

Detektionsschwellen von Infraschall-Tonkomplexen

Björn Friedrich¹, Holger Joost², Thomas Fedtke², Jesko L. Verhey¹

¹ *Abteilung f. Experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,*

E-Mails: bjoern.friedrich@med.ovgu.de, jesko.verhey@med.ovgu.de

² *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig,*

E-Mails: holger.joost@ptb.de, thomas.fedtke@ptb.de

Einleitung

Die Infraschall-Exposition stellt ein immer wichtiger werdendes gesellschaftliches Problem dar, denn die Anzahl an Infraschallquellen in unserer Umgebung nimmt stetig zu. Obwohl Infraschall-Frequenzen außerhalb des klassischen Hörfrequenzbereiches liegen, berichten mehrere Veröffentlichungen über eine Hörwahrnehmung bis hinunter zu 2 Hz [1]. Entsprechende psychoakustische Messungen werden üblicherweise mit Einzeltönen durchgeführt. Aus deren Ergebnissen können jedoch keine direkten Rückschlüsse auf die Wahrnehmung abgeleitet werden, wenn – wie bei echten Umweltgeräuschen – mehr als eine Infraschall-Frequenzkomponente vorhanden ist.

In der vorliegenden Studie wurde daher der Frage nachgegangen, welchen Effekt die Anzahl der Infraschall-Komponenten (n_C) auf die Detektionsschwelle (L) eines n_C -Tonkomplexes hat. Für den Hörschallbereich zwischen 20 Hz und 20 kHz hat Green [2] bereits vor über sechzig Jahren drei Mechanismen vorgeschlagen:

- (1) Dominanz einer Komponente: Es könnte sein, dass eine Komponente des Tonkomplexes alle anderen Komponenten dominiert. Dann müsste die Detektionsschwelle des Tonkomplexes genauso groß sein wie die Detektionsschwelle der dominanten Komponente, wenn letztere als Einzelton präsentiert wird. Bei diesem Mechanismus findet also keine Integration spektraler Größen über die Komponenten des Tonkomplexes statt.
- (2) Integration der Information: Hier wird angenommen, dass die Information über die Komponenten des Tonkomplexes integriert wird. Im Hörschallbereich wird dies beobachtet, wenn die Komponenten spektral so weit auseinanderliegen, dass jede Komponente eine andere Frequenzgruppe anregt.
- (3) Integration der Intensität: Falls sich die spektralen Intensitäten der einzelnen Komponenten des Tonkomplexes addieren, wiese das darauf hin, dass die Komponenten innerhalb einer Frequenzgruppe verarbeitet werden.

Untersucht wurde, ob einer dieser Mechanismen die Detektionsschwellen von Tonkomplexen mit Infraschall-Komponenten erklären kann. Dazu wurde ein aus zwei Teilen bestehendes psychoakustisches Experiment durchgeführt. Im ersten Teil wurden Detektionsschwellen von Einzeltönen mit Infraschall-Frequenzen gemessen. Im

zweiten Teil wurden Detektionsschwellen von Zwei- und Dreitonkomplexen bestimmt. Ähnlich wie in [3] wurden die Pegel der einzelnen Komponenten so gewählt, dass sie sich auf die im ersten Teil ermittelte Schwelle des jeweiligen Einzeltons bezogen. Ebenso wurden die Pegel der Detektionsschwellen von Mehrtonkomplexen in Sensation Level (SL) relativ zur Schwelle einer Komponente angegeben. Ein Pegel von 0 dB SL bei einem Dreitonkomplex bedeutet beispielsweise, dass der Pegel jeder der drei Komponenten der Detektionsschwelle des dazugehörigen Einzeltons entspricht. In Tabelle 1 ist aufgelistet, welcher Pegel in dB SL an der Detektionsschwelle sich in Abhängigkeit von der Anzahl der Infraschall-Komponenten im Tonkomplex je nach Mechanismus ergeben müsste.

Tabelle 1: Vorhergesagte Pegel in dB SL an der Detektionsschwelle (L) in Abhängigkeit von der Anzahl der Infraschall-Komponenten (n_C) für die drei angenommenen Mechanismen.

