

Hörbare Geometrieänderungen in virtuellen Räumen

Ramona Bomhardt, Janina Fels

Institut für Technische Akustik, Juniorprofessur für Medizinische Akustik

52074 Aachen, Deutschland, Email: rbo@akustik.rwth-aachen.de

Einleitung

Für akustische Raumsimulationen, die beispielsweise zur Auralisierung von Gebäuden benötigt werden, kommen unterschiedliche Verfahren abhängig von der Frequenz und der Modelgröße zum Einsatz. Während für tiefe Frequenzen unterhalb der Schroederfrequenz häufig Finite Elemente Methoden eingesetzt werden, werden für den Bereich oberhalb dieser Frequenz Ray-Tracing und Spiegelschallquellen verwendet, da diese oberhalb der Schroederfrequenz wesentlich weniger Rechenleistung benötigen und damit auch echtzeitfähig eingesetzt werden können. Damit diese Echtzeitfähigkeit gewährleistet werden kann, sollte das dazu verwendete Geometriemodell des zu simulierenden Raums sehr einfach sein. Um einfache Modelle mit möglichst wenigen Flächen zu erhalten, müssen in den Modellen häufig Flächen zusammengefasst und approximiert werden. Ungeklärt ist dabei jedoch immer noch die Frage, wie stark diese Vereinfachung sein darf, ohne dass sich der vereinfachte zu simulierende Raum signifikant anders anhört als das detaillierte Modell. Deshalb soll hier der Frage nachgegangen werden, ab welcher Drehung einer Wand in einem Raum diese Drehung hörbar ist.

Dazu soll folgend die auditive Wahrnehmung in Räumen eingegangen werden. Zur akustischen Orientierung in komplexen Umgebungen nutzt der Mensch die frühen Reflexionen von Grenzflächen (Wänden, Decken, Böden, große Objekte) und deren Bezug zur Schallquelle. Verändert sich die Position des Hörer oder der Quelle in einer Szene mit Grenzflächen, so ändert sich im Normalfall ebenfalls die akustisch wahrgenommene Szene. Die maximale nicht hörbare Veränderung einer Grenzfläche (Abstand oder Drehung) ist abhängig von binauralen Parametern, interauralen Zeit- und Pegeldifferenzen und psychoakustischen Größen. Die wahrgenommenen frühen Reflexionen werden in echtzeitfähigen Raumakustiksimulationen durch Spiegelschallquellen realisiert. Wird im Zuge einer Approximation des geometrischen Modells der Umgebung die relative Ausrichtung oder Lage einer Wand verändert, so ändert sich ebenfalls die Position der Spiegelschallquelle. Außerdem kann sich durch diese Raumveränderungen ebenfalls der Nachhall des Ray-Tracings verändern. Durch die Drehung, Verschiebung von einer Wand oder das Zusammenfassen von Wänden kann daher der Raum größer oder kleiner werden.

Raumkonfiguration

Die Annahme ist, dass die Wahrnehmungsschwelle der Wanddrehung abhängig von den akustischen Raumeigenschaften und der Hörerposition ist. Es ist bekannt,

dass die Lokalisation in Räumen von Parametern wie des Raumvolumens, der Nachhallzeit und des Abstands zwischen Quelle und Hörer abhängt [4] [5]. Es konnte ebenfalls nachgewiesen werden, dass die Lokalisation von Hörerpositionen mittig im Raum nicht so stark von Wandreflexionen gestört werden [6] [7].

Um nun eine die Wahrnehmungsschwelle festzulegen, bei der die Wanddrehung gerade hörbar ist für beliebige Räume, muss zuerst ein Raum gefunden werden, in dem Menschen besonders sensibel sind. Dazu wurden im Vorfeld zwei Hörversuche durchgeführt, die der Frage nachgehen, in welchen Räumen die Lokalisationfähigkeit am besten ist. Dazu wurden sowohl die Größe wie auch die Absorption der Wände verändert.

Im Einklang mit einzelnen Ergebnissen realen Räumen [4] [5] [6] [7], ergab sich, dass ein Raum der Größe $15 \times 15 \times 3\text{m}$ mit einer Absorption von $\alpha = 0.9$ auf allen Flächen für die Mehrheit der Probanden sehr gute Lokalisationseigenschaften bietet.

Im Zuge dieses Experiments wird nun die zu drehende Wand als schallhart angenommen.

