

Extraaurale Kopfhörer für virtuelle Akustik

Joshua Wermers, Stefanie Goicke, Tim Jürgens & Jürgen Tchorz

Institut für Akustik, Technische Hochschule Lübeck, 23562 Lübeck, Email: juergen.tchorz@th-luebeck.de

Einleitung

In der audiologischen Diagnostik erlauben Lokalisationstests Aussagen über die Genauigkeit der Ortung von Schallquellen. Die räumliche Trennung von Nutz- und Störschall ermöglicht die Erfassung der binauralen Verarbeitung von Probanden und des Nutzens einer Hörgeräteversorgung in solchen alltäglichen Situationen. Die Wiedergabe einer räumlichen Trennung mit Lautsprechern ist jedoch mit hohem technischen Aufwand verbunden, insbesondere für komplexere Situationen, die mehr als zwei Lautsprecher erfordern. Alternativ lassen sich mit virtueller Akustik bei Darbietung über Kopfhörer vergleichsweise einfach vielfältige räumliche Situationen generieren. Mit HdO-Hörgeräten sind handelsübliche circum- und supraaurale Kopfhörer aufgrund der Position hinter den Ohrmuscheln jedoch nicht einsetzbar. Extraaurale Kopfhörer (FEC - free-air equivalent coupling to the ear [1]), bei denen die Wandler vor den Ohrmuscheln positioniert sind, ohne diese zu berühren oder zu umschließen, können hier eine Lösung darstellen (z.B. AKG K1000, Jecklin Float, oder Forschungsmodelle [2, 3]).

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein Prototyp eines extraauralen Kopfhörers zur Durchführung von Lokalisationsexperimenten mit virtueller Akustik erstellt. Dabei wurde der Frequenzgang an der Position der Mikrofone von HdO-Hörgeräten entzerrt und dort die Übersprechdämpfung zwischen beiden Seiten bestimmt. Hauptziel der Arbeit war die Ermittlung der Richtungsunterscheidungsschwellen (minimum audible angle) virtueller Schallquellen in der Horizontalebene (frontal und lateral) bei normalhörenden Versuchspersonen. Dabei wurde die gleiche Versuchsdurchführung wie in [4] gewählt, um einen direkten Vergleich zwischen extraauraler und circumauraler Darbietung zu ermöglichen.

Material und Methoden

Hardware

Als Schallwandler dienen Visaton BF 32 S Breitband-Lautsprecher mit einem Durchmesser von 32 mm. Die Lautsprechergehäuse sowie die Halterungen zur Montage an einem Kopfbügel wurden mit 3D-Druck angefertigt (Abb. 1). Der horizontale Abstand zwischen Wandler und Gehörgang ist einstellbar von 1-6 cm. Die vertikale Position ist ebenfalls einstellbar. Messsignale und Stimuli wurden über ein Roland Quad-Capture Audio-Interface und einen t.amp TA50 Verstärker auf die Wandler übertragen. Zur Messung des Frequenzgangs und der Übersprechdämpfung dienten omnidirektionale Miniaturkondensatormikrofone (DPA 4060).

Elektroakustik

Frequenzgang und Übersprechdämpfung wurden an der Position von HdO-Mikrofonen hinter den Ohrmuscheln eines Kunstkopfes im reflektionsarmen Raum der TH Lübeck durchgeführt (Abb. 2).

Die Übersprechdämpfung wurde mit weißem Rauschen aus dem rechten Wandler gemessen (Distanz zum Tragus: 4 cm). Die Stimuli für die Messung der Richtungsunterscheidungsschwellen wurden an der Position von HdO-Mikrofonen mit einem minimalphasigen inversen Filter frequenzgangentzerrt.

