

Richtungsunterschiedsschwellen (Minimum Audible Angles) für ein zirkulares Wellenfeldsynthesesystem in reflexionsbehafteter Umgebung

Florian Völk, Hugo Fastl

AG Technische Akustik, MMK, Technische Universität München, 80333 München, Deutschland, florian.voelk@mytum.de

Einleitung

Als Richtungsunterschiedsschwelle (Minimum Audible Angle, MAA) bezeichnet man den Winkel zwischen zwei benachbarten Schallquellen, deren Positionen bei sequentieller Wiedergabe auditiv eben als unterschiedlich wahrgenommen werden können. Richtungsunterschiedsschwellen bei klassischer Lautsprecherwiedergabe unter definierten, sehr speziellen Bedingungen (in reflexionsarmer Umgebung) sind wohlbekannt. Bei Verwendung von Wellenfeldsynthese (WFS) zur Schallwiedergabe, insbesondere in reflexionsbehafteter Umgebung, stellt sich jedoch erneut die Frage nach den Richtungsunterschiedsschwellen, da in diesem Fall eine deutlich veränderte Situation vorliegt: In typischen Konfigurationen wird Wellenfeldsynthese verwendet, um ebene oder Kugelwellen (also Schallfelder in reflexionsarmer Umgebung), die sogenannten Primärquellen, zu synthetisieren. Wird ein Wellenfeldsynthesesystem allerdings in reflexionsbehafteter Umgebung betrieben, überlagern sich dem synthetischen Schallfeld die Reflexionen des Wiedergaberaums. Der Einfluss dieser Reflexionen auf die Eigenschaften der resultierenden Hörereignisse ist weitgehend unklar. In diesem Beitrag werden deshalb Richtungsunterschiedsschwellen für ein zirkulares Wellenfeldsynthesesystem vorgestellt, die in reflexionsbehafteter Umgebung bei vollständiger Dunkelheit mit einem two-alternative forced choice (2-AFC) Verfahren gemessen wurden. Diskutiert werden insbesondere Einflüsse des Wiedergaberaums, der Stimuli und der Primärquellenart auf die Richtungsunterschiedsschwellen.

Vorarbeiten

Mills (1958) benutzte Tonimpulse, um mit realen Schallquellen in reflexionsarmer Umgebung MAAs zu messen. Seine Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Richtungsunterschiedsschwellen von der Schalleinfallrichtung und vom spektralen Gehalt der Stimuli abhängen. Die geringsten Werte von einigen Grad ergeben sich für frontale Beschallung. Perrott und Pacheco (1989) fanden für breitbandige Schalle Werte etwas unterhalb von 1° .

Methode und Vorgehen

Die hier dargestellten Experimente wurden in einem abgedunkelten Laborraum ($6.8\text{ m} \times 3.9\text{ m} \times 3.3\text{ m}$) am Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation der Technischen Universität München durchgeführt. Die Nachhallzeit dieses Labors kann durch Einbringen von Vorhängen und absorbierenden Materialien beeinflusst werden. In Anlehnung an Perrott und Pacheco (1989) wurde ein 2-AFC

Verfahren (vgl. Hellbrück und Ellermeier 2004) mit einer 2down/1up Regel als psychometrisches Verfahren zur Bestimmung des MAA verwendet. Zur Schrittweitanpassung kam PEST (Parameter Estimation by Sequential Testing) zum Einsatz. Die vier Probanden hörten dabei zwei Schalle und wurden gebeten, durch Tastendruck anzugeben, ob das zum zweiten Schall korrespondierende Hörereignis links oder rechts vom ersten auftrat. Die Präsentationsreihenfolge variierte dabei zufällig. Dieses Vorgehen wurde wiederholt, bis die Abweichungen zwischen den letzten beiden Minimal- und den letzten beiden Maximalwerten des Regelvorgangs kleiner als 0.8° waren. Da diese Methode auf den 70.7%-Punkt der psychometrischen Funktion konvergiert, ist der MAA hier als die Schwelle im Azimut definiert, an der etwa 71% aller horizontalen Positionsurteile korrekt sind. Alle Ergebnisse werden als Mediane und Interquartilbereiche der intraindividuellen Mittelwerte über drei Wiederholungen dargestellt. Die Schallwiedergabe wurde über mittels WFS erzeugte Kugelquellen und ebene Wellen realisiert. Details zum verwendeten Aufbau und der entsprechenden Signalverarbeitung finden sich in Völk (2010).

