

Meßverfahren zur Beurteilung von Beschallungsanlagen und deren Komponenten insbesondere bei Lautsprechern und Endstufen

Autor:

Dr. Anselm Goertz
 Audio & Acoustics Consulting Aachen
 Robensstr. 62
 D-52070 Aachen

Tel.: 0241/155820
 Fax: 0241/155821
 e-mail: anselm.goertz@t-online.de

Vortrag zum Cavis Congress 99

Inhalt:

MEßVERFAHREN ZUR BEURTEILUNG VON BESCHALLUNGSANLAGEN UND DEREN KOMPONENTEN INSBESONDERE BEI LAUTSPRECHERN UND ENDSTUFEN	2
ÜBERSICHT.....	2
KOMPLEXER FREQUENZGANG	2
ZEITVERHALTEN.....	4
VERZERRUNGSWERTE	6
RÄUMLICHES ABSTRAHLVERHALTEN	7
BEURTEILUNG VON LEISTUNGSVERSTÄRKERN.....	10
LINEARES ÜBERTRAGUNGSVERHALTEN	10
VERZERRUNGSWERTE	11
LEISTUNG UND MEHR	13
HÖREINDRUCK.....	14
ZUSAMMENFASSUNG.....	15

Meßverfahren zur Beurteilung von Beschallungsanlagen und deren Komponenten insbesondere bei Lautsprechern und Endstufen

Übersicht

Welche meßtechnischen Verfahren und Eckwerte einen Lautsprecher oder einen Leistungsverstärker sinnvoll charakterisieren und einen möglichst guten Rückschluß auf die klanglichen Eigenschaften zulassen, stellt heute immer noch einen Streitpunkt unter Anwendern und Entwicklern dar. Neben der landläufigen Meinung, daß die Qualitäten eines Lautsprechers oder einer Endstufe nicht meßbar sind, sondern nur über den Höreindruck zu erfahren, gibt es verschiedene Fraktion, die der einen oder anderen Meßmethode entscheidende Bedeutung beimessen. An dieser Stelle sei nur das Thema Sprungantwort eines Lautsprechers genannt, das wie kein anderes die Meinungen polarisiert. Die eine Seite erkennt aus der Sprungantwort nahezu alles über den Lautsprecher, während von der anderen Seite der Sprungantwort als meßtechnische Aussage keine Bedeutung beigemessen wird. In den folgenden Absätzen soll daher zunächst eine kurze Übersicht über die möglichen Messungen an Lautsprechern gegeben und auf einige Besonderheiten hingewiesen werden. Insgesamt umfaßt die dort vorgestellte Meßreihe das lineare Übertragungsverhalten, das Verzerrungsverhalten respektive das nichtlineare Übertragungsverhalten und das räumliche Abstrahlverhalten. In einem zweiten Abschnitt werden einige Meßverfahren bei Leistungsverstärkern erläutert und in Bezug zu den klanglichen Eigenschaften gestellt.

Komplexer Frequenzgang

Die eigentliche Frequenzgangkurve (*Abb.1/links*) ist die wohl meist gezeigte Meßkurve eines Lautsprechers, die auf Achse des Lautsprechers aufgezeichnet wird und möglichst eine Aussage über die Empfindlichkeit enthalten sollte, die sich auf eine Entfernung von 1 Meter und eine Klemmenspannung bezieht, die an der nominellen Impedanz der Box einer Leistung von 1 Watt entsprechen würde. Die obere und untere Grenzfrequenz des Lautsprechers und der Grad der Abweichung von einem gewünschten Verlauf lassen hier erste Aussagen über den klanglichen Charakter und die tonale Abstimmung zu. Als Randwerte sollten Angaben über die Messbedingungen, z.B. über eine zeitliche Fensterung der Impulsantwort zur Vermeidung von Interferenzen durch Reflexionen oder auch über einer mögliche Glättung der Kurve gemacht werden. Zur Glättung der Kurve hat sich ein Wert von 1/6 Oktave als praxistauglich und gehörrichtig bewährt.

Zur Beurteilung der Ursachen von Welligkeiten im Frequenzgang kann ein Zerfallsspektrum (*Abb.1/rechts*) betrachtet werden. Das hier dargestellte Ausschwingverhalten eines Lautsprechers läßt resonierende Gehäuse oder sich in Partialschwingungen ergehende Membranen leicht erkennen. Einbrüche im Frequenzgang stellen sich hier häufig als lang nachschwingende und verspätet einschwingende mechanische oder akustische Resonanzen heraus, deren klangliche Auswirkungen deutlich schwerwiegender sein können, als es die Abweichungen im Frequenzgang vermuten lassen würden. Besondere Vorsicht ist hier geboten, wenn der Frequenzgang durch elektrische Vorfilter korrigiert werden soll und sogar noch eine Pegelanhebung an Resonanzstellen erfolgt, was in der Regel zu klanglichen Verschlechterungen führt. Das in *Abb.1* dargestellte Beispiel zeigt eine solche Resonanzstelle bei ca. 600 Hz, die im Frequenzgang als Einbruch und im Zerfallsspektrum als Resonanz auftritt.

An dieser Stelle sollte ein Sonderfall erwähnt werden. Die häufig bei Beschallungslautsprechern anzutreffenden Hochtontreiber mit 3 oder 4 Zoll großen Membranen erzeugen durch die unvermeidlichen Partialschwingungen dieser Membranen bei hohen Frequenzen gerne sehr fein strukturierte Welligkeiten in Größenordnungen von 5-10 dB, die sich dann auch durch entsprechendes Nachschwingen äußern. Trotz dieser augenscheinlichen Problemstellen konnten aber bei dieser Art Unebenheiten im Frequenzgang keine klanglichen Beeinträchtigung

festgestellt werden, soweit sie in Bereichen von 8 kHz aufwärts lagen. Auch wenn die technischen Möglichkeiten mit fein auflösenden Digitalfiltern bestehen, hat es sich eher als problematisch herausgestellt diese Abweichungen entsprechend zu entzerren. Klangliche Verbesserungen konnte hierdurch grundsätzlich nicht erzielt werden.

Der im Beispiel in *Abb.1* gezeigt Lautsprecher erreicht bezüglich des Ausschwingverhaltens im Hochtonbereich ein hervorragendes Verhalten. Ein hier eingesetzter Bändchenhohtöner, bei dem die Antriebskraft gleichmäßig verteilt auf der gesamten Membranfläche angreift, kennt die Problematik der Partialschwingungen so nicht und weist daher eindeutige Vorteile auf.

