

## Zur Tonhöhe inharmonischer Komplexer Töne

W. SCHMID

(Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München)

### Einleitung

Komplexe Töne können je nach spektralem Aufbau bezüglich der Wahrnehmung der Tonhöhe mehrdeutig sein. Können einzelne Teiltöne vom Gehör durch Spektralanalyse aufgelöst werden, so kann durch „analytisches Hören“ die Wahrnehmung einzelner „Spektraltonhöhen“ ermöglicht werden; zusätzlich entstehen durch „synthetische“, also ganzheitliche auditive Wahrnehmung „Virtuelle Tonhöhen“ [1].

Ein harmonischer Komplexer Ton liegt dann vor, wenn es sich bei den Teiltonfrequenzen  $f_n$  um ganzzahlige Vielfache einer gemeinsamen Basisfrequenz  $f_b$  handelt.

Er wird als inharmonischer Komplexer Ton bezeichnet, wenn das Teiltongefüge additiv um einen bestimmten Frequenzbetrag  $\delta f$  verschoben wurde.

In der vorliegenden Arbeit wird über psychoakustische Experimente mit derartigen Schallen berichtet; ein Meßverfahren zur direkten Ermittlung der Ausgeprägtheit ihrer Virtuellen Tonhöhen wird vorgestellt.

### Hörversuche

Die Experimente wurden mit acht normalhörenden Versuchspersonen im Alter von 26 bis 49 Jahren durchgeführt. Fünf Versuchspersonen (VP) können als geübt bis sehr erfahren in Hörversuchen bezeichnet werden; alle verfügen über gute bis sehr umfassende musikalische Ausbildung.

Bei den digital synthetisierten Testschallen handelte es sich um sog. „unvollständige Komplexe Töne“ mit der Basisfrequenz  $f_b = 250$  Hz, bestehend aus neun Spektrallinien mit den Frequenzen 1000, 1250, ..., 2750, 3000 Hz. Für die additive spektrale Verschiebung  $\delta f$  aller Teiltonfrequenzen wurden Werte gewählt zu  $n \cdot f_b / 10 = n \cdot 25$  Hz ( $n \in \{0, \pm 1, \dots, \pm 9, \pm 10\}$ ); die Pegel der Spektralkomponenten (alle in Sinusphase!) waren gewichtet durch ein elektrisches Filter mit einer Dämpfung von 10dB/Dekade.

Alle Komplexen Töne wurden den Versuchspersonen in schallisierter Meßkabine monotonisch über einen elektrodynamischen Kopfhörer (Beyer DT 48) mit vorgeschaltetem Freifeldentzerrer [2] mit einem Schallpegel von  $L = 58$  dB  $\pm 1$  dB eingespielt.

### Tonhöhen inharmonischer Komplexer Töne

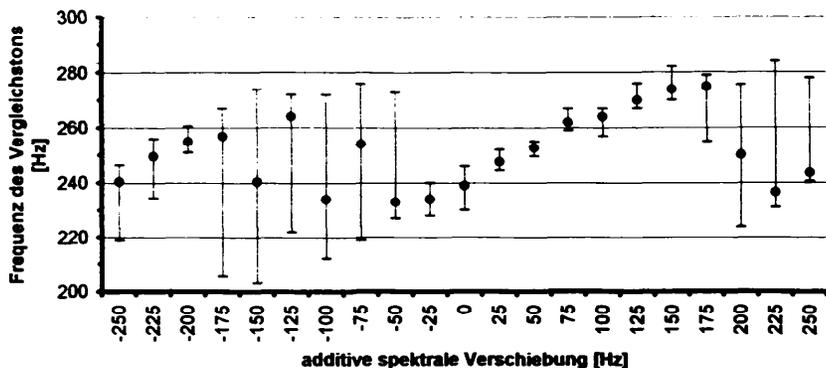
Testschalle mit unterschiedlichen spektralen Verschiebungen wurden in randomisierter Folge dargeboten. Die Versuchspersonen konnten während der maximalen Testschalldauer von einer Minute beliebig oft auf einen Sinus-Vergleichston (Frequenz  $f_v$ , Schallpegel  $L = 50$  dB) umschalten.

Ihre Aufgabe bestand darin, mittels eines Wendel-Potentiometers die Frequenz des Vergleichstons so einzustellen, daß seine Tonhöhe der Tonhöhe des Testschalls entspricht. Der Frequenz-Einstellbereich war begrenzt auf 100 ... 300 Hz.

### Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt die Frequenzen der Sinus-Vergleichstöne für die jeweiligen Testschalle. Die aus der Literatur (z. B. [2]) bekannten Effekte sind auch hier zu finden: die beurteilte Tonhöhe entspricht offensichtlich ungefähr der Basisfrequenz  $f_b$  und steigt für  $\delta f = -50$  ... ca. +150 Hz monoton mit zunehmender spektraler Verschiebung des Komplexen Tons an; die Streuungen der Vergleichstonfrequenzen sind hier gering. Bei großen Absolutbeträgen

der spektralen Verschiebung werden die Interquartilbereiche der Vergleichstonfrequenzen größer. De Boer [3] nannte diese Bereiche treffend „regions of doubt“.



