

FREQUENZ-DISKRIMINATION BEI SINUSTÖNEN UND BANDBEGRENZTEN RAUSCHEN

Edwin Schorer

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

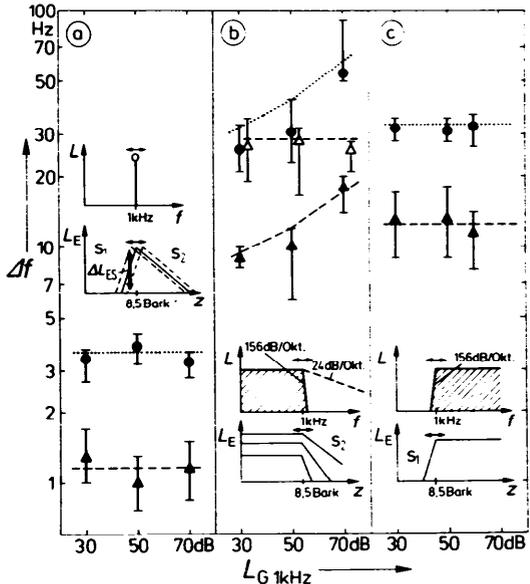
1. EINLEITUNG

Der eben wahrnehmbare Frequenz-Unterschied zweier durch eine Pause getrennter Töne (Frequenz-Unterschiedsschwelle) ist etwa dreimal kleiner als der mit frequenzmodulierten Sinustönen gefundene eben wahrnehmbare Gesamt-Frequenzhub (Frequenz-Modulationsschwelle), vgl. /1/. Zur Bestimmung entsprechender Wahrnehmbarkeitsschwellen bei breitbandigen Testschallen eignen sich Hoch- und Tiefpaßrauschen, da sie eine ausgeprägte Tonhöhenempfindung auslösen können /2/. In der vorliegenden Arbeit werden mit Sinustönen und bandbegrenzten Rauschen gemessene Frequenz-Modulations- sowie -Unterschiedsschwellen und ein daraus abgeleitetes Funktionsschema erläutert.

2. MESSERGEBNISSE

Mit Hilfe einer Abfragemethode, die sich bereits bei der gemeinsamen Bestimmung von Frequenz-Variationsschwellen und -Unterschiedsschwellen von Sinustönen bewährt hat /1/, wurden beide Schwellenarten von sechs Versuchspersonen für Sinustöne um 1 kHz sowie für Hoch- und Tiefpaßrauschen mit 1 kHz Grenzfrequenz gemessen. Die zeitlichen Parameter der Schalldarbietung (Tondauer $T_T=1100$ ms, Pausendauer $T_P=200$ ms) waren so gewählt, daß quasistationäre Verhältnisse vorausgesetzt und optimale Schwellenwerte erwartet werden konnten (Vgl. z.B. /3/,/4/). Die Modulationsfrequenz f_{mod} bei Frequenzmodulation betrug 4 Hz. Die Schalldruckpegel der Testschalle waren so eingestellt, daß sich Frequenzgruppenpegel um 1 kHz von 30, 50 und 70 dB (max. 60 dB bei HP-Rauschen) ergaben; Fig. 1 zeigt die Meßergebnisse als Zentralwerte mit Wahrscheinlichen Schwankungen (Symbole). Beim 1 kHz Sinuston (Fig. 1a) liegt die Frequenz-Modulations-

Fig.1 Meßergebnisse für Frequenz-Modulationsschwellen (Kreise) und Frequenz-Unterschiedsschwellen (Dreiecke) für a: Sinuston, b: steiles (geschlossene Symbole) und flaches (offene Dreiecke) Tiefpaßrauschen, c: steiles Hochpaßrauschen. Berechnete Modulationsschwellen (punktirt) und Unterschiedsschwellen (gestrichelt). Außerdem jeweils eingefügt: Spektrum der Testschalle und zugehöriges Erregungspegel-Tonheits-Muster.



