

Lautsprecher-Beamforming unter Berücksichtigung von Raumreflexionen

Georg Fischer, Johannes Nowak, Andreas Männchen und Daniel Beer

Fraunhofer-Institut für digitale Medientechnologie IDMT, 98693 Ilmenau, Deutschland

Email: georg.fischer@idmt.fraunhofer.de

Einleitung

Die Möglichkeit personalisierte, räumlich getrennte Audiowiedergabe zu realisieren – sogenannte Personal Sound Zones (PSZ) – ist im Fokus aktueller Forschung. Eine Möglichkeit, einen scharf abgegrenzten Bereich zu beschallen, ist das Bündeln der Abstrahlung der einzelnen Lautsprecher (LS) im Array-Verbund durch Beamforming (BF). Beim BF werden die einzelnen Wandler gezielt gefiltert, um die Abstrahlung in ihrer Breite sowie Richtung zu beeinflussen. Durch die Überlagerung verschiedener Filter können auch mehrere Hauptkeulen, sogenannte Beams, erzeugt werden und damit auch mehrere PSZs.

Während die Trennung zwischen zwei Zonen in reflexionsfreier Umgebung bei > 18 dB liegt (vg. Abbildung 3), können in typischen Anwendungsszenarien, bspw. im Auto, keine sogenannten Freifeldbedingungen angenommen werden.

In Abbildung 1 ist die Schallabstrahlung eines Lautsprecher-Arrays in eine reflektierende Umgebung skizziert. In der jeweiligen Hörzone trifft nicht nur der Direkt-, sondern auch Reflexionsschall ein, wodurch Schall der Zone 1 ungewollt in Zone 2 – und umgekehrt – gelangt. Die Kanaltrennung wird entsprechend reduziert.

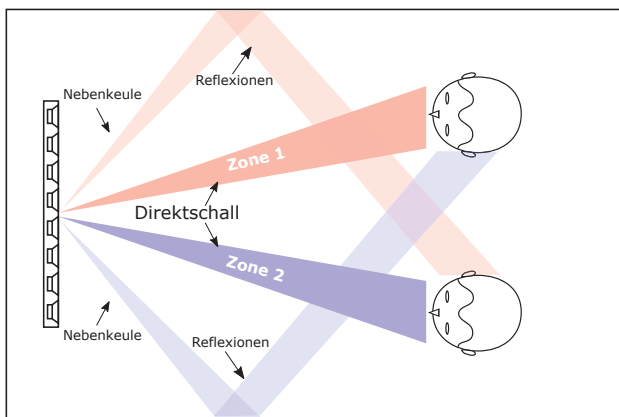


Abbildung 1: Diese Abbildung zeigt schematisch das Zerstören der Kanaltrennung zwischen zwei Hörzonen durch auftretende Reflexionen. Die Farben entsprechen jeweils dem Audio-Content einer Hörzone.

Francombe et. al. [1] konnten zeigen, dass eine Kanaltrennung von 30 dB oder mehr (je nach Signal) nötig ist, um den jeweiligen Audio-Inhalt ungestört folgen zu können.

Gegenstand der hier vorgestellten Untersuchungen ist es, zu klären, ob durch Einbeziehen von Reflexionen in den Filter-Erstellungsprozess des BF eine Verbesse-

rungen hinsichtlich der Kanaltrennung erzielt werden kann. Um diesen Ansatz zu evaluieren, werden in diesem Artikel Untersuchungen beschrieben, die auf Schallfeldsimulationen beruhen.

