

VERGLEICH VON MITHÖRSCHWELLENMUSTERN UND PULSATIONSSCHWELLENMUSTERN  
BEI FREQUENZGRUPPENRAUSCHEN UND SINUSTÖNEN

Hugo Fastl

Lehrstuhl für Elektroakustik, Technische Universität München

1. EINFÜHRUNG

Mithörschwellenmuster schmalbandiger maskierender Schalle stellen ein Maß für die Frequenzselektivität des Gehörs dar ([1], [2]). Bei maskierenden Sinustönen erschweren Schwebungen und Rauigkeiten die Schwellenbestimmung. Darüber hinaus werden bei Testtonfrequenzen oberhalb der Maskierfrequenz häufig Differenzöne hörbar. Die genannten Probleme werden umgangen, wenn Maskierer und Testton zeitlich versetzt dargeboten werden. Neben der Nachhörschwelle [3] bietet sich hier die Pulsationsschwelle [4] an. Bei der Pulsationsschwellenmethode ist von Vorteil, daß auch relativ ungeübte Versuchspersonen rasch reproduzierbare Daten liefern, ein gravierender Nachteil ist jedoch die große Abhängigkeit der Meßergebnisse von geringfügigen Veränderungen zeitlicher Reizparameter ([5], [6], [7]). Deshalb ist die Auswahl eines im Hinblick auf die Frequenzselektivität des Gehörs "richtigen" Pulsationsschwellenmusters weitgehend willkürlich. Um hier definierte Verhältnisse zu schaffen, wurde folgender Weg eingeschlagen: Als "adäquate" Reizkonfiguration für Pulsationsschwellenmessungen wird dasjenige Zeitraster betrachtet, bei dem sich das Mithörschwellenmuster und das Pulsationsschwellenmuster für Frequenzgruppenrauschen möglichst wenig unterscheiden. Die Wahl der Mithörschwellenmuster von Frequenzgruppenrauschen als "Bezugswert" erscheint gerechtfertigt, da über diese Muster international Einigkeit besteht. Mit dem für Frequenzgruppenrauschen "optimierten" Zeitraster werden dann Pulsationsschwellenmuster auch für Sinustöne ermittelt. Inwiefern diese Muster die Frequenzselektivität des Gehörs für Sinustöne widerspiegeln, läßt sich - insbesondere an den Flanken - durch Vergleich mit Mithörschwellenmustern maskierender Sinustöne abschätzen.

2. EXPERIMENTE

An den Messungen nahmen 6 normalhörende Versuchspersonen im Alter von 26 bis 29 Jahren teil. Die Schalle wurden in einer schallisolierten Meßkabine monaural über einen dynamischen Kopfhörer (Beyer DT48) dargeboten, dem ein Freifeldentzerrer ([1], S. 40) vorgeschaltet war. Als Meßmethode wurde Pendelndes Einregeln verwendet. Bei der Pulsationsschwellenmessung wurden die "Maskiererdauer"  $T_M = 100$  ms und die Testtondauer  $T_T = 100$  ms (jeweils 70% Werte) konstant gehalten. Die Dauer der Gaußförmigen Anstiegszeit war  $T_{RG} = 10, 20$  oder  $30$  ms, die Lückendauer zwischen "Maskierer" und Testton (70% Werte) wurde zu  $t_g = 0, 5, 10, 15, 20, 30$  oder  $45$  ms gewählt. Für die Bestimmung der Mithörschwelle wurde das Zeitraster im Prinzip beibehalten und lediglich der Maskierer als Dauerschall ( $T_M = \infty$ ) dargeboten. Folglich wurden die Mithörschwellen mit nur  $100$  ms langen Testtönen gemessen, die durch Pausen von nur  $100$  ms bis  $190$  ms Dauer getrennt waren. Für die oben aufgeführten Parameterkombinationen wurden sowohl Mithörschwellenmuster als auch Pulsationsschwellenmuster für Frequenzgruppenrauschen bei  $2$  kHz mit  $60$  dB Schallpegel von einer gut geübten Versuchsperson gemessen. Optimale Übereinstimmung der Muster ergab sich für die Parameter  $T_{RG} = 10$  ms und  $t_g = 5$  ms ( $f_p = 4,8$  Hz). Das entsprechende "adäquate" Zeitraster für die Pulsationsschwellenmessungen ist in Fig. 1 dargestellt. Mit diesem Zeitraster wurden sämtliche Messungen sowohl für Frequenzgruppenrauschen als auch für Sinustöne durchgeführt. Bei gleicher Frequenz von maskierendem Ton und Testton wurde die Phasenlage  $\phi = 90^\circ$  gewählt. Jede der sechs Versuchspersonen reproduzierte jeden Schwellenwert einmal; die Symbole in den Figuren repräsentieren demnach Zentralwerte aus jeweils  $12$  Schwellenwerten.

