

Akzentuierung und Ausprägtheit von Spektraltonhöhen bei harmonischen Komplexen Tönen

J. Chalupper, W. Schmid
Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München

Einleitung

Neben Virtuellen Tonhöhen können bei harmonischen Komplexen Tönen auch zu einzelnen Teiltönen gehörige Spektraltonhöhen wahrgenommen werden [TERHARDT 1979].

Durch geeignete Verfahren können einzelne Teiltöne akzentuiert und damit besser aus dem Gesamtklang „herausgehört“ werden. Bisher wurde dieses Phänomen vor allem über Erkennungsraten von Hintergrundmelodien, mit dem Ziel, eine Wahrnehmungsschwelle zu finden, untersucht [BAUMANN 1995]. Die Hörempfindung „Ausprägtheit der Tonhöhe“ (ATH) stellt ein psychoakustisches Maß für die Deutlichkeit einer wahrgenommenen Tonhöhe dar und ermöglicht eine quantitative Untersuchung von Verfahren zur Teiltonakzentuierung insbesondere auch im überschweligen Bereich.

Im folgenden werden deshalb vier Akzentuierungsverfahren (Erhöhung des Teiltonpegels, Amplitudenmodulation, Frequenzmodulation und statische Verstärkung) hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Ausprägtheit der Tonhöhe untersucht.

Experimente

Die Ausprägtheit der Tonhöhe wurde in allen vier Versuchen per „Größenschätzung mit Ankerschall“ gemessen, wobei der Anker jeweils ein dem zu beurteilenden Teilton des Komplexen Tons in Frequenz und Pegel gleicher Sinuston war. Dem Ankerschall wurde jeweils der Wert „100“ fest zugeordnet. Die Größe der Wahrscheinlichen Schwankungen war stark vom Testschall abhängig, im Mittel jedoch nicht größer als bei vergleichbaren Versuchen zur ATH.

Der Vergleichstonpegel L_{TV} (Versuch I. und V.) wurde durch Einregela bestimmt. Alle Schalle wurden digital synthetisiert, gaußmoduliert und über einen freifeldentzerrten Kopfhörer (DT 48) dargeboten [ZWICKER, FASTL 1990].

I. Erhöhung des Teiltonpegels

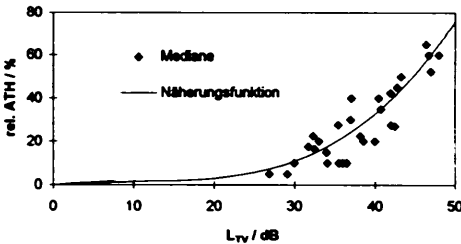


Abb. 1 Abhängigkeit der Ausprägtheit der Tonhöhe vom Pegel des Vergleichstons. Dargestellt sind Mediane (aus jeweils 32 Urteilen) und eine daraus abgeleitete Näherungsfunktion (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,8$)

An neun verschiedenen Komplexen Tönen (inharmonische und vollständige und unvollständige harmonische Komplexe Töne mit drei unterschiedlichen Basisfrequenzen f_c : 110, 370, 820 Hz) wurden bei insgesamt 30 Teiltönen die Ausprägtheit der Tonhöhe und der Pegel eines gleichfrequenten und gleichlauten Sinustons ermittelt. Die verwendeten vollständigen harmonischen Komplexen Töne bestanden aus sechs Teiltönen konstanten Pegels; bei den unvollständigen fehlten demgegenüber die erste und die zweite Harmonische; die Teiltonabstände der inharmonischen Töne wurden so gewählt, daß möglichst wenig Schwebungen auftraten und die Teiltontrennungsschwelle nicht unterschritten wurde. Die Komplexen Töne wurden mit einem Gesamtpegel von 60 dB dargeboten. An den Versuchen nahmen jeweils acht Versuchspersonen (VPen) teil, die jeden Teilton viermal beurteilten. Die so gewonnenen Wertepaare aus Ausprägtheit der Tonhöhe und Vergleichstonpegel sind in Abb. 1 dargestellt.

