

CHARAKTERISTISCHE BANDBREITEN DES GEHÖRS UND EINIGE DERER WECHSELBEZIEHUNGEN

VLADIMÍR MAJERŇIK, Bratislava

EINLEITUNG

Das Gehör stellt ein kompliziertes System zur Bearbeitung der in akustischen Signalen inkodierten Information dar. Eine der wichtigsten Rollen spielt hierbei die Analyse der akustischen Stimuli, d. h. die Wertermittlung der physikalischen Parameter der akustischen Stimuli, in denen die Information beinhaltet ist. Die Funktionsweise des Gehörs als eines Analysators ist natürlich recht kompliziert und es scheint, daß sie auch von denen der uns üblichen linearen Analysatoren wesentlich abweicht.

Bei experimenteller Erforschung des Gehörs hat man in der letzten Zeit eine reichliche Menge faktologischer Materials in der Form von verschiedensten Konstanten, empirischen Beziehungen und Funktionen gesammelt. Die bei der Untersuchung des Gehörs als eines Analysators ermittelten Kenngrößen (wie z. B. die Zeitkonstante der Lautstärkebildung, Frequenzunterscheidungsvermögen usw.) können in zwei Gruppen aufgeteilt werden:

a) Größen, die mit der Analyse der Intensitätskomponente der akustischen Stimuli zusammenhängen (z. B. Unterscheidungsvermögen für die Lautstärke usw.).

b) Größen, die mit der Frequenzanalyse der akustischen Stimuli verknüpft sind (z. B. Frequenzunterscheidungsvermögen usw.).

Offensichtlich kann eine derartige Aufteilung beim heutigen Stand unserer Kenntnisse über den Gehöranalysator nicht immer eindeutig vorgenommen werden, da dieser eine komplexe Analyse ausführt, bei der die experimentellen Daten für die (heutzutage) die Frequenzanalyse verantwortlich gezeichnet wird, voraussichtlich auch mittelbar oder unmittelbar mit den Daten, mit denen wir heute die Intensitätsanalyse charakterisieren, zusammenhängen, oder gar von den letzteren abgeleitet werden können. Dennoch ist es nach dem heutigen Standpunkt angemessen die obige Aufteilung zu benutzen. In weiteren Teilen der vorliegenden Arbeit werden wir uns lediglich mit solchen Daten befassen, die mit der Gehörfunktion als eines Frequenzanalysators zusammen-

hängen; diese werden schlechthin als charakteristische Bandbreiten des Gehörs bezeichnet werden, und zwar ohne Rücksicht darauf, ob sie die Dimension einer Frequenz haben werden oder nicht und auch unabhängig davon, ob sie mittels des Spektralbildes oder mittels des Zeitverlaufes ausgedrückt sein werden. Wir werden, konkret gefaßt, unter den charakteristischen Bandbreiten des Gehörs folgende Daten (und auch Daten die von diesen abgeleitet werden können) verstehen:

- 1) Tonkennzeit t_T
- 2) Frequenzunterscheidungsvermögen für stationäre akustische Stimuli
- 3) Click-Kennzeit t_{cp}
- 4) Standardabweichung der Vergleichstonfrequenz bei Bestimmung der Tonhöhe von kurzen Tonsignalen nach dem Angleichverfahren (method of matching)
- 5) kritische Bandbreite Δf_c .

Ausgehend von experimentellen Daten werden im Folgenden einige Beziehungen zwischen den charakteristischen Bandbreiten des Gehörs aufgestellt und deren Interpretierungsmöglichkeiten diskutiert.

CHARAKTERISTISCHE BANDBREITEN DES GEHÖRS

Die *Tonkennzeit* t_T ist die minimale Dauer eines Tonsignales, die dazu erforderlich ist, damit der Tonsignal vom Beobachter als ein Schall mit bestimmter Tonhöhe wahrgenommen werden kann. Die Tonkennzeit in Abhängigkeit von der Frequenz wurde von mehreren Autoren experimentell ermittelt, insbesondere von Birck, Kotowski und Lichte [1] (bei mittleren Pegeln), Türk [2] (Pegel nicht angegeben, wahrscheinlich ebenfalls mittlerer Pegel), Dougherty und Garner [3] (Pegel 110 dB) und Mayer [4] (Pegel 30—40 dB). Alle Autoren benutzen bei ihren Untersuchungen Tonimpulse mit zufälligen Anfangsphasenwinkeln. Dougherty und Garner [3] haben gezeigt, daß Schallpegel oberhalb von 40 dB etwa den gleichen Einfluß auf die Tonkennzeit haben und wir halten es deshalb für berechtigt, den Mittelwert der in [1], [2], [3] und [4] ermittelten Werte als Richtwert für die Tonkennzeit zu gebrauchen. Die auf diese Weise gewonnenen Werte für die Tonkennzeit in Abhängigkeit von der Frequenz sind im Bild 1 dargestellt.