Beamforming

Beamforming beschreibt die Generierung von LS-Filtern, um die Richtwirkung eines LS-Arrays zu beeinflussen. Die einfachste Methode ist das sogenannte Delay-and-Sum-BF [2]. Dabei wird die Abstrahlrichtung durch gezielte Verzögerungen der einzelnen Array-Elemente beeinflusst. Durch Aufsummieren der Abstrahlungsfunktionen aller Kanäle resultiert das Abstrahlverhalten des gesamten LS-Arrays. Zusätzlich zu den Delays können Amplitudengewichtungen der Array-Elemente erfolgen. Damit lassen sich insbesondere Nebenkeulen unterdrücken und die Breite der Hauptkeule beeinflussen. Um die Abstrahlbreite über einen großen Frequenzbereich konstant zu halten, werden die Delays und Amplituden im Frequenzbereich berechnet. Die so durchgeführte frequenzabhängige Verzögerung der einzelnen Array-Elemente kann man als virtuelle Krümmung des Arrays interpretieren [3]. Durch eine inverse Diskrete Fourier Transformation (iDFT) ergeben sich dann die entsprechenden FIR-Filter (engl. Finite Impulse Response).

Neben der manuellen Berechnung der Filterkoeffizienten, ist es möglich, den Filterentwurf über eine Optimierungsberechnung durchzuführen. Im Folgenden wird die hierfür nötige Vorgehensweise erläutert.

Für ein Array mit N Wandlern ergibt sich der Schalldruck an einem Punkt s durch die Superposition aller Einzelschallquellen. Werden die Lautsprecher in dem Array als Monopole angenähert, ergibt sich die Abstrahlungsfunktion $G_s^{(n)}$ eines Lautsprechers zu einem Punkt s als [4]:

$$G_s^{(n)} = \frac{e^{-jkr_s^{(n)}}}{4\pi r_s^{(n)}} \quad (1)$$

Hier ist r die Entfernung zwischen den Punkten n und s . Die Wellenzahl k beschreibt die Richtung und ist definiert als $k = 2\pi/\lambda$.

Mit zusätzlichen komplexen Filtergewichten $w(\omega)$, mit ω als Kreisfrequenz, lässt sich schreiben:

$$p_s = \sum_{n=0}^{N-1} G_s^{(n)} w^{(n)} = \mathbf{G}_s \cdot \mathbf{w}^H \quad (2)$$

Aufgrund der besseren Übersichtlichkeit soll bei dieser und folgenden Formeln auf das Notieren der Frequenzabhängigkeit verzichtet werden.

Nach Festlegen von Bereichen, die beschallt bzw. nicht beschallt werden sollen, kann mit Formel (2) eine Optimierungsaufgabe formuliert werden. Ziel ist es, die optimalen Filtergewichte \mathbf{w} zu finden. Eine mögliche Formulierung des Optimierungsproblems ergibt sich zu:

$$\min_{\mathbf{w}} \|\mathbf{G}_{\text{Stille}} \cdot \mathbf{w} - p_{\text{Stille}}\|_2$$

so, dass $\mathbf{G}_{\text{Laut}} \cdot \mathbf{w} = p_{\text{Laut}}$ (3)

Hier ist p_{Stille} der Zielschalldruck in der Quiet Zone und p_{Laut} der Zielschalldruck in Beamrichtung (Loud Zone). Die Operatoren $\|\dots\|_2$ bezeichnen die euklidische Norm. Es ist anzumerken, dass dieses Optimierungsproblem für mehrere Frequenzstützstellen berechnet werden muss. Durch eine iDFT der Filtergewichte ergeben sich die BF-Filter.

Raumsimulation

Um die nötigen Raumsimulationen durchzuführen, kam die McRoomSim Toolbox für MATLAB zur Anwendung [5]. Diese Simulationsumgebung erlaubt die Simulation einfacher, quaderförmiger Räume. Schallquellen und Schallempfänger sind frei platzierbar und in ihrer Abstrahlcharakteristik frei definierbar. Die Wände des Raumes lassen sich durch das Anpassen von (frequenzabhängigen) Absorptions- und Streukoeffizienten in ihrer akustischen Beschaffenheit variieren. Zusätzlich können Direktschall, frühe und diffuse Reflexionen in den Simulationen berücksichtigt werden.