Es ist unschwer zu erkennen, daß mit zunehmendem Vergleichstonpegel die Ausprägtheit zunimmt. Dieser Zusammenhang kann durch ein Polynom 3. Ordnung gut angenähert werden, sodaß es möglich ist, aus

dem Vergleichstonpegel die Ausprägtheit zu berechnen. Der Pegel des Vergleichstons ist ein Maß für die gedrosselte Lautheit eines Teiltons und kann über die Kurven gleicher Lautheit und die gedrosselte Lautheit [ZWICKER 1987] aus den Teiltonpegeln beliebiger Komplexer Töne ermittelt werden. Zu beachten ist, daß der in Abb. 1 dargestellte funktionale Zusammenhang nur für gedrosselte Teiltöne gilt; bei ungedrosselten Sinustönen verläuft die ATH über dem Pegel deutlich flacher [FASTL 1989]. Wird der Pegel eines Teiltons also immer weiter erhöht, bis er als ungedrosselt empfunden wird, so wird seine Ausprägtheit relativ zur Pegelerhöhung immer weniger - entsprechend dem Verlauf der gedrosselten Lautheit - zunehmen; im ungedrosselten Fall schließlich ist keine Akzentuierung - im Sinne eines verbesserten „Heraushörens“ - mehr möglich.

II. Amplitudenmodulation

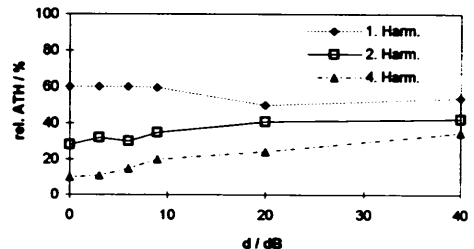


Abb. 2 Ausprägtheit der Tonhöhe der amplitudenmodulierten Teiltöne in Abhängigkeit vom Modulationsmaß $d = 20 \log((1+m)/(1-m))$. Mediane (aus jeweils 40 Urteilen) bei drei verschiedenen Harmonischen f_n gemittelt über zwei Basisfrequenzen (164 Hz und 392 Hz). $f_{mod} = 5$ Hz.

Die ATH amplitudenmodulierter Teiltöne wurde von fünf VPen je viermal beurteilt. Die verwendeten harmonischen Komplexen Töne bestanden aus 20 Teiltönen, wobei der Pegel bei den ersten zehn Teiltönen konstant war, um dann mit der Teiltonnummer um jeweils 6 dB abzufallen. Jeweils die erste, zweite und vierte Harmonische wurde bei Basisfrequenzen von 164 Hz und 392 Hz untersucht. Der Darbietungspegel betrug 73 dB. Da sich bei den verwendeten Basisfrequenzen keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der ATH feststellen ließen, wurden die Meßwerte zu einem Datensatz zusammengefaßt.

Abb. 2 zeigt, daß grundsätzlich zwischen Grundton und höheren Harmonischen unterschieden werden muß:

1. Die ATH der 1. Harmonischen nimmt mit zunehmendem Modulationsmaß leicht ab und bleibt ab ca. 20 dB praktisch konstant.
2. Die ATH der höheren Harmonischen nimmt zu und kommt bei ca. 20 dB in eine Sättigung.

Die erste Harmonische ist der am schwächsten gedrosselte Teilton eines harmonischen Komplexen Tons und daher relativ zu den höheren Harmonischen „a priori“ (durch Teiltonpegelerhöhung) akzentuiert - außerdem wird er von der Virtuellen Tonhöhe „oberlagert“, sodaß er als nahezu ungedrosselt angesehen werden kann. Bei ungedrosselten Sinustönen wurde mit zunehmendem Modulationsmaß ebenfalls eine Abnahme der ATH festgestellt [SCHMID 1997].

Ist ein Teilton bereits stark akzentuiert, so hat eine zusätzliche Amplitudenmodulation offensichtlich nur wenig oder sogar vermindern den Einfluß auf die Ausprägtheit seiner Tonhöhe.

