

Bewertung der richtungsabhängigen Schalleintragskomponenten im individuellen Restgehörgang bei undichtem Sitz eines offenen Im-Ohr-Hörsystems hinsichtlich akustischer Transparenz

Reinhild Roden¹, Vincent Gräfen¹, Piero Rivera Benois², Simon Doclo^{2,3}, Matthias Blau^{1,3}

¹ Institut für Hörtechnik und Audiologie, Jade Hochschule Oldenburg, E-Mail: reinhild.roden@jade-hs.de

² Dept. für Medizinische Physik und Akustik, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

³ Cluster of Excellence Hearing4All, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Einleitung

Für den Prototyp eines offenen Im-Ohr-Hörsystems mit zwei internen Lautsprechern, vier integrierten Mikrofonen und nicht individueller, generischer Otoplastik (Abb. 1, 2) sollen im eingesetzten Zustand die Eigenschaften des offenen Ohres für alle Schalleinfallrichtungen für einen akustisch transparenten Höreindruck erhalten bleiben [1, 2]. Messungen haben allerdings gezeigt, dass der relative Übertragungspfad zwischen innerem Mikrofon im Vent des Hörsystems und dem Trommelfell (relTF) nicht unabhängig von der Position äußerer Schallquellen ist [5], was eine Schätzung des Schalldrucks am offenen Trommelfell aus den Signalen der eingebauten Mikrofone bei eingesetztem Hörsystem erschweren könnte.

In dieser Arbeit werden die zusätzlichen richtungsabhängigen Schalleintragskomponenten, die durch Lecks in den Gehörgang bei undichtem Sitz der Otoplastik eintreten, als Ursache für die Richtungsabhängigkeit der relTF herausgestellt. Es schließt sich die Betrachtung des zu erwartenden Fehlers durch die Undichtigkeiten bei generischer Otoplastik für diesen Prototyp und eine Bewertung dieses Fehlers hinsichtlich der Erreichung akustischer Transparenz an.

Methoden

FEM-Simulation

Bei perfekt abschließendem Sitz des Hörsystems in der Concha können zusätzliche Transferpfade von äußeren Quellen zum Trommelfell über die Lecks um das Hörsystem ausgeschlossen werden. Für diesen Fall ist zu erwarten, dass der Schall einer externen Quelle sich im rohrähnlichen Vent und im Restgehörgang zum Trommelfell als ebene Welle ausbreitet. Demnach sollte die Hypothese von richtungsunabhängigen relativen Übertragungsfunktionen zwischen dem inneren Mikrofon des Hörsystems und dem Trommelfell gelten. Dieser optimale Fall bei völligem Ausschluss von Undichtigkeiten wurde mittels Finiter Elemente Methode in COMSOL 5.4 am KEMAR-Kunstkopf mit eingesetztem Hörsystem simuliert. Die resultierenden Übertragungsfunktionen von externen Quellen zu innerem Vent-Mikrofon und zum Kuppler-Mikrofon ermöglichen die Überprüfung der genannten Hypothese zur ebenen Wellenausbreitung für die gegebene geometrische Struktur mit ihrer gegebenen Anordnung der Mikrofone (Abb. 3, 4). Die Geometrie des KEMAR-Kopfes mit anthropometrischer Pinna, dem Hörsystem und dem Kuppler wurde dazu mittels 3D Scans und CAD-Modellen erstellt. Das äußere Schallfeld, dessen Grenze kugelförmig mit einem Radius von 142 mm um das interaurale Zentrum liegt (Abb. 3), lässt

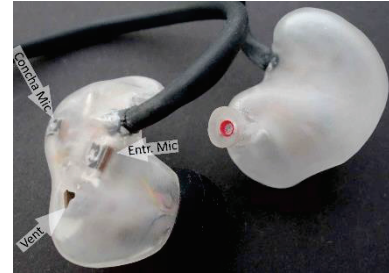


Abbildung 1: Foto des offenen Im-Ohr-Hörsystems mit generischer Otoplastik mit und ohne Dome (medialer Abschluss am Restgehörgang), aus [2]

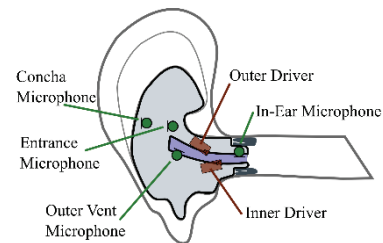


Abbildung 2: Schematische Darstellung des offenen Im-Ohr-Hörsystems mit den verbauten Komponenten, aus [2]

