

Zur Ausprägtheit der Tonhöhe von Rauschen mit zeitvarianter Bandbegrenzung

W. Schmid

Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München

1. Einleitung

Eine langsame Variation der Tonhöhe kann zu einer Erhöhung aber auch einer Reduktion der Ausprägtheit der Tonhöhe (ATH) führen. Diesbezüglich wichtige, auf den ersten Blick widersprüchliche Ergebnisse neuerer Untersuchungen sind: Bei isolierter Darbietung eines Testschalls: Frequenzmodulation eines Sinustons reduziert die Ausprägtheit der Tonhöhe [1]; auch jene der „Haupttonhöhe“ [2] eines Komplexen Tons wird geringer, falls er mit Vibrato gesungen bzw. auf einem Musikinstrument gespielt wird [1]. Bei Darbietung eines Testschalls, simultan zu einem zweiten Schall oder mehreren Schallen: Frequenzmodulation eines Sinustons im Breitbandrauschen (der Testtonpegel liegt wenige dB über seiner Mithörschwelle) reduziert die Ausprägtheit der Tonhöhe; Frequenzmodulation eines Sinustons, der als Teilton eines Komplexen Tons dargeboten wird, steigert die Ausprägtheit der zugehörigen Spektraltonhöhe [1,3]; sie steigt auch bei einem Komplexen Ton an, der als Vokal- oder Instrumentalstimme mit Vibrato im dreistimmigen Chor (zwei Stimmen ohne Vibrato!) gehört wird [1]. Die aufgezählten Testschalle können bei isolierter Darbietung Tonhöhen hoher Ausprägtheit hervorrufen [4, 5]. Sogenannte „Kantentöne“ von bandbegrenzten Rauschen, deren Tonhöhe ungefähr der Filtergrenzfrequenz entspricht [6, 7] sind dagegen sehr undeutlich wahrnehmbar [4, 8]. Vor diesem Hintergrund ist zu klären, ob eine zeitvariante Bandbegrenzung (durch Modulation der Filtergrenzfrequenz) zu einer Steigerung oder zu einer Reduktion der Ausprägtheit eines „Kantentons“ führt.

2. Versuchspersonen und Meßverfahren

Insgesamt 8 normalhörende, geübte Versuchspersonen (VPen) nahmen an den Hörversuchen teil (Alter: 20-41 J.). Jeweils zu Beginn einer Sitzung wurden einige Testschall-Ankerschall-Paare als Beispiele für die im Folgenden zu beurteilenden Schalle eingespielt. Die Schalldarbietung erfolgte in schallisierter Meßkabine monotonisch über einen dynamischen Kopfhörer (Beyer DT48) mit Freifeldentzerrer (nach [9]). Es wurde die psychometrische Methode „Größenschätzung mit Ankerschall“ verwendet. Die VPen gaben die Werte über eine Rechnerastatur ein. Schallabfolge: Ankerschall (5 sec.), Pause (2 sec.), Testschall (5 sec.), Pause (2 sec.), Wiederholung, Pause zur Eingabe des Wertes, usf. Bei den Experimenten zu Abschnitt 4.1 dauerten die Schalle 1 Sekunde. (Hüllkurven: $T_{90}=50\text{ms}$). Jeder Testschall wurde von jeder VP bei randomisierter Abfolge in jeder Parameter-Konfiguration mindestens viermal, üblicherweise sechs mal beurteilt. Dargestellt in den Diagrammen sind jeweils die Medianwerte mit Interquartilbereichen, die aus den Gesamt-Datensätzen aller VPen und Sitzungen resultieren.

3. Testschalle

Um an früher durchgeführte Experimente mit bandbegrenzten Rauschen anschließen zu können, wurden die Schalle folgendermaßen erzeugt: ein sehr steilflankiger Bandpaß (= IdB/Hz) in analoger Schaltungstechnik filtert (nach „doppeltem Überlagerungsprinzip“ in zwei ZF-Ebenen [10]) thermisches Weißes Rauschen (20...20000 Hz). Da die Ausprägtheit der Tonhöhe von Tieffrauschen anhand von Mithörschwellenmustern quantitativ beschrieben werden kann [8], gelingt es mit der o.g. Filterflankensteilheit (die größer ist als die größten Steigungen der Mithörschwellenflanken [9]) bandbegrenzte Rauschen zu erzeugen, deren Tonhöhen am stärksten ausgeprägt sind. Die sequentielle Variation der Filterparameter erfolgte bei den Hörversuchen über ein D/A-Interface vom Rechner. Aus Abbildung 1 ist die Definition von Filtergrenzfrequenz und deren Modulationshub zu entnehmen. Außerdem ist schematisch ein Spectrogramm eines solchermaßen erzeugten Testschalls dargestellt.

