

## NACHVERDECKUNG VON SCHMALBANDRAUSCHEN BZW. KUBISCHEN DIFFERENZRAUSCHEN

Hugo Fastl

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

### 1. Einführung

Werden ein Sinuston und ein Schmalbandrauschen gleichzeitig dargeboten, dann kann durch die Nichtlinearität des Gehörs ein kubisches Differenzrauschen entstehen. Für im Gehör gebildete kubische Differenztöne konnte Zwicker 1986 in einem Modell der peripheren Vorverarbeitung nachweisen, daß sie wie von außen zugesetzte Töne wirken. Darüber hinaus führen Mithörschwellenmessungen einerseits und Messungen nach der Kompensationsmethode andererseits zu nahezu identischen Ergebnissen hinsichtlich der kubischen Verzerrungen (Zwicker und Fastl 1973). Folglich kann angenommen werden, daß im Gehör gebildete kubische Differenzrauschen praktisch dieselbe Mithörschwelle hervorrufen wie von außen zugesetzte Schmalbandrauschen. Während zur Simultanverdeckung kubischer Differenzrauschen einige Daten vorliegen, ist die von Differenzrauschen bewirkte Nachverdeckung weitgehend unbekannt. Daher wird in dieser Arbeit die Nachverdeckung eines kubischen Differenzrauschens untersucht und mit der Nachverdeckung eines Schmalbandrauschens verglichen, welches im Frequenzgebiet des kubischen Differenzrauschens die gleiche Simultanverdeckung wie dieses erzeugt.

### 2. Messungen

Sämtliche Messungen wurden von zwei normalhörenden Versuchspersonen im Alter von 26 bzw. 33 Jahren nach der Methode des Bekesy-tracking durchgeföhrt. Die Schalle wurden in einer schallisolierten Kabine einohrig über einen elektrodynamischen Kopfhörer (Beyer DT 48) mit Freifeldentzerrer nach Zwicker und Feldtkeller (1967, S. 40) dargeboten. Als Schallreize wurden ein 2 kHz-Ton mit 70 dB Schallpegel und ein 100 Hz breites Rauschen bei 2,5 kHz mit 60 dB Pegel gewählt. Die Mithörschwellen dieser Dauerschalle wurden mit 500 ms langen Testtönen bestimmt. Sowohl Simultanverdeckung als auch Nachverdeckung wurden mit 500 ms langen Maskierern, die durch 400 ms lange Pausen getrennt waren, gemessen. Die Dauer der Testtöne war dabei 7 ms. Alle Schalle wurden mit einer Gaußförmigen Übergangsfunktion mit 3 ms Anstiegszeit ein- und ausgeschaltet. Die Verzögerungszeit  $t_v$  wurde jeweils zwischen dem Ende des Maskiererimpulses und dem Ende des Testtonimpulses (70 %-Werte) gemessen. Als weitere Maskierer, welche bei 1,5 kHz die gleiche Simultanverdeckung wie das kubische Differenzrauschen hervorrufen, wurde einerseits ein 100 Hz breites Schmalbandrauschen bei 1,5 kHz mit 28 dB Pegel und andererseits die Kombination dieses Rauschens mit einem Sinuston bei 2 kHz mit 70 dB Pegel verwendet. In den Figuren 1 bis 3 sind die Ergebnisse der 33 jährigen Versuchsperson dargestellt, die aus den Bekesy-Zick-Zack-Kurven durch graphische Mittelung gewonnen wurden. Die Ergebnisse der zweiten Versuchsperson waren jeweils recht ähnlich. Daher sind in Fig. 4 die Daten beider Personen zusammengefaßt und als Zentralwerte der jeweils sechs Meßwerte beider Versuchspersonen durch Symbole angegeben.