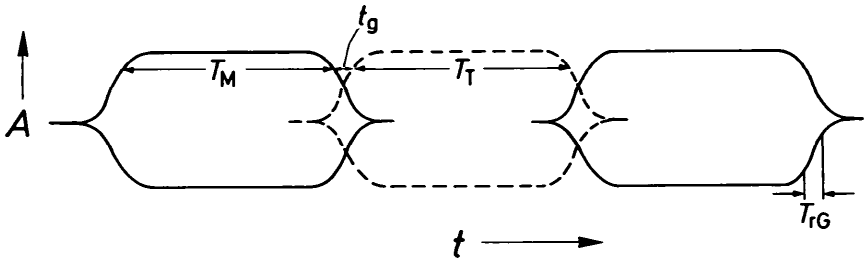


Fig. 1. Optimiertes Zeitraster für die Messung von Pulsationsschwellen. "Maskierer" durchgezogen, Testton gestrichelt.  $T_M = 100$  ms,  $T_T = 100$  ms,  $t_{rG} = 10$  ms,  $t_g = 5$  ms.

### 3. ERGEBNISSE

Fig. 2a zeigt im Vergleich ein Mithörschwellenmuster (durchgezogen) und ein Pulsationsschwellenmuster (gestrichelt) für ein Frequenzgruppenrauschen bei 13 Bark (2 kHz) mit 60 dB Schallpegel. Nachdem das Zeitraster für die Messung der Pulsationsschwelle (vgl. Fig. 1) dahingehend optimiert wurde, daß möglichst geringe Unterschiede zwischen Mithörschwelle und Pulsationsschwelle auftreten, ergeben sich erwartungsgemäß recht ähnliche Mithörschwellen- und Pulsationsschwellenmuster. Im Mittel unterscheiden sich die Zentralwerte nur um 1,4 dB; das Ziel größtmöglicher Ähnlichkeit beider Muster wurde also in guter Näherung erreicht. Obwohl die 100 ms langen Testtöne nur durch 110 ms lange Pausen getrennt waren, stimmt das Mithörschwellenmuster in Fig. 2a gut mit "klassischen" Mithörschwellenmustern maskierender Frequenzgruppenrauschen überein (vgl. [1], S. 61).

Gemäß Fig. 2b ergeben sich für einen maskierenden Sinuston deutliche Unterschiede zwischen Mithörschwellen- und Pulsationsschwellenmuster. Im Mittel beträgt die Differenz der Zentralwerte 9 dB, in Einzelfällen an der oberen Flanke jedoch 20 dB. Diese großen Unterschiede sind vor allem auf die Hörbarkeit von Differenztönen bei der Mithörschwellenmessung zurückzuführen. Für einen Testton bei 13 Bark ( $f_T = f_M$ ) kann die Mithörschwellenmessung als Bestimmung der Amplitudenmodulationsschwelle interpretiert werden. Allerdings wird die Amplitudenmodulation nicht bei der Tonheit des maskierenden Tones, sondern bei höheren Tonheiten detektiert ([1], S. 153). Folglich ist der Schwellenwert bei 13 Bark nicht repräsentativ für die Mithörschwelle sondern für die Amplitudenmodulationsschwelle. Das Pulsationsschwellenmuster in Fig. 2b weist eine erheblich steilere untere Flanke auf als das Mithörschwellenmuster. Dieses Verhalten ist im Einklang mit Literaturergebnissen; jedoch ist zu vermuten [7], daß die extrem steile untere Flanke des Pulsationsschwellenmusters auf der Detektion des Testtones bei Frequenzen unterhalb seiner Mittenfrequenz beruht ("off-frequency detection").

