Dr.-Ing. Anselm Goertz [Audio & Acoustics Consulting Aachen]
Dipl.-Ing. Monika Laws [Audio & Acoustics Consulting Aachen]

Vergleich messtechnischer Ergebnisse und Hörversuche bei Leistungsverstärkern im Grenzlastbereich

Comparison of measuring results and listening tests for power amplifiers at the region of maximum output load

Audio & Acoustics Consulting Aachen ; Robensstr. 62 ; D-52070 Aachen
e-mail: anselm.goertz@t-online.de ; Homepage: www.anselmgoertz.de

Kurzfassung

Um der noch nicht zufriedenstellend geklärten Frage nach dem Zusammenhang von messtechnischen Ergebnissen und klanglichen Eigenschaften von Leistungsverstärkern weiter nachzugehen, soll in konsequenter Fortführung der bisherigen Untersuchungen an Endstufen für den Beschallungs- und Studiobereich in diesem Vortrag das Verhalten von Leistungsverstärkern im Grenzlastbereich aufgezeigt werden. Es werden sowohl Messergebnisse wie auch die Resultate der Hörversuche mit unterschiedlichen Endstufen in typischen Betriebssituationen vorgestellt. Eine besondere Beachtung finden dabei die Musikwiedergabe im Bereich der Clipgrenze und die Auswirkung von Limitern.

Summary

Nowadays the questions of the correlation of measuring results and listening impressions of power amplifiers are not clarified with satisfying results. In the consequent progression of the existing tests, this report presents the behaviour of amplifiers in the region of maximum load. Measuring results and the results of listening tests with different amplifiers in typical operating modes are shown with a special focus on music reproduction in the range of clip limit and the effects of limiters.

Motivation und Zielsetzung

Nach einer vorliegenden Untersuchung aus dem Vorjahr [1] gehen die meisten bei Hörvergleichen festgestellten klanglichen Differenzen von Leistungsverstärkern aus deren unterschiedlichen Frequenzgängen hervor. Obwohl die Unterschiede im Frequenzgang im Vergleich zu den bei Lautsprechern auftretenden Abweichungen kaum von Relevanz zu sein scheinen und sich in einer Größenordnungen von nur 0,1..0,5 dB abspielen, die sich zudem meist nur an den Randbereichen des Hörspektrums feststellen lassen, dürfte hier in den meisten Fällen schon das einzige Unterscheidungsmerkmal liegen. Ursachen für diese Abweichungen sind in unterschiedlichen Hoch- und Tiefpassfiltern der Eingangsstufe sowie unter Belastung im frequenzabhängigen Innenwiderstand respektive Dämpfungsfaktor zu finden.

In Berichten von diversen Hörvergleichen und in einer Vielzahl von Artikeln in der Audio-Presse wird jedoch immer wieder festgestellt, dass die im Hörvergleich wahrnehmbaren Unterschiede zwischen Leistungsverstärkern eher groß sind. Auf der Suche nach den Ursachen dieser zunächst widersprüchlichen Feststellungen und einem möglichen messtechnischen Zusammenhang wurden so zunächst die verschiedensten Messreihen zum linearen und nichtlinearen Übertragungsverhalten und zum Leistungsspektrum durchgeführt. Signifikante Unterschiede waren dabei vor allem in den Verzerrungswerten nahe der Clipgrenze und in der Leistungsverteilung in Abhängigkeit von der Lastimpedanz und Signalform festzustellen. Mit Ausnahme einiger Extremfälle lagen die Verzerrungswerte jedoch immer um Zehnerpotenzen unter denen der besten Lautsprecher.

Für die oben genannte Veröffentlichung [1] wurden im Anschluss an die Messreihen eine Reihe akribisch vorbereiteter Hörversuche ausgeführt, die sich teilweise über mehrere Tage erstreckten und messtechnisch genau dokumentiert wurden. Über eine großzügig dimensionierte Umschalteinheit wurde der Vergleich paarweise abgehandelt und je zwei Verstärker an einem Lautsprecher verglichen. Beide Verstärker wurden jeweils mit dem gleichen Eingangssignal versorgt und über ein Meßsystem exakt auf eine einheitliche Verstärkung abgeglichen. Eine Voraussetzung in allen Fällen war es, dass keiner der Verstärker durch das Musiksignal an seine Clipgrenzen gebracht wurde, so dass hierdurch entstehende Effekte keine Berücksichtigung fanden. In mehreren Hörsitzungen mit unterschiedlichen Lautsprechern, bevorzugt jedoch mit großen passiven Studiomonitoren, wurden so jeweils 4-6 vom Konzept her unterschiedliche Endstufen verglichen. Die Ergebnisse waren großteils von ernüchternder Art, wo

trotz guten Willens, verschiedenster Musikrichtungen und Aufnahmen sowie bester Randbedingungen keine reproduzierbaren Unterschiede wahrzunehmen waren. Auswirkungen unterschiedlicher Frequenzgänge waren in diesen Testfeldern weitgehend auszuschließen, da keine der getesteten Endstufen bei 20 Hz oder 20 kHz um mehr als 0,1 dB von ihren Mitstreitern abwich. Es bieten sich nun drei Möglichkeiten der Erklärung für diesen Umstand an:

- Bei den Vorversuchen wurde der Pegelabgleich nicht hinreichend exakt ausgeführt, so dass die wahrnehmbaren Unterschiede auf Pegeldifferenzen, wo schon 0,5 dB deutlich zu bemerken sind, zurückgehen.
- Die Frequenzgänge der Endstufen mit angeschlossenem Lautsprecher wurden nicht geprüft und verglichen, so dass z.B. leichte Pegelanhebungen oder Absenkungen in den Randbereichen für die unterschiedlichen Höreindrücke verantwortlich sein können, wo ebenfalls eine Größenordnung von 0,5 dB schon eindeutig zu erkennen ist.
- Die Endstufen wurden so betrieben, was durchaus als normaler Betriebszustand gesehen werden darf, dass Signalspitzen schon die Clipgrenzen der Endstufen erreichten und so Verzerrungen und Signalkompression entstanden.

Punkt 1 und 2 sollen hier nicht weiter verfolgt werden, so dass an dieser Stelle nochmals auf die erste Veröffentlichung [1] zum Thema verwiesen wird. Der letzte Punkt wird in dieser Abhandlung als Thema aufgegriffen, wo das Verhalten von Leistungsverstärkern speziell in dem Arbeitsbereich, wo das Signal schon eine mehr oder weniger starke Verzerrung und Kompression erfährt, messtechnisch und mit Hörversuchen analysiert wird.

Das Testfeld setzte sich wie auch in den anderen Hörversuchen aus qualitativ als hochwertige einzustufenden Geräten für professionelle Anwendungen, d.h. im Tonstudio, in Installationen oder für PA zusammen. Auf Geräte mit exotischen Konzepte wurde verzichtet, wenngleich das Testfeld sich mit Halb- und Vollbrücken Schaltungen, bipolaren und MosFet Leistungshalbleitern sowie herkömmlichen und Schaltnetzteilen schon erheblich unterschied. Die 4 Endstufen wurden aus unterschiedlichen Leistungsklassen ausgewählt, so dass anhand der Hörbeispiele auch beurteilt werden sollte, welchen Gewinn ein größerer Verstärker gegenüber einem kleineren Modell zu erbringen vermag.

Testgeräte

Die vier hier vorgestellten Endstufen werden im Text und in den Messgrafiken teilweise mit Abkürzung benannt, die im folgenden neben den kompletten Modellbezeichnungen und einer kurzen Aufzählung der Schaltungsprinzipien aufgelistet sind:

1) PL2	QSC Powerlight 218	Bipolare Halbleiter ; Schaltnetzteil
2) CR1	Crown Reference I	Bipolare Halbleiter ; Herkömmliches Netzteil Fullbridge Topologie
3) AD4	Audience Delight AD2404	MosFet ; Herkömmliches Netzteil
4) HP3	Hafler P3000	MosFet ; Herkömmliches Netzteil grounded source Topologie

Leistungsprofile

Für eine erste Übersicht wurden zunächst die Leistungsprofile der vier Testendstufen bestimmt. Gemessen wurden für Impedanzen von 2, 4 , 8 und 16 Ohm die Standardwerte für Dauer- und Peakleistung. Zusätzlich wurde die maximale Leistung für Signale mit einem Crestfaktor von 6, 12 und 18 dB ermittelt und mit in die Grafik aufgenommen.

Besonders für den Beschallungsbereich dürfte neben dem regulären Betrieb einer Endstufe noch von Bedeutung sein, wie sie sich im Grenzbereich an der Clipgrenze oder auch darüber verhält. Wann diese Grenze erreicht wird, hängt natürlich von der maximalen Ausgangsleistung und hier primär von der Peakleistung ab. Da übliche Musiksignale stark impulsbehaftet sind, erreichen einzelne kurze Peaks immer zuerst das Limit der Peakleistung, lange bevor der Mittelwert des Signals 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 eine Endstufe an einem entsprechenden Lautsprecher zu liefern in der Lage ist, sollte daher immer die Leistung bei 6, 12 oder sogar 18 dB Crestfaktor gelten.

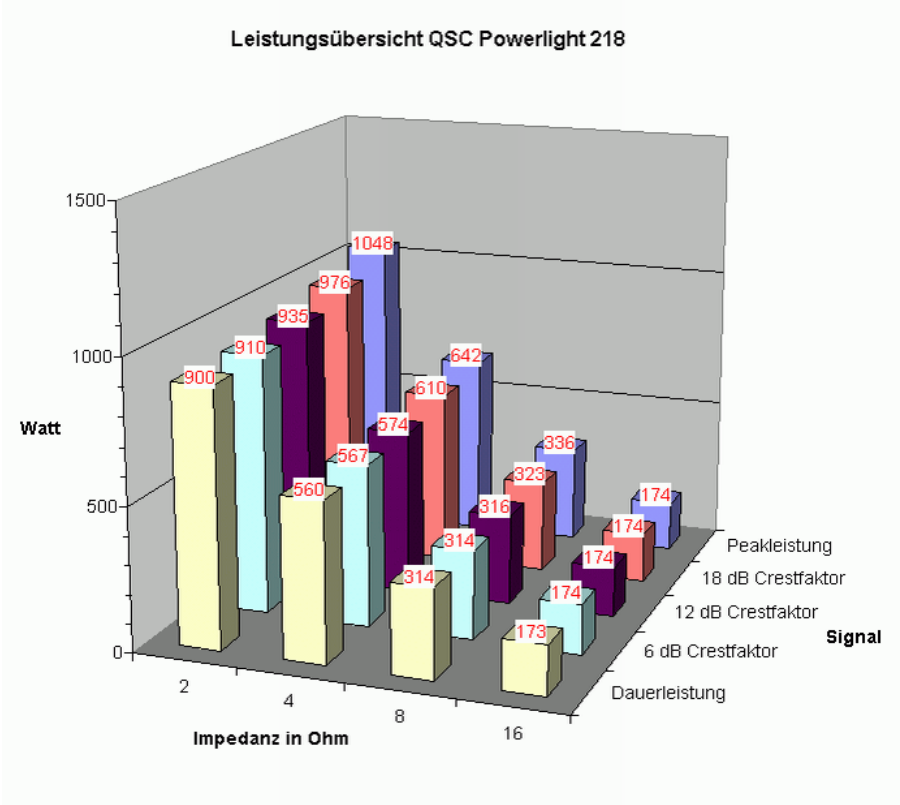
Abbildung 1 und **Abbildung 2** zeigen vier Leistungsübersichten für die hier vorgestellten Endstufen. Für die Modelle Reference I und P3000 lässt sich erkennen, dass die Leistung insbesondere bei niederohmigen Belastungen von 2 oder 4 Ohm recht große Unterschiede in Abhängigkeit von der Signalform aufweist. Die Endstufe PL218 verhält sich dagegen fast unabhängig vom Crestfaktor des Testsignals.

Bestimmt wird das Verhalten der Endstufen primär durch deren Netzteile. **Abbildung 3** verdeutlicht dieses Verhalten noch mit der Reaktion der Verstärker auf einen Sinusburst. Die Endstufen CR1 und HP3 verfügen über ein herkömmliches Netzteil mit einer recht hohen Spannung, so dass der Sinusburst zunächst auf eine hohe 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 Netzteilelkos. Das andere Extrem stellt die PL218 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. Ähnlich verhält sich das Modell AD4 trotz eines herkömmlichen Netzteiles, da dieses sehr großzügig und auch für einen 2-Ohm Dauerbetrieb unter harten Randbedingungen ausgelegt wurde.

Grundsätzlich sollte ein konventionelles Netzteil jedoch 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. Unter kritischen Umständen birgt dieses Konzept natürlich die Gefahr einer thermischen Überlastung des Netztrafos und der Leistungshalbleiter in sich. Zwingend erforderlich sind daher gewisse Schutzmechanismen, wie z.B. eine SOA Überwachung, wo anhand der Halbleitertemperatur, des Kollektorstromes und der Emitter-Kollektor-Spannung der Arbeitspunkt ermittelt und mit dem sicheren Arbeitsbereich (SOA) verglichen wird. Ergeben sich kritische Werte, so greift ein Limiter begrenzend ein.

Zurück zu den Leistungsprofilen lassen sich hier anhand der Abweichungen von einer idealen Spannungsquelle, die unabhängig von der Signalform eine konstante Leistung erbringen und diese bei jeder Impedanzhalbierung exakt verdoppeln würde, die Netzteilcharakteristik und mögliche Strombegrenzungen erkennen. Steigt die Leistung bei zunehmendem Crestfaktor für eine konstante Lastimpedanz (im Diagramm von vorne nach hinten) kräftig an, so hat das Netzteil ein weiches Verhalten und bietet hohe Peakreserven gegenüber der eher geringen Dauerleistung. Gleiches drückt sich im Verlauf der Balkendiagramme bei abnehmender Impedanz aus, wo ein sehr hartes und stabiles Netzteil die Leistung bei jeder Halbierung der Impedanz nahezu verdoppelt. Weiche Netzteil brechen dagegen unter dem erhöhten Strombedarf bei niedrigen Impedanzen schon merklich zusammen. Sehr schön sind diese Zusammenhänge

bei der Hafler P3000 und Crown Reference I zu erkennen, die beide als typische Studio Endstufen für eine möglichst hohe Peakleistung an 4 oder 8 Ohm Lasten optimiert sind. Zusätzlich ist für die Crown Reference I an der 2-Ohm Belastung das Eingreifen der Strombegrenzung bei hohen Spannungsspitzen zu erkennen, wo die 2 Ohm Peakleistung aufgrund des sehr hohen Stromes bei gleichzeitig hoher Kollektor-Emitter-Spannung reduziert werden muss, um ein Durchbrennen der Halbleiter zu verhindern. Die sonst übliche Class-H Technik mit gestuften Versorgungsspannungen wurde bei der Reference I in Hinblick auf den Einsatzbereich nicht angewandt, da keine extremen Dauerleistung zu erwarten sind und allen Vorbehalten gegenüber der Class-H Technologie von vorne herein bei einer Studioendstufe begegnet werden sollte.



