

Zur Ausprägtheit der Tonhöhe gedrosselter und amplitudenmodulierter Sinustöne

W. Schmid

Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München

Einleitung

Die Deutlichkeit, mit der eine Tonhöhe eines Testschalls gehört wird, kann in Hörversuchen bestimmt werden. Hierzu wird unter Verwendung der psychometrischen Methode Größen-schätzung mit Anker die „Ausprägtheit der Tonhöhe“ (ATH) gemessen. Wie viele Experimente gezeigt haben, liefert das Verfahren gut reproduzierbare Daten u. a. auch dann, wenn

- sich Testschalle bezüglich spektraler und/oder zeitlicher Merkmale stark unterscheiden (s. z.B. [1]),
- Virtuelle Tonhöhen Komplexer Töne (z.B. [2]) oder
- Tonhöhen, die von Rauschen (z.B. [3]) bzw. jene, die von Impulsfolgen [4] hervorgerufen werden können, untersucht werden,
- Spektraltonhöhen auf verschiedene Weise akzentuiert werden [5].

Mit diesem somit bereits gut bewährten Meßverfahren wurde die Ausprägtheit von Spektraltonhöhen für Amplitudenmodulation und Drosselung durch Rauschmaskierer untersucht.

Versuchspersonen und Meßverfahren

An den Experimenten nahmen normalhörende Versuchspersonen (VPen) (Alter 20-39 Jahre) teil. Alle Schalle waren mit gaußförmiger Hüllkurve ($T_{90}=30\text{ms}$) versehen und wurden in einer schallisolierten Meßkabine monotonisch über einen dynamischen Kopfhörer (Beyer DT48) mit vorgeschaltetem Freifeldentzerrer (nach [6]) dargeboten. Jeder Testschall wurde von jeder VP bei randomisierter Abfolge in jeder Parameter-Konfiguration mindestens viermal bewertet. Die in Hörversuchen erfahrenen VPen hörten jeweils zu Beginn einer Sitzung einige Testschall-Ankerschall-Paare als Beispiele für die nachfolgend erscheinenden Schalle. Die hierzu gehörigen ATH-Werte wurden nicht in den Gesamtdatensatz übernommen.

Dargestellt in den Diagrammen sind jeweils die Medianwerte mit Interquartilbereichen, die aus den Gesamt-Datensätzen aller VPen und Sitzungen resultieren.

Sinustöne

Werden verschiedene Schalle dargeboten, die gleiche Tonhöhen hervor-rufen können, so wird jeweils die ATH des Sinustons als die ausgeprägteste beurteilt [1]. Wird ein Sinuston mit einem Schallpegel von 80 dB bei verschiedener Frequenz dargeboten, so zeigt die Ausprägtheit seiner Tonhöhe eine „Bandpaßcharakteristik“ [7]: Tonhöhen tieffrequenter und hochfrequenter Sinustöne werden hierbei als weniger ausgeprägt beurteilt, als jene von Sinustönen im mittleren Frequenzbereich. Da verschiedenfrequente Sinustöne mit gleichem Pegel unterschiedlich laut sein können, liegt die Vermutung nahe, daß bei entsprechendem Lautheitsausgleich die Tonhöhen auch gleich ausgeprägt wahrgenommen werden. Nach [7] ist eine Verminderung der relativen ATH eines 1 kHz-Testtons dann gegeben, wenn er im Vergleich zum Ankerschall mit geringerem Pegel dargeboten wird. Gemäß diesem funktionalen Zusammenhang zwischen Lautheit und ATH wurden die Werte für die Ausprägtheit der Tonhöhe der 80dB-Sinustöne frequenzabhängig gemäß den Kurven gleicher Lautheit [6] gewichtet.

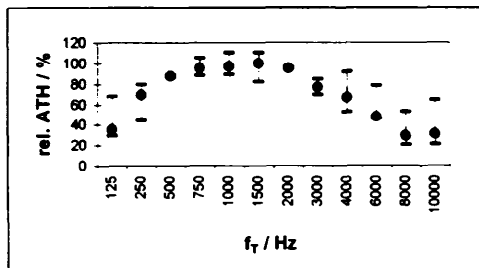


Abb. 1 Rel. ATH von Sinustönen der Frequenz f_T und Schallpegel $L_T=80\text{dB}$. Daten nach [7] (Ankerschalle bei 0,5 bzw. 3 kHz), jedoch mit Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der Lautheit.