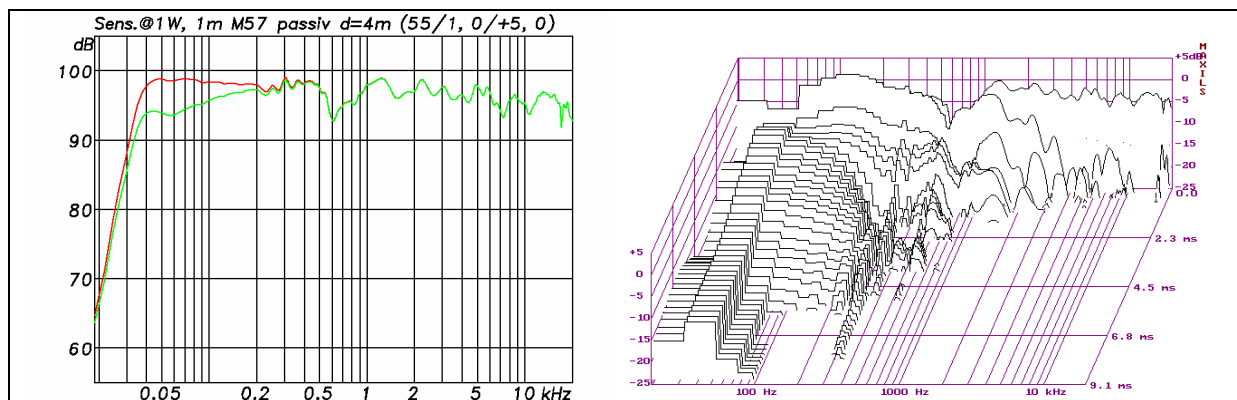


Abbildung 1 Frequenzgang (l) und Zerfallsspektrum (r) eines Lautsprechers

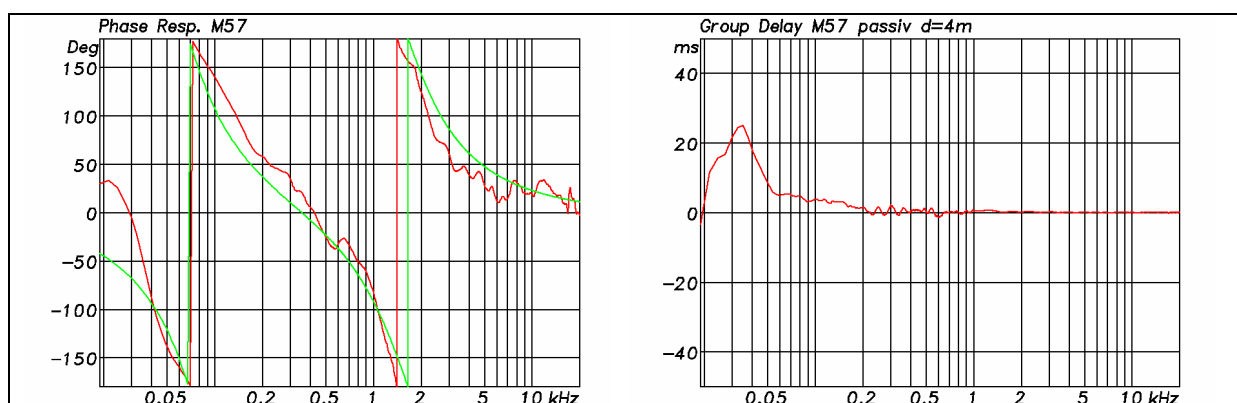


Abbildung 2 Phasengang (l) und Laufzeitverhalten (r) eines Lautsprechers

Zum komplexen Frequenzgang gehört neben dem Betragsspektrum auch der Phasenverlauf. Ein einzelnes Lautsprecherchassis kann dabei weitgehend als minimalphasiges System aufgefaßt werden, was für Mehrwegesystem nicht mehr uneingeschränkt gilt. Der in *Abb.2/links* gezeigt Phasenverlauf eines 2-Wege Beispiellautsprechers weist über den gesamten Frequenzbereich eine Phasendrehung von 2×360 Grad auf, die im unteren Frequenzbereich weitgehend dem minimalphasigen Anteil eines korrespondierenden Hochpaßfilters 4.Ordnung für das Bassreflexsystem entspricht. Der Hochtonweg für sich betrachtet, stellt einen Hochpaß 2.Ordnung dar, der eine Phasendrehung von 180 Grad mit sich bringt. Zusammen mit der Frequenzweiche 2.Ordnung entstehen so weitere 360 Grad Phasendrehung. Die zweite Kurve in *Abb.2/links* entspricht den beiden idealisierten Hochpaßfiltern 4.- und 2.Ordnung für Tief- und Hochtöner sowie der Frequenzweiche 2.Ordnung. Abweichung vom minimalphasigen Anteil und starke Phasendrehungen deuten im Bereich der Trennfrequenzen auf Laufzeitdifferenzen der einzelnen Wege zueinander hin, die abhängig von der räumlichen Anordnung der einzelnen Wege zueinander auch von der Meßposition abhängen können. Differenziert man die Phase nach der Frequenz, so ergibt sich die Gruppenlaufzeit, deren Verlauf für das Beispielsystem in *Abb.2/rechts* dargestellt ist.

Dominiert wird der Verlauf hier durch den kräftigen Anstieg zu tiefen Frequenzen, der sich zwangsläufig aus der als Hochpaßfilter 4.Ordnung wirkenden Tieftoneinheit in einem Bassreflexgehäuse mit einer Tuningfrequenz von 36 Hz ergibt. Deutlich stärker fällt dieser Anstieg bei noch höheren Filterordnungen aus, wie sie z.B. mit elektrischen Vorfiltern bei einer Butterworth Abstimmung 6.- oder gar 8.Ordnung anzutreffen ist. Klare Vorteile können hier geschlossene Gehäuse verbuchen, die nur einer Hochpaßfunktion 2.Ordnung entsprechen. Hier beträgt die Gruppenlaufzeit für eine Eckfrequenz von 36 Hz nur 7 ms gegenüber 18 ms bei einer Abstimmung 4.Ordnung und 28 ms für die Funktion 6.Ordnung. Die im PA-Sektor gelegentlich anzutreffende Abstimmung 8.Ordnung steigt hier sogar auf 42 ms an. Der Höreindruck so ausgeprägter Laufzeiten im Bassbereich wird oft als schleppender und nicht mehr zu Musik passender Bass bezeichnet. Mittels eines DSP-Systems ist es nun leicht möglich, über ein digitales FIR-Filter einem Lautsprecher ein ideales Laufzeit respektive Phasenverhalten anzueignen oder auch das Verhalten eines Lautsprechers nachzustellen. Hörversuche mit unterschiedlichen Filtern, die eine Simulation des Laufzeitverhaltens verschiedener Filtertypen zur Abstimmung des Tieftöners erlaubten, resultierten recht eindeutig zu Gunsten der Varianten mit einem möglichst geringen Laufzeitanstieg zu den tiefen Frequenzen. Entsprechend positiv in der Bewertung der Hörergebnisse schnitten dann Lautsprecher ab, deren Laufzeitverhalten im Bassbereich durch ein FIR-Filter kompensiert wurde. Als unvermeidlicher Nachteil stellt sich bei diesem Verfahren natürlich eine entsprechend hohe Grundlaufzeit in der Größenordnung von 20-50 ms ein, die sich bei vielen Einsätzen im Studio und auf der Bühne leider verbietet.

Zeitverhalten

Als Fortsetzung des Gedankenganges aus dem vorhergehenden Absatz, soll nun die Betrachtung des Phasen- und Amplitudenganges im Zusammenhang mit dem Zeitverhalten erörtert werden. Während Frequenz- und Phasengang als Größe über der Frequenz aufgetragen sind, zeigt die Sprungantwort die Reaktion des Lautsprecher auf einen Spannungssprung. Der Schalldruckverlauf wird aufgezeichnet und über der Zeitachse aufgetragen. Ähnliches gilt für die Impulsantwort, wo die Reaktion des Lautsprechers auf einen sehr kurzen Spannungsimpuls beobachtet wird. Alle drei Darstellungsweisen, d.h. der komplexe Frequenzgang mit Phaseninformation, die Impulsantwort und die Sprungantwort lassen sich allerdings ohne Verluste ineinander überführen und beinhalten alle eine absolut identische Information über das zu beschreibende System. Mathematisch betrachtet errechnet sich die Impulsantwort über eine inverse Fouriertransformation aus dem komplexen Frequenzgang und die Sprungantwort über eine zeitliche Integration aus der Impulsantwort. Umgekehrt ist die Impulsantwort durch Differenzieren aus der Sprungantwort zu berechnen und der komplexe Frequenzgang über eine Fouriertransformation aus der Impulsantwort.