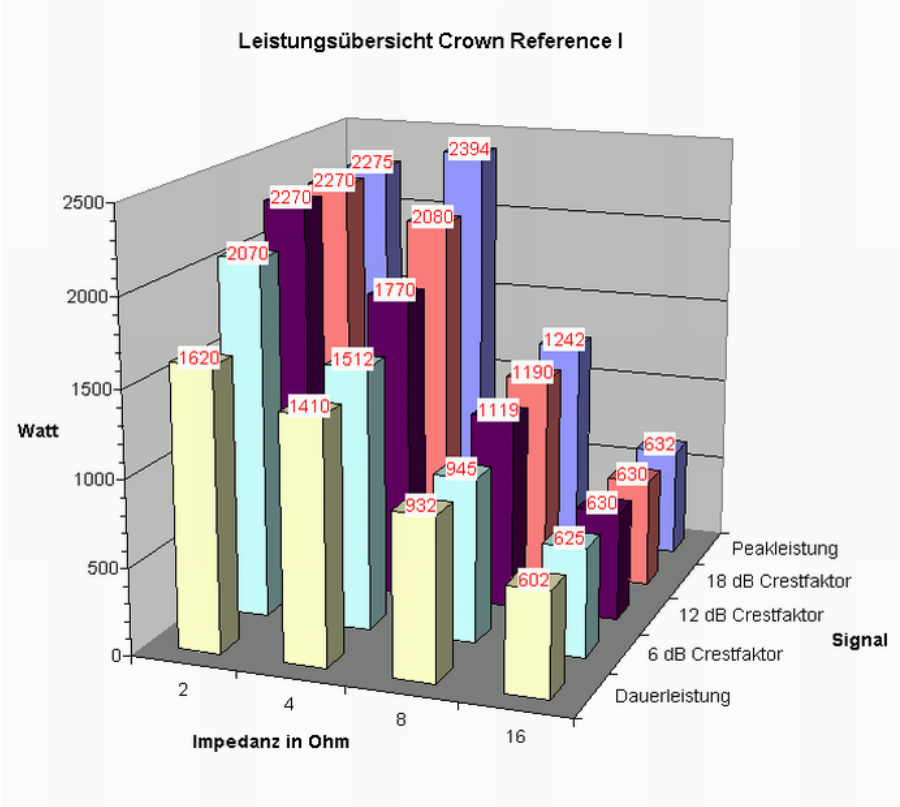
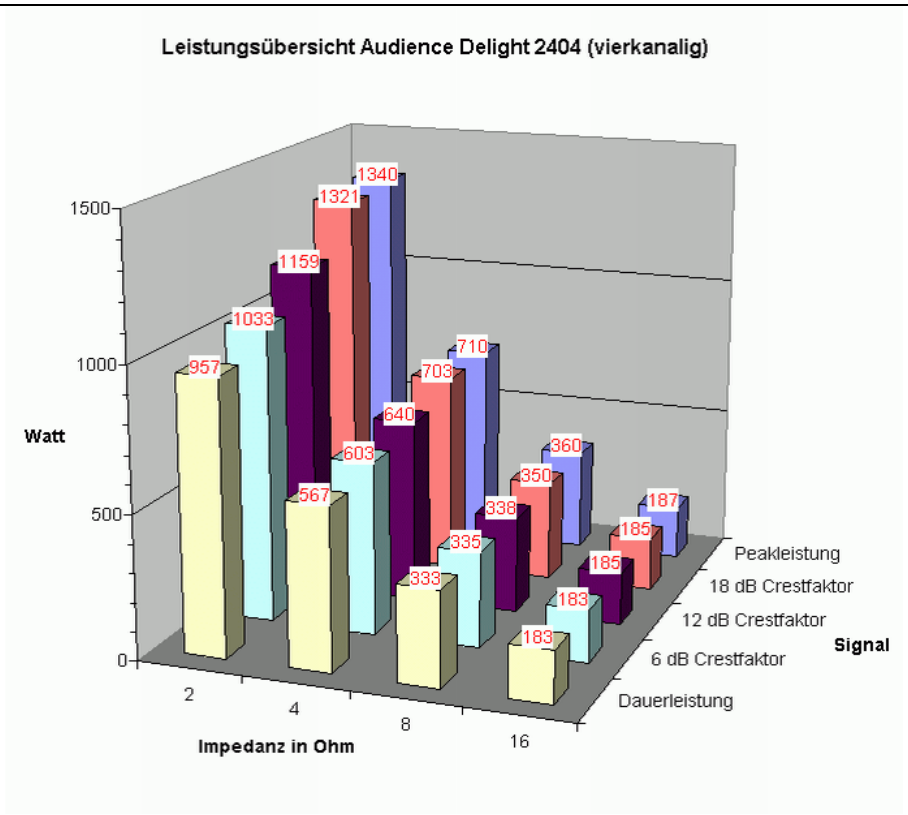


Abbildung 1 Leistungsprofile von 2 der 4 im Vergleich eingesetzten Leistungsverstärker bei gleichzeitiger Belastung aller Kanäle für Lastimpedanzen von 2, 4, 8 und 16 Ohm. Angabe in Watt für Peakleistung, Sinus-Dauerleistung (1% THD) sowie für Signale mit 6, 12 und 18 dB Crestfaktor.



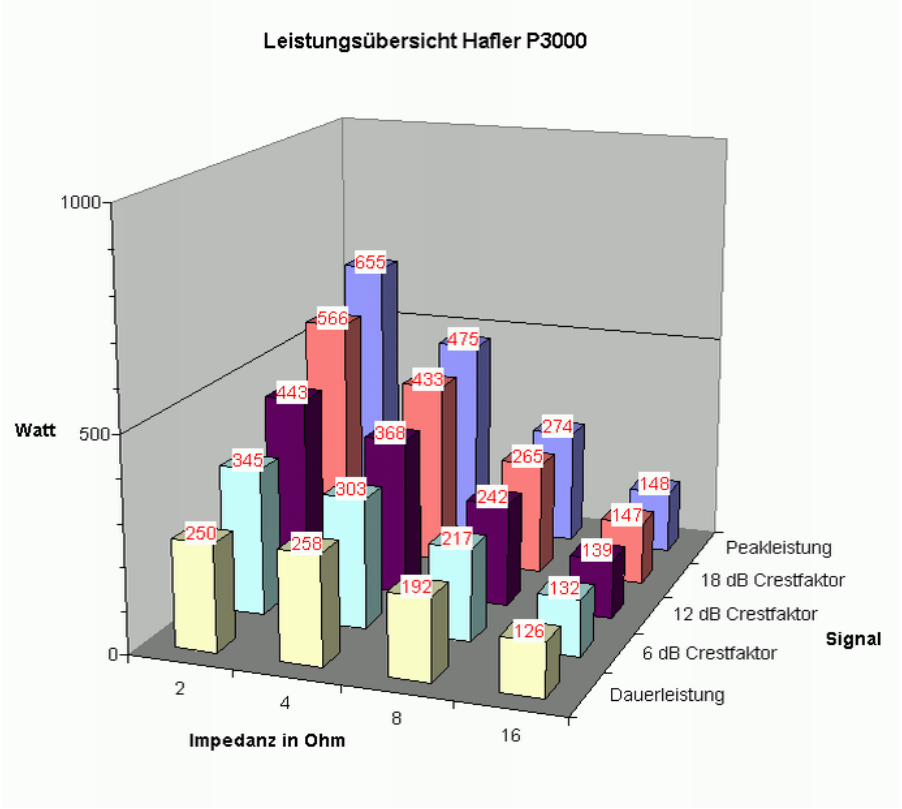


Abbildung 2 Leistungsprofile von 2 der 4 im Vergleich eingesetzten Leistungsverstärker bei gleichzeitiger Belastung aller Kanäle für Lastimpedanzen von 2, 4, 8 und 16 Ohm. Angabe in Watt für Peakleistung, Sinus-Dauerleistung (1% THD) sowie für Signale mit 6, 12 und 18 dB Crestfaktor.

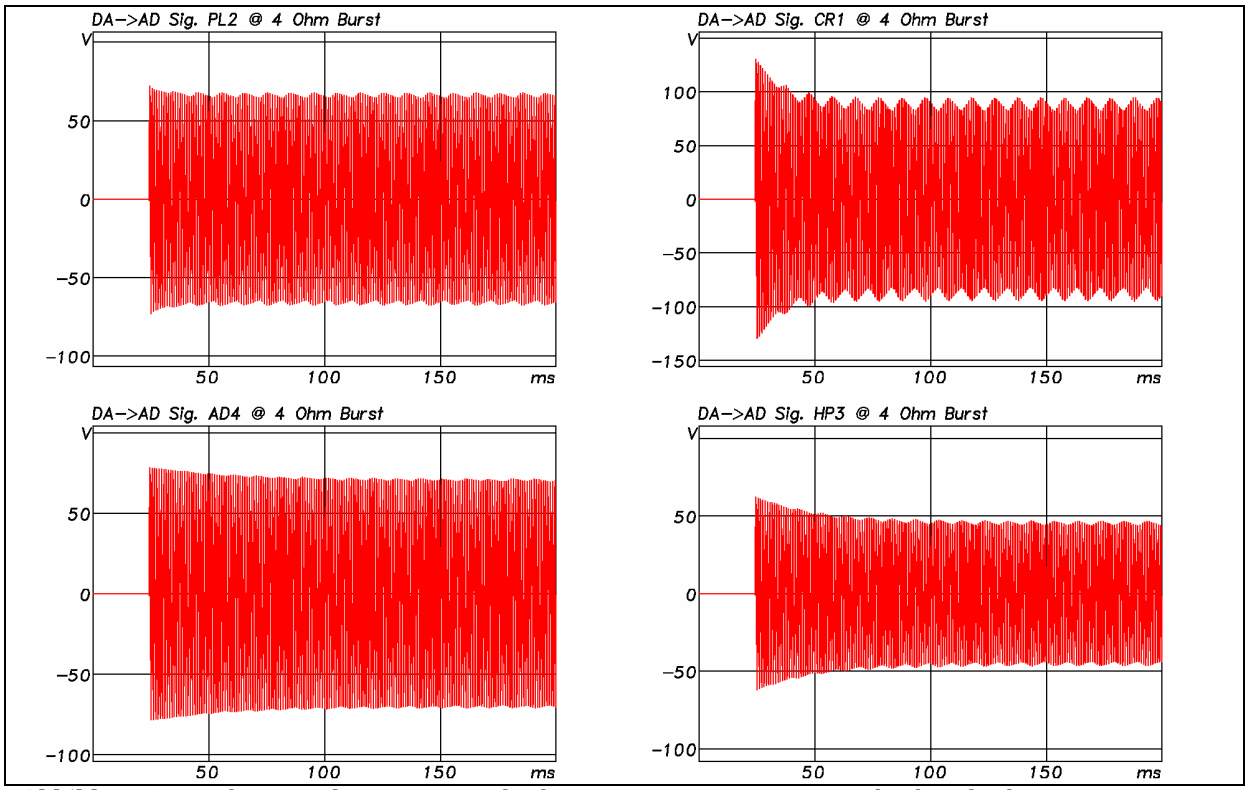


Abbildung 3 Peakreserve der vier im Vergleich eingesetzten Leistungsverstärker bei gleichzeitiger Belastung aller Kanäle und einer Lastimpedanzen von 4 Ohm

Netzversorgung

Als kurzes Intermezzo soll hier eine Betrachtung über die Auswirkung der Netzstromversorgung bei Endstufen eingeschoben werden. Die Ergebnisse fielen bei diversen Messungen als Randprodukte an. Im Vorfeld der Messungen stellte sich heraus, dass Endstufen mit Schaltnetzteilen bis zur einer bestimmten Leistungsklasse kaum Unterschiede in der Peak- und Dauerleistung aufweisen. Durch eine Regelung sind diese Netzteile in der Lage weitgehend unabhängig vom Belastungszustand und von der Primärspannung eine konstante Ausgangsspannung zu liefern. Bis zum Erreichen eines bestimmten Stromlimits steht für die nachfolgende Endstufenschaltung somit immer eine konstante Versorgungsspannung zur Verfügung. Eine typische Endstufe dieser Gattung ist die PL218, deren Reaktion auf einen Sinusburst in **Abbildung 3** oben-links zu sehen ist. Endstufen mit ungeregelten herkömmlichen Netzteilen weisen dagegen einen mehr oder weniger starken Unterschied zwischen anfänglicher Peakleistung und der endgültigen Dauerleistung auf. Die Versorgungsspannung für die eigentliche Endstufe sinkt im Belastungsfall ab und damit auch die Aussteuerungsgrenze der Endstufe. Verursacht wird der Spannungsabfall durch die limitierte Kapazität der Siebelkos

und den Innenwiderstand des Netztrafos, wie auch durch den Spannungsabfall auf der Netzzuleitung bei hohen Leistungen.

Abbildung 4 zeigt nun das Verhalten einer sehr leistungsstarken Endstufe mit einem ungeregelten Schaltnetzteil (Camco Vortex 6) an verschiedenen Stromversorgungen. Das Schaltnetzteil mit einem HF-Trafo hat einen sehr geringen Innenwiderstand, so dass sich für die Endstufe selber direkt das Verhalten des Stromnetzes widerspiegelt. Ein Spannungsabfall am Stromnetz wird durch dieses Netzteil nicht ausgeregelt. **Abbildung 4** zeigt nun die Messung der Endstufe bei der Reaktion auf einen Sinusburst an zwei verschiedenen Netzanschlüssen. Im linken Bild war die Endstufe direkt an einer 63A Unterverteilung angeklemmt und konnte so auf eine nahezu lastunabhängig stabile Netzspannung zugreifen. Für das rechte Bild erfolgte der Anschluß an eine herkömmliche Steckdose, die über ca. 50m Kabel mit der Hauptverteilung verbunden war. Hier zeigt sich recht deutlich, wie kraß sich schon der Spannungsabfall auf der Netzleitung im Ausgangssignal einer Endstufe hoher Leitung wiederfindet. Dem gegenüber kann der eigentliche Innenwiderstand des Schaltnetzteiles vernachlässigt werden.

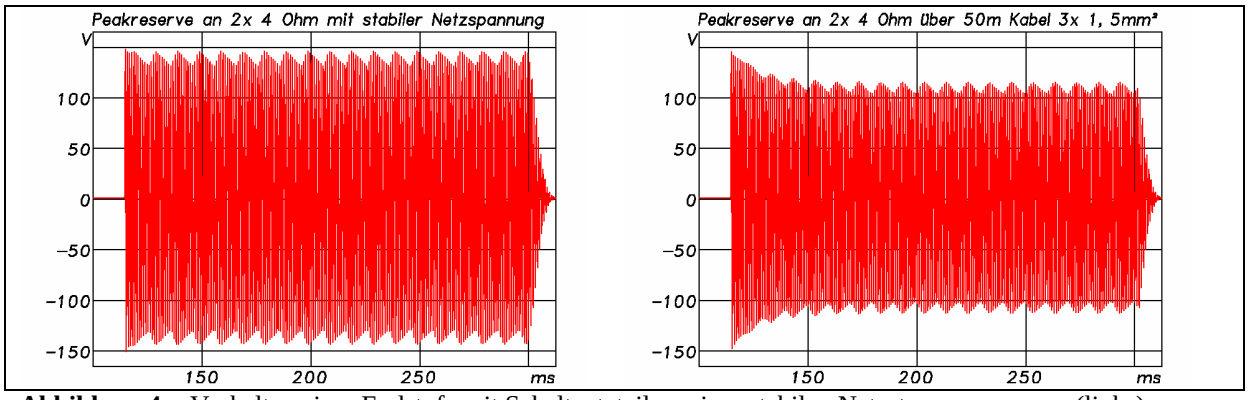


Abbildung 4 Verhalten einer Endstufe mit Schaltnetzteil an einer stabilen Netzstromversorgung (links) und beim Anschluss über 50m Kabel mit 1,5mm² Querschnitt (rechts)

Grundsätzlich dürfte dieser Fall aber von eher geringer Bedeutung sein, da der Spannungszusammenbruch bei der Messung mit einem Sinusburst entsteht, der einer Dauerbelastung mit nur 3 dB Crestfaktor entspricht. Normale Musiksignale liegen dagegen immer in Bereichen von 12 bis 18 dB. Selbst bei starker Kompression sind nur selten Crestfaktoren von unter 9 dB zu beobachten, wo dann die aufgenommene Dauerleistung immer noch um einen Faktor 4 unter der Peakleistung liegt.

Lastwiderstände

Für die Messung der Leistungsprofile wurde auf ein mit 3 kW belastbares Widerstands-Array zurückgegriffen, das ausschließlich aus rein ohmschen Widerständen zusammengesetzt war. Ein Lautsprecher stellt dagegen mit Ausnahme weniger Exemplare eine komplexe Last mit einer starken Abhängigkeit von Betrag und Phase von der Frequenz dar. Da diese Lasten deutlich schwieriger für eine Endstufe zu beherrschen sind, wurden noch zwei Lautsprecher Dummy Loads (LSD) schaltbar für 4 oder 8 Ohm Nennimpedanz ins Spiel gebracht. Der Impedanzverlauf (siehe **Abbildung 5**) dieser komplexen Lasten wurde weitgehend einer typischen 2-Wege Bassreflexbox mit horngeladenem Hochtöner nachempfunden. Vergleicht man nun die üblichen Verzerrungsmessungen an einer Endstufe, wie z.B. THD über der Frequenz, Modulationsverzerrungen nach SMPTE oder DIM100 Intermodulationsverzerrungen, wie sie zum einen an einer rein ohmschen Last oder eben an einer dem realen Lautsprecher nachempfundenen Last gemacht wurden, so sind bei modernen Endstufen als einziger Unterschied meist nur geringere Verzerrungswerte bei der komplexen Last ob der in manchen Frequenzbereichen geringeren Belastung zu erkennen. Weitere Unterschiede waren bei den vier Testgeräten nicht festzustellen, so dass die komplexen Lasten keinen erhöhten Schwierigkeitsgrad für die Probanden darstellten und damit leider auch keine größere Aussagekraft hatten. Wie dem auch sei, so wurden alle Leistungsmessungen mit ohmschen Lasten und alle Verzerrungsmessungen an ohmschen und an komplexen Lasten ausgeführt. Die Hörversuche wurden ausschließlich mit den komplexen Lautsprecher-Dummy-Loads gemacht, um hier möglichst realistische Bedingungen zu schaffen. Näheres hierzu später.

