

Zur Wahrnehmbarkeit von Modulationsverzerrungen

G. KRUMP

Harman/Becker Automotive Systems GmbH, Straubing

1. Einführung

Für die Optimierung des Großsignalverhaltens von Lautsprechern, die der zunehmend leistungsfähigeren Verstärkerelektronik gerecht werden sollen, ist die Modellierung des Antriebs- und Schwingensystems mit Finiten Elementen sehr hilfreich [3]. Aus den auslenkungsabhängigen Verläufen von Kraftfaktor, Nachgiebigkeit und Induktivität können die zu erwartenden Verzerrungen simuliert werden. Die Ergebnisse werden anhand von Messungen mittels eines Distortion Analyzers überprüft und verifiziert [1]. Die Kenntnis entsprechender Hörschwellen stellt neben Simulation und Messung den dritten Baustein zur kosten- und zeitoptimierten Entwicklung leistungsstabiler Lautsprechersysteme dar.

Modulationsverzerrungen sind aufgrund ihrer höheren Amplitude, ihrer inharmonischen Verzerrungsprodukte und ihres breitbandigen Auftretens, insbesondere unterhalb der Primärtöne in der Regel kritischer als harmonische Verzerrungen. Daher werden im folgenden Hörschwellenuntersuchungen mit zwei Sinustönen gleicher Amplitude bei den Frequenzen der quadratischen und kubischen Intermodulationsprodukte sowie zum Vergleich der entsprechenden harmonischen Verzerrungsprodukte vorgestellt.

2. Versuchsdurchführung

Bei einer Versuchsreihe A wird f_1 gleich 50 Hz gewählt, während f_2 in diskreten Frequenzschritten zwischen 150 Hz und 4 kHz verändert wird. Durch den tieffrequenten Primärtönen wird das Verzerrungsverhalten des Lautsprechers bei großer Auslenkung deutlich. Bei der zweiten Versuchsreihe B wird f_2 konstant auf 1 kHz fixiert und f_1 von 50 bis 900 Hz variiert. Die Primärtöne wurden den Versuchspersonen monaural über Kopfhörer (Beyer DT 48) mit Freifeldentzerrer [4] mit einem Pegel pro Spektrallinie von 90 dB dargeboten. Dem Zweittonkomplex mit gleicher Phase wurde zusätzlich ein pulsierender Sinuston (Impulsdauer: 200 ms, Rampe: 20 ms, Pause: 160 ms) addiert, dessen Pegel die Personen mittels einer Eichleitung so einstellen sollten, daß sie den Testton gerade noch wahrnehmen konnten. Die Frequenz des Testtones wurde vom Versuchsleiter so gewählt, daß sie in Abhängigkeit von den Primärtönen dem zu untersuchenden Verzerrungsprodukt entsprach, um damit die zugehörige Hörschwelle zu erhalten.

Infolge der relativ lauten Signale stellte jede Person pro Primärtönenkonstellation und pro Verzerrungsprodukt den Testton nur einmal ein. Aus den Angaben von acht normalhörenden Versuchspersonen im Alter von 24 bis 39 Jahren wurden die Zentralwerte und Wahrscheinlichen Schwankungen errechnet, welche in den Fig. 2 und 3 durch Symbole mit Balken gekennzeichnet sind. Mögliche Einflüsse von Schwebungen und Verzerrungen vom Gehör selbst wurden in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

In Fig. 1 sind für beide Versuchsreihen die entstehenden Verzerrungsprodukte bei bestimmten Primärtönen skizziert [2]. Zusätzlich sind die Verdeckungskurven der Primärtöne in Form von Asymptoten angedeutet, deren Steigung sich aus den entsprechenden Versuchsergebnissen in Fig. 2 bzw. 3 ergibt. Der genaue Verlauf der Mithörschwellen von maskierenden Sinustönen ist infolge auftretender Schwebungen wesentlich komplizierter und kann in Zwicker und Fastl [4] nachgelesen werden. Zu beachten ist, daß bei 50 Hz die Ruhehörschwelle bereits um 40 dB angehoben ist und dadurch der mit 90 dB dargebotene Primärtönen leiser wahrgenommen wird, so daß die Steigung der oberen Flanke steiler verläuft als üblicherweise bei hohen Pegeln. Dies wird hauptsächlich bei der Darstellung der zugehörigen Mithörschwellen-Tonheitsmuster deutlich. Dennoch können Einflüsse von Verdeckungseffekten auch in Fig. 1 durch Parallelverschiebung der Mithörschwellenmuster zur Abszisse entsprechend der Konstellation der Primärtöne grob abgeschätzt werden, wengleich hierzu genaugenommen eine Tonheitsskalierung nötig wäre.

