

Die SOFE-Hörumgebung für die audiologische Forschung – Aufbau und Ergebnisse aus der Anwendung

Bernhard U. Seeber

Audio-Signalverarbeitung, Technische Universität München

Schlüsselwörter: Auralisation, auditive Szenenanalyse, binaurales Hören, Cochlea Implantat, Hörgerät

Einführung

Komplexe Hörumgebungen mit mehreren Schallquellen, diffusen Hintergrundgeräuschen und Schallreflexionen an Wänden und Objekten begleiten uns im täglichen Leben, bereiten normalhörenden Personen aber kaum Schwierigkeiten. Mit Hörstörungen nimmt die Fähigkeit stark ab, in solchen Situationen Schallquellen herauszuhören („auditive Szenenanalyse“) und die Höranstrengung nimmt zu. Mit der SOFE (Simulated Open Field Environment, Seeber et al., 2010), einer Lautsprecherapparatur im reflexionsarmen Raum, können derartige Hörsituationen im Labor realistisch nachgebildet werden. Spezielle Software ermöglicht die Simulation der Raumakustik und deren Auralisation über die elektronisch-entzerrten Lautsprecher für Studien zum Einfluss von Schallreflexionen. Die SOFE wird um eine visuelle Umgebung ergänzt, die über Videoprojektoren auf akustisch-transparenten Vorhängen abgebildet wird. Die Kopplung von visueller Projektion mit akkurater Freifeldakustik ermöglicht eine Vielzahl von Studien zur räumlichen audio-visuellen Interaktion, sowie die Entwicklung von neuen audiologischen Testverfahren, beispielsweise für Kleinkinder. Ausgehend von einem Überblick über den Aufbau und die Raumsimulationsverfahren der SOFE werden ausgewählte Forschungsergebnisse aus der 10-jährigen Nutzung der SOFE zusammengefasst. In verschiedenen Studien wurde die Lokalisationsfähigkeit von bilateralen CI-Trägern in reflexionsarmer Umgebung, im Beisein einer einzigen Schallreflexion (Präzedenzeffekt), in simulierten Räumen und in diffusem Rauschen untersucht. Die Ergebnisse zeigen eine deutlich erhöhte Sensitivität auf Störschalle im Vergleich zu normalhörenden Probanden und zeigen Möglichkeiten für eine Verbesserung der Signalkodierung auf.

Material und Methodik

Methodik und Aufbau der SOFE

Die Wiedergabe von Schallen aus verschiedenen (virtuellen) Richtungen kann über zwei Methoden erfolgen: (1) Die Schalle werden über Kopfhörer dargeboten, wobei die Simulation der Richtung „virtuell“ über die Filterung der Schalle mit Außenohrübertragungsfunktionen geschieht. Bei Verwendung von individuellen Außenohrübertragungsfunktionen ist eine genaue Richtungsabbildung auch mit Hörhilfen möglich (Seeber und Fastl, 2008; Seeber und Fastl, 2003). Der Vorteil dieses Ansatzes besteht in den geringen Kosten für die verwendete Hardware und der Portabilität des Versuchsaufbaus, der Nachteil in Schwierigkeiten bei der Messung der individuellen Außenohrübertragungsfunktionen, insbesondere mit Patienten, und in Problemen bei der Wiedergabe von dynamischen Hörsituationen. (2) Die Schalle werden über Lautsprecher wiedergegeben, wobei zur Abbildung der Schallrichtung bzw. zur Reproduktion eines virtuellen Schallfeldes verschiedene Methoden Anwendung finden (Blauert, 1997; Borish, 1984; Favrot und Buchholz, 2010; Kirszenstein, 1984; Pulkki, 1997; Schroeder und Atal, 1963; Seeber et al., 2010; Spors und Ahrens, 2007; Vorländer, 2008).

