

Neue Meßmethode zur Beurteilung der nichtlinearen Verzerrungen von aktiven Lautsprechern

(A new method for measuring the nonlinearities of monitoring loudspeakers)

*Sebastian Goossens *, Marion Saller ***

* Institut für Rundfunktechnik

** Bayerischer Rundfunk

Kurzfassung

An drei aktiven Lautsprechern unterschiedlicher Größe und Qualität wurden Untersuchungen zu deren nichtlinearen Verzerrungen durchgeführt. Es zeigte sich, dass zur Kennzeichnung des nichtlinearen Verhaltens von Aktivlautsprechern die Intermodulationsverzerrungen unbedingt berücksichtigt werden müssen. Anhand der üblicherweise angegebenen harmonischen Verzerrungen (Klirrfaktoren) konnten die drei Lautsprecher nicht voneinander abgegrenzt werden. Eine neue Messmethode zur praxisgerechten Kennzeichnung des nichtlinearen Verhaltens wird vorgestellt, bei der das Messobjekt mit einem Multisinussignal angeregt wird. Die Ergebnisse dieser Meßmethode dokumentieren die Klassenunterschiede der drei Aktivlautsprecher deutlich. Erste orientierende Hörversuche wurden durchgeführt, anhand derer die subjektive Wirkung der nichtlinearen Verzerrungen beschrieben werden.

1. Einleitung

„Bei hochqualitativen audiatechnischen Komponenten, die als „analytisches“ Arbeitswerkzeug im Studio (auch bei Wiedergabe relativ hoher Schallpegel) eingesetzt werden, müssen nichtlineare Verzerrungen so minimiert sein, dass die Interaktion mit dem gehörigen Differenzton keine hörbaren Auswirkungen hat.“

Mit dieser Aussage haben Wolfgang Schmid und Josef Chalupper in Ihrem Vortrag auf der 19. Tonmeistertagung 1996 [1] hervorgehoben, dass bei Regielautsprechern die Intermodulationsverzerrungen gemessen werden sollten. Die Verzerrungsprodukte eines guten Regielautsprechers sollten dabei niedriger liegen als der gehörige Differenzton.

Die Autoren schreiben weiter: „In vielen Produktdatenblättern sind sehr kleine Klirrfaktorenwerte angegeben. Leicht kann der Eindruck entstehen, die nichtlinearen Verzerrungen des audiatechnischen Systems seien auf das äußerste Minimum reduziert. Da ... Distorsionsprodukte auf unterschiedlichste Weise entstehen können, lassen sich Differenztonfaktoren aus Klirrfaktormesswerten nicht ... berechnen.“ „Der Lautsprecher mit dem höheren Kaufpreis hatte eine um bis zu 16 dB schlechtere Differenztondämpfung“

Damit stellen die Autoren nicht nur den Sinn der üblichen Messung und Angabe der harmonischen Verzerrungen (Klirrfaktoren) in Frage, sondern warnen auch davor, den

höheren Kaufpreis eines Regielautsprechers grundsätzlich als Garant für niedrige Verzerrungen anzusehen.

2. Grundlagen

2.1. Intermodulationsverzerrungen

Während bei der Messung der harmonischen Verzerrungen das System nur mit einem einzelnen Sinuston angeregt wird, so sind für die Anregung bei Messung der Intermodulationsverzerrungen zwei Sinustöne nötig. Abb. 1 zeigt die quadratischen und Abb. 2 die kubischen Verzerrungsprodukte zweier Sinustöne (f_1 und f_2). Neben den harmonischen Verzerrungsprodukten bei ($2f_1$, $2f_2$, $3f_1$ und $3f_2$) entsteht beispielsweise der Differenzton ($f_2 - f_1$) sowie der Summenton ($f_1 + f_2$).

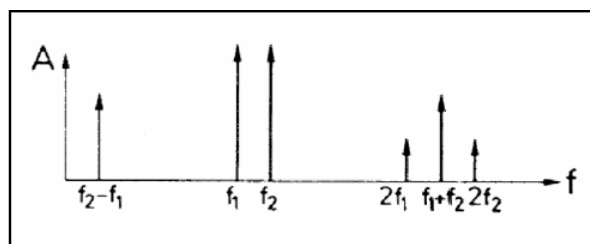


Abb. 1: Quadratische Verzerrungen

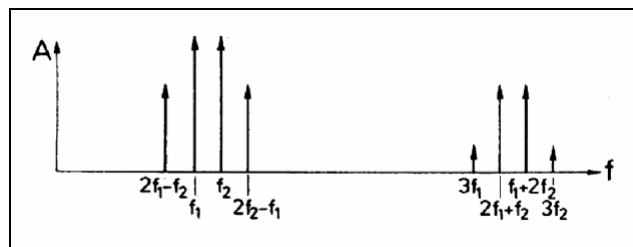


Abb. 2: Kubische Verzerrungen

2.2. Nichtlineare Verzerrungen des Gehörs

Nach Zwicker, Fastl [2] folgen die quadratischen Verzerrungen des menschlichen Gehörs der Gleichung

$$L(f_2 - f_1) = L_1 + L_2 - 130 \text{ dB} \quad (1)$$

wobei L_1 und L_2 die Pegel der Primärtöne darstellen.