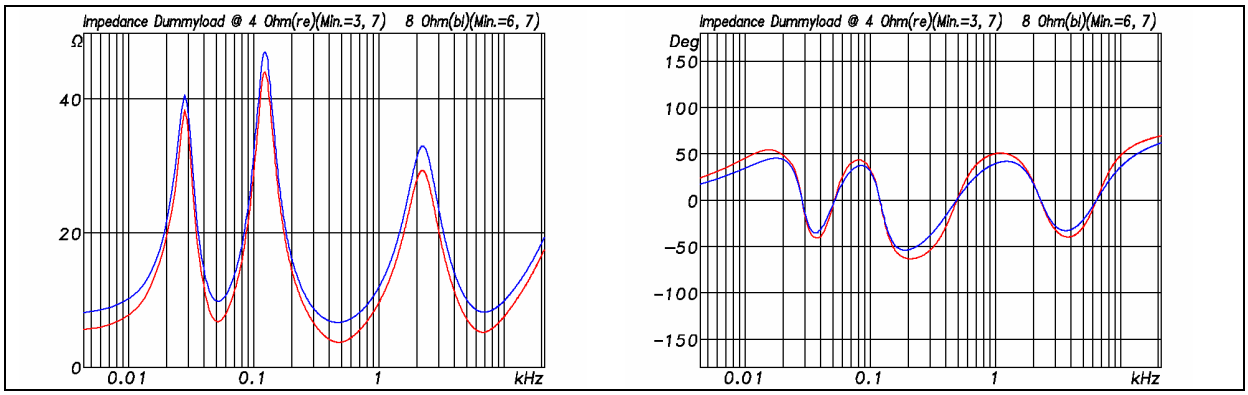


Abbildung 5 Betrag und Phase der Impedanz der eingesetzten Lautsprecher-Dummys für 4 und 8 Ohm Nennimpedanz

Verzerrungswerte

Bei den Verzerrungsmessungen wurden drei verschiedene und weitgehend gebräuchliche Methoden angewandt. Gemessen wurden die THD-Werte für ein 1 kHz Sinussignal, die Modulationsverzerrungen nach SMPTE mit einem 60 Hz und einem 7 kHz Sinussignal im Verhältnis 4:1 und die dynamischen Intermodulationsverzerrungen DIM100 mit einem 3,15 kHz Rechtecksignal und einem 15 kHz Sinussignal im Verhältnis 4:1. Für die THD Messung werden zur Auswertung die harmonischen Verzerrungen d2 bis d9 berücksichtigt, jedoch nicht das Rauschen und die subharmonische Anteile wie bei einer THD+N Messung. Bei der Messung der Modualtionsverzerrungen nach SMPTE mit dem 7 kHz Nutzsignal und dem 4-fach größeren 60 Hz Störsignal werden die Intermodulationsprodukte 2. und 3.Ordnung zur Auswertung herangezogen. Ein besonderes Augenmerk dürfte den DIM100 Messungen gelten, denen in Bezug auf eine Relevanz für die klanglichen Qualitäten eine besonders hohe Bedeutung zukommt. Das 3,15 kHz Rechteck ist bei der DIM100 Methode mit einem 100 kHz Tiefpass in seiner Flankensteilheit begrenzt und ausgewertet werden die insgesamt 9 Intermodulationsprodukte im hörbaren Frequenzbereich.

Jede dieser Messmethoden wurde an den vier Endstufen mit je einer Messreihen in niedriger Auflösung von 1 dB Schritten im Bereich von –80..+20 dBu Eingangsspannung und mit einer hohen Auflösung von 0,1 dB im Bereich von –10..+20 dBu Eingangsspannung gemacht. Die Messreihen von –80..+20 dBu erlauben einen Gesamtüberblick, während die Messungen zwischen –10..+20 dBu auf Grund ihrer sehr hohen Auflösung genaue Details an der Clipgrenze erkennen lassen. Die vier Endstufen wurden für die Messungen sehr exakt auf einen Verstärkungswert von 25 dB (siehe Tabelle 1) eingestellt. Alle Messreihen liefen immer zweikanalig parallel ab, jedoch wurden nur für die DIM100 Messungen auch beide Kurven in das Diagramm eingetragen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist für die THD- und SMPTE-Messungen immer nur ein Kanal dargestellt. Signifikante Abweichungen zwischen den beiden Kanälen einer Endstufe waren hier bei den vier Probanden nicht festzustellen. Als zweite Kurve befindet sich stattdessen die zugehörige Ausgangsleistung in den THD und SMPTE Diagrammen. Hier lässt sich somit über der Eingangsspannung auf der X-Achse des Messdiagramms zum einen der Verzerrungswert in dB und in der zweiten Kurve die Ausgangsleistung in Watt an einer 8 Ohm Last ablesen. Das obere Diagramm in einer Abbildung stellt die Übersicht dar und das untere den stark vergrößerten Bereich um die Clipgrenze. Der

Übersichtsdarstellung liegen jeweils 101 Messwerte und der Ausschnittsdarstellung 151 Messwerte zu Grunde.

Betrachtet man die THD Kurven der 4 Endstufen in **Abbildung 6** bis **Abbildung 9**, so entsprechen diese zunächst einmal dem prinzipiellen Verlauf einer jeden Verstärkerstufe, bei denen der THD Wert kontinuierlich fällt bis zum Erreichen der Clipgrenze, wo er dann schlagartig ansteigt. Die zugehörige Leistungskurve steigt auch oberhalb der Clipgrenze weiterhin an, da sich das ursprüngliche Sinussignal dort immer mehr einem Rechteck nähert, dessen RMS Wert 3 dB über dem eines Sinussignals liegt. Abweichend von diesem Verlauf weisen alle Verstärker ihre eigenen charakteristischen Eigenschaften auf. **Abbildung 7** und **Abbildung 9** zeigen die Kurven von Endstufen mit MosFet Leistungstransistoren, mit einem typischen leichten Anstieg der THD-Werte einige dB unterhalb der Clipgrenze. Ein wenig ungewöhnlich mutet der Verlauf in **Abbildung 6** an, wo der Kurvenverlauf teilweise von der üblichen kontinuierlich fallenden Geraden abweicht. Interessant erscheint auch das Verhalten der Endstufe in **Abbildung 8** kurz vor dem Erreichen der Clipgrenze, wo die Kurve eine leicht unruhige Struktur erhält. Eine möglich Erklärung dafür könnte die schon einsetzende Schutzschaltung sein, da die Messreihen sehr langsam mit einem kontinuierlich anliegendem Messsignal abliefen und es bei den damit einhergehenden hohen Dauerleistung (700 Watt pro Kanal an einer 8 Ohm Last) schon zu kritischen Erwärmungen der Leistungshalbleiter kommen kann. Aus der jeweils zweiten und vergrößerten Darstellung lässt sich mit 0,1 dB Genauigkeit die Clipgrenze für Dauerleistung an einer 2x 8 Ohm Last ablesen. Der Cursor ist hier immer auf dem letzten Wert platziert, bevor der Kurvenverlauf in den steilen Anstieg übergeht. Dieser Wert liegt bei allen Endstufen im Testfeld deutlich unter –80 dB (=0.01%) und bedarf somit keiner weiteren Diskussion.

Ein wenig auffälliger stellen sich die Messungen der transienten Intermodulationsverzerrungen DIM100 dar, die in vergleichbarer Form in **Abbildung 10** bis **Abbildung 13** für die 4 Endstufen gezeigt sind. Geradezu mustergültig gibt sich die Endstufe in **Abbildung 11**, wo die Verzerrungswerte bereits 30 dB unter Vollaussteuerung auf ein Niveau von –80 dB gefallen sind und bis zur Clipgrenze auch dort bleiben. Ähnlich gut, nur mit leichten Welligkeiten im Verlauf, stellt sich die Endstufe in **Abbildung 13** dar, wogegen die beiden anderen Modelle in **Abbildung 10** und **Abbildung 12** einen nicht genauer zu erklärenden kräftigen Anstieg schon 6-10 dB unterhalb der Clipgrenze aufweisen.

Zuletzt wäre noch ein Blick auf die Modulationsverzerrungen in **Abbildung 14** bis **Abbildung 17** zu werfen, die für alle vier Endstufen vom prinzipiellen Verlauf her den THD-Messungen ähneln. Insgesamt liegen die Verzerrungswerte jedoch auf einem höheren Niveau und die Schwankungen sind stärker ausgeprägt.

Die nachfolgende Tabelle 1 fasst für alle 4 Endstufen die Eckwerte aus den 3 Verzerrungsmessungen sowie einige Leistungswerte zusammen. In den letzten Zeilen sind noch die Werte für das maximale Gain, die bei den Messungen eingestellten Verstärkungswerte und den Störabstand unbewertet wie auch mit A-Bewertung angegeben.

	PL 218	**Reference I**	**AD2404**	**P3000**
Peakleistung 2x 4/8 Ohm [W] @ 1% THD	642 336	2394 1242	710 360	475 274
Dauerleistung 2x 4/8 Ohm [W] @ 1% THD	560 314	1410 932	567 333	258 192
Clipgrenze @ 1kHz 2x 8Ohm THD [dB] Leistung [W] Inputlevel [dBu]	 -94,8 293 11,2	 -87,4 700 14,3	 -84,4 340 11,4	 -82,8 182 8,7
Clipgrenze @ 1kHz 2x 8Ohm DIM100 [dB] Leistung [W] Inputlevel [dBu]	 -39,8 12,2	 -29,3 15,3	 -77,5 12,2	 -69,8 9,7
Clipgrenze @ 1kHz 2x 8Ohm SMPTE [dB] Leistung [W] Inputlevel [dBu]	 -80,0 193 9,4	 -68,2 518 13,0	 -74,9 235 9,8	 -70,3 129 7,2
Max. Gain in dB	32	26	25	29
S/N dB/dB(A)	112/115	122/124	113/119	106/110
Gain in dB L/R bei Messungen	24,72 24,96	25,38 25,20	25,13 25,07	25,14 25,08

Tabelle 1 Eckwerte der Verzerrungsmessungen an der Clipgrenze
Dauer- und Peakleistung an 4/8 Ohm sowie Clipgrenze bei THD-, SMPTE- und DIM100-Messungen ; Gain und S/N Werte