Die hier vorgestellte SOFE soll in der psychoakustischen Forschung mit normal- und schwerhörigen Probanden als auch mit Trägern von Hörhilfen (verschiedene Positionen: Hinter-dem-Ohr, im-Kanal) und Cochlea Implantaten verwendet werden. Um reproduzierbare und realistische Schallfeldbedingungen für alle diese Anwendungsfälle zu erhalten, bietet sich die Wiedergabe über Lautsprecher an. Für die Forschung sind absolut verlässliche Ergebnisse eine Grundnotwendigkeit. Daher muss das Schallsignal am Ort des Zuhörers (Ohrsignale) exakt in Pegel und Phase über den genutzten Frequenzbereich reproduzierbar sein, eine Forderung, die nur in der kontrollierten akustischen Umgebung eines reflexionsarmen Raumes erfüllbar ist. Dies schränkt auch die Verwendung der Wiedergabemethoden über die Lautsprecher ein, da beim Abspielen über mehrere Lautsprecher oberhalb einer Grenzfrequenz Aliasingeffekte auftreten, beispielsweise mit Ambisonics oder Wellenfeldsynthese (Spors und Ahrens, 2007). Diese verursachen – insbesondere bei schmalbandigen Signalen wie sie in der Forschung oft verwendet werden – positionsabhängig unterschiedlich große Pegel- und Phasenänderungen, die für Messungen an Hörhilfen und psychoakustische Untersuchungen störend sind. Weiterhin treffen bei der Wellenfeldsynthese mehrere Wellenfronten am Zuhörer nacheinander ein, was bei einigen Hörstörungen (z.B. bei Trägern von Cochlea Implantaten) zu Fehlern in der Richtungswahrnehmung



Abb. 1: Foto der SOFE-Implementierung im reflexionsarmen Raum des MRC Institute of Hearing Research in Nottingham, UK.

führt (Kerber und Seeber, 2013). Daher verwendet die SOFE eine Methode, bei der jede einzelne Schallquelle von nur einem Lautsprecher abgestrahlt wird. Der dabei auftretende Richtungsfehler beträgt maximal 5° horizontal (Lautsprecherabstand 10°), wobei Direktschallquellen im Experiment i.a. auch so gewählt werden können, dass sie auf einen Lautsprecher treffen und so kein Abbildungsfehler auftritt. Für Schallreflexionen spielt der sich ergebende geringe Richtungsfehler kaum eine Rolle, da der Präzedenzeffekt binaurale Information in den Reflexionen schwer zugänglich macht (Discrimination suppression, Litovsky et al., 1999). Sollte die Quantisierung auf die Lautsprecherpositionen dennoch stören, wie bei der Wiedergabe von bewegten Quellen, können hörbare Aliasing-Artefakte mit der Perceptual-Equalized-Panning (PEP)-Methode (Seeber und Hafter, 2013) unterdrückt werden. Diese Methode nutzt einen einfachen Filter, um die Aliasing-Fehler zu reduzieren, was sie bei kleinen Lautsprecherabständen sogar unhörbar macht.

Die SOFE-Implementierungen an der UC Berkeley (Hafter und Seeber, 2004) und am MRC Institute of Hearing Research (Seeber et al., 2010) bestanden aus jeweils 48 Lautsprechern, davon 36 in der Horizontalebene, die von zwei 24-kanaligen Digital-Analog-Wandlern über Leistungsendstufen angesteuert wurden. Über einen speziellen Softwaretreiber kann die Schallausgabe direkt aus Matlab erfolgen, wobei beim Abspielen eine Lautsprecherentzerrung in Realzeit vorgenommen werden kann. Damit ist die Kalibrierung und die Entzerrung des Frequenz- und Phasengangs in einem weiten Frequenzbereich (200 Hz – 12 kHz) innerhalb von 1,5 dB und wenigen μ s möglich. Diese hohe Abbildungsgenauigkeit ermöglicht eine phasengetreue Summation der Signale verschiedener Lautsprecher, wie sie für Studien zum Präzedenzeffekt benötigt wird.

Raumsimulation und Auralisation

Viele Studien zu audiologischen Fragestellungen können bereits durch das einfache Abspielen von Zielschallen und Rauschen über die SOFE-Lautsprecher durchgeführt werden. Wichtige Fragestellungen in der aktuellen Forschung zielen auf eine Klärung der Probleme in natürlichen Hörsituationen mit Raumhall ab. Für diese Studien wurde eine Raumsimulationssoftware entwickelt, mit der Raumimpulsantworten für beliebige Quellen- und Empfängerkonfigurationen in beliebig geformten Räumen berechnet werden können. Die Software basiert auf der Spiegelquellenmethode (Borish, 1984; Kirszenstein, 1984) und berücksichtigt die Gültigkeit und Sichtbarkeit der einzelnen Spiegelquellen durch einen Backtracking-Algorithmus (Lee und Lee, 1988; Vorländer, 2008). Zur Auralisation werden für jeden SOFE-Lautsprecher einzelne Impulsantworten berechnet, mit denen die Zielschalle gefaltet werden. Die Spiegelquellen werden dazu entweder dem nächstgelegenen SOFE-Lautsprecher zugeordnet, oder durch Panning energetisch auf benachbarte Lautsprecher verteilt. Die Auralisation kann ebenfalls mit virtueller Akustik über Kopfhörer erfolgen, wofür verschiedene Kataloge an Außenohrübertragungsfunktionen zur Verfügung stehen.

