

TONHÖHEN HARMONISCHER UND INHARMONISCHER KOMPLEXER TÖNE

Andreas Grubert

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

1. Einleitung

Bei der Tonhöhenwahrnehmung komplexer Töne unterscheidet man zwischen zwei Tonhöhenarten: Spektraltonhöhe und Virtuelle Tonhöhe [1]. Die einzelnen Teiltöne eines komplexen Tones erzeugen ihnen zugeordnete Spektraltonhöhen. Verschiebt man einen Teilton eines komplexen Tones, so wird im Spektraltonhöhenmuster die entsprechende Komponente verschoben. Die Virtuelle Tonhöhe wird aus dem Spektraltonhöhenmuster extrahiert.

Der Einfluß von Frequenzverschiebungen eines einzelnen Teiltones auf die Tonhöhe eines komplexen Tones wurde neuerdings von Moore et al. [2] untersucht. Sie fanden für Verschiebungen einzelner Teiltöne um 2%-3% Verschiebungen der Virtuellen Tonhöhe um maximal 0.5%, die bei weiter zunehmender Inharmonizität (bis +8%) wieder auf ca. 0.25% zurückgingen.

Die Aussagen des Modells der Virtuellen Tonhöhe [3] stimmen bei Verschiebung einzelner Teiltöne bis zu 3% mit diesen Ergebnissen weitgehend überein. Verschiebungen um mehr als 3% haben dem Modell zufolge nahezu keinen Einfluß auf die Virtuelle Tonhöhe. Moore et al. fordern auf Grund der Diskrepanz zwischen ihren Daten und den Modellaussagen eine Modifizierung des Modells.

Um diesem Problem nachzugehen, wurden folgende Untersuchungen angestellt:

- (a) Die von Moore et al. beschriebenen Versuche wurden - im wesentlichen unter denselben Bedingungen- wiederholt.
- (b) Die experimentellen Ergebnisse wurden mit den Modellergebnissen verglichen.
- (c) In einer zusätzlichen Meßreihe wurden die Versuchspersonen angewiesen, anstelle der Virtuellen Tonhöhe (d.h. der Tonhöhe des gesamten komplexen Tones) die Spektraltonhöhe des verschobenen 1. Teiltones zu beurteilen. Auf diese Weise soll vor allem verifiziert werden, daß die beiden Tonhöhenarten unabhängig voneinander beurteilt werden können.

2. Einfluß von Frequenzverschiebungen der 1. Harmonischen2.1 Virtuelle Tonhöhe

Sieben geübte Versuchspersonen sollten einen Vergleichs-Sinuston, mit einem Pegel von 60 dB, auf die Virtuelle Tonhöhe verschiedener komplexer Töne, die im Folgenden als Testklänge bezeichnet werden, einstellen. Die Testklänge wurden aus den ersten 10 Harmonischen, mit den Grundfrequenzen $f_B = (150, 156, 162, 200, 208, 216, 400, 416, 432 \text{ Hz})$, gebildet. Die Wahl der eng benachbarten Grundfrequenzen erfolgte, um individuelle Unterschiede in den Frequenz-Tonhöhenkennlinien der Versuchspersonen erkennen und ausmitteln zu können. Für die Auswertung wurden deshalb jeweils drei benachbarte Grundfrequenzen zu einer Gruppe zusammengefaßt. Alle zehn Teiltöne eines Testklanges hatten gleiche Amplitude; der Gesamtpegel betrug 60 dB. Die Frequenz des ersten

Teiltönen wurde in 1% Schritten bis zu +8% verschoben. Somit ergaben sich für eine Testreihe 81 Klänge, die in zufälliger Reihenfolge sieben geübten Versuchspersonen in einer schallgedämmten Meszkabine dargeboten wurden. Die Darbietung erfolgte über einen freifeldentzerrten Kopfhörer BEYER DT 48. Die Dauer des Testschalls betrug 800 ms. Nach einer ebenso langen Pause mußte die Versuchsperson den Vergleichs-Sinuston auf die Virtuelle Tonhöhe des Testklanges einstellen. Die Versuchsperson hatte hierzu beliebig lange Zeit. Jeder Testklang wurde pro Versuchsreihe zweimal in Folge dargeboten, um der Versuchsperson eine Grob- und eine Feineinstellung zu ermöglichen.