Quell- und Hörerposition

Da hier besonders der Effekt der Spiegelschallquelle an der stark reflektierenden Wand untersucht werden soll, wird vorerst untersucht, wie diese Spiegelschallquelle sich mit verschiedenen Quell- und Hörerpositionen ändert.

Dazu wird hier der Winkel $\Delta\alpha$, die Leveldifferenz ΔL und Laufzeitdifferenz $\Delta\tau$ zwischen Spiegelschallquelle und Quelle in der Grafik 1 betrachtet [3]. Es lässt sich feststel-

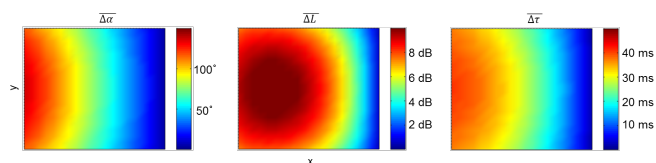


Abbildung 1: An jeder Stelle im Raum wird eine Quelle aufgestellt und der Hörer verschoben. Aus der Lage der Quelle, des Hörers und der Spiegelschallquelle ergeben sich die Parameter $\Delta\alpha$, ΔL und $\Delta\tau$. Da der Hörer für jede Quellposition an jede beliebige Position geschoben wird, ergibt sich hier der abgebildete jeweilige Mittelwert.

len, dass der Winkel $\Delta\alpha$ sehr stark schwanken kann. Die Level und Laufzeitdifferenz (ΔL und $\Delta\tau$) hingegen nehmen mit dem Abstand zur stark reflektierenden Wand zu.

Jedoch ist im Raum nicht jede beliebige Kombination von $\Delta\alpha$, ΔL und $\Delta\tau$ möglich. Somit werden plausible Positionen von Quelle und Hörer im Raum ausgewählt, die möglichst große Variationen der Parameter ($\Delta\alpha =$

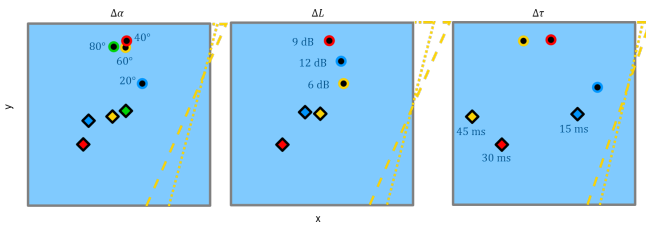


Abbildung 2: Für den Hörversuch werden insgesamt acht Quell- (Punkt) und Hörerpositionen (Raute) mit den folgenden Kombinationen von $\Delta\alpha$, L und τ : $[20^\circ \text{ 9 dB 30ms}]$, $[40^\circ \text{ 9 dB 30ms}]$, $[60^\circ \text{ 9 dB 30ms}]$, $[80^\circ \text{ 9 dB 30ms}]$, $[40^\circ \text{ 6 dB 30ms}]$, $[40^\circ \text{ 12 dB 30ms}]$, $[40^\circ \text{ 9 dB 15ms}]$ und $[40^\circ \text{ 9 dB 45ms}]$ gewählt. Die gestrichelten gelben Linien entsprechen exemplarische Wanddrehungen um den Winkel φ .

$[20 \text{ 40 60 80}]^\circ$, $\Delta L = [6 \text{ 9 12}] \text{ dB}$, $\Delta\tau = [15 \text{ 30 45}] \text{ ms}$ aufzeigen. Außerdem wurde Augenmerk darauf gelegt, dass der Hörer sich möglichst mittig im Raum befindet [6] [7] (siehe Abbildung 2).

Hörversuchsdesign

Um die Wahrnehmungsschwelle an der jeweiligen Konstellation (siehe Abbildung 2) zu bestimmen, wird hier das Quest-Verfahren mit Quantilen verwendet [1] [2]. Dies hat den Vorteil, dass nach etwa 20 Abfragen mittels ABX-Test der Algorithmus auf der Wahrnehmungsschwelle des jeweiligen Probanden konvergiert und somit binnen von 50 Minuten der Hörversuch mit den acht Konfigurationen inkl. einer Einführungsrunde durchführbar ist. In dieser Einführungsrunde wird die Wand zweimal für alle Positionen für eine Wanddrehung von $\varphi = 30^\circ$ dargeboten. In Vorversuchen wurden für die Weibull-Verteilung, auf welcher der Quest Algorithmus beruht, folgende Werte ermittelte $\Psi(p = 0.75, \beta = 3, \delta = 0, 15, \gamma = 0, 5)$. Dabei ist p der Schwellwert für die Wahrnehmungsschwelle, β der Formparameter der Funktion, δ die Falsch-negativ-Rate und γ die Ratewahrscheinlichkeit. Es wird initial eine Normalverteilung mit $\varphi = 15^\circ \pm 15^\circ$ angenommen. Die maximale Drehung φ der stark reflektierenden Wand wird im Versuch bis lediglich 30° zugelassen, da darüber hinaus der Raum zu stark deformiert wird.