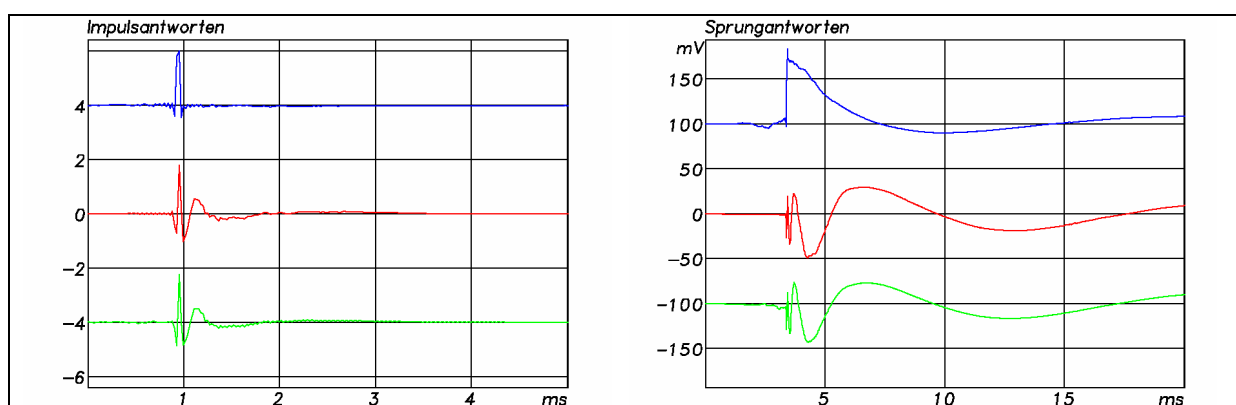


Abbildung 3 Impuls- (l) und Sprungantworten (r) der 3 Lautsprecher

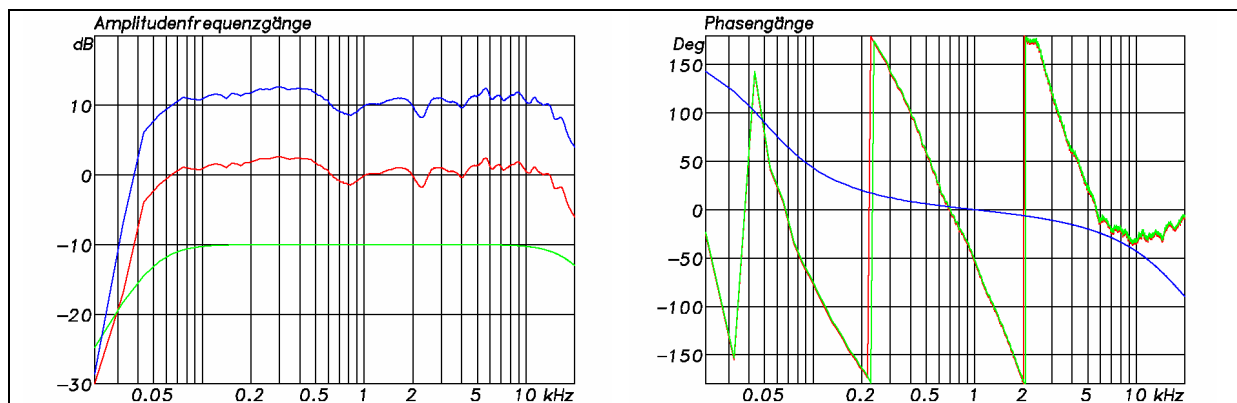


Abbildung 4 Frequenz- (l) und Phasengänge (r) der 3 Lautsprecher

Ein Beispiel mit einem 2-Wege Lautsprecher und zwei daraus konstruierten Fällen soll hier zur Anschauung dienen. In der ersten Variante werden Phasengang und Frequenzgang des real existierenden 2-Wege Lautsprechers sowie die zugehörigen Impuls- und Sprungantworten dargestellt. In den *Abb.3* und *4* ist das immer die mittlere Kurve. Der zweite Fall ist ein künstlich konstruierter Lautsprecher, der den Frequenzgang des original Lautsprechers hat, aber den Phasenverlauf eines idealen Übertragers mit einer 50 Hz und 20 kHz Hoch- und Tiefpaßbegrenzung. Die zugehörigen Kurven sind in den *Abb.3* und *4* oben dargestellt. Die dritte Variante (untere Kurve in *Abb.3* und *Abb.4*) übernimmt nur den Phasengang des realen Lautsprechers und erhält einen idealen Frequenzgang, der auch wieder durch den 50 Hz und 20 kHz Hoch- bzw. Tiefpaß begrenzt ist. Sehr schön ist an diesen Beispielen zu erkennen, wie Phasen- und Frequenzgang das zeitliche Übertragungsverhalten eines Lautsprechers beeinflussen. Während zwischen den Zeitsignalen in *Abb.3* kaum Unterschiede zwischen der realen Box und der Variante mit einem idealen Frequenzgang zu erkennen sind, unterscheidet sich der Lautsprecher mit einem idealen Phasengang erheblich und zwar in der Form, daß der angestrebte Sprung bzw. der Impuls fast optimal wiedergegeben wird. Der Phasengang des realen Lautsprechers dagegen führt dazu, daß Anteile aus unterschiedlichen Frequenzbereichen quasi auseinander laufen. Deutlich separieren sich hier auch die Einschwingvorgänge von Tief- und Hochtöner. Überraschend ist dieses Ergebnis natürlich nicht, da es nur die einfachen Zusammenhänge der Signaltheorie wiedergibt.

Interessant sind dagegen die widersprüchlichen Aussagen in der Psychoakustik, die zum einen behaupten, daß das menschliche Gehör nur über sehr geringe Fähigkeiten des Phasenhörens verfügt und somit kaum Unterschiede zwischen der Variante mit dem idealen Phasen- respektive Zeitverhalten und dem realen Lautsprecher zu hören sein dürften. Von gleicher Seite wird dagegen dem Frequenzgang eine große hörphysiologische Bedeutung beigemessen, so daß auch Abweichung von weniger als 1 dB klar auszumachen sein sollen. Die andere Fraktion mißt dagegen dem Phasengang und dem Zeitverhalten eines Lautsprechers die größere Bedeutung für den Höreindruck bei.

Für ein einfaches Experiment können die drei vorab beschriebenen Lautsprecher mit einem FIR-Filter sehr hoher Auflösung simuliert werden. Einige Hörversuche mit den drei entsprechenden Filtervarianten, die im Frequenz- und Phasengang sowie im Zeitverhalten exakt die Verläufe aus *Abb.3* und *4* nachgebildet haben, wurden mit unterschiedlichem Programmmaterial durchgeführt. Zum Abhören wurde ein elektrostatischer Kopfhörer eingesetzt, da Lautsprecher ihrerseits wiederum das Übertragungsverhalten beeinflussen hätten und somit keine korrekte Beurteilung möglich gewesen wäre. Als Ergebnis stellte sich heraus, daß zwischen dem original Lautsprecher und der Variante mit ausschließlich optimierten Phasenverlauf kein Unterschied festzustellen war. blieb dagegen die Phase unverändert und der leicht wellige Amplitudenverlauf des realen Lautsprecher wurde kompensiert, so waren durchaus geringfügige Unterschiede wahrnehmbar. Es sei auch nochmals darauf hingewiesen, daß der grundsätzliche Verlauf des Frequenzganges mit einer Hochpaßfilterung bei 50 Hz und einer Tiefpaßfilterung bei 20 kHz jeweils 2.Ordnung auch bei der im Amplitudenverlauf entzerrten Version

beibehalten wurde, um Irritationen durch einen insbesondere im Tieftonbereich ausgedehnten Übertragungsbereich zu vermeiden.

Als Resümee aus diesen Hörversuchen kann daher festgestellt werden, daß eine Phasen- bzw. Laufzeitverzerrung nur dann hörbare Vorteile erbringt, wenn extreme Laufzeiten kompensiert werden können, so wie es z.B. bei den vorab genannten Tieftonsystemen mit Hochpaßabstimmungen hoher Ordnung der Fall ist. Gleiches gilt für Laufzeiten, die durch sehr steile Frequenzweichenfilter mit Flankensteilheiten von mehr als 48 dB/Okt. entstehen. Die von nicht pathologischen konstruierten Lautsprechern verursachten Laufzeiten bzw. Phasenverläufe sind dagegen bezüglich ihrer Hörbarkeit als unkritisch zu betrachten.

Verzerrungswerte

Die Verzerrungswerte von Lautsprechern aller Art stellen für den Anwender eine der wichtigsten Größen für die Auswahl der möglichen Einsatzbereiche dar. Leider beschränken sich auch heute viele Hersteller immer noch auf eine einzige wenig aussagekräftige Angabe für einen Maximalpegelwert, der zudem keinerlei Bezug zu einem Frequenzbereich hat. Wesentlich anschaulicher ist dagegen eine Kurve über dem gesamten angestrebten Frequenzbereich, die entweder den Klirrfaktor bei konstanter Eingangsspannung anzeigt oder den maximal erreichbaren Pegel bei einem vorgegebenen Klirrfaktorgrenzwert. Beide Diagramme können mit PC gestützten Meßsystemen leicht aufgezeichnet werden. Als Meßsignal können hier Sinusbursts verwendet werden, die nach der Übertragung über den Lautsprecher mit einer FFT Analyse auf ihre Klirranteile hin untersucht werden. Die Beispielkurven in *Abb.5* wurden mit 180 ms langen Bursts und einer 4K FFT zur Klirrfaktoranalyse gemessen. Bei dieser Meßmethode stellt sich in einigen Fällen bei der Maximalpegelbestimmung das Problem ein, daß bei Lautsprechern mit Schutzfunktionen gegen dauernde thermische Überlastung, wie sie fast bei jedem Hochtöner in der Studio- oder Beschallungstechnik zu finden sind, durch ein Ansprechen der Schutzschaltung der Pegel kräftig reduziert wird. In der Tat ist es so, daß konservativ eingestellte Limiter bei Sinusbursts dieser Länge schon ansprechen müssen, obwohl sie bei normalem Programmmaterial erst bei drastischen Übersteuerungen greifen würden. In solchen Fällen kann die Meßdauer und FFT-Länge nur für den Hochtonbereich hinreichend weit verkürzt werden, ohne daß die Auflösung zu gering wird.

Eine weitere Problemstelle bei dieser Art Messung sind Reflexionen, die durch Interferenzen zu erheblichen Meßfehlern führen können. Durch die Messung mit Sinussignalen in vorgegebenen Frequenzabständen (typisch 1/6-1/12 Oktave) ist auch eine weitere Mittelung über mehrere Werte nicht zu empfehlen. Es sollte daher dringend auf eine völlig reflexionsfreie Umgebung geachtet werden. In *Abb.5/links* sind solche Problemstellen bei 65 Hz und 85 Hz zu erkennen, die durch die nicht mehr reflexionsfreien Wände des Meßraumes unterhalb von 100 Hz entstehen. In gewissen Grenzen lassen sich solche Problemstellen durch eine zweite Meßreihe mit geringerem Meßabstand reduzieren. Beide Meßreihen können später kombiniert werden, wobei die Messung in größerer Entfernung als Pegelbezug dient.