### 3. Ergebnisse

Fig. 1 zeigt die Mithörschwellen-Muster des Sinustones (gestrichelt) bzw. der Kombination aus Sinuston plus Schmalbandrauschen (durchgezogen). Der Pegel  $L_T$  des Testtones an der Mithörschwelle ist als Funktion der Testfrequenz  $f_T$  dargestellt. Da das Kriterium "detection of anything" verwendet wurde, zeigt das Mithörschwellen-Muster für den Sinuston (gestrichelt) bei Testfrequenzen um 2,5 kHz einen deutlichen Einbruch, der auf die Wahrnehmung von kubischen Differenz-

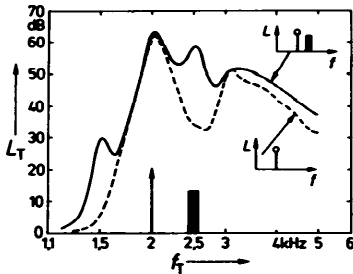


Fig. 1: Mithörschwellen-Muster eines 2 kHz-Tones mit 70 dB Schallpegel (gestrichelt) bzw. der Kombination aus Sinuston plus 100 Hz breites Rauschen bei 2,5 kHz mit 60 dB Pegel (durchgezogen).

tonen zurückzuführen ist. Das Mithörschwellen-Muster für Sinuston plus Schmalbandrauschen (durchgezogen) weist nicht nur ein zweites Maximum bei 2,5 kHz, der Mittenfrequenz des Rauschens auf, sondern darüber hinaus noch ein Maximum bei 1,5 kHz, welches von dem im Gehör entstehenden kubischen Differenzrauschen herrührt (vgl. Zwicker und Fastl 1973).

Beim Übergang von der Mithörschwelle (Dauer-Maskierer, 500 ms Testton) zur Simultanhörschwelle (500 ms Maskierer, 7 ms Testimpuls in der Mitte des Maskierers) bleibt die Form des Musters im wesentlichen erhalten. Wegen der kürzeren Testtondauer liegt die Schwelle jetzt allerdings bei etwa 10 dB höheren Pegeln  $L_T^*$  des Testtonimpulses. In Fig. 2 repräsentiert die dick durchgezogene Kurve das Simultanhörschwellen-Muster der Kombination aus Sinuston plus Schmalbandrauschen. Deutlich sind die Maxima bei 1,5 kHz, 2 kHz und 2,5 kHz zu erkennen. Die dünn gezeichneten Kurven in Fig. 2 repräsentieren Nachhörschwellen-Muster. Die strichpunktierte Kurve gilt für eine Verzögerungszeit von 7 ms, d.h. der

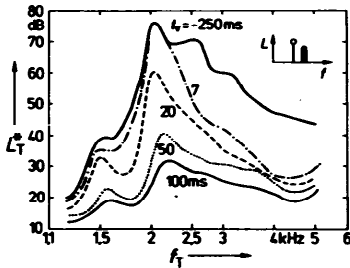


Fig. 2: Simultanhörschwellen-Muster (dick durchgezogen) und Nachhörschwellen-Muster der Kombination aus Sinuston plus Rauschen. Verzögerungszeit  $t_v$  als Parameter.

Beginn des Testtonimpulses schließt an das Ende des Maskiererimpulses direkt an. Während im Maximum und an der unteren Flanke des Musters kaum Änderungen auftreten, zeigt sich ein deutlicher Abfall der oberen Flanke des Musters beim Übergang von Simultan- zu Nachverdeckung. Mit zunehmender Verzögerungszeit (gestrichelt 20 ms, gepunktet 50 ms, durchgezogen 100 ms) sinkt das Nachhörschwellen-Muster ab; gleichzeitig verschiebt sich das Maximum nach höheren Frequenzen (vgl. Fastl 1977). Das Nebenmaximum bei 1,5 kHz, das vom kubischen Differenzrauschen herrührt, scheint mit wachsender Verzögerungszeit ähnlich abzufallen, wie dies von isoliert dargebotenen Schmalbandrauschen bekannt ist (Fastl 1977).