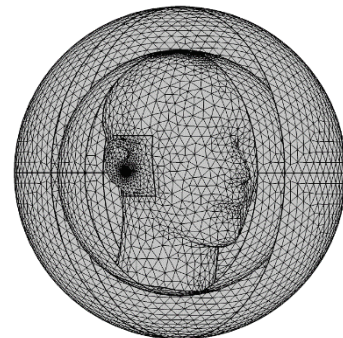


Abbildung 3: Gitter der sphärischen Domäne (Radius = 142 mm zum interauralen Zentrum) mit KEMAR-Kopf und anthropometrischer Pinna mit eingesetztem Hörsystem, umgeben von einer PML-Schicht (Dicke der PML-Schicht/Maschenweite des Gitters je Frequenz variabel)

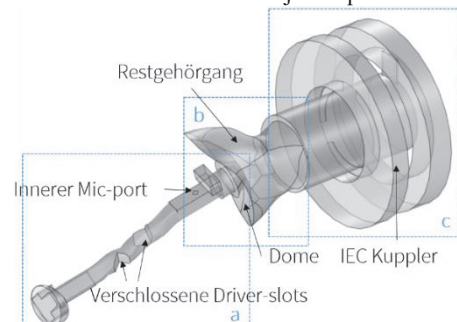


Abbildung 4: innere geometrische Struktur: a) Vent, b) Restgehörgang mit abschließendem Dome, c) IEC Kuppler

Betrachtungen ausschließlich für Quellen im Nahfeld zu. Die Entfernung der Quelle ist für diese allgemeine Betrachtung jedoch weitgehend irrelevant.

Im FE-Modell wurden die Oberflächen des Kopfes, Vents und des Kupplers als schallhart angenommen. Die Flächen der Pinna, des Restgehörgangs und des Domes wurden mit der Impedanz menschlicher Haut (gegeben in COMSOL) belegt. Thermo-viskose Effekte wurden für die engen Strukturen des Kupplers einbezogen. Die Anregung erfolgte reziprok [3] [4], um eine große Anzahl externer (sphärisch angeordneter) Quellpositionen in einer Berechnung zu ermöglichen. Die Schnellequellen lagen damit auf den Oberflächen des inneren Mikrofon-Ports und dem Kuppler-Mikrofon. Simuliert wurden Frequenzen zwischen 1 und 8 kHz, bei einer Auflösung von 1/24 Oktave.

Messungen an der Schallwand

Um für dieses Hörsystem die relative Transferfunktion zwischen innerem Vent-Mikrofon und dem Trommelfell- bzw. Kuppler-Mikrofon (relTF) für verschiedene Winkel des Schalleinfalls mit dicht abschließendem Sitz zu messen, wurde ein Silikonstück (Abb. 5, oben) als negative Abformung der Otoplastik mit angeschlossenem zylindrischen Rohrstück, an das ein Kuppler angesetzt wird, gegossen. An einer kreisrunden Schallwand im drehbaren Lautsprecherbogen wurde dieses Silikonstück („optimal dicht“) mittig platziert und für horizontale Quellen Signale am Vent- und Kuppler-Mikrofon mit dem Hörsystem bzw. ohne das Hörsystem nur am Kuppler-Mikrofon aufgenommen. An einer weiteren Silikonform eines menschlichen Außenohrs mit vollständigem Gehörgang und Trommelfell [5] wurde diese Messung bei normalem Einsetzen des Hörsystems („undicht“) und mit dem Versuch der Abdichtung durch Modelliermasse („abgedichtet“) wiederholt. Im Falle der Silikonpinna wurde ein zylinderförmiges Sondenmikrofon mit dem Port mittig am Umbopunkt und eben in der Fläche des Trommelfells in Richtung des Gehörgangs fest platziert.