In Fig. 2c zeigt das Mithörschwellenmuster für Frequenzgruppenrauschen bei 13 Bark mit 80 dB Schallpegel an der oberen Flanke eine Einsattelung, die auf die Hörbarkeit von Differenzrauschen zurückzuführen ist; an der unteren Flanke liegt bei 11,5 Bark die Pulsationsschwelle deutlich (9 dB) unter der Mithörschwelle. Ansonstenergeben sich gemäß Fig. 2c nur geringe Unterschiede (< 5 dB) zwischen Mithörschwellen- und Pulsationsschwellenmustern.

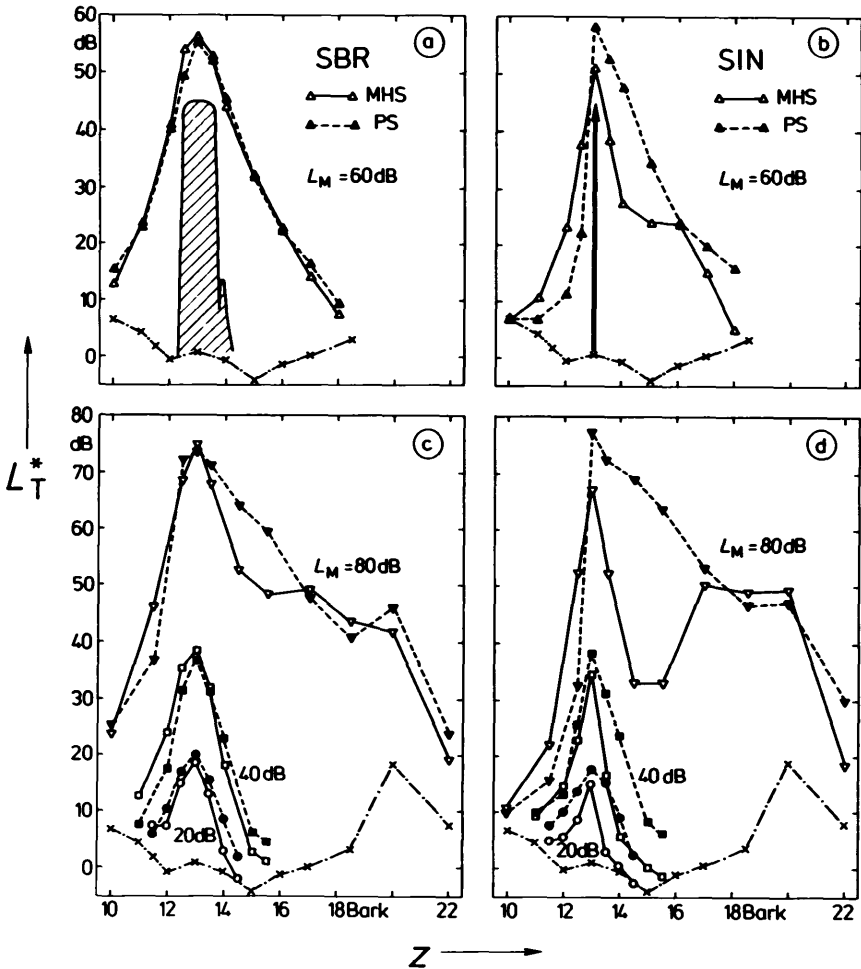


Fig. 2. Mithörschwellenmuster und Pulsationsschwellenmuster für Frequenzgruppenrauschen und Sinustöne bei 13 Bark. Mithörschwellenmuster durchgezogen, Pulsationsschwellenmuster gestrichelt, Ruheshchwelle strichpunktiert.

(a) Frequenzgruppenrauschen mit  $L_M = 60$  dB Schallpegel. Die Spektralverteilung des Rauschens wird durch die schraffierte Fläche angedeutet.

(b) Sinuston mit  $L_M = 60$  dB. Der Pfeil verdeutlicht die spektrale Lage des maskierenden Tones.

(c) Frequenzgruppenrauschen mit  $L_M = 80$  dB, 40 dB und 20 dB.

(d) Sinuston mit  $L_M = 80$  dB, 40 dB und 20 dB.