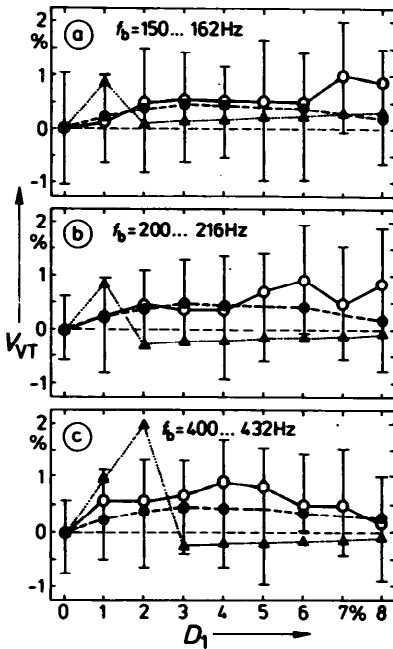


Fig. 1: Relative Verschiebung V_{VT} der Virtuellen Tonhöhe in Abhängigkeit von der relativen Verschiebung D_1 der 1. Harmonischen eines komplexen Tones. Unterschiedliche Grundfrequenzen sind eingetragen. Offene Kreise: Zentralwerte und Wahrscheinliche Schwankungen von 7 Versuchspersonen; ausgefüllte Kreise: Daten von Moore et al. (1985); Dreiecke: Berechnungen nach dem Modell der Virtuellen Tonhöhe.

Fig. 1 zeigt die Messergebnisse in Abhängigkeit von der relativen Frequenzverschiebung D_1 des ersten Teiltones,

$$D_1 = (f_1 - f_b) / f_b \quad (1)$$

V_{VT} bezeichnet die relative Verschiebung der Virtuellen Tonhöhe gegenüber dem harmonischen Fall;

$$V_{VT} = (f_V - f_{V0}) / f_{V0} \quad (2)$$

Hier bedeutet f_V die Vergleichstonfrequenz bei $D_1 \neq 0$, und f_{V0} bedeutet den entsprechenden Wert bei $D_1 = 0$.

Offene Symbole bezeichnen die Zentralwerte für die zusammengefaßten Messungen mit den Grundfrequenzen $f_b = 150 \dots 162$ Hz; $f_b = 200 \dots 216$ Hz; $f_b = 400 \dots 432$ Hz. Horizontale Linien geben die Wahrscheinlichen Schwankungen an. Pro Punkt wurden 66 Einstellungen gemacht, wobei vier Versuchspersonen je vier, und drei Versuchspersonen je zwei Versuchsreihen absolvierten. Dreiecke und punktierte Linien zeigen die Modellberechnungen. Ausgefüllte Kreise und gestrichelte Linien gelten für die gemittelten Ergebnisse von Moore et al..

Bei den Grundfrequenzen $f_b = 150 \dots 162$ Hz, und $f_b = 200 \dots 216$ Hz zeigt sich mit zunehmender Verschiebung des ersten Teiltones ein leichter Anstieg der Virtuellen Tonhöhe der Testklänge. Bei der Grundfrequenz 400 Hz zeigt sich bei Verschiebung bis 5% ein leichter Anstieg, und ab 5% ein leichter Abfall der Virtuellen Tonhöhe.

Die Berechnungen nach dem Modell (punktiert) ergeben bis zu einer Verschiebung des ersten Teiltones um 1-2% eine Verschiebung der Virtuellen Tonhöhe, welche gleich D_1 ist. Bei weiter steigender Inharmonizität wird im Modell die Virtuelle Tonhöhe von einer höherliegenden spektralen Komponente gebildet und leicht erhöht. Diese Erhöhung ist nach der Theorie der Virtuellen Tonhöhe auf die Tonhöhenverschiebung durch Teilmaskierung zurückzuführen, und hat primär mit der Frequenzverschiebung des ersten Teiltones nichts zu tun.

Obwohl Moore keine Angaben über Streuungen seiner Versuchsergebnisse macht, kann man von einer guten Übereinstimmung mit unseren Ergebnissen sprechen. Der Abfall bei Verschiebungen um mehr als 3% kann für die Grundfrequenzen $f_b=150..162$ Hz, und $200..216$ Hz als nicht signifikant angesehen werden.