Audio-visuelle Versuchsumgebung

Die SOFE wird durch eine interaktive visuelle Umgebung erweitert, die flexibel verwendbar ist. Zum einen kann sie für die Anzeige der lokalisierten Schallrichtung verwendet werden. Durch Drehen an einem Trackball verschieben die Versuchspersonen ein visuelles Objekt (Lichtpunkt, Bild eines Lautsprechers etc.) aus einer Ausgangsposition auf die lokalisierte Richtung, die sie somit dem Versuchsleiter und dem Computer mitteilen (ProDePo-Methode, Seeber, 2002). Des Weiteren können über die visuelle Umgebung Rückmeldungen an die Versuchsperson gegeben werden, was interaktive Lokalisationsstudien mit Kindern ermöglicht. Dabei sitzt das Kleinkind (Alter 1-5 Jahre) mit der Bezugsperson auf dem Stuhl in der SOFE und hört Schalle aus verschiedenen Testrichtungen, auf die es mit Kopf- oder Körperbewegungen reagiert. Diese Bewegungen werden ausgewertet, um die Lokalisationsfähigkeit zu bestimmen. Die visuelle Umgebung der SOFE belohnt die Kinder mit Animationen für die Bewegungen auf die Schallrichtungen hin, so dass die Habituation an die Stimuli minimiert wird und sich ein spielender Versuchsablauf ergibt (AnimalSeek-Methode, McCartney, 2012). Weiterhin wird die visuelle Umgebung in Studien zur audio-visuellen Interaktion verwendet.

Ausgewählte Ergebnisse mit bilateralen Cochlea-Implantat-Trägern

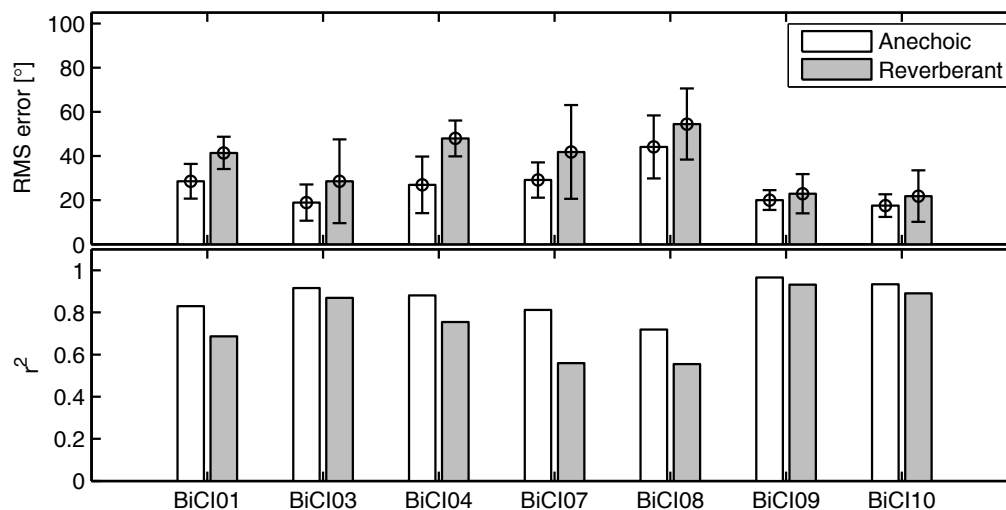


Abb. 2: Lokalisierungsergebnisse in reflexionsarmer Umgebung und in einem simulierten Raum von 7 bilateralen Cochlea-Implantat-Trägern. Der moderate Raumhall führte zu einer signifikanten Verschlechterung der Lokalisationsfähigkeit bei einigen Probanden, was sowohl im erhöhten RMS-Lokalisationsfehler (obere Abbildung) als auch in einer reduzierten Korrelation der lokalisierten Richtungen mit den Zielrichtungen (untere Abbildung) sichtbar ist. Abb. 1 in Kerber und Seeber, 2013.

