

Akustische Schallquelle für die objektive Untersuchung der auditorischen Wahrnehmung von Infraschall mittels MEG und fMRT

Robert Kühler¹, Johannes Hensel¹

¹Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland, Email: robert.kuehler@ptb.de

Einleitung

Das auditorische System des Menschen ist unempfindlicher für Infra- und tieffrequenten Schall ($1 < f < 125$ Hz) gegenüber Schallereignissen im höheren Frequenzbereich. Entgegen der allgemeinen Meinung ist die Wahrnehmung von Infraschall mit dem Gehör jedoch möglich und Reintonhörschwellen wurden u.a. von [1] ermittelt. Darüber hinaus wird angenommen, dass ein Bevölkerungsanteil von ca. 2.5% der EU besonders sensitiv auf tieffrequenten Schall reagiert und sich verstärkt belästigt fühlt [2]. Die Mechanismen des „Hörens“ von Infraschall und die Weiterverarbeitung im auditorischen System sind jedoch nicht genau bekannt. Im Rahmen des europäischen Metrologie-Forschungsprojekts „EARS“ sollen mithilfe bildgebender Verfahren, wie z. B. funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) und Magnetenzephalographie (MEG) die Mechanismen der auditorischen Wahrnehmung näher untersucht werden. In diesem Beitrag wird eine MEG-/MRT-kompatible akustische Infraschall-Quelle für die Anregung des auditorischen Systems und Messungen der Hörschwelle bis zu einer unteren Frequenz von 2,5 Hz zur Erprobung und Validierung der Infraschall-Quelle vorgestellt.

Akustische Infraschall-Quelle

Die Schallquelle basiert auf einem elektrodynamischen Lautsprecher mit starkem Magneten und verwindungssteifem Chassis und ist in der Lage, hohe Schalldruckpegel mit sehr geringen harmonischen Verzerrungen im zu untersuchenden Frequenzbereich ($2,5 \text{ Hz} < f < 125 \text{ Hz}$) zu erzeugen. Der Lautsprecher ist luftdicht in eine gedämpfte Holzbox eingebaut und die Schallabstrahlung erfolgt über einen Polyethylenschlauch und einen audiometrischen Gehörgangstopfen, vgl. Abb. 1. Durch die Verwendung eines Schallschlauches kann die Quelle zur Vermeidung elektromagnetischer Beeinträchtigungen außerhalb des Erfassungsbereiches der bildgebenden Sensoren platziert werden. Das abgeschlossene Volumen zwischen Lautsprechermembran, Schlauch und Ohr einer Testperson stellt für tiefe Frequenzen eine Druckkammer dar und ermöglicht eine verlustarme akustische Anregung im Infraschallbereich.

Die Schallisolierung gegenüber den MRT-Betriebsgeräuschen für Testpersonen erfolgt mittels eines supraauralen Gehörschutzes (Bilsom Comfort 2420) mit angepasstem Schallschlauchdurchgang in die Gehörschutzkapsel.

Die Testsignale können mit einem optischen Mikrophon (Sennheiser MO2000) überwacht werden (vgl. Abb. 1), dass keinerlei Metallteile enthält und keinen Strom

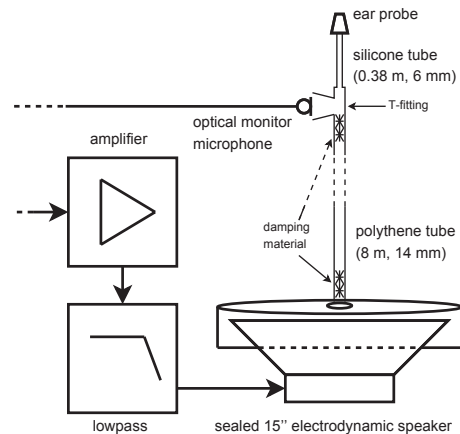


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Infraschall-Quelle für eine rein auditorische Anregung. Für eine Verwendung innerhalb MEG- und MRT-Untersuchungen erfolgt die Schallübertragung über einen Schlauch zum Ohr der Testperson. Harmonische Verzerrungen werden durch den Tiefpass 2. Ordnung und Dämpfungsmaterial innerhalb des Schallschlauches minimiert.

führt. Es setzt die Auslenkung der Mikrofonmembran linear in die Helligkeit eines Lichtstrahles um, der über Lichtleiterkabel an einen optisch-analogen Wandler gesendet und in eine Spannung gewandelt wird.