Um die Wirkung dieser Gleichung 1 zu verdeutlichen, sind im Folgenden drei einfache Berechnungsbeispiele aufgeführt:

$L_1 = L_2 = 70 \text{ dB}$; $L(f_2 - f_1) = 10 \text{ dB}$; Differenztondämpfung: 60 dB entspricht 0,1%

$L_1 = L_2 = 80 \text{ dB}$; $L(f_2 - f_1) = 30 \text{ dB}$; Differenztondämpfung: 50 dB entspricht 0,3%

$L_1 = L_2 = 90 \text{ dB}$; $L(f_2 - f_1) = 50 \text{ dB}$; Differenztondämpfung: 40 dB entspricht 1%

Während es somit möglich ist, die quadratischen Verzerrungen des menschlichen Gehörs im Wesentlichen zu bestimmen, gestaltet sich dies nach bisherigen Untersuchungen bezüglich der kubischen Verzerrungen als äußerst komplex.

Es lässt sich allerdings feststellen, dass in dem Bereich großer Schalldruckpegel die quadratischen Verzerrungen des Gehörs weitgehend dominieren. Während die quadratischen Verzerrungen des Gehörs mit zunehmenden Primärtonpegeln ansteigen, fallen die kubischen Verzerrungen des Gehörs nach Erreichen eines Maximalwertes wieder ab. Bei niedrigen Primärtonpegeln sind hingegen die kubischen Verzerrungen am präsentesten.

Bei Lautsprechern dominieren mit zunehmendem Schalldruckpegel die quadratischen Verzerrungen gegenüber den kubischen Verzerrungen. Damit führen Wechselwirkungen zwischen den quadratischen Verzerrungen des Lautsprechers und den quadratischen Verzerrungen des Gehörs die kritischsten Auswirkungen für das Hörergebnis herbei.

3. Eigene Untersuchungen

Im Rahmen einer am IRT durchgeführten Diplomarbeit [3] wurden die nichtlinearen Verzerrungen an Aktivlautsprechern untersucht.

Dabei wurde die Bedeutung der Intermodulationsverzerrungen im Vergleich zu den harmonischen Verzerrungen erforscht. Zur verbesserten Beschreibung des nichtlinearen Verhaltens wurde ein geeignetes Messverfahren gefunden und zur subjektiven Beurteilung des nichtlinearen Verhaltens der Lautsprecher wurden Hörbeispiele erstellt.

3.1. Drei Aktivlautsprecher verschiedener Klassen

Da es sich um grundlegende Untersuchungen und um die Festlegung eines geeigneten Messverfahrens handelte, kam der Auswahl der zu untersuchenden Lautsprecher eine besondere Bedeutung zu.

Sie sollten einerseits als aktive Regielautsprecher im professionellen und semiprofessionellen Studiobetrieb verwendet werden. Andererseits sollten sie von ihrer zu erwartenden Qualitätsklasse so verschieden sein, dass durch das zu findende Messverfahren tatsächlich Unterschiede dokumentiert und bewertet werden können. Die ausgewählten Lautsprecher werden in Tabelle 1 beschrieben.

	Typ		Abmessungen H×B×T [mm]	Frequenzgang (laut Herstellerangaben)	Maximalpegel (Abstand 1m; laut Herstellerangaben)
LS1	JBL Control11	2-Wege Kleinlaut- sprecher	235×159×143	120Hz bis 20kHz (±3dB)	87dB SPL
LS2	Klein+Hummel O110	Aktiver 2-Wege Studio-Regie- lautsprecher	267×170×190	58Hz bis 20kHz (±2dB)	107,7dB SPL
LS3	Musicelectronic Geithain GmbH RL903K	Aktiver 3-Wege Studio-Regie- lautsprecher	480×285×353	35Hz bis 20kHz (±3dB)	113dB SPL

Tabelle 1: Die ausgewählten Aktivlautsprecher

Der Controll von JBL ist als passiver Lautsprecher bekannt. Für die Untersuchungen wurde er mit einem passenden Verstärker (the t.amp PM40C) versehen, der auf der Rückseite montiert wird und ihn damit zum Aktivlautsprecher macht.

3.2. Der Messaufbau

Alle Messungen wurden im reflexionsarmen Raum des IRT (siehe Abb. 3) durchgeführt.

Der Aktivlautsprecher und das Messmikrofon wurden direkt an das Messsystem angeschlossen. Das Messsystem befand sich außerhalb des Messraumes. (siehe Abb.4)

Die Messungen wurden mit dem Messsystem Analyzer2 der Firma Klippel durchgeführt. Mit Hilfe dieses Systems können analoge Messsignale generiert und erfasst werden. Die Signalverarbeitung erfolgt digital. Die zu messenden Parameter werden in regelmäßigen Abständen bestimmt und in der Datenbank des Messgerätes gespeichert. Eine USB-Schnittstelle erlaubt den Anschluss eines PC und ermöglicht so eine Steuerung der Messung und eine Auswertung der Ergebnisse.



