

PHASENGRENZFREQUENZ UND FREQUENZGRUPPENBREITE

Edwin Schorer

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

1. EINLEITUNG

Die Kenntnis der Analyse-Bandbreite des menschlichen Gehörs ist in der Psychoakustik von großer Bedeutung. Zur Bestimmung dieser Größe, die im deutschen Sprachgebrauch mit Frequenzgruppenbreite bezeichnet wird, sind in der Literatur zahlreiche Verfahren beschrieben worden. Die Diskrepanzen, die unter den Ergebnissen verschiedener Autoren herrschen, sind insbesondere bei Messungen im Frequenzbereich unter 1 kHz erheblich. Um in diesem Frequenzbereich Einflüsse der Meßmethode auf das Ergebnis zu ermitteln, wurde für eine Mittenfrequenz von 125 Hz die Frequenzgruppenbreite mit Hilfe dreier verschiedener Verfahren bestimmt. Im folgenden sollen die Messungen beschrieben und die Ergebnisse mit entsprechenden Resultaten aus der Literatur verglichen werden.

2. MESSMETHODEN

2.1 Schmalbandrauschen verdeckt durch Sinustöne

Ein einfaches Verdeckungs-Experiment zur direkten Bestimmung der Frequenzgruppenbreite wurde 1954 von Zwicker /1/ angegeben. Als Maskierer werden zwei Sinustöne gleichen Pegels gemeinsam dargeboten (Fig. 1). Als Testschall dient ein Schmalbandrauschen, dessen Bandbreite wesentlich kleiner als die Frequenzgruppenbreite gewählt wird. Die Mithörschwelle für dieses Schmalbandrauschen wird in Abhängigkeit vom Frequenzabstand  $\Delta f$  der Sinustöne gemessen, wobei die Mittenfrequenz  $f_m$  des Schmalbandrauschens festgehalten wird und die Frequenzen der Sinustöne stets symmetrisch zu  $f_m$  liegen. Die Mithörschwelle hat einen konstanten Wert, solange alle drei Komponenten in eine Frequenzgruppe fallen. Dies kann damit erklärt werden, daß das Gehör zur Bildung der Mithörschwelle alle Schallintensitäten innerhalb einer Frequenzgruppe zusammenfaßt. Überschreitet der Frequenzabstand  $\Delta f$  die Frequenzgruppenbreite, so sinkt die Mithörschwelle ab, da der Beitrag der Sinustöne zur Gesamtintensität innerhalb der Frequenzgruppe um  $f_m$  abnimmt. Fig. 1 zeigt das Meßergebnis für eine Mittenfrequenz von 125 Hz. Der Pegel der Sinustöne war je 65 dB, die Bandbreite des Schmalbandrauschens 30 Hz. Gezeigt sind die Zentralwerte von 8 Versuchspersonen; 50% aller Meßwerte liegen im schattierten Bereich. Die gemessene Mithörschwelle ist konstant für Frequenzabstände  $\Delta f$  kleiner 80 Hz und nimmt für größere  $\Delta f$  ab. Die Frequenzgruppenbreite kann entweder durch den Schnittpunkt zweier Näherungsgereaden (vgl./1/) oder durch den 3 dB-Abfall der Mithörschwelle definiert werden. Verwendet man letzteres Verfahren, so erhält man aus dieser Messung für die Frequenzgruppenbreite einen Zentralwert von 104 Hz mit Wahrscheinlichen Schwankungen von 85 Hz bzw. 128 Hz. Die

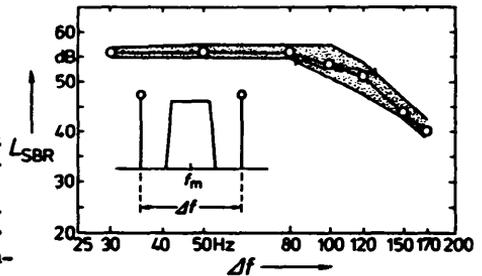


Fig. 1 Mithörschwelle  $L_{SBR}$  eines Schmalbandrauschens verdeckt durch zwei Sinustöne veränderlichen Frequenzabstandes  $\Delta f$  aber fester Mittenfrequenz  $f_m$ . Zentralwerte (Kreise) und 50%-Bereich (schattiert) von 8 Versuchspersonen. Bandbreite des Schmalbandrauschens  $\Delta f_{SBR} = 30$  Hz, Mittenfrequenz  $f_m = 125$  Hz, Schalldruckpegel der Sinustöne 65 dB/Ton. Die Frequenzgruppenbreite ist gegeben durch den 3 dB-Abfall der Mithörschwelle (ausgefülltes Quadrat).

