

METHODISCHE EINFLÜSSE BEI DER BESTIMMUNG VON FREQUENZVARIATIONS- UND FREQUENZUNTERSCHIEDS-SCHWELLEN

Edwin Schorer

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

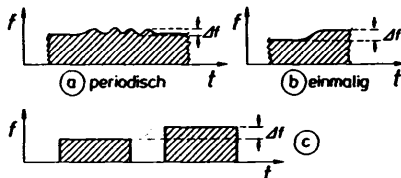
1. EINLEITUNG

Die kleinste eben wahrnehmbare Frequenz- oder Tonhöhenstufe ist eine stark mitbestimmende Größe für jede Art von Modell oder Theorie des Hörens. In der Vergangenheit wurden zwei unterschiedliche Versuchsstrategien zur Bestimmung der eben wahrnehmbaren Frequenzstufe bzw. einer eben wahrnehmbaren Frequenzdifferenz angewendet. Die klassische Methode verwendet frequenzmodulierte Töne, deren eben wahrnehmbarer Modulationshub durch Einstellen oder pendelndes Einregeln ermittelt wird (vgl. /1/ und /2/). Die andere Möglichkeit zur Bestimmung einer kleinsten wahrnehmbaren Frequenzdifferenz besteht in der Anwendung von gepulsten Tönen. Hierbei werden zwei Reintöne unterschiedlicher Frequenz dargeboten, die zeitlich durch eine Pause voneinander getrennt sind. Die Schwelle der wahrnehmbaren Frequenzdifferenz kann durch Anwendung von Einregelmethoden (vgl. /4/, /7/) oder Abfragemethoden ermittelt werden (vgl. z.B. /3/, /4/). Die beiden Arten der Reizdarbietung - also Darbietung eines frequenzmodulierten Tones einerseits oder Darbietung durch Pausen getrennter Reintöne andererseits - führen zu unterschiedlichen Ergebnissen, wobei man mit dem Modulationsverfahren stets deutlich größere Schwellen erhält als mit gepulsten Tönen (vgl. z.B. /3/, /5/, /6/, /7/). Die vorliegende Untersuchung geht davon aus, daß - bedingt durch die stark unterschiedlichen Wahrnehmungsleistungen, die die beiden Darbietungsarten der Versuchsperson abverlangen - nicht ein- und dieselbe eben wahrnehmbare Änderung, sondern zwei verschiedene Größen gemessen werden, die als Variations- bzw. Unterschiedsschwelle bezeichnet werden.

2. BEGRIFFSBESTIMMUNG

Schall-Variationen und Schall-Unterschiede können für beliebige Schalleigenschaften definiert werden, wobei als wichtigste die Intensität und die Frequenz zu nennen sind. Da diese Arbeit sich ausschließlich mit Frequenz-Änderungen befaßt, soll anhand der Beispiele Frequenz-Variation und Frequenz-Unterschied eine Begriffsbestimmung vorgenommen werden. Fig. 1a und 1b zeigen zwei einfache Fälle von Frequenz-Variationen, nämlich eine sinusförmige Frequenz-Modulation (a) bzw. eine Frequenz-Einzelvariation (b). In jedem Fall erfolgt die Frequenz-Variation während der Schalldarbietung. Im Gegensatz hierzu steht die in Fig. 1c skizzierte Darbietung eines Frequenz-Unterschiedes. Ein Reintone fester Frequenz wird für eine bestimmte Zeit dargeboten und dann abgeschaltet. In der anschließenden Darbietungspause wird die Frequenz verändert, um den Ton mit veränderter Frequenz erneut darzubieten. Die Versuchsperson (Vp) wird also mit der Tonhöhe vor und nach einer Variation konfrontiert; die Frequenz-Änderung selbst ist nicht Teil der Darbietung. Soll die Wahrnehmbarkeitsschwelle für die beschriebenen Frequenz-Änderungen gemessen werden, so muß die Vp im Falle von Frequenz-Variationen (Fig. 1a, 1b) darauf achten, ob sich während der Tondarbietung die Tonhöhe wahrnehmbar ändert oder nicht. Sehr viel umfangreicher ist

Fig. 1 Beispiele für Schalländerungen: a: periodische Frequenz-Variation (Frequenz-Modulation), b: einmalige Frequenz-Variation, c: Frequenz-Unterschied. Darbietungsphasen schraffiert.



