

EIN BEITRAG ZUR BESTIMMUNG DER INFORMATIONSTHEORETISCHEN CHARAKTERISTIKEN DES GEHÖRS

JOZEF KRÚTEL, Bratislava

Das menschliche Gehör unterscheidet Schallsignale auf Grund verschiedener Kriterien; nach Lautheit, Tonhöhe, Dauer u. ä., d. h. nach psychophysikalischen Korrelaten von physikalischen Parametern, die die Gruppe der sogenannten subjektiven Eigenschaften bilden, oder nach Klangfarbe, Volumen u. ä., d. h. nach psychophysikalischen Korrelaten von physikalischen Parametern, die der Gruppe der sog. sekundären subjektiven Eigenschaften angehören [1]. Zur vollständigen Beschreibung des Gehörs als Übertragungskanal benötigt man die Anzahl von hinsichtlich aller Kriterien im gesamten Empfangsbereich des Gehörs unterscheidbaren Signale zu kennen. Diese Aufgabe ist noch unlöslich, da einerseits Schallsignale bezüglich der sekundären subjektiven Eigenschaften quantitativ noch nicht erfassbar sind, und andererseits noch nicht genügend, zur Bestimmung der komplexen informations-theoretischen Charakteristiken des Gehörs benötigten experimentellen Materials vorliegt. Mit Rücksicht auf den ersteren der angegebenen Gründe muß man sich vorderhand nur auf die informationstheoretischen Eigenschaften des Gehörs bezüglich primärer subjektiver Eigenschaften von Schallsignalen beschränken.

Bei nichtstationären Schallsignalen, die — wie bekannt — den Hauptträger von Information darstellen, muß dabei von den fundamentalen Beziehungen für deren Unterscheidbarkeit hinsichtlich der einzelnen Parameter, von denen bekannt ist, daß sie die Unterscheidbarkeit beeinflussen, d. h. Intensität I , Dauer t und Frequenz f (bzw. spektrale Zusammensetzung), ausgegangen werden. Diese können allgemein in der Form

$$DLI = F_1(I, t, f, h)$$

$$DLt = F_2(I, t, f, h)$$

$$DLf = F_3(I, t, f, h)$$

beschrieben werden, wobei DLI , DLt und DLf die einzelnen Unterschieds-

schwellen bezeichnen und der Parameter h symbolisiert eine etwaige Abhängigkeit von weiteren physikalischen Parametern des Signals bzw. deren Kombinationen (hier denkt man insbesondere an den Einfluß der Umhüllenden sowie der Anfangsphase).

Es zeigt sich [2, 3, 4], daß dieses Gleichungssystem unter gewissen Umständen für Sinustöne auf

$$DLI = F'_1(I, t, f) \tag{1}$$

$$DLt = F'_2(I, t, f) \tag{2}$$

$$DLz = F'_3(I, t) \tag{3}$$

reduziert werden kann, wobei durch z die Tonhöhe in mel (als Korrelat der Frequenz) bezeichnet ist. Für Rauschsignale (weißes Rauschen) schrumpfen die Gleichungen, mit Rücksicht auf die Frequenzunabhängigkeit, auf

$$DLI = F''_1(I, t) \tag{4}$$

$$DLt = F''_2(I, t) \tag{5}$$

zusammen.

Man stößt allerdings auch weiterhin auf ein Problem: die Gleichungen (1)–(5) für die einzelnen DL sind bis jetzt nur mangelhaft bekannt. Die Beziehungen (1) und (4) sind als mathematische Funktionen noch nicht aufgestellt worden. Es gibt gewisse Ergebnisse von älteren Arbeiten [5, 6], jedoch vor allem die Zahlenangaben der Arbeit [5], die sich bislang als einzige mit der Abhängigkeit von DLI von der Impulsdauer t befaßt hat, sind mit Rücksicht auf neuere Untersuchungen [7] als zweifelhaft zu bezeichnen. In der Arbeit [7] wurde die Gestalt des funktionellen Zusammenhanges (1) für mittleren Frequenzbereich und konstante Intensität I angegeben. Die Beziehungen (2) und (5) sind bis jetzt ebenfalls ungenügend bekannt [8]. Eine diesbezügliche umfangreiche Untersuchung haben in der letzten Zeit Nábělek und Rozsypal [9] unternommen, der viele neue wertvolle Angaben entnommen werden können. Hinreichend bekannt war bis heute nur die Beziehung (3), die eigentlich die Unscharfrelation für das Gehör ist [3].

