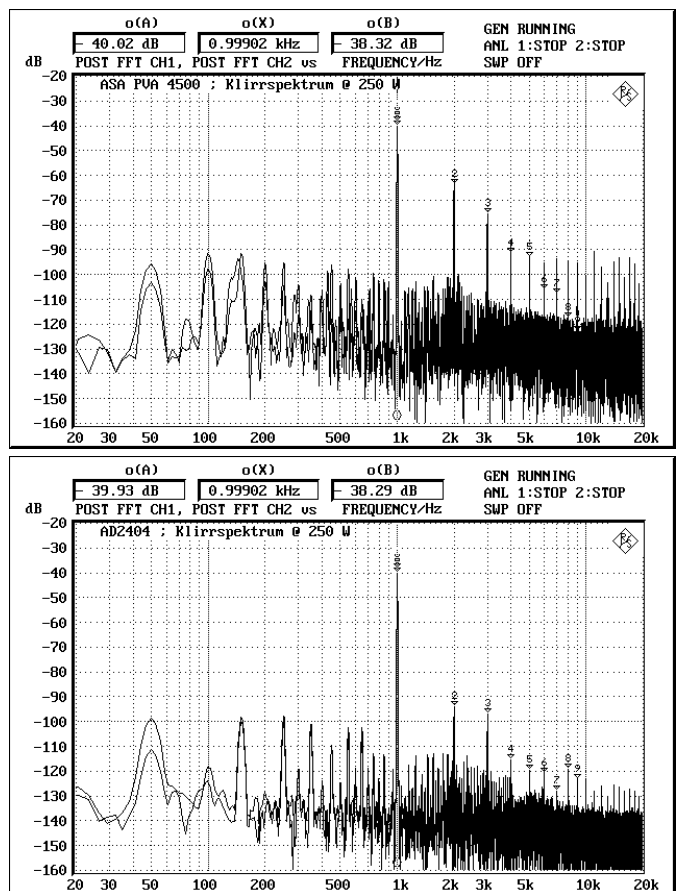


Abb.6 Klirrspektren für ein 1 kHz Signal an zwei verschiedenen Endstufen bei 250 Watt Ausgangsleistung an 4 Ohm Last (die 1 kHz Grundwelle ist jeweils um 40 dB gedämpft)

unterschiedlich klingen und den Eindruck verfälschen. Wählt man dagegen immer den gleichen Abhörpegel, würden kleine Endstufen benachteiligt, da sie hier womöglich schon an ihre Grenzen stoßen, wo andere Modelle gerade mal einen Bruchteil ihrer Maximalleistung liefern müssen. Für einen direkten Vergleich müßten die Lautsprecher abwechselnd zwischen den verschiedenen Endstufen umgesteckt oder über eine Umschalteneinrichtung geschaltet werden. Beide Methoden bergen Probleme in sich. Schon an Hand dieser kurzen Aufzählung läßt sich erahnen, welcher Konfliktstoff in so einem Hörvergleich stecken kann. Erschwerend kommt hinzu, dass die Endstufen ja nicht alle zur gleichen Zeit zum Test bereit stehen und Höreindrücke unmöglich aus der Langzeit-Erinnerung zu beurteilen sind.

Aus dieser Diskussion heraus entwickelten sich zwei Methoden für den Hörvergleich. Die erste Variante besteht darin, die zu vergleichenden Endstufen auf eine exakt gleiche Verstärkung einzumessen, die dann aus einer Quelle gespeist werden und über eine kräftige Umschalteneinheit an einen Lautsprecher geschaltet werden können. So wird ein wechselseitiges Hören beider Geräte unter identischen Randbedingungen möglich, wobei mit höchster Akribie auf den Abgleich der Verstärkungswerte zu achten ist. Diese Methode eignet sich primär für einen Vergleich im normalen Arbeitsbereich deutlich unterhalb der Leistungsgrenze beider Testkandidaten, so dass auch Endstufen unterschiedlicher Leistung verglichen werden können. In der zweiten Variante werden die Endstufen bezüglich ihrer Verstärkung so eingestellt, dass sie exakt bei der gleichen Eingangsspannung ihre Clip-Grenze erreichen. Ein direktes Umschalten an einem Lautsprecher ist jetzt nicht mehr sinnvoll, da die Ausgangspegel bei dieser Methode abhängig von der Ausgangsleistung unterschiedlich sind. Die Endstufen werden daher an einer komplexen Last (Lautsprecher-Dummy) betrieben. Anschließend können die Signalpegel über einen Spannungsteiler wieder angeglichen werden, so dass nach einer Umschalteneinheit ein Abhören über einen hochwertigen Kopfhörer möglich ist. Dieser Aufbau gestattet es, die Endstufen relativ zur ihrer Maximalleistung an oder über der Leistungsgrenze zu vergleichen. Mit dieser Methode können insbesondere die Limiterfunktionen und das Sättigungsverhalten beobachtet werden.

Bisher haben sich drei wichtige Eigenschaften herauskristallisiert, die bei einer klanglichen guten Endstufe immer ausgeprägt anzutreffen sind. Das ist ein insgesamt niedriges Klirrspektrum auch bei hohen Frequenzen mit möglichst wenig Oberwellen höherer Ordnung, des weiteren möglichst geringe transiente Verzerrungen und drittens eine hohe Peakleistung, wobei letzteres insbesondere im Betrieb an der Leistungsgrenze wichtig wird. Bei Hörversuchen ist genau darauf zu achten, dass Fehlinterpretationen durch Pegelabweichungen und von Frequenzgangunterschieden vermieden werden, wobei eine Genauigkeit von 0,1 dB im gesamten Hörbereich anzustreben ist.