Von der Tonkennzeit, die die Dimension einer Zeit hat, können zwei weitere charakteristische Bandbreiten des Gehörs, nämlich die minimale Bandbreite Δf_T und die Periodenzahl n_T der Tonsignale der Dauer t_T , die bei der Gehörfrequenzanalyse von Wichtigkeit sind, abgeleitet werden. Die minimale Bandbreite Δf_T kann mit Hilfe der Beziehung zwischen der Bandbreite Δf und der Dauer T des akustischen Signales ermittelt werden:

$$Af \cdot T \geq 1.$$

(1)

Setzen wir $T = t_T$ und wählen wir den Minimalwert für Af , so bekommen wir für Af_T :

$$Af_T = \frac{1}{t_T}.$$

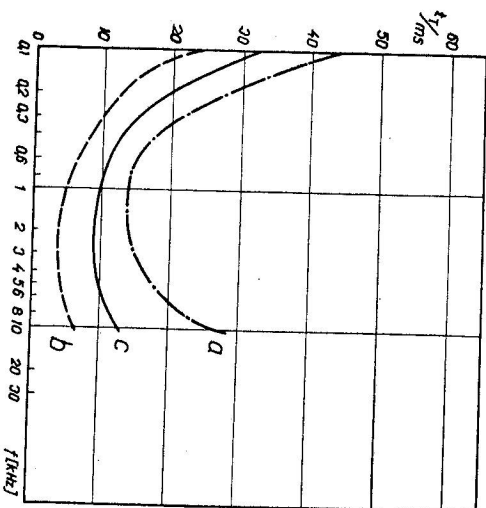


Bild 1. Mittelwerte der Tonkennzeiten in Abhängigkeit von der Frequenz (ausgezogen). Die höchsten und die niedrigsten Messwerte für die Tonkennzeiten in Abhängigkeit von der Frequenz (gestrichelt).

Die Periodenzahl n_T eines Tonimpulses, dessen Dauer gleich der Tonkennzeit ist, wird bestimmt durch die Gleichung

$$n_T = t_T \cdot f.$$

Das *Frequenzunterscheidungsvermögen Af_{UL} für stationäre akustische Stimuli* ist als vom Beobachter eben wahrnehmbare Frequenzänderung bei zwei einander folgenden genügend langen Tonsignalen definiert. Das Frequenzunterscheidungsvermögen in Abhängigkeit von der Frequenz wurde experimentell insbesondere von folgenden Autoren bestimmt: Shower und Biddulph [5], Zwicker [6], Harris [7], Boring [8], Petran [9] und Schubert [10]. Da die Experimente zur Ermittlung des Frequenzunterscheidungsvermögens unter verschiedenen Bedingungen (unterschiedliche Methodik usw.) verliefen, so kann ein Mittelwert der in [5] bis [10] angegebenen Werte nicht als repräsentativer Richtwert für das Frequenzunterscheidungsvermögen angesehen werden. Eine der sorgfältigsten Bestimmungen des Frequenzunterscheidungsvermögens stammt von Zwicker [6], und wir werden im Weiteren die von

ihm ermittelten Werte benutzen. Der Verlauf des Frequenzunterscheidungsvermögens in Abhängigkeit von der Frequenz, bei Lautstärke von 60 Phon, (nach [6]), ist im Bild 2 wiedergegeben. Vom Frequenzunterscheidungsvermögen kann eine weitere charakteristische Bandbreite des Gehörs — n_{DL} — abgeleitet werden, bestimmt durch die Gleichung

$$n_{DL} = t_{DL} \cdot Af_{DL},$$

wobei t_{DL} die Minimaldauer des stationären Tonsignales ($t_{DL} = \text{ca. } 250 \text{ msec.}$) ist.