Die Referenz bei diesem Versuch ist immer der Ausgangszustand mit rechtwinkligen Wänden. Im folgenden wird die stark reflektierende Wand um den Winkel φ so gedreht, dass trotzdem der Abstand zwischen Quelle und Spiegelschallquelle gleich bleibt. Der Direkt-schall fällt immer im Winkel von 60° zum Probanden ein. Zwar ist die Lokalisationfähigkeit im frontalen Bereich präziser, jedoch wird hier das Risiko einer Vorne-Hintenvertauschung durch die Verwendung der Kunstkopf HRTF des Instituts für Technische Akustik, RWTH Aachen, gemindert. Das Raumvolumen ändert sich dadurch, weshalb nicht beliebige Winkel φ angenommen werden können. Insgesamt haben 30 Probanden im Alter von 27 ± 9 Jahren teilgenommen, welche keinerlei Vorkenntnisse bzgl. Binauraltechnik besaßen. 57% von ihnen waren weiblich. Der Versuch wurde in der Hörkabine im

Institut für Technische Akustik der RWTH Aachen mit einem Sennheiser HD 650 Kopfhörer durchgeführt. Als Stimuli wurde ein 100 ms langes zweimalig gepulstes rosa Rauschen verwendet. Dieses wurde auf Grund der unterschiedlichen Entfernungen zwischen Hörer und Quelle normiert.

Ergebnisse

Im folgenden werden die Konfigurationen nach $\Delta\alpha$, L , und τ aufgeteilt. Da die Ergebnisse für die Wahrnehmungsschwellen der Wanddrehung häufig probandenabhängig stark schwanken, wird außerdem die relative Wahrnehmungsschwelle $\Delta\varphi_{Prob,Konfig} = \varphi_{Prob,Konfig} - \overline{\varphi_{Prob}}$ der Probanden diskutiert.

Winkelabhängige Resultate

Bei der Betrachtung der winkelabhängigen Wahrnehmungsschwelle, schwankt der Median zwischen 9 und 13° . Der interquartile Abstand ist hier sehr groß. Durch die

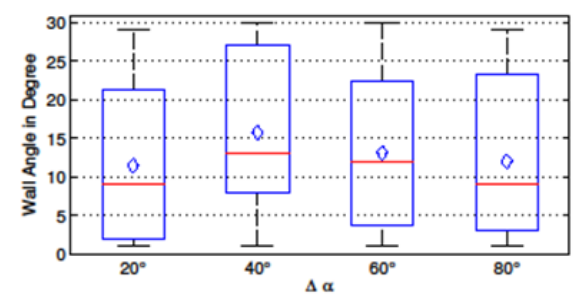


Abbildung 3: Die Wahrnehmungsschwellen für unterschiedliche Winkel zwischen Quelle und Spiegelschallquelle. Die Pegeldifferenz beträgt 9 dB und die Laufzeitdifferenz 30 ms.

relative Darstellung in Abbildung 4 wird zwar der interquartile Abstand verringert, jedoch ist kein Winkel darbietung gegenüber einer anderen signifikant differenzierbar. Lediglich eine Erhöhung für 40° ist zu beobachten.

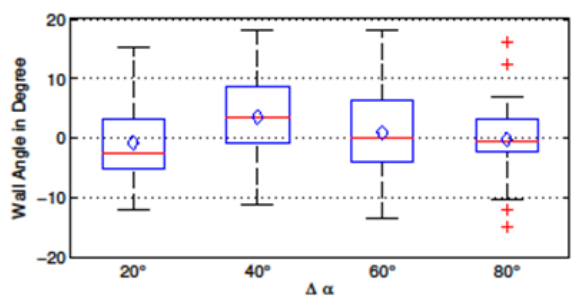


Abbildung 4: Die relative Darstellung $\Delta\varphi_{Prob,\Delta\alpha} = \varphi_{Prob,\Delta\alpha} - \overline{\varphi_{Prob}}$ für unterschiedliche Winkel $\Delta\alpha$ für die Wanddrehung φ .

