

### Hintergrund

In einer permanent beweglichen Welt und ihrer Virtualisierung geht es ständig um eine Kombination von verschiedensten Parametern in stets neuer und unterschiedlicher Gewichtung. Dabei sind die Parameter zur Richtungswahrnehmung von statischen Audiosignalen weitestgehend erforscht:

- So geschieht die Lokalisation entlang der horizontalen Achse (links-rechts; siehe Abb. 1) durch die Auswertung von interauralen Laufzeit- und Pegelunterschieden. Hier können je nach Frequenz Pegelunterschiede von weniger als 1 dB und Laufzeitunterschiede von bis zu 10  $\mu$ s erkannt werden, was einem minimal wahrnehmbaren Winkel von 1° entspricht (Mills, 1958).
- Der Schalleinfallswinkel von vorne wird hierbei sehr genau wahrgenommen (ca. 3-4° Unschärfe), während er bei seitlichem Schalleinfall eine Lokalisationsunschärfe von bis zu 10° erreichen kann (Blauert, 1974, S. 33).
- Entlang der vertikalen Achse (vorne-hinten, oben-unten) bestimmen die Außenohrübertragungsfunktionen (engl.: head related transfer function, HRTF) die Genauigkeit der Lokalisation. Die HRTFs sind stark frequenzabhängig und hörspezifisch. HRTFs können zur dreidimensionalen Darbietung von virtuellen Schallquellen über Kopfhörer verwendet werden (siehe Abb. 2). In der Oben-Unten-Wahrnehmung lässt sich bei einem Schalleinfall von vorn eine Winkelgenauigkeit von bis zu +/- 9° erreichen (z.B. Plenge & Brunschen, 1971).

Allerdings bleiben im Forschungsgebiet der auditiven Wahrnehmung von Bewegungen noch viele Fragen offen. Gerade durch die jüngsten technischen Fortschritte im Bereich der Virtual- und Augmented-Reality-Headsets kombiniert mit einem präzisen Head-Tracking ist diese Thematik höchst aktuell, sowohl von der Seite der technischen Umsetzung als auch von der Seite der notwendigen Grundlagenforschung.

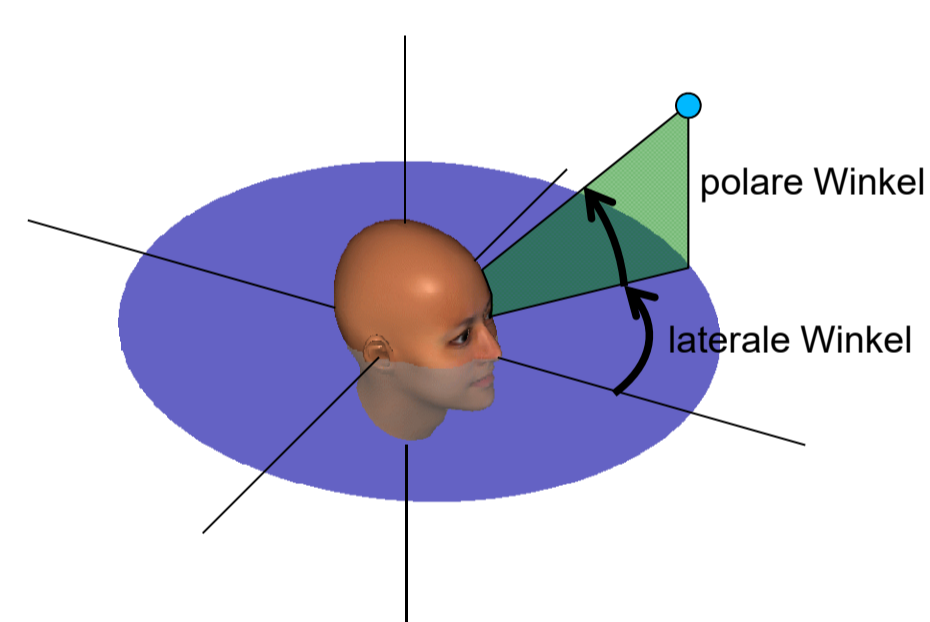


Abb. 1: Kopfbezogenes Koordinatensystem mit lateralem und polarem Winkel.