Abb. 3: Messaufbau im reflexionsarmen Raum

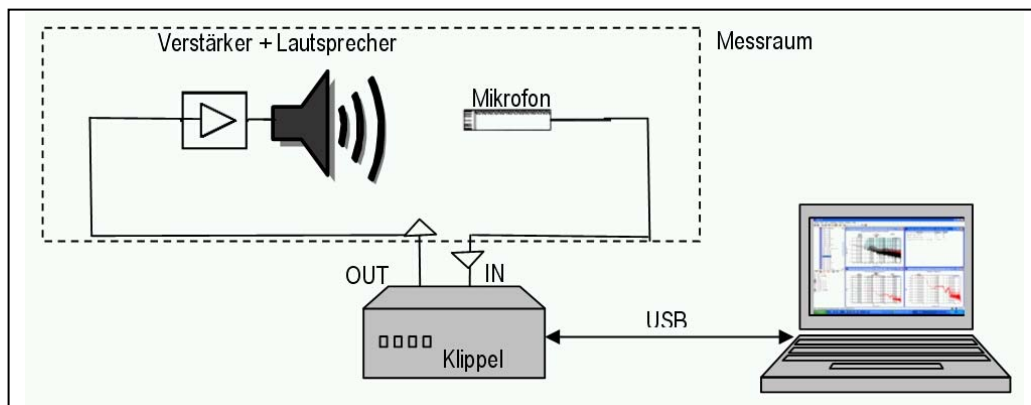


Abb. 4: Anordnung zur Messung der nichtlinearen Verzerrungen

3.3. Messung der nichtlinearen Verzerrungen

3.3.1. Harmonische Verzerrungen (k_2 und k_3)

Die Messung der harmonischen Klirrfaktoren (k_2 und k_3) stellt bislang den Standard zur Beschreibung der nichtlinearen Verzerrungen dar. Die Anregung des Lautsprechers erfolgt mit einem Sinuston (vgl. Abb. 5), dessen Frequenz (f_1) einen angegebenen Frequenzbereich durchläuft (sweep). Dabei werden die Pegel der Grundwelle f_1 sowie der Verzerrungskomponenten bei $2f_1$ (k_2) und $3f_1$ (k_3) gemessen und im Diagramm entlang der Frequenz aufgetragen. Der Pegelabstand der Klirrkomponente zur Grundwelle kann entweder als Klirrdämpfung in dB oder als Klirrfaktor in Prozent angegeben werden.

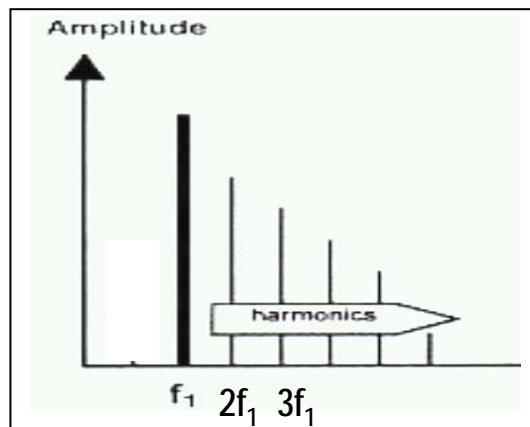


Abb. 5: Grundwelle und die harmonischen Verzerrungskomponenten

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen in einer Übersicht für alle drei Lautsprecher die Verzerrungskomponenten zweiter und dritter Ordnung. Die Messung wurde bei 91dB in 15cm Abstand durchgeführt. Das entspricht einem Pegel von ca. 75 dB in einem Abstand von 1m

Zur besseren Orientierung wurden an einigen Dezibelwerten der Klirrkomponenten die zugehörigen Klirrfaktoren in Prozent angegeben.

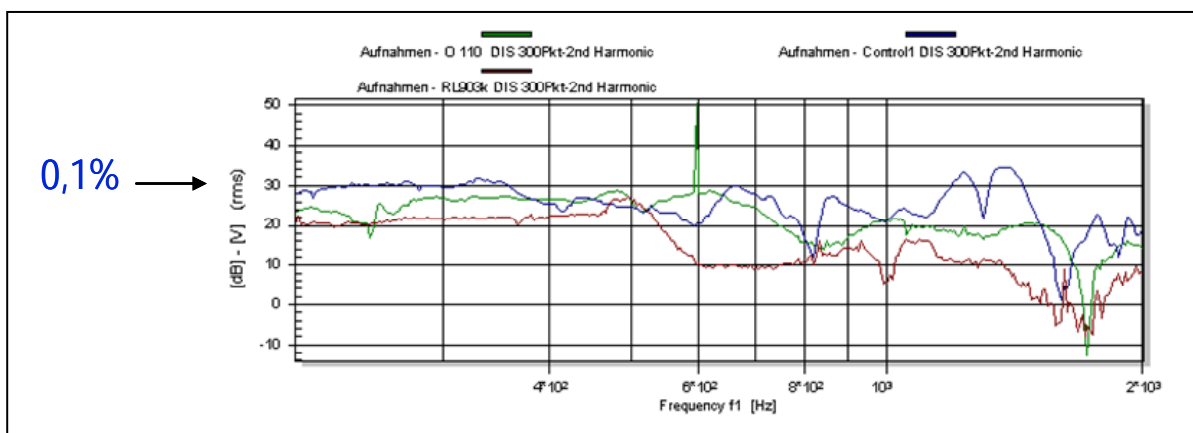


Abb. 6: Grundwelle und die harmonischen Verzerrungskomponenten zweiter Ordnung für die drei Lautsprecher Control1, O110 und RL903K.

Es kann festgestellt werden, dass die harmonischen Verzerrungen der drei Lautsprecher kaum Unterschiede aufweisen. Obwohl die Lautsprecher drei Klassen zuzuordnen sind, unterscheiden sich ihre Klirrfaktoren lediglich um 0,1 bis 0,2 %.