Mechanismus	Pegel an der Schwelle (L)
Dominanz einer Komponente	0 dB SL
Informationsintegration	$-5 \cdot \lg(n_C)$ dB SL
Intensitätsintegration	$-10 \cdot \lg(n_C)$ dB SL

Methode

Die Methode wird im Folgenden nur in ihren Grundzügen beschrieben, eine detaillierte Beschreibung findet sich in [4].

In einem zweiteiligen Experiment wurden von 14 Normalhörenden (5 weiblich, 9 männlich) im Alter zwischen 20 und 33 Jahren (Median 22,5 Jahre) Detektionsschwellen gemessen. Die Messungen fanden in einer doppelwandigen Kammer statt. Es wurde das adaptive 3-Intervall-3-Alternativen-Zwangwahlverfahren verwendet. Als Schwellenschätzer diente der Mittelwert aus zwei Schwellen (Test-Retest-Paradigma).

Im ersten Teil des Experiments wurden Detektionsschwellen von Einzeltönen mit den Frequenzen 4 Hz, 8 Hz, 12 Hz und 16 Hz bestimmt. Die Gesamtdauern inklusive Ein- und Ausschalttrampen betragen zwischen 1,0 s (für 16 Hz) und 2,5 s (für 4 Hz). Bei der Wahl der Stimulusparameter wurde sich an [5] orientiert.

Im zweiten Teil des Experiments wurden Detektionsschwellen von Zwei- und Dreitonkomplexen bestimmt (4–8, 4–12, 4–8–12 [Hz]). Die Pegel der einzelnen Komponenten wurden so gewählt, dass alle Komponenten den gleichen Pegel relativ zu ihrer im ersten Teil bestimmten Einzelton-Schwelle hatten. Die Stimulusdauer betrug 2,5 s.

Die Stimuli wurden stets dem linken Ohr der Versuchsperson präsentiert. Die Darbietung erfolgte mittels eines eigens für solche Versuche entwickelten Wiedergabesystems, das die Infraschallsignale mit den benötigten Pegeln rausch- und verzerrungsarm darbieten kann. Es wird als LDREPS (Abkürzung für Low-Distortion Reproduction System) bezeichnet. Das LDREPS besteht aus zwei RadioEar DD45-Kopfhörerkapseln, einem Kopfhörerverstärker basierend auf einer LPA-2S-Platine von Funk Tonstudioteknik, und einem Einsteckhörersystem Etymotic ER-10B+ mit eingebautem rauscharem Mikrofon. Die Eigenschaften des LDREPS sind in [6] beschrieben. Um sicherzustellen, dass das LDREPS die im Experiment verwendeten Stimuli ausreichend verzerrungsarm wiedergeben kann, wurden die akustischen Frequenzspektren der Stimuli im Ohrsimulator B&K 4157 mit dem Mikrofon des LDREPS untersucht. Dazu wurde eine der beiden DD45-Kapseln bei 40 phon angeregt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in [4] veröffentlicht.

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 1 zeigt die Gruppenmediane (blaue Linie mit ausgefüllten Punkten) und die dazugehörigen Interquartilsabstände (halbdurchsichtiger blauer Schlauch) der Schalldruckpegel an der Detektionsschwelle als Funktion der Einzelton-Frequenz. Die Detektionsschwellen fallen monoton von 114 dB SPL bei 4 Hz auf 88,5 dB SPL bei 16 Hz ab. Sie weichen um weniger als 2 dB von der Regression zweiter Ordnung (gestrichelte schwarze Linie) aus der Abbildung 10 von Møller und Pedersen [1] ab.

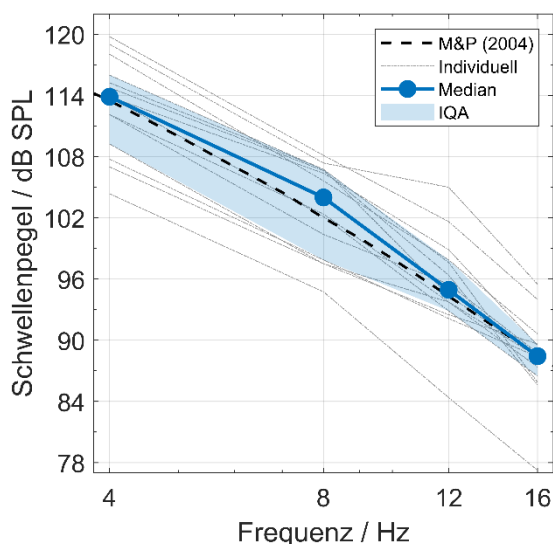


Abbildung 1: Schwellenschalldruckpegel für die Infraschall-Einzelöne. Die grauen Strichpunktlinien zeigen die individuellen Daten der 14 Versuchspersonen. Der Gruppenmedian wird durch die blaue Linie mit den ausgefüllten Punkten dargestellt, der Interquartilsabstand durch den halbdurchsichtigen blauen Schlauch. Die gestrichelte schwarze Linie repräsentiert die Regression zweiter Ordnung aus Abbildung 10 von M&P [1].

