

# Mithörschwellen von frequenzmoduliertem Schmalbandrauschen

S. WARTINI

(Lehrstuhl für Elektroakustik der Technischen Universität München)

Die Messung der Mithörschwellen von Sinustönen, verdeckt durch stationäre Schmalband-Maskierer, führt für Sinustöne und frequenzgruppenbreites Schmalbandrauschen zu ähnlichen Meßergebnissen. Genaue Untersuchungen [3] zeigen jedoch gewisse Unterschiede, und zwar hinsichtlich Flankensteilheit und Breite der Mithörschwellen. Ausgehend von einer Veröffentlichung von Zwicker [2], die Mithörschwellen von frequenzmodulierten Sinustönen beschreibt, wurde eine Untersuchung mit frequenzmoduliertem Schmalbandrauschen als Maskierer durchgeführt.

## 1. Messungen

Das frequenzmodulierte Schmalbandrauschen (FM-SBR) wurde aus Weißem Rauschen erzeugt, indem der Durchlaßbereich eines variablen Bandpaßfilters [1] periodisch sinusförmig verschoben wurde. Seine mittlere Frequenz war  $f_m = 1.5$  kHz; die Bandbreite  $\Delta f_{SBR} = 140$  Hz (Fig. 1). Die Frequenzmodulation erfolgte mit einem Frequenzhub von 700 Hz bei Modulationsfrequenzen  $f_{mod}$  von 0.5 Hz, 2 Hz, 8 Hz, 32 Hz und 64 Hz. Die Bandbreite des SBR war so gewählt, daß sie kleiner war als die Frequenzgruppenbreite des Gehörs bei der mit 800 Hz niedrigsten Momentan-Mittelfrequenz. Als Testsignal wurde eine Folge gaußförmig geschalteter Sinustöne mit einer Anstiegszeit von 2 ms und einer Dauer von 5 ms verwendet. Bei der Modulationsfrequenz 0.5 Hz betrug die Folgefrequenz der Testtöne ebenfalls 0.5 Hz. Für die übrigen Modulationsfrequenzen war die Folgefrequenz unabhängig von der Modulationsfrequenz auf 2 Hz festgelegt. Bei niedrigen Modulationsfrequenzen trat ein Synchronisationseffekt zwischen der Testtonfolge und dem FM-SBR auf. Die Versuchsperson hatte den Eindruck, den Testton noch zu hören, obwohl sein Pegel bereits weit unter dem der Ruheshörschwelle lag. Deshalb wurde die Periodizität der Testtonfolge verändert, indem jeder dritte Testtonimpuls nicht dargeboten wurde. Die Frequenzen der Testtöne waren in Anlehnung an die früheren Messungen [2] auf 700 Hz, 900 Hz, 1.2 kHz, 1.45 kHz, 1.8 kHz, 2.1 kHz, 2.3 kHz und 3 kHz festgelegt. Die Testtöne wurden während der Modulationsperiode so dargeboten, daß die Testtonfrequenz möglichst nicht mit der Momentan-Mittelfrequenz des FM-SBR übereinstimmte (Fig. 1).

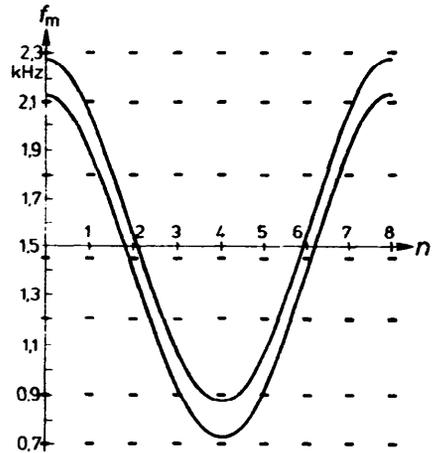


Fig. 1: Verlauf der Momentangrenzfrequenzen des SBR als Funktion der Zeit. Der Zeitpunkt  $t_n$  während der Modulationsperiode wird durch seinen Index  $n = \frac{8 \cdot i}{T}$  ( $T = \frac{1}{f_{mod}}$ ) bezeichnet. Die horizontalen Striche markieren Darbietungszeitpunkte und Frequenzen des Testtones (Die Testtonfrequenz 3 kHz ist nicht dargestellt.)