Zum Vergleich wurden die Verzerrungsprodukte eines 16 cm Lautsprechers in geschlossener Box bei Primärtönenkonstellationen

gemäß Versuchsreihe A und B, jedoch mit etwas engeren Frequenzschritten ermittelt. Bei einer elektrischen Leistung von 32 Watt ergaben sich in einem Meter Abstand Primärtönenpegel von etwa 90 dB, so daß die Meßergebnisse mit den Hörschwellen verglichen werden können. In Fig. 1 sind die Pegel L der Verzerrungsprodukte des Lautsprechers bei der entsprechenden Primärtönenkonstellation eingetragen, so daß leicht ersichtlich ist, welche Verzerrungen wahrgenommen werden können.

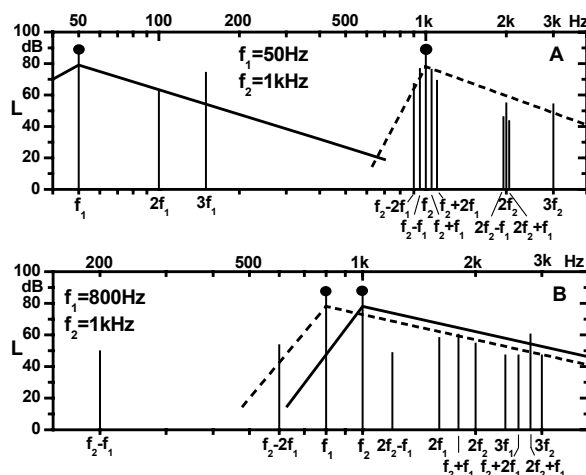


Fig. 1: Versuchsreihe A mit fixiertem $f_1 = 50$ Hz, Versuchsreihe B mit fixiertem $f_2 = 1$ kHz. Mithörschwelle der Primärtönen skizziert. Verzerrungsprodukte eines Lautsprechers bei 32 W.

3. Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Versuchsreihe A mit f_1 gleich 50 Hz sind in Fig. 2 dargestellt. Zur besseren Übersicht sind die Symbole mit gestrichelten bzw. durchgezogenen Geraden verbunden. In Fig. 2a ist der eben wahrnehmbare Testtonpegel L_T bei einer Testtonfrequenz von $f_2 - f_1$ bzw. $f_2 + f_1$ in Abhängigkeit von der Primärtönenfrequenz f_2 aufgetragen. Bei beispielsweise f_2 gleich 150 Hz liegt die Mithörschwelle des Differenztones (Rechteck) um 100 Hz bei 70 dB, während sie bei $f_2 + f_1$ (Dreieck) um 200 Hz bei 65 dB zu finden ist. Bei höheren Frequenzen unterscheiden sich die Hörschwellen bei Differenz- und Summenfrequenz noch weniger. Infolge des sehr tieffrequenten ersten Primärtönen liegen die quadratischen Intermodulationsverzerrungen stets sehr nahe beim zweiten Primärtönen bei f_2 , so daß dessen Verdeckung durchwegs zu relativ hohen Hörschwellen von ca. 70 dB führt. Der Einfluß der Mithörschwellen kann durch die in Fig. 1A eingetragenen Asymptoten gut abgeschätzt werden.

Ähnliches gilt für die Hörschwellen bei kubischen IM-Verzerrungsfrequenzen in Fig. 2b, obwohl bei $f_2 + 2f_1$ die Schwelle am größten sein müßte, da diese Frequenz durch die sehr flache obere Flanke des zweiten Primärtönen am meisten verdeckt wird.

Der maskierende Einfluß der Primärtönen ist bei den kubischen harmonischen Verzerrungsfrequenzen (ausgefüllte Symbole) aufgrund des großen Frequenzabstandes gering, so daß in Fig. 2c diese Hörschwellen niedriger liegen als diejenigen bei den quadratischen (nicht ausgefüllte Symbole) und auch gegenüber Fig. 2b und 2c geringe Testtonpegel aufweisen. Ein Ausnahme ist bei f_2 gleich 200 und 250 Hz zu finden, da hier der Testton bei $3f_1$ (Raute) gleich 150 Hz durch den nahen zweiten Primärtönen bei 200 bzw. 250 Hz sehr stark verdeckt wird.

In Versuchsreihe A ergibt sich durch den tieffrequenten Primärtönen über den gesamten interessierenden Frequenzbereich eine relativ starke Verdeckung, so daß die Darstellung in Fig. 1A stellvertretend für alle anderen Primärtönenkonstellationen steht. Hauptsächlich sind bei dem verwendeten Lautsprecher Verzerrungsprodukte bei $3f_1$, $3f_2$ sowie $f_2 - f_1$ und $f_2 - 2f_1$ wahrnehmbar.