schwelle (Kreise) im Mittel bei 3,6 Hz, die Frequenz-Unterschiedsschwelle (Dreiecke) bei 1,15 Hz. Für keine der beiden Schwellen ist eine Pegelabhängigkeit nachweisbar. Den Faktor drei zwischen Modulations- und Unterschiedsschwelle findet man auch bei Tieffpaßrauschen (Fig. 1b) und Hochpaßrauschen (Fig. 1c); die absoluten Schwellenwerte liegen jedoch um etwa einen Faktor zehn höher und beim Tieffpaßrauschen tritt zusätzlich eine Verschlechterung von Modulations- und Unterschiedsschwelle mit wachsendem Pegel auf. Verwendet man flaches (24 dB/Okt.) Tieffpaßrauschen - Fig. 1b zeigt hierfür die Frequenz-Unterschiedsschwelle (offene Symbole) -, so verschiebt sich die Schwelle nach noch größeren Werten und die Pegelabhängigkeit verschwindet, da die geringe Flankensteilheit des Rauschens die vom Gehör benutzte pegelabhängige Selektivität stets unterschreitet /5/.

3. FUNKTIONSSCHEMA FÜR FREQUENZÄNDERUNGEN

Frequenz-Modulationschwellen

Das zu einem Sinuston gehörige Erregungspegel-Tonheitsmuster kann schematisch als dreieckförmige Verteilung dargestellt werden (Einfügung in Fig. 1a). Eine Frequenzmodulation des Tones führt zu einer Hin- und Herverschiebung dieser Verteilung längs der Tonheitsachse. Das Funktionsschema für langsame Schalländerungen nach Zwicker (/6/,/5/) sieht entlang der z-Achse Detektoren vor, die nur Pegeländerungen registrieren können und bei Überschreitung eines bestimmten, konstanten Schwellenmaßes ΔI_{ES} ansprechen. Bei Frequenzmodulation wird dieses Schwellenmaß an der steilsten Flanke der Erregungspegelverteilung zuerst erreicht. Bei Sinustönen mit mehr als 50 dB Schalldruckpegel über der Schwelle ist dies die untere, bei kleineren Pegeln die obere Flanke /7/. Die bei den drei hier verwendeten Pegeln auftretenden Flankensteilheiten liegen im Mittel bei $S_1=27$ dB/Bark, was in einer Modulationsschwelle resultiert, die hier zu $\Delta f_M=3,6$ Hz bestimmt wurde. Weiterhin beträgt die Frequenzgruppenbreite Δf_G bei 1 kHz etwa 150 Hz, sodaß man das Schwellenmaß zu

$$\Delta I_{ES} = \frac{S_1 \cdot \Delta f_M}{\Delta f_G} = 0,6 \text{ dB} \quad \text{bestimmen kann.} \quad (1)$$

Das in Fig. 2 beschriebene Experiment rechtfertigt die Annahme, daß das Schwellenmaß nicht, wie ursprünglich angenommen /5/, konstant ist, sondern von der Zeit zwischen zwei Ansprechzeitpunkten der Detektoren abhängt. Fig. 2 zeigt den Verlauf der Wahrnehmbarkeitsschwelle für eine einzelne Frequenzvariation eines 1000 Hz-Tones, abhängig von der Zeitdauer zwischen deren Auftreten und dem Einschalten des Tones. Da nur Pegeländerungen detektiert werden können, müssen dieselben Detektoren beim Einschalten und bei der Frequenz-Variation ansprechen. Kurze Zeit nach dem Einschalten wird aber eine wesentlich höhere Schwelle gemessen als nach einer "Erholungszeit" von etwa 200 ms, was bei Annahme einer unveränderlichen Steilheit der unteren Flanke als variables Schwellenmaß interpretiert werden muß (Fig. 2, rechte Ordinate). Bringt man dieses in das Schwellen-Funktionsschema ein, lassen sich für bandbegrenzte Rauschen Modulationsschwellen berechnen (Fig. 1 b, c, punktiert), die mit den Meßergebnissen gut übereinstimmen. Im Gegensatz zum Sinuston ist die Amplitude von Rauschen nicht konstant, sondern statistischen Schwankungen unterworfen. In der Frequenzgruppe um 1 kHz, in der eine Tonhöhenempfindung bei den hier verwendeten Rauschen ausgelöst wird, ist im Mittel alle 10 ms mit einem Hüllkurvenmaximum zu rechnen /8/, sodaß man für die dort befindlichen Detektoren nicht die Ruheempfindlichkeit von 0,5 dB annehmen darf, sondern von einem Schwellenmaß von ca. 4 dB ausgehen muß (Fig. 2). Da bei Tieffpaßrauschen zur Frequenzdiskrimination außerdem nur die obere Flanke zur Verfügung steht, die sich mit wachsendem Pegel verflacht (Einfügung Fig. 1b), erhält man die beschriebene Pegelabhängigkeit der Modulationsschwelle. Bei Hochpaßrauschen beträgt die Flankensteilheit S_1 pegelunabhängig etwa 18 dB/Bark, was zu einer berechneten wie gemessenen Modulationsschwelle von 33 Hz führt.