Zur Unterdrückung von überschweiliger harmonischen Verzerrungen höherer Ordnung wird ein analoger Tiefpass 2. Ordnung mit einer Eckfrequenz von 40 Hz, und innerhalb des Schallschlauches poröses Dämpfungsmaterial verwendet. Die Abbildung 2 zeigt die Schalldruckpegel der ersten fünf Harmonischen gegenüber der Freifeldhörschwelle bei 2,4 phon [4] bei einer sinusförmigen Anregung im Frequenzbereich von 2,5 bis 125 Hz mit einem Anregungspegel entsprechend der Kurve gleicher Lautstärkepegel bei 60 phon [1, 4].

Ermittlung der Hörschwelle

Zur Validierung der Infraschall-Quelle wurden die monauralen Hörschwellen von 18 (♀ 8, ♂ 10) otologisch normalen Testpersonen im Alter von 18 bis 25 Jahren (Ø 21 Jr.) für das bessere Ohr bestimmt. Das kontralaterale Ohr blieb unverschlossen und die Messungen fanden in einem schallisolierten Raum statt. Die Hörschwellen für 14 Reintöne im Frequenzbereich $2,5 \leq f \leq 125$ Hz wurden mithilfe der adaptiven, gewichteten „Up-and-Down“-Methode in Kombination mit einem „2-Alternative-Unforced-Choice“-Verfahren nach [3] ermittelt. Die Dauer der Testtöne variierte zwischen 0,6 s

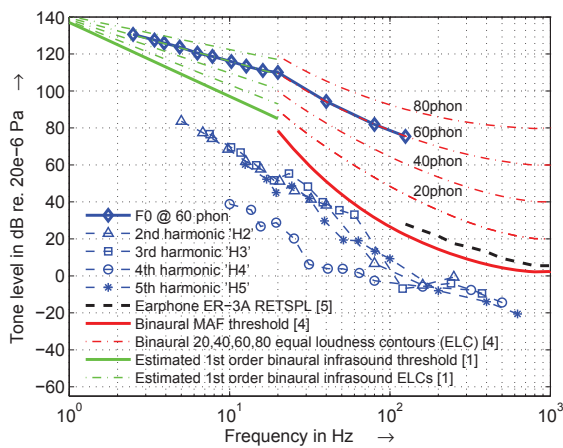


Abbildung 2: Grundton (F_0) und harmonische Verzerrungsprodukte H_n ($n = 2 \dots 5$) der Infraschall-Quelle für Sinustöne von 2,5 bis 125 Hz bei einem Anregungspegel von 60 phon entsprechend den Schalldruckpegelwerten aus [1] und [4].

für 125 Hz und 4 s für 2,5 Hz. Alle Töne wurden über \cos^2 -Rampen ein- und ausgeschaltet. Für einen Testton der Frequenz $f \leq 20$ Hz wurde die Dauer der Rampen auf jeweils drei Perioden und für $f > 20$ Hz auf jeweils vier Perioden der jeweiligen Frequenz festgelegt. Abb. 3 zeigt die ermittelten monauralen Hörschwellen für die konstruierte Infraschall-Quelle. Die mittlere Hörschwelle

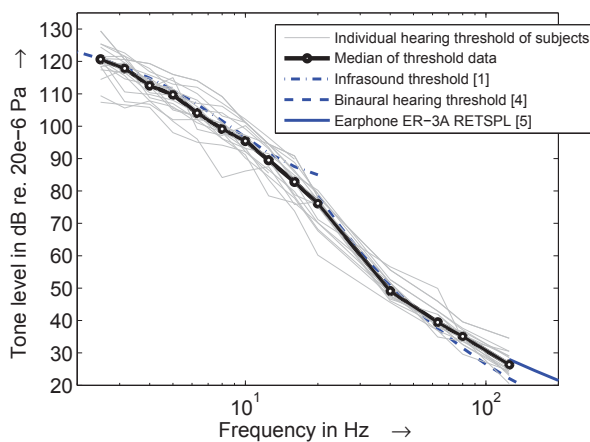


Abbildung 3: Mit Hilfe der Infraschall-Quelle ermittelte monaurale Hörschwellen für Reintöne zwischen $2,5 \leq f \leq 125$ Hz für 18 otologisch normale Testpersonen im Alter von 18 bis 25 Jahren. Zum Vergleich sind die standardisierten Hörschwellen für einen Einsteckhörer (ER-3A) und für das Freifeld (ISO226:2003) dargestellt. Unterhalb von 20 Hz ist zusätzlich die binaurale Hörschwelle im Druckfeld nach [1] dargestellt.