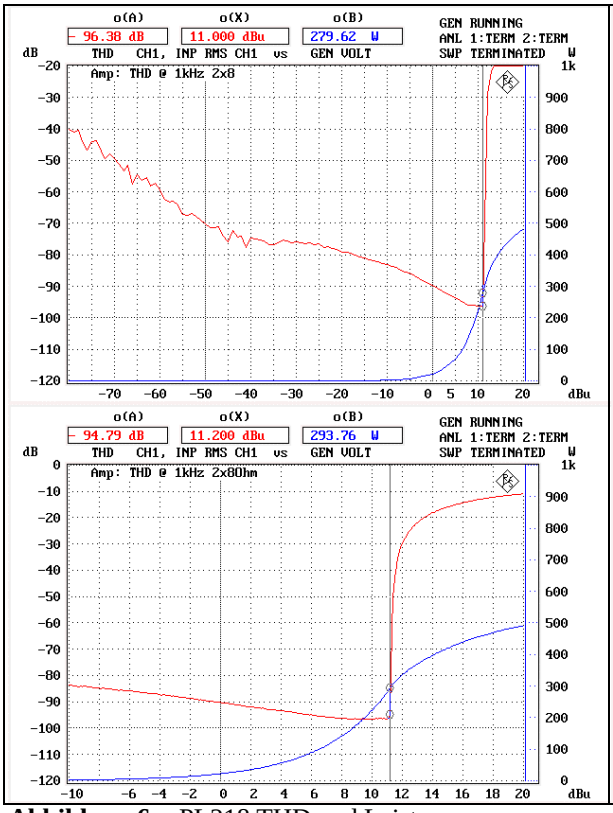


Abbildung 6 PL218 THD und Leistungsmessung an 2x8 Ohm Belastung

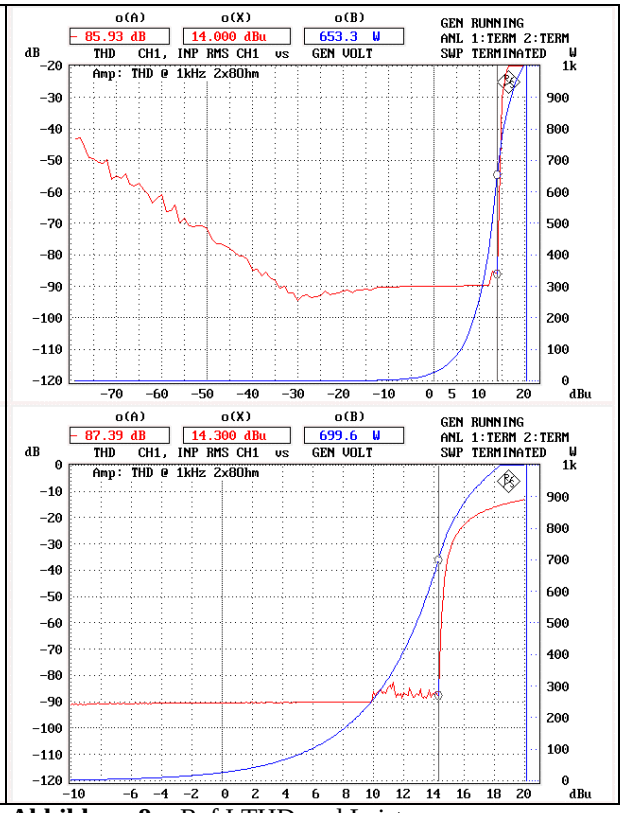


Abbildung 8 Ref.I THD und Leistungsmessung an 2x8 Ohm Belastung

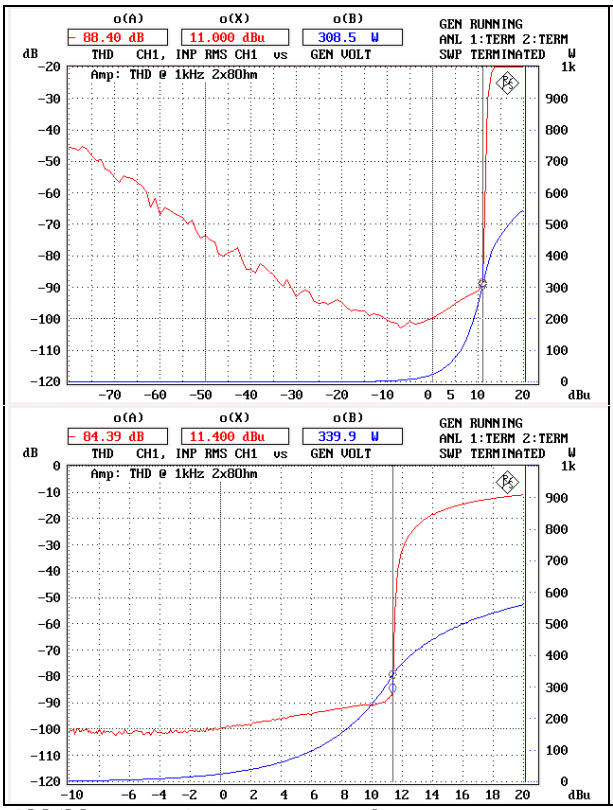


Abbildung 7 AD2404 THD und Leistungsmessung an 2x8 Ohm Belastung

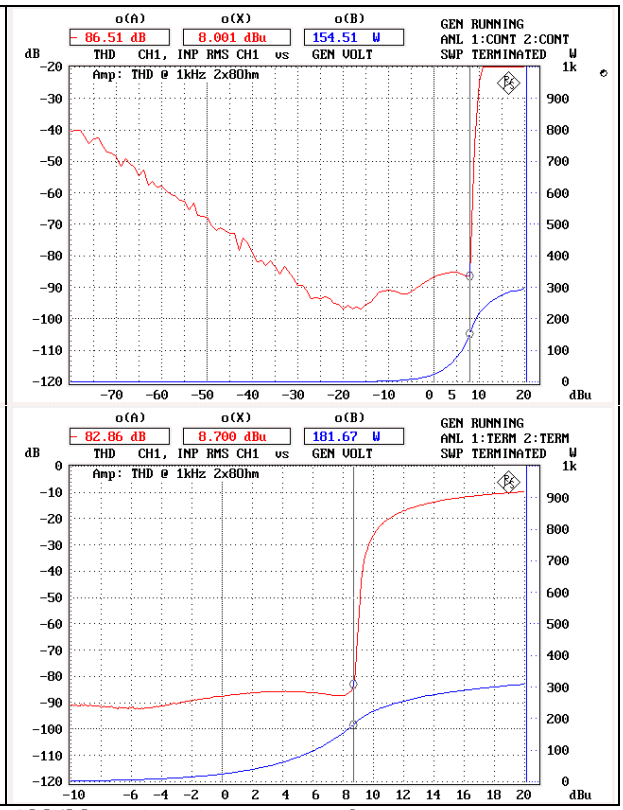


Abbildung 9 P3000 THD und Leistungsmessung an 2x8 Ohm Belastung

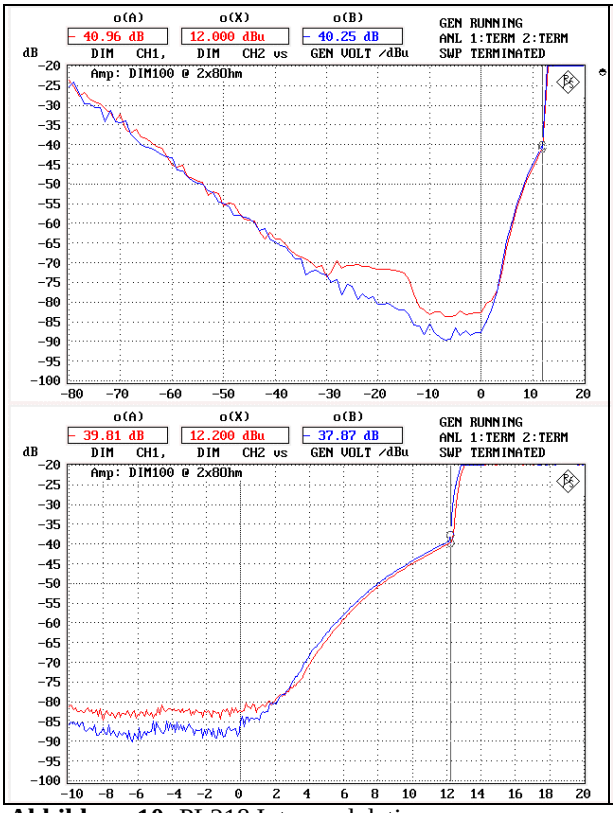


Abbildung 10 PL218 Intermodulationsverzerrung DIM100 an 2x8 Ohm Belastung

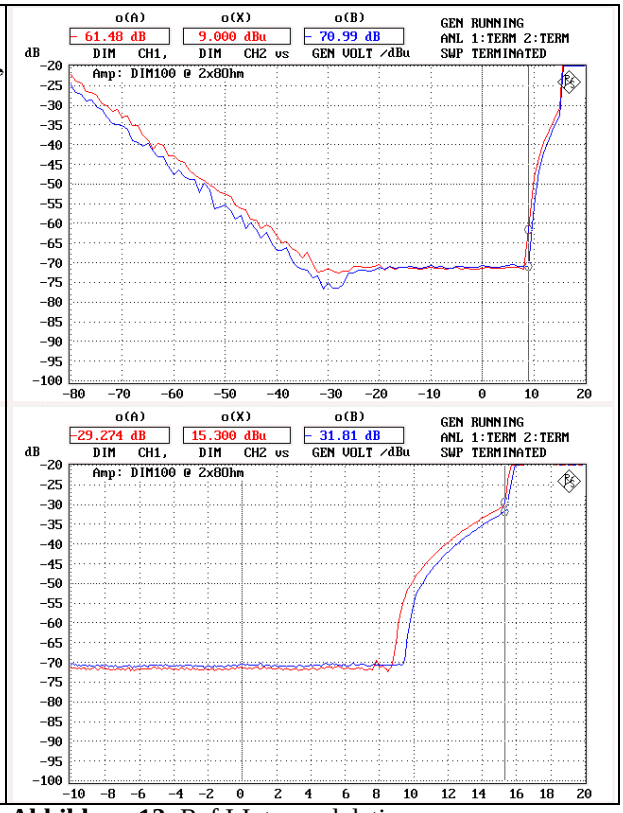


Abbildung 12 Ref.I Intermodulationsverzerrung DIM100 an 2x8 Ohm Belastung

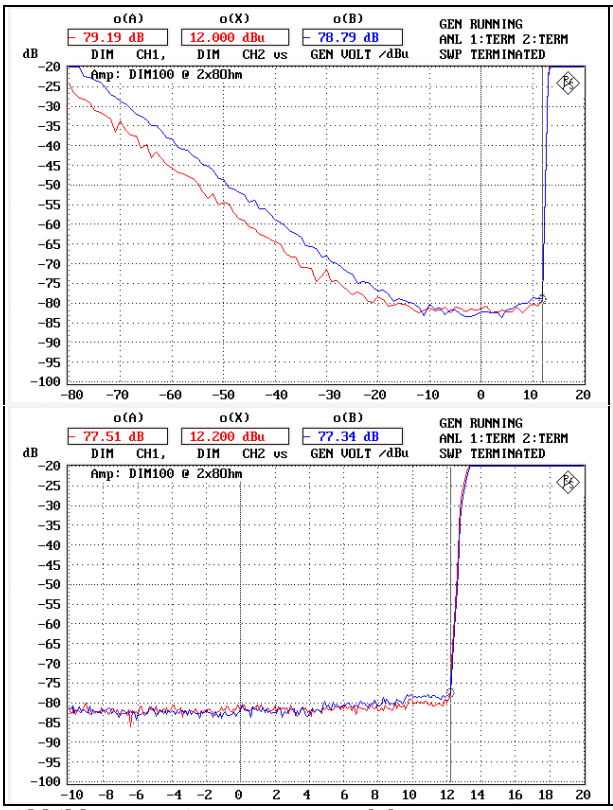


Abbildung 11 AD2404 Intermodulationsverzerrung DIM100 an 2x8 Ohm Belastung

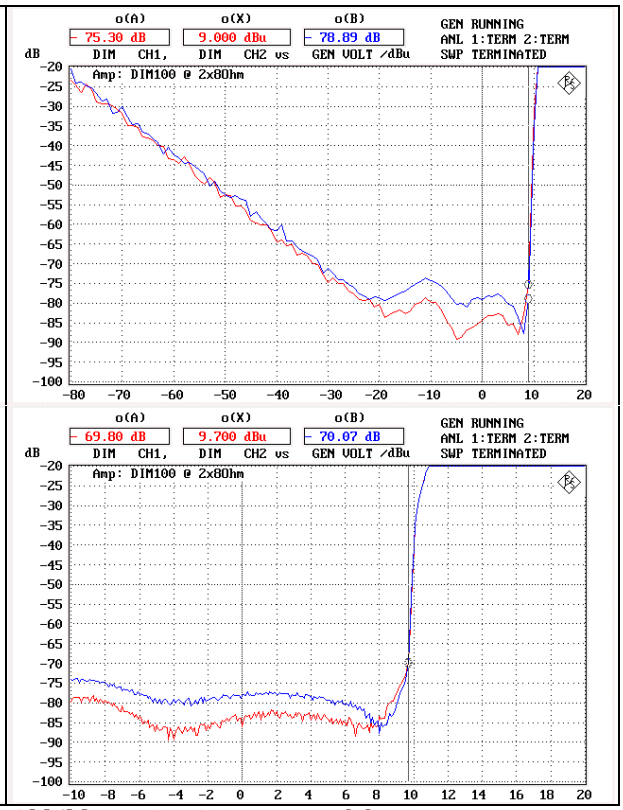


Abbildung 13 P3000 Intermodulationsverzerrung DIM100 an 2x8 Ohm Belastung

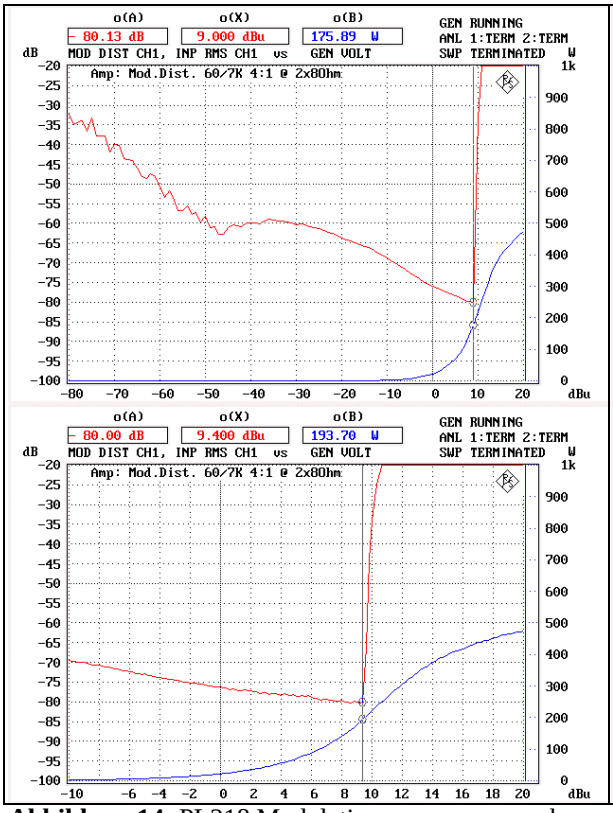


Abbildung 14 PL218 Modulationsverzerrung nach SMPTE 60/7k an 2x8 Ohm

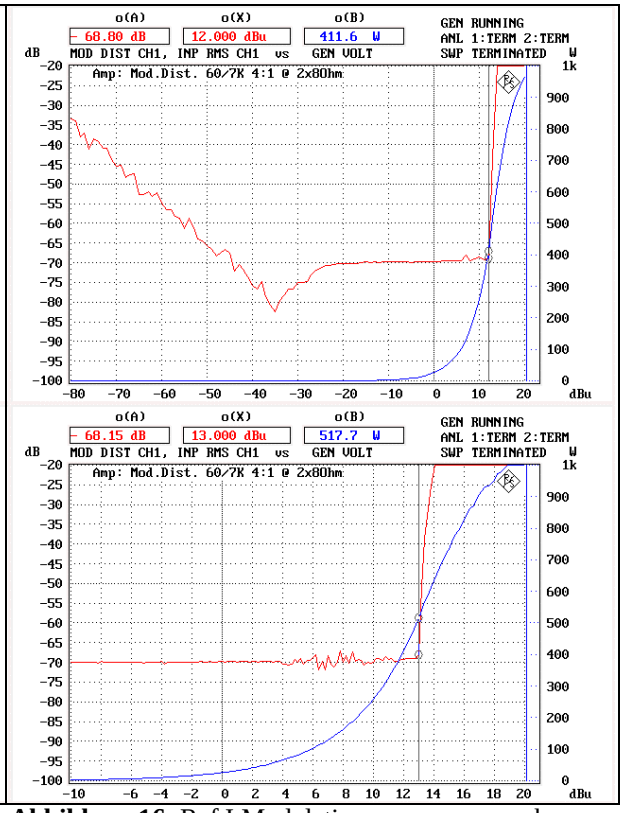


Abbildung 16 Ref.I Modulationsverzerrung nach SMPTE 60/7k an 2x8 Ohm

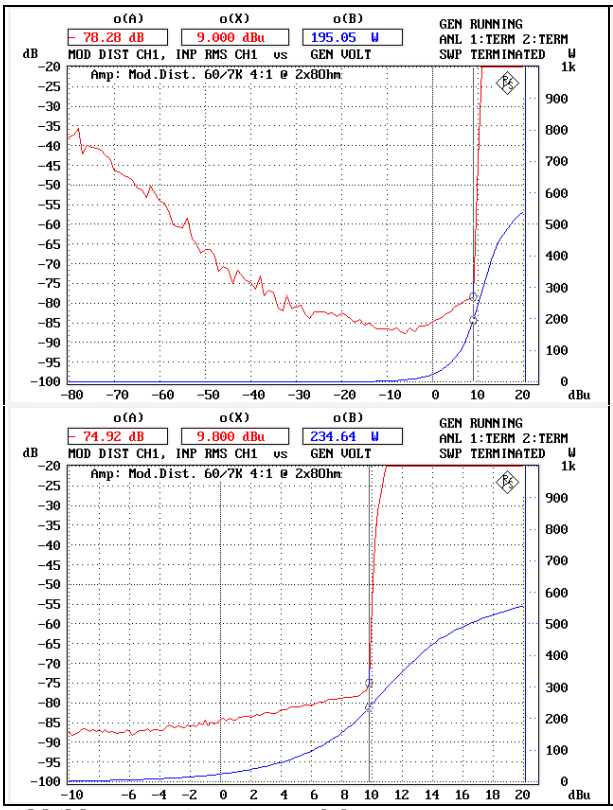


Abbildung 15 AD2404 Modulationsverzerrung nach SMPTE 60/7k an 2x8 Ohm

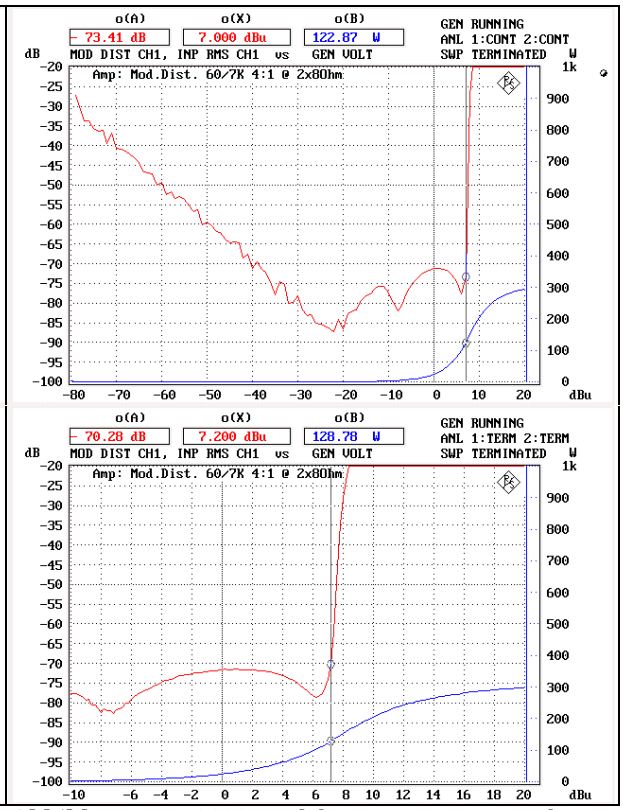


Abbildung 17 P3000 Modulationsverzerrung nach SMPTE 60/7k an 2x8 Ohm

Testsignale und Crestfaktoren

Für die Hörversuche im Rahmen dieses Tests wurden drei kurze Musikpassagen ausgewählt, die zum einen im Originalzustand verwendet und in einer zweiten Variante mit einem Kompressor zur Verringerung der Signaldynamik vorbehandelt wurden, so dass insgesamt 6 Samples zur Verfügung standen.

