

Optimierung einer omnidirektionalen Quelle

Alexander Przibilla¹, Andreas Haeussler¹, Steven van de Par¹

¹ Akustik, Hearing4all, Uni Oldenburg

Einleitung

Für viele Zwecke in der Bau-/Raumakustik sind omnidirektionale Messquellen wünschenswert z.B. für die korrekte Bestimmung von raumakustischen Parametern. Allerdings finden omnidirektionale Schallquellen auch in der virtuellen Akustik Anwendung, z.B. als Referenzquelle, wo es nützlich ist, ein flaches Spektrum unabhängig des Winkels zu haben. Spektrale Färbung des Direkt- und Nachhallfeldes, können dabei z.B. die spezifischen Merkmale der kopfbezogenen Übertragungsfunktionen beeinflussen.

Aus Kruse et al. [1] ist eine omnidirektionale Schallquelle, basierend auf dem Prinzip eines Ringradiators, hervorgegangen. Die Quelle besteht aus zwei sich gegenüberliegenden Gehäusehälften (Abb. 1) in denen jeweils ein Lautsprecher eingepasst ist. Der Schalldruck welcher von den beiden Lautsprechern abgestrahlt wird, kann nur durch die Öffnung zwischen den Gehäusen entweichen.

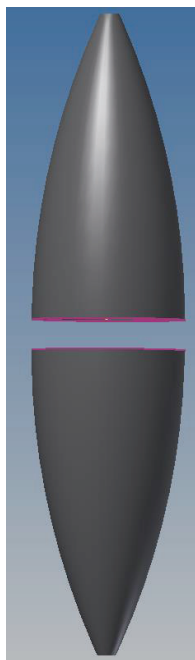


Abb. 1: Gehäusehälften der Omnidirektionalen Schallquelle nach Kruse et al.. Die Lautsprecher (an den rosa Flächen) strahlen sich gleichphasig an. Schall entweicht durch Öffnung zwischen den Gehäusehälften

Messungen über den Azimuthalwinkel bzw. über den Elevationswinkel zeigen, dass Abweichungen von maximal ± 6 dB bis 10 kHz entstehen [1].

Gegeben durch die Bauform treten allerdings Resonanzen auf, welche im Frequenzgang zu erkennen sind. Um diese Resonanzen zu minimieren und den Frequenzgang zu glätten werden mechanische sowie digitale Verbesserungsansätze vorgenommen.

In einem Hörtest werden die verschiedenen Maßnahmen subjektiv evaluiert. Dabei wird untersucht, inwiefern sich der Frequenzgang über acht unterschiedliche Elevationswinkel in der Wahrnehmung unterscheidet.

Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik der Quelle wird über den Azimuthalwinkel und den Elevationswinkel gemessen. Über den Azimuthalwinkel, ergeben sich aufgrund der Symmetrie nur geringe Abweichung von ± 1 dB bis 10 kHz. Die Messung der Richtcharakteristik in Elevationsebene ist in Abb. 2 dargestellt. Dabei ist zu erkennen das sich die Richtcharakteristik für $\pm 40^\circ$ um die Öffnung kaum verändert. Allerdings ergibt sich bei den Polen ($+90^\circ$ und -90°) ein Energiemaximum. Dies führt zu Abweichung von ± 6 dB bis 10 kHz über den Elevationswinkel.

Vergleichsmessungen haben allerdings gezeigt, dass die Richtcharakteristik im Vergleich zu anderen herkömmlichen Quellen eine Verbesserung darstellt [2].

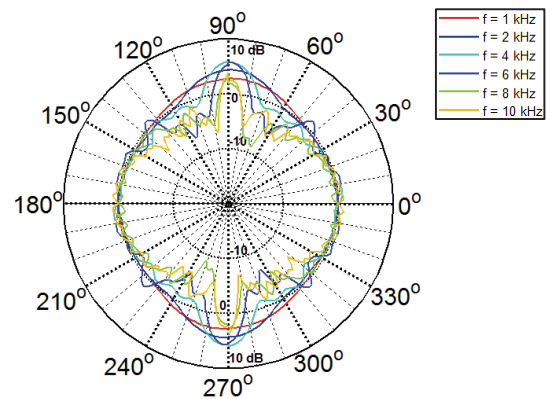


Abb. 2: Messung der Richtcharakteristik über den Elevationswinkel.

