

Schutz des Gehörs bei Infraschall-Hörversuchen

Holger Joost¹; Marion Bug¹; Björn Friedrich²; Jesko Verhey²; Thomas Fedtke¹

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig,

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

² Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Abteilung für Experimentelle Audiologie,

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

Einleitung

Infraschall wird zunehmend als gesellschaftliches Problem wahrgenommen und hat deshalb einen neuen Stellenwert in der Lärmbekämpfung erhalten. Dieser Infraschall, allgemein definiert als Schall mit Frequenzen kleiner als 20 Hz [1] und damit unterhalb des klassischen Hörfrequenzbereiches, galt lange Zeit als nicht hörbar. Zwischenzeitlich konnten jedoch auch für Infraschall Hörschwellen bis hinunter zu 2 Hz [2] gemessen werden. Allerdings sind die Schalldruckpegel (SPL) sehr hoch. So liegt beispielsweise die mittlere binaurale Freifeldhörschwelle für 1000 Hz bei einem SPL von nur 2,4 dB [3], für 4 Hz hingegen bei etwa 114 dB [2].

Die für Hörversuche im Infraschallbereich erforderlichen Schalldruckpegel von bis zu 130 dB würden im Hörschallbereich weit über der zulässigen Sicherheitsgrenze liegen. Aus ethischen Gründen muss daher zum Schutz des Gehörs von Versuchspersonen vor eventuell auftretenden zu hohen Pegeln, insbesondere im Hörfrequenzbereich, eine wirksame Schutzvorrichtung eingesetzt werden. Bislang wird dafür häufig ein Tiefpassfilter, als letzter Sicherheitsbaustein zwischen dem Verstärker und dem Schallwandler, eingesetzt, der die Übertragung von Hörschallfrequenzen ausreichend dämpft. Dieser Ansatz wurde bisher auch bei unseren Versuchen zur Infraschallwahrnehmung verfolgt. Mit dem Einsatz eines Tiefpasses sind jedoch eine Vielzahl von Nachteilen verbunden, was uns dazu veranlasst hat, eine alternative Lösung als Schutzvorrichtung zu entwickeln.

Im Folgenden wird zunächst unser Wiedergabesystem vorgestellt, bevor in diesem Zusammenhang die neue Gehörschutzvorrichtung mit den Eigenschaften des bisherigen Ansatzes (Tiefpassfilter) verglichen wird.

Wiedergabesystem für Infraschall-Hörversuche

Von uns wird das Wiedergabesystem LDREPS (Low-Distortion Sound-Reproduction System) eingesetzt, das bei den erforderlichen hohen Schalldruckpegeln sehr verzerrungsarm ist [4].

Abbildung 1 zeigt ein Foto des LDREPS. Es basiert auf der Audiometrie-Kopfhörer-Kapsel RadioEar DD45 (RadioEar, Dänemark), von welcher in dem Wiedergabesystem zwei Stück für die getrennte Übertragung zweier Signale vorhanden sind. Die Schallwandler sind elektrodynamische Systeme, die vom Hersteller mit einer Nennimpedanz von 10 Ω und als linear bis zu einer Eingangsleistung von 500 mW spezifiziert sind. Die harmonischen Verzerrungen sind bei 120 dB SPL mit < 1 % angegeben. Die DD45-

Kopfhörerkapseln sind in luftdichten Aluminiumgehäusen montiert, jeweils mit einem Schallauslass in der Frontplatte. Schallschläuche mit einer Länge von etwa 25 cm verbinden die Schallauslässe mit dem Einsteckhörer Etymotic ER-10B+ (Etymotic Research Inc., USA), das ein Low-Noise-Mikrofon-System integriert hat. Das Volumen, das von der Membran der Kopfhörerkapsel, den Schallschläuchen und dem Gehörgang-Restvolumen gebildet wird, ist ausreichend klein, um eine akustische Stimulation mit den DD45-Kopfhörerkapseln bis in den Infraschallfrequenzbereich zu ermöglichen.

