

Richtungshören – Lokalisieren, Externalisieren und Fokussieren

Robert Baumgartner

Institut für Schallforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften, 1040 Wien

E-Mail: Robert.Baumgartner@oeaw.ac.at

Einleitung

Hörer sind häufig komplexen akustischen Umgebungen mit mehreren Schallquellen ausgesetzt. Richtungshören ermöglicht dabei das Lokalisieren einzelner Schallquellen sowie das Fokussieren der Aufmerksamkeit darauf. Diese Prozesse basieren auf der Inferenz (internes Modell) von räumlichen Umgebungszuständen aus zahlreichen akustischen Merkmalen und können entweder bewusst vom Hörer gesteuert sein oder auch reflexartig auftreten, um den Hörer beispielsweise vor Gefahrenquellen zu schützen. Um eine möglichst effiziente und kontrollierte Interaktion mit einer veränderbaren Umgebung zu ermöglichen, sollten diese Prozesse fortlaufend Vorhersagen über zukünftige Ereignisse erstellen und die sensorische Verarbeitung sollte möglichst früh an die momentanen Anforderungen angepasst sein. Abbildung 1 stellt vereinfacht dar, wie diese Mechanismen entlang der menschlichen Hörbahn implementiert sein könnten. Einzelne Aspekte dieses komplexen Mechanismus werden im Folgenden genauer beleuchtet.

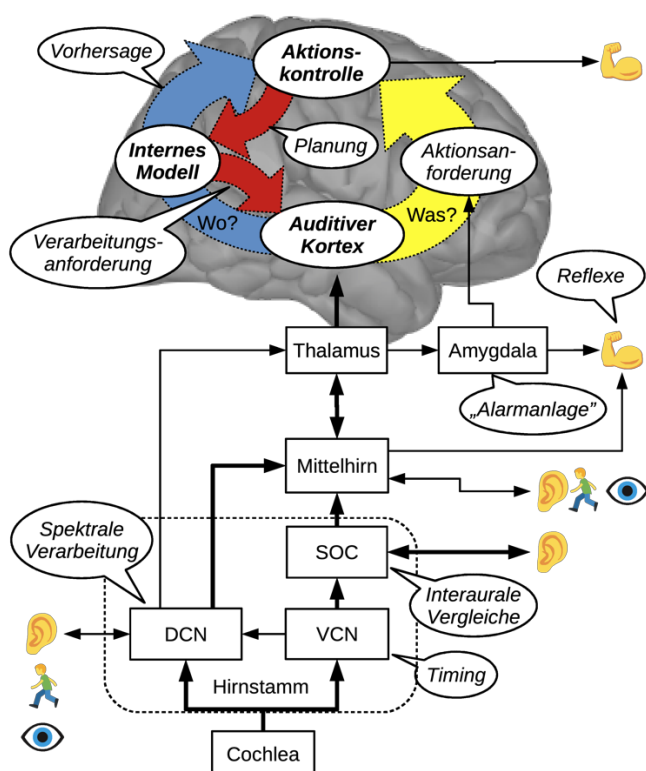


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der neuronalen Verarbeitung von auditiver Richtungsinformation. DCN: dorsal cochlear nucleus. VCN: ventral cochlear nucleus. SOC: superior olivary complex. Symbole: contralaterale Hörbahn (Ohr), visuelle Information (Auge), somatosensorische Information (Männchen), Arm (Handlungen). Details siehe [1].

Lokalisieren in Sagittalebene

Interaurale Unterschiede in Laufzeit (ITD) und Pegel (ILD) geben Auskunft über die laterale (links/rechts) Einfallsrichtung des Schalls. Information über den Polarwinkel (oben/unten und vorne/hinten) liefern zudem spektrale Merkmale, die vor allem durch die Richtcharakteristik des Außenohrs hervorgerufen werden und üblicher Weise in Form von richtungsabhängigen Übertragungsfunktionen (eng.: HRTFs) zwischen Quellposition und Ohrkanal beschrieben werden. Die Form des Außenohrs und somit auch die Richtungskodierung der HRTFs ist jedoch sehr individuell. Folglich verwendet auch jeder Mensch eine individuelle Dekodierung dieser Information und ad-hoc Lokalisation mit nicht individualisierten HRTFs führt in der Regel zu starken Defiziten in der Lokalisationsleistung [2,3].

