Harmonische Tonkomplexe mit Infraschall-Grundfrequenz

Jonas Lochner[1], Johannes Hensel[2], Brigitte Schulte-Fortkamp[3]

[1] TU Berlin, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, Deutschland, Email: jonas.lochner@live.com

[2] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Deutschland, Email: johannes.hensel@ptb.de

[3] TU Berlin, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, Deutschland, Email: b.schulte-fortkamp@tu-berlin.de

Motivation

Im Rahmen der Bachelorarbeit [1], welche an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, bearbeitet wurde, wurden Hörschwellenmessungen durchgeführt, um Tieftonwirkung und Hörbarkeit harmonischer Tonkomplexe mit Infraschall-Grundfrequenz zu untersuchen. Dabei wurde besonders der Einfluss unhörbarer Obertöne auf die Hörschwelle untersucht. Im Folgenden wird ein Grundton mit harmonischen Obertönen als harmonischer Tonkomplex bezeichnet. Ein Signal aus harmonischen Obertönen ohne Grundton wird als harmonischer Obertonkomplex bezeichnet.

Vorbereitung der Hörversuche

Da das menschliche Ohr im Infraschallbereich weniger empfindlich als im Hörbereich ist, und folglich nur hohe Schalldruckpegel eine Hörwahrnehmung hervorrufen, musste eine Generatorkette (s. Abb. 1) gefunden werden, welche Infraschalltöne mit geringen technischen Verzerrungen am Ohr der Versuchsperson darbieten kann. Als Schallgeber wurde ein Einsteckhörer (modifizierter DT 48, Abkürzung ModDT48) verwendet, welcher Hörschwellenmessungen unter Ausschluss solcher Wahrnehmungen, die nicht über das Ohr vermittelt werden, ermöglichte. Um möglichen Störschall mit hohen Schalldruckpegeln im mittleren und hohen Frequenzbereich zu verhindern, wurden zwei Tiefpässe eingebaut. Kalibriert wurde die Generatorkette mit einem Tieftonmikrofon, welches durch ein Schlauchstück mit einem am ModDT48 angebrachten Ohrstöpsel verbunden war. Die Hörschwellen wurden mit dem Messprogramm *Psylab* nach einem 3-AFC-Verfahren mit 1-up/2-down Methodik bestimmt. An den zwei Hörversuchen nahm die gleiche Gruppe von zehn otologisch normalen Versuchspersonen teil.

Reintonhörschwelle

Der erste Hörversuch zeigte, dass die gemittelte Reintonhörschwelle (s. Abb. 2) im tieffrequenten Bereich der Freifeld-Hörschwelle nach ISO 226 und im Infraschallbereich der ersten Regression der Hörschwellenkurve nach Møller [2] entsprach. Die Hörschwelle des 16-Hz-Tones entspricht eher der Hörschwelle nach ISO 226 als der Møllerschen Hörschwelle. Im Infraschallbereich von 12 Hz abwärts steigt die gemessene Hörschwelle weniger steil als im Frequenzbereich darüber. Jedoch ist der Betrag der Steigung mit fallender Frequenz größer als bei der ersten Regression der Møllerschen Hörschwellenkurve. Die Übereinstimmung der mit Einsteckhörer gemessenen Hörschwelle mit den Hörschwellen nach ISO 226 und Møller, welche auf Messungen im Freifeld und der Druckkammer basiert, könnte darauf hinweisen, dass im untersuchten Frequenzbereich die Beschallungsart einen geringen Einfluss auf die Lage der Hörschwelle hat.

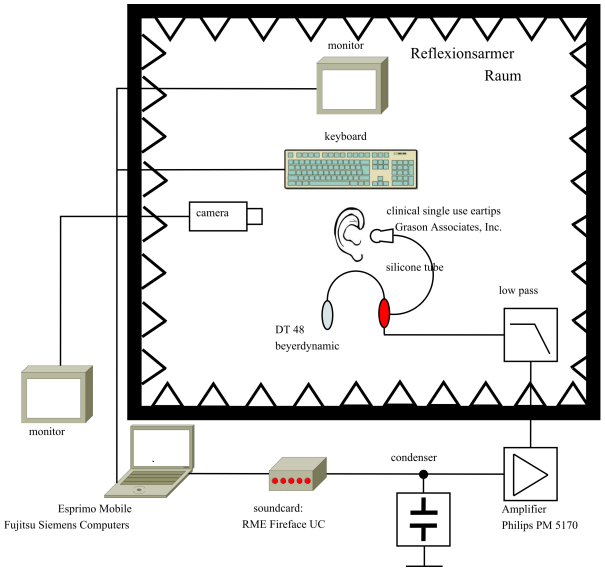

Abbildung 1: Versuchsaufbau für die Hörtests.