Frühe Reflexionen werden über das Spiegelquellenmodell berechnet, diffuse Reflexionen über einen Ray-Tracing-Algorithmus (Diffuse Rain Algorithm). Für detailliertere Informationen wird auf das zugehörige Paper verwiesen [5].

Eigener Ansatz

Im hier vorgestellten BF-Ansatz werden die Reflexionen der Umgebung im Filter-Design berücksichtigt. Dafür wird die Optimierungsrechnung aus Formel (3) entsprechend modifiziert. In der Zielfunktion werden nun die Raumübertragungsfunktionen genutzt, die durch die Anregung des jeweiligen Lautsprechers entstehen. Die modifizierte Variante des BF-Filter-Designs sieht demnach wie folgt aus:

$$\min_{\mathbf{w}} \|\mathbf{H}_{\text{Stille}} \cdot \mathbf{w} - p_{\text{Stille}}\|_2$$

so, dass $\mathbf{G}_{\text{Laut}} \cdot \mathbf{w} = p_{\text{Laut}}$ (4)

Hier ist nun $\mathbf{H}_{\text{Stille}}$ die Übertragungsfunktionsmatrix für die Quiet Zone. Diese enthält die Raumübertragungsfunktionen der jeweiligen LS im Array an den jeweiligen virtuellen Messpunkten.

Simulationen

Die Untersuchungen basierten auf Simulationen. Auf Messungen wurde an diesem Punkt verzichtet, da komplette Balloon- oder zumindest Polarmessungen in verschiedenen Räumen nötig gewesen wären, was den Aufwand deutlich vergrößert hätte.

Die Simulationen teilen sich in zwei Teile auf. Im ersten Teil wurde die Abstrahlcharakteristik eines BF-Arrays mit acht gleichmäßig verteilten Wandlern und einer Abstrahlrichtung von 45° simuliert. Das Array hatte eine Gesamtlänge von $l = 0.34$ m. Die BF-Filter wurden nach Formel (3) berechnet. Die Abstrahlcharakteristik lag als Sammlung von Impulsantworten (IR, engl. *impulse response*) für ein Kugelgitter mit einer Auflösung von 5° in Elevation und Azimuth vor. Die LS wurden als Monopole angenommen und die IRs nach Formel (1) berechnet. Die Auswertung fand für zwei Positionen statt. Zum einen in 45° , also in Beamrichtung und zum anderen in -45° , also der entgegengesetzten Richtung, jeweils in 1 m Abstand zum Array. Eine Übersicht über die weiteren Parameter ist in Tabelle 1 aufgeführt. In Abbildung 2 ist der Simulationsaufbau grafisch dargestellt.

Tabelle 1: Simulationsparameter der durchgeführten Untersuchungen

Parameter	Wert
Raumgröße [x, y, z]	[5.0, 4.0, 4.0] m
Arrayposition [x, y, z]	[1.7, 1.0, 1.3] m
Absorptionskoeffizienten	0.5
Streukoeffizienten	0.5

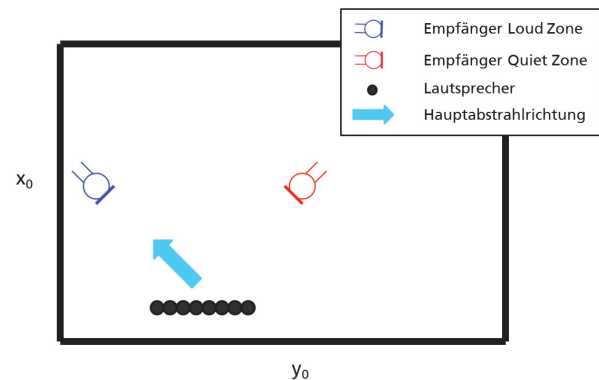


Abbildung 2: Skizze des Simulationsaufbaus mit den reflektierenden Raumwänden x_0 und y_0 .

