

BESCHREIBUNG DER PEGELABHÄNGIGKEIT DER SPEKTRALTONHÖHE VON SINUSTÖNEN ANHAND VON MITHÖRSCHWELLENMUSTERN

A. Hesse

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

1. Einleitung

Bereits seit langem ist bekannt, daß die Tonhöhe eines Sinustones nicht allein von seiner Frequenz bestimmt wird (zusammenfassende Literaturangabe siehe z.B. [1]). Eine Änderung der Tonhöhe eines Sinustones bei festgehaltener Frequenz, ausgelöst durch die Veränderung einer anderen physikalischen Größe, wird als Tonhöhenverschiebung bezeichnet. Diese kann sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Eine solche Tonhöhenverschiebung tritt z.B. dann auf, wenn ein Sinuston eine Pegeländerung erfährt. Diese Tonhöhenverschiebung eines Sinustones in Abhängigkeit vom Schallpegel L wird im weiteren mit v_L bezeichnet. Den Zusammenhang zwischen Tonhöhe und Tonhöhenverschiebung v hat Terhardt [2] aufgezeigt. In seiner Arbeit definierte er als Maß für die Tonhöhe die Frequenztonhöhe H_F . Im Falle der Tonhöhe von Sinustönen, also der Spektraltonhöhe, berechnet sich diese nach der Gleichung:

$$H_F = (f_T/\text{Hz}) \cdot (1+v) \quad \text{TE} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet f_T die Frequenz des in der Tonhöhe verschobenen Sinustones. Als Einheit der Frequenztonhöhe H_F wurde von Terhardt die Bezeichnung "Tonhöheinheit" (TE) gewählt. Aus dieser Gleichung geht hervor, daß eine Klärung und Beschreibung der Prinzipien, nach welchen die Tonhöhenverschiebungen von Sinustönen erfolgen, mit einer Erklärung und Beschreibung der Spektraltonhöhe von Sinustönen gleichzusetzen ist. In der vorliegenden Arbeit soll die Pegelabhängigkeit der Spektraltonhöhe anhand von Mithörschwellenmustern beschrieben werden.

Wie in einer Arbeit von Fastl zusammenfassend dargestellt [3], bilden Mithörschwellenmuster ein sehr grundlegendes Maß sowohl für das zeitliche als auch das spektrale Auflösungsvermögen des Gehörs. Aus diesem Grund zählt die Mithörschwelle zu den Standardgrößen der Psychoakustik. Sie erfüllt darüberhinaus die Forderung nach leichter Meßbarkeit und guter Reproduzierbarkeit. Mithörschwellenmessungen bilden die Basis oder liefern Zwischengrößen zu vielen psychoakustischen Funktionsschemata (vgl. [4,5]). Die vielseitige und erfolgreiche Anwendbarkeit dieser psychoakustischen Größe ermutigt zu dem Versuch, auch für die Spektraltonhöhe von Sinustönen eine auf Mithörschwellen basierende Beschreibung zu entwickeln.

2. Herleitung der Beschreibung

Fig. 1 zeigt exemplarisch Mithörschwellen-Tonheitsmuster von Sinustönen unterschiedlicher Frequenzlagen (durchgezogene Linien) sowie das Tonheitsmuster der Ruhörschwelle (gestrichelt). Dabei wird die Ruhörschwelle als Sonderfall einer durch ein stets vorhandenes Grundgeräusch verdeckten Mithörschwelle angesehen [4]. Dieses interne Grundgeräusch ist bei mittleren und hohen Frequenzen frequenzunabhängig, steigt bei tiefen Frequenzen jedoch stark an und ist für den Verlauf der Ruhörschwelle in diesem Bereich verantwortlich. Der frequenzabhängige Verlauf der Begrenzung des Hörbereiches nach niedrigen Pegeln

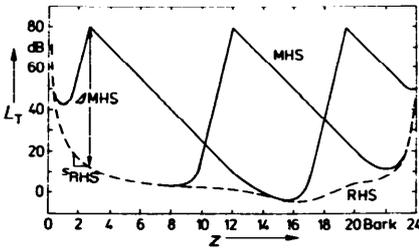


Fig. 1: Schematische Darstellung der Mithörschwellen-Tonheitsmuster der Ruheschwelle (RHS, gestrichelt) und von Sinustönen unterschiedlicher Frequenzlagen (MHS). ΔMHS und s_{RHS} siehe Text.

dem Verlauf (Steigung) des Tonheitsmusters des Maskierers im Bereich von 1 Bark unterhalb der Tonheit des Testtones und der Größe und Richtung von Tonhöhenverschiebungen aufgezeigt werden [7]. Als Ansatz für die Ermittlung berechneter Tonhöhenverschiebungen v_L ergibt sich daraus der Zusammenhang:

$$v_L = c_L \cdot \Delta MHS \cdot g(s_{RHS}) \quad \text{mit } c_L = \text{konst.} \quad (2)$$

Dabei wird mit $g(s_{RHS})$ die zu ermittelnde Abhängigkeit der Tonhöhenverschiebung v_L von der Steigung s_{RHS} der Ruheschwelle bezeichnet (siehe Fig. 1).