Für Studiolautsprecher hat sich die Darstellung des Klirrfaktors bei konstanter Eingangsspannung (*Abb.5/rechts*) als gutes Kriterium herausgestellt. Je nach der angestrebten Abhörentfernung und dem gewünschten Pegel ist hier gut zu erkennen, welchen Klirrfaktor der Lautsprecher erzeugt und wie sich die Werte aus harmonischen Verzerrungen 2.- und 3.Ordnung zusammensetzen. Für Beschallungssysteme eignet sich dagegen eher die zweite Form, bei der ein Grenzwert für den THD-Wert vorgegeben wird. Als Grenzwerte haben sich 1%, 3% und 10% THD bewährt. Die 1% Kurve hat hier zwar wenig Praxisbezug, läßt aber ein schnelles Erkennen möglicher Schwachstellen zu. Die 10% Kurve dagegen gibt recht gut den praktischen Nutzpegel wieder, den ein Lautsprecher zu erzeugen in der Lage ist. In beiden Fällen sollte ein möglichst ausgeglichener Verlauf ohne herausragende Bereiche angestrebt werden. Größere Einbrüche in bestimmten Bereichen deuten nicht nur auf Schwachstellen in der Konstruktion hin, sondern können auch zu merklichen Verzerrungen und zu einem unsauberen Klangeindruck führen. Abhängig vom wiederzugebenden Programmmaterial können Überhöhungen in der Maximalpegelkurve in gewissen Frequenzbereichen sinnvoll sein. Neben den teilweise recht weit gehenden

Anforderungen moderner Musik im Bassbereich, sollte vor allem der Grundtonbereich Beachtung finden. Pegelreserven an dieser Stelle erlauben es dann auch, ohne weitere Kompression durch Limiter einzugehen, Stimmen oder einzelne Instrumente bei einem hohen Gesamtpegel noch hervorzuheben. Viele Beschallungslautsprecher weisen allerdings genau hier einen Schwachpunkt auf. Die häufig anzutreffenden Kombinationen aus direktstrahlenden Basslautsprechern und horngeladenen Low-Mid Systemen in Kombination mit einer tiefen Trennfrequenzen von 100-150 Hz führt nicht selten zur einer Überforderung der gerne zu klein gestalteten Hörner. Der Verlust an Empfindlichkeit in diesem Bereich erzwingt kräftige Kompensationen durch die Controller, die dann zwar zu einem ausgeglichenen Frequenzgang führen, aber keine adäquaten Schalldrücke mehr zulassen ohne die Treiber zu überfordern.

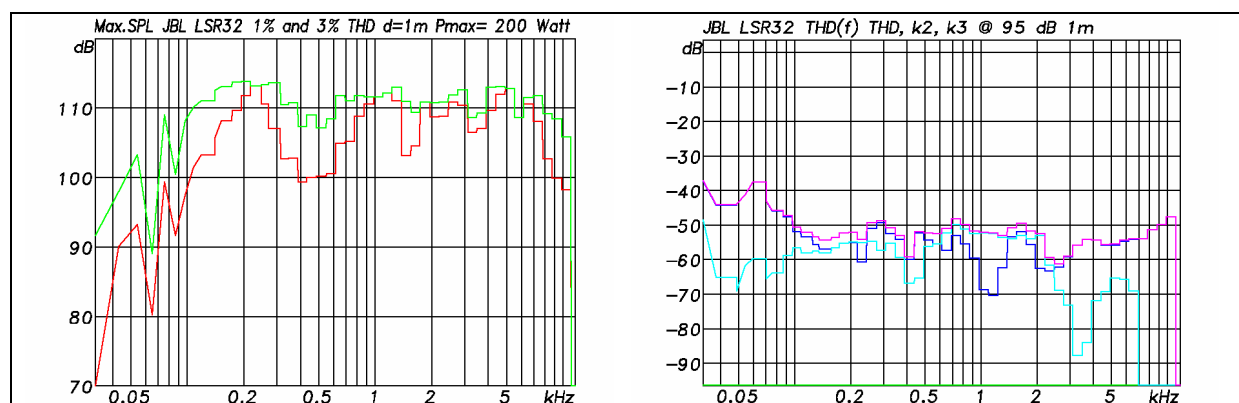


Abbildung 5 Maximaler Pegel bei einem bestimmten Klirrfaktorgrenzwert (l) und THD, k2 und k3 bei einem definierten Pegel (r)

Häufig ist zu beobachten, daß Kurven unterschiedlicher Grenzwerte in der Darstellung zusammenfallen (*siehe Abb.5/links*), was grundsätzlich nicht sein kann, da die Werte eindeutig definiert sein müssen. Die Ursache hierfür ist in möglichen Leistungsgrenzen der treibenden Endstufen oder durch einen Limitereinsatz zu finden, die eine weitere Pegelerhöhung nicht zulassen. Speziell bei empfindlichen Kalottenlautsprechern sollte die maximal zugeführte Leistung auf sinnvolle Werte begrenzt werden, da diese Lautsprecher nur sehr wenig Klirrfaktor erzeugen und ohne weitere Schutzmechanismen stark gefährdet sind, einer Überlastung zu erliegen.

Räumliches Abstrahlverhalten

Das räumliche Abstrahlverhalten von Lautsprechern kann mit oder weniger gleicher Aussagekraft in verschiedenen Formen dargestellt werden. Die traditionelle Darstellungsweise besteht aus Polardiagrammen, die für bestimmte Frequenzbereiche (Terzen oder Oktaven) das Richtverhalten eines Lautsprecher in einer Ebene darstellen. Bei einer Auflösungen in Terzen erfordert diese Form der Darstellung dann schon ca. 30 einzelne Kurven, so daß gerne auch zu Isobarenflächen (*siehe Abb.6*) oder dreidimensionalen Bildern gegriffen wird, die das Richtverhalten in einer Ebene für den gesamten Frequenzbereich in einer Grafik übersichtlich zeigen.

Das hier aufgeführte Beispiel eines großen PA-Lautsprechers mit einer Twin-Koax Hornanordnung ist auf „Constant Directivity“ optimiert und erzielt ab ca. 500 Hz bis zu den höchsten Frequenzen eine nahezu konstante Richtwirkung von 60x40 Grad bezogen auf einen Pegelabfall von 6 dB gegenüber der Mittelachse. Soll mit diesen Lautsprechern ein größerer Raumbereich abgedeckt werden, so können entsprechend viele Systeme zueinander mit diesen Winkeln angeordnet werden. Durch die sauberen Richteigenschaften kann dann das Verfahren angewandt werden, daß immer nur ein Lautsprecher für einen bestimmten Winkelbereich zuständig ist und Interferenzeffekte weitgehend vermieden werden. Auf Grund der beschränkten Abmessung der Low-Mid Hörner weitet sich der Abstrahlwinkel zu tiefen Frequenzen unweigerlich auf, wie es auch hier in *Abb.6* unterhalb von 500 Hz zu erkennen ist. Ein optimales Zusammenspiel mehrerer System wird unterhalb dieser Frequenz dann möglich, wenn der Abstand der Lautsprecher zueinander so gering ist, daß ein gleitender

Übergang in den Bereich der akustischen Kopplung erfolgt. Das Beispielsystem verhält sich hier geradezu muster­gültig und läßt eine problemlose Kombination mehrerer Lautsprecher ohne größere Interferenzbereiche oder Lücken zu. Unregelmäßigkeiten sowie Sprungstellen in den Isobarenkurven sollten daher für Lautsprecher, die auch als Gruppe bzw. Cluster eingesetzt werden, unbedingt vermieden werden.

Ebenso ist bei Beschallungslautsprechern unter dem Aspekt der Rückkopplungsproblematik auf seitliche Nebenmaxima zu achten. Häufig bilden sich Nebenmaxima in der vertikalen Ebene eines Lautsprechers aus, wie es auch in Abb.6/unten bei ca. 500 Hz zu erkennen ist. Wird ein solches System als Zentrallautsprecher über einer Bühne und damit über den Mikrofonen angebracht, so tritt unvermeidlich ein verstärktes Rückkopplungsproblem in diesem Frequenzbereich auf.

Weniger kritisch verhält es sich dagegen, wenn der Lautsprecher ausschließlich als Einzelsystem, wie es z.B. bei einer Studio-Abhöre der Fall ist, betrieben wird. Typische Lautsprecher mit Konus und Kalottensystemen weisen hier der Anzahl ihrer Wege entsprechend Sprungstellen in den Isobarenkurven auf, die in ihrer charakteristischen Form einem Tannenbaum ähneln. Unter der hypothetischen Annahme, daß sich der Hörer immer in der Nähe der Mittelachse eines Lautsprechers befindet und die Umgebung weitgehend reflexionsfrei wäre, könnte sogar behauptet werden, daß alles, was der Lautsprecher außerhalb seiner Mittelachse abstrahlt, von untergeordneter Bedeutung ist. Sobald allerdings ein umgebender Raum angeregt wird, kommen über Reflexionen bzw. Nachhall wieder alle Anteile die ein Lautsprecher rundum abstrahlt mit ins Spiel. Abhängig vom Absorptionsverhalten des Raumes betrifft das vor allem die mittleren und tiefen Frequenzen. Eine weitere Messung des Leistungsfrequenz­ganges in einem Hallraum kann hier Aufschluß bieten. Im diffusen Schallfeld werden alle Anteile, die der Lautsprecher abstrahlt, erfaßt. Die Energiedichte im diffusen Schallfeld ist proportional zur abgestrahlten Leistung und auch zur Nachhallzeit des Raumes. Die Nachhallzeit ist allerdings auch in Hallräumen stark frequenzabhängig und muß deshalb zunächst noch in der Messung kompensiert werden.