Frequenzgang

Die Messungen der Richtcharakteristik haben gezeigt, dass sich der Frequenzgang über den Winkel nur relativ gering verändert. In Abb. 3 ist das Frequenzspektrum für 0° Elevation zu sehen. Der Arbeitsbereich dieser Quelle beginnt bei ca. 150 Hz, es ist eine relativ breite Überhöhung bei 1,7 kHz zu erkennen sowie weitere Resonanzen bei 9,7 kHz und 14 kHz. Im Spektrogramm (Abb. 4) ist auch das zeitliche Verhalten dieser Resonanzen zu sehen.

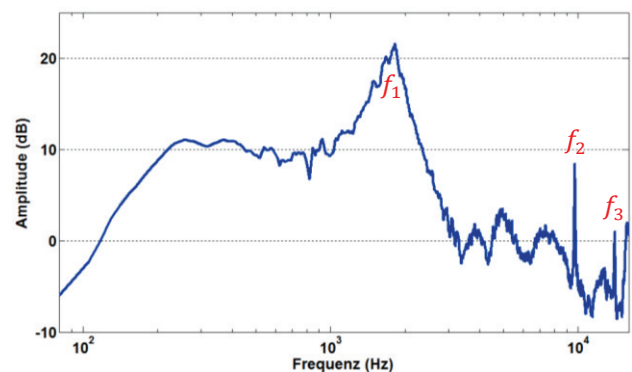


Abb. 3: Frequenzgang der Quelle, aufgenommen im Abstand von 1 m und Elevationswinkel von 0° . An den Stellen $f_1 = 1,7$ kHz, $f_2 = 9,7$ kHz und $f_3 = 14$ kHz treten Resonanzen auf.

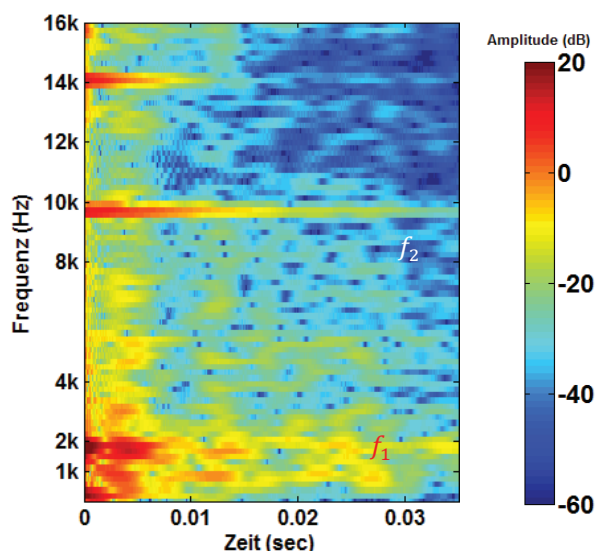


Abb. 4: Spektrogramm der Quelle, unter gleichen Bedingungen wie Abb. 3 aufgenommen. Resonanzen bei den Frequenzen $f_1 = 1,7$ kHz, $f_2 = 9,7$ kHz und $f_3 = 14$ kHz sind auch im Abklingfeld der Quelle deutlich zu sehen.

Die stehende Welle mit der Frequenz f_1 resultiert aus einer Kreisresonanz, welche waagrecht zur Lautsprechermembran in der Öffnung entsteht. Die Resonanzen an bei $f_2 = 9,7$ kHz stammt von senkrechten stehenden Wellen zwischen den Lautsprechern.

Frequenzgang – mechanische Optimierung

Die Resonanzen aus dem vorherigen Kapitel führen zu einer Verminderung der Impulstreue der Quelle. Diese sollen nun durch mechanische Ansätze optimiert werden.

Zur Glättung des Frequenzgangs sind in die Öffnung zwei Einsätze eingebracht: Eine Scheibe aus Dämmmaterial in Kombination mit einer exponentiellen Struktur (Abb. 5).