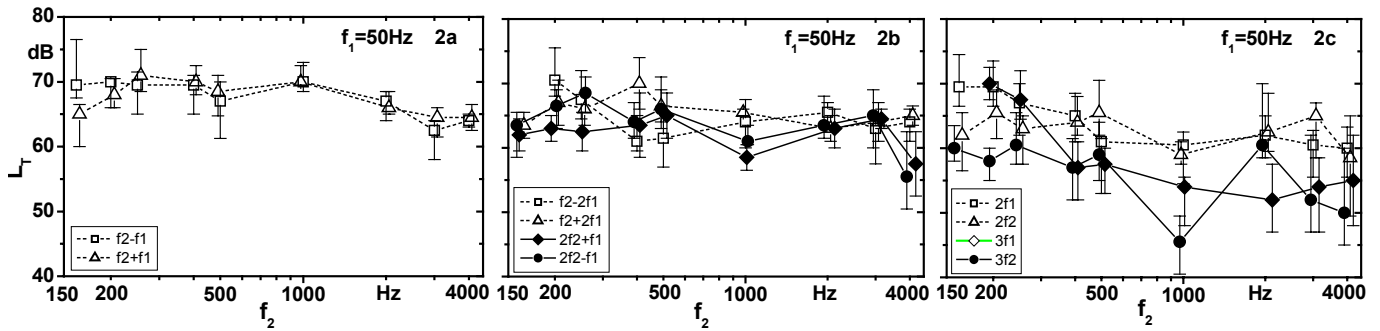


Fig. 2: Testtonpegel L_T bei quadratischen (a), kubischen (b) IM-Verzerrungs- bzw. harmonischen Verzerrungsfrequenzen (c) mit $f_1 = 50$ Hz.

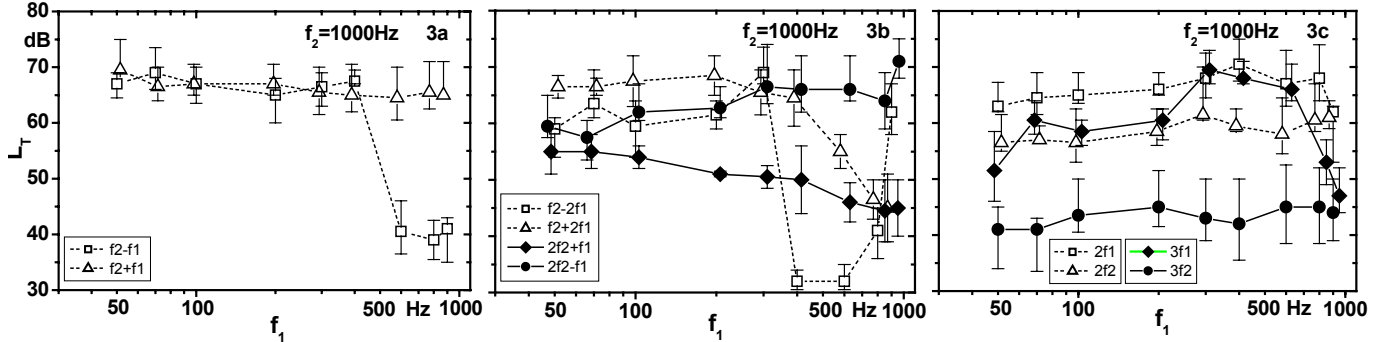


Fig. 3: Testtonpegel L_T bei quadratischen (a), kubischen (b) IM-Verzerrungs- bzw. harmonischen Verzerrungsfrequenzen (c) mit $f_2 = 1$ kHz.

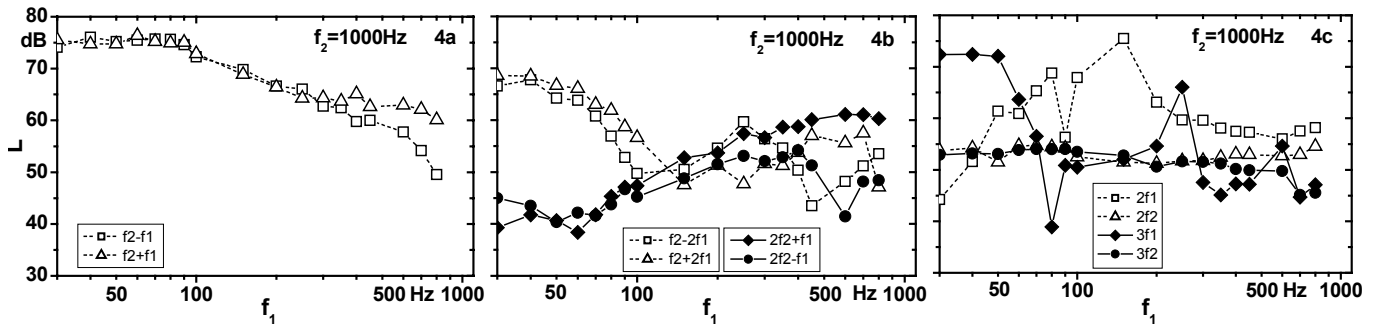


Fig. 4: Pegel L von quadratischen (a), kubischen (b) IM-Verzerrungen bzw. harmonischen Verzerrungen (c) eines Lautsprechers.