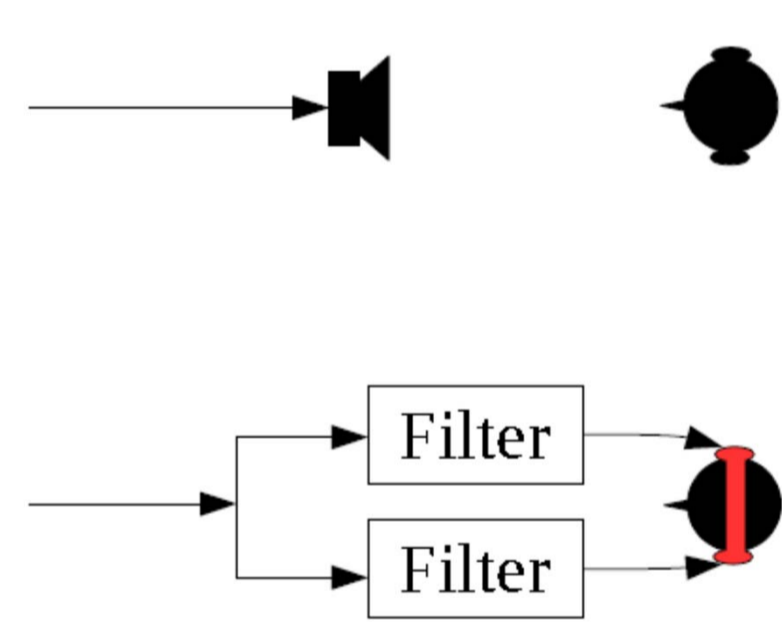


Abb. 2: Darbietung virtueller Schallquellen mithilfe von HRTFs.

Bei der Schalllokalisierung von statischen und beweglichen Quellen müssen auch weitere Wahrnehmungsaspekte berücksichtigt werden, wie z.B. der Einfluss unterschiedlicher oder sich ändernder raumakustischer Verhältnisse (Nachhall, frühe Reflexionen, Entfernung zur Schallquelle etc.) auf die Schalllokalisierung (Auralisation; Vorländer, 2008) oder der Einfluss der visuellen Wahrnehmung auf die Ortung einer Schallquelle (cross-/multi-modal perception; Stein, 2012). Je nach Signalbeschaffenheit (Impulse, Rauschen, Einzeltöne, Sprache, Musik) kann hier die Wahrnehmung auch noch mal unterschiedlich ausfallen. Dabei steht in diesem Beitrag und speziell in der virtuellen Realität zur Darbietung von virtuellen Welten eine Fragestellung besonders im Fokus:

„Wie lassen sich bewegte Schallquellen in einer virtuellen Umgebung möglichst realitätsnahe nachbilden?“

### Herangehensweise

Im Rahmen des Beitrags werden verschiedene Aspekte des Einflusses der Kopfbewegung auf die Wahrnehmung diskutiert und daraus resultierende Richtlinien und Forschungsfragen vorgestellt. Eine vergleichende Zusammenstellung der bisherigen Studien zur Wahrnehmung von bewegten Schallquellen schafft Aufschluss über die bislang ermittelten Parameter und Grenzwerte. Es werden sowohl die noch zu findenden als auch die bereits bekannten Einflussgrößen und Hörschwellen zusammengestellt und ihre Operationalisierbarkeit für den berechenbaren Einsatz in virtuellen 3D-Umgebungen diskutiert. Dabei wird der Fokus auf den aktuellen technischen Fortschritt von Virtual- und Augmented-Reality-Headsets kombiniert mit einem präzisen Head-Tracking System gesetzt.

### Lokalisation bei Bewegung

Aus einer Auswahl der bisherigen Literatur können folgende Richtlinien bezüglich des Einflusses von Kopf- und Schallquellenbewegung abgeleitet werden:

Kopfbewegungen in Richtung der Schallquelle tragen zur Verbesserung der räumlichen Lokalisation bei	Young, 1931
Kopfbewegungen können durch vestibuläre und visuelle Merkmale ersetzt werden	Wallach, 1940
Dreh- und Schwenkbewegungen verringern gering aber signifikant die vertikalen Lokalisierungsfehler für niederfrequente Rauschstimuli	Thurlow & Runge, 1967
Keine Vorne-hinten-Verwechslung bei vom Hörer kontrollierter Schallquellenbewegung, jedoch bei unkontrollierter vorhanden → Kopfbewegungen sind für die dynamischen Merkmale nicht erforderlich, um die Vorne-hinten-Verwechslung zu minimieren	Wightman & Kistler, 1999
Endgültige Position einer bewegten Schallquelle scheint gewöhnlich in Bewegungsrichtung verschoben („auditory representational momentum“)	Getzmann & Lewald, 2007
Mit Kopfbewegungen treten vorne-hinten-Verwechslungen am stärksten bei tieffrequenten (ca. 500 Hz) Signalen auf	Brimijoin & Akeroyd, 2012
Kopfbewegungen verbessern Externalisation und reduzieren Vorne-Hinten-Verwechslungen. Individuelle HRTFs verbessern Externalisation mit Kopfbewegung minimal.	Brimijoin, Boyd & Akeroyd, 2013
Zur Reduktion der Vorne-hinten-Verwechslungen sind Kopfbewegungen um 4° in der horizontalen bzw. 16° in vertikaler Richtung ausreichend.	McAnally & Martin, 2014
Gerade wahrnehmbarer Bewegungswinkel einer Schallquelle bei einer horizontalen Bewegung: 1,5° bis 21° (je nach Geschwindigkeit und Spektrum). Große Lokalisationsfehler bei Schallquellenbewegungen über einer Geschwindigkeit von 70° /s.	Carlile & Leung, 2016
Kopfbewegung gekoppelt mit Head-Tracking verbessert die Externalisation wesentlich (trotz nicht-individueller HRTFs)	Hendrickx, 2017