Als Schallstimuli wurden Impulsfolgen (700 ms Impuls-, 300 ms Pausendauer, 20 ms gaussförmige Flanken) präsentiert. Als breitbandiger Reiz (20 Hz bis 20 kHz) wurde gleichmäßig anregendes Rauschen (uniform exciting noise, UEN, vgl. Fastl und Zwicker 2007) verwendet. Diese spektrale Rauschcharakteristik kam auch in bandbegrenzten Versionen, als Tief- (20 Hz bis 2 kHz) und Hochpassrauschen (2 kHz bis 20 kHz), sowie als frequenzgruppenbreites Schmalbandrauschen bei Mittenfrequenzen im gesamten Hörbereich zum Einsatz.

Primärquellenart und -entfernung

Abb. 1 zeigt, gekennzeichnet als gefüllte Kreise, Richtungsunterschiedsschwellen für über Kugelquellen bei verschiedenen Entfernungen abgestrahlte, breitbandige Rauschimpulse. Gestrichelte Linien: Extrema der Quartile für ebene Wellen bei verschiedenen Pegeln.

Zunächst lässt sich feststellen, dass die ermittelten Werte mit den bekannten Literaturdaten insofern übereinstimmen, dass die mittleren Schwellen für breitbandige Schalle unabhängig von der Primärquellenart unterhalb von zwei Grad liegen. Darüber hinaus zeigen sich keine deutlichen systematischen Unterschiede, weder zwischen ebenen und Kugelwellen, noch für Kugelquellen in verschiedenen Entfernungen.

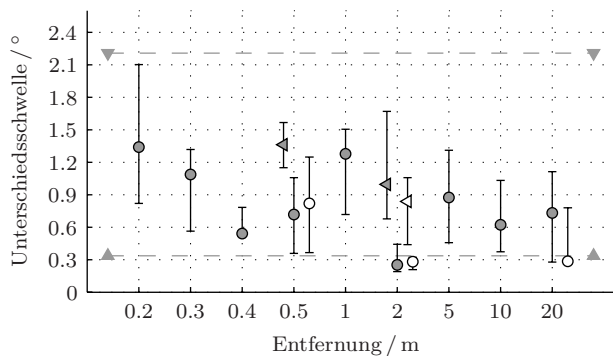


Abbildung 1: Richtungsunterschiedsschwellen im verwendeten Wellenfeldsyntheseaufbau für Rauschimpulsfolgen. Frontale Kugelquellen, Breitband- (o) und Tiefpassrauschen (<) in zwei verschiedenen Raumzuständen (gefüllt geringe, offen hohe Nachhallzeit). Gestrichelt: Extrema der Quartile für ebene Wellen bei unterschiedlichen Pegeln.

Schalleinfallrichtung

In Abb. 2 sind Richtungsunterschiedsschwellen für bei konstantem Abstand von 2 m in verschiedenen Richtungen synthetisierte, Breitbandrauschimpulse abstrahlende Kugelquellen als gefüllte Kreise dargestellt.

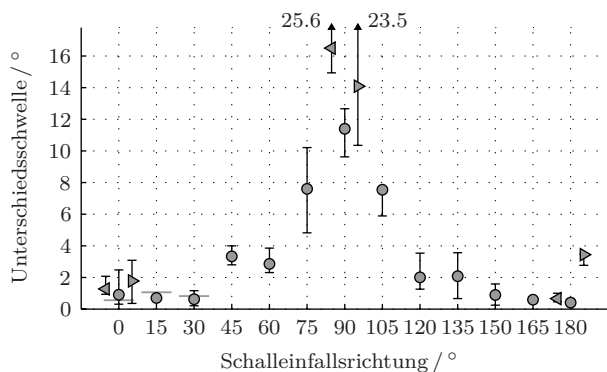


Abbildung 2: Richtungsunterschiedsschwellen im verwendeten WFS-Aufbau für Rauschimpulsfolgen (700 ms Puls, 300 ms Pause, 20 ms Flanke). Kugelquellen in 2 m Abstand und verschiedenen Einfallrichtungen. Breitband- (o), Tiefpass- (<) und Hochpassrauschen (>). Linien: Mediane für ebene Wellen.

