

Einfluss der relativen Anfangsphase auf die Verdeckung eines amplitudenmodulierten tieffrequenten Tons durch einen tonalen Infraschall

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

¹ Abt. 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

Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass das menschliche Gehör Infraschall (< 20 Hz) wahrzunehmen vermag, sofern die Schalldruckpegel der entsprechenden Signale hoch genug sind (z. B. [1–6]). Die genauen Mechanismen der Infraschallwahrnehmung sind jedoch noch nicht geklärt.

Eine Hypothese ist die, dass Infraschall als Amplitudenmodulation (AM) wahrgenommen wird. Daten von Marquardt und Jurado [7] zeigen, dass Infraschallreize perzeptuell sehr ähnlich zu zeitlichen Amplitudenmodulationen tieffrequenter Reize sind. Versuchspersonen ihrer Studie konnten einen mit 8 Hz modulierten 63-Hz-Träger von einem 63-Hz-Ton in Anwesenheit eines überschwellig dargebotenen 8-Hz-Infraschalls nur schwer unterscheiden.

Motiviert durch die Studie von Marquardt und Jurado [7] untersuchten Friedrich, Joost, Fedtke und Verhey [8], ob die Wahrnehmung von AM im tieffrequenten Hörschallbereich durch Infraschall beeinflusst wird. Hierzu wurde der gerade wahrnehmbare Modulationsgrad (im Folgenden als *AM-Schwelle* bezeichnet) für einen mit 8 Hz sinusförmig modulierten 64-Hz-Ton bestimmt, und zwar sowohl in Abwesenheit als auch in Anwesenheit eines überschwelligen, ebenfalls sinusförmigen 8-Hz-Infraschallreizes. Der Infraschallreiz wurde entweder in Phase (0°) oder in Gegenphase (180°) relativ zur Modulation dargeboten. Für beide Phasenlagen waren die AM-Schwellen durch die Anwesenheit des Infraschallreizes im Mittel über alle

Versuchspersonen um 4 dB erhöht. Der Effekt der Phase auf die Schwelle war individuell sehr unterschiedlich: Bei einigen Versuchspersonen waren die AM-Schwellen bei 180° höher als bei 0° , bei anderen waren sie niedriger, bei wiederum anderen waren sie nahezu gleich. Im Mittel über alle Versuchspersonen gab es keinen signifikanten Phaseneffekt.

Ein vergleichbares Versuchsparadigma wurde kürzlich im Hörschallbereich von Schlittenlacher, Lim, Lawson und Moore [9] genutzt. Sie untersuchten in ihrer Studie den Einfluss eines 50-Hz-Tons auf die AM-Schwelle bei einem mit 50 Hz amplitudenmodulierten 3-kHz-Ton in Abhängigkeit von der der Phasenlage zwischen Ton und Modulator im Bereich von 0° bis 330° . In Abbildung 1 ist links schematisch das Spektrum der verwendeten Reize gezeigt. Auf der rechten Seite der Abbildung ist die über alle Versuchspersonen gemittelte AM-Schwelle als Funktion der Phasenlage dargestellt. Die Funktion ist näherungsweise sinusförmig, mit einem Minimum bei 90° und einem Maximum bei 270° . Der AM-Schwellenunterschied zwischen diesen beiden Phasenlagen beträgt 10 dB (grüne gepunktete Linie). Der Phaseneffekt zwischen 0° und 180° beträgt in ihrer Studie hingegen nur 2 dB (rote gepunktete Linie).

Das Ziel der vorliegenden Studie bestand darin, zu untersuchen, ob ein größerer Effekt der Phasenlage auch bei der Interaktion von Infraschall und AM im tieffrequenten Hörschallbereich gemessen werden kann, wenn nicht nur 0° und 180° betrachtet werden. Daher wurden neue Messungen durchgeführt, in denen die AM-Schwellen für Phasenlagen von 0° bis 315° in 45° -Schritten bestimmt wurden.