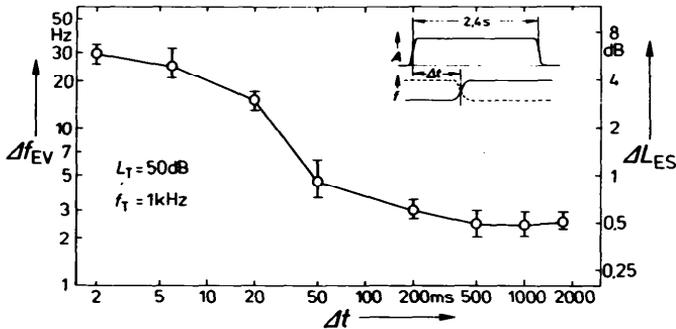


Fig. 2 Schwelle für die Wahrnehmbarkeit einer einzelnen Frequenzvariation eines sinusförmigen Testtones (linke Ordinate) in Abhängigkeit von der Verzögerungszeit zwischen deren Auftreten und dem Einschalten des Testtones. Rechte Ordinate: Schwellenmaß ΔL_{ES} , berechnet für 27 dB/Bark Steilheit der unteren Flanke des Erregungspegel-Tonheitsmusters.

Frequenz-Unterschiedsschwellen

Zur Beurteilung von Frequenz-Unterschieden ist die Einbeziehung eines Gedächtnisses unerlässlich, da die Tonhöhe des zuerst dargebotenen Schalles zum Vergleich mit dem nachfolgenden Schall gemerkt werden muß /1/. Man darf annehmen, daß dieser Speicher auf einer relativ hohen Verarbeitungsebene der Hörbahn angesiedelt ist und die Tonfrequenz im Speicher demzufolge in einer höher codierten Form vorliegt. Die gegenüber der Modulation um einen Faktor drei bessere Frequenzdiskrimination bei Schall-Unterschieden kann durch die Annahme eines Optimierungsprozesses (z.B. einer Interpolation zwischen Empfindungsorten) auf dieser höheren Verarbeitungsebene erklärt werden. Die Tonhöhe eines Schalles kann umso genauer definiert gespeichert werden, je deutlicher sie ausgeprägt ist. Da Sinustöne die am besten ausgeprägte Tonhöhe besitzen ($AT=1$, vgl./9/), liegt die entsprechende Frequenz-Unterschiedsschwelle niedriger als bei den bandbegrenzten Rauschen mit ihrer relativ schlecht ausgeprägten Tonhöhe. Die Modellvorstellung geht von der Annahme aus, daß die Frequenz-Unterschiedsschwelle $\Delta f_{U,X}$ eines beliebigen Schalles zum Kehrwert der Ausprägtheit der Tonhöhe AT_X dieses Schalles direkt proportional ist und ihr Absolutwert durch Vergleich mit der Frequenz-Unterschiedsschwelle des Sinustones derselben Frequenzlage errechnet werden kann:

$$\Delta f_{U,X} = \Delta f_{U,Sinus} \cdot \frac{1}{AT_X} \quad (2)$$

Für breitbandige Dauerschalle ($\Delta f > \Delta f_G$) kann die Ausprägtheit der Tonhöhe berechnet werden nach:

$$AT = C \cdot \frac{0,75 \cdot S_1 + S_2}{90} \quad (3)$$

Hierin sind S_1 und S_2 die Steilheiten der unteren und oberen Flanke des Erregungspegel-Tonheitsmusters in dB/Bark. Die pegelabhängige Steilheit S_2 wurde

nach /10/ berechnet zu:

$$S_2 = [24 + 0,23 \cdot (f/\text{kHz})^{-1} - 0,2 \cdot I_C/\text{dB}] \text{ dB/Bark} \quad (4)$$

