

Zusammenhänge zwischen interauralen Tonhöhendifferenzen und Oktavabweichungen bei Sinustönen

E. TERHARDT (Fachgebiet Akustische Kommunikation, T.U. München)

1. Einleitung

Die interaurale Tonhöhendifferenz ITD ("Binaurale Diplakusis") wird durch alternierende Darbietung je eines Sinustones auf den beiden Ohren und Abgleich einer der beiden Frequenzen auf gleiche Tonhöhe gemessen. Sie wird durch

$$d_{LR} = -d_{RL} = (f_R - f_L)/f_L \quad (1)$$

ausgedrückt, wobei f_R und f_L die Frequenzen der rechts bzw. links dargebotenen Sinustöne nach dem Abgleich sind. $d_{LR} > 0$ bedeutet, daß ein- und derselbe Sinuston, auf beiden Ohren zugleich dargeboten, links eine höhere Tonhöhe hervorruft als rechts.

Die Oktavabweichung OA wird durch alternierende Darbietung zweier Sinustöne und Abgleich einer der beiden Frequenzen auf optimale Oktavverwandtschaft gemessen. Sie wird durch

$$\Omega = f_2/(2f_1) - 1 \quad (2)$$

ausgedrückt, wobei f_1 und f_2 die Tonfrequenzen nach dem Abgleich sind.

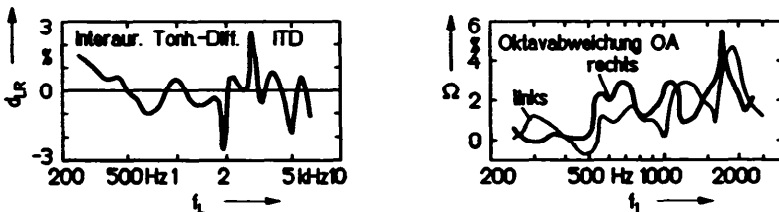


Fig.1 (links). Beispiel für die ITD einer normalhörenden Person; nach van den Brink (1975).

Fig.2 (rechts). Beispiel für die monauralen OA einer Person; nach Ward (1954).

Fig.1 und 2 zeigen je ein Beispiel der ITD und der OA bei normalhörenden Personen. Die ITD schwankt als Funktion der Frequenz unregelmäßig um den Wert Null. Der Verlauf ist individuell verschieden und für ein- und dieselbe Person langzeitlich stabil (van den Brink, 1975). Die OA zeigt erstens eine Tendenz zur "Spreizung" (d.h., sie verläuft im Mittel bei $\Omega > 0$) und zweitens Schwankungen, welche hinsichtlich ihrer Amplitude und Häufigkeit pro Frequenzintervall denen der ITD ähneln. Jene Schwankungen der OA treten besonders beim monauralen Oktavabgleich auf; beim binauralen (diotischen) Abgleich sind sie gering. Es wird seit längerem vermutet, daß die beschriebenen Schwankungen auf ein- und dieselbe Ursache zurückzuführen sind, nämlich auf entsprechende, physiologisch bedingte Schwankungen der "Frequenz-Tonhöhe-Charakteristiken" FTC der beiden Ohren (van den Brink, 1975, 1977). Als Beitrag zur Klärung dieser Zusammenhänge wurden die im folgenden beschriebenen Untersuchungen durchgeführt.

2. Theoretische Ansätze

Die FTC des rechten bzw. linken Ohres sei durch den Ansatz

$$H_{R,L}/pu = f_{R,L}[1 + v_{0R,L}(f_{R,L})]/Hz, \quad (3)$$

beschrieben. Darin bedeuten f die Frequenz, H die Tonhöhe (in "pitch units" pu) und $v_{0R,L}$ die als Funktion der Frequenz unregelmäßig um den Wert null pendelnden Abweichungen der FTC des rechten bzw. linken Ohres. Es wird angenommen, daß ihr Verlauf von physiologischen Unregelmäßigkeiten bestimmt wird, langzeitlich konstant und für jedes Ohr und jede Person verschieden ist.

Die ITD kann mit diesem Ansatz auf jene Abweichungen zurückgeführt werden, indem man $H_R = H_L$ setzt. Löst man die so entstehende Gleichung nach f_R/f_L auf, so ergibt sich

$$d_{LR} = \frac{f_R}{f_L} - 1 = \frac{1 + v_{0L}(f_L)}{1 + v_{0R}(f_R)} - 1 \approx v_{0L}(f_L) - v_{0R}(f_R). \quad (4)$$

Bzüglich des Oktavabgleichs wird angenommen, daß dabei die beiden Tonhöhen mit den zur Oktavverwandtschaft gehörenden, langzeitlich gespeicherten Marken einer zentralen "Schablone" zur Deckung gebracht werden, welche auf die von den beiden Ohren gelieferten Tonhöhen gleichermaßen angewendet wird.