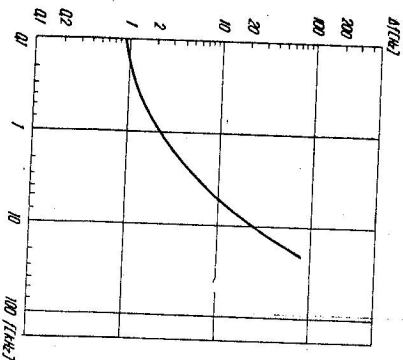


Bild 2. Verlauf des Frequenzunterscheidungsvermögens in Abhängigkeit von der Frequenz bei Lautstärke von 60 Phon (nach Zwicker [6], angegeben in [16]).

Die *Click-Kennzeit t_{CP}* ist die minimale Dauer eines Tonsignales, bei der der Charakter seiner Wahrnehmung von einem ausgesprochen rauschenartigen zum rauschenartigen mit tonaler Komponente eben umschlägt (Dougherty und Garner [3]). Die so definierte Click-Kennzeit wurde in Abhängigkeit von der Frequenz im Bereich 125—8000 Hz, beim Pegel von 110 dB, von Dougherty und Garner [3] gemessen. Von der Click-Kennzeit kann abermals eine weitere charakteristische Bandbreite des Gehörs, nämlich die Periodenzahl n_{CP} eines Tonsignales, dessen Dauer gleich der Click-Kennzeit ist, nach der Beziehung

$$n_{CP} = t_{CP} \cdot f$$

abgeleitet werden.

Die *Standardabweichung σ der Frequenzen des stationären Vergleichstones* bei der Bestimmung der Tonhöhe von kurzen Tonimpulsen der Trägerfrequenz f nach dem Angleichverfahren (method of matching), wurde in Abhängigkeit von der Frequenz und von der Dauer, bei zwei Schallpegeln (70 und 90 dB), von Dougherty und Garner [11] ermittelt. Der Verlauf der Abhängigkeit σ/f (in Prozent) ist im Bild 3 und 4 wiedergegeben.

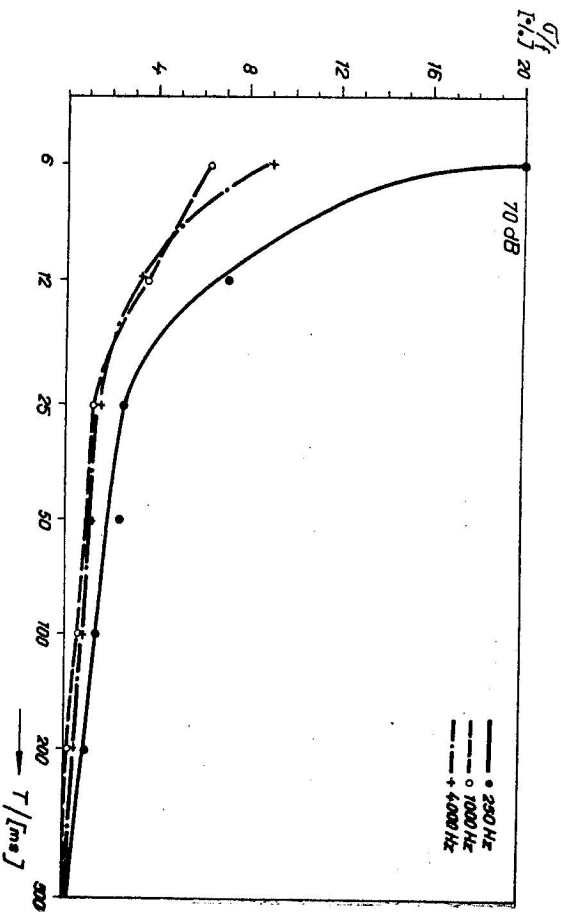


Bild 3. Verhältnis o/f (in Prozent) in Abhängigkeit von der Dauer der Tonsignale bei Pegel von 70 dB. Parameter ist die Frequenz der Tonsignale.