Aus der oben gelisteten Studien ergeben sich anschließende offene Forschungsfragen:

- Inwiefern verändert sich die *Lokalisation* entlang der vertikalen Ebenen in der multimodalen virtuellen Realität? Wie wirken sich dabei die eigenen und fremden HRTFs allgemein und in verschiedenen Frequenzbereichen aus?
- Wie wirken sich sowohl Schallquellen- als auch Kopfbewegungen auf die *Externalisation* in multimodaler Darbietung von virtuellen Umgebungen aus? Die Dreh- und Schwenkbewegungen sowie Unterschiede in Signalen Stimuli könnten eine Rolle spielen.
- Wie beeinflussen Kopfbewegungen den Bauchredner-Effekt (*audio-visuelle Wahrnehmung*) in der virtuellen Realität?

Diese Fragestellungen sind meist zu komplex, um sie unter realen Bedingungen kontrolliert zu untersuchen. Mit Hilfe des am Acoustics Research Institute (ARI) der ÖAW entwickelten Plugins „SOFAlizer for Unity“ lassen sich nun Hörversuche mit austauschbaren HRTFs in audio-visuellen virtuellen Umgebungen darbieten, in denen Hörsituationen wiederholbar und mit allen Variablen kontrolliert in die Auswertung einbezogen werden können.

### Zusammenfassung

Im Bereich der Lokalisation von statischen und bewegten Schallquellen zeigt sich ein breiter Forschungsstand. Dennoch sind die Parameter zur Richtungswahrnehmung bei dynamischen Schallquellen in Kombination mit anderen Wahrnehmungsaspekten noch längst nicht abschließend geklärt. Insbesondere durch die Entwicklung des SOFAlizer-Plugins für den Einsatz in virtuellen Umgebungen werden genauere Untersuchungen zur multimodalen Wahrnehmung mit individuellen HRTFs möglich.

### Literatur

BLAUERT, J.: *Räumliches Hören*. Hirzel Stuttgart 1974.  
 BRIMIJOIN, W. O., AKEROYD, M. A.: *The role of head movements and signal spectrum in an auditory front/back illusion*. In: *i-Perception* 3/3 (2012), S. 179–182.  
 BRIMIJOIN, W. O., BOYD, A. W., AKEROYD, M. A.: *The contribution of head movement to the externalization and internalization of sounds*. In: *PLoS One* 8/12 (2013), e83068.  
 CARLILE, S., LEUNG, J.: *The Perception of Auditory Motion*. In: *Trends in Hearing* 20 (2016), S. 1–19.  
 GETZMANN, S., LEWALD, J.: *Localization of moving sound*. In: *Perception & Psychophysics* 69/6 (2007), S. 1022–1034.  
 HENDRICKX, E., STITT, P., MESSONNIER, J.-C., LYZWA, J.-M., KATZ, B. F. G., BOISHÉRAUD, C. d.: *Influence of head tracking on the externalization of speech stimuli for non-individualized binaural synthesis*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 141/3 (2017), S. 2011–2023.  
 MCANALLY, K. I., MARTIN, R. L.: *Sound localization with head movement: implications for 3-d audio displays*. In: *Frontiers in Neuroscience* 8/210 (2014), S. 1–6.  
 MILLS, A.W.: *On the minimum audible angle*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 30/4 (1958), 237–246.  
 PLENGE, G., BRUNSCHEN, G.: *Signalkenntnis und Richtungsbestimmung in der Medianebene bei Sprache*. In: *Proceedings, 7th Int. Congr. on Acoustics* (1971), Budapest, 19 H 10.  
 STEIN, B. E.: *The New Handbook of Multisensory Processing*. MIT Press 2012.  
 THURLOW, W. R., RUNGE, P. S.: *Effect of induced head movements on localization of direction of sounds*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 42/2 (1967), S. 480–488.  
 VORLÄNDER, M.: *Auralization*. Springer Berlin Heidelberg 2008.  
 WALLACH, H.: *The role of head movements and vestibular and visual cues in sound localization*. In: *Journal of Experimental Psychology* 27/4 (1940), S. 339–368.  
 WIGHTMAN, F. L., KISTLER, D. J.: *Resolution of front-back ambiguity in spatial hearing by listener and source movement*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 105/5 (1999), S. 2841–2853.  
 YOUNG, P. T.: *The Role of Head Movements in Auditory Localization*. In: *Journal of Experimental Psychology* 14 (1931), S. 95–124.