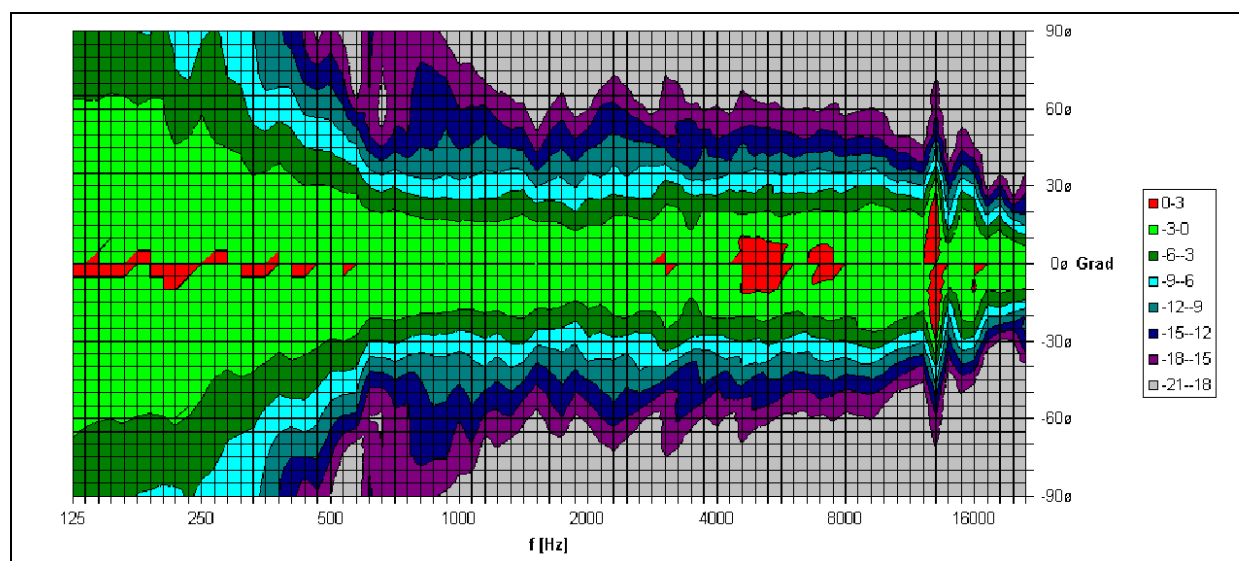


Abbildung 6a Horizontales Abstrahlverhalten in der Isobarendarstellung (3 dB/div)

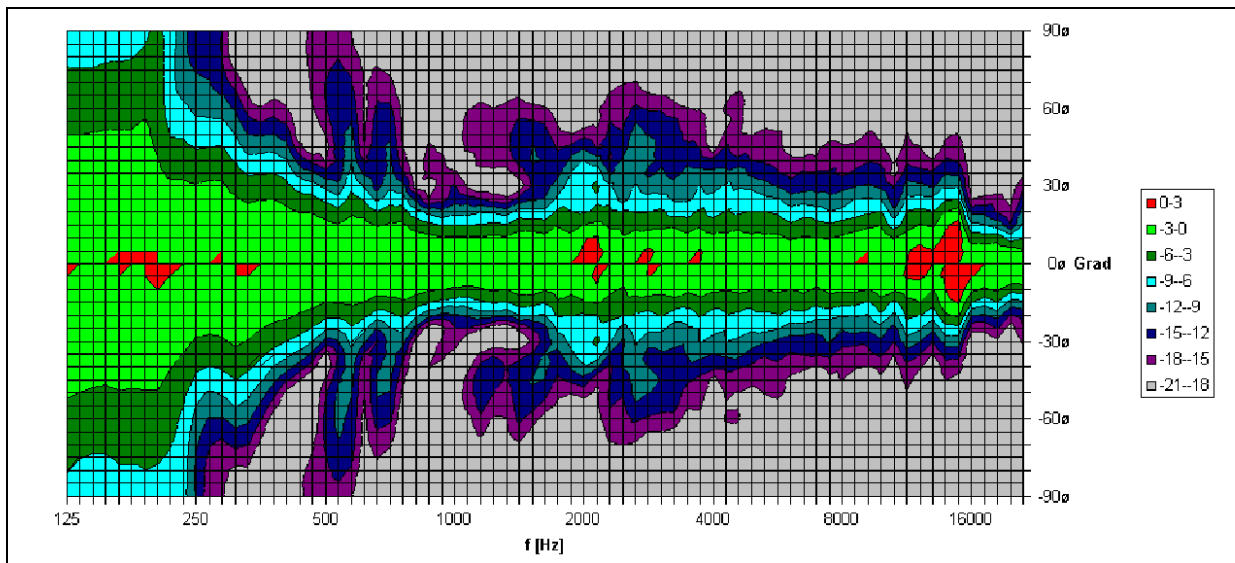


Abbildung 6b Vertikales Abstrahlverhalten in der Isobarendarstellung (3 dB/div)

Für den Beispiellautsprecher sind der Freifeldfrequenzgang und der bereits um die Nachhallzeit kompensierte Diffusfeldfrequenzgang in *Abb.7/links* dargestellt. Unterhalb von 200 Hz kann wegen der ausgeprägten einzelnen Raummoden die Hallraummessung nicht mehr bewertet werden. Darüber erkennt man die bis ca. 1 kHz stetig abnehmende Kurve im Diffusfeld. Darüber hinaus stellt sich ein fast konstanter Verlauf ein, wie es bei einem konstanten Abstrahlwinkel sein sollte, der aber zwischen 2 und 4 kHz um ca. 3 dB nach oben abweicht. Diese Abweichung bedeutet, daß der Lautsprecher hier mehr Energie in den Raum abstrahlt. Je nach räumlicher Umgebung, wo ein solcher Lautsprecher betrieben wird, wird sich diese Überhöhung mehr oder weniger stark im Höreindruck wiederfinden. Aus diesen Messungen wurde die in *Abb.7/rechts* abgebildete EQ-Kurve zur Kompensation des Diffusfeldfrequenzganges eingestellt. Wie weit es nun Sinn macht, den Diffusfeldfrequenzgang über ein Filter zu kompensieren, hängt von Nachhall des Raumes ab, so daß die Kurve als Anhaltspunkt für den Verlauf einer Filtereinstellung gesehen werden kann, die dann in ihrer Dynamik bei Bedarf abgeschwächt wird.

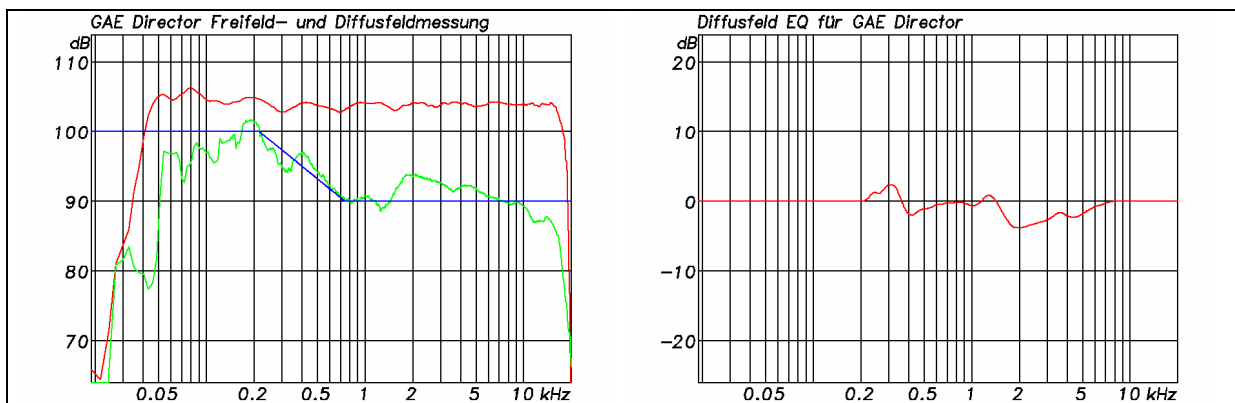


Abbildung 7 Freifeld- und Diffusfeldfrequenzgang (l) und die daraus abgeleitete Diffusfeld EQ-Kurve (r)

