

# Zur Wahrnehmbarkeit von schmalbandigen Frequenzgangvariationen bei Lautsprechern

G. KRUMP

Harman Audio Electronic Systems, Straubing

## 1. Einführung

Ein wichtiges physikalisches Kriterium zur Beurteilung eines guten Lautsprechers ist nach wie vor der Frequenzgang. Zahlreiche Lautsprecher weisen je nach Größe abweichend vom gewünschten geradlinigen Verlauf im Frequenzbereich zwischen 800 und 2000 Hz charakteristische Pegelüberhöhungen oder Pegelabsenkungen auf, bei denen zudem der Klirrfaktor ansteigt. Ursache hierfür sind Impedanzsprünge zwischen dem relativ harten Membrankegel und der weichen Sicke. Um beurteilen zu können, ob entsprechende Maßnahmen zur Vermeidung dieser schmalbandigen Frequenzgangvariationen wie z. B. Optimieren der Klebeverbindung ausreichend sind, ist es notwendig, die eben wahrnehmbaren Pegelschwellen unseres Gehörs in diesem Frequenzbereich zu kennen. Daher wurden im folgenden Versuche durchgeführt, diese bei 1 kHz zu ermitteln.

## 2. Versuchsdurchführung

Als Anregungssignal wurde ein Multisinussignal mit 20000 Spektrallinien von 1 Hz bis 20 kHz im Abstand von 1 Hz berechnet. Die Amplitude der einzelnen Linien war gemäß Fig. 1 abgesehen von den Pegelvariationen um 1 kHz jeweils konstant, während die Phasen mit Hilfe eines Zufalls-generators statistisch gleichverteilt waren. Das periodische Rauschsignal, das über einen D/A-Wandler zyklisch wiedergegeben wurde, besitzt den Vorteil, daß nun schmalbandige Pegelüberhöhungen oder Absenkungen im interessierenden Frequenzbereich sehr steiflankig mit Spektrallinien mit größerer oder kleinerer Amplitude realisiert werden können [1].

Der eben wahrnehmbare Schwellenwert bei Pegelüberhöhungen wurde durch Erhöhen der einzelnen Spektrallinie bei 1 kHz um  $\Delta L_{ST}$  gleich 16, 18, 20, 22 und 24 dB gegenüber den benachbarten Spektrallinien ermittelt. Die Frequenzgruppenbreite  $\Delta f_G$  um 1 kHz (entspricht 8,5 Bark) liegt bei 160 Hz. Dementsprechend wurde zusätzlich die Hörbarkeit von schmalbandigen Pegelüberhöhungen von einer halben (80 Hz) sowie einer (160 Hz) und zwei (320 Hz) Frequenzgruppenbreiten untersucht. Die Pegel der entsprechenden Frequenzgruppen wurden um  $\Delta L_{\Delta f_G}$  gleich 1, 2, 4, 6 und 8 dB gegenüber den benachbarten erhöht. Die Hörschwelle von Pegelabsenkungen wurde ebenfalls bei einer halben, einer und zwei Frequenzgruppenbreiten mit Frequenzgruppenpegelunterschieden  $\Delta L_{\Delta f_G}$  von 1, 2, 4, 6, 8 und 10 dB untersucht. Alle Signale wurden in ruhiger Umgebung diotisch über einen Kopfhörer (Beyer DT 48) mit Freifeldentzerrer wiedergegeben. Der Gesamtpegel betrug stets 70 dB und veränderte sich infolge der sehr großen Linienanzahl durch die schmalbandigen Pegelvariationen wenig. Der Gesamtpegel  $L_{ges}$  errechnet sich gemäß Gl. 1 mit Hilfe des Dichtepegels  $I_{WR}$  und der Anzahl der Spektrallinien (20000) bzw. infolge des Linienabstandes von 1 Hz der gesamten Bandbreite von  $\Delta f$  gleich 20000 Hz. Für einen Darbietungspegel von 70 dB ergibt sich ein Dichtepiegel  $I_{WR}$  von 27 dB. Der zugehörige Frequenzgruppenpegel  $L_{\Delta f_G}$  bei 1 kHz ( $\Delta f_G = 160$  Hz) beträgt nach Gl. 2 ohne Pegelvariationen 49 dB.