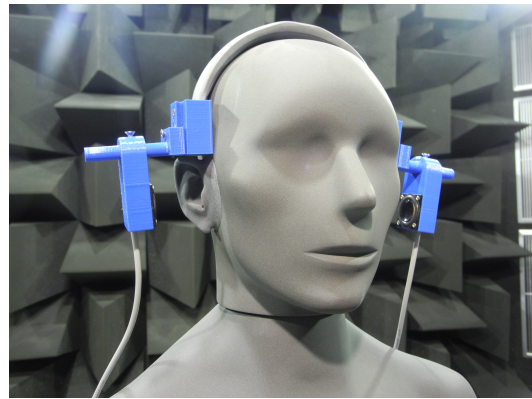


Abbildung 1: Extraauraler Kopfhörer mit 4 cm Abstand zwischen Lautsprecher und Tragus. Die horizontale und vertikale Lage der Wandler ist einstellbar.

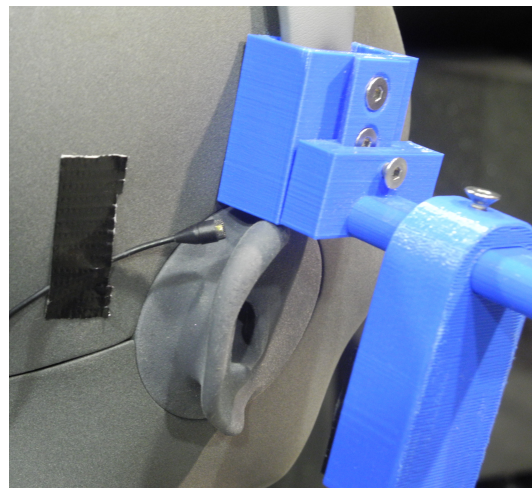


Abbildung 2: Position der Messmikrofone hinter den Ohrmuscheln des Kunstkopfes.

Lokalisationsexperimente

An der Studie nahmen 11 normalhörende Probanden teil (25-31 Jahre, 4m, 7w). Als Stimulus wurde frequenzgangentzerrtes Breitbandrauschen verwendet (0,6 - 12 kHz,

90 ms Dauer, 10 ms fade-in/fade-out). Die Richtungsinformation wurde durch Faltung des Stimulus mit den jeweiligen binauralen Kunstkopf-HRIRs [5] aufgeprägt. Zur Ermittlung der Richtungs-Unterscheidungsschwellen wurden Stimuluspaare mit festen Richtungsunterschieden in einem nicht-adaptiven Verfahren über den extraauralen Kopfhörer mit einem Abstand von 4 cm zwischen Wandler und Tragus dargeboten. Für die frontale (laterale) Richtungs-Unterscheidungsschwelle kam der Referenzstimulus jeweils aus 0° (270°), und der Vergleichsstimulus randomisiert aus $[0^\circ, \pm 2^\circ, \dots, \pm 10^\circ]$ ($[242^\circ, 246^\circ, \dots, 294^\circ, 298^\circ]$).

Die Versuchsdurchführung und die Rückmeldung der Versuchsperson erfolgte über eine Matlab-GUI. Referenz- und Vergleichsstimulus wurden nacheinander mit einer Pause von 1,5 s und einem Pegel von 65 dB SPL präsentiert. Nach jedem Stimuluspaar mussten die Probanden entscheiden, ob die Richtung beider Stimuli als gleich oder unterschiedlich wahrgenommen wurde. Nach einem Trainingsdurchlauf mit der Referenzrichtung 0° startete die Schwellenmessung, zunächst für die frontale, danach für die laterale Referenzrichtung. Jede Vergleichsrichtung wurde randomisiert 5 (10) mal nach der frontalen (lateralen) Referenzrichtung dargeboten. Daraus ergaben sich insgesamt 60 (150) Stimuluspaare für frontal (lateral). Es erfolgte kein Feedback, ob die zuletzt gegebene Antwort korrekt oder falsch war. Die gesamte Durchführung dauerte ca. 30 min pro Versuchsperson. Als Richtungs-Unterscheidungsschwelle wird derjenige Winkelunterschied zwischen Referenz- und Vergleichsstimulus angesetzt, welcher mit 50%-iger Wahrscheinlichkeit als Unterschied wahrgenommen wird.

Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt die frequenzabhängige Übersprechdämpfung zwischen der rechten und linken Seite bei Messposition hinter den Ohrmuscheln. Die Übersprechdämpfung steigt zu hohen Frequenzen an und überschreitet ab 250 Hz einen Wert von 15 dB.

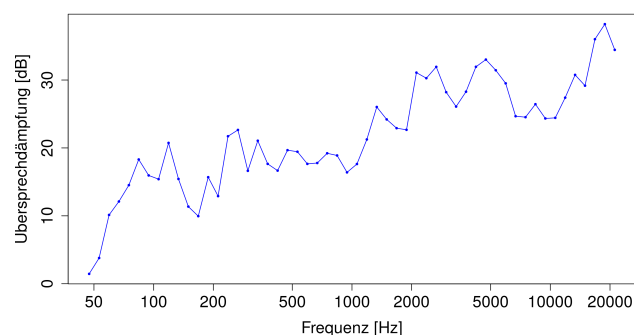


Abbildung 3: Übersprechdämpfung zwischen rechter und linker Mikrofonposition (jeweils hinter den Ohrmuscheln). Auflösung: 1/6 Oktaven.

Die Frequenzübertragungen vor und nach der Entzerrung an der Position hinter den Ohrmuscheln sind in Abb. 4 dargestellt. Durch die Entzerrung wird ein Frequenzgang (± 2 dB) von 75 - 20.000 Hz erreicht.

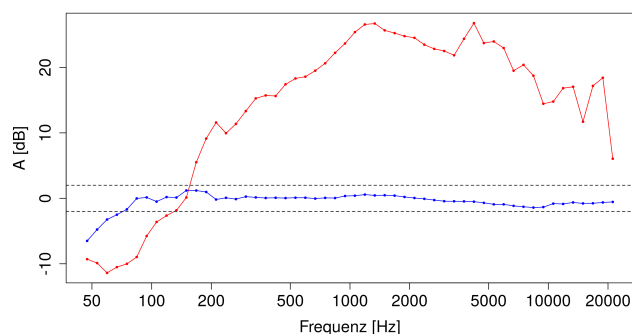


Abbildung 4: Frequenzgang an der Position von HdO-Mikrofonen hinter der Ohrmuschel vom Kunstkopf vor (rot) und nach (blau) Entzerrung des Frequenzgangs. Gepunktete Linien: ± 2 dB.

Die Verteilungen der Richtig-Antwort-Wahrscheinlichkeiten (jeweils gemittelt über 5 bzw. 10 Darbietungen pro Richtung für jede Versuchsperson) sind in Abbildungen 4 und 5 dargestellt, zusammen mit der an den Datenpunkten aller Probanden mittels logistischer Regression gefitteten psychometrischen Funktionen. Nicht eingezeichnet sind die Antworten für identische Referenz- und Vergleichsrichtung (also Darbietung beider Stimuli aus 0° bzw. 270°)

Die Richtungs-Unterscheidungsschwellen, welche aus den durch alle Datenpunkte gefitteten psychometrischen Funktionen (gemittelt über in beide Seiten der Referenzrichtung) sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Für die Wahrnehmung eines Richtungsunterschieds gegenüber 0° ist ein Winkelunterschied von $5,8^\circ$ erforderlich, gegenüber 270° ein Unterschied von 12° . Auch bei Darbietung mit circumauralen Kopfhörern lag die Schwelle bei seitlicher Referenzrichtung deutlich höher [4], insgesamt aber etwas niedriger als bei extraauraler Darbietung.

Tabelle 1: Richtungs-Unterscheidungsschwellen für virtuelle Schallquellen in der Horizontalebene für frontale und laterale Referenzrichtung (über alle Datenpunkte, gemittelt über Abweichungen in beide Richtungen des Referenzstimulus). Rechte Spalte: Vergleichsstudie mit circumauralen Kopfhörern (Sennheiser HDA 200) in normalhörenden Versuchspersonen [4].

	extraaural	circumaural
frontal	$5,8^\circ$	4°
lateral	12°	10°

Eine detailliertere Bild zeigt die Untersuchung der individuell ermittelten Schwellen der 11 Versuchspersonen. Tabelle 2 stellt Mittelwerte und Standardabweichungen dieser Schwellen dar, aufgeschlüsselt nach den Abweichungen zu beiden Seiten der Referenzrichtungen.