III. Frequenzmodulation

Die ATH frequenzmodulierter Teiltöne wurde bei den gleichen Schallpegeln von den gleichen VPen mit dem gleichen Prozedur wie bei den amplitudenmodulierten Tönen beurteilt. Ähnlich den Ergebnissen bei Amplitudenmodulation läßt sich folgendes feststellen (Abb. 3):

1. Die ATH der 1. Harmonischen bleibt mit zunehmendem Frequenzhub praktisch konstant.

2. Die ATH der höheren Harmonischen nimmt zu und kommt bei einem Hub von ca. 7 % in eine Sättigung, bzw. nimmt leicht ab.

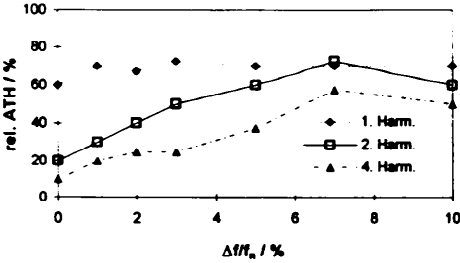


Abb. 3 Ausprägtheit der Tonhöhe frequenzmodulierter Teiltone in Abhängigkeit vom relativen Frequenzhub $\Delta f/f_0$. Mediane (aus jeweils 40 Urteilen) bei drei verschiedenen Harmonischen f_n gemittelt über zwei Basisfrequenzen (164 Hz und 392 Hz). $f_{mod} = 5$ Hz.

Akzentuierung durch Frequenzmodulation hat auf die ATH offensichtlich nahezu die gleichen Auswirkungen wie Akzentuierung durch Amplitudenmodulation. Insbesondere wird auch hier deutlich, daß die durch dieses (Akzentuierungs-)Verfahren erreichbare Akzentuierung bzw. Zunahme der ATH in erster Linie davon abhängt, wie stark der betreffende Teilton „a priori“ akzentuiert ist.

IV. Statische Verstimmung

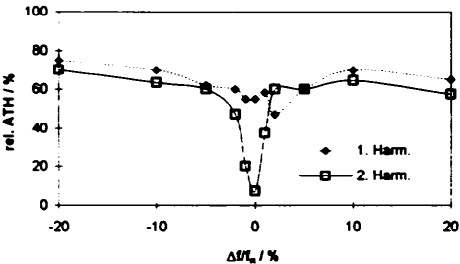


Abb. 4: relative ATH statisch verstimmter Teiltöne in Abhängigkeit von der relativen Frequenzverschiebung $\Delta f/f_0$. Mediane (aus jeweils 32 Urteilen) bei zwei verschiedenen Harmonischen f_n gemittelt über zwei Basisfrequenzen (164 Hz und 392 Hz).

Dieser Versuch wurde ebenfalls wie unter II. beschrieben durchgeführt. Allerdings standen nur vier VPen zur Verfügung. Die Meßwerte beider Basisfrequenzen wurden zusammengefaßt, sodaß einem Median 32 Meßwerte zugrundeliegen. Abb. 4 zeigt, daß auch hier - wie bei AM und FM - zwischen erster und höheren Harmonischen unterschieden werden muß. Der Grundton wird durch die Verschiebung kaum beeinflusst. Der zweite Teilton dagegen besitzt im unverstimmten Fall eine ATH unter 10 %, die bis zu einer Verstimmung von ± 10 % auf das sechsfache anwächst und dann konstant bleibt bzw. sogar leicht abnimmt.

Bei einer Verstimmung von ca. 2 % sind leichte „Überschwinger“ erkennbar: beim Grundton nach unten, beim 2. Teilton nach oben. Die so verstimmten Teiltöne schweben stark, d.h. schwanken in ihrer Lautstärke. Aus II ist bekannt, daß AM bei der ersten Harmonischen eine verminderte, bei höheren Harmonischen jedoch steigende Wirkung auf die ATH hat. Es handelt sich hier offensichtlich um eine Überlagerung zweier Akzentuierungsverfahren.