Pegeldifferenz Resultate

Bei der Betrachtung der Wanddrehung φ für unterschiedliche Leveldifferenzen ΔL fällt auf, dass hier die

Wahrnehmungsschwelle der Probanden bei 6 dB besonders niedrig ist. 9 dB und 12 dB weisen ähnliche Wahrnehmungsschwellen auf. Auch die relative Betrachtung

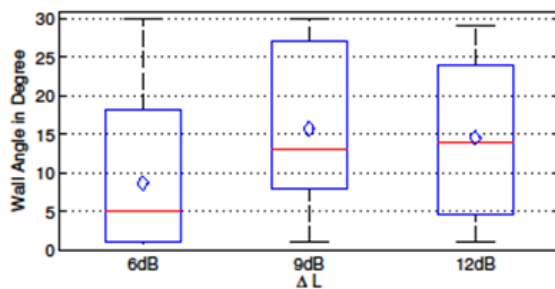


Abbildung 5: Die Wahrnehmungsschwellen für unterschiedliche Winkel zwischen Quelle und Spiegelschallquelle. Der Winkel beträgt 40° und die Laufzeitdifferenz 30 ms.

zeigt, dass $\Delta L = 6$ dB sich signifikant zu den anderen beiden Konfigurationen unterscheidet.

Laufzeitdifferenz Resultate

Ein ähnliches Bild wie bei der Pegeldifferenz zeigt sich bei der Laufzeitdifferenz. Hier wird der geringste Median für 15 ms angenommen (siehe Abbildung 6). Diese Tendenz

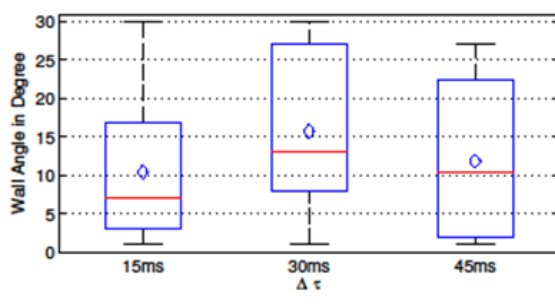


Abbildung 6: Die Wahrnehmungsschwellen für unterschiedlichen Laufzeitdifferenzen zwischen Quelle und Spiegelschallquelle. Die Pegeldifferenz beträgt 9 dB und der Winkel 40° .

spiegelt sich ebenfalls in der relativen Betrachtung wieder. Dort ist 15 ms gegenüber den anderen beiden Laufzeitdifferenzen signifikant differenzierbar.

Diskussion

Es lässt sich beobachten, dass zwar die absoluten Schwellwerte φ der Konfigurationen Tendenzen zeigen, diese aber auf Grund der großen Streuung der Ergebnisse nicht signifikant sind. Die Schwellwerte φ liegen hier für ΔL und τ zwischen 5 und 7° . Bei allen anderen Konfigurationen liegen die Werte zwischen 9 und 14° deutlich höher. Werden die Ergebnisse probandenbezogen betrachtet, so sind die ersten beiden Konfigurationen signifikant differenzierbar. Die Schwellwerte des Winkels $\Delta\alpha$ sind weitestgehend unabhängig von dem Winkel. Bei der näheren Betrachtung der Konfiguration $[40^\circ 9$ dB 30 ms] ist ihr Schwellwert im Vergleich mit den anderen Konfigurationen wesentlich höher. Speziell

bei ΔL und τ wäre zu erwarten, dass der Schwellwert zwischen denen von 6 und 12 dB sowie 30 und 45 ms liegen [3]. Deshalb sollen im Folgenden die Ergebnisse vertiefend diskutiert werden. Wird Abbildung 2 betrachtet, so fällt auf, dass speziell für die Konfiguration $[40^\circ 9$ dB 30 ms] der Hörer fast am weitesten vom Zentrum entfernt ist. Dies kann eine mögliche Erklärung sein. Eine weitere Überlegung ergibt sich durch die Formel 1, welche die Direktschall- D zur Nachhallenergie angibt [4].