Es bestätigt sich die bereits von Mills (1958) für reale Quellen beobachtete Tendenz, dass die Richtungsauflösung für seitlichen Schalleinfall abnimmt, und für frontale und rückwärtigen Einfall Werte im Bereich um 1° erreicht.

Spektralgehalt der Stimuli

Zusätzlich zu den Daten für breitbandiges Rauschen wurden in den gezeigten Experimenten an bestimmten Stützpunkten auch Daten für Tief- (<) und Hochpassrauschen (>) erhoben (Grenzfrequenz jeweils 2 kHz). Abb. 1 offenbart für frontale Kugelquellen sowohl in 0.5 als auch in 2 m Entfernung eine deutliche Erhöhung des MAA durch die Bandbegrenzung auf Frequenzen unterhalb von 2 kHz, was sich in Abb. 2 für frontale, aber auch für rückwärtige und insbesondere für seitliche Quellen in 2 m Ab-

stand bestätigt. Ähnliche Tendenzen zeigen sich in Abb. 2 für Bandbegrenzung auf Frequenzen oberhalb von 2 kHz, wobei sich hier für die rückwärtige Quelle im Vergleich zum tiefpassgefilterten Schall eine stärkere Erhöhung der Schwelle ergibt. Dies könnte darauf hindeuten, dass Spektralanteile oberhalb von 2 kHz zur Unterscheidbarkeit von rückwärtigen Schalleinfallrichtungen weniger beitragen als Spektralanteile unterhalb. Abb. 3 zeigte Daten für frontal einfallende ebene Wellenfronten und Schmalbandrauschen als gefüllte Symbole.

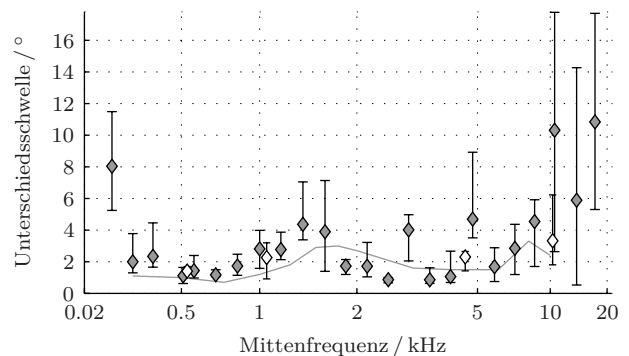


Abbildung 3: Richtungsunterschiedsschwellen im verwendeten WFS-Aufbau. Primäre ebene Wellen und frequenzgruppenbreite Schmalbandrauschimpulsfolgen in zwei verschiedenen Raumzuständen (gefüllt geringe, offen hohe Nachhallzeit). Grau durchgezogen: Tonimpulse/reale Quellen nach Mills (1958).

Im wesentlichen werden die von Mills (1958) mit realen Quellen in reflexionsarmer Umgebung ermittelten Werte qualitativ und quantitativ auch für Wiedergabe mit WFS in reflexionsbehafteter Umgebung bestätigt.

Wiedergabeumgebung

In den Abb. 1 und 3 sind zusätzlich zu den bereits diskutierten als ungefüllte Symbole auch Daten für einen veränderten Raumzustand (Vergrößerung der mittleren Nachhallzeit von 50 auf 140 ms) angegeben. In allen betrachteten Fällen zeigt sich kein Einfluss der so veränderten Wiedergabeumgebung.

Die Autoren danken BOSE GmbH, Sound Service GmbH/Samson Tech. Corp. und Audio AG/RME für die Unterstützung beim Aufbau des WFS-Systems. Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Projekt FA 140/4 gefördert.

Literatur

- Fastl H., E. Zwicker: *Psychoacoustics - Facts and Models*. 3. Auflage (Springer, Berlin Heidelberg, 2007)
- Hellbrück J., W. Ellermeier: *Hören - Physiologie, Psychologie und Pathologie*. 2. Auflage (Hogrefe, 2004)
- Mills A. W.: On the minimum audible angle. *J. Acoust. Soc. Am.* **30**, 237–246 (1958)
- Perrott D. R., S. Pacheco: Minimum audible angle thresholds for broadband noise as a function of the delay between the onset of the lead and lag signal. *J. Acoust. Soc. Am.* **85**, 2669–2672 (1989)
- Völk F.: Psychoakustische Experimente zur Distanz mittels Wellenfeldsynthese erzeugter Hörereignisse. In *DAGA 2010*, 1065–1066 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin, 2010)