Die Konstante C hat für Ausschnitte aus Weißem Rauschen den Wert 0,6. Gleichung (3) wurde anhand der in /9/ und /11/ benutzten breitbandigen Testschalle überprüft. Die errechnete Ausgeprägtheit der Tonhöhe liegt bei allen Schallen innerhalb der gemessenen Wahrscheinlichen Schwankungen. Für das hier verwendete Hoch- und Tiefpaßrauschen ergeben sich aus (3) die in Fig. 1 b und c gestrichelt eingezeichneten Abhängigkeiten.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Das Frequenz-Unterscheidungsvermögen des menschlichen Gehörs gegenüber gepulst dargebotenen Schallen ist etwa dreimal besser als bei frequenzmodulierten Schallen. Es wurde gezeigt, daß diese in der Literatur für Sinustöne bekannte Tatsache auch für Änderungen der Eckfrequenz bandbegrenzter Rauschen zutrifft. Während alle gemessenen Frequenz-Modulationsschwellen durch ein modifiziertes Schwellen-Funktionschema nach Zwicker erfaßt werden, kann die höhere Empfindlichkeit bei der Beurteilung von Schall-Unterschieden wegen der dort vorliegenden komplexeren Wahrnehmungsleistung über den Vergleich von Empfindungsgrößen erklärt werden. Es zeigt sich, daß der Kehrwert der Ausgeprägtheit der Tonhöhe mit der Größe der Frequenz-Unterschiedsschwelle stark korreliert und als Entscheidungsgröße für ein Funktionschema geeignet ist. Eine aus den Meßergebnissen abgeleitete und anhand von Literaturdaten bestätigte Berechnungsformel gestattet die Abschätzung der Ausgeprägtheit der Tonhöhe breitbandiger Schalle aus dem Erregungspegel-Tonheitsmuster und damit die Vorausberechnung entsprechender Frequenz-Unterschiedsschwellen.

Diese Arbeit wurde von der DFG im Rahmen des SFB 204 "Gehör" unterstützt.

Literatur

- /1/ Schorer, E., Methodische Einflüsse bei der Bestimmung von Frequenzvariations- und Frequenzunterschiedsschwellen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '87, DPG-Verlag, Bad Honnef, 577, 1987
- /2/ Fastl, H., Über Tonhöhenempfindungen bei Rauschen. *Acustica* 25, 350, 1971
- /3/ Harris, J. D., The decline of pitch discrimination with time. *J. Exptl. Psych.* 43, 93, 1952
- /4/ Moore, B. C. J., Temporal parameters in pitch perception. Ph. D. thesis, University of Cambridge, 1971
- /5/ Maiwald, D., Ein Funktionsschema des Gehörs zur Beschreibung der Erkennbarkeit kleiner Frequenz- und Amplitudenänderungen. *Acustica* 18, 81, 1967
- /6/ Zwicker, E., Die elementaren Grundlagen zur Bestimmung der Informationskapazität des Gehörs. *Acustica* 6, 365, 1956
- /7/ Zwicker, E. und Jaroszewski, A., Inverse frequency dependence of simultaneous tone-on-tone masking patterns at low levels. *J.A.S.A.* 71, 1508, 1982
- /8/ Rice, S. O., Mathematical analysis of random noise. In: *Noise and Stochastic Processes*, Ed. N. Wax, Dover Publications, New York, 1954
- /9/ Fastl, H. und Stoll, G., Scaling of pitch strength. *Hearing Research* 1, 293, 1979
- /10/ Terhardt, E., Calculating virtual pitch. *Hearing Research* 1, 155, 1979
- /11/ Fastl, H., Pitch strength and masking patterns of low-pass noise. In: *Psychophysical, Psychological and Behavioral Studies in Hearing*. Ed. van den Brink and Bilsen, Delft UP, Delft, 1980