Für die korrekte Lokalisation in komplexen Hörumgebungen mit Raumhall und Störgeräuschen ist zeitliche Information aus dem Schallsignal wichtig, z.B. aus Schalleinsätzen (Hartmann, 1983). Die binauralen Hörprozesse mit Cochlea Implantat (CI) beruhen jedoch überwiegend auf der Auswertung von Pegelinformation (Seeber und Fastl, 2008), ein Prozess der potentiell empfindlicher gegenüber Störschallen ist. Kerber und Seeber (2012) haben die Lokalisationsfähigkeit von 10 bilateralen CI-Trägern für Sprache in diffusem Rauschen als Funktion des Signal-Rauschabstands (SNR) untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lokalisation mit CI erst ab ca. +7 dB SNR relativ ungestört durch das Hintergrundrauschen ist und dass alle CI-Probanden die Fähigkeit zur Rechts-Links-Unterscheidung bei -3 dB SNR verloren hatten. Bei normalhörenden Probanden zeigte sich im selben Test eine größere Robustheit gegenüber dem Störschall. Die Lokalisationsfähigkeit im Störschall bei -5 dB SNR entsprach immer noch grob den Fähigkeiten von CI-Trägern in ruhiger, reflexionsarmer Umgebung.

In einer weiteren Studie wurde der Einfluss von Raumhall auf die Lokalisationsfähigkeit quantifiziert (Kerber und Seeber, 2013). Analog zur Studie zum Einfluss von Hintergrundrauschen, in der der Signal-Rauschabstand wie in Sprachtests variiert wurde, wurde hier das Direktschall-zu-Nachhall-Verhältnis (DRR, direct-to-reverberant ratio) geändert. Dies simuliert eine variable Entfernung von der Quelle, wobei jedoch die Richtungen der Reflexionen in allen Testbedingungen konstant blieben. Abb. 2 zeigt ausgewählte Ergebnisse dieser Studie. Ähnlich wie Hintergrundrauschen hat auch Raumhall einen starken Einfluss auf die Lokalisationsfähigkeit mit CIs. Der RMS-Lokalisationsfehler war bei allen Probanden erhöht, meist signifikant (Abb. 2 oben). Auch die Korrelation der lokalisierten mit den vorgegebenen Schallrichtungen verringerte sich deutlich durch die Präsenz des Raumhalls, was ebenfalls eine verschlechterte Lokalisationsfähigkeit anzeigt (Abb. 2 unten). Eine weitere Analyse zeigt, dass die Lokalisation der meisten CI-Träger bereits bei +5 dB DRR beeinträchtigt war, während sie bei Normalhörenden oberhalb von -8 dB DRR ungestört blieb. Das Problem ist, dass in kritischen Hörbedingungen, wie in Klassenräumen, nur selten der Direktschall über den Nachhall überwiegt (DRR > 0 dB).

Die meisten CI-Träger werden demnach nicht den maximalen binauralen Nutzen aus ihren bilateralen Implantaten in täglichen Hörumgebungen ziehen können. Die Studie wies außerdem Zusammenhänge zwischen der Lokalisationsfähigkeit der CI-Träger mit ihren Sprachprozessoren und der im elektrischen Stimulationsmuster kodierten monauralen und binauralen Information nach. Es konnte erstmals gezeigt werden, dass interaurale Zeitdifferenzen zur Lokalisation mit CIs in kritischen Bedingungen beitragen – im Gegensatz zu Situationen in Ruhe, in denen mehrfach gezeigt wurde, dass interaurale Pegeldifferenzen dominant sind (Kerber und Seeber, 2013). Dieses Ergebnis motiviert eine gezielte Kodierung der binauralen Information in CIs.

Zusammenfassung

Die Simulated Open Field Environment (SOFE) hat sich in ihrem 10-jährigen Bestehen als eine Art „Schweizer Taschenmesser“ erwiesen, das eine große Vielzahl an verschiedenen Studien zum binauralen Hören und zur auditorischen Szenenanalyse in komplexen Hörsituationen mit mehreren Quellen, Störschallen und simuliertem Raumhall ermöglicht. Durch die visuelle Umgebung wird der Anwendungsbereich auf audio-visuelle Studien und Studien mit Kleinkindern erweitert. In der SOFE durchgeführte Studien belegen die hohe Störwirkung von Hintergrundrauschen und Raumhall auf das binaurale Hören, speziell die Lokalisationsfähigkeit, bei Trägern von bilateralen Cochlea Implantaten. Die Ergebnisse schlagen gezielte Verbesserungen in der Signalverarbeitung vor, damit bilaterale CI-Träger in täglichen Hörsituationen den optimalen Nutzen aus ihren Implantaten ziehen können.