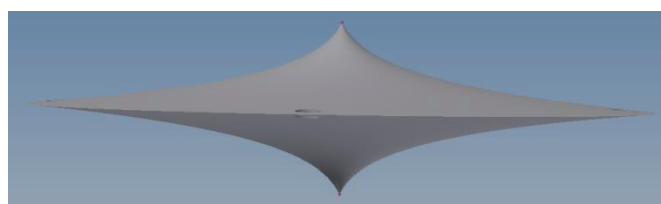


Abb. 5: Modellzeichnung der exponentiellen Struktur. Die Oberfläche wurde nach einer um 90° gekippten Exponentialfunktion erstellt.

Die exponentielle Struktur soll die stehenden Wellen brechen, die sich in der Öffnung zwischen den Lautsprechern ausbreiten. Das Dämmmaterial soll vor allem die Resonanzen im hochfrequenten Bereich unterdrücken.

In Abb. 6 ist der resultierende Frequenzgang dargestellt. Für die Kreisresonanz bei f_1 ist eine Dämpfung von 7 dB zu erkennen, einhergehend mit einer Minimierung des Q-Faktors. Der generelle Verlauf des Frequenzgangs oberhalb von f_1 ist nahezu gleich geblieben, allerdings ist der Peak bei f_2 um 10 dB gedämpft. Im Spektrogramm in Abb. 7 ist sehr gut zu erkennen, dass sich das Nachschwingverhalten im

hochfrequenten Bereich nun deutlich verbessert hat, allerdings ist die Kreisresonanz immer noch zu erkennen.

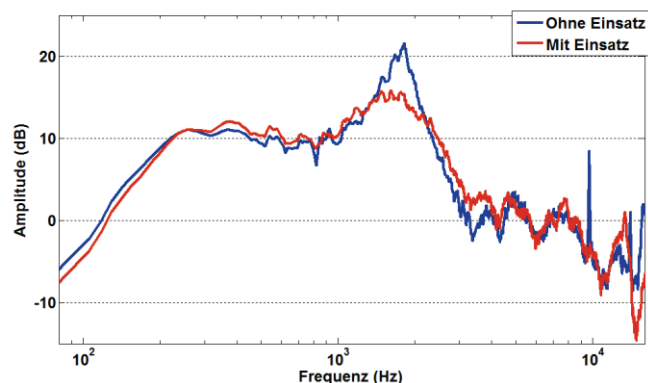


Abb. 6: Vergleich des Frequenzgangs mit mechanischer Optimierung und ohne.

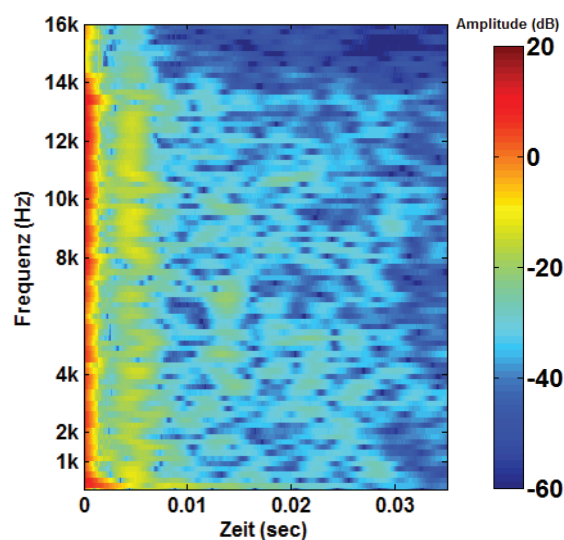


Abb. 7: Spektrogramm mit mechanischer Optimierung

Frequenzgang – digitale Optimierung

Zur digitalen Optimierung werden nun drei verschiedene Filter angewendet. Die Optimierung dieser Filter geschieht über die Impulsantwort bei 0° .

Ein inverser Filter ohne Glättung und über eine zwölfte Oktave geglättet mit einer Samplelänge von 2^{12} bei einer Samplingfrequenz von 48 kHz wird nach Gleichung (1) erstellt.

$$(1) \quad iH = \frac{H^*}{|H|^2 + |B|^2}$$

Zusätzlich wird noch über die Kaskadierung von 4 IIR-Filtern eine dritte Filteroption erstellt.