$$L_{ges} = I_{WR} + 10 \log (\Delta f / \text{Hz}) \text{ dB} \quad (1)$$

$$L_{\Delta f_G} = I_{WR} + 10 \log (\Delta f_G (f) / \text{Hz}) \text{ dB} \quad (2)$$

Die Wahrnehmbarkeitsgrenzen wurden im Paarvergleich mit Ankerschall ermittelt. Die Versuchsperson bekam zunächst eine Sekunde lang den Ankerschall, welcher aus Spektrallinien mit stets konstanter Amplitude bestand, dargeboten. Nach einer halben Sekunde Pause wurde für eine Sekunde das zu beurteilende Vergleichssignal wiedergegeben. Diese Kombination wurde mit einer Sekunde Pause ständig wiederholt, bis die Person sich in ihrem Urteil sicher war. Die Versuchsperson sollte angeben, ob sich das zweite Rauschsignal von dem ersten spektral unterscheidet. Die Beurteilung von Pegelüberhöhung bzw. -absenkung wurde separat in jeweils zwei getrennten Versuchreihen durchgeführt, wobei jedes Signalpaar pro Sitzung von den 10 normalhörenden Personen in statistisch verteilter Reihenfolge zweimal beurteilt wurde, so daß pro Vergleichspaar insgesamt 40 Beurteilungen vorliegen. Die ersten vier Beurteilungen jeder Versuchreihe dienen zur Einstimmung und wurden nicht gewertet.

## 3. Ergebnisse

In Fig. 2a ist über dem Pegelunterschied  $\Delta L_{ST}$  des Sinustones die Häufigkeit positiver Antworten in Prozent aufgetragen. Falls alle 10 Versuchspersonen bei einem Testpaar in allen vier Bewertungen einen Unterschied gehört haben, gab es 40 positive Antworten, welche als 100 Prozent gewertet wurden. Deutlich ist erkennbar, daß der gesuchte Schwellenwert, ab dem die einzelne Sinuslinie gerade gehört wird, nicht durch einen Sprung definiert ist, sondern durch einen Übergang der Wahrscheinlichkeit von Null nach Eins. Je schwieriger eine Änderung der Empfindungsgröße festzustellen ist, desto flacher sind die Steigungen. Nach Zwicker und Fastl [2] wird als Grenzwert derjenige Wert definiert, bei dem die Wahrscheinlichkeit gleich 0,5 bzw. 50 % ist. Die einzelne Sinuslinie muß demnach bei dem durchgeführten Paarvergleich eine Pegelanhebung  $\Delta L_{ST}$  von mindestens 18 dB aufweisen, um wahrgenommen zu werden.

Bei einem Schmalbandrauschen mit einer Bandbreite von einer halben Frequenzgruppe hingegen ist nach Fig. 2b eine Pegelüberhöhung  $\Delta L_{\Delta f_G}$  von nur etwa 2,5 dB notwendig, um Unterschiede im Schallpaar feststellen zu können. Dieser Schwellenwert ist ebenfalls in Fig. 2c und 2d erkennbar, wenn die Pegelüberhöhung eine bzw. zwei Frequenzgruppen umfaßt.

Schmalbandige Pegelabsenkungen sind hingegen noch stärker von der Bandbreite abhängig. Fig. 3a zeigt, daß die Versuchspersonen bei einer Absenkung von einer halben Frequenzgruppenbreite selbst um 10 dB keinen eindeutigen Unterschied zwischen Ankerschall und zu vergleichenden Schall wahrnahmen. Die geringe Steigung des Kurvenverlaufes läßt auf

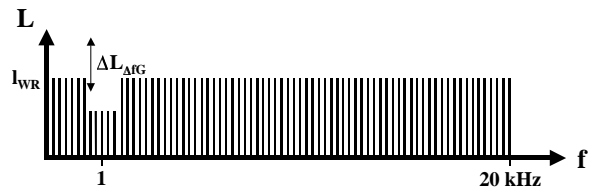


Fig. 1: Linienpektrum mit steiflankigen Pegelanhebungen bzw. Pegelabsenkungen  $\Delta L_{\Delta f_G}$  bei 1 kHz.