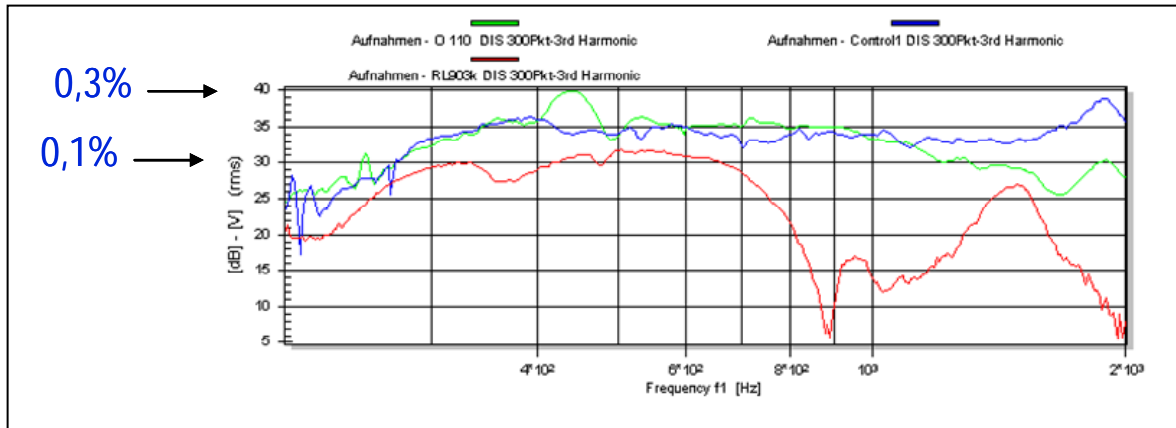


Abb. 7: Grundwelle und die harmonischen Verzerrungskomponenten dritter Ordnung für die drei Lautsprecher Control1, O110 und RL903K.

3.3.2. Die Intermodulationsverzerrungen bei Zweitton-Anregungssignal

Als Anregungssignal wurde ein Sinuston mit einer festen Frequenz f_1 von 20 Hz gewählt sowie ein zweiter Sinuston, dessen Frequenz f_2 während des Messablaufs den Bereich von 200Hz bis 2 kHz durchläuft (vgl. Abb. 8). Der tiefe Ton f_1 hatte eine um 6 dB höhere Amplitude als der Ton f_2 . Der Tiefton-Lautsprecher sollte somit große Membranauslenkungen ausführen. Für die Messung wurde ein Pegel des Tons f_2 von 75 dB in einer Entfernung von 1m eingestellt.

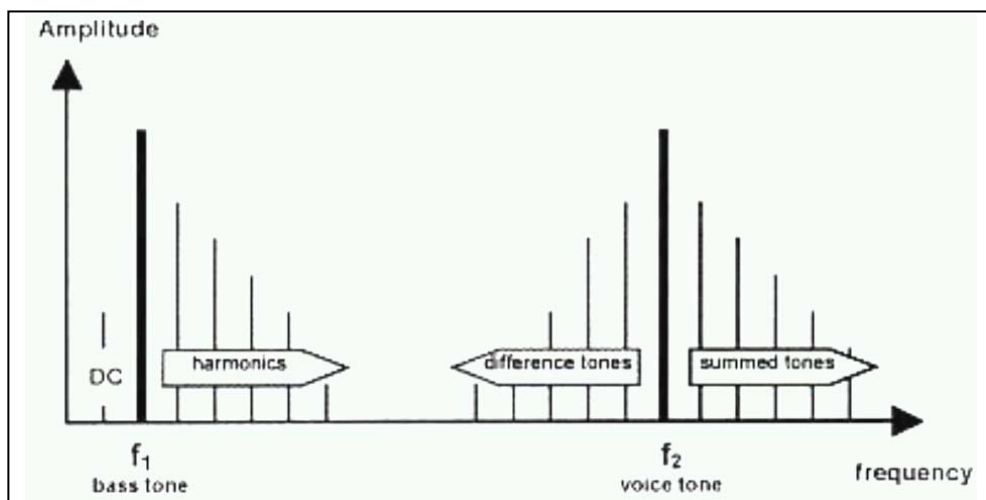


Abb. 8: Zweitton Anregungssignal und Verzerrungskomponenten

Als Ergebnis werden die Differenzton- und Summenton- Intermodulationskomponenten rund um f_2 gemessen. Die Intermodulationsverzerrungen zweiter (d_2) und dritter Ordnung (d_3) werden als Prozentangaben des Pegels von f_2 ausgedrückt:

$$d_2 = \frac{P(f^2 - f_1) + P(f^2 + f_1)}{P f_2} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$d_3 = \frac{P(f^2 - 2f_1) + P(f^2 + 2f_1)}{P f_2} \cdot 100\% \quad (3)$$

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen in einer Übersicht für alle drei Lautsprecher die relativen Intermodulationsverzerrungen zweiter und dritter Ordnung. Die Messung wurde bei 91dB in 15cm Abstand durchgeführt. Das entspricht einem Pegel von ca. 75 dB in einem Abstand von 1m