Um Lokalisationseigenschaften in Sagittalebene auf individueller Ebene vorhersagen zu können wurde ein Computermodell entwickelt, das die wesentlichen Verarbeitungsstufen von spektraler Richtungsinformation abbilden soll [3–5] – siehe Abbildung 2. In diesem Modell werden die spektralen Gradienten von Erregungsmustern des Stimulus mit jenen interner, individueller HRTF-Mustervorlagen verglichen. Die Extraktion spektraler Gradienten ist wesentlich um die Robustheit der Lokalisationsfähigkeit gegenüber groben Veränderungen des Quellspektrums erklären zu können [3,6]. Der Gradientenvergleich wird auf monauraler Ebene durchgeführt, mit einem individuell angepassten Sensitivitätsparameter skaliert und anschließend abhängig von der lateralen Richtung der Quelle binaural kombiniert, wobei ipsilaterale Information höher gewichtet wird als kontralaterale Information. Zuletzt folgt eine räumliche Abbildungsfunktion, welche auch die Antwortmethodik von Lokalisationsexperimenten mit berücksichtigt.

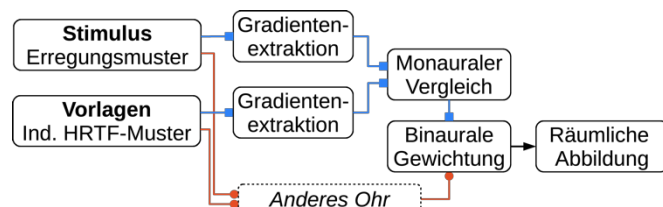


Abbildung 2: Vereinfachte Struktur des Modells zur Verarbeitung spektraler Richtungsinformation. Details siehe [3–5].

Dieses Computermodell ermöglicht eine effiziente Evaluierung von komplexen technischen Audio-wiedergabesystemen [7,8] sowie auch physiologischen Problemstellungen [5]. Modellanalysen haben beispielsweise

gezeigt, dass häufig beobachtete interindividuelle Unterschiede im Lokalisationsvermögen nur in geringem Maße auf die Individualität der akustischen Eigenschaften zurück zu führen sind sondern die (richtungsunabhängige) spektrale Sensitivität des Hörers reflektieren [9]. Diese Sensitivitätsunterschiede können zum einen auf periphere Schäden in der Cochlea und dem auditiven Nerv beruhen [5], aber auch durch höhere kognitive Defizite verursacht werden.

Externalisieren und das Inferenzproblem

Unter künstlichen Hörbedingungen kann es zu nicht plausiblen Reizkombinationen kommen, welche die natürlich externalisierte Distanzwahrnehmung, also deren empfundene Abbildung in den umgebenden Raum, beeinträchtigen. Während eine Lateralisierung entlang der interauralen Achse auch mit höchst artifiziellen Schallreizen (wie beispielsweise Sinustönen) funktioniert, erfordert eine scharfe Lokalisation im dreidimensionalen Raum zumeist akustische Gegebenheiten, die mit Erwartungen basierend auf gewohnten Hörumgebungen in Einklang zu bringen sind. Demzufolge lassen sich Studien, welche gezielt den Einfluss spektraler Modifikationen auf die Externalisierung untersuchten [10–12], zum Großteil anhand der etablierten spektralen Merkmale für Lokalisation in Sagittalebene vorhersagen [13].

Spektrale HRTF-Modifikationen sind folglich auch in der Lage Wahrnehmungsverzerrungen von Distanzbewegungen zu evozieren, bei denen sich annähernde Quellen zu höherer Salienz führen als sich entfernende Quellen [14]. Darauf aufbauende Analysen von ereigniskorrelierten Potentialen (EKPs) mittels Elektroenzephalographie (EEG) haben gezeigt, dass solche spektral-evozierten Unterschiede sowohl in der Externalisierung als auch in der Wahrnehmungssensitivität von Distanzbewegungen erst von späteren, üblicherweise aufgabenspezifischen Gehirnaktivitäten (EKP-Komponente P2) reflektiert werden. Es wird vermutet, dass dieser Salienzanstieg von der Amygdala gesteuert wird (vgl. Abb. 1) [15].