Die Ergebnisse von Versuchsreihe B in Fig. 3 zeigen eine noch kritischere Primärtonkonstellation. Zum Vergleich sind in Fig. 4 die zugehörigen Verzerrungspegel L des Lautsprechers dargestellt. In Fig. 3a nimmt die Hörschwelle des Differenztones (Rechteck) aufgrund der fehlenden Verdeckung bei f_1 gleich 600, 800 und 900 Hz sehr geringe Werte von ca. 40 dB an. Fig. 1B zeigt die Konstellation für f_1 gleich 800 Hz. Der Differenzton bei 200 Hz wird nicht mehr verdeckt. Ein Vergleich mit Fig. 4a macht deutlich, daß die Verzerrungen mehr als 10 dB über der Hörschwelle liegen, welche bereits nahe an die Ruheshwelle reicht.

Teilweise noch tiefere Hörschwellen lassen sich bei den Frequenzen f_2-2f_1 (Rechteck) mit f_1 gleich 400 und 600 Hz in Fig. 3b messen, da die Verzerrungsfrequenzen bei dieser Konstellation wieder außerhalb der Verdeckung der Primärtöne liegen. Auch bei $2f_2+f_1$ (Raute) sinkt mit zunehmendem unteren Primärtönen f_1 die Hörschwelle, weil dieses Verzerrungsprodukt dann zu höheren Frequenzen wandert und immer weniger vom Sinuston bei 1 kHz maskiert wird. Das kubische Verzerrungsprodukt besitzt zudem gemäß Fig. 4b ab f_1 größer ca. 300 Hz einen wesentlich höheren Pegel als die ebenfalls hochfrequente harmonische Verzerrung bei $3f_2$, so daß es in Fig. 1B als deutlich hörbar erscheint.

Unter den Hörschwellen in Fig. 3c fällt insbesondere der tiefe Testtonpegel bei $3f_2$ (Kreis) auf. Da er nur von dem fixierten Primärtönen f_2 bei 1 kHz verdeckt wird, liegt er weitgehend unabhängig von f_1 bei ca. 43 dB. Die oberen Flanken der Verdeckungskurven scheinen sich also kaum zu addieren. Ein Vergleich mit Fig. 4c zeigt, daß die kubische Verzerrung bei $3f_2$ stets wahrnehmbar ist.

4. Zusammenfassung

Versuchsreihe A führt gemäß Fig. 1A zu breitbandigen Verdeckungseffekten, so daß die kritischen IM-Verzerrungen bei f_2-f_1 und f_2-2f_1 liegen. Zudem können kubische harmonische Verzerrungsprodukte hörbar werden. Ein Primärtönen bei f_1 gleich 100 Hz könnte z.B. die Situation noch verschärfen, da dann die IM-Produkte einen größeren Frequenzabstand zu dem verdeckenden Primärtönen bei f_2 aufweisen. In Versuchsreihe B werden die IM-Verzerrungen besonders bei f_2-f_1 , aber auch bei f_2-2f_1 kaum mehr von den nahe beieinander liegenden Primärtönen maskiert. Die Verzerrung bei $2f_2+f_1$ ist aufgrund ihres hohen Pegels besser wahrnehmbar als die bei $3f_2$. IM-Verzerrungen müssen im Vergleich zu harmonischen Verzerrungen wegen ihrer inharmonischen Frequenzlage und ihres höheren Pegels besonderes beachtet werden.

Der Autor dankt Herrn Florian Straßer, der im Rahmen seines Praktikums bei der Fa. Harman/Becker die Hörversuche durchgeführt hat.

Literatur

- [1] Klippel W., *Distortion Analyzer - a New Tool for Assessing and Improving Electrodynamic Transducer*. 108th Convention of AES, Paris, Feb. 2000, preprint 5109.
- [2] Krump G., *Halten Wandler-Boards, was sie versprechen?* Elektronik **26**, Franzis-Verlag, München, 1993, 95-105.
- [3] Rausch M., Kaltenbacher M., Kreitmeier L., Krump G., Landes H., Simkovics R., *Einsatz numerischer Verfahren bei der Berechnung der nichtlinearen Eigenschaften von elektrodynamischen Lautsprechern*. In: DAGA '00, Verlag: DEGA, Oldenburg 2000, 710-711.
- [4] Zwicker E. und Fastl H., *Psychoacoustics - Facts and Models*. Second edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999.