Aus Abb. 1 ist ersichtlich, daß eine derartige Gewichtung nicht hinreicht, um die Frequenzabhängigkeit der ATH zu kompensieren. Tonhöhen (sehr) tieffrequenter und (sehr) hochfrequenter Sinustöne sind offenbar nicht deswegen weniger ausgeprägt, weil sie bei gleichem Schallpegel leiser wahrgenommen werden.

Zur weiteren Prüfung dieses Sachverhalts wurden nun in mehreren Experimenten mehrere VPen-Gruppen verschiedenfrequente Sinustöne dargeboten, die die gleiche (berechnete) Lautheit aufwiesen. Abb. 2 zeigt Meßdaten solcher Versuche für $N=8\text{ sone}_{\text{ref}}$. Deutlich ist auch hier die Abnahme der ATH zu tieferen bzw. zu höheren Testtonfrequenzen zu erkennen. Die intraindividuellen Streuungen der Daten betragen im mittleren Frequenzbereich ca. 5-10%; sie steigen auf 10-20% bei sehr tiefen und sehr hohen Frequenzen.

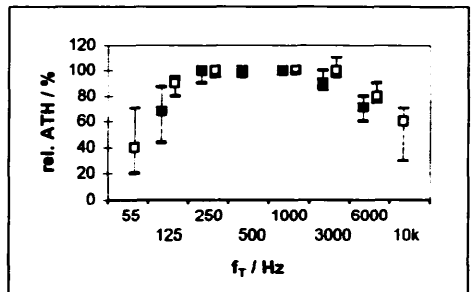


Abb. 2 Rel. ATH von Sinustönen der Frequenz f_T der berechneten Lautheit $N = 8\text{ sone}_{\text{ref}}$, Ankerschall bei 1 kHz. Leere Quadrate: VPen-Gruppe 1 (7 VPen); ausgefüllte Quadrate: VPen-Gruppe 2 (7 VPen).

Amplitudenmodulierte Sinustöne

Es wird nun gezeigt, in welchem Maße die Ausprägtheit der Tonhöhe eines Sinustones von einer Amplitudenmodulation beeinflusst werden kann.

Für die nachstehend beschriebenen Experimente mit amplitudenmodulierten Schallen gilt folgende Festlegung:

Die Pegel der unmodulierten Testschalle haben den Wert L_T . Dieser Pegel bzw. die Pegeldifferenz ΔL_T zur individuellen Mithörschwelle (MHS) ist jeweils bei den Abbildungen 3 bis 5 angegeben. Die amplitudenmodulierten Töne sind jeweils so gewählt, daß ihre Maximalamplituden (Schalldruck, bzw. Spannung am Kopfhörer) gleich denen der unmodulierten Töne sind.

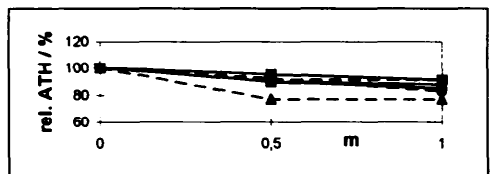


Abb. 3 Rel. ATH von Sinustönen der Frequenzen f_c , amplitudenmoduliert mit Modulationsgrad m und Mod.-frequenz $f_{\text{mod}} = 4\text{ Hz}$. Pegel $L_T = 60\text{ dB}$ (s. Text). Trägerfrequenz f_c : 120 Hz (Kreise), 1 kHz (Quadrate), 6 kHz (Dreiecke). Ankerschalle: unmod. Sinuston (durchgezogene Linien) bzw. amplitudenmod. Sinuston mit $m = 1$ (gestrichelte Linien). Medianwerte normiert auf den max. Medianwert 100 der Daten von 6 VPen.