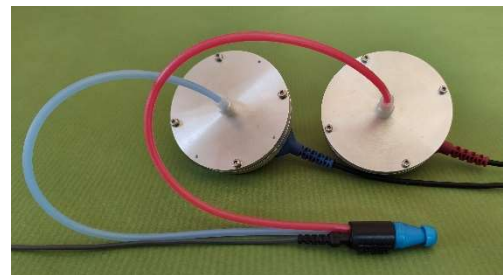


Abbildung 1: Foto des Wiedergabesystems, bestehend aus zwei DD45-Kopfhörerkapseln (oben), über zwei Schallschläuche mit dem Einsteckhörer Etymotic ER-10B+ (unten) gekoppelt.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil des LDREPS ist der Kopfhörerverstärker zum Speisen der DD45-Wandler. Er basiert auf einem LPA-2S Board (Funk Tonstudioteknik, Deutschland), das der Hersteller für unseren speziellen Zweck modifiziert hat, um die DD45-Wandler mit ihren niedrigen Impedanzen von 10 Ω bis hinunter zu 2 Hz mit einer maximalen Leistung von 500 mW betreiben zu können. Dieser Kopfhörerverstärker bietet eine hohe Ausgangsleistung und hat gleichzeitig ein sehr geringes Restrauschen sowie sehr geringe harmonische Verzerrungen (THD+N: 1 kHz-Signal 0,0013 %; 10 Hz-Signal 0,0006 %; beide bei 500 mW / 10 Ω).

Gehörschutzvorrichtung und Qualität der Stimuli

Zum Schutz des Gehörs von Versuchspersonen vor eventuell auftretenden zu hohen Pegeln im Hörfrequenzbereich wird bislang, wie in der Einleitung erwähnt, ein Tiefpassfilter als letzter Baustein zwischen dem Kopfhörerverstärker und der Kopfhörerkapsel eingesetzt. Jedoch fügt ein solches Tiefpassfilter selbst bei Verwendung hochwertiger

Komponenten dem Nutzsignal aufgrund eigener Nichtlinearitäten, insbesondere der verwendeten induktiven Elemente, unerwünschte Frequenzkomponenten hinzu, die dann zur Wahrnehmung des Infraschallsignals beitragen könnten.

Der Einfluss des Tiefpassfilters auf einen Stimulus kann durch Messung und Vergleich der Schalldruckpegelspektren ohne und mit Tiefpassfilter ermittelt werden. Abbildung 2 zeigt das Blockschaltbild des dafür verwendeten Versuchsaufbaus. Der von der DD45-Kopfhörerkapsel emittierte Infraschall wird durch einen Schallschlauch zum Etymotic ER-10B+ Einsteckhörer geleitet. Dieser ist über den Adapter DB-2012, der den äußeren Gehörgang simuliert, mit einem Simulator des abgeschlossenen Gehörgangs (Typ 4157 Brüel & Kjær, Dänemark) verbunden, dessen Mikrofon hier zur Messung des Schalldruckes verwendet wird. Dieser Simulator wird im Folgenden Ohrsimulator genannt.

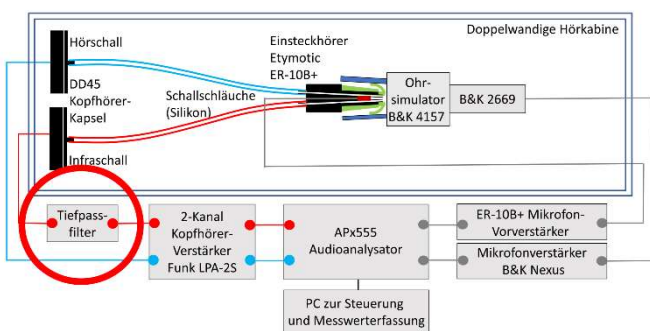


Abbildung 2: Blockschaltbild des Aufbaus zur Messung technischer Verzerrungen des LDREPS mit und ohne Tiefpassfilter (hier mit Tiefpassfilter gezeigt). Der zweite Kanal (hellblaue Verbindungslinien) ermöglicht es dem LDREPS, einen zusätzlichen Hörschallstimulus darzubieten (hier nicht verwendet).