Abbildung 2 zeigt die Gruppenmediane (ausgefüllte Punkte) und die dazugehörigen Interquartilsabstände (vertikale Fehlerbalken) der Pegel in SL an der Detektionsschwelle des 4-Hz-Einzeltons (blau), der beiden Zweitonkomplexe (violett) und des Dreitonkomplexes (orange). Zusätzlich sind in Form von farblich hervorgehobenen horizontalen Linien die von den drei Mechanismen vorhergesagten Schwellen eingezeichnet. Der Einzelton hat definitionsgemäß und unabhängig vom Mechanismus eine Schwelle von 0 dB SL (durchgezogene dunkelgraue Linie).

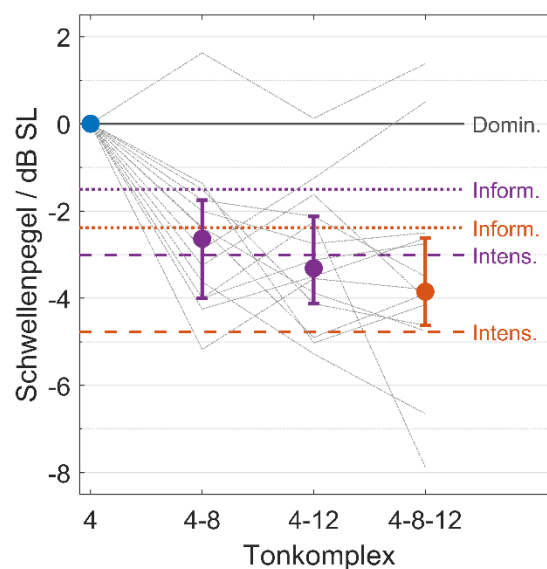


Abbildung 2: Gemessene und vorhergesagte Schwellenpegel in dB SL für die Infraschall-Tonkomplexe (violett und orange) sowie für den Einzelton (blau). Die Gruppenmediane der gemessenen Schwellen werden durch ausgefüllte Punkte dargestellt, die dazugehörigen Interquartilsabstände durch Fehlerbalken. Die zugrundeliegenden individuellen Daten der 14 Versuchspersonen sind durch graue Strichpunktlinien angedeutet. Die horizontalen hervorgehobenen Linien repräsentieren die von den drei Mechanismen vorhergesagten Schwellen: Die durchgezogene dunkelgraue Linie entspricht für alle Tonkomplexe die Vorhersage bei Dominanz einer Komponente; die gepunkteten Linien entsprechen für die Zweitonkomplexe und den Dreitonkomplex (violett beziehungsweise orange) der Vorhersage bei Informationsintegration; die gestrichelten Linien entsprechen für dieselben Signale (wie zuvor violett beziehungsweise orange) der Vorhersage bei Intensitätsintegration.

Für die beiden Zweitonkomplexe liegen die Schwellenpegel bei -2,6 dB SL beziehungsweise -3,3 dB SL. Letzterer weicht signifikant von dem bei Informationsintegration vorhergesagten Wert von -1,5 dB SL ab (gepunktete violettfarbene Linie; Sign Tests: $p = 0,057$ und $S = 3$ für Stimulus 4-8, $p < 0,013$ und $S = 2$ für Stimulus 4-12). Allerdings entsprechen die Werte in guter Näherung der Vorhersage bei Intensitätsintegration (gestrichelte violettfarbene Linie; Sign Tests: beide $p = 0,791$, $S = 8$ für Stimulus 4-8 und $S = 6$ für Stimulus 4-12). Beim Dreitonkomplex fällt die Schwelle weiter ab. Der gemessene

