

Einfluss von auditorischer Bewegung auf Lokalisation unter Freifeldbedingungen

Stefan Klockgether^{*,1}, Bastian Epp^{1,2}, Jesko L. Verhey^{1,2}

¹AG Neuroakustik, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, D-26111 Oldenburg, *stefan.klockgether@uni-oldenburg.de

²Abt. Experimentelle Audiologie, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, D-39120 Magdeburg

Einleitung

Ein gesundes menschliches Gehör ist in der Lage, verschiedene Geräusche voneinander zu trennen. Man kann zum Beispiel in komplexen akustischen Umgebungen einem Gespräch folgen (Cocktailparty-Effekt). Dabei helfen neben spektralen auch binaurale Merkmale, um einzelne Schallquellen voneinander zu unterscheiden. Geräusche, die nicht direkt von der Seite dargeboten werden, erreichen beide Ohren mit einem Laufzeit- und einem Pegelunterschied. Dabei werden die Unterschiede größer, je weiter ein Geräusch von der Seite kommt. Die interauralen Unterschiede ermöglichen es, die Richtung aus der Schalle dargeboten werden, zu schätzen.

Ein Maß für das räumliche Auflösungsvermögen ist der kleinste hörbare Winkelunterschied (minimum audible angle, MAA) [2]. Der Mensch ist in der Lage zwei Geräusche die von vorne dargeboten werden, bei einem Winkelabstand von ungefähr 1° noch zu unterscheiden. Mit größerem Azimuth wird das Auflösungsvermögen kleiner, was größere MAAs bedeutet.

Viele Schallquellen zeigen räumliche Dynamik, was in einer zeitlichen Dynamik der interauralen Unterschiede resultiert. Der Mensch kann Bewegung auditorisch wahrnehmen. Es ist jedoch noch nicht klar, wie die Wahrnehmung auditorischer Bewegung funktioniert. Auditorische Bewegungswahrnehmung könnte als reine Ableitung der Lokalisation funktionieren. Allerdings wurden in physiologischen Studien in Vögeln und auch in einigen Säugetierarten Neuronengruppen gefunden, die explizit auf Bewegung reagieren [4].

Ein Indiz für die Existenz dieser expliziten Wahrnehmung von Bewegung liefert die auditorische Trägheit (auditory momentum), welche zeigt, dass der Endpunkt einer Bewegung auditorisch hinter dem physikalischen Endpunkt wahrgenommen wird [1]. Um die Wahrnehmung von auditorischer Bewegung besser zu verstehen, wurde in einem psychoakustischen Experiment versucht, Verschiebungen von Lokalisation zu quantisieren. Dazu wurden MAAs in Abhängigkeit von statischer und räumlich dynamischer Referenz gemessen und miteinander verglichen.

Versuchsaufbau

Für das Experiment wurde ein statischer Aufbau im Freifeld benutzt, mit dem bewegte Schallquellen durch Überblenden simuliert werden konnten. Der Aufbau in einem reflexionsarmen Raum bestand aus einem Halbkreis in der horizontalen Ebene mit einem Radius von drei Metern und 32 Aktivlautsprechern (Genelec 6010A),

die im Abstand von $5,625^\circ$ am Halbkreis befestigt waren. Durch das Überlagern der Signale zweier Lautsprecher konnte bei diesem geringen Lautsprecherabstand für alle Winkel zwischen zwei realen Lautsprechern jede virtuelle Schallquelle ohne wahrnehmbaren Fehler simuliert werden [3]. Die Lautsprecher wurden frequenzweise im Pegel und in der Phase ausgeglichen, sodass eine kontinuierliche Bewegung einer Schallquelle simuliert werden konnte. Die Halbkreisform des Aufbaus vermied Dopplereffekte im Zentrum des Halbkreises, wo die Probanden mit den Ohren in der Lautsprecherebene positioniert wurden. Eine Kopfstütze minimierte Kopfbewegungen. Ein über der Mitte des Halbkreises angebrachter Monitor ermöglichte Rückmeldungen an die Probanden und sorgte für einen visuellen Bezugspunkt.