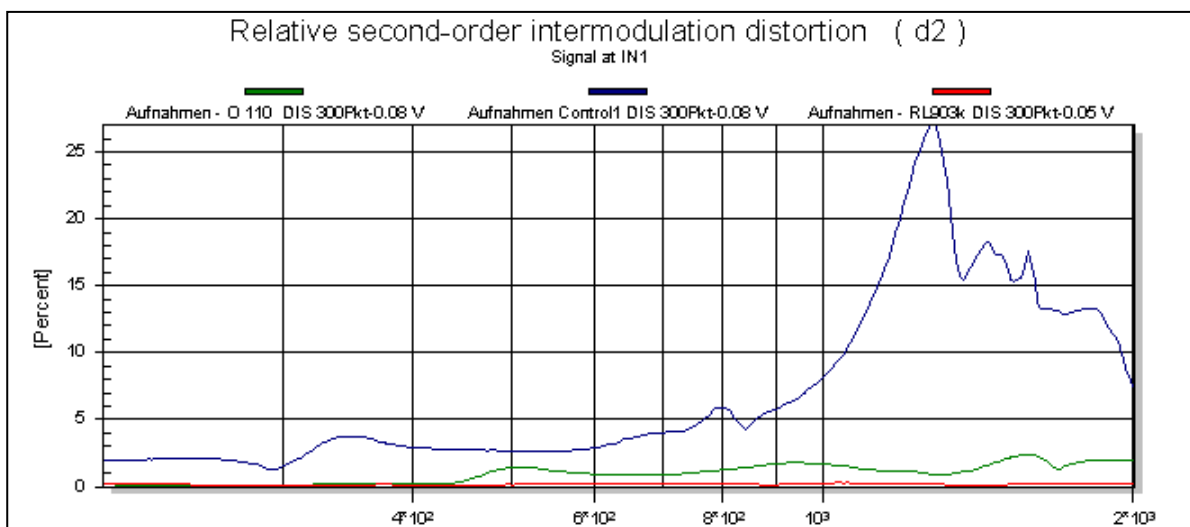


Abb. 9: Die relativen Intermodulationsverzerrungen zweiter Ordnung für die drei Lautsprecher Controll1, O110 und RL903K bei einem Pegel von 75 dB in einer Entfernung von 1m

Bei dieser Messung treten große Unterschiede zwischen den Ergebnissen der drei Lautsprecher auf. Die Intermodulationsverzerrungen zweiter Ordnung (d_2 in Abb. 9) zeigen für den Lautsprecher Controll1 Werte über 20%. Für den Lautsprecher O110 werden Werte bis 2% gemessen, während die Werte für den RL903K mit weniger als 0,3% in dieser Darstellung von der Null-Linie kaum zu unterscheiden sind.

Die Intermodulationsverzerrungen weisen deutlich höhere Werte auf als die harmonischen Verzerrungen.

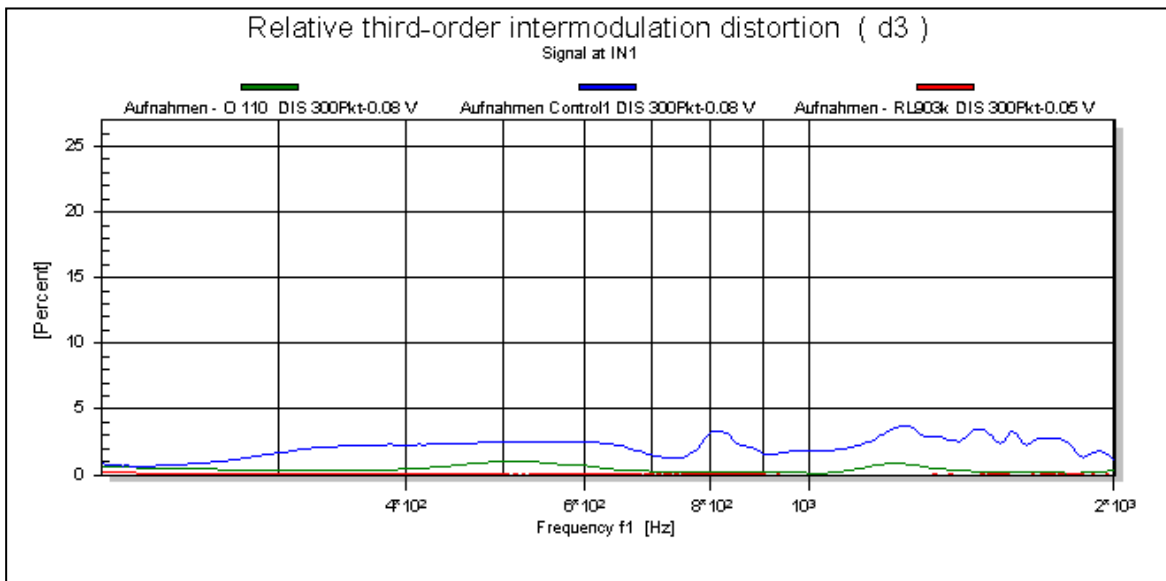


Abb. 10: Die relativen Intermodulationsverzerrungen dritter Ordnung für die drei Lautsprecher Control1, O110 und RL903K bei einem Pegel von 75 dB in einer Entfernung von 1m

Um die Intermodulationsverzerrungen eines Lautsprechers vollständig zu beschreiben, müssten alle relevanten Kombinationen an Zweitönen untersucht werden. Zur Kennzeichnung des nichtlinearen Verhaltens von Aktivlautsprechern ist das Verfahren zu zeitaufwendig.

3.4. Messung der nichtlinearen Gesamtverzerrungen bei Multiton-Anregungssignal

Die Messung des nichtlinearen Verhaltens bei Anregung mit einem Multitonsignal stellt eine interessante Alternative dar. Durch seinen breitbandigen Charakter kommt es den komplexen Signalen die ein Lautsprecher üblicherweise abstrahlt wesentlich näher, als die die üblichen Anregungssignale mit ein oder zwei Sinustönen.

3.4.1. Das Messverfahren bei Multiton-Anregungssignal

Für die vorliegende Untersuchung wurden 5 Anregungslinien pro Oktav gewählt (vgl. Abb. 11). Die nichtlinearen Verzerrungen werden in den Zwischenräumen gemessen. Eine Auftrennung der Gesamtverzerrungen nach harmonischen Verzerrungen und Intermodulationsverzerrungen ist nicht mehr möglich. Das Messergebnis kann als „nichtlinearer Fingerabdruck“ des Lautsprechers bezeichnet werden.