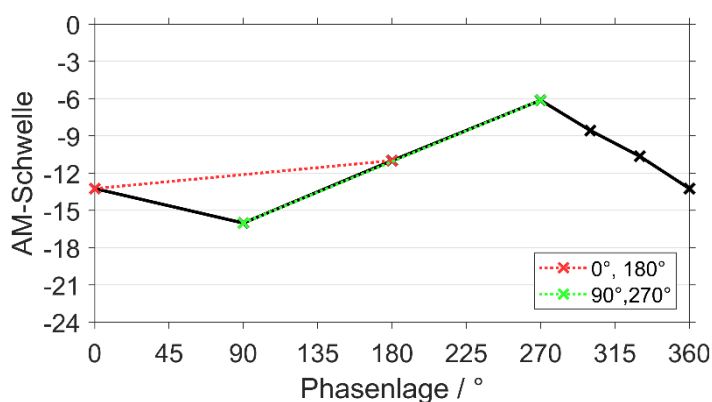
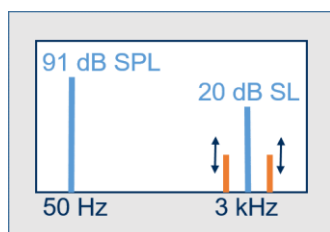


Abbildung 1: Das Experiment von Schlittenlacher und Kollegen [9]. Links: Schematische Darstellung des Spektrums der verwendeten Reize. Die Reize bestanden aus einem mit 50 Hz modulierten 3-kHz-Träger sowie einem überschwelligen 50-Hz-Ton, dessen Phasenlage relativ zum Modulator Werte zwischen 0° und 315° hatte. Rechts: Die über alle Versuchspersonen arithmetisch gemittelte AM-Schwelle als Funktion der Phasenlage.

Methode

Insgesamt wurden die AM-Schwellen für fünf Versuchspersonen bestimmt. In diesem Beitrag stellen wir die Ergebnisse zweier Versuchspersonen vor, die bereits in unserer vorherigen Studie [8] etwa 10 Monate zuvor gegenläufige Phaseneffekte (zwischen 0° und 180°) zeigten. Die Details zu den zwei Versuchspersonen, deren Daten hier gezeigt werden, sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Angaben zu den Versuchspersonen. Die Zeit zwischen den Studien bezieht sich auf den Zeitraum der Hörversuche in der aktuellen und der vorherigen Studie [8].

Kürzel	Geschlecht, Alter	Zeit zwischen den Studien
L1	weiblich, 29 Jahre	10 Monate
L2	männlich, 33 Jahre	10 Monate

Abbildung 2 zeigt schematisch das Spektrum der verwendeten Reize. Sie bestanden aus einem mit 8 Hz sinusförmig modulierten 64-Hz-Träger sowie einem überschwelligen sinusförmigen 8-Hz-Reiz, dessen Phasenlage relativ zum Modulator Werte zwischen 0° und 315° hatte (Schrittweite 45°). Die Pegel des Infrschalls und der Trägerkomponente wurden relativ zur individuellen Hörschwelle angegeben (englisch „Sensation Level“, SL). Der SL war 9 dB für 8 Hz und 24 dB für 64 Hz. Hierzu wurde die individuelle Detektionsschwelle für 8 Hz und 64 Hz aus der vorherigen Studie [8] verwendet.

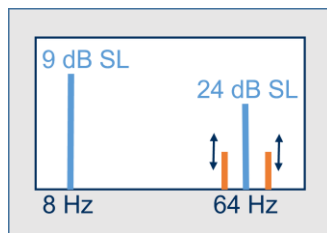


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Spektrums der verwendeten Reize. Die Reize bestanden aus einem mit 8 Hz modulierten 64-Hz-Träger sowie einem überschwelligen 8-Hz-Ton, dessen Phasenlage relativ zum Modulator zwischen 0° und 315° lag (Schrittweite 45°).