Fokussieren

Im Gegensatz zu automatisierten Salienzanstiegen ist die bewusste Steuerung von räumlich selektiver Aufmerksamkeit wesentlich um in vielen sozialen Alltagssituationen kommunizieren zu können, was gleichzeitig ein fundamentales Problem vieler Nutzer von Hörhilfen darstellt. Wir haben deshalb untersucht inwiefern inkonsistente Richtungsmerkmale Aufmerksamkeitsmechanismen in einer Hörsituation mit zwei konkurrierenden, örtlich getrennten (ca. $\pm 30^\circ$ Azimut) Sprechern beeinträchtigen [16]. Dabei wurden Spatialisierung gegenübergestellt, die entweder konsistente Information in Form von individualisierten HRTFs oder nur isolierte Merkmale wie ITD oder ILD zur Verfügung stellten. Bezüglich der energetischen Maskierung waren die Bedingungen ILD und HRTF äquivalent. Während die Versuchspersonen nur geringe Unterschiede in der Silbenerkennungsrate und den späteren EKPs (N1 und P2) zeigten, waren deutliche Unterschiede in der Gehirnaktivität im alpha-

Frequenzbereich (8-13 Hz) während der Vorbereitungsphase und in der initialen kortikalen Antwort (EKP-Komponente P1) während der Stimulusverarbeitung zu erkennen. Dies lässt vermuten, dass unter einfachen Aufgabenbedingungen kompensatorische Mechanismen in der Lage sind robuste Spracherkennung auch unter akustisch mehrdeutigen Bedingungen zu gewährleisten, jedoch vermutlich zu Lasten der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses [17]. Eine möglichst frühe, optimale Anpassung der sensorischen Verarbeitung erfordert hingegen konsistente Richtungsmerkmale.

Ausblick

Es gibt noch viele grundlegende Mechanismen des räumlichen Hörens zu untersuchen. In naher Zukunft werden wir uns neben der Weiterführung der oben behandelten Aspekten auch vermehrt mit auditiven Lernmechanismen beschäftigen. Wir werden folglich psychoakustische und neurophysiologische Messmethoden kombinieren, um grundlegende kognitive Mechanismen für statistisches und überwachtetes Lernen von räumlicher Information zu untersuchen, kognitive Teilsysteme zu identifizieren und offen zu legen wie sich diese Mechanismen und ihre neuronale Repräsentation über die gesamte menschliche Lebensdauer verändern.

Wie bisher fühlen wir uns zu reproduzierbarer Forschung verpflichtet und werden unsere Daten, Analysen und Modelle auf Plattformen wie der Auditory Modeling Toolbox [18] öffentlich zur Verfügung stellen.

Danksagungen

Ich möchte mich insbesondere bei Piotr Majdak, Barbara Shinn-Cunningham, Bernhard Laback und H. Steven Colburn für das hervorragende wissenschaftliche Mentorat bedanken. Zudem danke ich all meinen bisherigen KooperationspartnerInnen für die gute Zusammenarbeit sowie Peter Balazs stellvertretend für die angenehmen und anregenden Arbeitsbedingungen am Institut für Schallforschung. Außerdem danke ich dem Österreichischen Wissenschaftsfonds (FWF J3803-N30), der Europäischen Wissenschaftskommission (MSCA-RISE-2015: #691229) sowie Oculus Research, LLC für die finanzielle Unterstützung und der DEGA für die große Ehre den diesjährigen Lothar-Cremer-Preis entgegennehmen zu dürfen.