Hörschwellen unterschiedlicher Stimuli

Ein zweiter Hörversuch bestätigte die Ergebnisse von [3] und [4], dass die Hörschwelle eines harmonischen Tonkomplexes mit Obertönen, welche unterhalb ihrer Reintonhörschwelle liegen, niedriger liegt als die Hörschwelle des reinen Grundtons (s. Abb. 3). In [3] und [4] wurde jedoch nicht untersucht, ob die Obertöne auch als Obertonkomplex unhörbar waren. Daher wurden in der aktuellen Arbeit Hörschwellen der Obertonkomplexe gemessen. Es stellte sich heraus, dass die Pegel der Töne des Obertonkomplexes an dessen Hörschwelle um mehrere dB unter der individuellen Reintonhörschwelle lagen. Der Median der Differenzen zwischen Hörschwelle des reinen 16-Hz-Tones und des Schalldruckpegels der 2. Harmonischen des 8-Hz-Obertonkomplexes (also ebenfalls 16 Hz) betrug an dessen Hörschwelle $\Delta L_{OTC} = 7,4\,dB$.

Dies zeigte, dass die Hörschwelle des Grundtons eines Tonkomplexes mit Obertönen, welche auch als Obertonkomplex nicht gehört werden, niedriger liegt als die Hörschwelle des reinen Grundtons. Die Mediane der Hörschwellenunterschiede lagen für den 8-Hz-

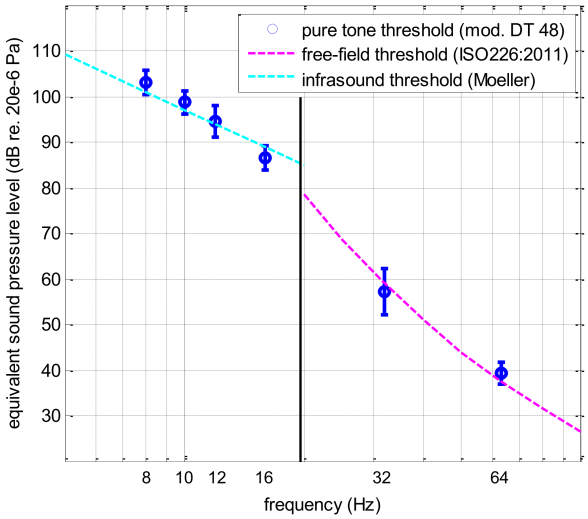

Abbildung 2: Arithmetische Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen Reintonhörschwellen von zehn Versuchspersonen (dunkelblau). Als Orientierungskurven dienen die Freifeld-Hörschwelle nach ISO 226 (magenta) und die Schätzungen der Hörschwelle (zyan) nach [2].