Um jedoch detailliertere Kenntnisse über die Nachverdeckung von kubischen Differenzrauschen im Vergleich zu Schmalbandrauschen zu erhalten, wurde durch drei verschiedene Maskiererkonfigurationen bei 1,5 Hz dieselbe Simultanhörschwelle erzeugt. Fig. 3 zeigt als durchgezogene Kurve das Simultanhörschwellen-Muster für einen 2 kHz-Ton mit 70 dB plus einem 100 Hz breiten Rauschen bei 2,5 kHz mit 60 dB. Die gepunktete Kurve repräsentiert das Simultanhörschwellen-Muster für ein 100 Hz breites Rauschen bei 1,5 kHz mit 28 dB Schallpegel. Die

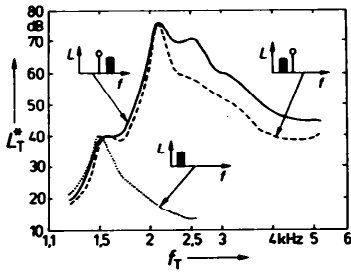


Fig. 3: Simultanhörschwellen-Muster eines 100 Hz breiten Rauschens bei 1,5 kHz mit 28dB Schallpegel (punktiert), der Kombination dieses Schmalbandrauschens mit einem Sinuston bei 2 kHz mit 70dB (gestrichelt) sowie der Kombination aus 2 kHz-Ton mit 70 dB plus 100 Hz breiten Rauschen bei 2,5 kHz mit 60 dB (durchgezogen).

gestrichelte Kurve stellt das Muster für die Kombination dieses Rauschens mit einem 2 kHz-Ton mit 70 dB Pegel dar. Diese dritte Konfiguration wurde gewählt, weil sie häufig zu "suppression" Anlaß gibt (Bechly und Fastl 1982, Fastl und Bechly 1983). Die in Fig. 3 gezeigten Ergebnisse machen deutlich, daß das Ziel - gleiche Simultanverdeckung bei 1,5 kHz - mit den gewählten Konfigurationen in guter Näherung erreicht wurde.

In Fig. 4 ist die Abhängigkeit der Nachhörschwelle  $L_T^*$  von der Verzögerungszeit  $t_V$  für die drei Konfigurationen dargestellt. Die Symbole bei  $t_V = -250$  ms illustrieren, daß nahezu dieselbe Simultanverdeckung erreicht wurde. Bei der Nachverdeckung (positives  $t_V$ ) liegen die Schwellen für das Schmalbandrauschen als Maskierer (mit durchgezogenen Linien verbundene Quadrate) durchweg über den Schwellen für die Kombination 2 kHz-Ton plus 2,5 kHz-Schmalbandrauschen als Maskierer (durch gestrichelte Linien verbundene Dreiecke). Die Schwellen für die Kombination 1,5 kHz-Schmalbandrauschen plus 2 kHz-Ton (Kreise) liegen für Verzögerungszeiten über 10 ms dicht bei den Werten für die Kombination 2 kHz-Ton plus 2,5 kHz - Schmalbandrauschen. Durch Hinzufügen eines 2 kHz-Tones zu einem Schmalbandrauschen bei 1,5 kHz wird dessen Nachhörschwelle um 2 bis 10 dB abgesenkt (vgl. Quadrate und Kreise). Dieser Effekt wird in der Literatur als "suppression" bezeichnet (Houtgast 1974). Das vom Gehör erzeugte kubische Differenzrauschen erleidet durch den benachbarten 2 kHz-Primarton offensichtlich nahezu die gleiche "suppression", wie ein von außen dem Gehör zugeführtes Schmalbandrauschen (vgl. Dreiecke mit Kreisen). Allerdings gilt dies gemäß Fig. 4 nur für Verzögerungszeiten von mindestens 20 ms. Bei kürzeren Verzögerungszeiten kommt ein Effekt ins Spiel, der in der Literatur häufig "cueing" genannt wird (Moore 1980). Dabei ist es für die Versuchsperson fast unmöglich zu entscheiden, ob ein Testimpuls am Ende des Maskierers ein separates Ereignis darstellt,