Die Reflexionseigenschaften der Wände wurde in vier Stufen iterativ variiert: in der ersten Stufe wurde der Einfluss der Wände komplett unterdrückt; es herrschten Freifeldbedingungen. In der zweiten Stufe wurde eine Wand x_0 während in der dritten Stufe die Wand y_0 mit in die Simulation einbezogen wurde. In der vierten Stufe wurden alle vier Wände simuliert. Nur in der letzten Stufe fand eine Simulation mit diffusen Reflexionen statt. Decken- und Bodenreflexionen wurden in den Simulationen vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass diese durch Anwenden eines horizontalen Linien-Arrays nicht beeinflusst werden können.

Im zweiten Teil wurden die BF-Filter nach Formel (4) berechnet. Die dafür nötigen Übertragungsfunktionen $\mathbf{H}_{\text{Stille}}$ wurden im Vorfeld simuliert. Für jede Raumgeometrie wurde eine Übertragungsfunktion erstellt und anschließend die entsprechenden Filter berechnet.

Ergebnisse

Zur Bewertung der Kanaltrennung wurde die Pegeldifferenz zwischen den Empfängerpositionen aus Abbildung 2 herangezogen. Unter Freifeldbedingungen erreicht der Beamformer eine Kanaltrennung von mehr als 18 dB im Frequenzbereich von 500–8000 Hz (vgl. Abbildung 3).

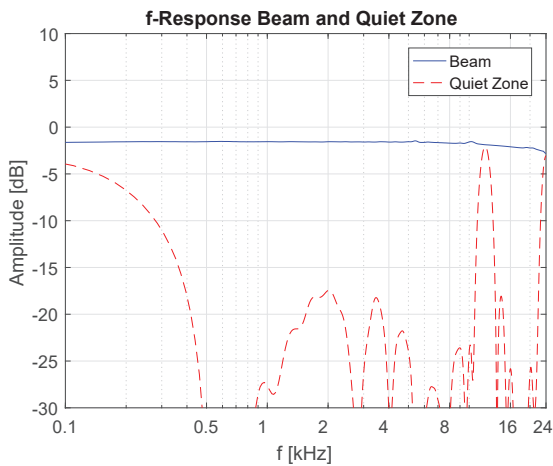


Abbildung 3: Simulierter Frequenzgang von Loud und Quiet Zone eines BF-Arrays unter Freifeldbedingungen.

Für die Konfiguration mit vier Wänden und diffusen Reflexionen sind die Frequenzgänge der Loud Zone und der Quiet Zone dargestellt – in Abbildung 4 mit reinem BF und in Abbildung 5 mit modifiziertem BF, der die Raumreflexionen in die Filtergenerierung miteinbezieht. Obwohl sich in Voruntersuchungen eine Optimierung der Kanaltrennung in bestimmten Frequenzbändern zeigte, konnte dieser Effekt in den Simulationen nicht mehr nachgewiesen werden. Vergleicht man die Pegel in den beiden Abbildungen, so zeigt sich sogar eine Verschlechterung der Kanaltrennung von ca. 5 dB, vor allem im Frequenzbereich von 500 Hz bis 2500 Hz. Für dieses Verhalten konnte bis zur Fertigstellung des Artikels keine zufriedenstellende Erklärung gefunden werden. Es konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass bei zunehmender Komplexität der Raumgeometrie die Kanaltrennung schlechter wird. Dies geschieht unabhängig vom verwendeten BF-Verfahren. Mit zusätzlichen diffusen Reflexionen verringert sich die Kanaltrennung weiter.

Fazit

In dieser Arbeit wurde ein BF-Algorithmus untersucht, der bei der Filtererstellung Raumreflexionen berücksichtigt. Ziel war es dadurch eine höhere Kanaltrennung in reflektierenden Umgebungen zu erreichen. Die Überprüfung der These fand anhand raumakustischer Simulationen statt.