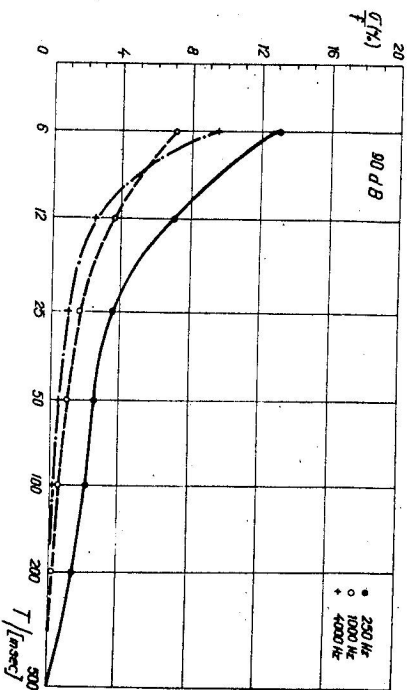


Bild 4. Verhältnis o/f (in Prozent) in Abhängigkeit von der Dauer der Tonsignale bei Pegel von 90 dB. Parameter ist die Frequenz der Tonsignale.

Die kritische Bandbreite Δf_c ist die Breite eines Frequenzintervalls $\langle f_{cz}, f_{ck} \rangle$ das sich dadurch auszeichnet, daß die Gesamtintensität I_G von Tönen, deren Frequenzen in diesem Intervall liegen so gebildet wird, daß die Teil-

intensitäten der einzelnen Töne einfach arithmetisch nach der folgenden Gleichung addiert werden:

$$I_G = I_1 + I_2 + \dots + I_n, \quad (2)$$

$$f_1, f_2, \dots, f_n \in \langle f_{cz}, f_{ck} \rangle.$$

Hierbei ist f_{cz} (f_{ck}) die niedrigste (höchste) Frequenz für die die Gleichung (2) noch gilt. Meßwerte für die kritischen Bandbreiten in Abhängigkeit von der Frequenz sind u. a. von Feldtkeller und Zwicker [12] veröffentlicht worden. Die kritische Bandbreite ist eine mit der Bildung der Lautstärkeempfindung von akustischen Stimuli unmittelbar zusammenhängende charakteristische Bandbreite des Gehörs. Von der kritischen Bandbreite kann eine weitere, abgeleitet charakteristische Bandbreite des Gehörs gewonnen werden — die Differenz n_g der Periodenzahl von Tonsignalen der Dauer t_g , deren Frequenzen f_{ck} bzw. f_{cz} sind:

$$n_g = t_g \cdot (f_{ck} - f_{cz}).$$

Hierbei bedeutet t_g die zur Ausbildung des kritischen Bandes nötige Zeit ($t_g = 10$ msec. [13]). (Nach neuesten Untersuchungen [17] zeigt es sich, daß für t_g wesentlich kürzere Zeit — unterhalb von 2 msec. — anzusetzen ist.)

GESCHLOSSENE EMPIRISCHE DARSTELLUNG DER ABHÄNGIGKEIT DER TONKENNZEIT UND DER CLICK-KENNZEIT VON DER FREQUENZ

Wie aus Bild 1 ersichtlich ist, kann die experimentell ermittelte Abhängigkeit der Tonkennzeit von der Frequenz durch eine verhältnismäßig einfache Kurve graphisch dargestellt werden. Es ist deshalb naheliegend zu versuchen, eine die experimentelle Abhängigkeit gut annähernde Funktion $t_T = F_1(f)$ zu konstruieren. Es kann gezeigt werden, daß dies wirklich möglich ist und daß die w. u. angegebene empirische Funktion die gewünschte Eigenschaft hat (f in Hz, t_T in msec.):

$$t_T = \frac{9,5}{1 - e^{-f}} \quad \text{im Bereich } 100\text{--}4000 \text{ Hz} \quad (3)$$

$$t_T = \frac{100}{12,1 - 4,21 \cdot 10^{-4}f} \quad \text{im Bereich } 4\text{--}10 \text{ kHz},$$

wobei $f_0 = 300$ Hz. Der Verlauf der Funktion $t_T = F_1(f)$ (Bild 5, Kurve a) deckt sich recht gut mit den tatsächlich gemessenen Werten von t_T (im Bild 5 durch Kreise dargestellt).