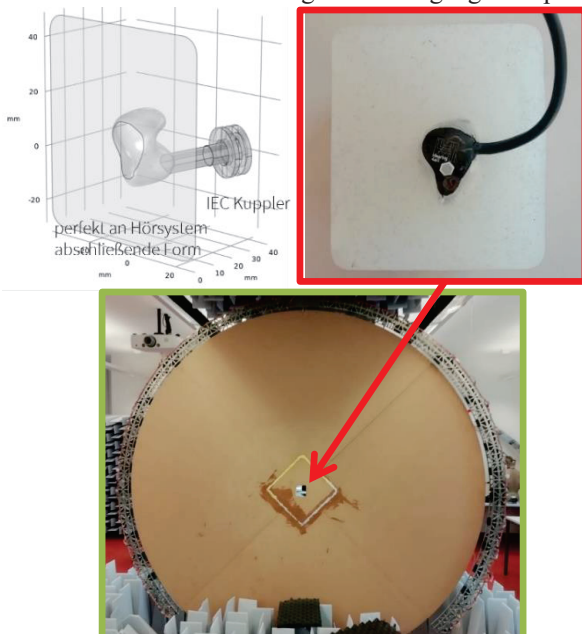


Abbildung 5: CAD-Modell (oben links) und Foto (oben rechts) des Silikonaufnahmestücks für das Hörsystem als Einsatz für die Schallwand im Lautsprecherbogen (unten)

Betrachtung anhand der Hearpiece-Datenbank

Zur späteren Bewertung der Undichtigkeiten hinsichtlich der zu erreichenden akustischen Transparenz, wurden Messungen der Hearpiece-Datenbank [6] herangezogen. Ausgewertet werden die jeweils 5 wiederholten Messungen der kopfbezogenen Transferfunktionen am Trommelfell bei eingesetztem Hörsystem (DV0001) an 26 Versuchspersonen (inkl. KEMAR) für sämtliche äußere Quellen sowie die 5 Messungen der kopfbezogenen Transferfunktion am Trommelfell für den offenen Fall.

Akustische Transparenz erfordert, dass der Schalldruck am Trommelfell mit eingesetztem Hörsystem $p_{d,a}$ ("aided") dem im offenen Zustand $p_{d,u}$ ("unaided") entspricht, d.h.

$$p_{d,a} = p_{d,u} \tag{1}$$

Bei einer externen und einer internen Quelle würde sich daraus

$$v_{int} * H_{a,int} = v_{ext} * (H_{u,ext} - H_{a,ext}), \tag{2}$$

ergeben (siehe Abb. 6), mit $H_{u,ext}$ bzw. $H_{a,ext}$ als Pfade zwischen äußerer Quelle v_{ext} zum unversorgten und zum versorgten Trommelfell, sowie dem internen Pfad $H_{a,int}$ für interne Quellen v_{int} . Bei Vernachlässigung der externen Schalleintragskomponenten vereinfacht sich Gl. (2) zu

$$v_{int} * H_{a,int} \approx v_{ext} * H_{u,ext} \tag{3}$$

Die Bewertung der Undichtigkeiten erfolgt aus der Betrachtung des Fehlers, der sich durch die Näherung ergibt, bei Vergleich des jeweils rechtseitigen Terms der Gleichungen (2) und (3).

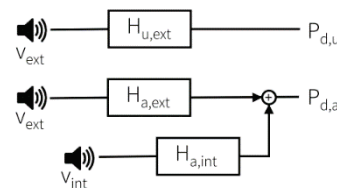


Abbildung 6: oben - Transfer $H_{u,ext}$ von einer äußeren Quelle v_{ext} zum Trommelfell im offenen Zustand $p_{d,u}$; unten - Summe eines inneren $H_{u,int}$ und externen Transferpfads $H_{u,ext}$ von einer inneren v_{int} und äußeren Quelle v_{ext} zum Trommelfell im geschlossenem Zustand $p_{d,a}$

