

Zur Wahrnehmbarkeit von tieffrequenten Verzerrungen

G. KRUMP

Harman Audio Electronic Systems GmbH, Straubing

1. Einführung

Infolge der zunehmend leistungsfähigeren Verstärkerelektronik werden immer höhere Ansprüche an das Großsignalverhalten eines Lautsprecher gestellt. Gerade bei tiefen Frequenzen wird damit der Lautsprecher durch die entsprechend große Auslenkung im stark nichtlinearen Bereich betrieben. Für eine optimale und kostengünstige Auslegung von Antrieb und Schwingensystem sind daher Kenntnisse über die Wahrnehmbarkeit von quadratischen und kubischen Verzerrungen notwendig, welche beide je nach Entstehungsort bei Subwoofern mit großem Hub verstärkt auftreten.

Verzerrungen gerader Ordnung sind hierbei beispielsweise auf unterschiedliche Steifigkeit der Aufhängung oder einseitige Begrenzung der Sicke bei positiver und negativer Auslenkung zurückzuführen, während Verzerrungen ungerader Ordnung auf unsymmetrischen Spulensitz beruhen. Obwohl bei Wiedergabesystemen Intermodulationsverzerrungen infolge ihrer inharmonischen Verzerrungsprodukte kritischer sind, beschränkt sich die vorliegende Untersuchung auf quadratische und kubische Verzerrungen eines einzelnen Grundsignals.

2. Versuchsdurchführung

Als Anregung wird ein computergeneriertes Multisinuussignal um 100 Hz verwendet, dessen Spektrallinien bei einem Linienabstand von 1 Hz konstante Amplituden und statistisch gleichverteilte Phasen aufweisen. Das Signal stellt somit ein periodisches Weißes Schmalbandrauschen dar, das im Gegensatz zu reinen Sinustönen störende Schwebungen vermeidet [2]. Zur Simulation von quadratischen und kubischen Verzerrungen werden dem Grundsignal Spektrallinien um 200 Hz bzw. 300 Hz hinzuaddiert, deren Pegeldifferenz $\Delta L_{2, \text{Harm.}}$ bzw. $\Delta L_{3, \text{Harm.}}$ zum Grundsignal zur Untersuchung der Wahrnehmungsschwelle variiert wird. In Fig. 1 sind die Verhältnisse zur Simulation der kubischen Verzerrungen dargestellt. Die Versuche wurden mit Bandbreiten Δf des Grundsignals und der entsprechenden Harmonischen von 50 Hz (50 Spektrallinien) und 100 Hz (100 Spektrallinien) durchgeführt.

Die Hörschwellen wurden bei einem Darbietungspegel des Grundsignals von 70, 80, 90 und 100 dB ermittelt. Die jeweiligen Pegeldifferenzen ΔL der zweiten bzw. dritten Harmonischen wurden so gewählt, daß die entsprechende Wahrnehmungsschwelle mit fünf Pegelstufen stets erfaßt wurde. Für einen Pegel von 70 und 80 dB wurde daher $\Delta L_{2, \text{Harm.}}$ zwischen 18 und 26 dB in 2-dB-Schritten variiert, während für Pegel von 90 und 100 dB die Pegeldifferenz 16 bis 24 dB betrug. Die dritte Harmonische hatte Pegelunterschiede $\Delta L_{3, \text{Harm.}}$ von 34 bis 42 dB für 70 und 80 dB Darbietungspegel und Differenzen zwischen 30 und 38 dB für die höheren Pegel von 90 und 100 dB. Die Pegeldifferenzen waren stets so groß, daß sie den Gesamtpegel des Grundsignals kaum beeinflussen.