Ähnlich kann auch die Frequenzabhängigkeit der Click-Kennzeit $t_{CP} = F_2(f)$ im Frequenzbereich 100—8000 Hz durch eine einfache empirische Beziehung der folgenden Form angenähert werden:

$$t_{CP} = \frac{2,75}{1 - e^{-f}}, \quad (4)$$

wobei $f_0 = 450$ Hz. Der Verlauf dieser Funktion ist im Bild 5 (Kurve b) dargestellt, die Meßwerte t_{CP} sind abermals durch Kreise kenntlich gemacht.

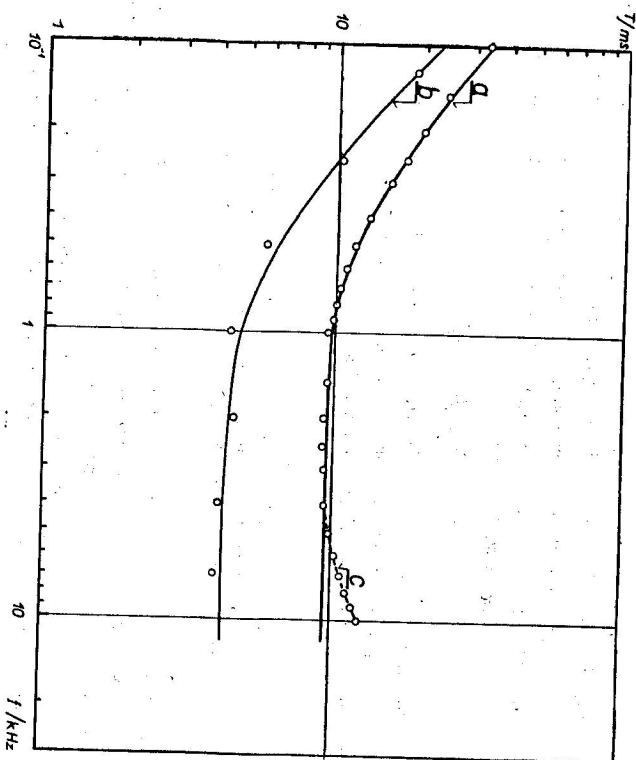


Bild 5. Verlauf der empirischen Beziehungen (3) für die Tonkennzeit t_r (Kurve a und c) und (4) für die Click-Kennzeit t_{CP} (Kurve b) in Abhängigkeit von der Frequenz. Experimentell ermittelte Werte sind durch Kreise angedeutet.

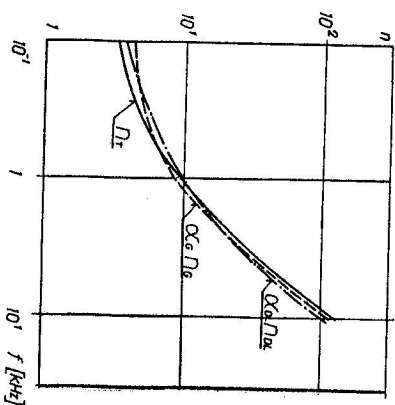
EINIGE EMPIRISCHE WECHSELBEZIEHUNGEN ZWISCHEN DEN CHARAKTERISTISCHEN BANDBREITEN DES GEHÖRS

Da die besprochenen charakteristischen Bandbreiten des Gehörs sämtlich Funktionen der Frequenz sind, erhebt sich die Frage, ob unter ihnen auch solche existieren, deren funktionaler Zusammenhang bis auf einen konstanten Faktor der gleiche ist. Es kann gezeigt werden, daß die abgeleiteten charakteristischen Bandbreiten des Gehörs (n_r, n_{DL} und n_C) diese Eigenschaft tatsächlich aufweisen. Trägt man nämlich n_r, n_{DL} und n_C (d. h. die vom Zeitverlauf ermittelten charakteristischen Bandbreiten des Gehörs) in eine gemeinsame graphische Darstellung ein, und zwar so, daß n_{DL} und n_C mit geeigneten konstanten Faktoren α_{DL} und α_C multipliziert worden sind, so kann die Kurve $n_r = F_3(f)$ mit den Kurven $n_{DL} = F_4(f)$ und $n_C = F_5(f)$ zum decken gebracht werden (s. Bild 6). Im Frequenzbereich 100—10 000 Hz gelten somit zwischen $n_r(f)$, $n_{DL}(f)$ und $n_C(f)$, im Rahmen der Meßgenauigkeit, die folgenden Gleichungen:

$$n_r(f) = \alpha_{DL} \cdot n_{DL}(f) \quad (5)$$

$$n_r(f) = \alpha_C \cdot n_C(f). \quad (6)$$

Bild 6. Graphische Darstellung der Frequenzabhängigkeit von n_r , $\alpha_{DL} \cdot n_{DL}$ und $\alpha_C \cdot n_C$.