Diese "Oktavschablone" wird durch das Tonhöhenverhältnis

$$H_2/H_1 = 2[1 + \Theta(f_1)] \quad (5)$$

definiert. Dabei bedeutet $\Theta(f_1)$ eine langzeitlich eingeprägte, frequenzabhängige Abweichung des zur Oktavverwandtschaft gehörenden Tonhöhenverhältnisses vom Wert 2. Das Zustandekommen der "Oktavschablone" sowie der Abweichung Θ wird weiter unten erläutert.

Der Oktavabgleich kann auf fünf verschiedene Arten vorgenommen werden, nämlich (1) monaural auf dem rechten Ohr (RR); (2) monaural links (LL); (3) tiefer Ton rechts, hoher Ton links (RL); (4) tiefer Ton links, hoher Ton rechts (LR); und (5) diotisch (D). Die dazugehörigen OA seien mit Ω_{RR} , Ω_{LL} , Ω_{RL} , Ω_{LR} und Ω_D bezeichnet. Mit (5) und (3) ergibt sich beispielsweise durch Oktavabgleich auf dem rechten Ohr

$$\frac{H_2}{H_1} = 2[1 + \Theta(f_1)] = \frac{f_2[1 + v_{0R}(f_2)]}{f_1[1 + v_{0R}(f_1)]} \approx \frac{f_2}{f_1}[1 + v_{0R}(f_2) - v_{0R}(f_1)]. \quad (6)$$

Durch Auflösen nach f_2/f_1 erhält man hieraus für die OA mit (2)

$$\Omega_{RR} = \frac{1 + \Theta(f_1)}{1 + v_{0R}(f_2) - v_{0R}(f_1)} - 1. \quad (7)$$

Da $|v| \ll 1$, folgt daraus mit hinreichender Genauigkeit

$$\Omega_{RR} = \Theta(f_1) - v_{0R}(f_2) + v_{0R}(f_1). \quad (8)$$

Auf entsprechende Weise erhält man

$$\Omega_{LL} = \Theta(f_1) - v_{0L}(f_2) + v_{0L}(f_1), \quad (9)$$

$$\Omega_{RL} = \Theta(f_1) - v_{0L}(f_2) + v_{0R}(f_1), \quad (10)$$

$$\Omega_{LR} = \Theta(f_1) - v_{0R}(f_2) + v_{0L}(f_1). \quad (11)$$

Beim diotischen Oktavabgleich ist davon auszugehen, daß die Tonhöhen dem Mittel der monauralen Werte entsprechen; daher gilt für die diotische OA

$$\Omega_D = \Theta(f_1) - 0,5[v_{0R}(f_2) + v_{0L}(f_2) - v_{0R}(f_1) - v_{0L}(f_1)]. \quad (12)$$

Aus diesen Ansätzen ergeben sich folgende Beziehungen zwischen OA und ITD:

$$\Omega_{RR} - \Omega_{LL} = d_{LR}(f_2) - d_{LR}(f_1); \quad (13)$$

$$\Omega_{RR} - \Omega_{RL} = d_{LR}(f_2); \quad (14)$$

$$\Omega_{RR} - \Omega_{LR} = -d_{LR}(f_1); \quad (15)$$

$$\Omega_{LL} - \Omega_{RL} = d_{LR}(f_1); \quad (15)$$

$$\Omega_{LL} - \Omega_{LR} = -d_{LR}(f_2). \quad (16)$$

Um die zu erwartenden Charakteristika der OA zu ermitteln, ist es nötig, die Frequenzabhängigkeit der "Oktavschablone", d.h. der Größe Θ abzuschätzen. Dazu wird zweckmäßigerweise die Zerlegung

$$\Theta(f_1) = S(f_1) + \sigma(f_1) \quad (17)$$

vorgenommen. $S(f_1)$ ist im ganzen Frequenzbereich größer null und spiegelt die im Mittel zu beobachtende Spreizung der Oktav wider. Schwankungen um den mittleren Verlauf werden durch $\sigma(f_1)$ berücksichtigt. Es wird angenommen, daß sowohl $S(f_1)$ als auch $\sigma(f_1)$ das Ergebnis einer Prägung durch die Tonhöhenintervalle sind, welche zwischen der ersten und zweiten sowie der zweiten und vierten Harmonischen periodischer Klänge - insbesondere der stimmhaften Sprachlaute - im Mittel auftreten (Terhardt, 1972), und zwar beim natürlichen, das heißt, binauralen Hören. Falls während des Prägenvorganges die FTC der beiden Ohren die gleichen Schwankungen aufweist wie oben für den Oktavabgleich angesetzt, sollte für σ der Ansatz

$$\sigma(f_1) = 0,5[v_{0R}(2f_1) + v_{0L}(2f_1) - v_{0R}(f_1) - v_{0L}(f_1)] \quad (18)$$

gültig sein.