Obwohl dieser Ansatz in Voruntersuchungen vielversprechende Ergebnisse lieferte, konnte keine Verbesserung der Kanaltrennung erreicht werden. Die Kanaltrennung hat sich in allen untersuchten Fällen verschlechtert. Auf Basis der präsentierten Ergebnisse kann jedoch abschließend zusammengefasst werden, dass die

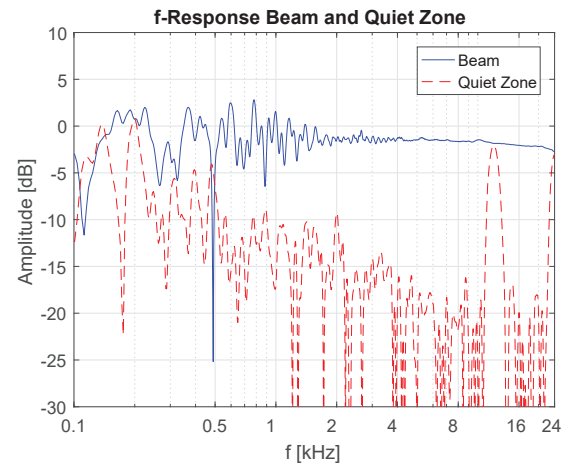


Abbildung 4: Frequenzgang von Loud und Quiet Zone für die Verwendung des klassischen Beamformers.

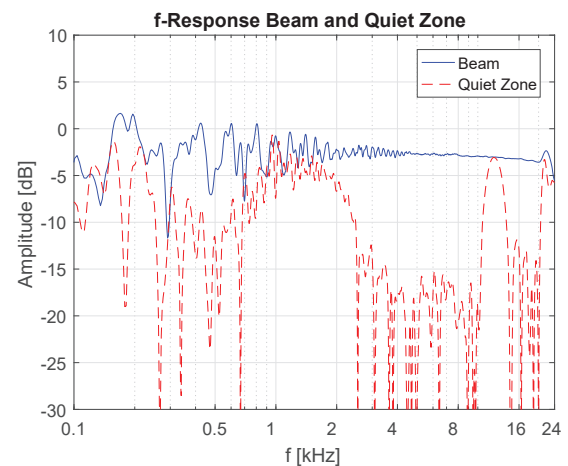


Abbildung 5: Frequenzgang von Loud (blau) und Quiet Zone (rot) für die Verwendung des modifizierten Beamformers.

Berücksichtigung von Raumreflexionen essentiell für effektives LS-Beamforming ist – insbesondere bei der Realisierung von PSZs.

In zukünftigen Untersuchungen soll dieses Verhalten näher analysiert und ggf. entsprechende Fehler in der Simulation beseitigt werden. Darüber hinaus sollen auch weitere, komplexere Szenarien und Parameter in die Betrachtungen miteinbezogen werden, wie z.B. komplexere Raum- und Arraygeometrien oder auch erweiterte Verfahren zur Filtergenerierung.

Literatur

- [1] Francombe, J.; Mason, R.; Dewhirst, M.; Bech, S.: Determining the threshold of acceptability for an interfering audio programme. Audio Engineering Society Convention 132 (2012)
- [2] Van Veen, Barry D.; Buckley, Kevin M.: Beamforming: A versatile approach to spatial Filtering. IEEE assp magazine 5 (1988), Nr. 2, S. 4–24

- [3] Keele jr., D.B.: Implementation of Straight-Line and Flat-Panel Constant Beamwidth Transducer (CBT) Loudspeaker Arrays Using Signal Delays. Audio Engineering Society Convention 113 (2002)
- [4] Ziomek, L.J.: Fundamentals of acoustic field theory and space time signal processing. CRC Press, 1995
- [5] Wabnitz, A.; Epain, N.; Jin, C.; van Schaik, A.: Room acoustics simulation for multichannel microphone arrays. Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics Melbourne, Australia, August 2010