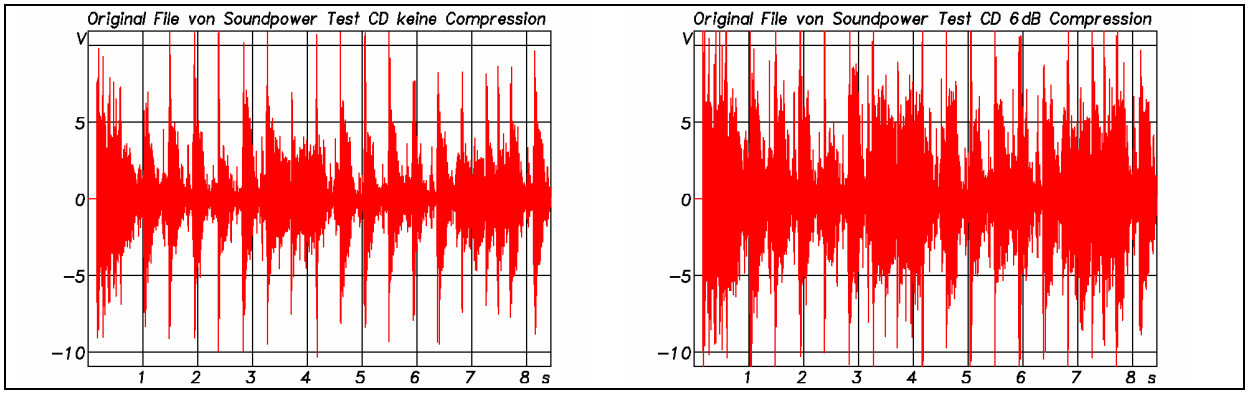


Abbildung 18 RMS = 6,68 dBu , Crest = 16,32 dB
Sample Nr.1

RMS = 10,0 dBu , Crest = 13,0 dB
Sample Nr.2

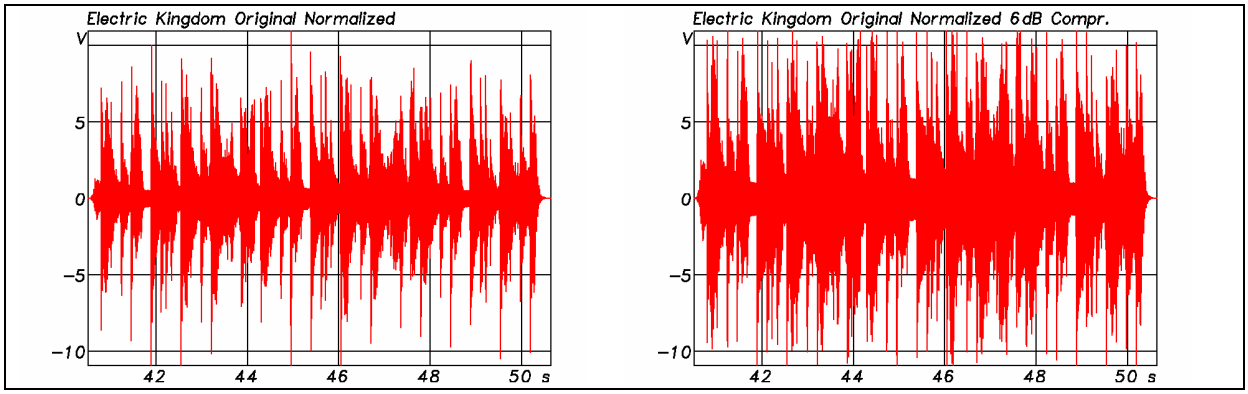


Abbildung 19 RMS = 7,32 dBu , Crest = 15,69 dB
Sample Nr.3

RMS = 10,49 dBu , Crest = 12,52 dB
Sample Nr.4

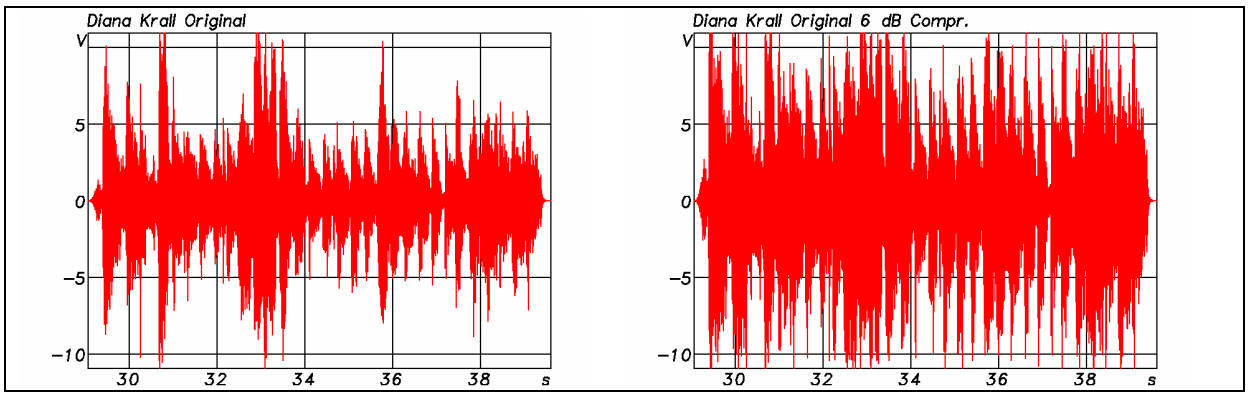


Abbildung 20 RMS = 7,44 dBu , Crest = 15,57 dB
Sample Nr.5

RMS = 11,62 dBu , Crest = 11,39 dB
Sample Nr.6

Abbildung 18 bis **Abbildung 20** zeigen den zeitlichen Verlauf dieser kurzen Passagen jeweils mit und ohne vorherige Kompression. Zu den Abbildung ist der jeweilige RMS Wert in dBu und der Crestfaktor angegeben. Die digitale Vollaussteuerung (0dBfs) des verwendeten DA-Umsetzers entspricht exakt +20 dBu bzw. 10,954 V_s, vorauf sich auch diese Werte beziehen.

Versuchsaufbau

Für die weiteren Versuche wurden diese 6 Signale über die 4 Testendstufen übertragen und ausgewertet. Die Endstufen waren dabei auf beiden Kanälen mit einem 4-Ohm Lautsprecher Dummy belastet und auf einen Verstärkungswert von 25 dB eingestellt. Ausgegeben und wieder aufgezeichnet wurde das Testsignal über einen PC via AES/EBU Interface und einem angeschlossenen hochwertigen AD/DA-Umsetzer mit 20-Bit ADCs (Crystal CS5390) und DACs (Burr Brown PCM1702). Der Wert für Vollaussteuerung betrug sowohl für die AD- wie auch für die DA-Seite exakt +20 dBu. Die vorab beschriebenen Samples waren alle mit ihren Spitzenwerten auf 0 dBfs normiert, so dass die Signale mit einer klar definierten Ausgangsspannung zur Verfügung standen, so wie sie in **Abbildung 18** bis **Abbildung 20** auch dargestellt sind.

Jedes Signal wurde sodann mit einem Pegel entsprechend digitaler Vollaussteuerung von +6 bis +19 dBu über die Endstufen übertragen. Am Endstufenausgang wurde das Signal über eine passive Vordämpfung von 25 dB abgegriffen und dem AD-Eingang wieder zugeführt. Da trotz genauer Einstellung die Verstärkungswerte der einzelnen Endstufen noch um bis zu ±0,3 dB von den gewünschten 25 dB abwichen (siehe Tabelle 1), waren diese Werte noch vorab entsprechend auf der digitalen Seite mit einem Multiplikationsfaktor passend zur gerade angeschlossenen Endstufe zu kompensieren.

Vor einer Testreihe wurden jeweils noch der Ein- und Ausgang des AD/DA-Umsetzers durchverbunden, um in dieser Konfiguration für jedes Sample bei jeder Pegelstufe eine Referenz aufzuzeichnen. Im Idealfall sollten nun die anschließend in diese Testschleife eingefügten Endstufen dem Signal keine Veränderung egal welcher Art zufügen. Die zwischen Endstufenausgang und AD-Umsetzer Eingang eingefügte passive Dämpfung von 25 dB kompensierte genau die Endstufenverstärkung von ebenfalls 25 dB, so dass die AD-Umsetzer immer im gleichen Bereich ausgesteuert wurden, wie auch bei der Referenzaufzeichnung ohne Endstufe in der Schleife. Jedes der 6 Samples wurde so in 14 Pegelstufen von +6..+19 dBu über

die vier Endstufen und jeweils einmal als Referenz aufgezeichnet. Als Resultat lagen danach zur Auswertung insgesamt 6x14x5=420 einzelne Samples vor. Ein Blockschaltbild des Versuchsaufbaus zeigt **Abbildung 21**.

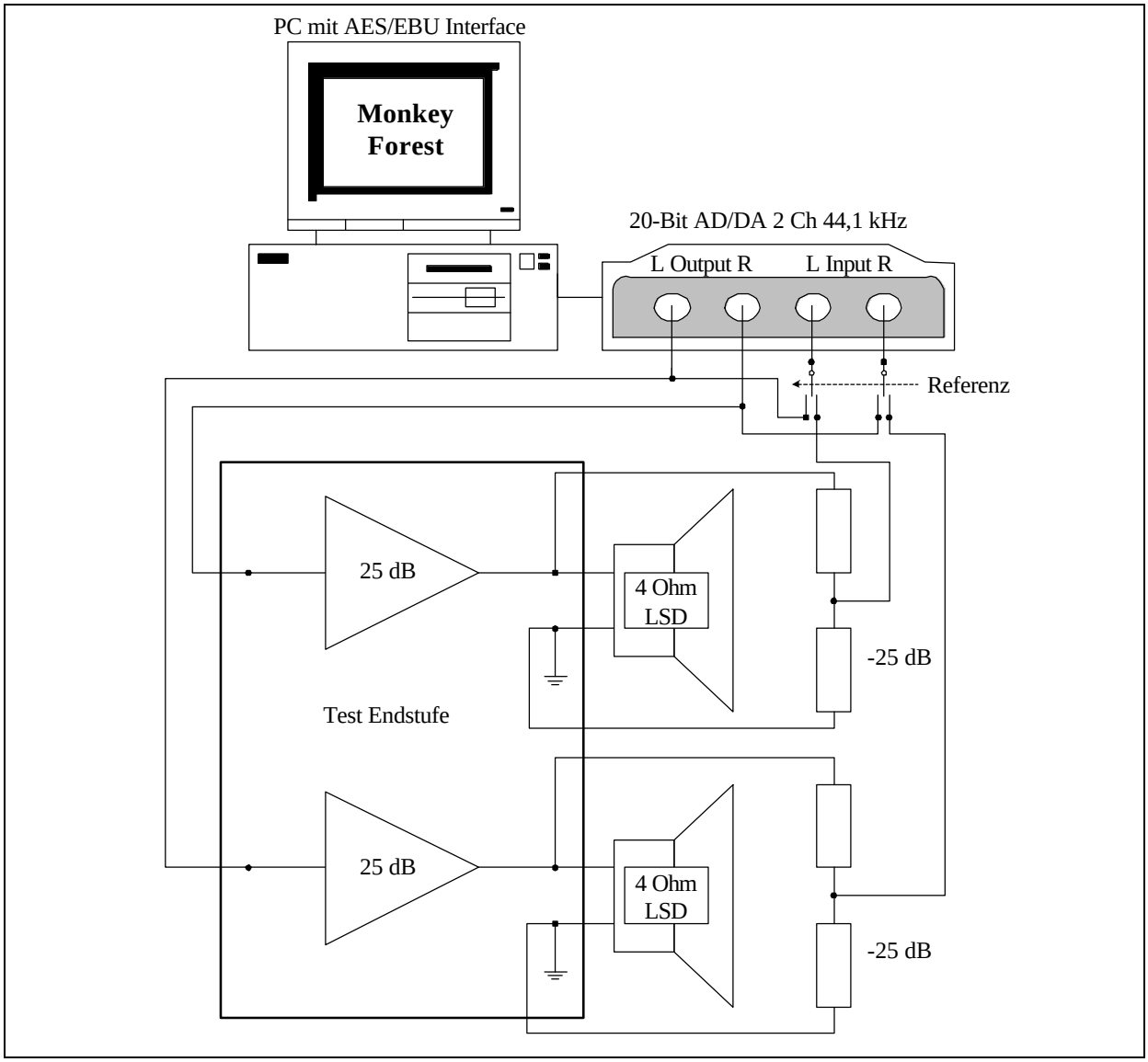


Abbildung 21 Blockschaltbild des Versuchsaufbaus mit PC, AD/DA-Umsetzer und einer Testendstufe

Signalstatistik

Neben einer Analyse des Höreindrucks wurden die Samples (Nr.1-6) nun für jede Pegelstufe bezüglich ihres RMS Wertes und ihres Crestfaktors gegenüber der Referenz ausgewertet. So entstand für jede Endstufe ein einfaches Diagramm (**Abbildung 22** bis **Abbildung 25**), wo abhängig von der Aussteuerung abzulesen ist, wie stark für die jeweiligen Test-Samples der RMS Wert bzw. Crestfaktor komprimiert wurde. Zusätzlich wurden in die Diagramme als

rote Balken die entsprechenden Eingangsspannungswerte zum erreichen der Dauerleistung und Peakleistung bei 25 dB Verstärkung der Endstufe eingetragen.

Wie es schon im voraus zu erwarten war, tritt bei den hohen Crestfaktoren der Signale im RMS Wert kaum eine Kompression ein, auch wenn es zu erheblichen Übersteuerungen bei den Signalpeaks von bis zu 6 dB kommt. **Abbildung 25** zeigt hier ein krasses Beispiel, wo bei einer Überschreitung der Clipgrenze durch die Peaks im Testsignal von 6 dB (Clipgrenze für Peakleistung bei +10 dBr und +16 dBr Inputlevel) selbst bei starker Signalkompression (Crestfaktor 11,39 dB) nur 0,9 dB Kompression im RMS Wert zu beobachten sind. Interessanter sind da schon die Kompressionen der Crestfaktoren respektive der Peakwerte, die schon deutlich einsetzen, wenn die Dauerleistungsgrenze der Endstufen überschritten wird. Für das Modell PL2 mit Schaltnetzteil und AD4 mit einem sehr großzügigen herkömmlichen Netzteil liegt der Grenzwert für das Erreichen des Peak-Grenzwertes weniger als 1 dB über dem Dauerleistungswert, so dass hier schon direkt die Peak Kompression durch Clipping einsetzt. Für die Modelle CR1 und HP3 mit eher weichen Netzteilen liegen diese Grenzen deutlich weiter auseinander, wo gut zu beobachten ist, wie die Peak Kompression abhängig vom Crestfaktor des Signals einsetzt. Signale mit einem geringen Crestfaktor beanspruchen die Endstufe naturgemäß im Mittel stärker, so dass keine so großen Peak Reserven mehr zur Verfügung stehen. Das Modell CR1 beweist sehr gut die Aussagekraft der anfangs vorgestellten Leistungsprofile (**Abbildung 1**), wo für eine zweikanalige Belastung mit 4 Ohm Impedanz die Leistungsgrenzen für 12 dB Crestfaktor bei 1770 Watt (=15,7 dBu Inputlevel) und für 18 dB Crestfaktor bei 2080 Watt (=16,4 dBu Inputlevel) liegen. Entsprechend ist in der Signalstatistik (**Abbildung 23**) für die nicht komprimierten Samples mit einem Crestfaktor von ca. 16 dB eine erste Peak Kompression bei 17 dBu Inputlevel zu beobachten. Für die vorkomprimierten Samples mit nur noch 12 dB Crestfaktor, setzt die Peak Kompression dagegen schon bei 16 dBu ein.

In einer ähnlichen Charakteristik, aber merklich weniger ausgeprägt, sind diese Zusammenhänge für die Endstufe HP3 zu erkennen. Die Ursache der Unterschiede könnte in der generell deutlich niedrigeren Leistung der HP3 gegenüber der CR1 um einen Faktor 5 liegen, wo parasitäre Kompressionsursache, wie z.B. das Einberechen der Netzspannung, viel geringer ausfallen.