Die maximale Schwankungsstärke wird bei Amplitudenmodulation für einen 1kHz-Sinuston und Modulationstiefe 40dB ($m \approx 0,98$) bei der Modulationsfrequenz 4 Hz erreicht [6]. Abbildung 3 ist zu entnehmen, daß dann die Ausprägtheit der Tonhöhe des Sinustons um ca. 10 bis ca. 20% gegenüber derjenigen des unmodulierten Tons vermindert wird. Die intraindividuellen Schwankungen der Daten sind hierbei sehr klein und betragen 5-10%, die interindividuellen Schwankungen ca. 10-20%

(und erreichen jedoch bei Verwendung von Ankerschallen mit $m=1$ auch Werte von ca. 30%). Unterschiede der ATH, die auf verschiedene Trägerfrequenzen zurückzuführen sind, sind nur für 3 VPen signifikant und zwar in der Weise, daß die ATH von amplitudenmodulierten Tönen mit der Trägerfrequenz 6 kHz um 5-10% geringer ist als für 120 Hz bzw. 1 kHz

Sinustöne und Rauschen

Wird ein Sinustone als Testton simultan zu einem drosselnden „Maskierschall“ dargeboten, so hängt die ATH dieses Testtons stark vom Pegel des Testtons über der Mithörschwelle, die der Maskierer erzeugt ab [8]. Da nur Daten für die Testtonfrequenz 3,3 kHz vorlagen, andererseits jedoch frequenzabhängige Effekte der ATH bekannt sind (s.o.), wurden in Hörversuchen Sinustöne mit den Frequenzen 55, 125, 280, 1000, 2300 und 8000 Hz untersucht.

Die Grundzüge des experimentellen Ablaufs sind: 1. Messungen der Mithörschwellen, die der Maskierer Gleichmäßig Verdeckendes Rauschen GVR [6], Gesamtpegel L_{GVR} erzeugt; 2. In einer weiteren Sitzung: Messung der rel. ATH des Testsinustons (Frequenz f_T , Pegel ΔL_T über der individuellen MHS. Zur besseren Vergleichbarkeit mit dem bekannten Datenmaterial wurden die zeitl. Struktur der Darbietung von Maskierer- und Testschall sowie Békésy-Tracking als Meßmethode für die Bestimmung der MHSn wie in [8] gewählt.

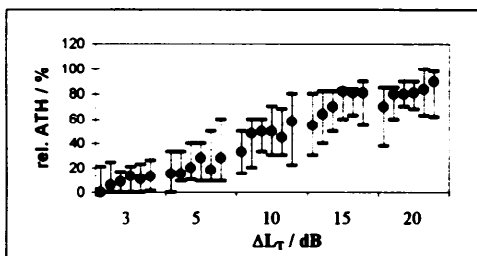


Abb. 4 Rel. ATH von Sinustönen als Funktion der Pegeldifferenz ΔL_T . Testtonfrequenzen f_T : 55, 125, 280, 1000, 2300, 8000 Hz (zugehörige Datenpunkte jeweils von li. nach re.); Maskierer: GVR, $L_{GVR} = 70$ dB. Ankerschalle: jeweils ungedrosselter Ton mit Pegel $L_A(f, VP) = L_T(f, VP)$ und Frequenz $f_A = f_T = f$ (6 VPen).

Abb 4 weist aus, daß (bei Berücksichtigung der Größe der Interquartilbereiche) dann keine Frequenzabhängigkeit der ATH der untersuchten Sinustöne im Falle von simultan dargebotenem GVR auftritt, wenn die ATH des Testtons relativ zum gleichfrequenten Ankerschall beurteilt wird. Die ATH weist die gleiche, wie in [8] beschriebene Abhängigkeit vom Pegel des Testtons über der VPen-spezifischen MHS aus.

Wie Abb 5 jedoch zeigt, ist die Frequenzabhängigkeit der rel. ATH eines Sinustons dann nicht mehr vernachlässigbar, wenn die Ankerschallfrequenz konstant gehalten wird und der Pegelabstand ΔL_T der Sinustöne von der MHS Werte von ca. ≥ 10 dB erreicht. Dann tritt der aus Abb. 2 bekannte Frequenzgang der ATH in Erscheinung.

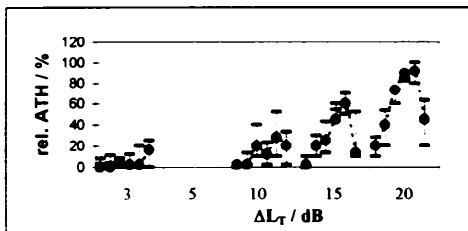


Abb. 5 Rel. ATH von Sinustönen als Funktion des Pegels ΔL_T . Daten wie in Abb 5, jedoch Ankerschallfrequenz $f_A = 1$ kHz.