4.1 Stationäre Bandbegrenzung: Einfluß der Grenzfrequenz

Die Tonhöhen sehr tieffrequenter und sehr hochfrequenter gleich lauter Sinustöne treten geringer ausgeprägt in Erscheinung als jene, die im mittleren Frequenzbereich liegen [11]. Desweiteren nimmt

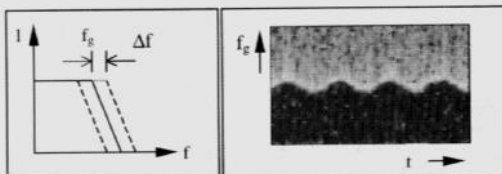


Abb. 1: Grenzfrequenzmoduliertes Tieffrauschen (TPR). Schematische Darstellungen:

f_g : Definition von (unmod.) Grenzfrequenz f_g sowie Modulationshub $2\Delta f$ der Grenzfrequenz; Re.: Spectrogram [12] eines TPR: $f_g = 1\text{ kHz}$; $2\Delta f = 200\text{ Hz}$; $f_{\text{mod}} = 4\text{ Hz}$.

mit zunehmender Bandbreite (bei konstanter Mittenfrequenz) die Ausprägtheit der Tonhöhe von Bandpaßrauschen ab [13]. Abbildung 2 ist zu entnehmen, wie die Ausprägtheit der Tonhöhe sinkt, wenn die Bandbreite des Rauschens einseitig durch Erhöhung der (zunächst unmodulierten) Grenzfrequenz (bzw. Grenztonheit) gesteigert wird.

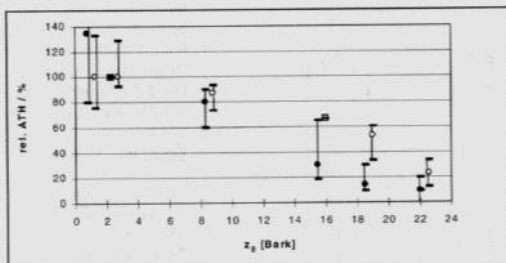


Abb. 2: Ausprägtheit der Tonhöhe von Tieffrauschen in Abhängigkeit der Grenztonheit z_g . Lautheit $N = 6\text{ sone}$; Ankerschalle: quadratische Symbole. (Daten auf Ankerwert 100% normiert)

Bei einer Erhöhung der Grenzfrequenz von 200 Hz (entspr. ca. 2 Bk) auf 2 kHz (entspr. ca. 13 Bk) nimmt die Ausprägtheit der Tonhöhe auf etwa die Hälfte ab. Wie weitere Versuchsreihen gezeigt haben, gilt der in Abb. 2 aufgezeigte Zusammenhang in sehr ähnlicher Weise auch, falls bei der Bandbreitenvergrößerung nicht die Lautheit, sondern der Schallpegel konstantgehalten wird. Eine Versuchsreihe mit konstantem Pegel $L=60\text{dB}$ lieferte Meßwerte, deren Abweichungen zu den in Abb. 2 gezeigten Median- bzw. Quartilwerten bei max. ca. 10% lagen.

4.2 Zeitvariante Bandbegrenzung: Einfluß des Modulationshubs

Wird nun die Bandbegrenzung periodisch um einen festen Betrag durch sinusförmige Modulation der Filtergrenzfrequenz verschoben, so ändert sich der Höreindruck erst, wenn ein bestimmter Wert des Modulationshubs überschritten wird. Die Eigenfluktuationen des Rauschens (abhängig von der Bandbreite) wirken sich auditiv u.a. als unperiodische Lautstärkeschwankungen und Rauigkeiten aus. Die Detektion einer „zusätzlichen Veränderung“ des Schalls bzw. der Hörempfindung „Tonhöhen schwankung“ ist auch dann erschwert, wenn diese mit einer Modulationsfrequenz von ca. 2 bis 5 Hz erzeugt wird (vgl. Abb. 5). Aus Abb. 3 ist zu entnehmen, daß es eine Modulationsschwelle gibt, ab welcher die Tonhöhe beginnt, ausgeprägter wahrgenommen zu werden. Diese liegt, abhängig vom Pegel, bei ca. 80 bis 130 Hz und damit um etwa Faktor 2 über der Grenzfrequenzmodulationsschwelle. Die sehr schwach ausgeprägte Tonhöhe wird also offenbar nicht undeutlicher durch die Modulation, sondern tritt dadurch deutlicher hervor! Die pegelabhängigen Schwellen können mit den ebenfalls pegelabhängigen Flankensteigungen der Mithörschwellen-