Schalldarbietung erfolgte bei diesem Experiment mit einem freifeldentzerrten Kopfhörer (Beyer DT 48) in einer schallisolierten Meßkabinen, die Mithörschwellen wurden mit der Methode des pendelnden Einregelns bestimmt.

## 2.2 Ableitung der Frequenzgruppenbreite aus der signal detection theory

Die "signal detection theory", wie sie u.a. von Fletcher /2/ angegeben wird, geht von der Annahme aus, daß ein Nutzsignal innerhalb eines Störsignales vom Gehör dann eben wahrgenommen werden kann, wenn die Nutzsignalleistung gleich der Störsignalleistung ist. Ist das Störsignal breitbandiges Rauschen, dessen Leistungsdichte bekannt ist, so kann aus der Mithörschwelle eines Sinustones das zur Detektion mindestens notwendige Signal/Rauschverhältnis abgeleitet werden und aus der Rauschleistung wiederum die Bandbreite des Analysefilters bestimmt werden. (Die Analyse-Bandbreite, die sich auf diese Weise aus Fletcher's "critical ratio"-Annahme ergibt, ist mit der direkt gemessenen Frequenzgruppenbreite vergleichbar, aber nicht identisch (vgl./3/)). Nach dieser Methode erhielten Fidell et al. Überraschend kleine Werte für die Analyse-Bandbreite bei tiefen Frequenzen /4/. Für unsere Messungen bei 125 Hz haben wir die Versuchsbedingungen von Fidell et al. möglichst genau reproduziert. Die Messungen wurden im Reflexionsarmen Raum durchgeführt. Die Mithörschwelle des Sinustones ( $f_T=125$  Hz), der von Tiefpaßrauschen mit der Grenzfrequenz 2 kHz maskiert war, wurde mit Hilfe einer 2AFC-Methode bei 6 Versuchspersonen bestimmt. Der Versuchsperson wurden zwei Testintervalle dargeboten, von denen eines den Sinuston und den Maskierer enthält, das andere nur den Maskierer allein. Die Versuchsperson mußte entscheiden, in welchem Intervall der Sinuston enthalten

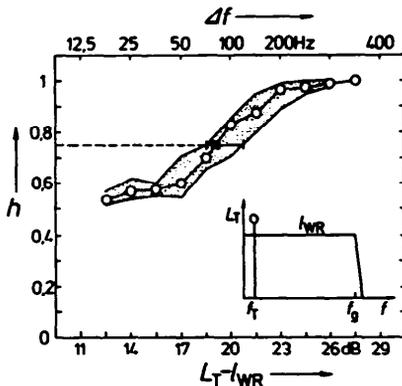


Fig. 2 Relative Häufigkeit  $h$  der korrekten Antworten in Abhängigkeit vom logarithmierten Signal/Rauschverhältnis  $L_T - L_{WR}$  bei der Detektion eines Sinustones ( $f_T = 125$  Hz) in einem Tiefpaßrauschen ( $L_{WR} = 40$  dB,  $f_g = 2$  kHz). Die Versuchspersonen mußten entscheiden, in welchem von zwei Testintervallen der Sinuston enthalten war (2AFC-Methode). Zentralwerte von 6 Versuchspersonen (Kreise) und 50%-Bereich (schattiert). Die Frequenzgruppenbreite (obere Skala) errechnet sich aus dem für  $h = 0,75$  notwendigen Signal/Rauschverhältnis (ausgefülltes Quadrat).

war. Danach folgte eine weitere Darbietung mit einem anderen Signal/Rauschverhältnis. 11 verschiedene Werte für das Signal/Rauschverhältnis wurden benutzt, jeder Wert wurde pro Versuchsperson 100mal dargeboten. Fig. 2 zeigt das Versuchsergebnis. An der Abszisse ist das logarithmierte Signal/Rauschverhältnis aufgetragen, an der zweiten Abszisse die entsprechende Filterbandbreite  $\Delta f$ . Die Ordinate trägt die Häufigkeit  $h$  der korrekten Antworten. Gezeigt sind die Zentralwerte von 6 Versuchspersonen und der 50%-Bereich (schattiert). Die Mithörschwelle ist durch eine Erkennungsleistung von 75% gegeben, die bei einem Signal/Rauschverhältnismaß von 18,9 dB eintritt. Dies entspricht einer Analyse-Bandbreite von 78 Hz mit den Wahrscheinlichen Schwankungen 68 Hz bzw. 118 Hz.