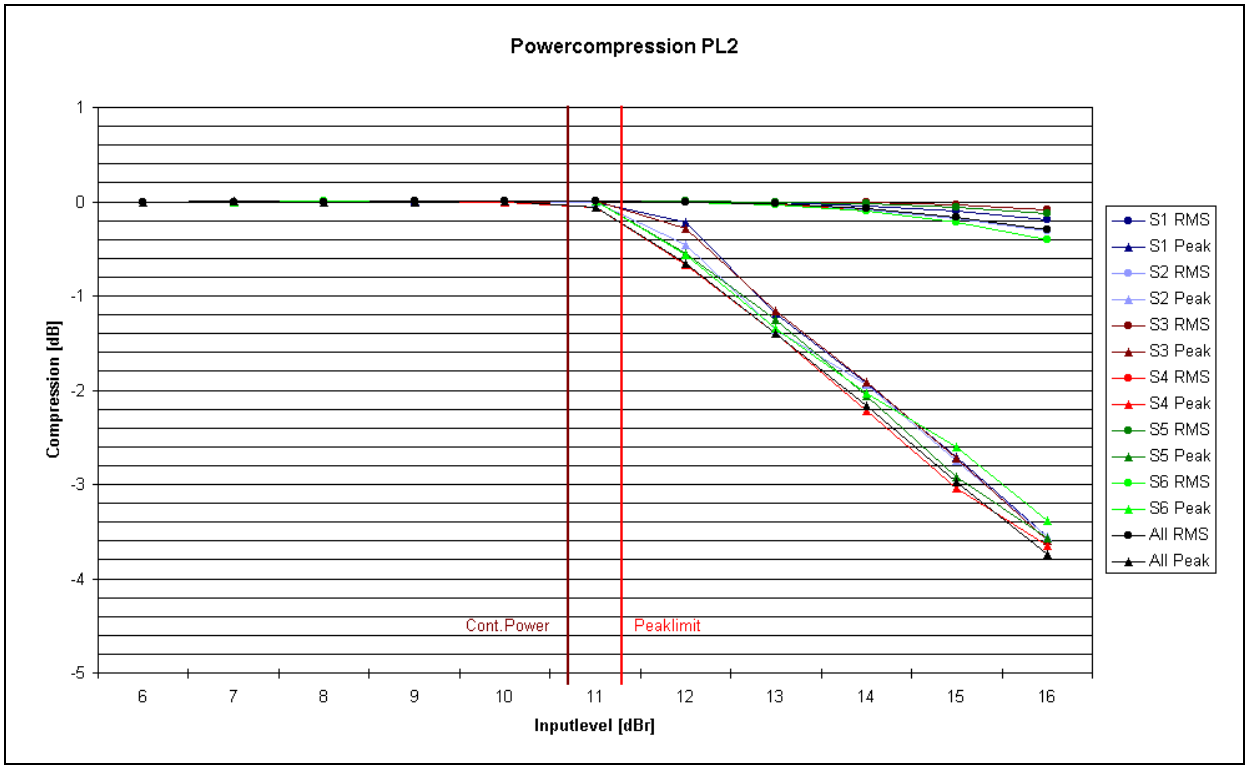


Abbildung 22 Powercompression für die Samples 1-6 bei den RMS und Peakwerten
Grenzwert Cont.Power = Dauerleistung der PL218 Endstufe
Grenzwert Peaklimit = Peakleistung der PL218 Endstufe

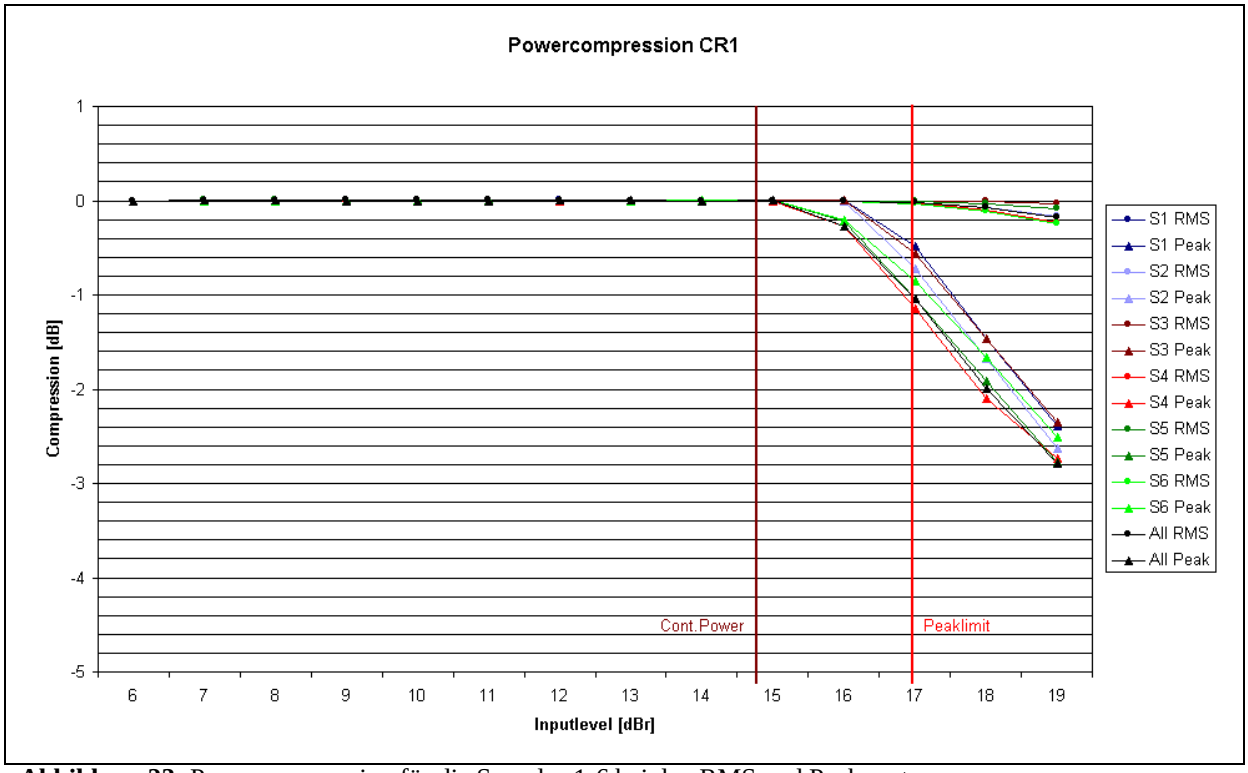


Abbildung 23 Powercompression für die Samples 1-6 bei den RMS und Peakwerten
Grenzwert Cont.Power = Dauerleistung der Reference I Endstufe
Grenzwert Peaklimit = Peakleistung der Reference I Endstufe

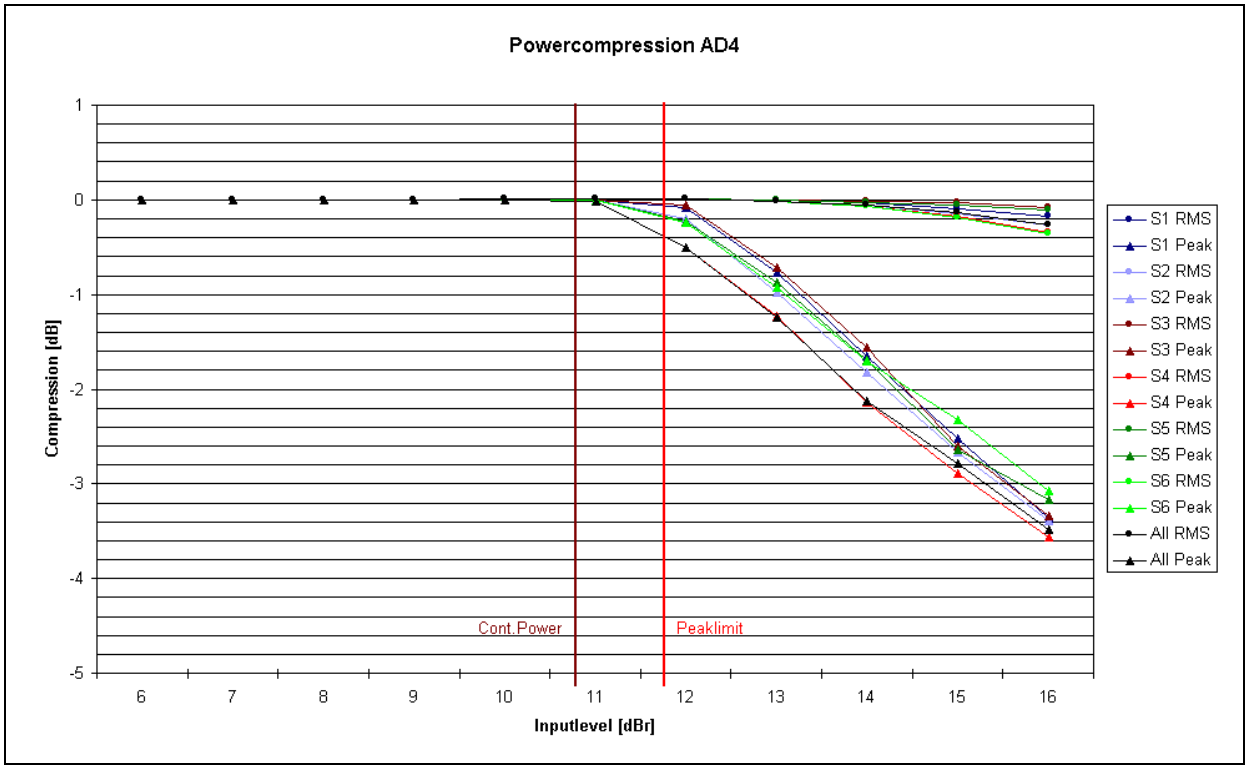


Abbildung 24 Powercompression für die Samples 1-6 bei den RMS und Peakwerten
Grenzwert Cont.Power = Dauerleistung der AD2404 Endstufe
Grenzwert Peaklimit = Peakleistung der AD2404 Endstufe

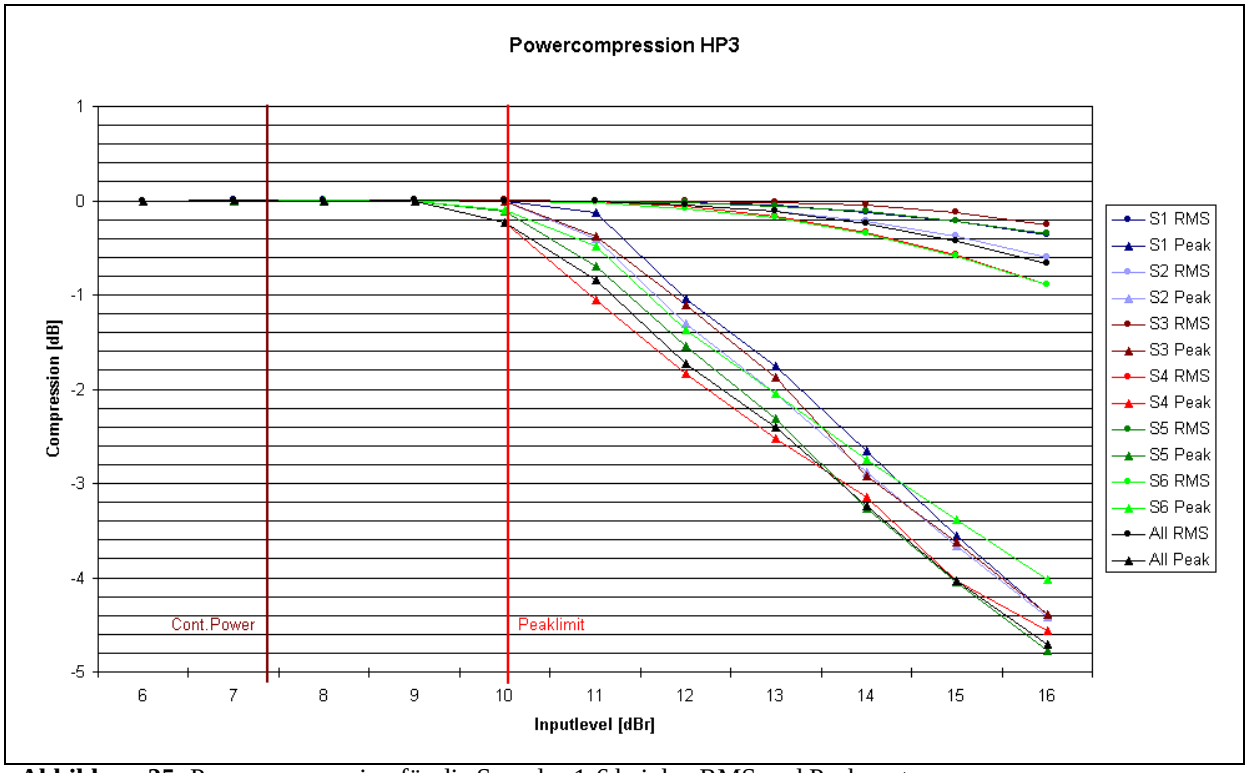


Abbildung 25 Powercompression für die Samples 1-6 bei den RMS und Peakwerten
Grenzwert Cont.Power = Dauerleistung der P3000 Endstufe
Grenzwert Peaklimit = Peakleistung der P3000 Endstufe

Hörversuche

Nachdem nun die Zusammenhänge zwischen der Signalstatistik der Test Samples und den Messwerten der Leistungsprofile hergestellt sind, stellt sich die Frage der praktischen Relevanz im Höreindruck. Die 420 Samples aus den Versuchsreihen boten hier natürlich reichhaltige Gelegenheit zur Auswertung, wo auf Grund der schieren Menge schon beachtet werden musste, sich nicht völlig zu verzetteln. Eine zweite Auswertung der Meßwerte bezüglich RMS- und Peak Kompression sollte hier behilflich sein. Dieses Mal wurden die Grafiken nicht für einzelne Endstufen erstellt, sondern jeweils für die einzelnen Samples. **Abbildung 26** bis **Abbildung 31** zeigen hier für jedes der Samples Nr.1-6 die Signal Kompression abhängig von den Testendstufen. Bezugswert ist wieder die Referenzmessung bei entsprechendem Pegel. Als senkrechte Linien sind auch hier die Werte der Dauer- und Peakleistung eingetragen.

Jedem Wert in diesen Diagrammen entspricht nun ein Sample, das zum Vergleich der Endstufen untereinander und zur Referenz verwendet werden kann. Ein Beispiel soll dieses verdeutlichen: Sample Nr.1 bei 12 dBr Pegel wird über die 4 Endstufen übertragen. In **Abbildung 26** ist für diesen Wert abzulesen, dass keine der 4 Endstufen hier eine nennenswerte Kompression der RMS Werte verursacht. Bei der Peak Kompression gibt es dagegen schon erhebliche Unterschiede. Die kleinste Endstufe HP3 im Testfeld wird bei diesem Eingangspegel an den Rand ihrer Leistungsfähigkeit getrieben und komprimiert die Peaks schon um 1,1 dB. Die beiden mittleren Modelle PL2 und AD4 kommen bei diesem Signal knapp an ihr Peaklimit und verursachen eine leichte Kompression von 0,1 bzw. 0,2 dB. Für das größte Modell CR1 liegt dieses Signal weit unterhalb aller Limits, so dass statistisch dem Signal keine Veränderungen zugefügt wird. Vergleicht man diese Werte bei 12 dBr Eingangspegel mit denen der anderen Samples, so ist auch hier wieder zu beobachten, wie ein abnehmender Crestfaktor die Peak Kompression zunehmen lässt.

Im Hörvergleich kann nun das jeweilige Sample bei gleichem Pegel im Original und über die 4 Endstufen gehört werden. Das lässt zum einen bei geringem Pegel unterhalb der Clipgrenze einen ganz normalen direkten Vergleich bei exakt gleicher Verstärkung und gleicher Belastung zu und ermöglicht es zudem bei gesteigerten Pegelwerte, das Verhalten der Endstufen an und über Clipgrenze zu beobachten. Interessant scheint es hier vor allem zu ermitteln, wann sich die Dynamikcompression im Grenzlastbereich hörbar bemerkbar macht und ob es auch

schon Effekte gibt, wenn die Peaks der Signale noch nicht die Clipgrenze der entsprechenden Endstufe erreichen.