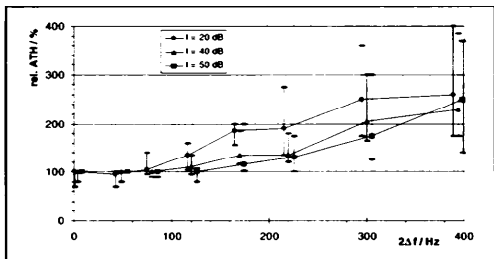


Abb. 3: Relative Ausprägtheit der Tonhöhe von Tiefpäbrauschen (TPR) in Abhängigkeit des Modulationshubes $2\Delta f$ der Filtergrenzfrequenzen 250 Hz und 1 kHz; $f_c = 1$ kHz; Rauschleistungsdichtepegel l: 20, 40, 50 dB. Ankerschalle: TPR mit stationärer Bandbegrenzung.

Muster erklärt bzw. beschrieben werden [14]. Weitere Experimente mit Tiefpäbrenzfrequenzen 250 Hz und 1 kHz zeigten, daß bei sehr großen Modulationshuben ein „Sättigungswert“ der Ausprägtheit der Tonhöhe bei $2\Delta f/f_g = 0,8 \dots 1,0$ eintritt.

4.3 Zeitvariante Bandbegrenzung: Einfluß des Modulationshubes bei unterschiedlicher Filterflankensteilheit

Tonhöhen von Tiefpäbrauschen, die mit Filtern geringer Flankensteilheit erzeugt werden, können nur gering ausgeprägt wahrgenommen werden. Eine quantitative Beschreibung gelingt durch Vergleich mit der jeweiligen Steigung des Mithorschwellenmusters [8]. Es liegt nahe, anzunehmen, daß die Grenzfrequenz eines Tiefpäfilters mit geringerer Flankensteilheit mit größerem Hub moduliert werden muß, damit die Tonhöhe des Rauschens gleichermaßen ausgeprägt erscheint wie bei einem Filter mit sehr großer Steilheit. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse entsprechender Experimente: Wie auch aus Abb. 3 ist zu entnehmen, daß die Ausprägtheit der Tonhöhe mit dem Modulationshub ansteigt. Bei kleinerer Filterflankensteilheit muß der Hub, wie erwartet, größer sein, um die Tonhöhe (näherungsweise) gleich ausgeprägt werden zu lassen. Bei einer Flankensteilheit von 6dB/oct gelingt es nicht mehr, die Ausprägtheit der ohnehin schon sehr undeutlichen Tonhöhe zu steigern. Die großen Interquartilbereiche spiegeln die Beurteilungsunsicherheit wider, die wie einige VPen bekundeten, sich aus der Tatsache ergibt, daß die Tonhöhe bei entsprechendem Hub zwar recht deutlich ist, aber sehr stark schwankt.

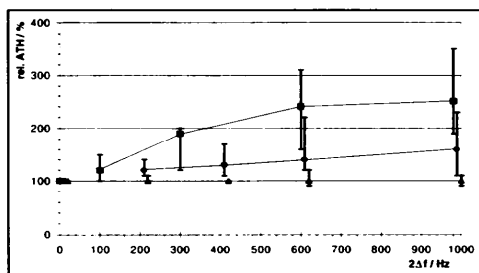


Abb. 4: Relative Ausprägtheit der Tonhöhe von Tiefpäbrauschen (TPR) in Abhängigkeit des Modulationshubes $2\Delta f$ der Filtergrenzfrequenz; $f_c = 1$ kHz; für Filterflankensteilheiten 96dB/oct (Quadrat), 48 dB/oct (Kreise), 6 dB/oct (Dreiecke). Ankerschalle: TPR mit unmod. Grenzfrequenz; (Intens.-Dichtepegel l=20 dB).

4.4 Zeitvariante Bandbegrenzung: Einfluß der Modulationsfrequenz

Das Gehör ist laut den Ergebnissen vieler Studien [14] für periodische Schallvariationen sehr empfindlich, falls die Modulationsfrequenz ca. 2 bis 5 Hz beträgt. Bei ca. 4 Hz erreicht auch die Empfindung der Schwankungsstärke ihr Maximum [9].

Abbildung 5 kann entnommen werden, daß auch hier im Falle der periodischen Variation der Tiefpäfilter-Grenzfrequenz ein Maxi-

um bei einer Modulationsfrequenz von ca. 3 bis 6 Hz auftritt. Die Tonhöhe des Tiefpäbrauschens wird dagegen weniger ausgeprägt wahrgenommen, wenn die Bandbegrenzung stationär erfolgt, aber auch wenn sie zu rasch variiert.

