

Evaluierung einer virtuellen akustischen Umgebung für Hörgeräte

Florian Klein¹, Stephan Werner¹, Martin Rekkitt¹

¹ Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau, Deutschland, Email: florian.klein@tu-ilmenau.de

Einleitung

Das räumliche Hören ist bei der Versorgung mit Hörhilfen stark eingeschränkt. Die dem natürlichen räumlichen Hören widersprechende akustische Aufbereitung und Wiedergabe von Audiosignalen über Hörhilfen führt zu einer deutlichen Verminderung der Wahrnehmung von Richtung, Distanz und Sprachverständlichkeit im Störgeräusch [7, 8]. Eine Evaluierung des räumlichen Hörvermögens mit Hörhilfen und ein entsprechendes Hörtraining zur Verbesserung des räumlichen Hörens ist daher unerlässlich.

In der Vergangenheit wurden Untersuchungen zum räumlichen Hörvermögen vor allem mit Lautsprecherarrays in dafür vorgesehenen Räumen durchgeführt. Diese bewährte Methode hat jedoch Einschränkungen hinsichtlich der möglichen Testparameter: Lautsprecher begrenzen die Anzahl der möglichen Richtungen und ihre Platzierung somit sind zum Beispiel Hörtests zum Distanzhören nur selten möglich. Durch eine virtuelle Hörumgebung können komplexere akustische Bedingungen realisiert werden, welche beispielsweise die Evaluierung der Sprachverständlichkeit in Räumen mit unterschiedlicher Raumakustik ermöglichen. In einigen Studien wurde virtuelle Hörumgebungen schon zu diesem Zweck angewendet [4, 5]. In der Rehabilitation von Hörgerätenutzern wird Hörtraining eingesetzt, um die Akzeptanz für die Hörhilfen zu erhöhen und um die Wahrnehmung unter den neuen Bedingungen zu schulen. Klassische Lösungen für ein Hörtraining zu Hause wird von einigen etablierten Hörgeräteherstellern bereit gestellt. Die Trainingsumgebungen beinhalten beispielsweise Übungen aus den Bereichen: Frequenzunterscheidung, Lautstärkeunterscheidung, Sprachverständlichkeit, Identifizierung von Alltagsgeräuschen und Musikinstrumenten sowie Training für selektives Richtungshören und zur Vorne-Hinten Unterscheidung. Hinzu kommen zahlreiche Hörtrainings-CDs und spezielle Systeme für das Hörtraining beim Hörgeräteakustiker. Auch für dieses Anwendungsszenario bieten virtuelle akustische Umgebungen Vorteile: Durch die Simulation realistischer Hörumgebungen sowie durch Integration der Hörgerätealgorithmen in diese Simulation, kann das Hörtraining effektiver gestaltet werden und die Akzeptanz des Hörgeräts erhöht werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer virtuellen akustischen Umgebung für Hörgeräte. Die Verwendung von Hörhilfen soll dadurch simuliert und getestet werden. Das System wird innerhalb eines Hörversuchs mit Normalhörenden getestet und evaluiert.

System und Messungen

Als Grundlage des Systems dienen zwei Forschungshörgeräte der Firma Audifon, welche für

diese Studie angepasst wurden. Bei den Hörgeräten handelt es sich um Hinter-dem-Ohr Systeme der Gattung RITE (Right-In-The-Ear), dabei befinden sich die Mikrofone hinter dem Ohr und der Lautsprecher im Ohrkanal. Die Geräte bieten externen Zugriff auf die Mikrofonensignale sowie die Möglichkeit externe Signale über die Lautsprecher wiederzugeben. Interne Signalverarbeitungsalgorithmen wurden für diese Studie abgeschaltet. Die Mikrofone der Hörgeräte hatten eine omnidirektionale Charakteristik.