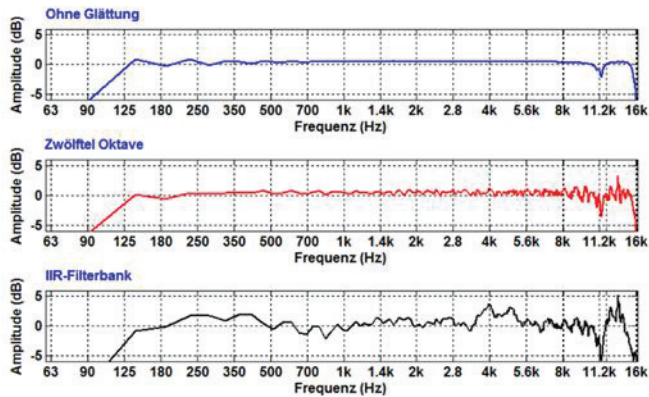


Abb. 7: Impulsantwort für 0° Elevation mit den optimierten Filterfunktionen gefaltet, dann der resultierende Frequenzgang ermittelt.

In Abb. 7 ist der Frequenzgang nach der Filterung zu sehen. Die inversen Filter ohne Glättung, resultiert in einem sehr flachen Frequenzgang. Bei dem geglätteten inversen Filter sind den Erwartungen entsprechend leichte Rippel im Frequenzgang zu sehen, welche sich allerdings im Bereich von +/- 2 dB befinden. Bei der IIR-Filterbank ist allerdings deutlich die Feinstruktur des Frequenzgangs noch erhalten, mit Schwankungen von +/- 5 dB.

Die größten Schwankungen nach der Korrektur durch die Filter treten allerdings erst nach 10 kHz auf.

Perzeptive Evaluation

Durchführung

Die digitalen Optimierungsansätze werden in einem Hörtest auf perzeptiver Ebene evaluiert. Untersucht werden sollten zum einen die erstellten Filter, zum anderen, wie sehr sich der Frequenzgang über die Elevationswinkel in der subjektiven Wahrnehmung verändert.

Dazu wird ein Hörtest, angelehnt an die Standards des MUSHRA Tests nach [3], durchgeführt. Für jeden der drei Filter wird ein Rating mit den gleichen Signalen und Konditionen konstruiert. Die Filter werden nicht im gleichen Run untereinander verglichen. Als Referenzsignale werden ein männlicher Sprecher aus dem OLSA, eine leicht geschlossene Hihat, eine Snare Drum und gepulstes Rosa Rauschen verwendet. Die Signale werden für die unterschiedlichen Konditionen mit Impulsantworten – aufgenommen aus unterschiedlichem Elevationswinkel (0°, 10°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 90°) – gefaltet und die jeweiligen Korrekturfilter angewendet.

Neben diesen Konditionen werden noch ein unteres Ankersignal (3,5 kHz Tiefpassfilter) sowie das unverfälschte, reine Testsignal als oberer Anker dargeboten.

Der Hörversuch wird von sechs erfahrenen Testpersonen durchgeführt. In einer Trainingsoberfläche konnten sich die Probanden alle Signale vor Beginn des Tests anhören. Im Test sollen die Probanden die Signale mit den unterschiedlichen Konditionen mit einem zusätzlich dargebotenen Referenzsignal vergleichen. Die Unterscheidung der Signale soll auf einer kontinuierlichen Skala in die Bereiche „kein Unterschied“ (100), „wenig“ (75), „mittelmäßiger“ (50),

„ziemlicher“ (25), „großer Unterschied“ (0) vorgenommen werden.

Ergebnisse

Die Hörtestergebnisse für die beiden inversen Filter sind in Abb. 8 und Abb. 9 zu finden.