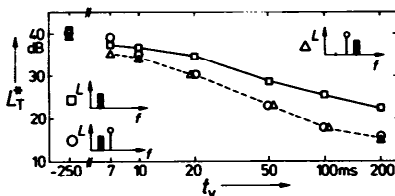


Fig. 4: Nachverdeckung, hervorgerufen von einem Schmalbandrauschen bei 1,5 kHz (Quadrate), von der Kombination aus Schmalbandrauschen plus 2 kHz-Ton (Kreise), sowie von der Kombination 2 kHz-Ton plus Schmalbandrauschen bei 2,5 kHz (Dreiecke). Reizdaten wie bei Fig.3 beschrieben.

oder lediglich eine Verlängerung des Maskierers repräsentiert (Zwicker und Feldtkeller 1967, S. 208, Fastl und Bechly 1981, Neff 1986). Durch Hinzufügen

weiterer Spektralkomponenten wird wegen des dann deutlicher in Erscheinung tretenden Klangfarbenunterschieds der Testtonimpuls leichter als separates Ereignis erkannt und die Nachhörschwelle liegt dann niedriger.

#### 4. Diskussion

Kubische Differenzrauschen erzeugen trotz gleicher Simultanverdeckung eine geringere Nachverdeckung als Schmalbandrauschen. Dieses Ergebnis scheint auf den ersten Blick im Widerspruch zu der Annahme zu stehen, daß kubische Differenzrauschen im Gehör praktisch genauso wirken, wie von außen zugeführte Schmalbandrauschen. Allerdings ist beim Vergleich der Nachverdeckung zu beachten, daß das kubische Differenzrauschen durch den benachbarten Primarton eine "suppression" erleidet. Die Größe der "suppression" stimmt mit derjenigen überein, die ein von außen zugeführtes Schmalbandrauschen durch einen benachbarten Sinuston erfährt. Dies bedeutet, daß sich ein im Gehör gebildetes kubisches Differenzrauschen nicht nur hinsichtlich der Nachverdeckung, sondern sogar auch hinsichtlich der "suppression" durch benachbarte Töne so verhält, wie ein den Gehör von außen zugeführtes Schmalbandrauschen.

#### Literatur

- Bechly, M. und Fastl, H. (1982) Interaktion der Nachhörschwellen-Tonheits-Zeitraster zweier maskierender Schalle. *Acustica* 50, 70-74.
- Fastl, H. (1977) Temporal masking effects: II. Critical band noise masker. *Acustica* 36, 317-331.
- Fastl, H. and Bechly, M. (1981) Post masking with two maskers: Effects of bandwidth. *J. Acoust. Soc. Am.* 69, 1753-1757
- Fastl, H. and Bechly, M. (1983) Suppression in simultaneous masking. *J. Acoust. Soc. Am.* 74, 754-757.
- Houtgast, T. (1974) Lateral suppression in hearing. Diss. Free University of Amsterdam.
- Moore, B.C.J. (1980) Detection cues in forward masking. In: *Psychophysical, Physiological and Behavioural Studies in Hearing* (van den Brink und Bilsen, eds.) Delft University Press, 222-229
- Neff, D. (1986) Confusion effects with sinusoidal and narrow band noise forward maskers. *J. Acoust. Soc. Am.* 79, 1519-1529.
- Zwicker, E. (1986) Suppression and  $(2f_1 - f_2)$ -difference tones in a nonlinear cochlear preprocessing model with active feedback. *J. Acoust. Soc. Am.* 80, 163-176.
- Zwicker, E. and Fastl, H. (1973) Cubic difference sounds measured by threshold- and compensation method. *Acustica* 29, 343-347.
- Zwicker, E. und Feldkeller, R. (1967) *Das Ohr als Nachrichtenempfänger* 2. erw. Auflage, Hirzel-Verlag, Stuttgart.