Die unterschiedlichen Signale wurden im Paarvergleich mit Ankerschall von neun normalhörenden Versuchspersonen im Alter von 25 bis 50 Jahren beurteilt. In ruhiger Umgebung wurde monaural als Ankerschall zunächst das Grundsignal ohne Verzerrungen mittels Kopfhörer (Beyer DT 48) mit Freifeldentzerrer [3] zwei Sekunden lang dargeboten. Nach einer halben Sekunde Pause wurde ebenfalls zwei Sekunden lang das zu beurteilende Signal mit den entsprechenden Verzerrungen wiedergegeben. Nach einer Sekunde Pause wiederholte sich das Schallpaar. Es wurde besonders darauf geachtet, daß weder der D/A-Wandler noch sonstige Geräte im Signalweg insbesondere bei hohen Pegeln zusätzliche Verzerrungen produzierten, die das Untersuchungsergebnis verfälschen könnten. Die Übertragungsfunktion des Freifeldentzerrers besitzt bei 100 Hz einen sehr steilen Anstieg und mußte daher genau stimmen [3]. Die Personen konnten sich die Signalfolge beliebig lange anhören bis sie sich Ihrer Entscheidung sicher waren. Sie mußten beurteilen, ob sich das zweite vom ersten Signal, dem Anker, spektral unterscheidet.

Pro Bandbreite und pro Verzerrungsgrad wurde eine separate Versuchsreihe mit 84 zu bewertenden Schallpaaren durchgeführt, in der

jede der fünf Pegeldifferenzen bei jedem der vier Darbietungspegel statistisch verteilt viermal beurteilt wurde. Bei diesen tieffrequenten Signalen war stets auf richtigen Sitz des geschlossenen Kopfhörersystems zu achten, so daß die ersten vier Signale der Optimierung des Kopfhörersitzes sowie zur Einstimmung dienten und nicht gewertet wurden. Für jedes Schallpaar wurden somit insgesamt 36 Beurteilungen abgegeben.

3. Versuchsergebnisse

In Fig. 2a sind die Ergebnisse zur Wahrnehmbarkeit von simulierten quadratischen Verzerrungen bei einer Bandbreite Δf von 50 Hz dargestellt. Über dem Pegelunterschied $\Delta L_{2, \text{Harm.}}$ ist durch die verschiedenen Symbole die Häufigkeit positiver Antworten in Prozent bei den vier unterschiedlichen Pegeln gekennzeichnet. Durch Interpolation der Punkte kann die Wahrnehmungsschwelle ermittelt werden. Nach Zwicker und Fastl [3] wird als Grenzwert derjenige Wert festgelegt, bei dem die Wahrscheinlichkeit, daß eine Person einen spektralen Unterschied zwischen den Schallpaaren hört, gleich 50 % ist. Bei einem Gesamtpegel von 70 dB sind demnach die quadratischen Verzerrungen der verwendeten Linienspektren hörbar, wenn sie eine Pegeldifferenz $\Delta L_{2, \text{Harm.}}$ von weniger als 24,5 dB aufweisen. Bei Pegeln von 80, 90 und 100 dB ergeben sich Grenzwerte von 23, 20 und 18 dB. Mit zunehmendem Pegel werden somit die Hörschwellen höher. Diese Tatsache kommt dem Lautsprecher zugute, da mit zunehmendem Wiedergabepegel die Verzerrungen infolge der größeren Auslenkung ansteigen. Insgesamt wird die Schwelle mit den fünf verwendeten Pegeldifferenzen sehr gut erfaßt und kann mit dem angege-

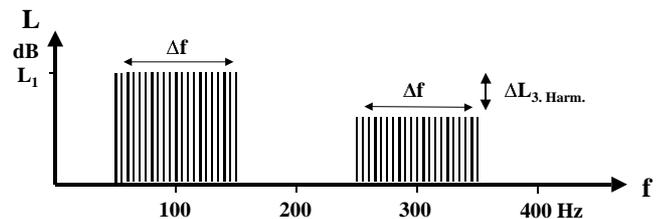


Fig. 1: Linienspektrum mit simulierten kubischen Verzerrungen.

benen Kriterium eindeutig ermittelt werden.