V. Vergleichstonpegel bei statischer Verstimmung

Bei einem weiteren Akzentuierungsverfahren (Adaptation bzw. „enhancement“) wird von Mithörschwellenablenkungen bei den akzentuierten Teiltonfrequenzen berichtet [VIEMEISTER 1980]; dadurch

wird die Akzentuierung gewissermaßen auf eine Teiltonpegelerhöhung zurückgeführt. Am Beispiel eines statisch verstimmten Teiltönen wird deshalb untersucht, ob auch die durch andere Verfahren erzielte Akzentuierung auf den unter I. gefundenen Zusammenhang zwischen ATH und L_{TV} zurückgeführt werden kann.

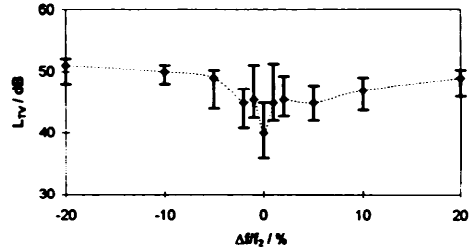


Abb. 5 Vergleichstonpegel eines statisch verstimmten Teiltönen in Abhängigkeit von der relativen Frequenzverschiebung $\Delta f/f_0$. Mediane und Interquartile (aus jeweils 28 Urteilen) beim 2. Teilton ($f_2 = 328$ Hz) eines harmonischen Komplexen Tons mit $f_0 = 164$ Hz.

Dazu wurde für einen Teilton, dessen ATH unter IV. gemessen wurde, der Vergleichstonpegel bestimmt. Dieser besitzt im harmonischen Fall sein Minimum (Abb. 5), wächst bis zu einer Verstimmung von ± 10 % stark (ca. 10 dB) an, um dann nur noch leicht zuzunehmen bzw. konstant zu bleiben; bei 2 % sind leichte Überschwinger zu sehen. Offensichtlich werden verstimmte Teiltöne lauter wahrgenommen. Die Ähnlichkeit der Kurvenverläufe in Abb. 4 und Abb. 5 weist auf eine Korrelation zwischen ATH und L_{TV} hin. Stellt man die Ergebnisse aus IV. und V. in einem ATH- L_{TV} -Diagramm dar, erhält man denselben funktionalen Zusammenhang wie in Abb. 1.

Die Zunahme der ATH verstimmter Teiltöne kann also auf eine Lautheitszunahme zurückgeführt werden.

Zusammenfassung

Durch Teiltonpegelerhöhung, Amplitudenmodulation, Frequenzmodulation und statische Verstimmung kann ein Teilton eines harmonischen Komplexen Tons akzentuiert und damit seine Ausprägtheit der Tonhöhe gesteigert werden. Bei bereits akzentuierten Tönen kann eine weitere Anwendung von Akzentuierungsverfahren zu einer Sättigung und sogar Verminderung der ATH führen. Daten aus der Literatur und die Gegenüberstellung von ATH und L_{TV} verstimmter Teiltöne legen die Vermutung nahe, daß akzentuierte Teiltöne lauter wahrgenommen werden als nichtakzentuierte.

Die Autoren danken M. Frühmann für die Durchführung eines Teils der Messungen und Prof. Dr.-Ing. H. Fastl für wertvolle Hinweise.

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

Literatur

- BAUMANN, U. 1995, Ein Verfahren zur Erkennung und Trennung multipler akustischer Objekte. München: Utz, 1995. (Diss. TUM 1995)
- FASTL, H. 1989, Pitch Strength of Pure Tones. In: Proc. 13. ICA Belgrade, Vol. 3, 11-14.
- SCHMID, W. 1997, Untersuchungen zur Ausprägtheit der Tonhöhe gedrosselter und amplitudenmodulierter Sinustöne. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 97.
- TERHARDT, E. 1979, Calculating Virtual Pitch. Hearing Research 1, 155-182.
- VIEMEISTER, N. 1980, Adaptation of Masking. In: Psychophysical, physiological and behavioral studies in hearing, (G. van den Brink, F. A. Bilsen, eds.) Delft, University Press, 190-199.
- ZWICKER, E. 1987, Berechnung partiell maskierter Lautheiten auf der Grundlage von ISO 532 B. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '87, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 181-184.
- ZWICKER, E., FASTL, H. 1990, Psychoacoustics, Facts and Models. Heidelberg, New York: Springer-Verlag.