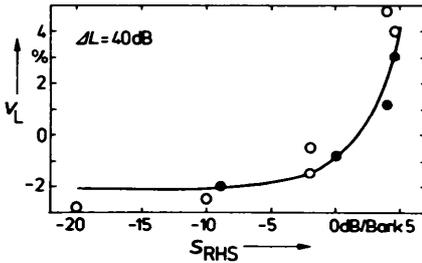


Fig. 2: Tonhöhenverschiebung v_L , ausgelöst durch eine Pegeländerung $\Delta L = 40$ dB, in Abhängigkeit von der Steigung s_{RHS} der Ruheschwelle im Bereich von 1 Bark unterhalb der Tonheit des Testtones. Ausgefüllte Kreise: Daten von Zwicker (1982); Kreise: Daten von Walliser (1969a); Durchgezogene Linie: Näherungsfunktion

$$g(s_{RHS}) = 1,2 \cdot e^{0,33 \cdot s_{RHS} / (\text{dB/Bark})} - 2,1 \quad (3)$$

Da diese Funktion die absolute Größe gemessener Tonhöhenverschiebungen v_L in Prozent bei Erhöhung der Mithörschwellen-Differenz ΔMHS um 40 dB widerspiegelt,

bei mittleren und hohen Frequenzen ergibt sich durch das Übertragungsmaß a_0 des Gehörs [4]. Aus Literaturdaten (vgl. [6]) und aus eigenen Untersuchungen [7] ist bekannt, daß die Größe der Tonhöhenverschiebungen von Sinustönen proportional der Differenz ΔMHS (siehe Fig. 1) zwischen den Mithörschwellenmustern des Testtones und des Maskierers ist. Dies gilt sowohl für die hier betrachtete Maskierung durch das interne Grundgeräusch (Ruhehörschwelle), als auch für Tonhöhenverschiebungen ausgelöst durch zugesetzte Störschalle. Weiterhin konnte ein Zusammenhang zwischen

Um zu dieser Abhängigkeit der Tonhöhenverschiebung v_L von der Steigung s_{RHS} zu gelangen, wurden Angaben für v_L von Walliser [1] und Zwicker [4] herangezogen. Für eine konstante Pegelerhöhung ΔL bzw. Erhöhung der Differenz ΔMHS der Mithörschwellen von Testton und Grundgeräusch um 40 dB ergeben sich dabei je nach Tonheit der Testtöne negative oder positive Tonhöhenverschiebungen. Fig. 2 zeigt diese Tonhöhenverschiebung v_L in Abhängigkeit von der Steigung s_{RHS} der Ruheschwelle. Die Daten von Walliser (Kreise) und Zwicker (Punkte) zeigen dabei sehr gute Übereinstimmung. Die durchgezogene Linie in Fig. 2 repräsentiert eine Näherungsfunktion für die dargestellte Abhängigkeit. Die Funktion hat die Form:

muß der Term $c_L \cdot \Delta MHS$ für $\Delta MHS = 40$ dB den Wert 0,01 ergeben. Aus dieser Bedingung errechnet sich die Konstante c_L zu $2,5 \cdot 10^{-4}$. Unter Einbeziehung dieses Wertes und der Gleichungen (2) und (3) ergibt sich die berechnete Tonhöhenverschiebung v_{Lb} zu

$$v_{Lb} = 3 \cdot 10^{-4} \cdot (\Delta MHS / \text{dB}) \cdot (e^{0,33 \cdot s_{RHS} / (\text{dB/Bark})} - 1,75) \quad (4)$$

3. Gegenüberstellung gemessener und berechneter Werte

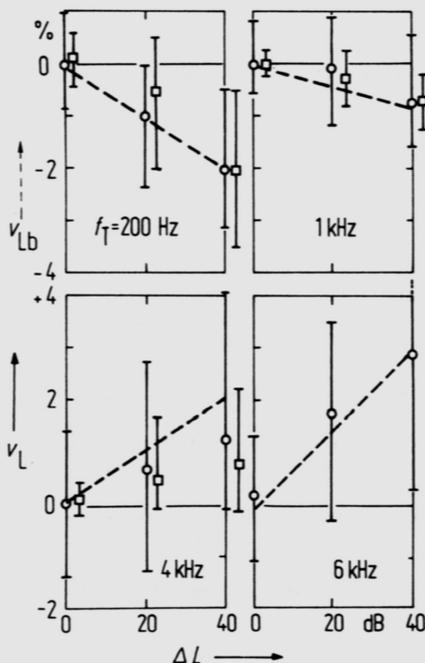


Fig. 3: Vergleich berechneter Werte der Tonhöhenverschiebung v_{Lb} (gestrichelte Linien) mit psychoakustisch ermittelten Daten v_L (Zentralwerte und Wahrscheinliche Schwankungen von 15 Versuchspersonen, nach Terhardt, 1974b) in Abhängigkeit von der Pegeländerung ΔL der Testtöne; Testtonfrequenzen f_T sind eingetragen. Quadrate: monotische Experimente; Kreise: dichotische Messungen.