In der Arbeit [7] konnte gezeigt werden, daß die Beziehung (1) im breiten Bereich frequenzunabhängig ist und es wurde diese Beziehung für eine konstante Intensität (Schallpegel $L = 60$ dB) auch aufgestellt. Prinzipiell kann in die in [7] angegebene Beziehung auch die Intensitätsabhängigkeit eingeschlossen werden, da in [10] gezeigt wurde, daß die Intensitätsabhängigkeit von der Impulsdauer nicht beeinflußt zu sein scheint. Es herrschen aber gewisse Unstimmigkeiten darüber, wie die Intensitätsabhängigkeit als solche aussehen soll: nach Riesz [11] ist DLI bei Pegeln $L > 40$ dB unabhängig

von I , in Richtung kleinerer Pegel steigt DLI an; nach Zwicker [12] und Maiwald [13] sinkt DLI monoton mit steigendem Pegel im gesamten Intensitätsbereich; nach [10] weist DLI im Bereich mittlerer Pegel ein Minimum auf und steigt nach beiden Seiten an, wobei der Anstieg in Richtung größerer Pegel wesentlich flacher verläuft. Allen Arbeiten gemeinsam ist: der Zahlenwert für DLI im Bereich mittlerer Pegel sowie der Anstieg in Richtung kleinerer Pegel. Bei der Angabe des Verlaufes in Richtung größerer Pegel gehen die Arbeiten völlig auseinander. Nimmt man für diesen Bereich als erste Näherung einen mittleren Verlauf, d. h. Intensitätsunabhängigkeit von DLI , so kann die Beziehung (1) für Sinustöne in der Form

$$DLI \text{ [dB]} = F_1'(l, t) = K_1(1 + 2e^{-L/20} + 10e^{-L/10}) + K_2e^{-t/t_0} \quad (6)$$

beschrieben werden, wobei L den Schalldruckpegel in dB und t die Impulsdauer bezeichnet. K_1 , K_2 und t_0 sind Konstanten ($K_1 = 0,55$ dB, $K_2 = 3,5$ dB, $t_0 = 30$ ms). In dieser Beziehung findet allerdings die für sehr niedrige Frequenzen und niedrige Pegel entdeckte Frequenzabhängigkeit von DLI keinen Niederschlag.

Die Lage ist wesentlich einfacher für Signale aus weißem Rauschen. Was die Abhängigkeit von DLI von der Intensität für weißes Rauschen anbelangt, so wurde durch die Arbeiten [6, 10, 12, 13] einheitlich festgestellt, daß im Bereich mittlerer und höherer Pegel DLI unabhängig von I ist und in Richtung niedriger Pegel ($L < 40$ dB) ansteigt. Die Beziehung (4) kann für weißes Rauschen dann in der folgenden Form geschrieben werden:

$$DLI \text{ [dB]} = F_1''(l, t) = K_1'(1 + 2e^{-L/20} + 10e^{-L/10}) + K_2'e^{-t/t_0} \quad (7)$$

Bedeutung der einzelnen Symbole in (7) wie bei (6) mit numerischen Werten $K_1' = 0,86$ dB, $K_2' = 3,2$ dB. Die Gleichungen (6) und (7) sind rein empirische Beziehungen und widerspiegeln in keiner Weise den Mechanismus der Abhängigkeit von DLI von I und t ; sie beschreiben den Tatsachenbestand, nicht aber seine Ursachen.

Obwohl der Einfluß der Bandbreite Δf und der Mittenfrequenz f_M auf DLI vom Bandpaßrauschen sowie der Einfluß der Umhüllenden $U(t)$ und der Anfangsphase q_0 bei Sinustönen noch nicht genügend geklärt und demzufolge auch der entsprechende allgemeine funktionelle Zusammenhang $DLI = F(I, t, f_M, \Delta f, U(t), q_0)$ noch nicht bekannt ist, stellen die gefundenen Beziehungen (6) und (7) vom Standpunkt der Informationstheorie brauchbare Relationen dar, auf Grund deren nun bereits zumindest die grundlegenden Eigenschaften des Gehörs als Information aufnehmenden Organes ermittelt werden können*.

* Für anregende Diskussionen gebührt mein aufrichtiger Dank Herrn Dr. V. Majerník.

- [1] Majerník V., *Studia Psychologica* 8 (1966), 65.
 [2] Majerník V., Congress report of the 4th International congress on cybernetics, Namur 1964, 556.
 [3] Majerník V., *Fyz. časop. SAV* 17 (1967), 65.
 [4] Oettinger R., *Acustica* 9 (1959), 431.
 [5] Garner W. R., Miller G. A., *J. exp. Psychol.* 34 (1944), 450.
 [6] Miller G. A., *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 19 (1947), 609.
 [7] Krútel J., *Zborník Ped. fak. UK* (im Druck).
 [8] Small A. M., Campbell R. A., *Amer. Journ. of Psychol.* 75 (1962), 401.
 [9] Nábišek I., Rozsypal A., *Záverečná správa št. úlohy H-O-41-18/34*, Fyzikálny ústav SAV, Bratislava 1969.
 [10] Krútel J., *Dissertation. Fyzikálny ústav SAV*, Bratislava 1970.
 [11] Riesz R. R., *Phys. Rev.* 31 (1928), 867.
 [12] Zwicker E., *Acustica* 6 (1956), 365.
 [13] Maiwald D., *Dissertation. TH Stuttgart* 1966.

Eingegangen am 10. 3. 1970

Fyzikálny ústav SAV,
 Bratislava