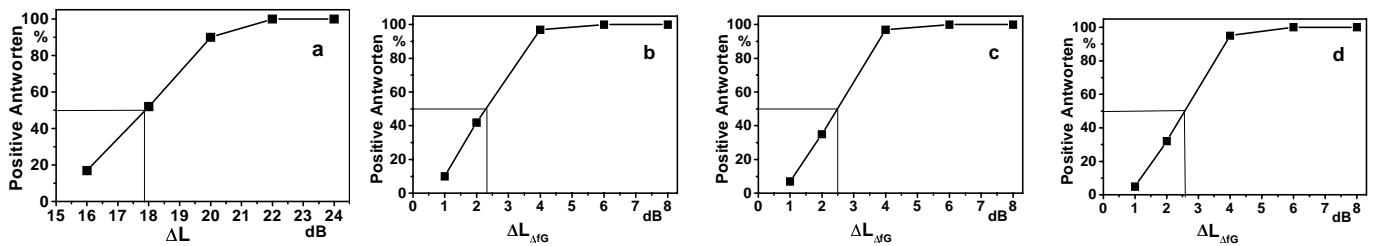
die Schwierigkeit der Beurteilung schließen. Es traten bei dieser schmalbandigen Absenkung relativ große interindividuelle Unterschiede auf. Nach Fig. 3b ergibt sich bei frequenzgruppenbreiter Absenkung  $\Delta L_{\Delta f_G}$  ein Schwellenwert von etwa 4 dB. Wird schließlich der Pegel von zwei Frequenzgruppen vermindert, so liegt der Grenzwert unter der 3 dB-Marke und entspricht damit in etwa dem Schwellenwert von Pegelüberhöhungen.

## 4. Diskussion

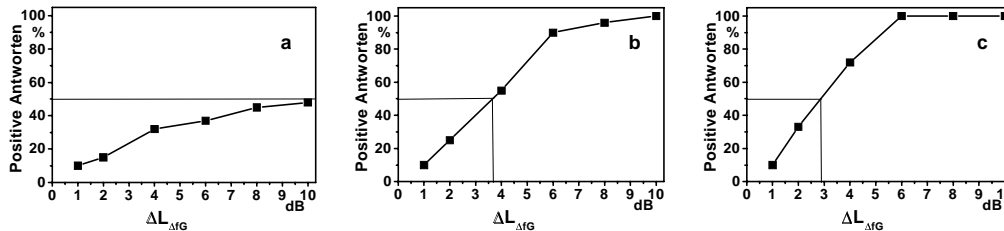
In der Literatur [2, 3] finden sich Untersuchungsergebnisse, die aussagen, daß bei Darbietung von maskierendem Rauschen plus Testton bei höheren Frequenzen (10 bis 20 kHz) bereits eine Pegeländerung von 1 dB innerhalb einer Frequenzgruppe wahrnehmbar ist, während bei tieferen Frequenzen (100 bis 500 Hz) die Schwelle sich auf 2 dB erhöht. Die höhere Schwelle wird durch die die Detektion eines Testtones störende Amplitudenfluktuation des Schmalbandrauschens erklärt, die bei den geringen Frequenzgruppenbreiten bei tiefen Frequenzen besonders ausgeprägt ist. Die Zusammenhänge werden bei Betrachtung der Mithörschwelle deutlich. Sie beschreibt den Pegel eines Testtones, bei dem dieser zusätzlich zu einem Maskierer gerade noch gehört wird. Der notwendige Testtonpegel  $L_T$  berechnet sich nach Gl. 3 aus dem entsprechenden Frequenzgruppenpegel  $L_{\Delta f_G}$  und dem Verdeckungsmaß  $a_v$ , welches den störenden Einfluß der erwähnten Eigenmodulation von Rauschen bei geringen Frequenzgruppenbreiten berücksichtigt.

$$L_T (f) = L_{\Delta f_G} (f) + a_v (f) \quad (3)$$

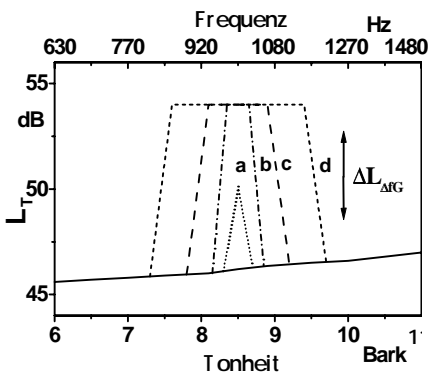
Bei hohen Frequenzen besitzt  $a_v$  einen Wert von -6 dB, d.h. der Pegel des eben wahrnehmbaren Testtones liegt 6 dB unter dem entsprechenden Frequenzgruppenpegel des Maskierers [2, 3]. Der zugleich mit dem Maskierer dargebotene Testton muß demnach nur ein Viertel der Maskiererin-tensität besitzen, um zugleich mit dem Maskierer wahrgenommen werden