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der individuell für jede Versuchsperson ermittelten Richtungs-Unterscheidungsschwellen.

	Mittelwert	std
frontal-links	6,3°	2,4°
frontal-rechts	5,3°	2,4°
lateral-hinten	13,6°	7,0°
lateral-vorne	12,7°	4,2°

Sowohl die individuellen Schwellen, als auch die Streuungen fallen gegenüber der seitlichen Referenzrichtung größer aus als gegenüber 0°. Für eine Versuchsperson konnte im Rahmen der dargebotenen Richtungsunterschiede keine Schwelle ermittelt werden.

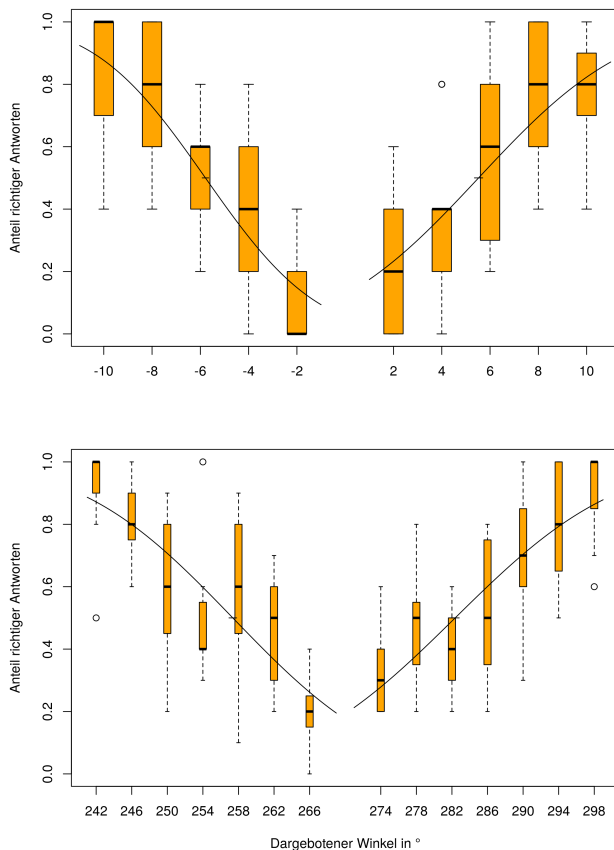


Abbildung 5: Richtig-Antwort-Wahrscheinlichkeiten und über alle Datenpunkte gefittete psychometrische Funktionen für virtuelle Schallquellen über extraauralen Kopfhörer. Oben: frontal, unten: lateral.

Zusammenfassung und Diskussion

Der vorgestellte extraaurale Kopfhörer erlaubt Lokalisationsexperimente in der Horizontalebene bei virtueller akustischer Richtungsdarbietung mit geringem apparativen Aufwand und ohne weitere Kompensation des Übersprechens. Im Vergleich zu einer Studie mit Präsentation der Stimuli über circumaurale Kopfhörer bei ansonsten identischem Ablauf [4] liegen die gemessenen Unterscheidungsschwellen geringfügig höher, bei vergleichbaren interindividuellen Streuungen. Die Schwellen bei 0° Azimuth liegen niedriger als für die seitliche Referenzrichtung. Dies ist in Übereinstimmung mit Schwellenmessungen über Lautsprecher, bei denen insgesamt

jedoch deutlich niedrigere Schwellen für 0° (1-2°) und 90° (3-4°) ermittelt wurden [6]. Eine mögliche Erklärung für die größeren Schwellenwerte ist die Verwendung von Kunstkopf-HRTFs, die zu einer eingeschränkten Lokalisationsleistung gegenüber Messungen mit individuellen HRTFs führen können [7].