Zusammenfassung

Die Meßreihen zum linearen und nichtlinearen Übertragungsverhalten von Endstufen lassen sich in drei Kategorien unterteilen. Das sind das lineare Übertragungsverhalten, die Verzerrungswerte und die Leistungsbilanz. Des weiteren sollte zwischen einem Betrieb im normalen Arbeitsbereich und im Grenzlastbereich differenziert werden. Geht man bei normalem Musikmaterial von einem Crestfaktor von 15-30 dB aus, so können durchaus schon erste Spitzen die Clipgrenze erreichen, wenn der mittlere Signalpegel noch 15-30 dB darunter liegt, wo dann bereits der Grenzlastbereich beginnt. Signifikante Unterschiede können sowohl meßtechnisch wie auch im Höreindruck häufig erst hier festgestellt werden. Unterhalb dieser Grenze gehen die Unterschiede in den Meßkurven der Verzerrungswerte aller Art so deutlich zurück, dass für hörbare Abweichungen, falls diese dann überhaupt noch wahrgenommen werden, vermutlich in den meisten Fällen der Frequenzgang verantwortlich ist.

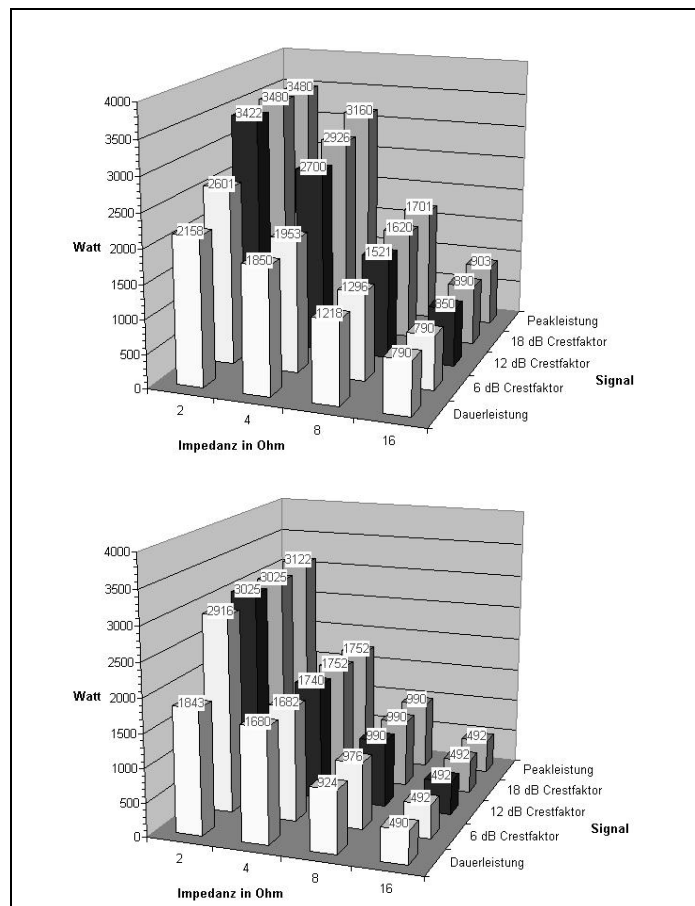


Abb.7 Leistungsübersicht für Belastungen von 2 bis 16 Ohm bei unterschiedlichen Signalen mit Crestfaktoren von 3 bis 18 dB oben: Endstufe mit herkömmlichem weichem Netzteil unten: Endstufe mit hart geregeltem Schaltnetzteil

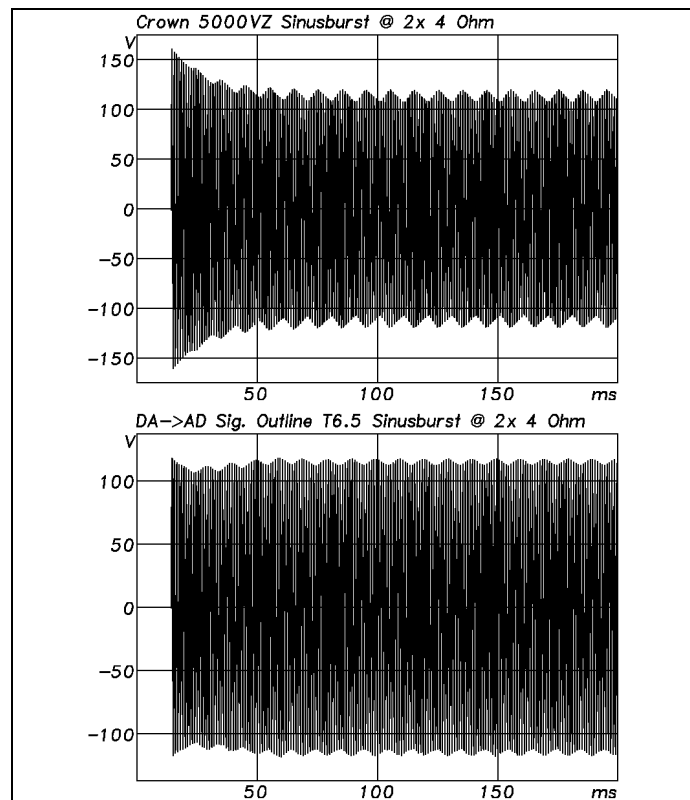


Abb.8 Peakreserve an einer 4 Ohm Last von zwei versch. Endstufen oben: Endstufe mit herkömmlichem weichem Netzteil unten: Endstufe mit hart geregeltem Schaltnetzteil