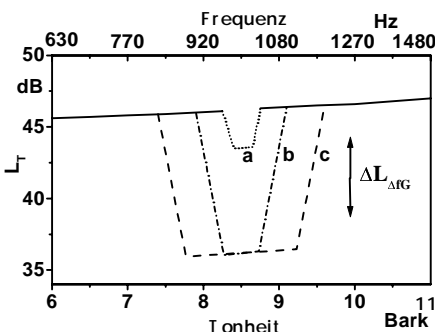
**Fig. 2:** Positive Antworten abhängig von der Pegelanhebung  $\Delta L_{ST}$  eines Sinustones (a) bzw. der Pegelanhebung  $\Delta L_{\Delta FG}$  von Schmalbandrauschen mit der Bandbreite von einer halben (b), einer (c) und zwei (d) Frequenzgruppen.



**Fig. 3:** Positive Antworten abhängig von Pegelabsenkungen  $\Delta L_{\Delta FG}$  von Schmalbandrauschen mit der Bandbreite von einer halben (a), einer (b) und zwei (c) Frequenzgruppen.



**Fig. 4:** Mithörschwellen-Tonheitsmuster für eine Pegelanhebung  $\Delta L_{ST}$  des Sinustones von 24 dB (a) bzw. Pegelanhebungen  $\Delta L_{\Delta FG}$  der Schmalbandrauschen von 8 dB (b bis d) bei Bandbreiten gemäß Fig. 2.



**Fig. 5:** Mithörschwellen-Tonheitsmuster für Pegelabsenkungen  $\Delta L_{\Delta FG}$  von 10 dB bei Bandbreiten gemäß Fig. 3.

zu können. Das Gehör nimmt somit ab einer Intensitätserhöhung um den Faktor 1,25, was im Pegelmaß 1 dB entspricht, Änderungen wahr. Bei Frequenzen um 1 kHz nimmt  $a_v$  einen höheren Wert von -3 dB an. Es ist also infolge der Amplitudenfluktuationen des schmalbandigen Rauschens eine Intensitätserhöhung um den Faktor 1,5 (gleich 1,7 dB) notwendig, damit das Gehör Änderungen registriert.

Bei den Literaturdaten handelt es sich um Modulationsschwellen, d.h. die Versuchsperson hat nicht zwei Schalle nacheinander zu vergleichen, sondern kann während der Darbietung eines Schalles auf Modulationen achten. Die hier ermittelten Vergleichsschwellen von ca. 2,5 dB bei schmalbandigem Rauschen sind etwas größer, da das akustische Gedächtnis mit eine Rolle spielt. Die Schwellenwerte hängen somit auch von der Untersuchungsmethode ab. Da üblicherweise im Lautsprecherbau Boxen im Paarvergleich beurteilt werden, erscheint die in dieser Versuchsreihe verwendete Methode zur Ermittlung von Vergleichsschwellen als sinnvoll.

Eine Betrachtung der Anregung im Mithörschwellen-Tonheitsmuster gemäß Fig. 4 erklärt die unterschiedlichen Grenzwerte von Sinuston und Schmalbandrauschen. Die Mithörschwelle des Rauschens stellt sich infolge der zu höheren Frequenzen hin anwachsenden Frequenzgruppenbreite als stetig ansteigende Linie dar, da der Frequenzgruppenpegel zunimmt. Bei Pegelüberhöhung in Form eines Sinustones (Fig. 4a) ist es sinnvoll, die resultierende Erhöhung des zugehörigen Frequenzgruppenpegels zu

berechnen. Eine einzelne Spektrallinie mit einer Pegeldifferenz  $\Delta L_{ST}$  von 24 dB zu den Nachbarlinien führt zu einer Anhebung  $\Delta L_{\Delta FG}$  der gesamten Frequenzgruppe (160 Spektrallinien) von nur 4 dB (siehe Fig. 4a). Dementsprechend erhöht sich bei einer Hörschwelle von 18 dB der notwendige Frequenzgruppenpegel nur um 1,5 dB. Die Hörgrenze des konstanten Sinustones liegt somit etwas niedriger als bei dem stark fluktuierenden Schmalbandrauschen und stimmt sehr gut mit Literaturdaten überein. Die Mithörschwellen des Schmalbandrauschens sind asymptotisch in den Kurvenverläufen b bis d dargestellt. Gerade bei schmalbandigen Pegelanhebungen wirken die Flanken, welche bei den vorliegenden Pegeln mit einer Steigung von 27 dB/Bark skizziert sind, sehr detektionsfördernd.