für einen Reinton mit 125 Hz wurde bei einem Wert von 26,4 dB SPL erreicht, wobei der Bereich zwischen dem 5%- und dem 95%-Perzentil ($P_{5,95}$) einen Wert von 7,5 dB umfasste. Für die tiefste Frequenz (2,5 Hz) musste im Mittel ein Schalldruckpegel von 120,7 dB SPL für eine Hörempfindung erzeugt werden. Der Perzentilbereich $P_{5,95}$ umfasste hierbei einen Bereich von 16 dB. Im Vergleich zu standardisierten Hörschwellen und Infraschall-

Hörschwellen aus der Literatur zeigt sich für die höchste Frequenz (125 Hz) eine gute Übereinstimmung mit der Bezugshörschwelle für einen Einsteckhörer [5]. Für tiefere Frequenzen sind die ermittelten Hörschwellenwerte vergleichbar mit den Werten der binauralen Hörschwelle aus der Literatur [1, 4]. Bei Betrachtung der Einzel-Hörschwellen im Infraschallbereich ($f < 20$ Hz) ist die Streuung der Werte um den Median größer als im höheren Frequenzbereich. Weiterhin ist zu erkennen, dass einzelne Testpersonen gegenüber der mittleren Hörschwelle eine niedrigere Schwelle für Frequenzen im Infraschallbereich ($\Delta > 10$ dB) aufweisen.

Zusammenfassung

Es wurde eine akustische Quelle konstruiert, die eine objektive Untersuchung der auditorischen Wahrnehmung und Verarbeitung von tieffrequenten Schall und Infraschall mithilfe bildgebender Verfahren (MEG, fMRT) ermöglicht. Die Infraschall-Quelle ermöglicht eine verzerrungsarme akustische Stimulierung im Frequenzbereich $2 \leq f \leq 250$ Hz bis zu einem oberen Schalldruckpegel gemäß der 60-phon-Kurve (130 dB SPL für 2,5 Hz). Zur Validierung wurden monoaurale Hörschwellen im Frequenzbereich $2,5 \leq f \leq 125$ Hz für 18 otologisch normale Testpersonen ermittelt. Die mittleren Hörschwellen sind vergleichbar mit Werten aus der Literatur und stellen Orientierungswerte für nachfolgende Untersuchungen im MEG und fMRT dar.

Ausblick

In ersten Testmessungen im MEG konnten objektive Gehirnaktivitäten, insbesondere die Stimulus-korrelierte Gehirnantwort „m100“, die ca. 100 ms nach dem Onset eines akustischen Stimulus im auditorischen Cortex auftritt, bis zu einer unteren Frequenz von 12 Hz bei überschwelliger Darbietung nachgewiesen werden. Weitere Untersuchungen sollen u.a. die Fragen nach der Tonotopie der auditorischen Infraschallwahrnehmung und dem Nachweis von neuronalen Erregungsschwellen, insbesondere bei unterschwelliger akustischer Stimulierung beantworten.

Literatur

- [1] Moeller H., Pedersen C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise Health* 2004;6:37-57
- [2] Leventhall H. G.: Low frequency noise and annoyance. *Noise Health* 2004;6:59-72
- [3] Kaernbach C.: Adaptive threshold estimation with unforced-choice tasks. *Perception & Psychophysics* 2001;63(8):1377-1388
- [4] Akustik - Normalkurven gleicher Lautstärkepegel. DIN ISO 226:2003
- [5] Akustik - Standard-Bezugspegel für die Kalibrierung audiometrischer Geräte - Teil 2: Äquivalente Bezugsschwellenschalldruckpegel für reine Töne und Einsteckhörer. DIN ISO 389-2:1994