Das aufgenommene Mikrofonsignal wird über den Mikrofon-Vorverstärker B&K 2669 und den Messverstärker B&K Nexus (Brüel & Kjær, Dänemark) auf einen Eingangskanal des Audioanalysators APx555 (Audio Precision, USA) geleitet. Das im Einsteckhörer Etymotic ER-10B+ vorhandene Mikrofon kann mit dem Ohrsimulator kalibriert und entzerrt und anschließend für Messungen mit Versuchspersonen eingesetzt werden. Der Audioanalysator APx555 liefert auch die Testsignale, die über den Kopfhörerverstärker Funk LPA-2S die DD45-Kopfhörerkapsel speisen. Zwischen dem Kopfhörerverstärker und der DD45-Kopfhörerkapsel für den Infraschallkanal wird das Tiefpassfilter (Filter zweiter Ordnung, -3 dB-Grenzfrequenz: 30 Hz) als Sicherungsglied eingebaut. Die DD45-Kopfhörerkapseln, der Einsteckhörer Etymotic ER-10B+ und der Ohrsimulator wurden für die Messungen in einer doppelwandigen schallisolierten Kabine platziert.

Abbildung 3 zeigt die gemessenen Spektren eines mit dem LDREPS übertragenen 4 Hz-Stimulus mit einem Schalldruckpegel von etwa 122 dB, einmal ohne (obere Grafik) und einmal mit (untere Grafik) Tiefpassfilter. Für die Messung des Spektrums mit zwischengeschaltetem Tiefpassfilter musste die Ausgangsspannung des Kopfhörerverstärkers aufgrund des Reihenwiderstands des Tiefpassfilters nachgeregelt

werden, um den gleichen Schalldruckpegel wie ohne Tiefpassfilter zu erreichen.

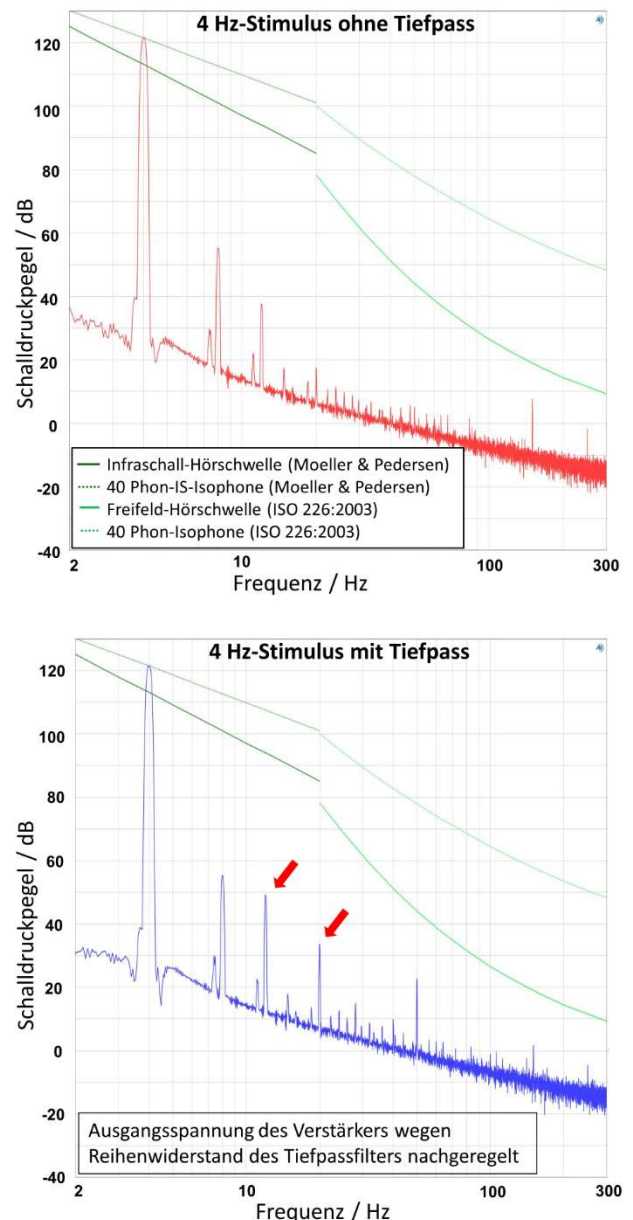


Abbildung 3: Spektren eines mit LDREPS übertragenen 4 Hz-Stimulus bei einem Schalldruckpegel von 122 dB; obere Grafik (rote Kurve): ohne Tiefpass, untere Grafik (blaue Kurve): mit Tiefpass zwischen Kopfhörerverstärker und DD45-Kopfhörerkapsel. Zusätzlich werden die Ruheshwellen und die 40 Phon-Isophonen gezeigt (grüne Linien).