Eingangspegel [dBu]	**Referenz**	**QSC PL218**	**Crown Reference I**	**Audience Delight 2404**	**Hafler P3000**
+6	ORG-SA06	PL2-SA06	CR1-SA06	AD4-SA06	HP3-SA06
+7	ORG-SA07	PL2-SA07	CR1-SA07	AD4-SA07	HP3-SA07
+8	ORG-SA08	PL2-SA08	CR1-SA08	AD4-SA08	HP3-SA08
+9	ORG-SA09	PL2-SA09	CR1-SA09	AD4-SA09	HP3-SA09
+10	ORG-SA10	PL2-SA10	CR1-SA10	AD4-SA10	HP3-SA10
+11	ORG-SA11	PL2-SA11	CR1-SA11	AD4-SA11	HP3-SA11
+12	ORG-SA12	PL2-SA12	CR1-SA12	AD4-SA12	HP3-SA12
+13	ORG-SA13	PL2-SA13	CR1-SA13	AD4-SA13	HP3-SA13
+14	ORG-SA14	PL2-SA14	CR1-SA14	AD4-SA14	HP3-SA14
+15	ORG-SA15	PL2-SA15	CR1-SA15	AD4-SA15	HP3-SA15
+16	ORG-SA16	PL2-SA16	CR1-SA16	AD4-SA16	HP3-SA16
+17	ORG-SA17		CR1-SA17		
+18	ORG-SA18		CR1-SA18		
+19	ORG-SA19		CR1-SA19		

Tabelle 2 Nomenklatur der Dateinamen mit den Samples der Hörtests [1]
In jeder Datei Sample Nr.1-6 in Folge
Format: WAV = Wave Audio File ; 44,1 kHz ; 16-Bit ; 2 Channel

In den Diagrammen der **Abbildung 26** bis **Abbildung 31** sind diejenigen Samples und Pegelwerte mit einem schwarzen Kreis markiert, bei denen für die betreffende Endstufe erstmals hörbare Signalverschlechterungen oder Veränderungen in Form von Verzerrungen, Pumpeffekten oder Rauhigkeiten auftraten. Interessant an diesen Eckwerten ist die dort auftretende Kompression des Signals durch die Endstufe gegenüber der Referenz, wie sie auf der Y-Achse abzulesen ist. Der zugehörige Eingangspegelwert findet sich auf der X-Achse. In Relation zur ebenfalls eingezeichneten Clipgrenze für die Peakleistung kann hier abgelesen werden, wie weit die Endstufe noch von diesem Grenzwert entfernt ist oder ob er schon überschritten wird.

Sample Nr.1 und 2 beinhalten eine Aufnahme mit Schlagzeug und E-Bass, die sich als recht unempfindlich gegen leichtes Clippen zeigte. Erst bei einer Peak-Kompression durch die Endstufen von 2 dB und mehr, wurden bei der nicht vorkomprimierten Version erste Abweichungen in Form von zittrigen Bässen und leichten Verzerrungen hörbar. Für das vorkomprimierte Sample Nr. 2 traten diese Effekte schon ab etwa 1 dB Peak-Kompression durch die Endstufen

ein. Andere Effekte oder Unterscheidungsmerkmale waren nicht festzustellen. Dieses gilt insbesondere für Pegel unterhalb der Clipgrenze.

Sample Nr.3 und 4 entstammten einer modernen Techno Dancefloor Produktion, die sich im Originalzustand als völlig unkritisch erwies und selbst Peak-Kompressionen von 3 dB durch die Endstufen noch klaglos, also unhörbar, über sich ergehen ließ. In vorkomprimierter Form wurde diese Passage auf Grund ihrer heftigen und lang anhaltenden Tiefbassanteile dann jedoch extrem kritisch, so dass Peak-Kompressionen von unter 1 dB schon unangenehm in Erscheinung traten.

Sample Nr.5 und 6 enthalten eine kurze Passage mit einer klassischen Jazz Combo und Stimme, die sich sowohl im Originalzustand, wie auch in der komprimierten Form, als recht kritisch entpuppte. Insbesondere die Stimme reagierte hier sehr früh auf Peak-Kompression und Verzerrungen, so dass bei Werten knapp über 1 dB schon hörbare Veränderungen und Rauhigkeiten auftraten.

Zusammenfassend kann über die Hörergebnisse gesagt werden, dass alle Endstufen mit den hier benutzten 6 verschiedenen Testsignalen ohne hörbare Einschränkungen bis an die Grenze ihrer Peakleistung ausgesteuert werden können. Auffällig ist dabei, dass trotz einer schon früher einsetzenden Kompression der Signalpeaks durch die Endstufen, keine hörbaren Signalveränderungen zu beobachten sind. Ganz im Gegenteil sogar, können manche Signale bis zu 4 dB über die Peakleistungsgrenze ausgesteuert und damit hart geclippt werden, bis die ersten Veränderungen hörbar werden. Von den vier Endstufen bietet das größte Modell, die Reference I, naturgemäß die absolut betrachtet höchsten Reserven. Andererseits reagiert sie auf Grund des extrem ausgereizten Verhältnisses zwischen Peak- und Dauerleistung auch am empfindlichsten auf Signale mit reduziertem Crestfaktor. Erschwerend kommen für eine Endstufe dieser Leistungsklasse Probleme mit merklich absinkender Netzspannung unter Volllast hinzu. Die Powerlight 218 mit geregeltem Schaltnetzteil und die AD2404 mit einem sehr großzügig ausgelegten herkömmlichen Netzteil sind dagegen weitgehend unsensibel für den Crestfaktor. Einen sehr günstigen Kompromiss trifft die P3000 in der kleinen Leistungsklasse, die ein sehr großzügiges Verhältnis zwischen Dauer- und Peakleistung bietet und dabei trotzdem mit komprimierten Signalen gut umzugehen weiß, aber eben bei weitem nicht mit den Problemen der Netzversorgung konfrontiert wird, wie es bei der Reference I mit der mehr als 5-fachen Ausgangsleistung der Fall ist.

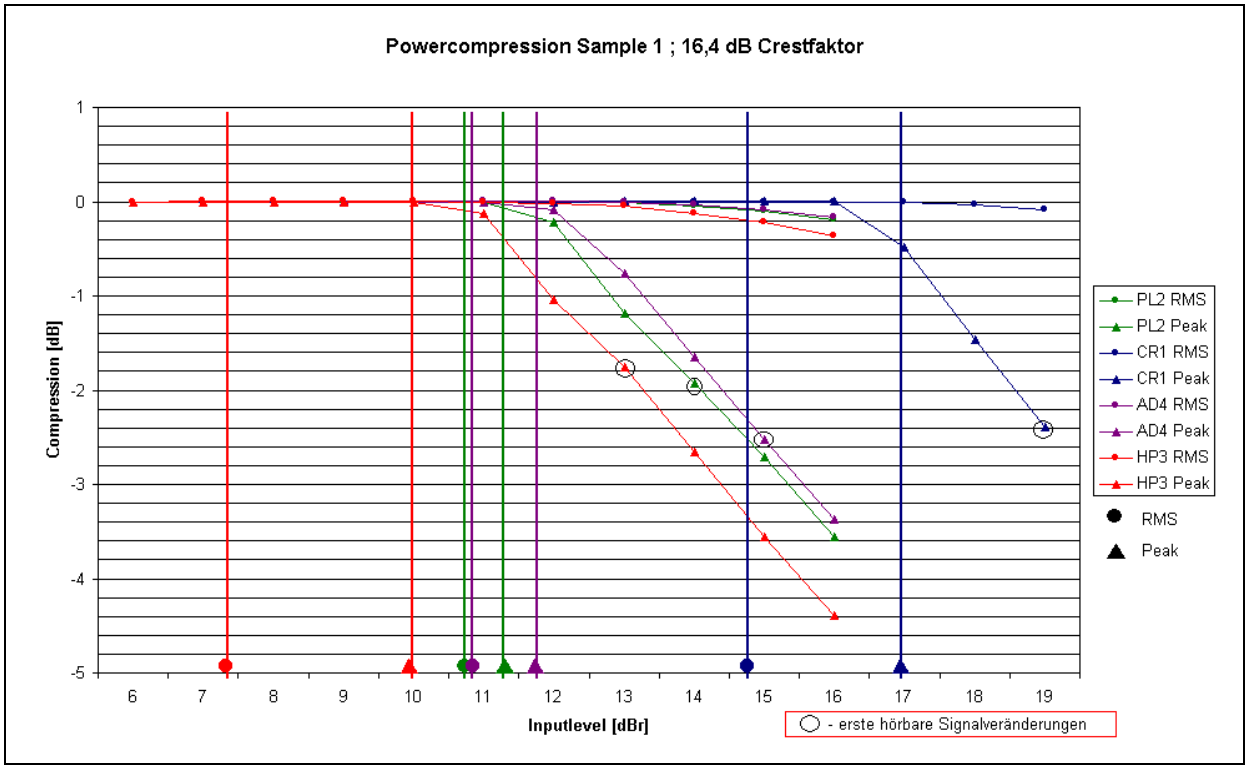


Abbildung 26 Powercompression der RMS- und Peakwerte für Sample Nr.1 mit 16,4 dB Crestfaktor
Grenzlinien für Dauer- und Peakleistungen der vier Testendstufen

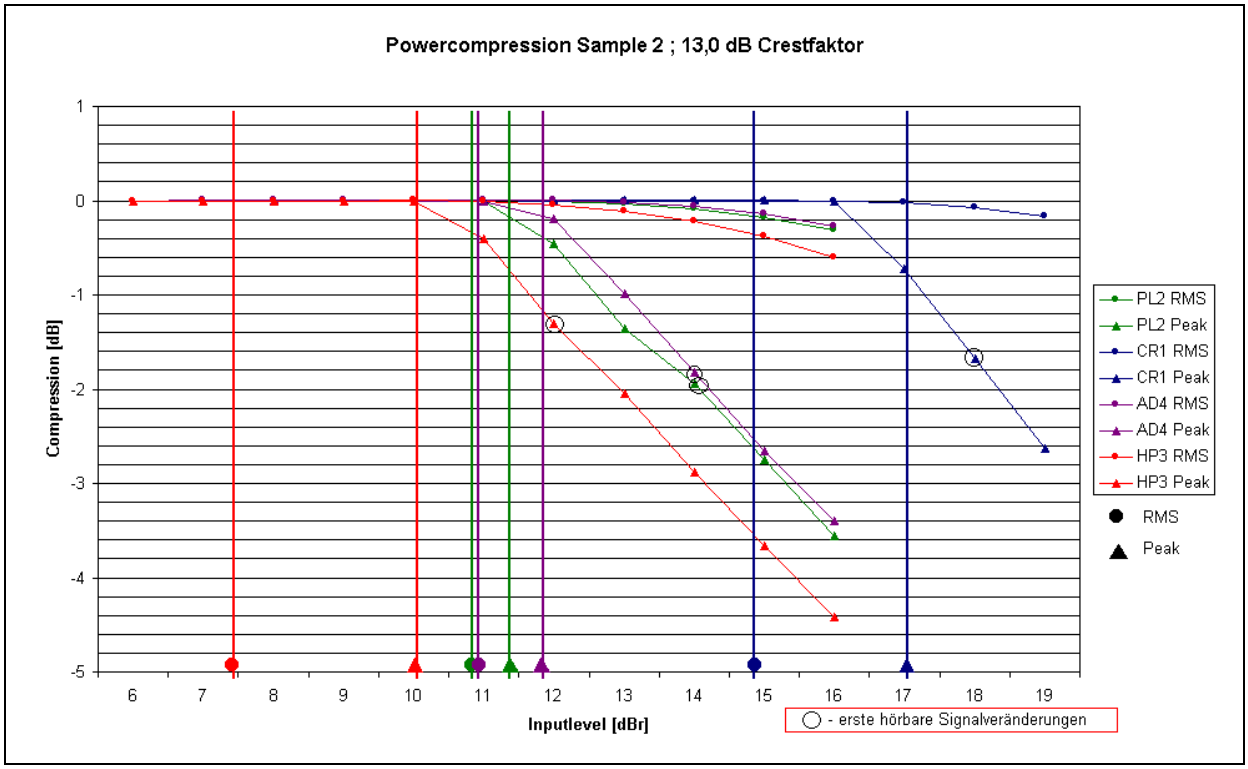


Abbildung 27 Powercompression der RMS- und Peakwerte für Sample Nr.2 mit 13,0 dB Crestfaktor
Grenzlinien für Dauer- und Peakleistungen der vier Testendstufen

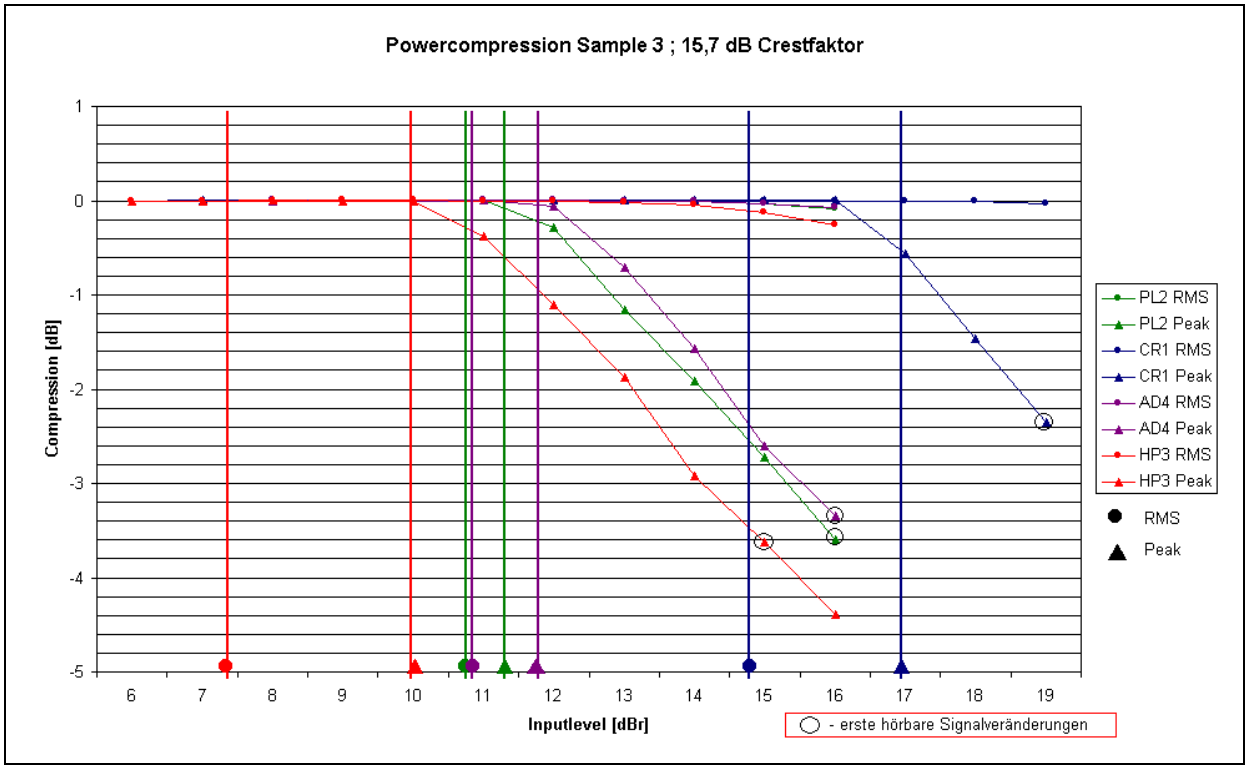


Abbildung 28 Powercompression der RMS- und Peakwerte für Sample Nr.3 mit 15,7 dB Crestfaktor
Grenzlinien für Dauer- und Peakleistungen der vier Testendstufen