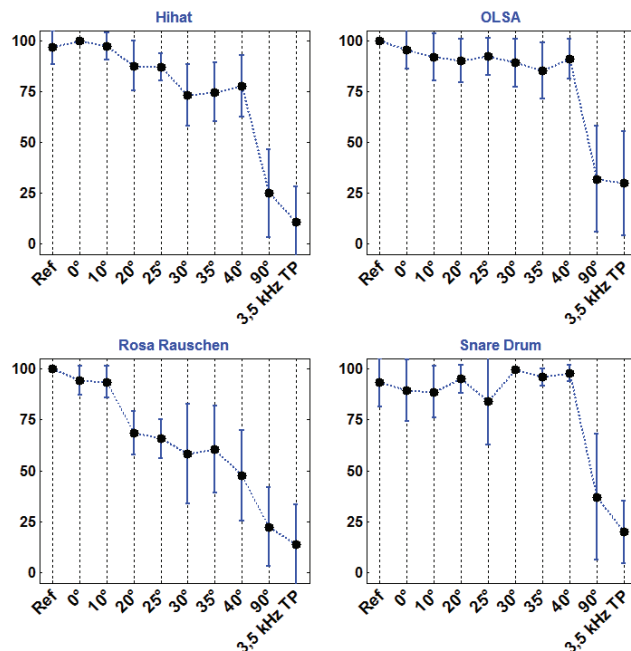


Abb. 8: Mittelwerte der Bewertung der Signale gefaltet mit dem inversen Filter ohne Glättung mit Standardfehler als Fehlerbalken über den Konditionen dargestellt.

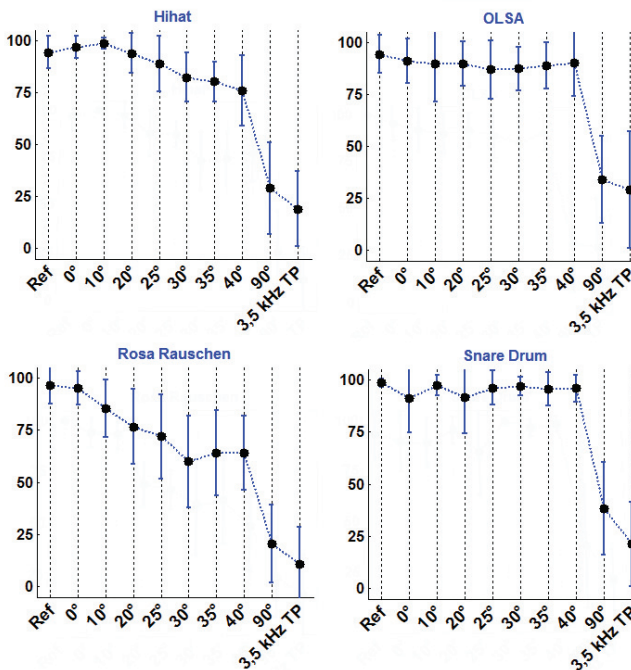


Abb. 9: Mittelwerte der Bewertung der Signale gefaltet mit dem geglätteten inversen Filter mit Standardfehler als Fehlerbalken über den Konditionen dargestellt.

Die Konditionen 0° bis 40° der Hihat und des OLSA-Sprechers für den inversen Filter ohne Glättung sind im Bereich im Bereich zwischen „kein Unterschied“ und „wenig Unterschied“ eingeordnet.

Die Konditionen gefaltet mit dem inversen Filter ohne Glättung und dem Signal der Hihat werden nur für Winkel bis 20° mit „kein Unterschied“ bewertet. Für Winkel von 30° bis 40° liegt die Einordnung bei „wenig Unterschied“.

Die Einordnung der Konditionen für das gepulste Rosa Rauschen unterliegt einer größeren Streuung. Hier werden nur die Konditionen 0° und 10° mit „kein Unterschied bewertet“. Bis 30° gibt es in der Bewertung einen Abwärtstrend. Die Konditionen 30° bis 40° werden mit „wenig“ bis „mittelmäßiger Unterschied“ bewertet.

Die Konditionen 90° und das untere Ankersignal werden bei allen Signalen mit „mittelmäßiger“ bis „ziemlicher Unterschied“ bewertet.