Der Maskierer wird während der Modulationsperiode  $T = \frac{1}{f_{mod}}$  zu neun Zeitpunkten  $t_n = \frac{n}{8} \cdot T$  ( $0 \leq n \leq 8$ ) bei jeder Testtonfrequenz abgetastet. Zum Zeitpunkt  $n = 0$  gehört dabei die höchste, zu  $n = 4$  die niedrigste und zu  $n = 8$  wieder die höchste Momentanfrequenz.

Die Meßapparatur entspricht weitgehend dem in [2] beschriebenen Aufbau. Lediglich der dort verwendete FM-Sinusgenerator wurde durch einen Rauschgenerator mit nachgeschalteten Bandpaß ersetzt, und der Versuchsablauf wurde mit einem Computer gesteuert.

Die Messungen wurden bei einem Gesamtpegel des FM-SBR von 70 dB nach der Methode des pendelnden Einregels mit dem Autor als Versuchsperson zweimal durchgeführt. Die Darbietung erfolgte monaural über Kopfhörer (Beyer DT48) in einer schallisolierten Kabine. In jeder Versuchssitzung wurden die Testtöne für eine Testtonfrequenz nacheinander zu den Zeitpunkten  $n = 0$  bis 7 dargeboten. Bei der Modulationsfrequenz 64 Hz wurden die Mithörschwellen nur zu den Zeitpunkten  $n = 0, 2, 4, 6$  und 8 gemessen. Im zweiten Versuchsdurchgang wurde die Reihenfolge der Zeitpunkte  $n$ , zu denen die Mithörschwellen während einer Sitzung gemessen wurden, umgekehrt ( $n = 7$  bis 0). Auf diese Weise sollten Lerneffekte und Fehler, die durch nachlassende Konzentration zum Ende einer Sitzung hin entstehen, vermieden werden.

## 2. Meßergebnisse

Fig. 2 zeigt die Mittelwerte der in den zwei Versuchsdurchgängen gemessenen Mithörschwellen, die in der Regel mit Abweichungen kleiner  $\pm 4$  dB reproduziert wurden.

Bei niedrigen Modulationsfrequenzen (0.5 Hz ( $\nabla$ ) und 2 Hz ( $\diamond$ )) liegen quasistationäre Bedingungen vor. Das Gehör kann der zeitlichen Änderung des Maskierers gut folgen. Die Mithörschwellen von niedrigen Testtonfrequenzen (700 Hz und 900 Hz) steigen an, wenn das Schmalbandrauschen mit seiner Momentanfrequenz spektral in die Nähe des Testtones kommt. Auffällig ist, daß die Absoluthörschwelle (HS, gestrichelt eingezeichnet) nie ganz erreicht wird. Für Testtonfrequenzen zwischen 1.2 kHz und 1.8 kHz weist die Mithörschwelle zwei Maxima auf. Die Momentanfrequenz des Maskierers wandert während einer Modulationsperiode zweimal an der Testtonfrequenz vorbei (siehe Fig. 1), wenn sie von ihrem höchsten auf ihren niedrigsten Wert absinkt ( $n = 0$  bis 4), und wenn sie wieder auf ihren Maximalwert ansteigt ( $n = 4$  bis 8). Für Testtonfrequenzen über 1.8 kHz steigt die Mithörschwelle erwartungsgemäß in den Zeitpunkten an, in denen die Momentanfrequenz ihren Maximalwert erreicht ( $n = 0$  und  $n = 8$ ). Mit den Testtonfrequenzen 2.3 kHz und 3 kHz wird die obere Flanke des Maskierers abgetastet.

Nach höheren Modulationsfrequenzen hin (8 Hz ( $\square$ ) und darüber ( $\times$ ,  $\circ$ )) zeigen die Mithörschwellen, daß das Gehör dem zeitlichen Verlauf der Anregung durch den Maskierer immer schlechter folgen kann. Die Mithörschwelle sinkt nicht mehr so weit ab wie bei niedrigen Modulationsfrequenzen und geht schließlich in einen beinahe pegelunabhängigen Verlauf über. In den Mithörschwellen bildet sich das Langzeitspektrum des FM-SBR ab und nicht mehr einzelne Kurzzeitspektren.