Messverfahren und Stimuli

Als Maß für die Auswirkungen von Bewegung auf die Lokalisation wurde der kleinste hörbare Winkelunterschied (MAA) benutzt. Dazu wurde eine Abfrage aus zwei Intervallen mit einer Länge von jeweils einer Sekunde abgespielt. Zwischen den Intervallen war eine Pause von 500 ms. Die Signale waren mit 100 ms langen Hanning-Rampen gefenstert. Abbildung 1 zeigt schematisch die drei unterschiedlichen Versuchskonditionen. Das erste Intervall enthielt immer das Referenzsignal (schwarz), welches in der statischen Kondition (Mitte) von vorne dargeboten wurde. In den beiden dynamischen Konditionen

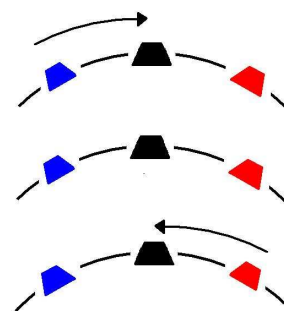


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Zuerst wird das Referenzsignal dargeboten (schwarz), dann das Zielsignal links (blau) oder rechts (rot) davon. In der oberen Kondition wird die Referenz von links bis zur Mitte, in der unteren von rechts bis zur Mitte bewegt. Die mittlere Kondition ist statisch. Die Probanden mussten entscheiden, ob das Zielsignal links oder rechts von der Referenz, bzw. vom Endpunkt der Referenz zu hören war.

(oben und unten) wurde die Referenz entweder von links zur Mitte (oben) oder von rechts zur Mitte (unten) bewegt. Das zweite Intervall enthielt das Zielsignal und

wurde links (blau) oder rechts (rot) der Referenz bzw. vom Endpunkt der Referenz dargeboten. Die Probanden mussten entscheiden, ob das zweite Signal links oder rechts der Referenz zu hören war, bzw. in den bewegten Konditionen links oder rechts vom Endpunkt der Referenz. Die bewegten Referenzen wurden dabei mit $80^\circ/\text{s}$ bewegt und die Bewegung begann bei -80° bzw. $+80^\circ$ und endete jeweils in der Mitte.

Der MAA wurde gleichzeitig für die drei Referenzkonditionen verschachtelt nach links und rechts gemessen. Benutzt wurde ein adaptives 2-AFC Verfahren mit 1-up 2-down Regel. Das Signal war ein 500 Hz Ton. Für jede einzelne Abfrage wurden Referenz- und Signalintervall den gleichen Winkel zufälligen Winkel zwischen -10° und $+10^\circ$ verschoben, um eine Lokalisation in der Mitte durch die Augen zu vermeiden. Zwischen -20° und $+20^\circ$ verändert sich das Winkelaufklärungsvermögen des menschlichen Gehörs nur minimal.

An dem Experiment nahmen zehn normalhörende Probanden teil, die die Messung jeweils fünf mal durchgeführt haben. Zur Schätzung der Schwelle wurde das arithmetische Mittel der letzten vier Wiederholungen verwendet.

Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der Messung. Aufgetragen ist der kleinste hörbare Winkelunterschied (MAA), jeweils gemessen nach links (blau) und rechts (rot) für

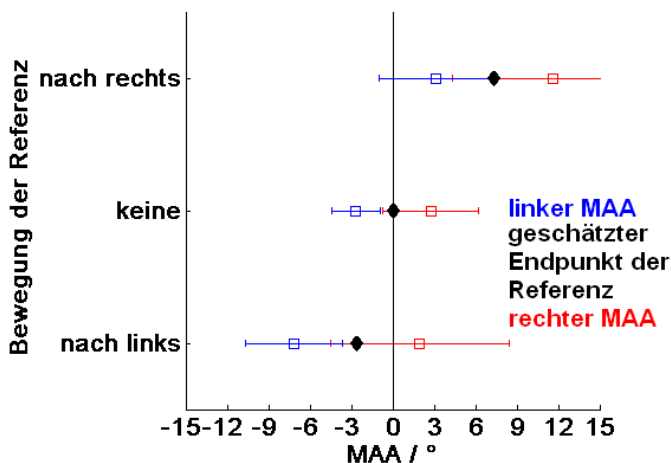


Abbildung 2: Kleinste hörbare Winkelunterschiede (MAA) für die verschiedenen Referenzkonditionen. In blau ist der nach links gemessene MAA zu sehen, in rot der nach rechts. Die schwarzen Rauten zeigen den Mittelwert von linkem und rechtem MAA und damit die abgeschätzte Lokalisation des Referenzsignals bzw. des Endpunktes des Referenzsignals.