Fig. 2b zeigt die Ergebnisse bei simulierten kubischen Verzerrungen um 300 Hz. Die Wahrnehmungsschwellen liegen im Vergleich zu den zweiten Harmonischen wesentlich tiefer. Bei einem Darbietungspegel von 70 dB genügt ein Pegelunterschied von weniger als 40 dB zum Grundsignal, um klangliche Veränderungen zu erkennen. Bei höheren Pegeln von 80, 90 und 100 dB wachsen die Hörschwellen zwar auf 38, 35 bzw. 31 dB an, sie liegen damit aber um über 13 dB unterhalb der Wahrnehmungsschwellen von den entsprechenden quadratischen Verzerrungen. Zudem führen kubische Verzerrungen infolge ihrer Abweichung vom Oktavschemata zu einem inharmonischen Klangbild und wirken dadurch weitaus störender.

Die Untersuchungsergebnisse bei der doppelten Bandbreite sind für simulierte quadratische Verzerrungen in Fig. 3a, für kubische Verzerrungen in Fig. 3b aufgetragen. Es zeigen sich sehr ähnliche Hörschwellen, so daß ein Einfluß der gewählten Bandbreite Δf nicht zu erkennen ist. Tendenziell liegen die Schwellen bei 100 Hz Bandbreite geringfügig höher als bei den schmalbandigeren Signalen.

$$\Delta L_{n, \text{Harm.}} = L_1 - L_n = 20 \log (1/k_n) \text{ dB} \quad (1)$$

Die unterschiedlichen Hörschwellen sind in Form von Pegeldifferenzen in Tabelle 1 nochmals aufgelistet und mit Gl. 1 in die Klirrfaktoren k_2 bzw. k_3 umgerechnet. Der minimale hörbare Klirrfaktor liegt dabei bei 1 %. Die Pegeldifferenzen bei 50 % positiven Antworten wurden dabei rechnerisch anhand der Untersuchungsergebnisse nach Fig. 2 und 3 ermittelt. Die genauen Pegelangaben sollen nicht dar-

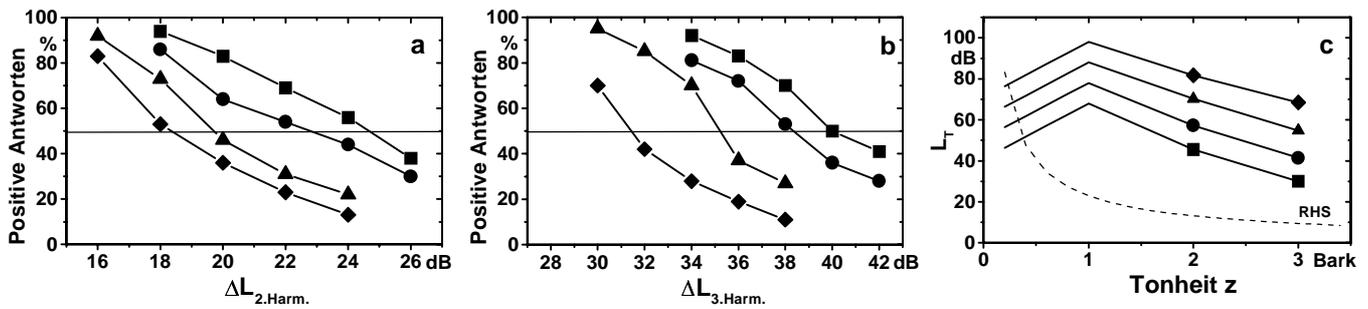


Fig. 2: Positive Antworten bei unterschiedlichen Pegeldifferenzen ΔL zwischen Grundsignal und hinzuaddierten quadratischen (a) bzw. kubischen (b) Verzerrungen mit einer Bandbreite von 50 Hz bei Grundsignalpegeln von 70 (Quadrate), 80 (Kreise), 90 (Dreiecke) und 100 (Rauten) dB. Zugehörige Mithörschwellen-Tonheitsmuster (c) mit Ruhehörschwelle (gestrichelt).