Amplitudenmodulierte Sinustöne und Rauschen

Nach Abb 3 vermindert eine Amplitudenmodulation (AM) die ATH eines Sinustons. Andererseits liegt die Vermutung nahe, daß eben jene

AM zu einer besseren „Heraus hörbarkeit“ des Sinustons im Rauschmaskierer und einer Erhöhung seiner ATH führt.

Das Ergebnis eines klärenden Experiments zeigt Abb. 6. Im knapp überschwelligen Bereich (3 dB über MHS) tritt kein signifikanter Unterschied der ATH des modulierten Sinustons zur ATH des unmodulierten Tons auf. Signifikante Unterschiede treten im stärker überschwelligen Bereich (10 ... 20 dB über MHS) zutage; die Modulation vermindert die ATH des Sinustons um ca. 20 bis 30% und hat damit prozentual eine etwas stärkere Auswirkung als bei Darbietung ohne simultanes Rauschen.

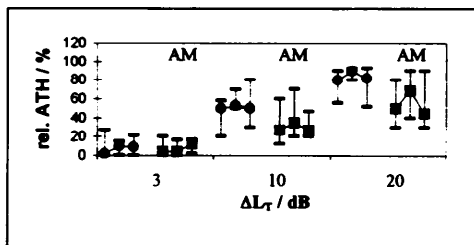


Abb. 6 Rel. ATH von amplitudenmodulierten ($m=1$) Sinustönen als Funktion der Pegeldifferenz ΔL_T . Testtonfreq. f_T : 125, 1k, 8kHz (zugeh. Datenpunkte von li. nach re.). Unmod. Töne: Kreise, mod. Töne: Quadrate. Maskierer wie Abb. 4; Ankerschalle jeweils unmod., ungedrosselt, mit Pegel $L_A(f, VP) = L_T(f, VP)$ und Frequenz $f_A = f_T = f$ (6 VPen).

Zusammenfassung

Für Schalle der hier vorgestellten Auswahl physikalischer Parameter kann restimiert werden:

Die Ausprägtheit der Tonhöbe von Sinustönen

- weist bei gleicher Lautheit eine charakteristische Frequenzabhängigkeit auf: Tonhöben mittelfrequenter Töne sind ausgeprägter,
- wird durch eine Amplitudenmodulation mit niedriger Modulationsfrequenz vermindert,
- weist keine Frequenzabhängigkeit auf, wenn die Töne simultan zu GVR dargeboten werden und Ankerschall- und Testschallfrequenz gleich sind;
- wird durch eine AM auch dann vermindert, wenn diese im stärker überschwelligen Bereich simultan zu GVR zu hören sind.

Der Verfasser dankt den Versuchspersonen, Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Fastl für hilfreiche Hinweise, sowie Frau Dipl.-Ing. P. Hasdemir, Frau Dipl.-Ing. agr. C. Rabus und Herrn Dipl.-Ing. S. Gamp für die Durchführung der Hörversuche.

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

Literatur

- [1] Fastl, H., and Stoll, G., Scaling of pitch strength. Hearing Research 1, 293-301 (1979).
- [2] Schmid, W., Zur Tonhöbe inharmonischer Komplexer Töne. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 94, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 1025-1028 (1994).
- [3] Fastl, H., Pitch strength and masking patterns of low-pass noise. In: Psychophysical, Physiological and Behavioural Studies in Hearing (van den Brink, Bilsen, eds.), Delft, University Press, 334-339 (1980).
- [4] Schmidt, M., Fastl, H., Hafer, E., Detektion und Ausprägtheit der Tonhöbe bei Impulsfolgen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 95, Dt. Gesellschaft für Akustik e.V. Oldenburg, 903-906 (1995).
- [5] Chalupper, J., Schmid W., Akzentuierung und Ausprägtheit von Spektraltonhöben bei harmonischen Komplexen Tönen. DAGA 97
- [6] Zwicker, E., Fastl, H., Psychoacoustics, Facts and Models. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1990.
- [7] Fastl, H., Pitch strength of pure tones. In: Proc. 13 ICA Belgrade, Vol. 3, 11-14 (1989).
- [8] Hesse, A., Zur Ausprägtheit der Tonhöbe gedrosselter Sinustöne. In Fortschritte der Akustik, DAGA 85, Verl. DPG-GmbH, Bad Honnef, 535-538 (1985).