Die Forschungshörgeräte wurden sowohl für die richtungsabhängigen als auch für die Wiedergabe der binauralen Signale im Hörtest verwendet. Im ersten Schritt wurden die Hörgeräte einem KEMAR Kunstkopf aufgesetzt und es wurden sowohl die Übertragungsfunktionen zwischen den Lautsprechern zu den Hörgeräten (kurz HATFs - „hearing aid transfer functions“) sowie die Übertragungsfunktion zwischen Lautsprechern und den Kunstkopfmikrofonen (kurz BRIRs - „binaural room impulse responses“) gemessen. Insgesamt wurden 32 Positionen in der Horizontalebene gemessen. Der Messabstand betrug 2 m und für vier Richtungen (315°, 225°, 135° und 45°) wurden auch kürzer Abstände von 1.65 m, 1.3 m, 0.95 m und 0.6 m gemessen. Messungen in der Medianebene wurden ebenfalls getätigt, aber diese werden in dieser Veröffentlichung nicht betrachtet. Alle Aufnahmen wurden im Hörlabor der TU Ilmenau gemessen, dessen akustischen Eigenschaften den Empfehlungen der ITU-R BS.1116 entspricht.

Zur Evaluierung der Messungen werden hier die interauralen Pegel- und Zeitdifferenzen für die Aufnahmemethoden betrachtet. Beim Vergleich der Pegeldifferenzen (siehe Abbildung 1) fällt auf, dass die maximale ILD („Interaural Level Difference“) bei den Hörgeräten geringer ausfällt. Dieser Unterschied ist begründet durch die Positionierung der omnidirektionalen Hörgerätemikrofone hinter dem Ohr im Zusammenhang mit der reflektionsbehafteten Messumgebung. Bei genauer Betrachtung der Kurven fällt auf, dass bei 0° ebenfalls eine Pegeldifferenz besteht, welche je nach Frequenzbereich unterschiedlich ausfällt. Genauere Messungen zeigen, dass die Empfindlichkeit der Mikrofonkapseln frequenzabhängig unterschiedlich ist.

Der Vergleich der ITDs („Interaural Time Differences“), zeigt ebenfalls höhere ITDs für den Kunstkopf gegenüber den Hörgeräten sowie leichte rechts-links Asymmetrien.

Für zukünftige Systeme bleibt daher festzuhalten, dass eine geeignete Equalisierung der Mikrofone vorgenommen werden sollte, da diese Unterschiede zu Lokalisationsfehlern führen können. Für die geplanten Hörtests wurden diese Abweichungen aber nicht als relevant erachtet, da der Fokus nicht auf geringen Lokalisationsgenauigkeiten liegt.

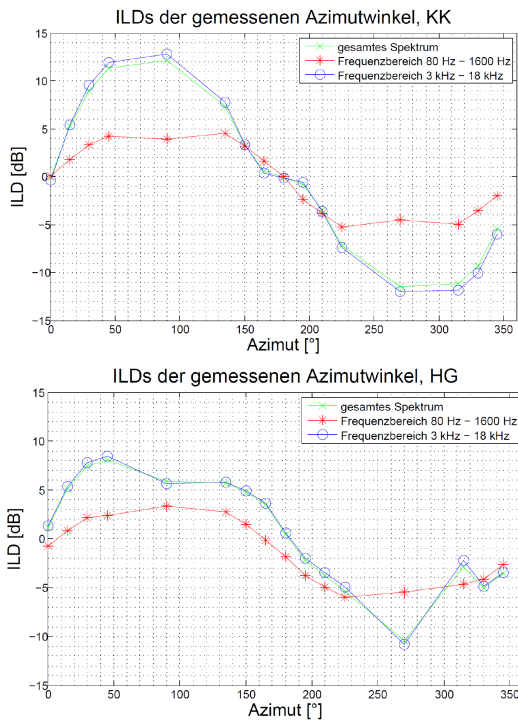


Abbildung 1: ILDs der einzelnen Messpunkte für den Kunstkopf (KK) oben und für die Hörgeräte (HG) unten. Dargestellt ist jeweils das gesamte Spektrum sowie zwei weitere Frequenzbereiche.