Der tendenzielle Verlauf der Diffusfeldkurve läßt sich auch schon aus der Isobarendarstellung in *Abb.6* vermuten, wo sich hier in der vertikalen Ebene die Bereiche der Überhöhungen bzw. Einbrüche schon durch Aufweitungen und Einschnürungen abzeichnen. Trotzdem sollte auf eine Hallraummessung nicht verzichtet werden, da die beiden Isobarenkurven natürlich nur die horizontale und vertikale Ebene erfassen. Die Hallraummessung berücksichtigt dagegen alle Richtungen. Alternativ hierzu bietet es sich an, im Freifeld auf

einem Kugelrasternetz um den Lautsprecher eine Vielzahl Frequenzgänge aufzunehmen, wie es auch für die Lautsprecherdaten in Raumsimulationsprogrammen üblich ist. Für eine Auflösung von 5 Grad kommen hier freilich schon 2812 Meßpunkte zusammen, deren Erfassung mit einer aufwendigen mechanischen Schwenkvorrichtung geraume Zeit in Anspruch nimmt. Aus dieser Datensammlung läßt sich dann ebenfalls der Frequenzgang im diffusen Schallfeld und weitere Größen wie Bündelungsmaß und Q-Faktor berechnen. Anschaulich hat diese Meßmethode den großen Vorzug, daß man das Richtverhalten in einer 3-dimensionalen Darstellung betrachten und sehr gut beurteilen kann. Nebenmaxima und Lücken im Abstrahlverhalten sind hier auch gut zu beobachten.

Beurteilung von Leistungsverstärkern

Bis heute wurde im Labor der Production Partner Redaktion ca. 60 verschiedene Endstufen in allen Leistungsklassen getestet. Neben diversen PA Amps mit Leistungen von 500 Watt bis 12 kW fanden auch einige Studioendstufen den Weg ins Testlabor. Die Bewertung innerhalb der Tests basierte dabei auf den Meßergebnissen und einigen anderen Faktoren wie Betriebssicherheit, Verarbeitung, Servicefreundlichkeit und nicht zuletzt auch Wirtschaftlichkeit. Eine klangliche Beurteilung fand nicht statt. Andererseits führten abseits der Tests gemachte Hörversuche immer wieder zu teilweise verblüffenden Ergebnissen. Deutlich vernehmbare Klangunterschiede waren auch bei Endstufen auszumachen, die sich meßtechnisch auf einem sehr hohen jedoch unterschiedlichem Niveau befanden. Für den erfahrenen Audiotechniker nicht zu überhören waren auch die charakteristischen Unterschiede verschiedener Schaltungskonzepte und Leistungshalbleiter. Im Folgenden soll daher der Versuch unternommen werden, die Messreihen in einen Zusammenhang zum Höreindruck zu bringen, gleichwohl dieses bei Endstufen wesentlich problematischer zu sein scheint als bei den vorab besprochenen Lautsprechern. Wie weit sich die bisher getesteten Geräte schon meßtechnisch voneinander abheben, zeigen einige Beispiele. Es handelt sich hier nicht um besonders positive oder negative Ausreißer, sondern lediglich um Endstufenmodelle, die sich am einen oder anderen Ende der Palette von Meßwerten befinden.

Lineares Übertragungsverhalten

Jede Endstufe wurde in den Testreihen zunächst in ihrem linearen Übertragungsverhalten gemessen. Die resultierenden Frequenzgänge wiesen im Hörbereich zwischen 20 Hz und 20 kHz in der Regel nur kleine Abweichungen vom ideal geraden Verlauf auf, die sich aber dennoch in Größenordnungen bis zu 0,5 dB abspielten. *Abbildung 8* zeigt ein Beispiel für zwei Endstufen, deren unterschiedliche Tiefpaßfilter in den Eingängen einen Unterschied von 0,2 dB bei 20 kHz verursachen. Während bei der ersten Endstufe die Tiefpaßeckfrequenz bei ca. 100 kHz liegt, verschiebt sie sich für das zweite Modell weit außerhalb des Meßbereiches oberhalb von 100 kHz.

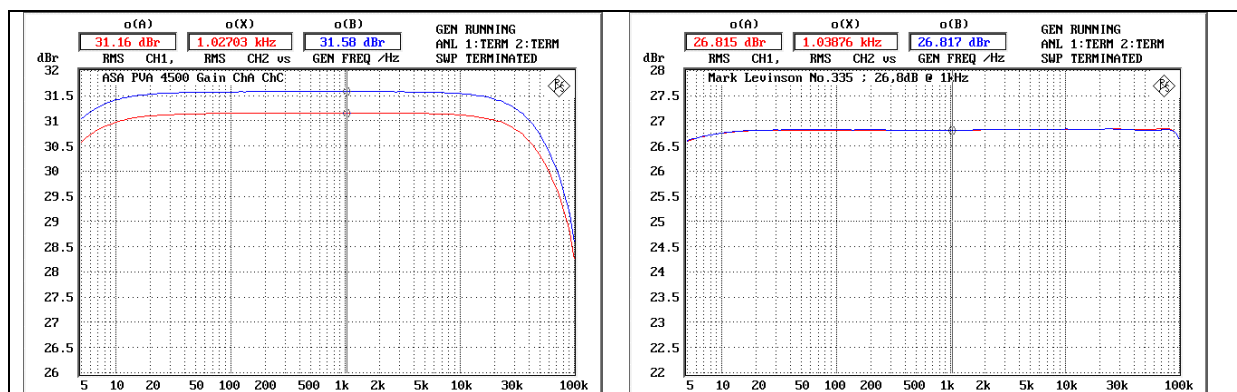


Abbildung 8 Frequenzgangmessung an zwei verschiedenen Endstufen

Größere Unterschiede waren auch durch den frequenzabhängigen Innenwiderstand der verschiedenen Endstufen zu beobachten. Während fast alle Schaltungskonzepte durch einen zu hohen Frequenzen hin ansteigenden Innenwiderstand hier geringe Pegelverluste bei Belastung verursachten, zeigten Endstufen mit Senseleitungen, welche die Gegenkopplung bis an die Lautsprecherklemmen bzw. sogar bis an den Lautsprecher führen, einen gegenteiligen Effekt. Durch eine geringfügige Überkompensation entsteht ein virtueller negativer Innenwiderstand, der bei Belastung dann sogar zu einer Pegelerhöhung führt. Das Beispiel in *Abbildung 9* stellt die Änderung des Ausgangspegels von zwei Endstufen an einer 4 Ohm Last gegenüber der Leerlaufspannung dar. Die Differenz bei 20 kHz beträgt hier erstaunliche 0,6 dB. Aus vielen anderen Hörvergleichen weiß man, daß breitbandige Pegeldifferenzen in allen Frequenzbereichen auch in Größenordnungen von 0,5 dB und weniger entscheidend sein können, so daß eine Endstufe mit einer wenn auch minimalen Höhenbetonung evtl. den Vorzug findet bei ansonsten gleichen Eigenschaften. Im Hörversuch stellt sich somit die Frage, wie weit solche Frequenzgangunterschiede mit zu bewerten oder auch vorab zu korrigieren sind.

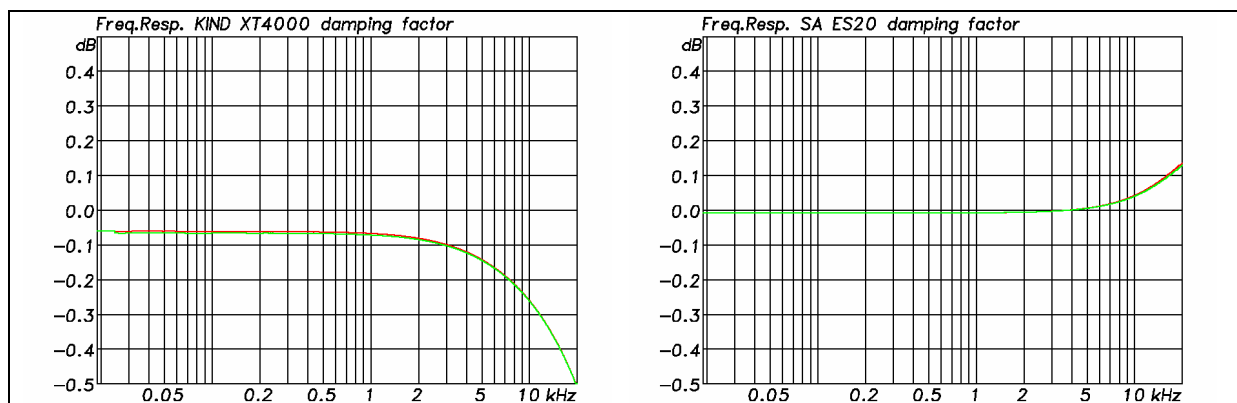


Abbildung 9 Pegeländerung an einer 4 Ohm Last gegenüber Leerlauf bei zwei verschiedenen Endstufen

Verzerrungswerte

Gemessen wurden auch die maximalen Ausgangsleistungen an verschiedenen Lasten und unterschiedlichen Signalen sowie verschiedene Meßreihen zum Verzerrungsverhalten. 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 sich schon mit -70 dB zufrieden gaben (siehe *Abbildung 10*). Betrachtet man den Klirrfaktor bei höheren Frequenzen, so fallen die Unterschiede von Fall zu Fall noch größer aus. Das Beispiel in *Abbildung 11* 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 12*), bei denen das Testsignals steile Rechteckflanken aufweist, wie sie vergleichbar bei kurzen Impulsen in Musikstücken 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 Klirrateile 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 Ordnung k2 oder k3.