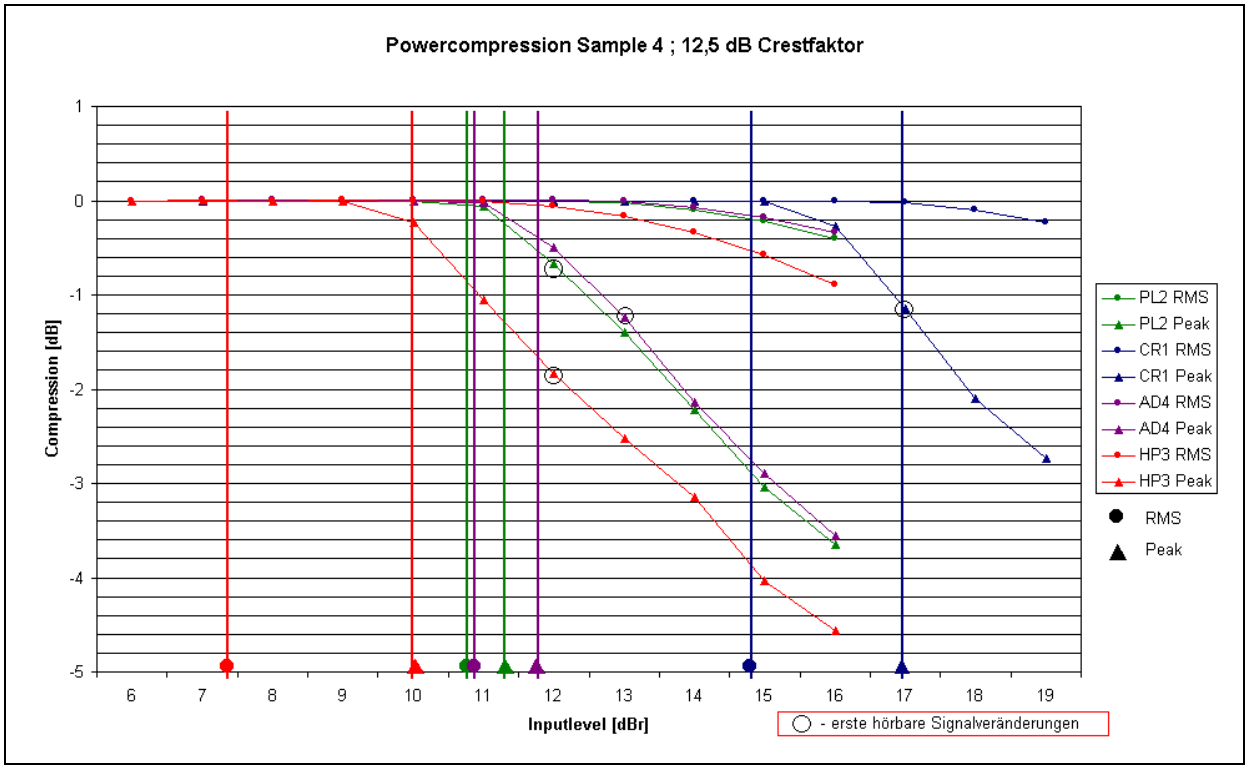


Abbildung 29 Powercompression der RMS- und Peakwerte für Sample Nr.4 mit 12,5 dB Crestfaktor
Grenzlinien für Dauer- und Peakleistungen der vier Testendstufen

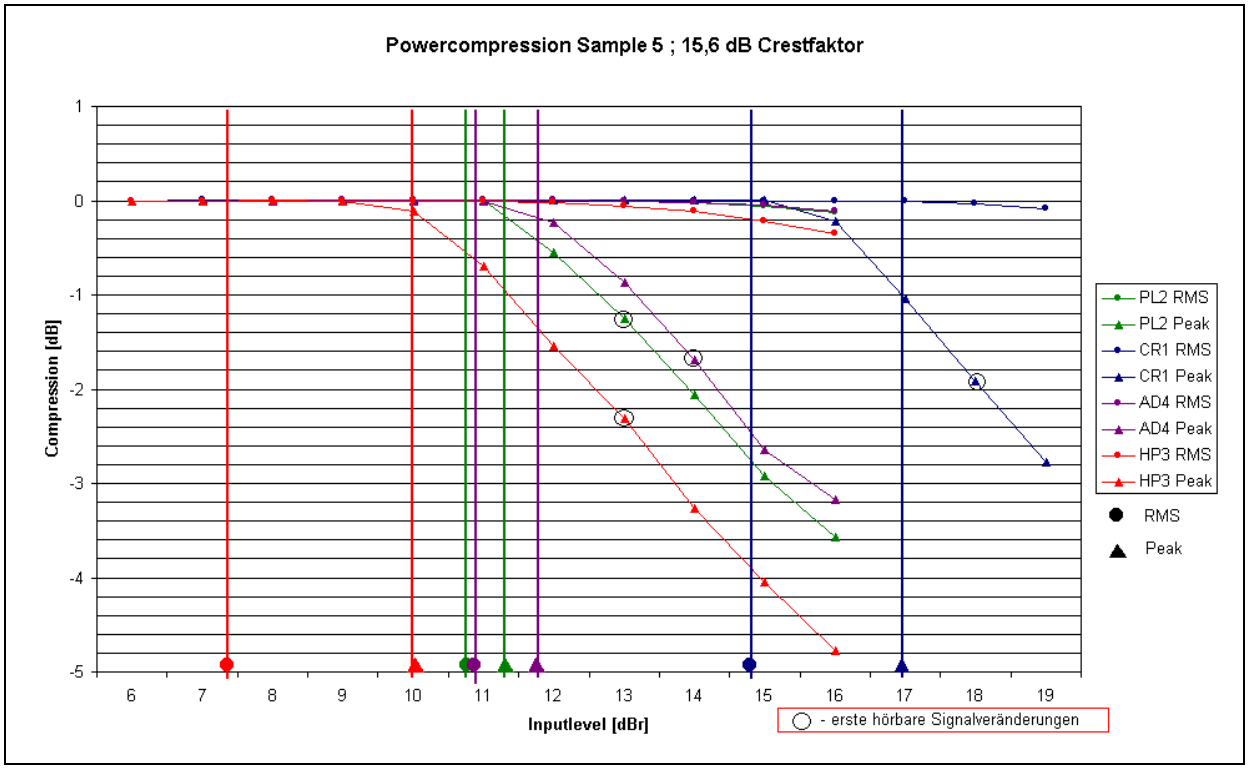


Abbildung 30 Powercompression der RMS- und Peakwerte für Sample Nr.5 mit 15,6 dB Crestfaktor
Grenzlinien für Dauer- und Peakleistungen der vier Testendstufen

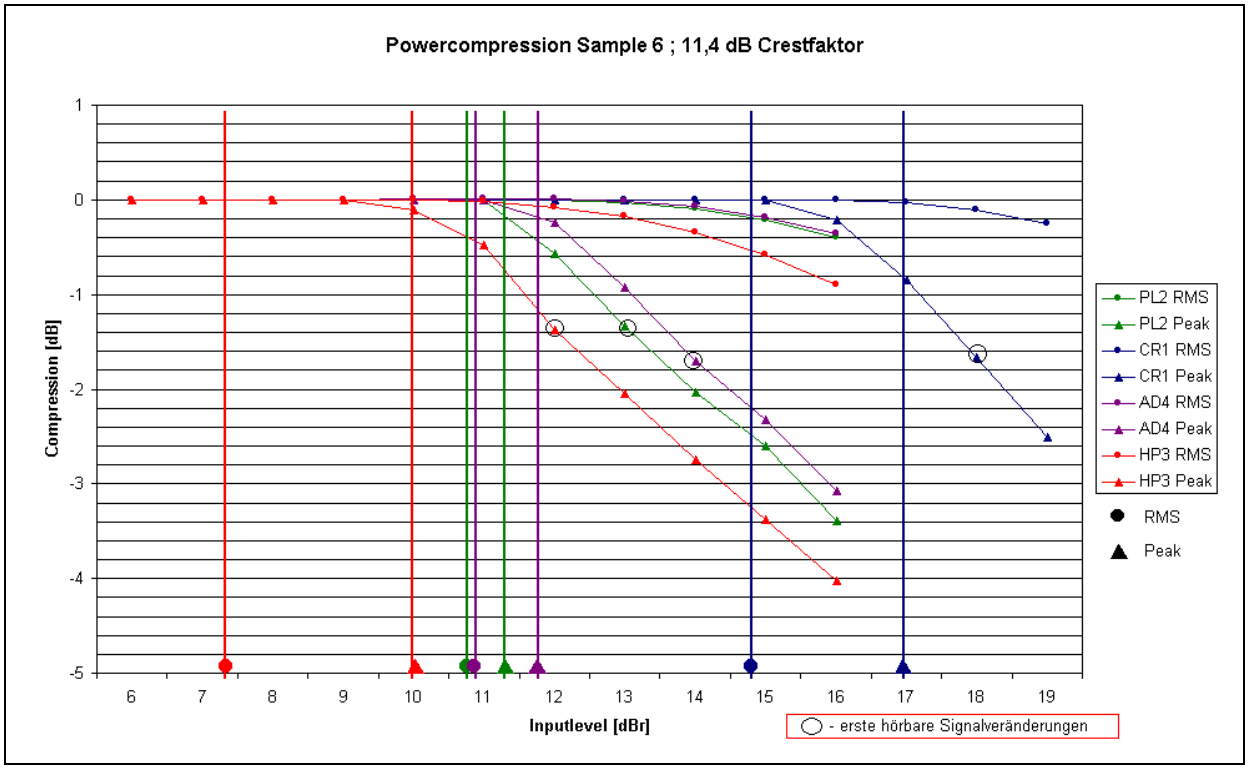


Abbildung 31 Powercompression der RMS- und Peakwerte für Sample Nr.6 mit 11,4 dB Crestfaktor
Grenzlinien für Dauer- und Peakleistungen der vier Testendstufen

Limiter und deren Einstellung

Bei Limitern im Audiobereich sind die beiden grundsätzlichen Varianten des RMS- und des Peak-Limiters zu unterscheiden. RMS-Limiter werden immer dort eingesetzt, wenn es darum geht, einen bestimmten mittleren Pegel über längere Zeit betrachtet nicht zu überschreiten. Ein typisches Beispiel sind RMS-Limiter zum Schutz von Hochtonlautsprechern vor thermischer Überlastung. Kurze Peaks werden von diesen Limitern ungehindert durchgelassen. Peak-Limiter haben dagegen die Aufgabe auch eine kurzzeitige Überschreitung festgelegter Grenzwerte nicht zuzulassen. Sie werden eingesetzt, um das Clippen eines nachfolgenden Gerätes, z.B. einer Endstufe, zu vermeiden. Es stellt sich nun die Frage, welche Folgerungen für die Einstellung der Peak-Limiter aus den hier gemachten Messungen und Hörversuchen gezogen werden können. Um ein Übersteuern jeglicher Art sicher zu vermeiden, ist eine Orientierung an einer Burst-Messung, wie in **Abbildung 3** abgebildet, zu empfehlen. Idealerweise sollte der Limiter so reagieren, dass er abhängig von der Vorgeschichte einen gewissen Peak-Overshoot bis zur maximalen Peakleistung zulässt und danach auf den Dauerleistungswert begrenzt. Nur so kann weitgehend sicher eine Übersteuerung vermieden werden. Steht nur ein einfacher Limiter mit einem Grenzwert und einer Attack- und Release Zeitkonstanten zur Verfügung, so kann dieser mit einer langen Attack Zeit auf den Dauerleistungswert der Endstufe eingestellt werden. Kürzere Peaks werden dann ungehindert durchgelassen, was unter Umständen zu einem gelegentlichen Übersteuern in den Peaks bei der nachfolgenden Endstufe führen kann. Wie die Hörversuche jedoch gezeigt haben, sind Übersteuerung in den Peakwerten von 2-3 dB völlig unkritisch. Kritisch wird es nur dann, wenn Signale schon stark vorkomprimiert sind oder lang anstehende Basstöne, wie sie in moderner elektronischer Musik gerne vorkommen, die Endstufen kurzzeitig auf Dauerleistung belasten. Für diesen Fall begrenzt dann der Limiter auf den richtigen Wert der Dauerleistung.

Fazit

Auch die zweite Mess- und Hörversuchsreihe lieferte recht ernüchternde Ergebnisse, was die klanglichen Unterschiede bei Endstufen betrifft. Um Missverständnisse auszuschließen, sei nochmals ganz klar gesagt, dass hier nur über moderne professionelle Hochleistungsendstufen gesprochen wird und keine exotischen Konzepte mit Röhren, Class-A Schaltungen usw. berücksichtigt wurden.

In der ersten Versuchsreihe [1] wurde bereits festgestellt, dass klangliche Unterschiede bei Endstufen im normalen Arbeitsbereich fernab der Clipgrenze, wenn sie denn überhaupt vorhanden sind, meist auf geringfügige Unterschiede im Frequenzgang oder auf einen unzureichenden Pegelabgleich zurückzuführen sind. Diese zweite Versuchsreihe sollte nun den Arbeitsbereich an und über der Leistungsgrenze beleuchten. Auch hier gibt es eine recht eindeutige Aussage, die lautet: Wichtig ist in erster Linie eine hohe Peakleistung, um alle Signalspitzen unkomprimiert übertragen zu können und sonst nichts !

Hörbare Unterschiede zwischen den vier hier getesteten Endstufen waren nur dann auszumachen, wenn auf Grund unterschiedlicher Peakleistungen mehr oder weniger früh eine starke Signalkompression oder Verzerrung einsetzte. Verzerrungen in den Spitzenwerten waren dabei erst für sehr deutliche Übersteuerungen von 3 dB und mehr überhaupt wahrzunehmen. Die Dauerleistungsfähigkeit der vier Endstufen spielte dabei keine Rolle, da selbst bei stark komprimierten Signalen der Bedarf an Peakleistung immer noch mindesten 4-fach höher liegt als für die Dauerleistung. Eine hohe Dauerleistung kann daher je nach Einsatzgebiet nur als Kriterium für die Betriebssicherheit in extremen Situationen gewertet werden, wo der klassische PA Einsatz auch zugehören dürfte.

Es bleibt somit als Quintessenz, dass soweit eine Endstufe dem heutigen Stand der Technik entspricht, von ihr keine hörbar klanglichen Beeinflussungen für das Audiosignal mehr ausgehen. Unterschiede finden sich somit nur in der Fähigkeit möglichst hohe unverzerrte Ausgangsspannungen in Kombination mit hohen Ströme bei niederohmeigen Lasten liefern zu können. Als weitere Qualitätskriterien sollten daher mehr periphere Größen, wie der Störabstand, die Gleichtaktunterdrückung an den Eingängen, die Genauigkeit der Pegelsteller, die Schutzschaltungen und nicht zuletzt auch das Verhältnis von Leistung zu Gewicht gesehen werden.

Ausblick

Extreme Betriebszustände mit Lasten unter 2 Ohm sowie primär induktiven oder kapazitiven Belastungen wurden hier für die Versuchsreihen nicht in Betracht gezogen, wo sicherlich noch Bedarf nach weiteren Forschungen liegt. Des weiteren wären die Versuche noch auf die immer weitere Verbreitung findenden digitalen Endstufen auszuweiten, die erhebliche Vorteile im Wirkungsgrad und extreme Leistungsdichten bieten.

Persönliche Anmerkung

In Anbetracht der bestimmt nicht immer akzeptierten Schlussfolgerungen dieses Beitrages sei mir eine persönliche Anmerkung zum Thema Endstufen und deren klangliche Eigenschaften erlaubt. Als Besitzer, Sammler und Liebhaber vieler exklusiver Endstufenmodelle war ich immer von den technischen Qualitäten dieser Geräte überzeugt. Mit der Gewissheit, dass sich dieses auch in den klanglichen Eigenschaften niederschlägt, habe ich bisher an einer Reihe von Hörvergleichen teilgenommen. Nicht zuletzt habe ich auch mit diesen Versuchsreihen in der Erwartung begonnen, klare Unterschiede feststellen, wenn auch nicht unbedingt messtechnisch begründen zu können. Meine persönlichen Vermutungen gingen eher in die Richtung, dass es klar hörbare Unterschiede geben würde, man diese nur mangels einer geeigneten Messmethode noch nicht messtechnisch zu manifestieren wusste. Leider erhärtete sich jedoch zunehmendes der schon immer vorliegende Verdacht, dass für die hörbaren Unterschiede nur geringe Frequenzgangabweichungen, ein unzureichender Pegelabgleich oder schlicht fehlende Leistung verantwortlich waren. Dass Endstufen klanglich filigran sein können, Anteile der Musik verschleiern und hervorholen oder mehr weniger räumlichen klingen können, war in allen Hörversuchen nicht einmal ansatzweise festzustellen.

Das alles nimmt jedoch aus meiner Sicht keiner der angesprochenen High-End Endstufe oder auch anderen exotischen Konzepten ihre Rechtfertigung. Bei diesen Geräten handelt es sich letztendlich um den Versuch, das technisch Machbare in bestimmten Richtungen bis ins Extrem zu treiben, was dann schon oft der Grundstein zu neuen bahnbrechenden Entwicklungen war. Als Fazit bleibt noch festzuhalten, dass die vier hier vorgestellten professionellen Endstufe ihren sehr hohen Qualitätsstandard eindrucksvoll unter Beweis gestellt haben. Im Rahmen ihrer jeweiligen Leistungsfähigkeit machen sie genau das, was man von ihnen erwartet, das Signal verstärken und sonst nichts !

Literaturhinweise

[1] Weitere Veröffentlichungen zum Thema sowie die kompletten Messergebnisse und Auszüge der Hörbeispiele finden sich als Download auf folgender Homepage: www.anselmgoertz.de