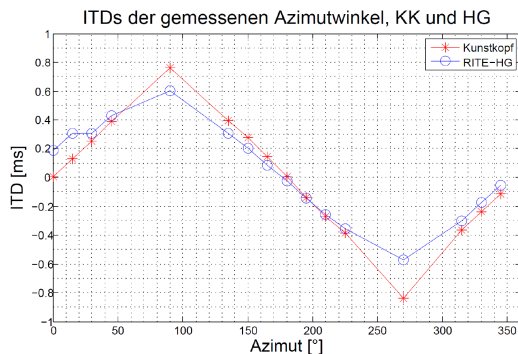


Abbildung 2: ITDs der einzelnen Messpunkte für das RITE Hörgerät und den Kunstkopf.

Die Lautsprecher der Hörgeräte übertragen Frequenzen bis ca. 8 kHz. Wichtige spektrale Merkmale, vor allem für die Lokalisation in der Medianebene werden somit zum größten Teil nicht übertragen. Als weitaus problematischer für die geplanten Tests stellte sich aber die Positionierung der Lautsprecher im Ohrkanal der Probanden heraus. Wurden die Hörgerätelautsprecher unterschiedlich tief im Gehörgang platziert, kam es zu deutlichen Richtungsverschiebungen. Vor jedem Test und mit jedem Probanden musste daher eine perzeptive Justierung für die richtige Platzierung mit der geringsten Richtungsverschiebung vorgenommen werden.

Hörtests und Ergebnisse

Im Folgenden zwei Hörtests mit diesem System vorgestellt. Der erste Test adressiert die Vorne-Hinten

Diskriminierung sowie die Wahrnehmung von Externalität und der zweite Test adressiert die Distanzwahrnehmung. Alle Tests wurden doppelt durchgeführt: einmal mit Kopfhörerwiedergabe und einmal mit Hörgerätewiedergabe. Zudem wurden innerhalb der Tests jeweils Stimuli auf Basis der BRIRs und der HATFs präsentiert. Das gewählte Hörtestdesign erlaubt daher aufnahmeseitig einen Vergleich von Kunstkopf BRIRs mit Hörgeräte HATFs sowie wiedergabeseitig einen Vergleich zwischen Kopfhörer und Hörgerät. Als Kopfhörer wurde das extraaurale Model BK211 der TU Berlin verwendet [2] und auf Basis von KEMAR HPTFs („headphone transfer functions“) entzerrt. Insgesamt haben 16 Probanden (4 Frauen und 12 Männer) mit einem Durchschnittsalter von 27,25 Jahren teilgenommen.

Für den ersten Tests wurde die GUI aus Abbildung 3 verwendet mit folgender Bedeutung der Bewertungsmöglichkeiten:

- (a) Ich höre das Signal vollständig in meinem Kopf und es ist sehr diffus (nicht gut lokalisierbar).
- (b) Ich höre das Signal vollständig in meinem Kopf und es ist gut lokalisierbar.
- (c) Ich höre das Signal außerhalb, aber sehr nah an meinem Kopf oder meinen Ohren.
- (d) Ich höre das Signal außerhalb meines Kopfes und es ist gut lokalisierbar.
- (e) Ich höre das Signal außerhalb meines Kopfes und es ist sehr diffus.

Zusätzlich sollte entschieden werden, ob das Signal von Vorne oder Hinten wahrgenommen wird. Es wurden alle vorhanden Richtungen in der Horizontalebene bei 2 m Entfernung im Test inkludiert und als Signal wurde ein Sprachsample einer Männerstimme mit einer Länge von 2.6 s genutzt.

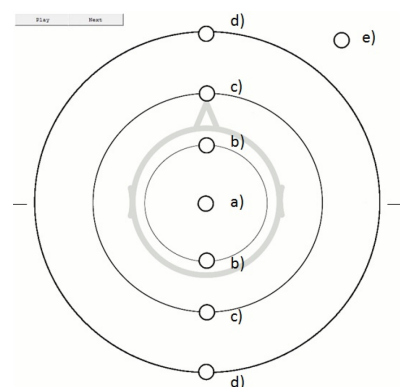


Abbildung 3: Grafische Bewertungsoberfläche für den ersten Teilversuch zur Vorn- Hinten-Vertauschung und Externalisation.