Die Konstanten α_{DL} und α_C werden von den Meßwerten n_{DL} und n_C errechnet. Nimmt man $t_{DL} = 250$ msec. und $t_C = 10$ msec., so bekommt man $\alpha_{DL} = 17,6$ und $\alpha_C = 52,0$. Aus den angegebenen Beziehungen geht hervor, daß $n_r(f)$, $n_{DL}(f)$ und $n_C(f)$ drei gleichartige Funktionen der Frequenz sind. Alle drei Größen, d. h. n_r , n_{DL} und n_C , sind jedoch auch von Lautstärkepegel abhängig; die Beziehungen (5) und (6) wurden für n_r , n_{DL} und n_C -Werte, die etwa den gleichen Pegeln entsprechen, abgeleitet.

Weitere Beziehungen zwischen den charakteristischen Bandbreiten des Gehörs können aus der Tabelle I ermittelt werden. In dieser Tabelle sind die $\sigma(f)$, T/f -Werte in Abhängigkeit von der Frequenz, für drei verschiedene Frequenzen ($f_1 = 250$ Hz, $f_2 = 1000$ Hz und $f_3 = 4000$ Hz), angegeben; es wurde hierbei $T = t_r$ gesetzt, d. h. für die Signaldauer T wurde die jeweilige Tonkennzeit für die einzelnen Frequenzen f_1 , f_2 und f_3 gewählt. Aus der Tabelle I ist ersichtlich, daß die $\sigma(f)$, $t_r/f = \sigma'/f$ -Werte im Rahmen der Meßgenauigkeit

keit unter diesen Bedingungen untereinander übereinstimmen, wobei σ'/f im Mittel gleich $4,4 \cdot 10^{-2}$ ist. Nimmt man dies in Erwägung, so kann man die folgende empirische Beziehung aufstellen:

$$\frac{\sigma'}{f} = \frac{\sigma(f, t_r(f))}{f} = 4,4 \cdot 10^{-2} \quad (7)$$

Tabelle 1.

$t_r(f)$ (in msec.)	f_1	f_2	f_3
$\sigma'_1 = \sigma'/f$ (in %) bei 70 dB	17,5	9,5	9,5
$\sigma'_2 = \sigma'/f$ (in %) bei 90 dB	4,0	4,3	4,5
$\sigma'_1 + \sigma'_2$	4,85	4,55	4,20
2	4,425	4,425	4,350
$q'_1 = \Delta f'_{nl}/f$ (in %) nach [15]	4,9	3,2	3,8
$q'_2 = \Delta f'_{nl}/f$ (in %) nach [14]	5,0	2,0	2,5
$q'_1 + q'_2$	4,95	2,60	3,15

Unter Benutzung von [14] und [15] kann analogisch gezeigt werden, daß für $\Delta f'_{nl}(f, t_r(f)) = \frac{\Delta f'_{nl}}{f}$ für Frequenzen von 250, 1000 und 4000 Hz, annähernd die folgende Gleichung gilt:

$$\frac{\Delta f'_{nl}}{f} = \frac{\Delta f'_{nl}(f, t_r(f))}{f} = 3,56.$$

An Hand des Obengesagten können folgende Folgerungen gezogen werden:
a) Die vom Zeitverlauf der akustischen Stimuli ermittelten abgeleiteten charakteristischen Bandbreiten des Gehörs (n_{DL} , n_T und n_G) sind — bis auf einen konstanten Faktor — gleich und man kann die folgende Gleichung aufstellen:

$$n_T(f) = \alpha_{DL} \cdot n_{DL}(f) = \alpha_G \cdot n_G(f) = F_G(f) \quad (8)$$

Die Funktion $F_G(f)$ ist eine, im gewissen Sinne die Frequenzcharakteristik des Gehörs widerspiegelnde Funktion, mit deren Hilfe alle diese besprochenen abgeleiteten charakteristischen Bandbreiten des Gehörs, bis auf einen konstanten Faktor, bestimmt werden können.

b) Die Tonkennzeit kann als die Zeit definiert werden, für die bei der gegebenen Frequenz $\sigma'/f = 4,4 \cdot 10^{-2}$ ist, oder für die $\Delta f'_{nl}/f$ ist etwa gleich 3,56. Das relative Frequenzunterscheidungsvermögen ist also für $T = t_r(f)$ für verschiedene Frequenzen etwa gleich.