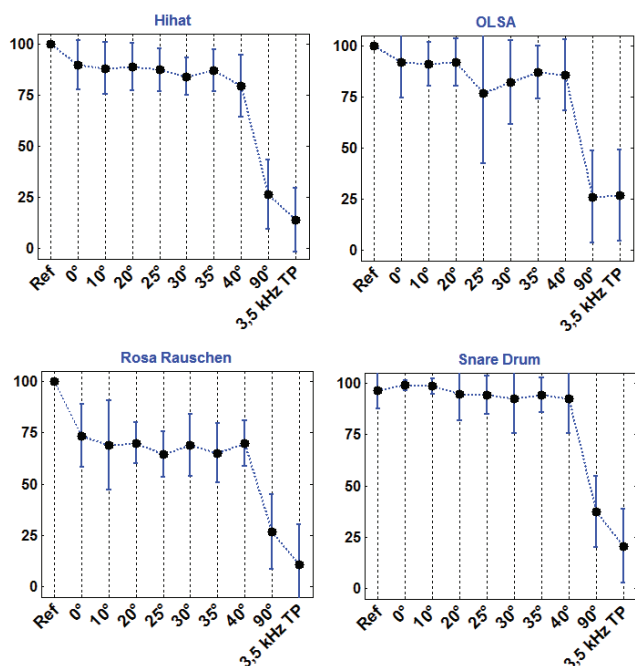


Abb. 10: Mittelwerte der Bewertung der Signale gefaltet mit der IIR-Filterbank mit Standardfehler als Fehlerbalken über den Konditionen dargestellt.

Für die IIR-Filterbank sind die Testergebnisse in Abb. 10 zu sehen. Die Bewertungen der Konditionen 0° bis 40° liegen für das Snare Drum Signal bei „kein Unterschied“. Für die Hihat und das Olsa Signal sehen die Bewertungen dieser Konditionen fast gleich aus. Sie fallen in den Bereich zwischen „kein“ und „wenig Unterschied“, setzen sich aber vom Referenzsignal ab.

Die gleichen Konditionen werden mit dem rosa Rauschen alle in großer Überlappung der Fehlerbalken zwischen „wenig“ und „mittelmäßiger Unterschied“ eingeordnet.

Auswertung

Der Hörtest hat gezeigt, dass die inversen Filter ähnliche Ergebnisse liefern. Für die natürlichen Signale – Hihat, Snare Drum und Sprecher – sind mithilfe der digitalen Optimierung bis zu einem Elevationswinkel von 40° die Unterschiede zwischen den mit der Quelle gefalteten Signalen und den Referenzsignalen gering. Für das Rauschen, welches ein sehr breitbandiges Frequenzspektrum besitzt, werden bis zu einem Winkel von 10° kaum Unterschiede von den Testpersonen gehört.

Die IIR-Filterbank zeigt für alle Signale – sehr deutlich allerdings für das gepulste Rauschen – dass die wahrgenommenen Unterschiede für verschiedene Elevationswinkel zwischen 0° und 40° gleich groß sind. Hier kann vermutet werden kann, dass sich der Höreindruck über die Winkel kaum verändert.

Zu den Ergebnissen des Hörtests muss noch gesagt werden, dass nicht alle Versuchspersonen in allen Experimenten das Referenzsignal erkannt haben. Dieses rührt wahrscheinlich daher, dass durch iteratives Hören eventuell Unterschiede wahrgenommen wurden, die nicht vorhanden waren.

Fazit

Der Frequenzgang der Quelle von Kruse et al. [1] konnte durch mechanische Einsätze auf ± 7 dB für $180 \text{ Hz} \leq f \leq 10 \text{ kHz}$ geglättet, sowie Resonanzen im hochfrequenten Bereich gedämpft werden. Drei verschiedene Korrekturfilter sind des Weiteren objektiv sowie perceptiv Evaluert worden. Im Hörtest zeigte sich, dass die Filter auch für Impulsantworten, die nicht exakt aus einem Elevationswinkel von 0° aufgenommen sind gute Ergebnisse liefern. Zum einen zeigt es, dass bei Raummessungen nicht unbedingt das Mikrofon exakt auf die Öffnung der Quelle zu richten ist zum anderen, dass die Färbung des Nachhallfeldes sich hauptsächlich durch die Änderung des Frequenzganges zu den Polen hin ergibt.

Literatur

- [1] Kruse, R., Haeussler, A., v. d. Par, S. 2012 “A new omnidirectional source based on a ring radiator”, DAGA Darmstadt.
- [2] Kruse, R., Haeussler, A., van de Par, S. (2013) "An omnidirectional loudspeaker based on a ring-radiator." Applied Acoustics 74.12: 1374-1377.
- [3] Mason, A. J. (2002). The MUSHRA audio subjective test method. BBC R&D White Paper WHP, 38.