Ein Beispiel zeigt *Abbildung 13*, wo deutlich zu erkennen ist, wie bei der links abgebildeten Endstufe recht heftige Klirrateile 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 -80 dB auftritt. Sehr vorbildlich stellt sich die zweite Endstufe dar, deren Klirrspektrum auf der rechten

Seite in *Abbildung 13* dargestellt ist. k_2 und k_3 treten hier nur noch mit -100 bzw. -105 dB auf und die noch höheren Oberwellen verschwinden nahezu völlig mit Werten von -120 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.

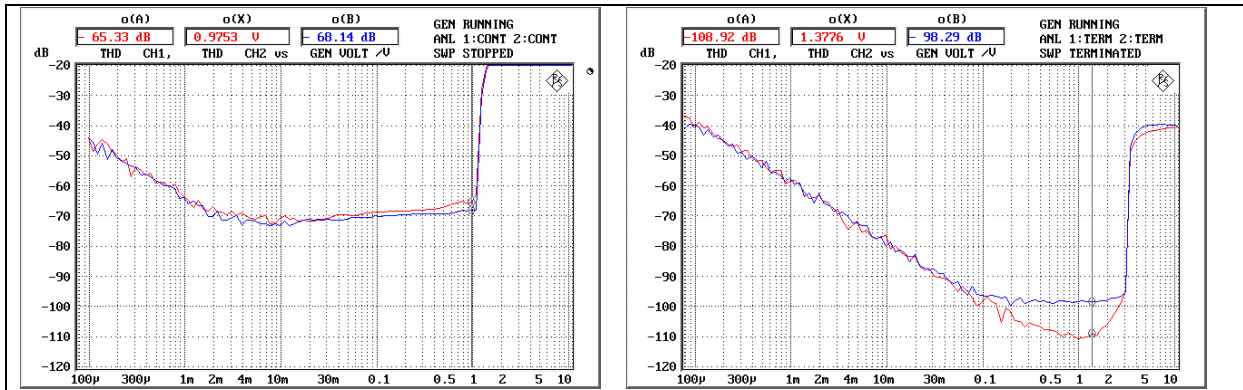


Abbildung 10 THD Werte bei 1 kHz für zwei verschiedene Endstufen

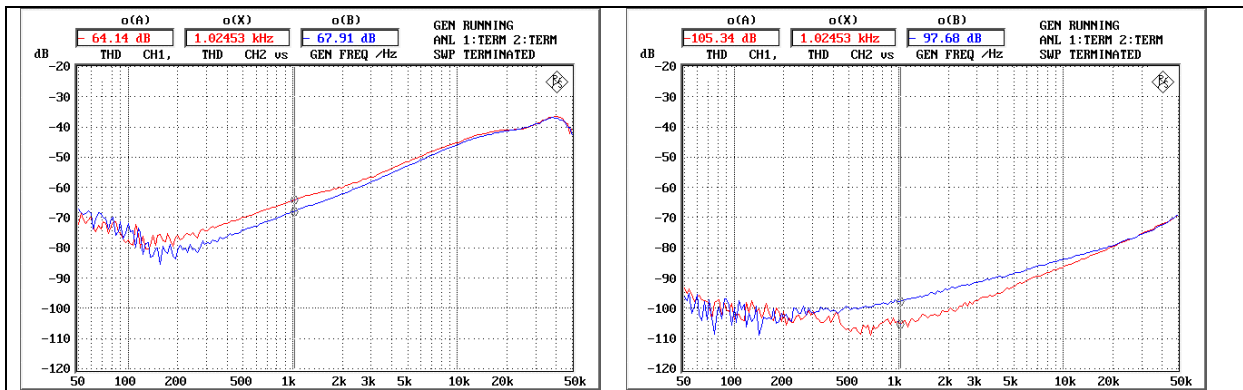


Abbildung 11 THD Werte über der Frequenz 3 dB unterhalb der Clipgrenze für zwei verschiedene Endstufen

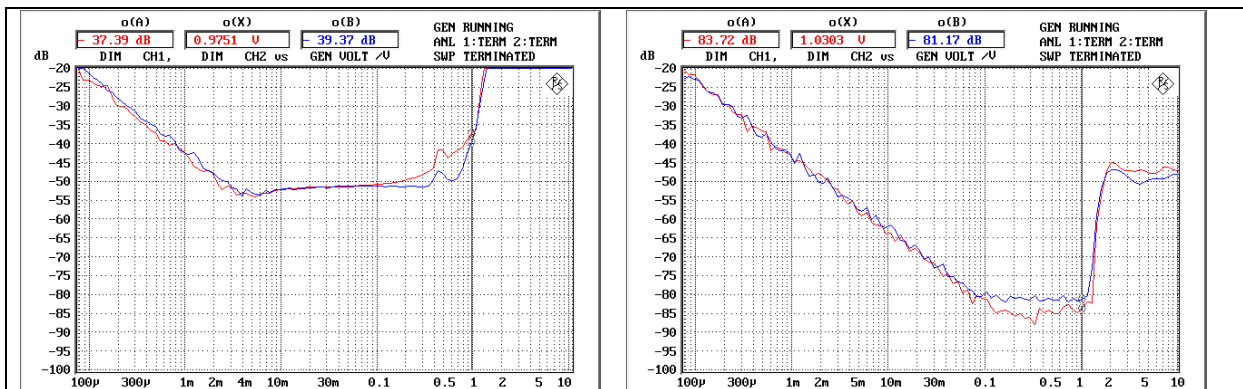
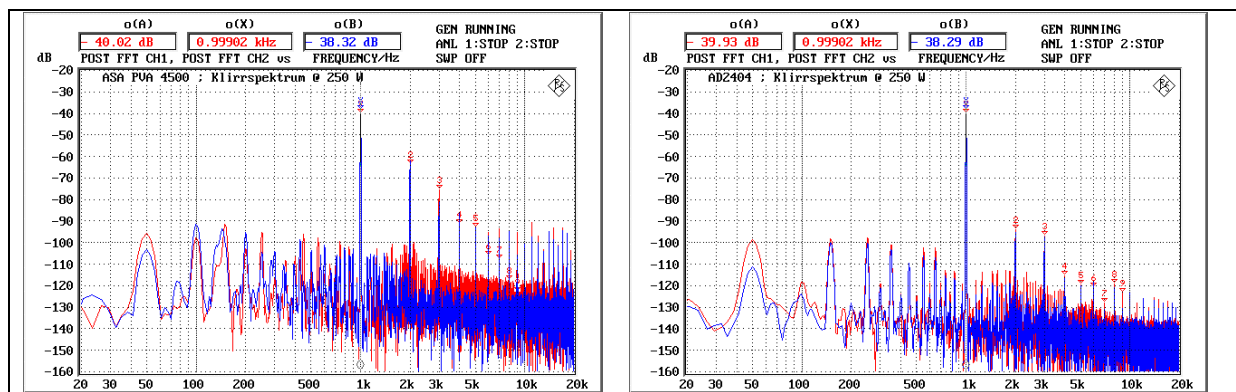


Abbildung 12 Intermodulationsverzerrungen DIM100 für zwei verschiedene Endstufen



**Abbildung 13 Klirrspektren für ein 1 kHz Signal an zwei verschiedenen Endstufen
Die 1 kHz Grundwelle ist jeweils um 40 dB gedämpft**

Leistung und mehr

Für den Beschallungsbereich dürfte neben dem regulären Betrieb einer Endstufe noch von besonderer Bedeutung sein, wie sich eine Endstufe im Grenzbereich an der Clipgrenze 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 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 14* zeigt eine Leistungsübersicht für zwei Endstufen an Belastungen von 2, 4, 8 und 16 Ohm bei Signalen mit Crestfaktoren von 3, 6, 12 und 18 dB und die absolute Peakleistung. In beiden Fällen läßt sich erkennen, daß die Leistung insbesondere bei niederohmigen Belastungen von 2 oder 4 Ohm recht große Unterschiede in Abhängigkeit von der Signalform aufweist. Für die rechts abgebildete Endstufe muß eine Strombegrenzung bei 2 Ohm Belastung reduzierend eingreifen, da sonst der höchst zulässige Strom durch die Endstufentransistoren überschritten würde.