## 2.3 Ableitung der Frequenzgruppenbreite aus der Phasengrenzfrequenz

Experimente, die zur Hörbarkeit von Amplituden- und Frequenzmodulation bei Sinustönen von Zwicker 1952 gemacht wurden /5/, bestätigten u.a. die Vermu-

tung, daß das Gehör Phasenunterschiede zwischen solchen Schallkomponenten wahrnehmen kann, die innerhalb einer Frequenzgruppe liegen. Dies führt dazu, daß bei der Bestimmung der eben wahrnehmbaren Modulationstiefe bei Amplitudenmodulation und bei Frequenzmodulation verschiedene Werte gemessen werden, solange die Modulationsfrequenz eine bestimmte Größe nicht überschreitet.

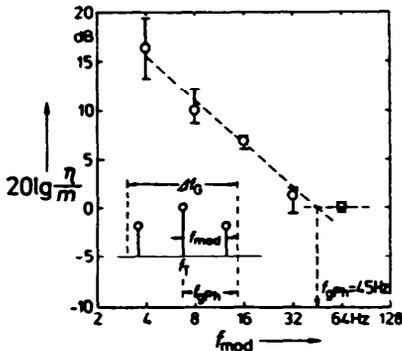


Fig. 3 Logarithmiertes Verhältnis von eben wahrnehmbarem Modulationsindex  $\eta$  bei Frequenzmodulation und eben wahrnehmbarem Modulationsgrad  $m$  bei Amplitudenmodulation eines Sinustones in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz  $f_{\text{mod}}$  ( $f_T = 125$  Hz,  $L_T = 80$  dB, sinusförmige Modulation). Zentralwerte und Wahrscheinliche Schwankungen von 8 Versuchspersonen (Symbole) und Näherungsgeraden (gestrichelt). Die Phasengrenzfrequenz  $f_{\text{gph}}$  ist die kleinstmögliche Modulationsfrequenz, für die sich gleiche Schwellen der Wahrnehmbarkeit von Frequenz- und Amplitudenmodulation ergeben. Die Frequenzgruppenbreite hat den doppelten Wert der Phasengrenzfrequenz  $f_{\text{gph}}$ .

Fig. 3 zeigt eingefügt das bei der Messung verwendete Amplitudenspektrum, das sowohl für amplituden- als auch für schwach frequenzmodulierte Töne bei sinusförmiger Modulation gültig ist. Der Unterschied zwischen den Modulationsarten besteht lediglich im Phasenspektrum: Bei der Amplitudenmodulation sind alle drei Spektralkomponenten in Phase, während bei Frequenzmodulation zwischen Träger und Seitenlinien eine Phasendifferenz von 90 Grad besteht. Bei einer Trägerfrequenz von 125 Hz wurden die Modulationsschwellen von 8 Versuchspersonen bei verschiedenen Modulationsfrequenzen gemessen. Fig. 3 zeigt die Meßergebnisse (Zentralwerte und Wahrscheinliche Schwankungen). An der Abszisse ist die Modulationsfrequenz aufgetragen, an der Ordinate das logarithmierte Verhältnis von eben wahrnehmbarem Modulationsindex  $\eta$  der FM und eben wahrnehmbarem Modulationsgrad  $m$  der AM. Mit wachsender Modulationsfrequenz nimmt der Unterschied zwischen den beiden Größen ab. Sobald die spektrale Breite des Testschalles die Frequenzgruppenbreite überschreitet, ergeben sich in den Modulationsschwellen für AM und FM keine Unterschiede mehr, weil die Seitenlinien in benachbarten Frequenzgruppen zu liegen kommen, und die Phasenbeziehung zwischen Träger und Seitenlinien über mehrere Frequenzgruppen hinweg vom Gehör nicht ausgewertet werden kann. Die kleinste Modulationsfrequenz, bei der gleiche Modulationsschwellen für Amplituden- und Frequenzmodulation auftreten, wird Phasengrenzfrequenz  $f_{\text{gph}}$  genannt; sie hat den halben Wert der Frequenzgruppenbreite  $\Delta f_G$ . Werden die Meßergebnisse durch zwei Geraden angenähert (Fig. 3, gestrichelt), so kann an deren Schnittpunkt die Phasengrenzfrequenz  $f_{\text{gph}} = 45$  Hz abgelesen werden. Daraus ergibt sich eine Frequenzgruppenbreite  $\Delta f_G$  von 90 Hz. Die Messungen wurden in einer schallisolierten Meßkabine mit einem freifeldentzerrten Kopfhörer (Beyer DT 48) gemacht.