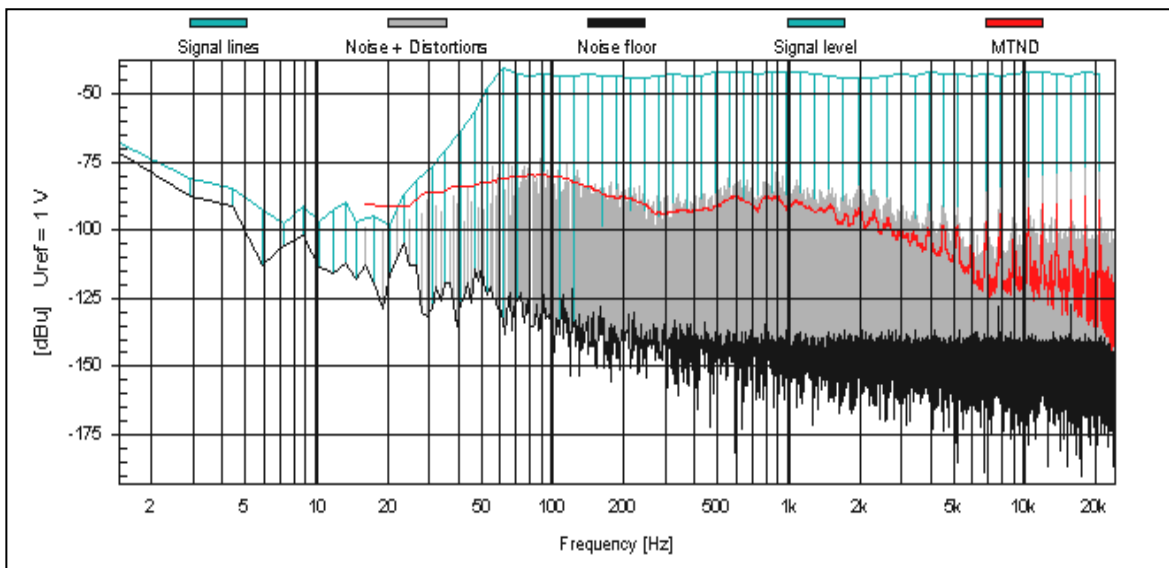


Abb. 11: Beispiel einer Messung der Gesamtverzerrungen mit dem Multitonsignal (5 Anregungslinien pro Oktave); Grundgeräusch (schwarz); Gesamtverzerrungen (rot); Verzerrungslinien (grau); Anregungslinien (blau)

3.4.2. Das Messergebnis bei Multiton-Anregungssignal

Abbildung 12 zeigt die Gesamtverzerrungen aller drei Lautsprecher in der Übersicht bei Anregung mit einem Multitonsignal.

Die Pegel der einzelnen Anregungstöne lagen im Übertragungsbereich des Lautsprechers bei 75 dB (75 dB mean signal level) in einer Entfernung von 1 m.

Zur besseren Orientierung wurden an einigen Dezibelwerten der Klirrkomponekten die zugehörigen Klirrfaktoren in Prozent angegeben. Die Abgrenzung der Lautsprecher gegeneinander ist mit diesen Ergebnissen gut möglich. Im Frequenzbereich um 1 kHz z.B. liegt der Lautsprecher RL903K bei 0,2% (-56 dB); der O110 bei 0,5% (-45 dB) und der Control1 bei 2% (-35 dB).

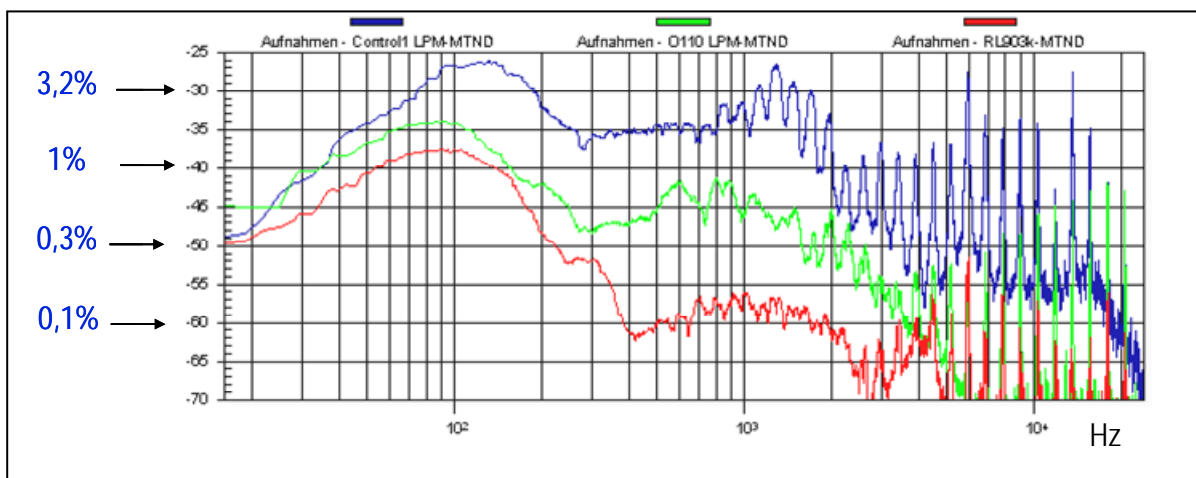


Abb. 12: Gesamtverzerrungen von drei Lautsprechern in der Übersicht bei Anregung mit dem Multitonsignal (75 dB mean signal level in einem Abstand von 1m)