2.2 Spektraltonhöhe des verschobenen Teiltones

Da die Tonhöhe eines komplexen Tones immer mehrdeutig ist, und insbesondere im inharmonischen Fall oft mehrere Tonhöhen analytisch wahrgenommen werden können, sollte in einem weiteren Versuch die Spektraltonhöhe des verschobenen Teiltones ermittelt werden. Die Versuchsbedingungen und der Versuchsablauf waren mit den in 2.1 genannten identisch. Die Grundfrequenzen betragen $f_b=150$, 200 und 400 Hz. Die Darbietung der daraus resultierenden 27 Klänge erfolgte in zufälliger Folge. Aufgabe der Versuchspersonen war es, den Sinus-Vergleichston auf die Tonhöhe der verschobenen ersten Harmonischen einzustellen.

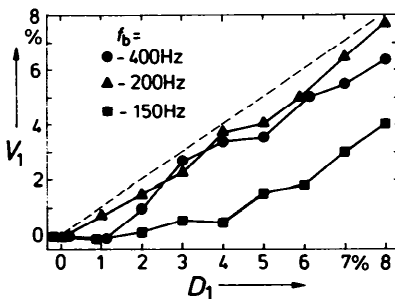


Fig. 2: Relative Verschiebung V_1 der Spektraltonhöhe der 1. Harmonischen in Abhängigkeit der Verschiebung D_1 des 1. Teiltones. Verschiedene Grundfrequenzen sind eingetragen; gestrichelte Linie: theoretische Gerade für $V_1=D_1$.

Fig. 2 zeigt die Meßergebnisse in Abhängigkeit von der relativen Frequenzverschiebung D_1 (Gl. 1) des 1. Teiltones. V_1 bezeichnet die relative Verschiebung der Tonhöhe des ersten Teiltones gegenüber dem harmonischen Fall; sie wird gemessen durch

$$V_1 = (f_V - f_{V0}) / f_{V0}. \quad (3)$$

Dargestellt sind die Zentralwerte von je 10 Einstellungen pro Punkt, wobei vier Versuchspersonen an zwei, und zwei Versuchspersonen an einer Versuchsreihe beteiligt waren. Quadrate gelten für eine Grundfrequenz $f_b=150$ Hz, Dreiecke für $f_b=200$ Hz und Kreise für $f_b=400$ Hz.

Die gestrichelte Linie zeigt die Gerade $V_1=D_1$. Zwar ist einerseits offensichtlich, daß die Ergebnisse von denjenigen der vorhergehenden Messungen der Virtuellen Tonhöhe abweichen, jedoch ist bisher noch ungeklärt, warum in Fig. 2 die Meßpunkte von der Geraden $V_1=D_1$ systematisch abweichen.

3.Schlußbemerkung

Es wurde der Einfluß von Frequenzverschiebungen des ersten Teiltones von harmonischen komplexen Tönen auf die Virtuelle Tonhöhe untersucht. Dabei wurde festgestellt, daß mit wachsender Frequenzverschiebung des ersten Teiltones die Virtuelle Tonhöhe leicht erhöht wird. Diese Ergebnisse stimmen mit denen von Moore et al. [2] gut überein. Berechnungen mit dem Modell der Virtuellen Tonhöhe geben die gefundenen Tonhöhenverschiebungen im wesentlichen korrekt wieder. Daraus wird geschlossen, daß die beobachteten Verschiebungen der Virtuellen Tonhöhe als Folge der zunehmenden Teilmaskierung höherer Spektralkomponenten anzusehen sind. Die Tonhöhenverschiebungen sind also nicht durch die Frequenzverschiebung des ersten Teiltones als solche zu erklären, sondern wurden indirekt, d.h. über den Maskierungseffekt auf die Spektraltonhöhen der 2. oder weiterer Harmonischer hervorgerufen. Zu einer Korrektur des Modells der Virtuellen Tonhöhe, besteht daher kein Anlaß.

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

Literatur

- [1] Terhardt, E. (1972): Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. *Acustica* 26,173.
- [2] Moore B.C.J, Glasberg B.R. and Peters R.W. (1985) : Relative dominance of individual partials in determining the pitch of complex tones. *J.Acoust.Soc.Am.*, 77, 1853-1860.
- [3] Terhardt E., Stoll G. and Seewann M. (1982): Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. *J.Acoust.Soc.Am.*, 71, 679.