Literatur

1. Majdak, P., Baumgartner, R., and Jenny, C. (2019). Formation of three-dimensional auditory space. bioRxiv. Available at: Preprint, posted January 8, 2019 [Accessed January 8, 2019].
2. Middlebrooks, J.C. (1999). Virtual localization improved by scaling nonindividualized external-ear transfer functions in frequency. *J Acoust Soc Am* 106, 1493–1510.
3. Baumgartner, R., Majdak, P., and Laback, B. (2014). Modeling sound-source localization in sagittal planes for human listeners. *J. Acoust. Soc. Am.* 136, 791–802.
4. Baumgartner, R., Majdak, P., and Laback, B. (2016). Erratum: Modeling sound-source localization in sagittal

- planes for human listeners [J. Acoust. Soc. Am. 136, 791-802 (2014)]. J. Acoust. Soc. Am. 140, 2456.
5. Baumgartner, R., Majdak, P., and Laback, B. (2016). Modeling the Effects of Sensorineural Hearing Loss on Sound Localization in the Median Plane. Trends Hear. 20, 1–11.
 6. Macpherson, E.A., and Middlebrooks, J.C. (2003). Vertical-plane sound localization probed with ripple-spectrum noise. J Acoust Soc Am 114, 430–445.
 7. Marelli, D., Baumgartner, R., and Majdak, P. (2015). Efficient Approximation of Head-Related Transfer Functions in Subbands for Accurate Sound Localization. IEEEACM Trans. Audio Speech Lang. Process. 23, 1130–1143.
 8. Baumgartner, R., and Majdak, P. (2015). Modeling Localization of Amplitude-Panned Virtual Sources in Sagittal Planes. J. Audio Eng. Soc. 63, 562–569.
 9. Majdak, P., Baumgartner, R., and Laback, B. (2014). Acoustic and non-acoustic factors in modeling listener-specific performance of sagittal-plane sound localization. Front. Psychol. 5, 1–10.
 10. Hartmann, W.M., and Wittenberg, A. (1996). On the externalization of sound images. J Acoust Soc Am 99, 3678–88.
 11. Hassager, H.G., Gran, F., and Dau, T. (2016). The role of spectral detail in the binaural transfer function on perceived externalization in a reverberant environment. J. Acoust. Soc. Am. 139, 2992–3000.
 12. Boyd, A.W., Whitmer, W.M., Soraghan, J.J., and Akeroyd, M.A. (2012). Auditory externalization in hearing-impaired listeners: The effect of pinna cues and number of talkers. J. Acoust. Soc. Am. 131, EL268–EL274.
 13. Baumgartner, R., Majdak, P., Colburn, H.S., and Shinn-Cunningham, B. (2017). Modeling sound externalization based on listener-specific spectral cues. Available at: https://www.researchgate.net/publication/317496219_Modeling_sound_externalization_based_on_listener-specific_spectral_cues [Accessed September 6, 2017].
 14. Baumgartner, R., Reed, D.K., Tóth, B., Best, V., Majdak, P., Colburn, H.S., and Shinn-Cunningham, B. (2017). Asymmetries in behavioral and neural responses to spectral cues demonstrate the generality of auditory looming bias. Proc. Natl. Acad. Sci. 114, 9743–9748.
 15. Bach, D.R., Schächinger, H., Neuhoff, J.G., Esposito, F., Salle, F.D., Lehmann, C., Herdener, M., Scheffler, K., and Seifritz, E. (2008). Rising Sound Intensity: An Intrinsic Warning Cue Activating the Amygdala. Cereb. Cortex 18, 145–150.
 16. Deng, Y., Choi, I., Shinn-Cunningham, B.G., and Baumgartner, R. (2019). Impoverished auditory cues fail to engage brain networks controlling spatial selective attention. bioRxiv, 533117.
 17. Giuliano, R.J., Karns, C.M., Neville, H.J., and Hillyard, S.A. (2014). Early auditory evoked potential is modulated by selective attention and related to individual differences in visual working memory capacity. J. Cogn. Neurosci. 26, 2682–90.
 18. Majdak, P., and Co. (2019). The Auditory Modeling Toolbox. Available at: <http://amtoolbox.sourceforge.net> [Accessed March 30, 2019].