Abbildung 4 zeigt die Externalisationsergebnisse. Die obere Grafik zeigt die Wiedergabe mit Kopfhörer und die untere mit Hörgerät. In beiden Grafiken ist jeweils die Bewertung für die Aufnahmen mit Kunstkopf (BRIR) sowie mit Hörgerät (HATFs) dargestellt. Der Externalisationsindex beschreibt das Verhältnis der Bewertungen d)

und e) zu der Gesamtanzahl der Bewertungen. Der Bewertungspunkt „nah am Kopf“ wurde dementsprechend als Im-Kopf-Lokalisation gewertet. Die Ergebnisse sind über die getesteten Azimutwinkel abgetragen, wobei die Bewertungen der linken und rechten Seite zusammengefasst wurden.

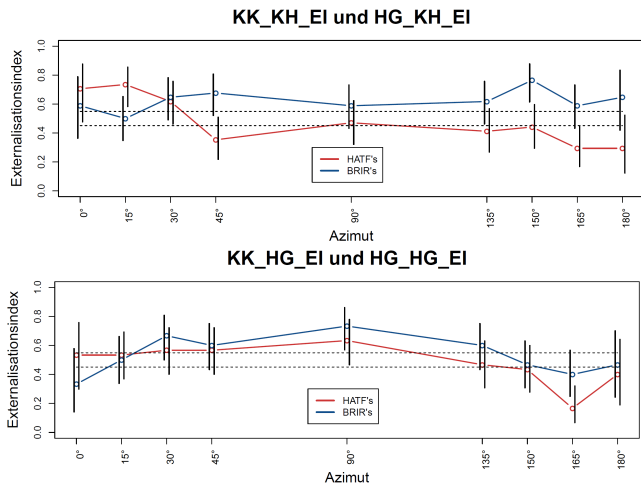


Abbildung 4: Externalisierungsergebnisse für die Kopfhörerwiedergabe (oben) und Hörgerätewiedergabe (unten). BRIR-Messung mit Kunstkopf (blau) und HATF-Messung mit Hörgerät (rot). Dargestellt ist der Medianwert mit 90% Konfidenzintervallen sowie der Ratebereich (gestrichelte Linie, 90% Niveau).

Die Externalisierung ist in beiden Grafiken relativ gering, was teilweise auf die statische Binauralsynthese und die nicht-individuellen Lokalisationsmerkmale zurückzuführen ist. Die Bewertungen zwischen HATFs und BRIRs unterscheiden sich bei der Kopfhörerwiedergabe lediglich bei 45° sowie in den Winkeln der hinteren Hemisphäre zu Gunsten der BRIRs. Bei der Wiedergabe über die Hörgeräte sind die Unterschiede noch geringer und nicht signifikant. Interessant ist in beiden Grafiken die Tendenz zu den frontalen Richtungen: Die HATFs Aufnahmen scheinen dort besser abzuschneiden, signifikante Unterschiede konnte hier jedoch nicht nachgewiesen werden. Keine der Aufnahmemethoden scheint dementsprechend einen Vorteil bei der Externalität zu bieten.

Der Vergleich zwischen den Wiedergabemethoden liefert ebenfalls ein differenziertes Bild. Wieder gibt es abhängig von der Richtung Unterschiede: Die BRIRs wurden bei der Kopfhörerwiedergabe sowie bei 0° tendenziell besser bewertet. Die HATFs Bewertungen sind bis auf 90° und 45° sehr ähnlich. Im Durchschnitt ergibt sich für keine der Wiedergabemethoden ein signifikanter Vorteil bezüglich der Externalität.

Aufgrund des fehlenden Einflusses der Ohrmuschel sowie der veränderten binauralen Merkmale der HATF Aufnahmen gegenüber der BRIR Aufnahmen, wäre eine schlechtere Externalität nachvollziehbar gewesen. Fehlende oder veränderte Lokalisationsmerkmale erhöhen die Lokalisationsunschärfe und nach Plenge müsste dies auch die Externalität negativ beeinflussen [3]. Die Ergebnisse sind jedoch im Einklang mit einer früheren Untersuchung [1],

bei welcher Aufnahmen mit Kunstkopf und einem Kugelflächenmikrofon verglichen wurden. Das Testdesign war vergleichbar mit dem hier vorgestellten Experiment und die Ergebnisse zeigten unerwartet hohe Bewertungen für die Externalität der Auralisierung auf Basis der Messungen mit dem Kugelflächenmikrofon.