Die Einfachheit der, zwischen den aus dem Zeitverlauf der akustischen Stimuli ermittelten abgeleiteten charakteristischen Bandbreiten des Gehörs geltenden Gleichungen (8) kann als eine Bekräftigung der Telefontheorie des Hörens angesehen werden, da der Zeitverlauf der akustischen Stimuli hauptsächlich durch die Periodenzahl charakterisiert ist, die ihrerseits wiederum mit der Anzahl der, bei der Einwirkung der akustischen Stimuli im Gehörorgan entstehenden Nervenpulse eng verknüpft ist.*

SCHRIFTTUM

- [1] Bürck, W., Kotowski, P., Lichte, H., *Der Aufbau des Tonhöhenbewusstseins*, Elektr. Nachr.-Techn. 12 (1935), S. 326.
- [2] Türk, W., *Über die physiologisch-akustischen Kennzeiten von Ausgleichsvorgängen*, Akust. Z. 5 (1940), S. 192.
- [3] Dougherty, J. M., Garner, W. R., *Pitch Characteristics of Short Tones. I. Two Kinds of Pitch Threshold*, J. exp. Psychol. 37 (1947), S. 351.
- [4] Mayer, E., *Über die Wahrnehmung von kurzdauernden Tonimpulsen*, Arch. Ohr.-Nas.-Kehlk. Hlk. 159 (1951), S. 354.
- [5] Showers, E. G., Biddulph, R., *Differential Pitch Sensitivity of the Ear*, JASA 3 (1931), S. 275.
- [6] Zwicker, E., *Die Veränderung der Modulationsschwellen durch verdeckte Töne und Geräusche*, Acustica 3 (1953), S. 274.
- [7] Harris, D., *Pitch Discrimination*, JASA 24 (1952), S. 750.
- [8] Boring, E. G., *The Size of the Differential Limen for Pitch*, Am. J. Psychol. 53 (1940), S. 450.
- [9] Petráň, L. A., *Pitch Discrimination near the Upper and Lower Thresholds of Audition*, Am. J. Psychol. 45 (1933), S. 248.
- [10] Schubert, K., *Über die Prüfung des Tonhöhenunterscheidungsvermögens*, Arch. Ohr.-Nas.-Kehlk. Hlk. 159 (1951), S. 339.
- [11] Dougherty, J. M., Garner, W. R., *Pitch Characteristics of Short tones. II. Pitch as a Function of Tonal Duration*, J. exp. Psychol. 38 (1948), S. 478.

* Für anregende Diskussionen gebührt mein aufrichtiger Dank Herrn Dipl.-Ing. I. Nábělek, ČSC und Herrn Dipl.-Phys. J. Krutěel.

- [12] Feldtkeller, R. Zwicker, E., *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*, S. Hitzel-Verlag, Stuttgart 1956.
- [13] Scholl, H., *Das dynamische Verhalten des Gehörs im Bereich der Hörschwelle*, Dissertation T. H. Stuttgart 1961.
- [14] Лянг Хих-ан Чистович, Л. А., Дифференциальные пороги по частоте в зависимости от длительности тональных посылов. (Фреkwenzunterscheidungsvermögen in Abhängigkeit von der Tonpulsdauer), *Акуст. журнал* (Акуст. zhurnal) 6 (1960), S. 81.
- [15] Oettinger, R., *Hörbarkeit von Frequenz- und Tonhöhenänderungen*, *Acustica* 9 (1959), S. 431.
- [16] Fack, H., *Informations-theoretische Behandlung des Gehörs*. In *Impuls-technik*, Herausgeber F. Winkel, Springer-Verlag B. G. H. 1956.
- [17] Zwicker, E., *Temporal Effects in Simultaneous Masking and Loudness*, *JASA* 38 (1965), S. 132.

Eingegangen am 11. 5. 1966

*Psychologický ústav SAV,
Bratislava*