3.4.3. Interpretation der Messkurven

Die Kurvenverläufe der drei Gesamtverzerrungen entlang der Frequenz weisen einige Gemeinsamkeiten auf. Nach jetzigem Kenntnisstand kann der prinzipielle Verlauf der Gesamtverzerrungen entlang der Frequenz folgendermaßen zugeordnet werden:

In der Umgebung der Resonanzfrequenz erreichen die nichtlinearen Verzerrungen bei allen drei Lautsprechern ihre höchsten Werte im Verhältnis zur Grundwelle. Dies kann auf ein Maximum der Membranauslenkung in diesem Bereich zurückgeführt werden (vgl. Abb. 13). Wie in der qualitativen Darstellung zu sehen ist, nimmt die Membranauslenkung (und damit die Gesamtverzerrung) über der Resonanzfrequenz stark ab.

Bei einem Zwei- oder Dreiweglautsprecher übernimmt allerdings im Bereich mittlerer Frequenzen der Mittel- oder Hochtöner und bestimmt dann den Verlauf der Verzerrungen.

Bei hohen Frequenzen bilden die Intermodulationsverzerrungen kleine „Hügel“ rund um die Anregungslinie. Das führt zu dem kammartigen Erscheinungsbild bei hohen Frequenzen.

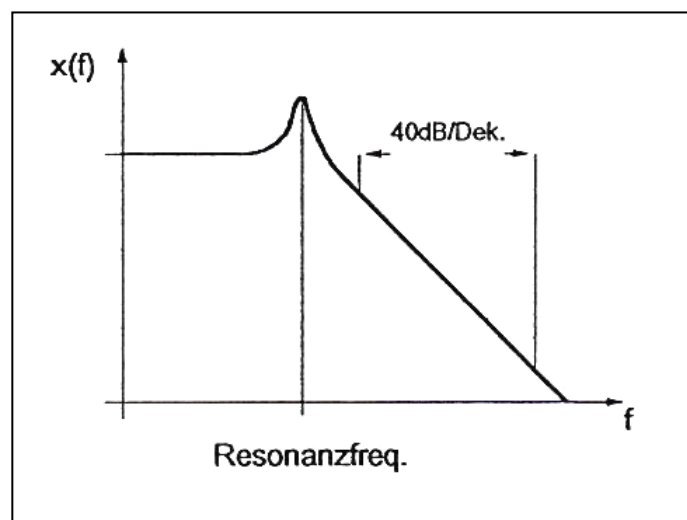


Abb. 13: Prinzipieller Frequenzgang der Membranauslenkung eines Lautsprechers (qualitative Darstellung)

3.4.4. Der „richtige“ Pegel des Multiton-Anregungssignals

Die Belastung des Aktivlautsprechers bei der Wiedergabe des Testsignals sollte einem realistischen Abhörpegel in einer Tonregie entsprechen (z.B. 86 dB(A)).

In den folgenden Ausführungen wird vom Pegel des Anregungssignals im Messraum der Bezug zu einem entsprechenden Abhörpegel in einer typischen Tonregie hergestellt.

Zunächst wird der bei den Messungen des Multiton-Verfahrens verwendete mean signal level (L_{msl}) in einen linearen Schalldruckpegel (L_{lin}) umgerechnet:

$$L_{lin} = 10 \cdot \log(\text{Zahl der Anregungslinien}) + L_{msl} = 17 \text{ dB} + 75 \text{ dB} = 92 \text{ dB} \quad (4)$$

Dieser lineare Gesamtpegel entspricht auf Grund der spektralen Zusammensetzung des Messsignals einem A-bewerteten Gesamtschallpegel von etwa 90 dB(A) in einer Entfernung von 1m im Messraum.

In einer typischen Tonregie mit einer Nachhallzeit von etwa 0,3 Sekunden gibt der Lautsprecher bei gleicher Anregung in einer Entfernung von 1 m 92,6 dB(A), in 2 m etwa 88 dB(A) ab

Damit kann festgestellt werden:

Die Messung mit einem Pegel des Multiton-Signals von 75 dB mean signal level in 1m Entfernung (Messraum) entspricht einer Belastung des Aktivlautsprechers bei einem realistischen Abhörpegel in einer Tonregie.

4. Hörbeispiele

Neben den messtechnischen Untersuchungen wurden auch Hörbeispiele erstellt, um die subjektive Wirkung der Verzerrungen bei verschiedenen Signalen zu untersuchen.

4.1. Wie äußern sich die nichtlinearen Verzerrungen?

Mit zunehmendem Pegel und damit auch mit stärkerer Ausprägung der Verzerrungen werden die Klirr- und Intermodulationsprodukte als Interferenzen wie zum Beispiel Schwebungen, Rauigkeiten usw. hörbar. Vor allem bei Einsetzen des Gesanges bzw. der Stimme und an Stellen mit großem tieffrequenten Anteil kann dies beobachtet werden. Bei hohen Frequenzen entstand teilweise der Eindruck der Gesang würde „Verschwimmen“. Teilweise wird auch die empfundene Dynamik des Signals verändert.

4.2. Erstellung der Hörbeispiele

Die Testsequenzen wurden im reflexionsarmen Raum über Messmikrofon im Abstand von 1m bei steigenden Lautsprecherpegeln aufgenommen. Der entsprechende Aufbau ist bereits in Abb. 3 dargestellt.