Pegel von -3,9 dB SL weicht signifikant von dem bei Informationsintegration vorhergesagten Wert von -2,4 dB SL ab (gepunktete orangefarbene Linie; Sign Test: $p < 0,013$ und $S = 2$). Allerdings ist der weitere Abfall auch nicht so groß wie bei einer Intensitätsintegration erwartet worden wäre (gestrichelte orangefarbene Linie beim vorhergesagten Wert von -4,8 dB SL; Sign Test: $p < 0,013$ und $S = 12$). Für die Dominanz einer Komponente, bei der jeder Tonkomplex einen Schwellenpegel von 0 dB SL haben müsste, spricht keiner der gemessenen Werte (durchgezogene dunkelgraue Linie; Sign Tests: für alle drei gilt $p < 0,013$, $S = 1$ für die Zweitonkomplexe und $S = 2$ für den Dreitonkomplex).

Die Abweichung der Ergebnisse für den Dreitonkomplex von der Vorhersage bei Intensitätsintegration könnte darauf hindeuten, dass dieser Mechanismus in irgendeiner Weise begrenzt ist. Natürlich könnte es auch sein, dass trotz Ausgleichs der Pegel im Tonkomplex nicht alle Komponenten gleich gut hörbar sind, da auch die Schwellen der Einzeltöne mit einer Messunsicherheit behaftet sind. Wird zum Beispiel eine Einzelton-Schwelle unterschätzt, so könnte die Komponente im Tonkomplex weniger zur Schwelle beitragen als bei einem Tonkomplex, in welchem die Komponentenpegel den exakten Einzelton-Schwellen entsprechen. In einem solchen Fall würde auch der Intensitätsintegrationsansatz für den Dreitonkomplex eine kleinere Schwellenverminderung als -4,8 dB SL vorher-sagen.

Zusammenfassung

In dieser Studie wurde untersucht, welchen Effekt die Anzahl der Infrasschall-Komponenten auf die Detektionsschwellen von Mehrtonkomplexen hat. Die Detektionsschwellen der dafür verwendeten Infrasschall-Einzeltöne zeigten dabei im Vergleich zu den Literaturwerten keine Auffälligkeiten. Die Ergebnisse für die Mehrtonkomplexe belegen, dass die Detektionsschwelle nicht durch eine dominante Komponente im Tonkomplex bestimmt ist; stattdessen findet eine spektrale Integration statt. Die Detektionsschwellen eines der beiden Zweitonkomplexe sowie des Dreitonkomplexes sind nicht mit der Idee einer Informationsintegration vereinbar. Die Ergebnisse für den Dreitonkomplex weichen allerdings signifikant von der Vorhersage des Intensitäts-integrationsansatzes ab. Es sind weitere Experimente mit einer größeren Datenbasis erforderlich, um diese Diskrepanz aufzuklären.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts „Infrasschall und seine Bedeutung für den Hörschall“ (FE 1192/3-1 | VE 373/4-1). Herrn Funk von Funk Tonstudiotechnik, Berlin, sei für die Modifikation ihrer Kopfhörerverstärkerplatine LPA-2S gemäß den Erfordernissen unserer Experimente herzlich gedankt. Marion Bug, PTB Braunschweig, unterstützte uns mit wertvollen Anregungen, und Michael Ziese, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, durch die Realisierung technischer Versuchskomponenten.

Literatur

- [1] Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise Health* 6:23 (2004), 37–57
- [2] Green, D. M.: Detection of multiple component signals in noise. *JASA* 30 (1958), 904–911, DOI: 10.1121/1.1909400
- [3] Buus, S., Müsch, H., Florentine, M.: On loudness at threshold. *JASA* 104 (1998), 399–410, DOI: 10.1121/1.423295
- [4] Friedrich, B., Joost, H., Fedtke, T., Verhey, J. L.: Spectral integration of infrasound at threshold. *JASA* 147 (2020), EL259–EL263, DOI: 10.1121/10.0000897
- [5] Kühler, R., Fedtke, T., Hensel, J.: Infrasonic and low-frequency insert earphone hearing threshold. *JASA* 137 (2015), EL347–EL353, DOI: 10.1121/1.4916795
- [6] Joost, H., Friedrich, B., Verhey, J. L., Fedtke, T.: How to present pure-tone infrasound to the ear. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, Aachen* (2020), 1470–1477