Deutlich ist in den in Abbildung 3 gezeigten Spektren zu erkennen, dass mit zwischengeschaltetem Tiefpassfilter die Pegel der durch Verzerrung auftretenden dritten wie auch der vierten Harmonischen (rote Pfeile in der Abbildung) stark steigen. Dieses ist auf die Nichtlinearitäten des Tiefpassfilters zurückzuführen. Eine solche Verzerrung ist schon deshalb nicht wünschenswert, da es mögliche Verzerrungen durch das Gehör überdeckt. Letztere werden aber als möglicher Mechanismus der Hörwahrnehmung von Infraschall diskutiert.

Im Vergleich zu Reintönen weisen komplexere Stimuli, die beispielsweise in Hörexperimenten mit realitätsnäheren Signalen verwendet werden, noch deutlich stärkere Verzerrungen auf.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch die unter den gleichen Bedingungen gemessenen Spektren für einen aus 4 Hz- und 7 Hz-Reintönen zusammengesetzten Stimulus, wiederum einmal ohne (obere Grafik) und einmal mit (untere Grafik) Tiefpassfilter. Auch hier ist die Ausgangsspannung des Kopfhörerverstärkers aufgrund des Reihenwiderstands des Tiefpassfilters nachgeregelt worden, um den gleichen Schalldruckpegel wie bei der Messung ohne Tiefpassfilter zu erhalten.

