Ein neuer Prototyp für Schallprojektion

A New Prototype for Sound Projection

Ben-Daniel Keller und Franz Zotter

Kurzfassung

Der Schallprojektor ist ein Lautsprecherarray, das auf einem Kugelsektor stark bündelnd abstrahlt. In Anlehnung an die Videoprojektion -- nur in diesem Fall akustisch -- soll die getroffene Stelle wahrnehmbarer Ausgangspunkt einer Kugelwelle sein. Dazu muss die Wandreflexion möglichst diffus sein.

Kugelarrays sind zwar schon bekannt und funktionieren in diesem Sinne, sind aber für die Schallbündelung auf einem eingeschränkten Winkel verschwenderisch:
Für eine geführte Schallausbreitung wird der Kugelsektor von radialen, schallharten Flächen flankiert. Durch diese Schallführung lässt sich die Bündelung im Vergleich zum Kugelarray bei gleichbleibender Lautsprecheranzahl wirkungsvoll steigern.

Der Schallprojektor soll als neues 2D-Klangverräumlichungsinstrument eingesetzt werden.

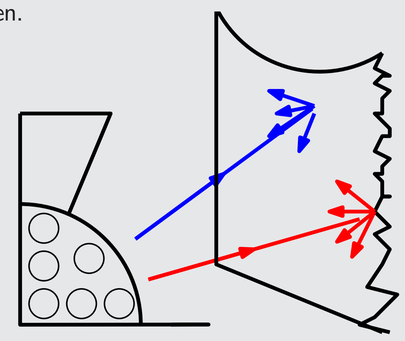

Abbildung 1: Wirkungsprinzip des Schallprojektors: hochgebündelte Schallstrahlen werden auf eine möglichst diffus reflektierende Wand gerichtet und sind dort idealerweise Ausgangspunkt einer neuen Kugelwelle

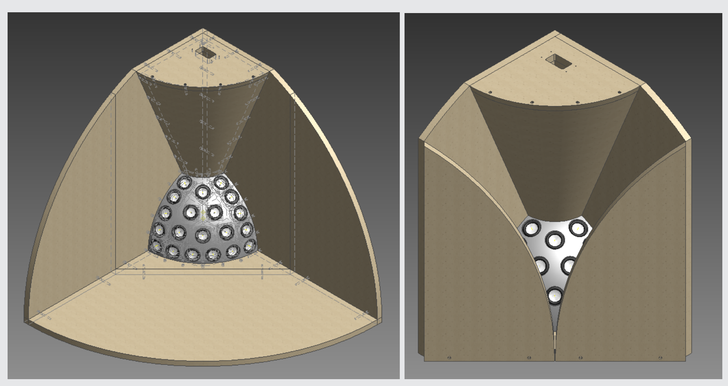

Abbildung 2: CAD Modell des Schallprojektors, (links) aufgebauter Zustand, (rechts) eingeklappter Zustand für Transport und Lagerung.

Kugelsektorharmonische

Das erreichbare Bündelungsmuster (beam pattern) setzt sich aus speziell für diesen Kugelausschnitt hergeleiteten Harmonischen zusammen. Zur Bündelungssteuerung (beamforming) werden die Harmonischen geeignet kombiniert.

Zuvor müssen die Kugelsektorharmonischen $Y_n^m(\varphi,\vartheta)$ für die flankierende Schallführung des Schallprojektors berechnet werden.

$$Y_n^m(\varphi,\vartheta) = \Theta_{\nu_{nm}}^{\mu_m}(\vartheta)\,\Phi_{\mu_m}(\varphi) \qquad \text{Kugelsektorharmonische}$$