Bestimmt wird das Verhalten einer Endstufe primär durch das Netzteil, das möglichst so ausgelegt sein sollte, 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, wogegen eine hohe Dauerleistung meist nicht ausgenutzt werden kann. *Abbildung 15* zeigt das Verhalten von zwei stark unterschiedlichen Endstufen auf einen Sinusburst. Die links 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 Netzteilkos. Das andere Extrem stellt eine 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. Ein Schaltnetzteil mit harter Charakteristik ist meist sehr platzsparend und leicht aufzubauen im Gegensatz zu einem herkömmlichen Netzteil, das bei einem vergleichbaren Verhalten extrem dimensioniert werden müßte und mit sehr großen und schweren Transformatoren und Siebelkos auszustatten wäre. Mit der Ausnahme von Schaltnetzteilen kann die Empfehlung für Endstufen daher immer lauten, alles auf eine möglichst hohe Peakleistung auszulegen, auch wenn die Dauerleistung erheblich geringer ausfällt. Dauerleistung wird von Endstufe auch bei sehr stark komprimierten Musiksignalen niemals gefordert werden, wogegen kurzzeitige hohe Peaks in jedem Signal enthalten sind und unverzerrt übertragen werden wollen.

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 gewisse 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 die Beispielenstufe Nr.2 in *Abbildung 10* und *12*, 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.

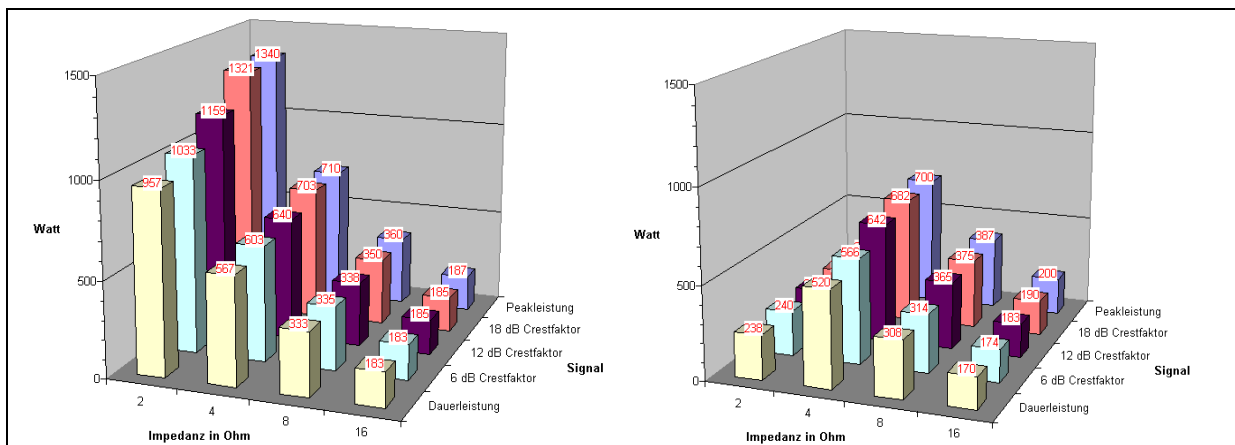


Abbildung 14 Leistungübersicht für Belastungen von 2 bis 16 Ohm bei unterschiedlichen Signalen mit Crestfaktoren von 3 bis 18 dB

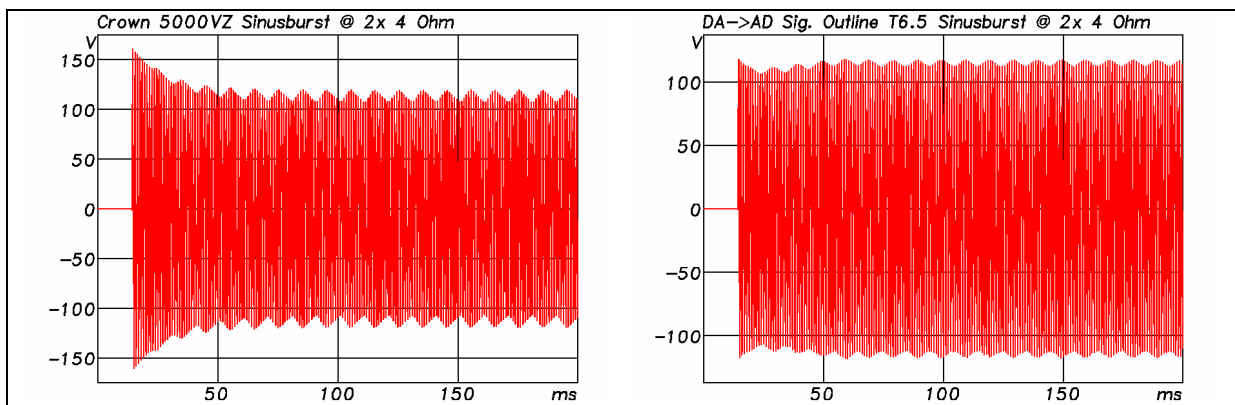


Abbildung 15 Peakreserve an einer 4 Ohm Last von zwei verschiedenen Endstufen
 re: Endstufe mit herkömmlichem Netzteil und weicher Charakteristik
 li: Endstufe mit hart geregelter Schaltung

Höreindruck

Es stellt sich nun die zentrale Frage, wie gut eine Endstufe sein muß und welche meßtechnischen Unterschiede sich klanglich bemerkbar machen. Ohne Frage sind z.B. die Frequenzgangabweichungen bei Endstufen um Dimensionen geringer als bei Lautsprechern. Ähnliches gilt für die Verzerrungswerte. Ein Sättigungsverhalten oder transiente Verzerrungen kennen Lautsprecher dagegen nicht. Zweifelsfrei kann aber auch behauptet werden, daß klangliche Unterschiede bei Endstufen im normalen Betrieb und im Grenzbereich eindeutig hörbar und reproduzierbar sind. Für eine Bewertung stellt sich nun die Frage, 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 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 Amps umgesteckt oder über eine Umschaltvorrichtung geschaltet werden. Beide Methoden bergen ihre Problem in sich. Schon an Hand dieser kurzen Aufzählung läßt sich erahnen, welcher schier unlösbare Konfliktstoff in so einem Hörvergleich steckt. Erschwerend kommt hinzu, daß die Endstufe ja nicht alle zur gleichen Zeit zum Test bereit stehen und Höreindrücke nur schwer aus der Erinnerung zu beurteilen sind.

Trotz allem haben sich drei Punkte 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 eine hohe Peakleistung, wobei letzteres insbesondere im Betrieb an der Leistungsgrenze wichtig wird.

Zusammenfassung

Zur meßtechnischen Charakterisierung eines Lautsprechers können Frequenzgang, Zerfallsspektrum sowie Maximalpegelkurven und Isobarendarstellungen einen umfassenden Eindruck liefern. Wie weit die einzelnen Kriterien von größerer oder kleinerer Bedeutung sind, hängt unter anderem vom Einsatzbereich eines Lautsprechers ab. Als entscheidende Feststellung kann aber gesagt werden, daß nur unter Beachtung aller Kriterien ein sicheres Urteil gefällt und ein Zusammenhang zum Höreindruck hergestellt werden kann. Des weiteren können zwischen einigen meßtechnischen Abweichungen, wozu krasse Laufzeitwerte, Nachschwinger im Zerfallsspektrum und Unregelmäßigkeiten in der Richtcharakteristik zählen und den klanglichen Eigenschaften eines Lautsprechers sichere Beziehungen festgestellt werden.

Betrachtet man eine gesamte Audiokette, so dürfte der Einfluß der Endstufen hier eher gering sein im Vergleich z.B. zur Bedeutung von Mikrofonen oder Lautsprechern. Trotz allem ist es immer wieder überraschend, wenn unter Testbedingungen Hörvergleiche angestellt werden, welche Unterschiede dort zu Tage gefördert werden, die immer dann besonders heftig auftreten, wenn die Endstufen voll ausgelastet werden und mit niederohmigen Lasten zu kämpfen haben. Ein so eindeutiger Zusammenhang zwischen der Summe aller Meßergebnisse und dem resultierenden Höreindruck wie bei Lautsprechern, kann bei Endstufen aber leider nicht hergestellt werden. Die Erfahrung lehrt hier, daß meßtechnisch in allen Disziplinen gut zu bewertende Endstufen auch nahezu immer einen entsprechend guten klanglich Eindruck hinterlassen. Versucht man unterdessen, die zweifelsfrei auch zwischen sehr guten Endstufen noch vorhandenen klanglichen Unterschiede meßtechnisch zu begründen, so kann häufig kein eindeutiger Schluß mehr gezogen werden.

Zu guter Letzt sollte nicht vergessen werden, daß es sich hier um Lautsprecher und Endstufen für den professionellen Einsatz handelt, wo Kriterien wie Betriebssicherheit, Langlebigkeit, Bedienung, Werterhalt, Wirtschaftlichkeit etc. unter Umständen eine größere Bedeutung zukommen kann, als einige dB mehr oder weniger an Störabstand oder Klirrfaktor.