Die in [8] über Lautsprecher gemessenen horizontalen Richtungs-Unterscheidungsschwellen lagen für die frontale Referenzrichtung bei 2,4°, und damit ebenfalls deutlich niedriger als in der hier vorgestellten Untersuchung. Um eine Winkelaufösung von 2° zu erzielen, wurden sehr kleine Lautsprecher verwendet, was durch den dadurch bedingten Frequenzgang und der notwendigen Entfernung zum Probanden hochfrequente Stimuli (untere Grenzfrequenz bei ca. 4.600 Hz) zur Folge hatte. Für schwerhörende Versuchspersonen sind ausgesprochen hochfrequente Stimuli jedoch nur eingeschränkt geeignet, insbesondere bei Vergleichsmessungen ohne Hörgeräte. Versuchsaufbauten mit größeren, beweglichen Lautsprechern zur Bestimmung der Richtungs-Unterscheidungsschwellen sind i.d.R. jedoch noch aufwändiger.

Um eine direkte Vergleichbarkeit mit [4] zu gewährleisten, wurde ein nicht-adaptives Verfahren zur Schwellenbestimmung verwendet. Zur effektiveren Messung der Schwellen bieten sich kriterienfreie Methoden an, beispielsweise ein 2 AFC Verfahren mit adaptiver Durchführung, bei dem die wahrgenommene Richtung der Änderung angegeben werden muss.

Durch die Frequenzgangsentzerrung am Kunstkopf wurde an diesem eine relativ ausgeglichene Übertragung ab 75 Hz erreicht. Der resultierende Frequenzgang hinter den Ohrmuscheln der Versuchspersonen wurde nicht überprüft. Eine individuelle Entzerrung des Frequenzgangs könnte gemeinsam mit einer Bestimmung der individuellen HRTFs der Probanden in Betracht kommen, was jedoch einer einfach durchzuführenden Lokalisationsmessung mit extraauralen Kopfhörern nicht entgegenkommen würde.

Literatur

- [1] H. Møller, D. Hammershøi, C. Jensen, and M. Sørensen, "Transfer characteristics of headphones measured on human ears," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 43, no. 4, pp. 203–217, 1995.
- [2] V. Erbes, F. Schultz, A. Lindau, and S. Weinzierl, "An extraaural headphone system for optimized binaural reproduction," in *Fortschritte der Akustik - DAGA 2012 (Darmstadt)*, DEGA.
- [3] F. Klein, S. Werner, and M. Rekitz, "Evaluierung einer virtuellen akustischen Umgebung für Hörgeräte," in *Fortschritte der Akustik - DAGA 2018 (München)*, DEGA.
- [4] S. Goicke, J. Tchorz, and T. Jürgens, "Untersuchung der relativen Lokalisationsfähigkeit in der Horizontal-

- ebene bei blinden und sehbehinderten Personen über Kopfhörer mittels virtueller Akustik,” in *Fortschritte der Akustik - DAGA 2021 (Wien)*, DEGA.
- [5] F. Brinkmann, “The FABIAN head-related transfer function data base,” 2017.
- [6] K. Saberi, L. Dostal, T. Sadralodabai, and D. R. Perrott, “Minimum audible angles for horizontal, vertical, and oblique orientations: Lateral and dorsal planes,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 75, no. 1, pp. 57–61, 1991.
- [7] B. Seeber, “Untersuchung der Lokalisation in reflexionsarmer Umgebung und bei virtueller akustischer Richtungsdarbietung mit einer Laser-Pointer-Methode,” in *Tagungsband Fortschritte der Akustik - DAGA 2002 (Bochum)*, 2002.
- [8] T. Z. Strybel and K. Fujimoto, “Minimum audible angles in the horizontal and vertical planes: Effects of stimulus onset asynchrony and burst duration,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 108, no. 6, pp. 3092–3095, 2000.