3. Vergleich mit Meßergebnissen

Mit diotischer Darbietung gemessene OA weisen als Funktion der Frequenz praktisch keine Schwankungen auf; das heißt, sie zeigen lediglich die Spreizung der Oktav (Walliser, 1969; Dobbins & Cuddy, 1982). Diese Beobachtung wird durch Gl.(12) zusammen mit (17) und (18) recht gut erklärt, jedenfalls unter der Voraussetzung, daß die bei der Prägung

der Oktavschablone wirksamen Abweichungen der FTC mit denen beim Oktavabgleich übereinstimmen. Die nach (18) mit (17) in Θ enthaltenen Schwankungen werden durch die nach (12) beim Oktavabgleich wirksamen Schwankungen weitgehend kompensiert, weil $f_2 \approx 2f_1$.

Wenn man sich von den in Fig.2 dargestellten monauralen OA Ω_{RR} bzw. Ω_{LL} ein- und derselben Person die im Mittel vorhandene Spreizung abgezogen denkt, so weisen die als Funktion der Frequenz pendelnden Verläufe immer noch eine gewisse Ähnlichkeit auf. Dieselbe ist auch an weiteren Resultaten desselben Autors zu beobachten (Ward, 1954). Durch eine Anzahl eigener Messungen im Frequenzbereich $f_1 = 500 - 600$ Hz wurde dies überprüft. Die in Fig.3 dargestellten Resultate von vier Versuchspersonen bestätigen die Ähnlichkeit der Schwankungsverläufe. Der theoretische Ansatz (8), (9) läßt dies zu, denn nach (17) und (18) sollte die den beiden Ohren gemeinsame Oktavschablone einen entsprechenden schwankenden Anteil enthalten.

Mit den Versuchspersonen Hei und Sch wurden in den Frequenzbereichen $f_1 = 500 - 600$ Hz und $f_2 = 1000 - 1200$ Hz die IDT gemessen. Damit kann für diese beiden Vpn die Gültigkeit von Gl.(13) überprüft werden. Zieht man bei zusammengehörigen Frequenzen jeweils von $\Omega_{RR} - \Omega_{LL}$ die Differenz $d_{LR}(f_2) - d_{LR}(f_1)$ ab, so müsste sich nach (13) bei allen Frequenzen null ergeben. Bei den genannten Meßergebnissen ist dies mit Abweichungen von bis zu $\pm 1\%$ nur annäherungsweise der Fall. Die bisher verfügbaren Meßergebnisse erlauben kein Urteil darüber, ob die Abweichungen auf Unzulänglichkeiten der theoretischen Ansätze oder auf die Meßgenauigkeit zurückzuführen sind.

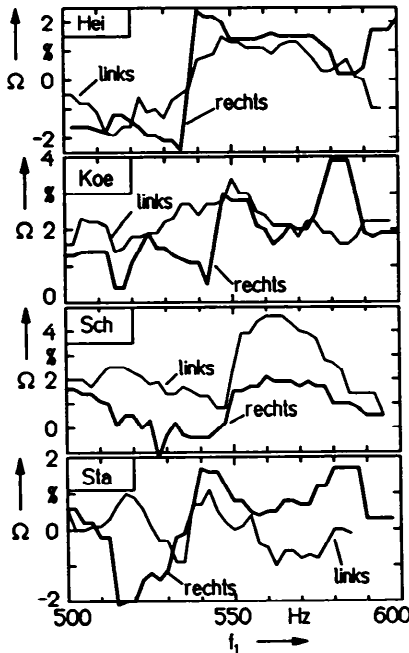


Fig.3. Monaurale OA von Sinustönen. Vier Versuchspersonen. Darbietungs-Schallpegel 65 dB.

Anmerkungen

Der Verfasser dankt Herrn Dipl.-Ing. J. Trell für die Durchführung der Hörversuche. Die Untersuchungen wurden im SFB 204 (Gehör), München, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, durchgeführt.

Literaturangaben

- van den Brink, G. (1975), *Acustica* 32, 166-174.
 van den Brink, G. (1977), in: Evans, E.F. & Wilson, J.P. (Ed.), "Psychophysics and Physiology of Hearing", Academic Press, London, 373-379.
 Dobbins, P.A. & Cuddy, L.L. (1982), *JASA* 72, 411-415.
 Terhardt, E. (1972), *Acustica* 26, 173-199.
 Walliser, K. (1969), *Frequenz* 23, 139-143.
 Ward, W.D. (1954), *JASA* 26, 369-380.