### 3. Zusammenfassung

In Fig. 4 sind die Meßergebnisse in Abhängigkeit von der Meßmethode zusammenfassend dargestellt. Methode 1 ist die direkte Bestimmung der Frequenzgruppenbreite mittels Schmalbandrauschen und zwei Sinustönen. Unser Ergebnis stimmt gut mit dem überein, das von Zwicker 1954 mit zwei Versuchspersonen erzielt wurde (ausgefüllter Kreis). Das Ergebnis für die Bestimmung der

Analyse-Bandbreite aus der "signal detection theory" (Methode 2) ist sehr ähnlich dem, das von Hawkins und Stevens 1950 mit der Einregelmethode und nicht entzerrtem Kopfhörer erhalten wurde /6/ (Methode 3, ausgefülltes Dreieck), steht jedoch in krassem Mißverhältnis zu dem Ergebnis von Fidell et al. (ausgefülltes Quadrat), deren Versuchsanordnung für unsere Messungen so genau wie möglich reproduziert wurde. Fidell et al. geben bei 125 Hz Mittenfrequenz eine Analyse-Bandbreite von ca. 16 Hz an, während unsere Ergebnisse zwischen 68 Hz und 118 Hz liegen. Die Frequenzgruppenbreite, die aus der Bestimmung der Phasengrenzfrequenz resultiert, liegt ebenfalls in diesem Bereich, nämlich zwischen 64 Hz und 103 Hz (Methode 4,  $L_T=80$  dB) bzw. zwischen 60 Hz und 109 Hz (Methode 5,  $L_T=50$  dB). Alle unsere Meßergebnisse, die mit verschiedenen Methoden gewonnen wurden, zeigen also gute Übereinstimmung. Übereinstimmung herrscht mit einer Ausnahme auch mit den Veröffentlichungen der wenigen Autoren, die bei dieser tiefen Mittenfrequenz Messungen durchgeführt haben. Die Meßergebnisse stützen außerdem unsere Auffassung, daß die Frequenzgruppenbreite unterhalb von 500 Hz näherungsweise konstant ist und einen Wert zwischen 80 Hz und 100 Hz besitzt.

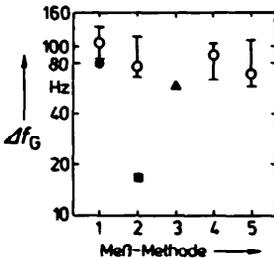


Fig. 4 Ergebnisse für die Frequenzgruppenbreite  $\Delta f_G$  in Abhängigkeit von der Meßmethode. Zentralwerte (Kreise) und Wahrscheinliche Schwankungen eigener Meßergebnisse im Vergleich mit Literaturangaben. Ausgefüllter Kreis: Zwicker, 1954; ausgefülltes Quadrat: Fidell et al., 1983; ausgefülltes Dreieck: Hawkins und Stevens, 1950. Meßmethoden: 1 Schmalbandrauschen verdeckt durch zwei Sinustöne; 2 "signal detection", 2AFC-Methode, Lautsprecherwiedergabe; 3 "signal detection", Einregel-Methode, Kopfhörerriedergabe; 4 über Bestimmung der Phasengrenzfrequenz  $f_{gp}$  bei  $L_T = 80$  dB; 5 wie 4, jedoch  $L_T = 50$  dB.

#### Literatur

- /1/ Zwicker, E., Die Verdeckung von Schmalbandgeräuschen durch Sinustöne. *Acustica, Akustische Beihefte* 1, 415-420, 1954
- /2/ Fletcher, H., Auditory patterns. *Rev. Mod. Physics* 12, 47-65, 1940
- /3/ Zwicker, E., Flottorp, G., and Stevens, S.S., Critical bandwidth in loudness summation. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 29, No. 5, 648-557, 1957
- /4/ Fidell, S., Horonjeff, R., Tefleteller, S., and Green, D.M., Effective masking bandwidth at low frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 73, No. 2, 628-638, 1983
- /5/ Zwicker, E., Die Grenzen der Hörbarkeit der Amplitudenmodulation und der Frequenzmodulation eines Tones. *Acustica, Akustische Beihefte* 3, 125-133, 1952
- /6/ Hawkins, J.E. and Stevens, S.S., The masking of pure tones and of speech by white noise. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 22, No. 1, 6-13, 1950