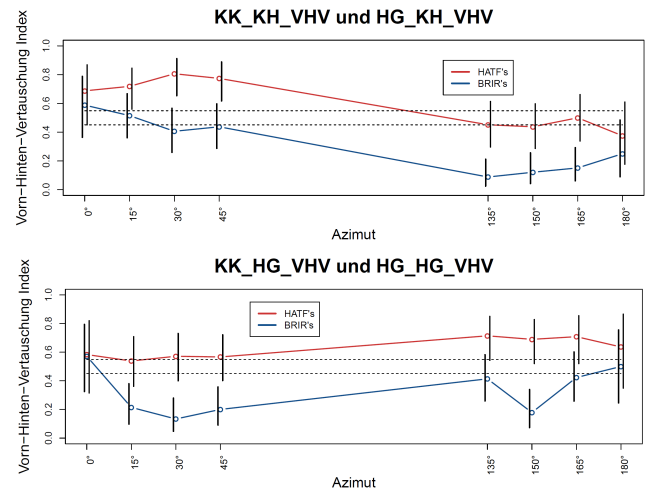


Abbildung 5: Ergebnisse der Vorne-Hinten-Vertauschungen für die Kopfhörerwiedergabe (oben) und Hörgerätewiedergabe (unten). BRIR-Messung mit Kunstkopf (blau) und HATF-Messung mit Hörgerät (rot). Dargestellt ist der Medianwert mit 90% Konfidenzintervallen sowie der Ratebereich (gestrichelte Linie, 90% Niveau).

Abbildung 5 zeigt die Vorne-Hinten-Vertauschungen aus dem ersten Test. Die Darstellung ist äquivalent zu den Abbildungen der Externalität. Der Wert der Vorne-Hinten-Vertauschungen gibt das Verhältnis der falsch zugeordneten Bewertungen zur Gesamtanzahl der Bewertungen an, dies betrifft sowohl die vorderen Richtungen, welche rückseitig wahrgenommen wurden sowie hintere Richtungen, welche vorderseitig wahrgenommen wurden. Da für die Richtung 90° eine Unterscheidung zwischen Lokalisationsunschärfe und Vorne-Hinten Vertauschung nicht möglich ist, wird diese nicht betrachtet. Die Ergebnisse zeigen deutlich weniger Vorne-Hinten-Vertauschungen für die BRIR Aufnahmen, außer bei den Richtungen 0° und 180°. Dieses Ergebnis wurde aufgrund der Mikrofonplatzierung hinter dem Ohr erwartet. Unerwartet hingegen ist, dass die hinteren Richtungen bei der Wiedergabe mit Hörgeräten höhere Fehlerraten zeigen als Vorne und das dies bei der Kopfhörerwiedergabe genau umgedreht ist. Da dieser Effekt sowohl bei den BRIR als auch den HATF Aufnahmen vorhanden ist, kann der Grund dafür nur bei den Lautsprechern der Hörgeräte liegen. Eine genaue Erklärung konnte aber bisher nicht gefunden werden.

Der zweite Test betrachtete die Unterscheidbarkeit verschiedener Distanzen. Dem Probanden wurde jeweils Paare von Distanzen vorgespielt und der Proband musste entscheiden, ob das zweite Signal gleich weit weg, näher dran oder weiter weg war als das erste Signal. Für jeden der vier Horizontalwinkel ergaben sich somit 10