Ich danke für die finanzielle Unterstützung durch NIH RO1 DCD 00087, MRC U135097132 und BMBF 01 GQ 1004B für die Entwicklung und den Aufbau der SOFE, sowie für die beschriebenen Studien. Weiterhin danke ich Ervin Hafter, Stefan Kerber und den mechanischen Werkstätten an der UC Berkeley und am MRC Institute of Hearing Research für Diskussionen, Unterstützung und Hilfe bei der Implementierung der SOFE.

Literatur

- Blauert, J. (1997). *Spatial hearing: The psychophysics of human sound localization*. Cambridge, USA: MIT Press.
- Borish, J. (1984). Extension to the image model to arbitrary polyhedra. *J Acoust Soc Am*, 75(6): 1827-1836.
- Favrot, S., und Buchholz, J. M. (2010). LoRA: A Loudspeaker-Based Room Auralization System. *Acta Acustica - Acustica*, 96: 364-375.
- Hafter, E., und Seeber, B. (2004). The Simulated Open Field Environment for auditory localization research. In *Proc ICA 2004, 18th Int Congress on Acoustics, Kyoto, Japan, 4-9042004*, Vol. V, S. 3751-3754: Int. Commission on Acoustics.
- Hartmann, W. M. (1983). Localization of sound in rooms. *J Acoust Soc Am*, 74(5): 1380-1391.
- Kerber, S., und Seeber, B. U. (2012). Sound localization in noise by normal-hearing listeners and cochlear implant users. *Ear & Hearing*, 33(4): 445-457.
- Kerber, S., und Seeber, B. U. (2013). Localization in reverberation with cochlear implants: predicting performance from basic psychophysical measures. *J Assoc Res Otolaryngol*, 14(3): 379-392.
- Kirszenstein, J. (1984). An Image Source Computer Model for Room Acoustics Analysis and Electroacoustic Simulation. *Applied Acoustics*, 17: 275-290.
- Lee, H., und Lee, B. H. (1988). An Efficient Algorithm for the Image Model Technique. *Applied Acoustics*, 24: 87-115.
- Litovsky, R., Colburn, H., Yost, W., und Gunzman, S. (1999). The precedence effect. *J Acoust Soc Am*, 106(4): 1633-1654.
- McCartney, D. (2012). *Development of the AnimalSeek Method to Measure the Localisation Ability of Children under Five*. PhD Thesis. The University of Nottingham.
- Pulkki, V. (1997). Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning. *J Audio Eng Soc*, 45(6): 456-466.
- Schroeder, M. R., und Atal, B. S. (1963). Computer Simulation of Sound Transmission in Rooms, *IEEE International Convention Record (S. 150-155)*: IEEE.
- Seeber, B. (2002). A New Method for Localization Studies. *Acta Acustica - Acustica*, 88(3): 446-450.
- Seeber, B., und Fastl, H. (2008). Localization cues with bilateral cochlear implants. *J Acoust Soc Am*, 123(2): 1030-1042.
- Seeber, B., und Hafter, E. (2013). *Perceptual equalization of artifacts of sound reproduction via multiple loudspeakers*. Int. Congress on Acoustics and 165th Meeting of the Acoustical Society of America, Montreal, Proc. Meetings. Acoustics.
- Seeber, B. U., und Fastl, H. (2003). Subjective Selection of Non-Individual Head-Related Transfer Functions. In E. Brazil, und B. Shinn-Cunningham (Edn.): *Proc 9th Int Conf on Aud Display*, S. 259-262. Boston, USA.
- Seeber, B. U., Kerber, S., und Hafter, E. R. (2010). A System to Simulate and Reproduce Audio-Visual Environments for Spatial Hearing Research. *Hearing Research*, 260(1-2): 1-10.
- Spors, S., und Ahrens, J. (2007). Comparison of higher-order ambisonics and wave field synthesis with respect to spatial aliasing artifacts. In A. Calvo-Manzano, A. Pérez-López, und S. Santiago (Edn.): *Proc ICA 2007, 19th Int Congress on Acoustics, Madrid, Spain, 2-7092007*: Int. Commission on Acoustics.
- Vorländer, M. (2008). *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin: Springer.