Die Aufnahmen mit verschiedenen Pegelniveaus wurden auf eine einheitliche Abspiel-Lautstärke angeglichen. Die Wiedergabe der Hörbeispiele erfolgte über Kopfhörer. So kann das Verhalten des Lautsprechers bei einem Wiedergabepegel von z.B. 82 dB bei einem angenehmen Kopfhörerpegel von 55 dB angehört werden. Die gehöreigenen Verzerrungen sind dadurch unerheblich.

4.3. Durchführung erster „Hörversuche“

Es wurden sieben Musiksequenzen, zwei Sprachaufnahmen und drei Testsignale untersucht. Diese ersten Versuche wurden mit wenigen Versuchspersonen durchgeführt. Daher können die Untersuchungen keinesfalls als regulärer Hörversuch bezeichnet werden.

Trotz dieser Einschränkungen sollen hier die ersten Eindrücke im Hinblick auf die einzelnen Lautsprecher wiedergegeben werden:

Die Aufnahmen mit dem RL903K der Firma Musicelectronic Geithain GmbH blieben weitgehend ohne wahrnehmbare Verzerrungen. Lediglich bei Testsignal 3 (Zwei-Ton) wurden ab einem Schalldruckpegel von 95 dB, durch Auslenkung der Membran des Tieftöners, Artefakte hörbar. Da die Verzerrungen des Lautsprechers bei allen durchgeführten Testverfahren bis hin zu einem Pegel von 94 dB in 1 m Abstand unter 5% lagen, war zu erwarten, dass keine hörbaren Verzerrungen von Seiten des Lautsprecher produziert werden.

Bei dem Lautsprecher O110 der Firma Klein+Hummel werden, fast durchgängig bei allen Testsignalen, Verzerrungen ab einem Pegel von 90 dB in 1 m Entfernung wahrnehmbar. Da bei der Messung der Intermodulationen mit dem Zwei-Ton Verfahren ein sprunghafter

Anstieg der Verzerrungen bei 90 dB SPL (in 1 m Abstand) zu beobachten ist, könnte dies ein kritischer „Schwellwert“ sein. Bei Testsignal 2 (Multiton) werden Verzerrungen ab 77 dB mean signal level in 1 m Abstand (ca. 95 dB linearem Pegel) wahrnehmbar.

Der Controll von JBL weist erwartungsgemäß die niedrigsten Wahrnehmungsschwellwerte auf. Hier sind bereits ab relativ niedrigen Schalldruckpegeln Veränderungen des Signals wahrnehmbar. Bei zwei Musikbeispielen zum Beispiel werden Verzerrungen als Rauigkeiten bei einem Pegel von 83 dB in 1 m Entfernung wahrnehmbar. Bei einem Sprachsignal werden ab 85 dB in 1 m Abstand Veränderungen des Signals deutlich. Schwebungen sind in Testsignal 3 (Zwei-Ton) ab 75 dB in 1 m zu erkennen.

5. Zusammenfassung

Zur Kennzeichnung des nichtlinearen Verhaltens von Aktivlautsprechern müssen die Intermodulationsverzerrungen unbedingt berücksichtigt werden. Die übliche Angabe der harmonischen Verzerrungen (Klirrfaktoren) in den Datenblättern reicht dazu nicht aus.

Die Messung der nichtlinearen Gesamtverzerrung mit einem Multisinus als Anregungssignal ist eine effektive Messmethode, die bei den vorliegenden Untersuchungen sehr gute Ergebnisse lieferte. Mit diesem „Nichtlinearen Fingerabdruck“ der Lautsprecher war eine Differenzierung nach Lautsprecherklassen sehr gut möglich.

Der größte untersuchte Regielautsprecher zeigte bei den üblichen Abhörpegeln ähnlich niedrige Verzerrungswerte wie das menschliche Gehör.

Bei technischen Signalen (Zwei-Ton) sind die Verzerrungen deutlich wahrnehmbar, sobald sie eine gewisse Schwelle überschreiten. Bei den bisher untersuchten Musik- und Sprachsequenzen sind die Verzerrungen nur beim kleinsten der untersuchten Lautsprecher eindeutig zu erkennen

6. Ausblick

Die vorgestellte neue Meßmethode zur Beurteilung der nichtlinearen Verzerrungen von aktiven Lautsprechern sollte nun auf weitere Aktivlautsprecher und andere Audiosysteme angewendet werden.

Vielleicht kann für die noch durchzuführenden Hörversuche ein kritisches Musik- oder Sprachsignal gefunden werden, das Veränderungen durch nichtlineare Verzerrungen deutlicher hervortreten lässt.

Die von Schmid und Chalupper [1] erhobene Forderung, dass die Verzerrungen von Regielautsprechern deutlich unter denen des Gehörs sein sollen, müssen nach weiteren Hörversuchen im Hinblick auf die Studiopraxis diskutiert werden.

7. Quellenverzeichnis

[1] Schmid, Wolfgang; Chalupper, Josef: “Die Ausgeprägtheit der Tonhöhe als psychoakustisches Kriterium zur Qualitätsbeurteilung elektroakustischer Komponenten – oder: warum ist der Phasengang des Differenztons 2. Ordnung so wichtig? “ *19. Tonmeister-tagung, 1996, München : Saur, 1996. – S. 861–874*

[2] Zwicker, Eberhard; Fastl, Hugo: “Psychoacoustics: Facts and Models. – 2. Aufl.” *Berlin[u.a.]: Springer, 1999*

- [3] Saller, Marion: “Untersuchungen zu nichtlinearen Verzerrungen am Aktivlautsprecher”
IRT München, FH Deggendorf: Diplomarbeit, 2005