Zum Vergleich von berechneten Werten der Tonhöhenverschiebung, v_{Lb} , mit psychoakustisch ermittelten Ergebnissen, v_L , werden Daten von Terhardt [8] herangezogen. Fig. 3 zeigt Zentralwerte und Wahrscheinliche Schwankungen der Ergebnisse von 15 Versuchspersonen bei 4 Testtonfrequenzen. Als gestrichelte Linien eingetragen sind jeweils die für eine Änderung der Mithörschwellen-Differenz ΔMHS zwischen Testton und Ruheschwelle von 40 dB berechneten Werte der Tonhöhenverschiebung, v_{Lb} . Die an der Abszisse aufgetragene und in den psychoakustischen Experimenten durchgeführte Pegeländerung ΔL kann direkt in eine entsprechende Änderung der Mithörschwellen-Differenz ΔMHS übergeführt werden, da sich bei Änderung des Darbietungspegels der Testtöne die zugehörigen Mithörschwellen-Tonheitsmuster im Kern, also bei der Tonheit bzw. Frequenz der Testtöne, ebenfalls um etwa diesen Betrag ändern (vgl. [4]). Neben der bei jeder Frequenz bzw. Tonheit der Testtöne maßgeblichen Steigung s_{RHS} der Ruheschwelle, ermittelt aus dem Verlauf in Fig. 1, muß daher in Gleichung (4) nur noch der Wert 40 dB für ΔMHS eingesetzt werden, um zur Tonhöhenverschiebung v_{Lb} zu gelangen. Entsprechend der Darstellung der Tonhöhenverschiebungen in Prozent der Testtonfrequenz müssen die dimensionslos berechneten Werte für diese Gegenüberstellung mit dem konstanten Wert 100 % multipliziert werden. Die berechneten Werte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit psychoakustisch ermittelten Daten, wie exem-

plarisches in Fig. 3 dargestellt.

4. Schlußbemerkung

Auch für die Veränderung der Tonhöhe von Sinustönen, ausgelöst durch überlagerte Störschalle, läßt sich eine Beschreibung anhand der den Schallen zugehörigen Mithörschwellenmuster ableiten. Eine solche Beschreibung basiert neben den zwei hier verwendeten Größen ΔMHS und Steigung im Mithörschwellenmuster des Maskierers zusätzlich noch auf dem durch einen zugesetzten Störschall hervorgerufenen Maß der Maskierung. Mit dieser Beschreibung auftretender Tonhöhenverschiebungen läßt sich ein Funktionsschema der Spektraltonhöhe von Sinustönen anhand von Mithörschwellenmustern entwickeln [7].

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 204, "Gehör", München gefördert.

LITERATUR

- [1] Walliser, K. (1969): Über die Abhängigkeiten der Tonhöhenempfindung von Sinustönen vom Schallpegel, von überlagertem drosselndem Störschall und von der Darbietungsdauer. *Acustica* 21, 211.
- [2] Terhardt, E. (1979): Calculating virtual pitch. *Hearing Research* 1, 155.
- [3] Fastl, H. (1974): Mithörschwellen als Maß für das zeitliche und spektrale Auflösungsvermögen des Gehörs, Dissertation an der Techn. Univ. München.
- [4] Zwicker, E. (1982): *Psychoakustik*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- [5] Fastl, H. (1982): Beschreibung dynamischer Hörempfindungen anhand von Mithörschwellen-Mustern, Hochschulverlag Freiburg.
- [6] Egan, J. P. und Meyer, D. R. (1950): Changes in Pitch of Tones of Low Frequency as a Function of the Pattern of Excitation Produced by a Band of Noise. *J. Acoust. Soc. Amer.* 22, 827.
- [7] Hesse, A. (1986): Ein Funktionsschema zur Beschreibung der Spektraltonhöhe von Sinustönen anhand von Mithörschwellenmustern. Dissertation, eingereicht an der Technischen Universität München.
- [8] Terhardt, E. (1974): Pitch of pure tones: its relation to intensity. In: *Facts and Models in Hearing*, (E. Zwicker and E. Terhardt, eds.), Springer, Berlin, 535.