dagegen die Aufgabe der Vp bei der Beurteilung eines Frequenz-Unterschiedes (Fig. 1c): Während des ersten Darbietungsintervalles muß sie sich die Tonhöhe des Tones einprägen und diesen Tonhöheindruck über die folgende Darbietungspause hinweg "merken". Im anschließenden zweiten Darbietungsintervall muß sie die jetzt wahrgenommene Tonhöhe mit der "gemerkten" Tonhöhe vergleichen und das geforderte Urteil (gleich/verschieden, 2. Ton höher/tiefer o.ä.) bilden. Im Gegensatz zur Beurteilung von Schall-Variationen ist bei der Beurteilung von Schall-Unterschieden also die Einbeziehung eines Gedächtnisses notwendig, um den Vergleich eines früheren Zustandes mit einem aktuellen Zustand durchführen zu können.

In der englischsprachigen Literatur werden die Begriffe "difference limen" (DL) und "just noticeable difference" (JND) synonym sowohl zur Bezeichnung von Modulations-(also Variations-)schwellen als auch von Unterschiedsschwellen benutzt. Auf die Notwendigkeit eindeutiger Bezeichnungen hat Zwicker in einem Kommentar zu /6/ hingewiesen. Hierzu schlug Moore vor, den Begriff "just noticeable difference" nur für Unterschiedsschwellen zu verwenden und Variations-schwellen mit "just noticeable variation" (JNV) zu übersetzen /6/.

3. MESSMETHODEN UND ERGEBNISSE

Die Wahrnehmbarkeitsschwellen für die drei in Fig. 1 gezeigten Frequenzänderungen wurden mit Hilfe einer nicht-adaptiven 2I-2AFC-Methode mit Feedback bei einer Trägerfrequenz um 1000 Hz bestimmt. Um einen Vergleich mit den klassischen Daten zur FM-Schwelle zu ermöglichen, wurde die Modulationsschwelle zusätzlich mit der Methode "pendelndes Einregeln" ermittelt. Die Schalldarbietung erfolgte monaural über einen freifeld-entzerrten Kopfhörer BEYER DT 48 in einer schallisolierten Kabine bei drei verschiedenen Schalldruckpegeln (30, 50 und 70 dB SPL). Sechs normalhörende männliche Versuchspersonen im Alter zwischen 27 und 33 Jahren nahmen an den Versuchen teil. Fig. 2 zeigt schematisch den zeitlichen Ablauf der verschiedenen Messungen. Zur periodischen Frequenzvariation (FM, Fig. 2a, b) wurde eine Rechteckschwingung der Frequenz $f_{mod} = 4\text{ Hz}$ verwendet, deren Anstiegs- und Abfallzeit durch ein Gaußfilter auf 20ms begrenzt war.

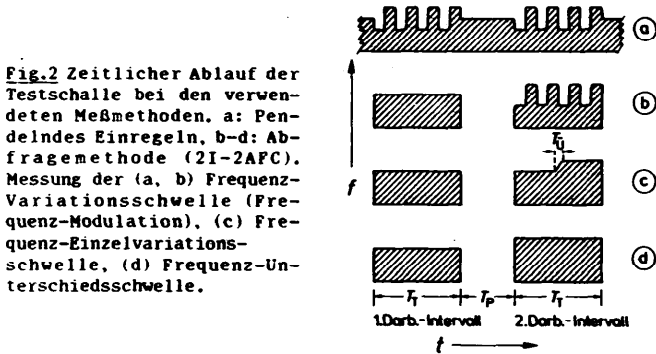


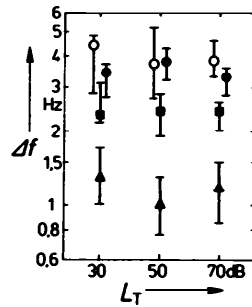
Fig. 2 Zeitlicher Ablauf der Testschalle bei den verwendeten Meßmethoden. a: Pendelndes Einregeln, b-d: Abfragemethode (2I-2AFC). Messung der (a, b) Frequenz-Variationsschwelle (Frequenz-Modulation), (c) Frequenz-Einzelvariationsschwelle, (d) Frequenz-Unterschiedsschwelle.