## 3. Diskussion

Frequenzmoduliertes Schmalbandrauschen ruft im großen und ganzen ähnliche Mithörschwellen hervor wie FM-Sinustöne. Es ergeben sich jedoch einige Unterschiede:

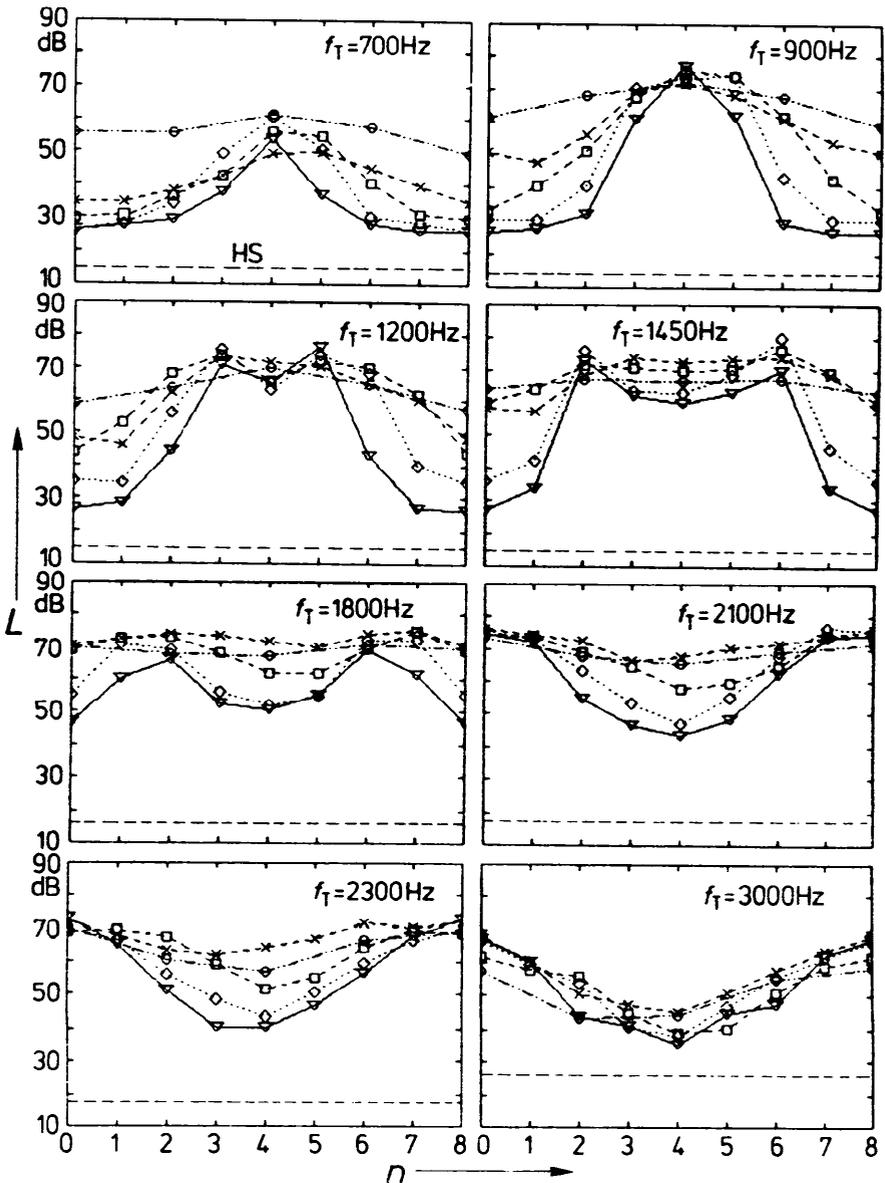


Fig. 2 : Mithörschwellen von frequenzmoduliertem Schmalbandrauschen mit einem Gesamtpegel von 70 dB. Aufgetragen ist der Pegel des Dauertones, aus dem die Testtonimpulse ausgeschnitten wurden über einer Modulationsperiode. Die Teilbilder zeigen die Mithörschwellen für die verschiedenen Testtonfrequenzen. Kurvenparameter ist die Modulationsfrequenz :  $\nabla$  = 0.5 Hz,  $\diamond$  = 2 Hz,  $\square$  = 8 Hz,  $\times$  = 32 Hz und  $\circ$  = 64 Hz. HS: Absoluthörschwelle, die sich aus der um das Grundrauschen des Versuchsaufbaus angehobenen Ruhehörschwelle ergibt.