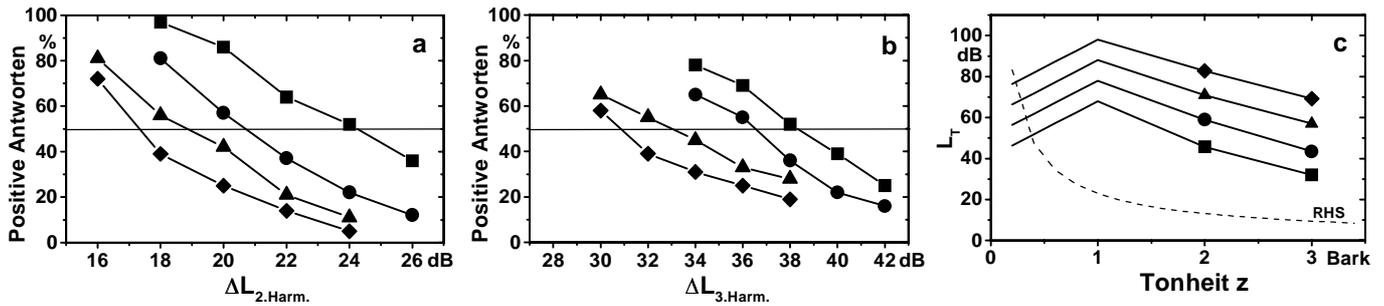


Fig. 3: Positive Antworten bei unterschiedlichen Pegeldifferenzen ΔL zwischen Grundsignal und hinzuaddierten quadratischen (a) bzw. kubischen (b) Verzerrungen mit einer Bandbreite von 100 Hz bei Grundsignalpegeln von 70 (Quadrate), 80 (Kreise), 90 (Dreiecke) und 100 (Rauten) dB. Zugehörige Mithörschwellen-Tonheitsmuster (c) mit Ruhehörschwelle (gestrichelt).

über hinwegtäuschen, daß die interindividuellen Hörschwellen um bis zu ± 2 dB vom 50 %-Wert abweichen.

4. Mithörschwelle

Die Wahrnehmbarkeit von weiteren Verzerrungsprodukten im Tiefenbereich kann abgeschätzt werden, indem die zugehörigen Mithörschwellen ermittelt werden. Für eine Bandbreite von 50 Hz bzw. 100 Hz sind in Fig. 2c bzw. 3c die Mithörschwellen-Tonheitsmuster für die verschiedenen Pegel asymptotisch skizziert. Die Umrechnung der Frequenz in die gehörgerechte Tonheit z erfolgt relativ einfach, da unter 500 Hz eine Frequenzgruppe des Gehörs konstant 100 Hz breit ist. Die Tonheit erhält man durch Aneinanderreihen und Durchnummerierung der Frequenzgruppen, so daß die Frequenzangaben nur durch 100 dividiert werden müssen.