Paarungen. Bei Kopfhörerwiedergabe liegen die Fehleraten (Verhältnis der falschen Antworten zur Gesamtanzahl der Antworten) sowohl für die BRIRs als auch die HATFs richtungsabhängig bei 0,3 bis 0,4. Bei den Richtungen 225 und 135 liegt die Fehlerrate bei den HATFs um lediglich 0,1 höher als für die BRIRs. Die Ergebnisse der Hörerätewiedergabe sind analog dazu, womit sich schlussfolgern lässt, dass zwischen den Aufnahmemethoden und zwischen den Wiedergabemethoden kein signifikanter Unterschied messbar war. Für die Distanzwahrnehmung sind vor allem Lautstärkeunterschiede sowie das Verhältnis zwischen Direktschall und Nachhall relevant. Beide Merkmale ändern sich durch die unterschiedliche Mikrofonierung. Das Testdesign betrachtet allerdings nur relative Distanzunterschiede - eine absolute Distanzbeurteilung könnte daher andere Ergebnisse liefern.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen nur einen geringen Einfluss der Aufnahmemethode auf die Wahrnehmung von Externalität und Distanz aber erwartungsgemäß einen starken Einfluss auf die Vorne-Hinten-Vertauschung. Die verschiedenen Wiedergabemethoden hatten keinen signifikanten Einfluss auf die getesteten Parameter. Aufgrund eingeschränkter Lokalisationsmerkmale bei der Hörerätmikrofonierung sowie des eingeschränkten Frequenzbereichs der Hörerätewiedergabe wurden zunächst größere Unterschiede bei der Externalisierung und der Distanzwahrnehmung erwartet. Beide Qualitätsmerkmale sind jedoch auch stark abhängig von raumakustischen Merkmalen und ihre Beurteilung basiert vor allem auch auf Hörerfahrung [6]. Diese Faktoren scheinen für diese Qualitätsparameter relevanter als die technischen Einschränkungen der Signalübertragung mit Hörgeräten. Insgesamt zeigt dieser Beitrag die Funktionsfähigkeit der getesteten virtuellen akustischen Umgebung für Hörgeräte, aber eine Validierung mit Nutzern von Hörgeräten steht noch aus. Perspektivisch kann diese Technik zur Emulation und Test von Hörgerätealgorithmen genutzt werden. Darüber hinaus bietet die Technologie die Möglichkeit eine geschützte Trainingsumgebung für Hörgerätenutzer zu schaffen.

Danksagung

Diese Arbeit wird unterstützt durch einen Zuschuss des Freistaates Thüringen und dem Europäischen Sozialfonds. Vielen Dank an die Firma Audifon für die Bereitstellung der Hörgeräte.

Literatur

- [1] Werner, S., Rekitt, M. und Klein, F.: „Distribution of Quadrant Errors in Auditory Localization using a Binaural Headphone system“, Proceedings der 41. Jahrestagung für Akustik (DAGA), Nürnberg, (2015)
- [2] Erbes, V., Schultz, F., Lindau, A. und Weinzierl, S.: „An Extraaural Headphone System for Optimized Binaural Reproduction“, Proceedings der 38. Jahrestagung für Akustik (DAGA), Darmstadt, (2012)
- [3] Plenge, G.: „Über das Problem der Im-Kopf-Lokalisation“, *Acustica*, 26(5), S. 241-252, (1972)
- [4] Mueller, M. F., Kegel, A., Schimmel, S. M., und Dillier, N.: „Localization of virtual sound sources with bilateral hearing aids in realistic acoustical scenes“, *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4732), (2012), URL: <https://doi.org/10.1121/1.4705292>
- [5] Peng, Z. E., Pausch, F., und Fels, J.: „Effect of room acoustics on speech perception by children with hearing loss“, *Journal of the Acoustical Society of America*, 139(1979), (2016), URL: <https://doi.org/10.1121/1.4949774>
- [6] Werner, S. und Klein, F.: „Influence of Context Dependent Quality Parameters on the Perception of Externalization and Direction of an Auditory Event“, 55th AES Conference Spatial Audio, Helsinki, Finland, (2014)
- [7] Van den Bogaert, T., Carette, E. und Wouters, J.: „Sound source localization using hearing aids with microphones placed behind-the-ear, in-the-canal, and in-the-pinna“, *Int. J. Audiol.* 50, (2011), S. 164–176, URL: <https://doi.org/10.1121/1.4949774>
- [8] G. Keidser u. a.: „The effect of multi-channel wide dynamic range compression, noise reduction, and the directional microphone on horizontal performance in hearing aid wearers“. *Int. J. Audiol.* 45, (2006), S. 563–579, URL: <https://doi.org/10.1080/14992020600920804>