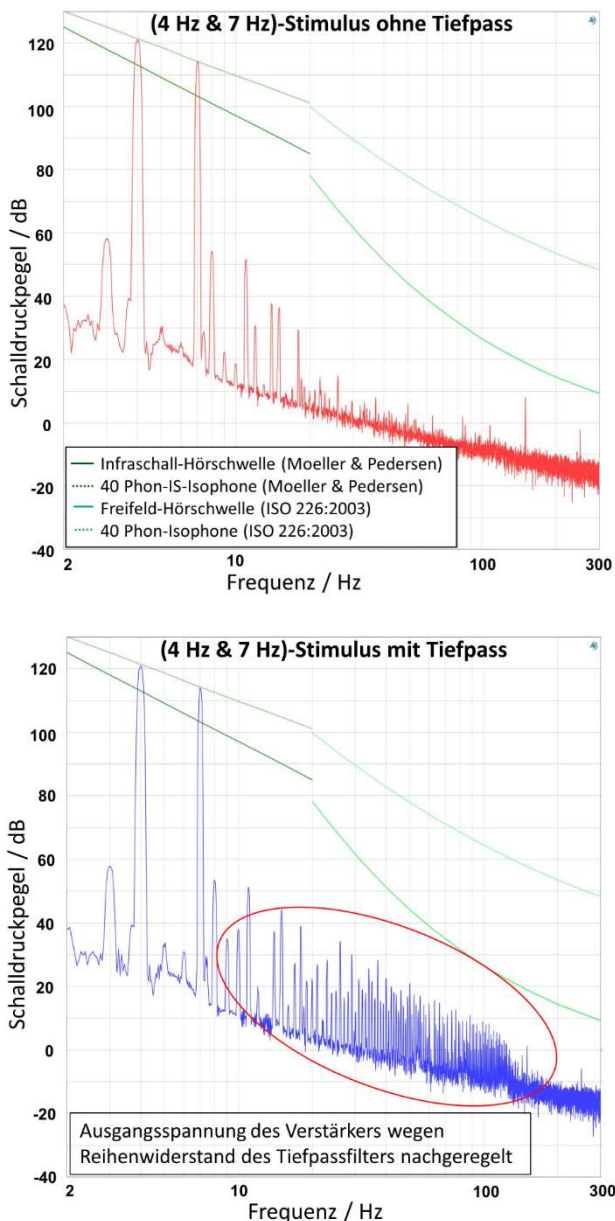


Abbildung 4: Spektren eines mit LDREPS übertragenen (4 Hz & 7 Hz)-Stimulus; obere Grafik (rote Kurve): ohne Tiefpass, untere Grafik (blaue Kurve): mit Tiefpass zwischen Kopfhörerverstärker und DD45-Kopfhörerkapsel. Zusätzlich werden die Ruhehörschwellen und die 40 Phon-Isophonen gezeigt (grüne Linien).

Im Vergleich zum Spektrum des 4 Hz-Reintons sind in den beiden Spektren des zusammengesetzten Stimulus höhere Pegel von Verzerrungsprodukten erkennbar. Sie wurden durch (nichtlineare) Mischung (Bildung von Summen- und Differenzfrequenzen) an den Nichtlinearitäten des Gesamt-Übertragungssystems gebildet. Im Falle des zwischengeschalteten Tiefpassfilters (untere Grafik) ist eine erhebliche Zahl an zusätzlichen Verzerrungsprodukten entstanden, die, auch wenn sie einzeln für sich betrachtet noch deutlich unterhalb der Hörschwelle liegen, in ihrer Summe zum „Hören“ des Infraschallstimulus beitragen können und deshalb vermieden werden sollten. Auch können diese technisch erzeugten Verzerrungsprodukte den Nachweis von Verzerrungsprodukten im Gehörgang von Probanden, die vom Gehör erzeugt wurden, erheblich erschweren.

Um dieses Problem zu lösen, wurde ein Schnellabschalter entwickelt, der bei Überschreitung von frequenzabhängigen, voreingestellten Pegelwerten das Signal abschaltet und damit Versuchspersonen vor zu hochpegeligen akustischen Signalen schützt. Er ersetzt das Tiefpassfilter, ohne jedoch das Nutzsignal signifikant zu beeinflussen, da er im durchgeschalteten Zustand lediglich als „Drahtverbindung“ fungiert. Er basiert auf einem Teensy-Mikrocontroller-Board, mit dem die an der DD45-Kopfhörerkapsel anliegende Klemmenspannung gemessen und frequenzabhängig ausgewertet wird. Eine akustische Kalibrierung, z. B. im Ohrsimulator, ermöglicht die Zuordnung von Schalldruckpegeln zu den Klemmenspannungswerten. Der damit ermöglichte Aufbau für Hörversuche ist in Abbildung 5 gezeigt. Hier ist nicht nur im Infraschallkanal ein solcher Schnellabschalter zwischen Kopfhörerverstärker und DD45-Kopfhörerkapsel eingefügt, sondern auch im Infraschallkanal. Dies stellt sicher, dass in beiden Kanälen des Wiedergabesystems das Gehör von Probanden wirksam geschützt wird. Im Hörschallkanal wäre dieser Schutz mit einem Tiefpassfilter nicht möglich, da er dort aufgrund seiner Tiefpasswirkung nicht eingesetzt werden kann.

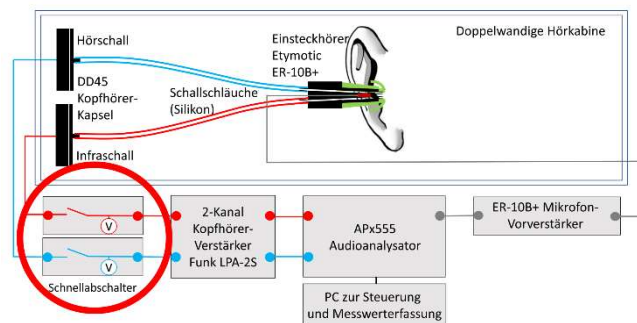


Abbildung 5: Blockschaubild des Aufbaus für Hörversuche mit Schnellabschaltern in beiden Kanälen.