Die Experimente fanden in einer Hörkabine statt. Die AM-Schwellen wurden mit einem adaptiven 3-Intervall-3-Alternativen-Zwangwahlverfahren mit 1-Auf-2-Ab-Prozedur gemessen. Für jede Kondition wurde als

Schwellenschätzer der arithmetische Mittelwert aus je zwei Einzelschwellen (in dB) verwendet.

Alle Reize waren 1500 ms lang, inklusive der Von-Hann-Flanken am Anfang und Ende des Reizes (Rampendauer je 250 ms). Sie wurden mittels des monauralen rausch- und verzerrungsarmen Einsteckhörersystems LDREPS (*Low-Distortion Sound Reproduction System*) dargeboten, das eigens für Versuche mit hochpegeligen Infrschallsignalen entwickelt worden ist. Das monaurale 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 rauscharmem Mikrofon. Die Eigenschaften des LDREPS sind in [10] näher beschrieben. Die Verzerrungsarmut für die in dieser Studie verwendete Trägerfrequenz von 8 Hz wurde in [6] gezeigt. Über das Mikrofon wurde im Experiment vor jeder neuen Kondition der ausreichend dichte Sitz des Einsteckhörers im Gehörgang überprüft. Dazu wurde ein 4-Hz-Signal mit einem im Ohrsimulator kalibrierten Schalldruckpegel von 102,5 dB präsentiert. Nur wenn die im Gehörgang gemessenen Pegel innerhalb eines Toleranzbereiches von 2,5 dB lagen, wurde die Messung durchgeführt.

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 3 zeigt für die beiden Versuchspersonen L1 (links) und L2 (rechts) jeweils die AM-Schwellen als Funktion der Phasenlage (schwarze Linie). Graue Punkte stellen die Einzelschwellen dar, aus denen der Mittelwert als AM-Schwelle berechnet wurde. Bei beiden Versuchspersonen zeigt sich eine näherungsweise sinusförmige Abhängigkeit. Die Phaseneffekte zwischen 0° und 180° sind in Stärke und Richtung individuell unterschiedlich (rote gepunktete Linien) und weichen nur geringfügig von den Effekten ab, die in der vorherigen Studie [8] beobachtet wurden (blaue gepunktete Linien; bei L1: -6 dB versus -5 dB; bei L2: $+2$ dB versus $+3$ dB). Die Lage der Extrema variiert leicht. Im Mittel über die beiden Versuchspersonen liegen Minimum und Maximum etwa bei 90° beziehungsweise 270° .

Die Abhängigkeit von der Phase ist in qualitativer Übereinstimmung mit den Daten von Schlittenlacher und Kollegen aus dem Hörschallbereich [9]. Sogar der AM-Schwellenunterschied zwischen 90° und 270° (grüne Linien) ist mit dem im Hörschallbereich vergleichbar: Der Effekt beträgt bei L1 etwa $+12$ dB und bei L2 etwa $+8$ dB.