Fig. 2d ermöglicht den Vergleich der Mithörschwellenmuster und Pulsationsschwellenmuster maskierender Sinustöne. Bei 80 dB Schallpegel ergeben sich, wie schon anhand von Fig. 2b diskutiert, eine Einsattelung der oberen Flanke des Mithörschwellenmusters durch die Hörbarkeit von Differenztönen sowie eine steile untere Flanke des Pulsationsschwellenmusters, vermutlich durch "off-frequency detection". Bei allen drei Schallpegeln lassen sich die Maxima der Mithörschwellenmuster wiederum als Amplitudenmodulationsschwellen interpretieren. Für 40 dB Schallpegel des maskierenden Sinustones stimmen die unteren Flanken von Mithörschwellen- und Pulsationsschwellenmuster nahezu überein, die obere Flanke des Pulsationsschwellenmusters verläuft flacher. Bei 20 dB Schallpegel liegt das Pulsationsschwellenmuster durchwegs über dem Mithörschwellenmuster und zeigt eine geringere Frequenzselektivität. Die Asymmetrie des Mithörschwellenmusters bei kleinen Maskiererpegeln mit steiler oberer Flanke und flacherer unterer Flanke ist im Einklang mit Literaturdaten [8].

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Die Bestimmung der Mithörschwelle maskierender Sinustöne wird durch die Hörbarkeit von Schwebungen, Rauigkeiten und Differenztönen erschwert. Diese Probleme treten bei Anwendung einer nichtsimultanen Meßmethode wie der Pulsationsschwelle nicht auf. Für Frequenzgruppenrauschen bei 13 Bark mit 60 dB Schallpegel wurde das Zeitraster der Pulsationsschwellenmessung dahingehend optimiert, daß nurmehr minimale Unterschiede zwischen Mithörschwellen- und Pulsationsschwellenmuster auftreten. Das resultierende Zeitraster weist folgende Dauern auf: "Maskiererdauer"  $T_M = 100$  ms, Testtondauer  $T_T = 100$  ms, Gaußförmige Anstiegszeit  $T_{rG} = 10$  ms, Lückendauer zwischen "maskierendem" Impuls und Testimpuls  $t_g = 5$  ms. Bei Anwendung dieses Zeitrasters sind auch für Schallpegel des maskierenden Frequenzgruppenrauschens von  $L_M = 80$  dB, 40 dB, und 20 dB Mithörschwellen- und Pulsationsschwellenmuster recht ähnlich. Wird dasselbe Zeitraster auch bei maskierenden Sinustönen angewendet, so zeigen sich bei allen verwendeten Schallpegeln deutliche Unterschiede zwischen Mithörschwellen- und Pulsationsschwellenmuster. Im Bereich um die Maskierfrequenz sowie in Bereichen, in denen bei Mithörschwellenmessungen Differenztöne hörbar werden, war dies zu erwarten. Ein unerwartetes Ergebnis ist allerdings, daß auch in Bereichen, in denen die Mithörschwelle von Sinustönen ungestört gemessen werden kann, Mithörschwellenmuster und Pulsationsschwellenmuster signifikante Unterschiede aufweisen. Insofern kann bezweifelt werden, daß Pulsationsschwellenmuster - trotz "optimiertem" Zeitraster - die psychoakustische Erregung des Gehörs durch Sinustöne zutreffend widerspiegeln.

#### Literatur:

- [1] Zwicker, E. und Feldtkeller, R., Das Ohr als Nachrichtenempfänger, Hirzel, Stuttgart 1967.
- [2] Fastl, H., Dissertation TU München 1974.
- [3] Fastl, H., Acustica 43, 282 (1979).
- [4] Houtgast, T., Dissertation Soesterberg 1974.
- [5] Fastl, H., Percept. & Psychophys. 18, 95 (1975).
- [6] Schreiner, Ch., Dissertation Uni Göttingen 1977.
- [7] Verschuur, H., Dissertation Uni Rotterdam 1978.
- [8] Zwicker, E. und Jaroszewski, A., J. Acoust.Soc.Am. 1982, in press.

*Der Autor dankt Herrn Dipl.Ing. H. Schneider für tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Messungen. Herr Professor Dr.Ing.E.Zwicker hat durch fruchtbare Diskussionen wesentliche Beiträge zu den Untersuchungen geleistet. Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 50, Kybernetik, München gefördert.*