Der Pegelhub, den die Mithörschwellen des FM-SBR während einer Modulationsperiode durchlaufen, ist bei niedrigen Modulationsfrequenzen größer als derjenige von Sinustönen [2]. Dieser Anstieg läßt sich durch die stärkere Drosselung der Testtöne durch das Schmalbandrauschen erklären. Die Testtonfrequenzen waren in [2] so gewählt, daß der Testton zum Zeitpunkt seiner Darbietung spektral neben der Momentanfrequenz des FM-Tones lag. Auch als der Sinuston durch das Schmalbandrauschen ersetzt wurde, war diese Bedingung mit zwei Ausnahmen (siehe Fig. 1) noch erfüllt. Der Frequenzabstand zwischen dem Testton und den Flanken des SBR wird jedoch geringer, was zur Folge hat, daß die Flanken des Erregungspegelverlaufs, den das SBR hervorruft, näher an den Testton rücken. Gleichzeitig wird die untere Flanke des SBR durch Differenztonprodukte [3] weiter nach tieferen Frequenzen verschoben. Da die Mithörschwelle des Maskierers sich in seiner Erregungspegelverteilung widerspiegelt ([4], S.110 ff), wird deutlich, daß durch die spektrale Verbreiterung des Maskierers bei unveränderter spektraler Lage von Testton und Maskierer der Pegel des eben wahrnehmbaren Testtones ansteigt.

Aus den Teilbildern in Fig. 2 geht hervor, daß die Mithörschwellen die gestrichelt eingezeichnete Absoluthörschwelle im Gegensatz zu den Messungen von Zwicker [2] niemals erreichen. Die Vermutung, daß diese Anhebung der Hörschwelle durch das Eigenrauschen des Versuchsaufbaus hervorgerufen wird, konnte nicht bestätigt werden, da die in Fig. 2 eingezeichneten Absoluthörschwellen die Anhebung der Ruhehörschwelle durch dieses Rauschen bereits berücksichtigen. Weitere Erklärungsansätze für diesen Effekt konnten nicht gefunden werden.

Auffällig ist der Verlauf der Mithörschwellen, den die Modulationsfrequenz 8 Hz hervorruft. Für Testtonfrequenzen um 1450 Hz ist der Pegelhub der Mithörschwellen im Vergleich zu den Mithörschwellen von frequenzmodulierten Sinustönen ungewöhnlich stark reduziert. Die Vermutung, daß es sich hier um einen Effekt handelt, der allein durch Nachverdeckung hervorgerufen wird, widerspricht bekannten Meßdaten ([4], S.207).

#### 4. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Untersuchung zur Bestimmung der Mithörschwellen von frequenzmoduliertem Schmalbandrauschen vorgestellt und ansatzweise mit Meßergebnissen aus einer früheren Arbeit [2], die Mithörschwellen von frequenzmodulierten Sinustönen beschreibt, verglichen. Die gefundenen Ergebnisse weisen prinzipiell denselben Verlauf auf wie die Mithörschwellen bei Verdeckung durch FM-Sinustöne. Jedoch zeigen sich einige Unterschiede, zu deren Erklärung es weiterer Untersuchungen bedarf.

#### Literatur

- [1] Schorer, E. Variabler Bandpaß mit großer Flankensteilheit. *Elektronik*, 1984, 13, 61-64.
- [2] Zwicker, E. Mithörschwellen und Erregungsmuster stark frequenzmodulierter Töne. *Acustica*, 1974, 31, 243-256.
- [3] Zwicker, E. und Bubel, G. Einfluß nichtlinearer Effekte auf die Frequenzselektivität des Gehörs. *Acustica*, 1977, 38, 67-71.
- [4] Zwicker, E. und Feldtkeller, R. *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*. S.Hirzel-Verlag, 2.Auflage, 1967.