Beim pendelnden Einregeln (Fig. 2a) erfolgte die Schalldarbietung kontinuierlich; jedoch wurde die Modulationsspannung mit einem Puls/Pausenverhältnis von 1100ms/500ms über einen Gaußmodulator ($t_{an}, t_{ab} = 20\text{ms}$) getaktet, um Adaptions-effekte zu vermeiden. Pro Vp und Pegel wurden 8 Messungen vorgenommen. Die Modulationsspannung (Fig. 2a, b) hatte beim Einschalten stets die gleiche Phasenlage. Bei der Abfragemethode (Fig. 2b - d) war die Darbietungszeit $T_D = 1100\text{ms}$, die Pausenzeit $T_P = 500\text{ms}$ (Fig. 2b), 1000ms (Fig. 2c) bzw. 80ms (Fig. 2d); die Schalle wurden weich ein- und ausgeschaltet ($t_{an}, t_{ab} = 20\text{ms}$). Die Einzelvariation (Fig. 2c) erfolgte mit einer Übergangszeit $T_{ij} = 50\text{ms}$, wobei positive und negative Variationen möglich waren. Nach einer Trainingsphase wur-

den in jeweils 2 Sitzungen 350 Abfragen in 7 Blöcken à 50 durchgeführt. Die Präsentation der jeweiligen Schalländerung erfolgte in zufälliger Sequenz in 1. oder 2. Darbietungs-Intervall. Durch Tastendruck mußte die V_p angegeben, in welchem Intervall der modulierte Ton (Fig. 2b), der Ton mit einmaliger Tonhöhenvariation (Fig. 2c) bzw. der höhere Ton (Fig. 2d) gehört wurde. Die Wahrnehmbarkeitsschwelle wurde bei 75% der psychometrischen Funktion bestimmt.

Fig. 3 zeigt Zentralwerte und Wahrscheinliche Schwankungen der Meßergebnisse. Die Schwelle der Wahrnehmbarkeit periodischer Frequenzvariationen ergibt sich zu $\Delta f = 4$ Hz (pendelndes Einregeln, offene Kreise) bzw. $\Delta f = 3,6$ Hz (Abfragemethode, Punkte). Obwohl die Abfragemethode hier ein geringfügig besseres Ergebnis liefert, darf man angesichts der sich stark überlappenden Wahrscheinlichen Schwankungen davon ausgehen, daß zur Bestimmung von FM-Schwellen beide Meßmethoden gleichermaßen geeignet sind und gleiche Ergebnisse liefern. Ein Vergleich mit klassischen Daten (Shower und Biddulph: 3,6 Hz, Zwicker: 3 Hz) zeigt gute Übereinstimmung. Die Empfindlichkeit gegenüber einmaligen Frequenzvariationen (Fig. 3, Quadrate) ist etwas größer als die für periodische Variationen. Die Zentralwerte liegen bei allen Pegeln bei ca. 2,4 Hz.

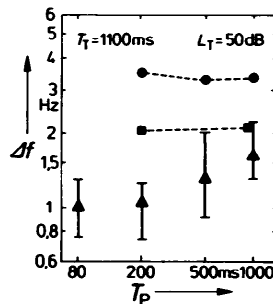
Fig. 3 Wahrnehmbarkeitsschwellen periodischer Frequenz-Variationen (Kreise), einmaliger Frequenz-Variationen (Quadrate) und von Frequenz-Unterschieden (Dreiecke). Meßmethoden: Pendelndes Einregeln (offene Symbole) und Abfragemethode (gefüllte Symbole). Sinustöne, 1 kHz.



Die Frequenz-Unterschiedsschwelle (Fig. 3, Dreiecke) liegt im Mittel bei 1,15 Hz und ist damit um einen Faktor 3 kleiner als die Frequenz-Modulationsschwelle. Im Bereich der Wahrscheinlichen Schwankungen treten keinerlei Überlappungen mit den oben beschriebenen Schwellen auf. Dieser sehr deutliche Unterschied zwischen Variations- und Unterschiedsschwelle kann nur mit der Verschiedenartigkeit der Wahrnehmungsleistungen (s.o.) erklärt werden.

Da für die Pausendauer T_p die Tonhöhe von der V_p gespeichert werden muß, gibt es eine Abhängigkeit der Frequenz-Unterschiedsschwelle von der Länge der Pause. Während Harris (5) eine Verschlechterung der Frequenz-Unterschiedsschwelle für Pausendauern größer 1s beobachtete, stimmt unser Meßergebnis (Fig. 4) besser mit dem von König (9) überein, der einen Anstieg ab ca. 300ms Pausen-

Fig. 4 Einfluß der Pausendauer T_p auf die Frequenz-Unterschiedsschwelle (Dreiecke, 5 Vpn.). Gestrichelt zum Vergleich: Einfluß der Pausendauer auf die Frequenz-Variationsschwellen, periodische (Kreise) und einmalige (Quadrate) Variation; Mittelwerte von 2 Vpn.



dauer angibt. Man kann davon ausgehen, daß aufgrund der Trainierbarkeit von Gedächtnisleistungen der Einfluß der Pausendauer individuell stark streut.