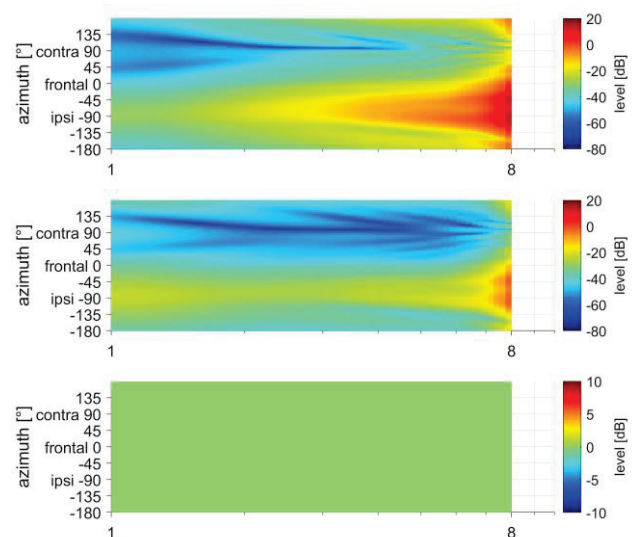


Abbildung 7: oben/mittig – simulierte Transferfunktionen zwischen horizontalen Quellen (Azimuth ϑ) und innerem Vent-Mikrofon, bzw. dem Kuppler-Mikrofon; unten - Richtungsabhängigkeit der relTF (relTF für alle ϑ relTF bei $\vartheta = -90^\circ$)

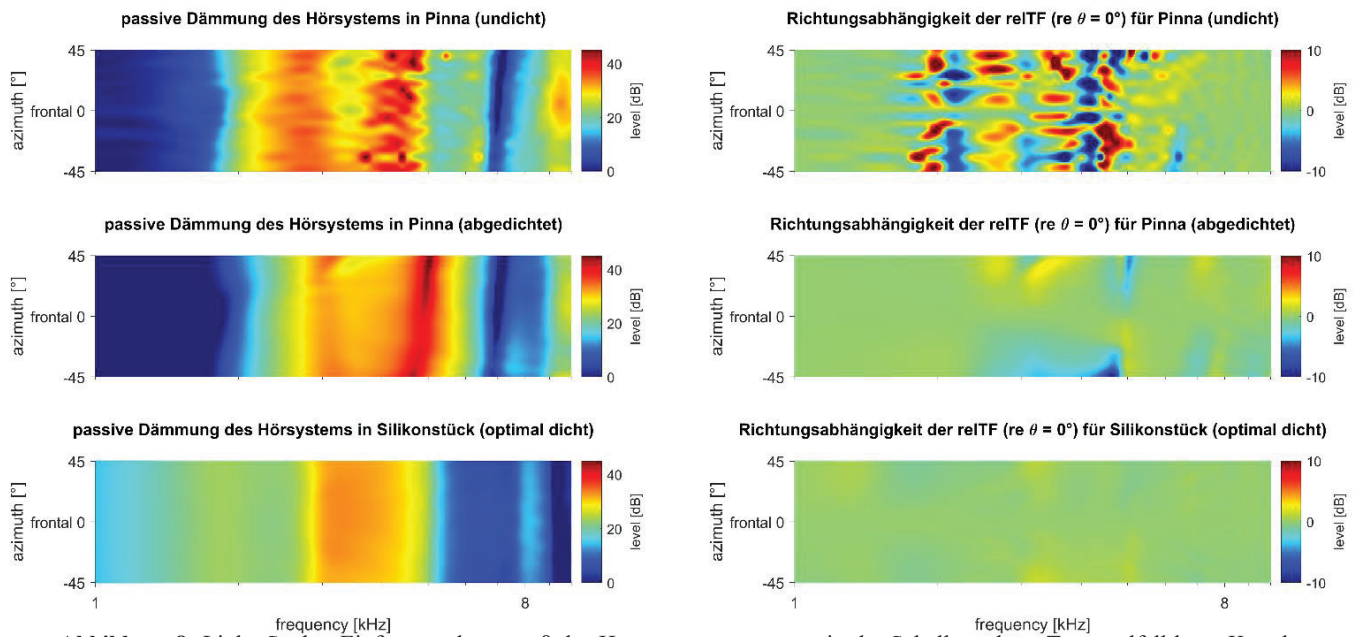


Abbildung 8: Linke Spalte: Einfügungsdämmmaß des Hörsystems, gemessen in der Schallwand am Trommelfell bzw. Kuppler, für einen undichten (oben), dichteren (Mitte) und perfekt abgeschlossenen Sitz des Hörsystems (unten), für horizontale Quellen (Azimuth ϑ). Rechte Spalte: Richtungsabhängigkeit der relTF zwischen innerem Vent-Mikrofon und dem Sonden- bzw. Kuppler-Mikrofon (relTF re relTF für $\vartheta = 0^\circ$ (frontal))

Ergebnisse

FEM-Simulation

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der FEM-Simulation. Oben und mittig sind dabei die Transferfunktionen zwischen horizontalen Quellen (Azimuth ϑ) und dem inneren Vent-Mikrofon bzw. dem Kuppler-Mikrofon in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt. Darunter findet sich die Darstellung der Richtungsabhängigkeit der relTF für alle Winkel ϑ . Dazu wurde zunächst die relTF berechnet und diese in Bezug gesetzt zur relTF bei $\vartheta = -90^\circ$. Für diesen simulierten, ideal abgeschlossenen Fall des eingesetzten Hörsystems in die KEMAR-Pinna sind alle betrachteten Werte für die Richtungsabhängigkeit der relTF faktisch 0 dB. Die relTF ist demnach richtungsunabhängig für das untersuchte Ventdesign mit gegebener Position des inneren Ventmikrofon.