drei verschiedene Referenzkonditionen. Die schwarzen Rauten symbolisieren jeweils den Mittelwert aus den beiden MAAs einer Referenz und schätzen den Punkt ab, an dem die Referenz, bzw. in den dynamischen Konditionen (oben und unten) der Endpunkt der Referenz durch die Probanden lokalisiert wurde. Die vertikale Linie zeigt den physikalischen Endpunkt der Referenz bzw. den Winkel, aus dem die statische Referenz dargeboten wurde.

In den Ergebnissen einiger Probanden waren selbst nach der dritten oder vierten Messwiederholung noch sehr starke Trainingseffekte für die dynamischen Konditionen zu sehen. Dabei haben die MAAs für die einzelnen Messungen jeweils einen starken Trend in eine Richtung gezeigt. Zur Quantifizierung der Lerneffekte sind weitere Messungen nötig. In Abbildung 2 ist zunächst der Mittelwert über die Ergebnisse von sechs Probanden zu sehen, die während der zweiten bis zur fünften Messwiederholung keinen erkennbaren Trainingseffekt zeigten.

Für die statische Referenzkondition (mitte) ist der MAA mit $2-3^\circ$ in beide Richtungen gleich groß. Das lässt darauf schließen, dass das Referenzsignal in der Mitte lokalisiert wurde (schwarze Raute), von wo es auch physikalisch dargeboten wurde. Für die nach rechts bewegte Referenz (oben) ist der rechte MAA mit ca. 11° deutlich größer als der nach links gemessene. Letzterer ist sogar auch auf der rechten Seite lokalisiert. Das bedeutet, dass das Zielsignal links vom Endpunkt der Referenz wahrgenommen wurde, obwohl es rechts vom physikalischen Endpunkt dargeboten wurde. Der wahrgenommene Endpunkt der Bewegung scheint deutlich in Richtung der Bewegung verschoben zu sein, was sich mit der Hypothese der auditorischen Trägheit [1] deckt. Für Signale von vorne ist die Winkelaufklärung in beide Richtungen symmetrisch, sodass auch für die bewegten Konditionen der Mittelwert zwischen den beiden gemessenen MAAs einer Kondition als Endpunkt der Bewegung der Referenz abgeschätzt werden kann (schwarz). Ähnliches zeigen die Ergebnisse für die Bewegung nach links (unten). Hier ist der wahrgenommene Endpunkt der Bewegung ebenfalls in Richtung der Bewegung verschoben. Diese durch Bewegung verursachte Verschiebung der Lokalisation von Schallquellen lässt sich mit MAAs messen.

Schlussfolgerung

- Der kleinste hörbare Winkelunterschied (MAA) ist größer in Richtung der Bewegung und kleiner in der entgegengesetzten Richtung (sogar kleiner 0°).
- Eine Verschiebung der Lokalisation durch Bewegung lässt sich mit Hilfe von MAAs messen.
- Lokalisation wird in Situationen mit räumlich dynamischen Schallquellen durch Bewegung beeinflusst.

Literatur

- [1] Getzmann, S.; Lewald, J. Localisation of moving sound. *Perception & Psychophysics*, (2007), 69, 1022-1034
- [2] Mills, A. W. On the minimum audible angle. *Journal Of The Acoustical Society Of America*, 1958, 30, 237-246
- [3] Seeber, B. U.; Hafter, E. Perceptual equalization in near-speaker panning. *Fortschritte der Akustik* (2007) 375-376
- [4] Wagner, H.; Kautz, D.; Poganiatz, I. Principles of acoustic motion detection in animals and man. *Trends in Neuroscience*, 1997, 20, 583-588