Anders als bei der Messung der Frequenz-Unterschiedsschwelle ist bei Frequenz-Variationsschwellen eine Abhängigkeit von der Pausendauer nicht zu erwarten, da wir annehmen, daß das Gedächtnis hier an der Schwellenbildung nicht in gleichem Maße wie bei der Beurteilung von Frequenz-Unterschieden beteiligt ist. Mit Hilfe zweier Vpn wurde diese Annahme überprüft. Für Pausendauern bis $T_p = 1s$ ist keine Abhängigkeit der Variationsschwellen feststellbar (Fig. 4).

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die Tatsache, daß die Beurteilung des Tonhöhen-Unterschiedes zweier durch eine Pause getrennter Töne für eine Vp eine grundsätzlich andere Aufgabe darstellt als die Erkennung kontinuierlicher Frequenz-Variationen, führt zur Definition zweier verschiedener Größen, der Frequenz-Variationsschwelle und der Frequenz-Unterschiedsschwelle. Sowohl Frequenz-Variationsschwellen für einmalige und periodische Variationen als auch Frequenz-Unterschiedsschwellen wurden für Sinustöne bei 1kHz mit einer Abfragemethode bestimmt. Während Einzelvariationen der Frequenz eine geringfügig niedrigere Wahrnehmbarkeitsschwelle haben als periodische Frequenz-Variationen, hebt sich die Frequenz-Unterschiedsschwelle mit einem Drittel des Wertes der Modulationsschwelle sehr deutlich ab, was den grundsätzlich verschiedenen Charakter von Variations- und Unterschiedsschwellen unterstreicht. Eine Pegelabhängigkeit wurde bei keiner der genannten Schwellen beobachtet. Der deutliche Kontrast zwischen Frequenz-Variationsschwelle und Frequenz-Unterschiedsschwelle ergibt sich bei Anwendung einer Einregel-methode (17) in gleicher Weise wie bei der in dieser Arbeit benutzten Abfragemethode. Diese Tatsache offenbart, daß die Schwelle einer Frequenz-Änderung - unabhängig davon, ob in einem Einregel- oder Abfrageexperiment - in erster Linie von der Art der verwendeten Testschalle abhängt. Die Resultate machen weiterhin klar, daß ein Funktionsmodell (10), dessen Gültigkeit für langsame Schallvariationen oft gezeigt wurde, nicht ohne weiteres gleichzeitig auch für Schallunterschiede gültig sein kann (vgl./6. und "comment").

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

Literatur

- /1/ Shower, E.G. and Biddulph, R., Differential pitch sensitivity of the ear. J.Acoust.Soc.Am. 3, 275-287, 1931
- /2/ Zwicker, E., Die Grenzen der Hörbarkeit der Amplitudenmodulation und der Frequenzmodulation eines Tones. Acustica AB 3, 125-133, 1952
- /3/ Harris, J.D., Pitch discrimination. J.Acoust.Soc.Am. 24, 750-755, 1952
- /4/ Fastl, H. and Hesse, A., Frequency discrimination for pure tones at short durations. Acustica 56, 41-47, 1954
- /5/ Stevens, S.S., Pitch discrimination, mels, and Kock's contention. J.Acoust.Soc.Am. 26, 1075-1077, 1954
- /6/ Moore, B.C.J. and Glasberg, B.R., The relationship between frequency selectivity and frequency discrimination for subjects with unilateral and bilateral cochlear impairments. In: (Moore and Patterson eds.) Auditory Frequency Selectivity. Plenum Press, New York, London, 311-322, 1986
- /7/ Fastl, H., Frequency discrimination for pulsed versus modulated tones. J.Acoust.Soc.Am. 63, 275-277, 1978
- /8/ Harris, J.D., The decline of pitch discrimination with time. J.Exptl.Psych. 43, 93-99, 1952
- /9/ König, E., Effect of time on pitch discrimination thresholds under several psychophysical procedures. J.Acoust.Soc.Am. 29, 606-612, 1957
- /10/ Maiwald, D., Ein Funktionsschema des Gehörs zur Beschreibung der Erkennbarkeit kleiner Frequenz- und Amplitudenänderungen. Acustica 18, 81-92, 1967