Messungen an Schallwand

Für die Messungen an der Schallwand sind in Abbildung 8 von oben nach unten der undichte, gefolgt vom abgedichteten Sitz des Hörsystems in der Silikon-Pinna und schließlich der optimal abgedichtete Fall im Silikonstück dargestellt. Aufgrund von Randeffecten der Schallwand ist der Winkelbereich für ϑ auf $\pm 45^\circ$ beschränkt. Die linke Spalte zeigt jeweils die passive Dämmwirkung des Hörsystems im jeweiligen Silikonpräparat als Einfügungsdämmmaß, d.h. als Trommelfell-Pegeldifferenz zwischen offenem und versorgtem Fall. Die rechte Spalte visualisiert die Richtungsabhängigkeit der relTF zwischen innerem Vent-Mikrofon und dem Sonden- bzw. Kuppler-Mikrofon.

Bereits in der Darstellung der Dämmwirkung sind richtungsabhängige Effekte zu beobachten. Die Dämmwirkung erscheint richtungsunabhängiger, je besser die Abdichtung ist. Einhergehend sind die relTFs ebenfalls richtungsabhängig für den undichten Sitz des Hörsystems, jedoch

richtungsunabhängig bei guter Abdichtung sekundärer Pfade.

Messungen der Hearpiece-Datenbank

Der für akustische Transparenz relevante Frequenzbereich liegt zwischen 0 und 7 kHz, wobei kritische Richtungsabhängigkeiten ab ca. 2 kHz auftreten, siehe Abb. 8. Der Fehler bei Vernachlässigung der externen Schallquelle zur Berechnung von $p_{d,a}$ bei zu erreichender Transparenz wird beschrieben durch das Verhältnis von $(H_{u,ext} - H_{a,ext})$ zu $H_{u,ext}$, wie oben zu Gl. (1) bis Gl. (3) erläutert wurde. Dieses ist für jede Richtung der externen Quelle nahe 0 dB im Frequenzbereich von ca. 2 bis 7 kHz (Abb. 9), da die passive Dämmwirkung in diesem Bereich groß ist (Abb. 10).

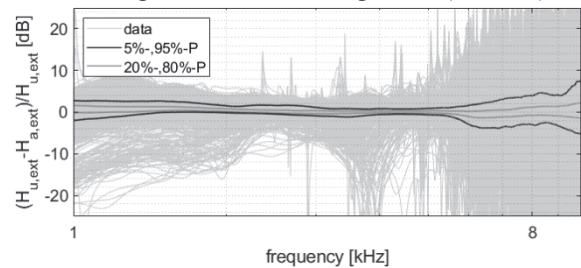


Abbildung 9: Fehler bei Vernachlässigung des Pfades externer Quellen zum Trommelfell im versorgten Fall für alle Probanden und Schalleinfallswinkel der Hearpiece-Datenbank

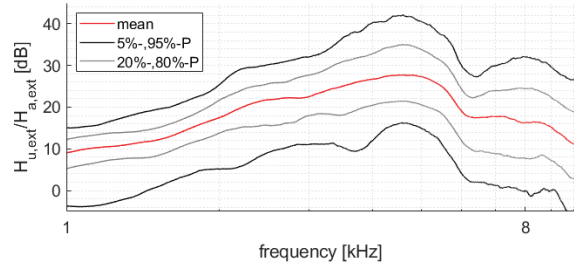


Abbildung 10: Perzentile für die passive Dämmwirkung des Hörsystems für alle Probanden und Schalleinfallswinkel der Hearpiece-Datenbank