**Abb. 1**

Mediane u. Interquartilbereiche der Vergleichstonfrequenzen für die Komplexen Töne als Funktion ihrer spektralen Verschiebung  $\delta f$ ; jeder Testschall wurde 8 mal dargeboten; Einstellbereich für Vergleichstonfrequenz: 100 ... 300Hz.

Tönhöhen können, wie frühere Untersuchungen [4] für unterschiedlichste Schalle gezeigt haben, nicht nur hinsichtlich der Dimension „hoch  $\leftrightarrow$  tief“, sondern auch bezüglich der Dimension „unausgeprägt  $\leftrightarrow$  ausgeprägt“ skaliert werden. Somit bietet sich folgende Hypothese zur Erklärung großer Streuungen von Vergleichstonfrequenzen an:

die Tonhöhe des Testschalls, auf die der Vergleichston abgeglichen werden könnte, ist nicht deutlich genug erkennbar, m. a. W.: die Ausgeprägtheit dieser Tonhöhe ist zu gering. Diese Annahme wird gestützt durch etliche Hinweise, die in der Literatur zu finden sind zur Qualität dieses Phänomens bei inharmonischen Komplexen Tönen (z. B. Fletcher [5]: „It is found that such a shift destroys the musical quality which the original tone possessed.“).

#### **Ausgeprägtheit der Tonhöhe inharmonischer Komplexer Töne**

Anstatt nun z. B. dem Vorschlag von Rakowski [6] zu folgen und die Streuung der Vergleichstonfrequenz als (indirektes) Maß für die Ausgeprägtheit der interessierenden Tonhöhe zu verwenden, wird hier die bereits sehr bewährte (s. z. B. [4]), direkte Untersuchungsmethode „Größenschätzung mit Ankerschall“ gewählt.

Exemplarisch wurde die Ausgeprägtheit jener Virtuellen Tonhöhe untersucht, die der Basisfrequenz des unvollständigen harmonischen bzw. inharmonischen Komplexen Tons entspricht.

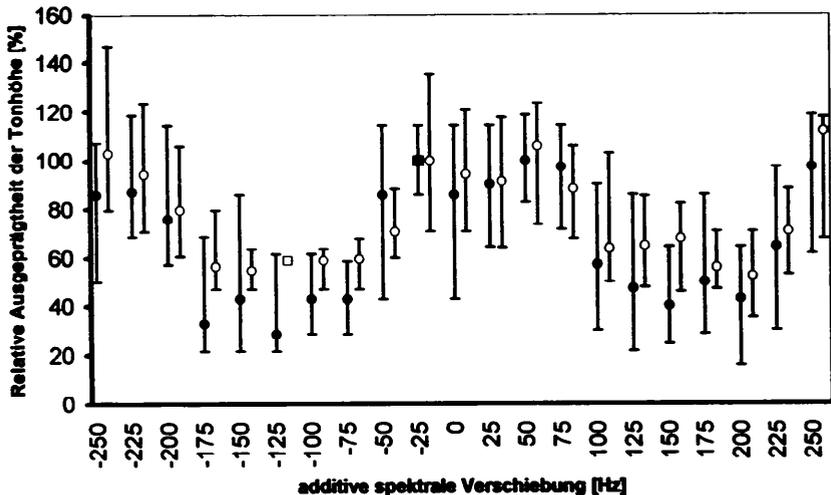
Dazu wurden denselben acht Versuchspersonen Schallimpulse (gaußförmige Hüllkurve, Dauer 1200ms, Zwischenpausen 1500ms) folgendermaßen eingespielt: 2 Sinustonimpulse (Frequenz  $f_{v_n}$ , Schallpegel  $L = 50$  dB) als Ankerschall, 2 Testschallimpulse (mit spektraler Verschiebung  $\delta f_n$ ). Diese Sequenz wurde dann wiederholt. Vor der nächsten Sequenz (mit anderen, aus einer Zufallsfolge gewählten Werten für  $f_{v_n}$  und  $\delta f_n$ ) erfolgte eine Pause von

vier Sekunden.

Aufgabe war, die Ausprägtheit der Tonhöhe des Testschalls in dem Tonhöhenbereich zu beurteilen, den der „Ankerschall“ vorgab. Der Ausprägtheit (Deutlichkeit) der Tonhöhe des Ankerschalls war die Zahl „100“ zugeordnet.

Als Ankerschall wurde ein Sinuston gewählt, da frühere Arbeiten [4] aufgezeigt haben, daß Sinustöne im Vergleich zu anderen Schallen sehr deutlich ausgeprägte Tonhöhenempfindungen hervorrufen. (Bei den Frequenzen  $f_{vn}$  handelte es sich um die Zentralwerte der Sinus-Vergleichstonfrequenzen für den jeweiligen Testschall, die aus dem oben beschriebenen Tonhöhenabgleich gewonnen wurden.)