$$\frac{D}{R} = 10 \log_{10} \left(\frac{0,161 \cdot Q \cdot V}{16\pi \cdot r_{LS} \cdot T_{60}} \right) \quad (1)$$

Sie wird als Maß angeführt, um die Lokalisationsfähigkeit in Räumen zu messen und ist abhängig von der Richtcharakteristik Q , die hier auf Grund der Punktschallquelle 1 ist, dem Volumen V , dem Nachhall T_{60} und dem Abstand zwischen Hörer und Quelle r_{LS} . Deshalb werden im Folgenden die Korrelation des Volumens V , des Abstands r_{LS} und der Nachhallzeit T_{60} mit den Schwellwerten φ betrachtet. Bereits in Abbildung 2 ist zu erkennen, dass je nach Hörer- und Quellposition die Wand um unterschiedliche Punkte gedreht wird und somit das Raumvolumen für die gleiche Drehung φ für die unterschiedlichen Positionen variieren kann. Die Korrelation zwischen $\Delta V = V(\varphi = 0^\circ) - V(\varphi = 30^\circ)$ und dem Schwellwert φ beträgt $\rho_V = 0.7$. Zu einem gleichen Ergebnis führt die Korrelation zwischen r_{LS} und dem Schwellwert φ . Allerdings sind die Nachhallzeit $\Delta T_{60} = T_{60}(\varphi = 0^\circ) - T_{60}(\varphi = 30^\circ)$ und der Schwellwert φ Schwellwert unkorreliert. Womit nur zwei der drei Parameter aus Gleichung 1 einen nachweisbaren Einfluss besitzen. Allerdings sind die Schwankungen der Nachhallzeit im gewählten Raum auch sehr gering. So ergeben sich Nachhallzeiten bei 1 kHz zwischen 360 und 470 ms.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei der Vereinfachung von Geometriemodellen zur Auralisierung Winkeländerungen von größer als 10° vermieden werden sollten. Bei besonders kleinen Pegel- und Laufzeitdifferenzen sollten es lediglich 5° sein. Allerdings handelt es sich beim vorliegenden Versuch um einen A-B Vergleich, der immer wesentlich sensibler gegenüber Änderungen ist als eine Plausibilitätsfrage. Viele der Probanden berichteten zudem, dass sie den Hörversuch sehr schwierig empfanden.

Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass der Quest-Algorithmus sich für das Versuchsdesign als sehr ökonomisch erweist. Sollten jedoch andere Signale, wie Sprache oder Musik, untersucht werden, so stößt das Versuchsdesign an seine Grenzen. Hier sind Schwellwerte oberhalb von $\varphi = 30^\circ$ zu erwarten [3], wodurch unter Umständen die Positionierung von Quelle oder Hörer nicht mehr möglich ist, da der Raum stark deformiert wird.

Vielmehr legen die Ergebnisse aus der Korrelation zwischen der Volumenänderung und der Wahrnehmungsschwelle eine Untersuchung speziell der Wandverschiebung und dadurch erzeugten Volumenänderung nahe.

Literatur

- [1] King-Smith, P. Ewen; Grigsby, Scott S.; Vingrys, Algis J.; Benes, Susan C.; Supowit, Aaron (1994): Efficient and unbiased modifications of the QUEST threshold method: theory, simulations, experimental evaluation and practical implementation. In: Vision research 34 (7), S. 885-912.
- [2] Treutwein, Bernhard (1995): Adaptive psychophysical procedures. In: Vision research 35 (17), S. 2503-2522.
- [3] Blauert, J. (1974) Räumliches Hören: Hirzel, ISBN 3-7776-0250-7.
- [4] Hartmann, William M. (1983): Localization of sound in rooms. In: The Journal of the Acoustical Society of America 74 (5), S. 1380-1391.
- [5] Hartmann, William Morris (1997): Listening in a room and the precedence effect. In: Binaural and spatial hearing in real and virtual environments, S. 191-210.
- [6] Shinn-Cunningham, B. G. (2001): Localizing sound in rooms. In: ACM/SIGGRAPH and Eurographics Campfire: Acoustic Rendering for Virtual Environments, S. 1-6.
- [7] Shinn-Cunningham, Barbara G.; Kopco, Norbert; Martin, Tara J. (2005): Localizing nearby sound sources in a classroom: Binaural room impulse responses. In: The Journal of the Acoustical Society of America 117 (5), S. 3100-3115.