Abbildung 6 zeigt das mit dem Messaufbau aus Abbildung 2 ermittelte Spektrum eines (4 Hz & 7 Hz)-Stimulus, wobei das Tiefpassfilter gegen einen Schnellabschalter ausgetauscht worden ist. Eine Spannungsnachregelung des Kopfhörerverstärkers, wie beim Einsatz des Tiefpassfilters, war hier nicht erforderlich. Das Spektrum ähnelt dem in der oberen Grafik von Abbildung 4 gezeigten, welches ohne

irgendein zwischengeschaltetes Sicherheitselement aufgenommen worden ist. Daraus ist ersichtlich, dass der Schnellabschalter ein übertragenes Signal nicht nennenswert beeinflusst. Insbesondere fügt er dem Signal keinerlei Verzerrungsprodukte hinzu.

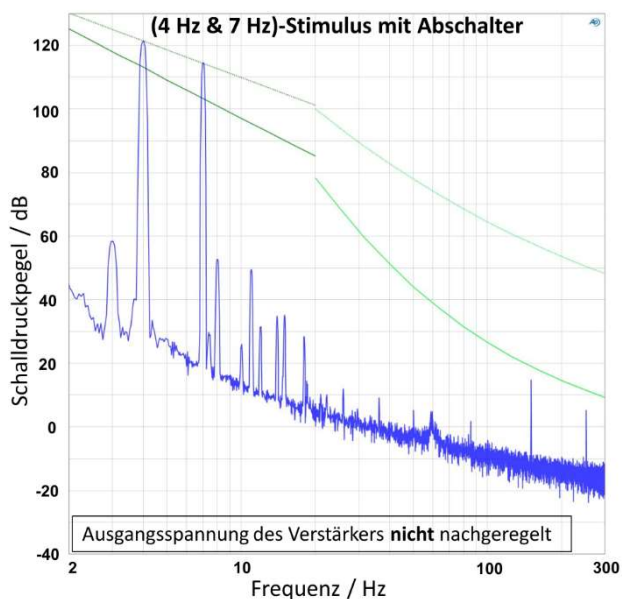


Abbildung 6: Spektrum eines mit LDREPS und Schnellabschalter übertragenen (4 Hz & 7 Hz)-Stimulus (blaue Kurve). Zusätzlich werden die Ruhehörschwellen und die 40 Phon-Isophonen gezeigt (grüne Linien).

Zusammenfassung und Ausblick

Der adäquate Schutz des Gehörs bei Infraschall-Hörversuchen ist wegen potenziell gehörschädigender Pegel unabdingbar. Ein üblicherweise zu diesem Zweck eingesetztes Tiefpassfilter dämpft zwar zuverlässig die Frequenzen im üblichen Hörfrequenzbereich, sein Einsatz ist jedoch aufgrund unerwünschter Eigenschaften (harmonische Verzerrungen, Durchgangsdämpfung) problematisch. Zudem

ist das Tiefpassfilter wegen seiner Sperrwirkung nicht im Hörschallkanal einsetzbar. In dieser Studie wurde ein Schnellabschalter als Ersatz des Tiefpassfilters vorgestellt. Der Vorteil des Schnellabschalters ist nicht nur, dass er keinen nennenswerten Eigenwiderstand hat, sondern auch, dass durch ihn keine zusätzlichen Verzerrungsprodukte auftreten. Somit ermöglicht er Infraschall-Hörversuche mit komplexeren Stimuli, die real vorkommenden Signalen nahekommen. Der Schnellabschalter kann auch im Hörschallkanal eines Wiedergabesystems eingesetzt werden. Zu guter Letzt sei angemerkt, dass der Schnellabschalter als Sicherheitseinrichtung auch mit anderen Wiedergabesystemen kombinierbar ist und damit nicht an unser Wiedergabesystem (LDREPS) gebunden ist.

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 danken wir Melina Strüp, Arbeitsgruppe „Hörschall“ der PTB, für die technische Realisierung des Schnellabschalters.

Literatur

- [1] E DIN 45680:2013: Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschmissionen. Berlin: Beuth; 2013.
- [2] Møller, H., Pedersen, C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise Health* 6:23 (2004), 37–57.
- [3] ISO 226:2003: Acoustics – Normal equal-loudness-level contours. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [4] 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, 2019, pp. 1470–1477. <http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/000733.pdf>.