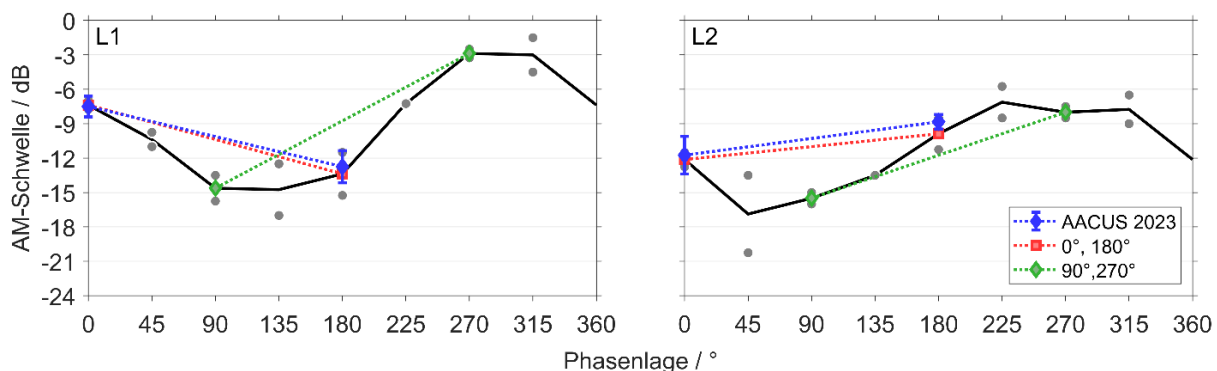


Abbildung 3: AM-Schwellen für zwei Versuchspersonen als Funktion der Phasenlagen zwischen Modulator und Infrschallreiz.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde untersucht, wie ein überschwelliger, sinusförmiger Infraschallreiz mit einer Frequenz von 8 Hz die Wahrnehmung einer Amplitudenmodulation (AM) mit einer Modulationsfrequenz von 8 Hz im tieffrequenten Hörschallbereich (64 Hz) beeinflusst. Der Fokus lag dabei auf der Phasenlage zwischen dem Modulator und dem Infraschallreiz. Die Abhängigkeit der AM-Schwelle von der Phasenlage hatte einen näherungsweise sinusförmigen Verlauf. Die Phaseneffekte zwischen 0° und 180° waren individuell unterschiedlich. Die individuellen AM-Schwellen glichen für diese Phasen nahezu denen, die in einer vorherigen Studie [8] bestimmt wurden. Das Maximum der AM-Schwelle lag nahe 270° , das Minimum nahe 90° . Die Differenzen zwischen den beiden Schwellen waren mit +8 dB und +12 dB vergleichbar mit den Effekten (+10 dB), die im Hörschallbereich [9] gemessen wurden.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung unseres Projektes „Infraschall und seine Bedeutung für den Hörschall“ (FE 1192/3-2 | VE 373/4-2). Darüber hinaus gilt unser Dank Benjamin Beyer für die Unterstützung bei der Datenerhebung in Magdeburg.

Literatur

- [1] Yeowart, N. S., Evans M. J.: Thresholds of audibility for very low-frequency pure tones. *The Journal of the Acoustical Society of America* 55, 1974, 814–818.
- [2] Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise & Health* 6, 2004, 37–57.
- [3] Kühler, R., Fedtke, T., Hensel, J.: Infrasonic and low-frequency insert earphone hearing threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America* 137 (4), 2015, EL347–EL353.
- [4] Jurado, C., Larrea, M., Patel, H., Marquardt, T.: Dependency of threshold and loudness on sound duration at low and infrasonic frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America* 148, 2020, 1030–1038.
- [5] Friedrich, B., Joost, H., Fedtke, T., Jesko, L. V.: Spectral integration of infrasound at threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America* 147, 2020, EL259–EL263.
- [6] Joost, H., Friedrich, B., Verhey, J. L., Fedtke, T.: Is infrasound perceived by the auditory system through distortions? *Acta Acustica* 5 (4), 2021, 1–10.
- [7] Marquardt, T., Jurado, C.: Amplitude modulation may be confused with infrasound. *Acta Acustica united with Acustica* 104, 2018, 825–829.
- [8] Friedrich, B., Joost, H., Fedtke, T., Jesko, L. V.: Effects of infrasound on the perception of a low-frequency sound. *Acta Acustica* 7, 2023, 60.
- [9] Schlittenlacher, J., Lim, J. X., Lawson, J., Moore, B. C. J.: Modulation masking produced by a low-frequency pure tone. *Hearing Research* 424, 2022, 108596.
- [10] Joost, H., Friedrich, B., Verhey, J. L., Fedtke, T.: How to present pure-tone infrasound to the ear. 23rd International Congress on Acoustics (ICA), Aachen, 2019.