Es ist jedoch bekannt, daß allein durch die Festlegung eines bestimmten Ankerschalles die Urteile der VP beeinflusst werden können („Ankereffekte“). Die Ausprägtheit der Tonhöhe des Ankerschalls im ersten Versuchsdurchlauf war groß. Im zweiten Durchgang wurde deswegen als Ankerschall der Testschall mit der spektralen Verschiebung  $\delta f = -125$  Hz verwendet (Symbol in Abb. 2: nicht ausgefülltes Quadrat); die relative Ausprägtheit der zu beurteilenden Tonhöhe hatte sich bei diesem Schall im ersten Durchgang als recht gering erwiesen (Zentralwert ca. 28 %). Jeweils vor den Anker- und Testschallimpulsen wurden zwei „Hinweis-Tonimpulse“ eingespielt (Frequenz  $f_{vn}$ ,  $L = 50$  dB). Die VP wurden gebeten, nur die Ausprägtheit der Tonhöhe in dem Bereich zu beurteilen, den der „Hinweisschall“ vorgab. (Der Begriff „Tonhöhenbereich“ wurde durch „musikalischer Ganzton“ näher erklärt.)



**Abb. 2**

Relative Ausprägtheit der Virtuellen Tonhöhe der Komplexen Töne als Funktion ihrer spektralen Verschiebung  $\delta f$ ; Mediane u. Interquartilbereiche aus je 4 Urteilen pro Testschall von 8 VP.

Ausgefüllte Symbole: Ankerschall: Sinuston; alle Daten wurden so normiert, daß der maximale Medianwert „100“ beträgt (Quadrat).

Nicht ausgefüllte Symbole: Ankerschall: Komplexer Ton (Quadrat); Normierung auf maximalen Medianwert.

Ergebnisse:

Die Ergebnisse für beide Ankerschalle sind aus Abbildung 2 zu entnehmen. Wie vermutet, zeigt sich deutlich, daß für zunehmende Absolutbeträge der spektralen Verschiebung des Komplexen Tons die Ausgeprägtheit der Virtuellen Tonhöhe (die der Basisfrequenz entspricht) geringer wird. Bei Verschiebungen von ca. -175 bis -75 Hz bzw. ca. +100 bis +200 Hz liegen die Zentralwerte nur noch bei etwa 40 bis 60 %. Für Werte von  $\delta f$ , die ungefähr gleich der Basisfrequenz sind, erreicht die Ausgeprägtheit der untersuchten Virtuellen Tonhöhe wieder ca. 100%. Die relativ großen Interquartilbereiche resultieren im wesentlichen nicht aus den intraindividuellen Schwankungen, sondern daraus, daß einige VP die Skalierung mittels eines kleinen Zahlenwertebereichs durchführen (z. B. 85 bis 110), die Werte jedoch mit sehr großer Wiederholgenauigkeit vergeben; andere VP bedienen sich eines größeren Wertebereichs.

Naheliegend war ein Vergleich der gewonnenen Daten mit den Werten für „pitch weight“, die der Algorithmus nach Terhardt [7] liefert, welcher die Theorie der Virtuellen Tonhöhe zur Grundlage hat. Die Daten für „Ausgeprägtheit der Tonhöhe“ und „pitch weight“ können zwar nicht direkt in Beziehung gesetzt werden. Es kann jedoch festgestellt werden, daß sich die Korrelationen dieser Größen für die untersuchte Virtuelle Tonhöhe der Komplexen Töne als sehr hoch erwiesen haben.

**Zusammenfassung**

Es wurde gezeigt, daß die Ausgeprägtheit der Virtuellen Tonhöhe, die der Basisfrequenz des untersuchten harmonischen Komplexen Tons entspricht, drastisch abnimmt, falls sein Teiltongefüge spektral verschoben wird. Seine zunehmende „mathematische Inharmonizität“ findet also Ausdruck im zunehmenden Verlust einer ausgeprägten Tonhöhe. Die Meßmethode der „Größenschätzung mit Ankerschall“ führte auch bei den hier verwendeten Testschallen zu einer zuverlässigen Skalierung der Ausgeprägtheit der Tonhöhe.

*Der Verfasser dankt Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Fastl für viele wertvolle Hinweise und für die kritische Durchsicht des Manuskripts.*

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

**Literatur**

- [1] Terhardt, E. et al., Tonhöhenmehrdeutigkeit, Tonverwandtschaft und Identifikation von Sukzessivintervallen. *Acustica* 61, 57-66 (1986).
- [2] Zwicker, E., Fastl, H., *Psychoacoustics. Facts and models.* Springer-Verlag, Heidelberg, New York 1990.
- [3] de Boer, E., Pitch of Inharmonic Signals. *Nature* 178, 535-536 (1956).
- [4] Fastl, H., Stoll, G., Scaling of pitch strength. *Hearing Research* 1, 293-301 (1979).
- [5] Fletcher, H., The physical criterion for determining the pitch of a musical tone. *The Physical Review, Second Series, March 1924, Vol. 23, No. 3, 427-437.*
- [6] Rakowski, A., Measurements of pitch. *Catgut Acoustical Society Newsletter* 27, 9-11 (1977).
- [7] Terhardt, E., Calculating virtual pitch. *Hearing Research* 1, 155-182 (1979).