Die Schwierigkeiten der Versuchspersonen bei der Wahrnehmung von Pegelabsenkungen  $\Delta L_{\Delta FG}$  einer halben Frequenzgruppenbreite werden bei Betrachtung des Mithörschwellenmusters in Fig. 5a deutlich. Dadurch, daß die Frequenzgruppe bei 8,5 Bark zur einen Hälfte mit Spektrallinien konstanter Amplitude und zur anderen Hälfte mit um 10 dB abgesenkten Spektrallinien angeregt wird, ist in Fig. 5a nur eine maximale Lückentiefe von 2,6 dB möglich. Durch die zu berücksichtigenden Flanken im Mithörschwellen-Tonheitsdiagramm ist bei einer halben Frequenzgruppenbreite nur eine sehr schmale Lücke erkennbar, die im wesentlichen von den Flanken der Mithörschwelle bestimmt wird. Dies ist die Ursache dafür, daß der Schwellenwert nicht festzustellen war und starke interindividuelle Schwankungen auftraten, da die individuellen Flankensteigungen der Personen eine Rolle spielt. Die Amplitudenfluktuation der schmalbandigen Absenkung verschlechtert die Situation zusätzlich. Die Mithörschwellenflanken spielen in Gegensatz zu Pegelüberhöhungen bei Pegelabsenkungen eine maskierende Rolle. Die Steigung beider Flanken wurde bei diesen Frequenzgruppenpegeln mit 27 dB/Bark angenommen. Bei größeren Darbietungspegeln wird aufgrund der nichtlinearen Auffächerung der Flanke an der unteren Lückengrenze auf Steigungen von nur noch 10 dB/Bark die Pegelabsenkung noch weiter verdeckt. Bei einer Lücke gemäß Fig. 5c, welche sich bereits über zwei Frequenzgruppen erstreckt, verliert die Flanke an Bedeutung und der Schwellenwert verringert sich nach Fig. 3c auf Werte um 3 dB. Bei breitbandigen Pegelabsenkungen liegt somit der Grenzwert in derselben Größenordnung wie bei Pegelüberhöhungen.

## 5. Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung ergibt bei Pegelabsenkungen und Pegelerhöhungen mit Bandbreiten ab zwei Frequenzgruppen eine minimale Vergleichsschwelle von etwa 2,5 dB. Bei Darbietung von Musiksignalen wird dieser Schwellenwert infolge des stark schwankenden Spektrums und des störenden Informationsgehaltes sicherlich noch wesentlich höher liegen. Eine relativ schnelle Abschätzung der Hörbarkeit der Sickenresonanz kann mit Hilfe der Terzpegelanalyse durchgeführt werden. Wenn der Terzpegel im betrachteten Frequenzbereich im Vergleich zu den benachbarten Terzpegeln eine Pegelüberhöhung bzw. -absenkung um weniger als 3 dB aufweist, so ist die Sickenresonanz in der Regel nicht wahrnehmbar. Mithörschwellenmuster verdeutlichen die Zusammenhänge. Bei Pegelüberhöhungen wirken die Flanken der Mithörschwelle detektionsfördernd, während sie bei Absenkungen maskierend wirken, so daß das Gehör auf Pegelüberhöhungen grundsätzlich etwas empfindlicher reagiert. Die Hör-

barkeit von Verzerrungen infolge des erhöhten Klirrfaktors kann über entsprechende Änderungen der Frequenzgruppenpegel ebenso abgeschätzt werden.

Der Autor dankt Herrn Daniel Eiser, der im Rahmen seines Praktikums bei der Fa. Harman Audio Electronics, Straubing die Hörversuche durchgeführt hat.

#### **Literatur**

- [1] Krump G., *Linienspektren als Testsignale in der Akustik*. In: Fort. der Akustik, DAGA'96, Verlag: DEGA, Oldenburg, 1996, 288-289.
- [2] Zwicker E. und Fastl H., *Psychoacoustics - Facts and Models*. Second edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999.
- [3] Zwicker E., *Psychoakustik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982.