Der Mithörschwellenpegel L_T beschreibt den Pegel eines Testtones, bei dem dieser zusätzlich zum Maskierer, in diesem Fall dem Grundsignal, gerade noch wahrnehmbar ist. Er errechnet sich aus der Summe von Frequenzgruppenpegel und Verdeckungsmaß a_v , welches den störenden Einfluß der Eigenfluktuationen von Schmalbandrauschen berücksichtigt. Das Verdeckungsmaß beträgt bei Frequenzen unter 500 Hz stets -2 dB [3]. Der Frequenzgruppenpegel des Grundsignals entspricht dem Darbietungspegel, da alle 50 bzw. 100 Spektrallinien in die entsprechende Frequenzgruppe fallen. Ein Pegel des Grundsignals von 70 dB führt daher zu einem gerade wahrnehmbaren Testtonpegel L_T von 68 dB. Die untere Flanke im Mithörschwellen-Tonheitsmuster wurde mit einer pegelunabhängigen Steigung von 27 dB/Bark angenommen, während der Verlauf zu höheren Tonheiten durch die Interpolation der Versuchsergebnisse skizziert werden kann. Die Steigungen der oberen Flanken können individuell stark schwanken, wodurch sich die interindividuellen Hörschwellenabweichungen von ± 2 dB erklären lassen. Die Steigungen weisen mit zunehmendem Pegel eine leichte nichtlineare Auffächerung auf wie sie bei Maskierern um beispielsweise 1 kHz aus der Literatur bekannt ist [3]. Allerdings besitzen diese bei einem Pegel von 100 dB wesentlich flachere Steigungen von ca. 7 dB/Bark, während in dieser Untersuchung minimale Steigungen von ca. 15 dB/Bark auftreten. Die Ursache liegt in der relativ hohen Ruhehörschwelle, die bei 100 Hz bereits ca. 25 dB ausmacht, bei 1 kHz hingegen etwa bei 3 dB liegt. Das Gehör berücksichtigt nur den Pegel über der Ruhehörschwelle (sensitive level), was bei der Berechnung der Mithörschwelle bei tiefen Frequenzen beachtet werden muß. Die Flanken zu höheren Tonheiten können unter Beibehaltung der Steigungen verlängert werden, so daß

Δf [Hz]	L [dB]	$\Delta L_{2, \text{Harm.}}$ [dB]	k_2 [%]	$\Delta L_{3, \text{Harm.}}$ [dB]	k_3 [%]
50	70	24,5	6,0	40,0	1,0
50	80	22,8	7,3	38,5	1,2
50	90	19,8	10,3	35,3	1,7
50	100	18,3	12,2	31,5	2,6
100	70	24,3	6,1	38,3	1,3
100	80	20,8	8,9	36,5	1,5
100	90	19,0	11,2	33,0	2,2
100	100	17,3	13,7	30,8	2,9

Tabelle 1: Wahrnehmbare Pegeldifferenzen ΔL bzw. Klirrfaktoren in ^A

auch die Wahrnehmbarkeit von höhergradigen Verzerrungsprodukten abgeschätzt werden kann.

Die Mithörschwellen zeigen, daß bei Grundsignalen um 100 Hz wegen der geringen Frequenzgruppenbreite und der relativ geringen Steigung der oberen Flanke harmonische Verzerrungen, insbesondere kubische Verzerrungen, deren Amplitude zudem quadratisch mit dem Eingangssignal anwächst, sowie die Summenprodukte von Intermodulationsverzerrungen kritisch sind. Der eben wahrnehmbare Klirrfaktor liegt bei 1 %. Die Differenzprodukte jedoch sind infolge der erhöhten Ruhehörschwelle wesentlich schlechter wahrnehmbar. Bei höheren Frequenzen sind die Verhältnisse hingegen eher umgekehrt, die inharmonischen Differenzöne von quadratischen Intermodulationsverzerrungen werden von der steilen unteren Flanke der Mithörschwelle wesentlich weniger maskiert als entsprechende Verzerrungen von der oberen Flanke, die wegen des hohen Pegels über der Ruhehörschwelle eine sehr geringe Steigung aufweist [1]. Die ermittelten Hörschwellen stellen sicher Extremwerte dar, bei Musikwiedergabe können die zulässigen Klirrfaktoren wegen der maskierenden Wirkung des Nutzsignals höher liegen.

Der Autor dankt Herrn Alexander Penn, der im Rahmen seines Praktikums bei der Fa. Harman Audio Electronic Systems die Hörversuche durchgeführt hat.

Literatur

- [1] Krump G., *Halten Wandler-Boards, was sie versprechen?* Elektronik 26, Franzis-Verlag, München, 1993, 95-105.

- [2] Krump G., *Linienspektren als Testsignale in der Akustik*. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '96, Verlag: Oldenburg, 1996, 288-289.
- [3] Zwicker E. und Fastl H., *Psychoacoustics - Facts and Models*. Second edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999.