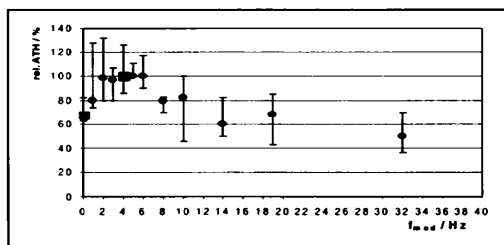


Abb. 5: Relative Ausprägtheit der Tonhöhe von Tiefpäbrauschen (TPR) in Abhängigkeit der Modulationsfrequenz f_{mod} der Filtergrenzfrequenz; $f_c = 1$ kHz; Modulationshub $2\Delta f = 170$ Hz; Rauschleistungsdichtepegel l = 40 dB. Quadrat, Symbole: Ankerschalle. Daten der beiden Versuchsreihen \approx zusammengefaßt und auf den Wert für $f_{mod} = 4$ Hz normiert.

Zusammenfassung

Sehr deutliche Tonhöhen, die von Tiefpäbrauschen hervorgerufen werden, können verdeutlicht werden, wenn die Grenzfrequenz des bandbegrenzenden Filters mit ca. 3 bis 6 Hz mit ausreichend großem Hub periodisch variiert wird. Die Ausprägtheit der Tonhöhe wird durch diese Modulation nicht vermindert wie bei den eingangs aufgezählten Schallen, die beim Hören ohne „Störschalle“ stark ausgeprägte Tonhöhen hervorrufen können und die in heterogenem auditivem Kontext gehört werden. Ähnlich wie bei Hörereignissen, die in homogenem/ähnlichem auditivem Umfeld mit anderen Hörereignissen „um die Wahrnehmung“ konkurrieren (s. Einleitung), so wird auch die „tonale“ Komponente des Rauschens (der „Kantenton“) besser wahrgenommen, seine Tonhöhe ausgeprägter, wenn sie instationär ist.

Der Verfasser dankt den Versuchspersonen, Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Fastl für hilfreiche Hinweise, sowie den Herren Dipl.-Ing. W. Auer, Dipl.-Ing. L. Nguyen, D. Patsoaru und Dipl.-Ing. U. Zimmermann für die Durchführung von Hörversuchen bzw. Interface-Konstruktion u. -programmierung.

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

Literatur

- [1] Huth, C. u. Schmid, W., Zur Ausprägtheit der Tonhöhe von Tönen mit und ohne Vibrato, DAGA 98 (in diesem Band).
- [2] Terhardt, E., Akustische Kommunikation, Berlin [u.a.]: Springer, 1998.
- [3] Chalupper, J., Schmid, W., Akzentuierung u. Ausprägtheit von Spektraltonhöhen bei harmonischen komplexen Tönen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 97, Dt. Ges. f. Akustik e.V. Oldenburg, 357-358 (1997).
- [4] Fastl, H., and Stoll, G., Scaling of pitch strength. Hearing Research 1, 293-301 (1979).
- [5] Wiesmann, N., Fastl, H., Ausprägtheit der virtuellen Tonhöhe und Frequenzunterschiedsschwellen von harmonischen komplexen Tönen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '92, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 841-844 (1992).
- [6] Fastl, H., Über Tonhöhenempfindungen bei Rauschen, Acustica 25, 350-354 (1971).
- [7] Schmid, W., Auer, W., Zur Tonhöhenempfindung bei Tiefpäbrauschen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 96, Dt. Ges. f. Akustik e.V. Oldenburg, 344-345 (1996).
- [8] Fastl, H., Pitch strength and masking patterns of low-pass noise. In: Psychophysical, Physiological and Behavioural Studies in Hearing (G. van den Brink, F. A. Bilken, eds.), Delft, University Press, 334-339 (1980).
- [9] Zwicker, E., Fastl, H., Psychoacoustics, Facts and Models, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1990.
- [10] Schorer, E., Variabler NF-Bandpaß mit großer Flankensteilheit, Elektronik 13, 61-64 (1984).
- [11] Schmid, W., Zur Ausprägtheit der Tonhöhe gedrosselter und amplitudenmodulierter Sinustöne. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 97, Dt. Ges. f. Akustik e.V. Oldenburg, 355-356 (1997).
- [12] MATLAB Version 5.1.0.
- [13] Wiesmann, N., Fastl, H., Ausprägtheit der Tonhöhe und Frequenzunterschiedsschwellen von Bandpäbrauschen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '91, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 505-508 (1991).
- [14] Schorer, E., Ein Funktionsschema zur Beschreibung eben wahrnehmbarer Frequenz- und Amplitudenänderungen. Dissertation, Technische Universität München 1988.