Bewertung hinsichtlich akustischer Transparenz

Die der FEM-Simulation zu Grunde liegende Geometrie entspricht dem KEMAR-Kopf, bestückt durch anthropometrische Pinnae mit perfekt abdichtendem Im-Ohr-Hörsystem. Die Ergebnisse der Simulation lassen vermuten, dass zusätzliche Schalleintragskomponenten bei undichtem Sitz des Hörsystems zur Richtungsabhängigkeit der relTF führen bzw. dass sich Schallwellen nach Einkopplung in den Vent ohne zusätzliche Undichtigkeiten erwartungsgemäß eben ausbreiten. Der Vergleich mit den Messungen an der Schallwand bestätigt diese Vermutung und zeigt, dass bei größtmöglicher Dichtigkeit im optimal abschließenden Silikoneinsatz die Richtungsabhängigkeit der passiven Dämmwirkung und der relTF verschwindet. Die Messungen an den Silikonpinnae in der Schallwand, am KEMAR und an Versuchspersonen weisen einen für diesen Prototyp unvermeidlich undichten Sitz des Hörsystems im Außenohr und damit richtungsabhängige relTFs oberhalb von etwa 2 kHz auf. Das Verhältnis von ($H_{u,ext} - H_{a,ext}$) zu $H_{u,ext}$ bei Auswertung der Hearpiece-Datenbank ist im Frequenzbereich von ca. 2 bis 7 kHz stets nahe 0 dB. Somit kann akustische Transparenz in diesem Frequenzbereich aufgrund der hohen passiven Dämmwirkung des Hörsystems ohne Berücksichtigung des Anteils externer Quellen im versorgten Fall bei Inkaufnahme eines nur kleinen Fehlers erzielt werden. Der Einfluss der zusätzlichen Schallkomponenten durch Undichtigkeiten zwischen Hörsystem und Gehörgangswand kann zum Erreichen akustischer Transparenz bei dem betrachteten Prototyp bei gezeigtem geringfügigen Einfluss vernachlässigt werden.

Fazit

Für einen im Projekt entwickelten Prototyp eines offenen Im-Ohr-Hörsystems gelangen auf Grund der generischen Otoplastik richtungsabhängige Schalleintragskomponenten zum Trommelfell. Dieser Beitrag konnte zeigen, dass die daraus resultierende richtungsabhängige passive Dämmwirkung des Hörsystems einhergeht mit der Richtungsabhängigkeit der relativen Übertragungsfunktion zwischen dem inneren Vent-Mikrofon und dem Trommelfell. Bei dichtem Sitz lassen sich, in Übereinstimmung mit gezeigten Ergebnissen der FEM-Simulation diesen Falls, keine Richtungsabhängigkeiten mehr messen.

Hinsichtlich der zu erreichenden Transparenz sollten diese Undichtigkeiten für den betrachteten Prototyp des offenen Im-Ohr-Hörsystems zu vernachlässigen sein, da die passive Dämmwirkung insgesamt hoch ist. Bei noch offeneren Hörsystemen wäre eine solche Vernachlässigung dagegen möglicherweise nicht mehr gerechtfertigt.

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projektnummer 352015383 - SFB 1330 C1

Literatur

- [1] Denk, F., Hiipakka, M., Kollmeier, B., and Ernst, S. M. (2018). An individualised acoustically transparent earpiece for hearing devices. *International journal of audiology*, 57(sup3), S62-S70.
- [2] Denk, F., Lettau, M., Schepker, H., Doclo, S., Roden, R., Blau, M., Bach, J.-H., Wellmann J., Kollmeier, B. (2019). A one-size-fits-all earpiece with multiple microphones and drivers for hearing device research. In *Audio Engineering Society Conference: 2019 AES INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEADPHONE TECHNOLOGY*. Audio Engineering Society.
- [3] Strutt, J. W. (1871). Some general theorems relating to vibrations. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1(1), 357-368.
- [4] Ballantine, S. (1929). Reciprocity in electromagnetic, mechanical, acoustical, and interconnected systems. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 17(6), 927-951.
- [5] Roden, R., Blau, M. (2020). The IHA database of human geometries including torso, head and complete outer ears for acoustic research. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 261, No. 2, pp. 4226-4237). Institute of Noise Control Engineering.
- [6] Denk, F., Kollmeier, B. (2021). The Hearpiece database of individual transfer functions of an in-the-ear earpiece for hearing device research. *Acta Acustica*, 5, 2. <https://doi.org/10.1051/aacus/2020028>