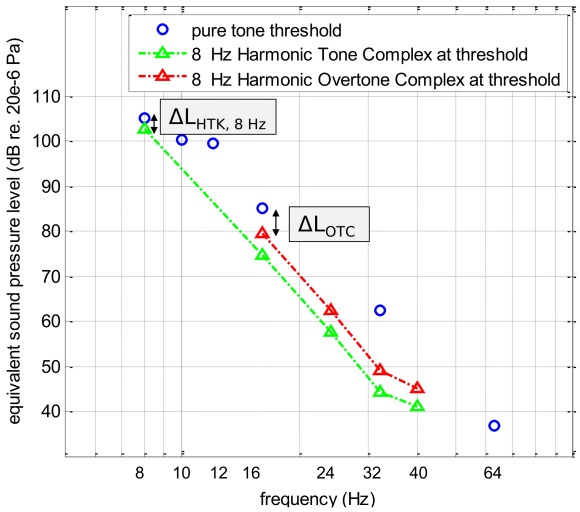

Abbildung 3: Beispiel einer Versuchsperson: Reintonhörschwelle des ersten Hörversuchs (blau). Bei Darbietung an der Hörschwelle des harmonischen Tonkomplexes mit 8-Hz-Grundfrequenz sind die äquivalenten Schalldruckpegel jeder einzelnen Harmonischen dargestellt (grün). Desgleichen ist an seiner Hörschwelle der Obertonkomplex des (fehlenden) 8-Hz-Grundtones dargestellt (rot).

harmonischen Tonkomplex (sechs Versuchspersonen) bei

$$\Delta L_{HTK,8Hz} = 1,5\,dB\,, \tag{1}$$

und für den 12-Hz-harmonischen Tonkomplex (sieben Versuchspersonen) bei

$$\Delta L_{HTK,12Hz} = 2,8\,dB\,. \tag{2}$$

Diese Hörschwellenverschiebungen lassen sich nicht durch den Effektivwert-Schalldruckpegel der harmonischen Tonkomplexe erklären, da dieser nur um wenige Hunderstel dB über dem Pegel des Grundtons lag.

Wahrnehmungs-Evaluation

Den Versuchspersonen wurden Fragen zur Wahrnehmung und Tieftonwirkung von Infraschall gestellt. Die reinen Infraschalltöne wurden mehrheitlich als angenehm empfunden und mit 'flackernd' oder 'brummend' beschrieben. Sie wurden als nicht tonhaltig beschrieben und daher von mehreren Versuchspersonen mit Windgeräuschen verglichen. Da bei Tonkomplexen mit und ohne Grundton im Infraschallbereich keine Unterschiede in der Wahrnehmung nachweisbar waren, kann vermutet werden, dass ein schwellennaher Obertonkomplex eine Infraschall-ähnliche Wahrnehmung hervorrufen kann.

Fazit

Die Hörschwellenmessungen von „reinen“ Infraschall-Tönen zeigten, dass diese erst bei hohen Schalldruckpegeln von über 80 dB wahrgenommen werden. Mögliche Gehörschädigungen im Hörbereich durch Infraschall-Exposition mit hohen Schalldruckpegeln sollten zukünftig untersucht werden (zunächst also eine mögliche TTS), außerdem die Rolle ungewollter technischer Verzerrungen, welche auch bei der Beschallung mit „reinen“ Tönen vorhanden sind. Bei den durchgeführten Messungen lagen die Pegel der Einzeltöne der ungewollten technischen Klirrkomponenten unterhalb genormter Reintonhörschwellen. Zukünftig sollte jedoch bei der Messung von Reinton-Hörschwellen untersucht werden, ob das Summensignal der Klirrkomponenten (Obertonkomplex) gehört wird, ebenso die Unterschiede zwischen Kalibrierung mit „äquivalenten“ Bedingungen am Ohr, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wurde, und gehörrichtiger Messung mit einer Gehörgangssonde.
In dieser Arbeit konnten Hörschwellenverschiebungen durch unhörbare Obertonkomplexe nachgewiesen werden. Zukünftig muss geklärt werden, inwiefern die Phasenbeziehungen der Harmonischen Einfluss auf diese Hörschwellenverschiebungen haben.

Literatur

[1] Lochner, J.: Hörschwellenmessungen zur Tieftonwirkung und Hörbarkeit harmonischer Tonkomplexe mit Grundfrequenz im Infraschallbereich. Bachelorarbeit TU Berlin, Inst. f. Strömungsmech. und Techn. Akust. (2013)

[2] Møller, H. & C.S. Pedersen: Hearing at Low and Infrasonic Frequencies. Noise & Health Vol.6 Issue 23 (2004), 37-57

[3] Watanabe & Yamada: Study on Perception of Complex Low Frequency Tones. Journal of low frequency noise, vibration and active control 21 (2002), 123-130

[4] Ryu et al.: Hearing thresholds for low-frequency complex tones of less than 150 Hz. Journal of low frequency noise, vibration and active control 30 No. 1 (2011), 21-30