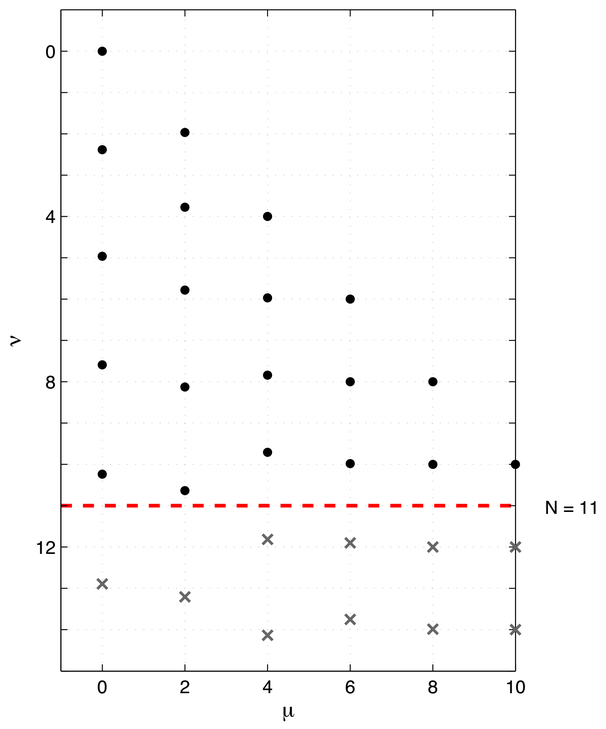

Abbildung 3: Werte für die Ordnung ν und den Grad μ, die sich aus den Randbedingungen ergeben. Bis zur Ordnung N =11 ergeben sich 20 Lösungen

Damit die Lösung gilt, muss die Schallschnelle normal zur Schallführung jeweils zwei Stellen des Azimut- und Zenitwinkels null werden. Die Schallschnelle ist proportional zu den Winkelableitungen. Damit definieren wir die Teillösungen:

$$\Phi_{\mu_m}(\varphi) = N_{\mu_m}\,\cos(\mu_m\,\varphi) \qquad \text{Lösung für Azimut}$$

$$\left.\frac{\mathrm{d}\Phi_\mu(\varphi)}{\mathrm{d}\varphi}\right|_{\varphi_{1,2}} = 0 \qquad \text{Neumann-Randbedingung für Azimut}$$

$$\Theta_{\nu_{nm}}^{\mu_m}(\vartheta) = \alpha_{nm}\,P_{\nu_{nm}}^{\mu_m}(\cos\vartheta) + \beta_{nm}\,Q_{\nu_{nm}}^{\mu_m}(\cos\vartheta) \qquad \text{Lösung für Zenit}$$

$$\left.\frac{\mathrm{d}\Theta_\nu^\mu(\vartheta)}{\mathrm{d}\vartheta}\right|_{\vartheta_{1,2}} = 0 \qquad \text{Neumann-Randbedingung für Zenit}$$

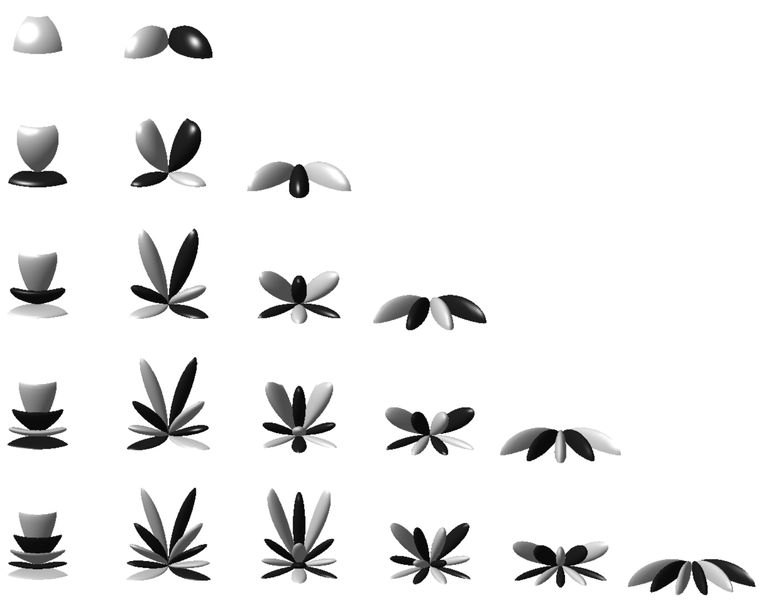

Abbildung 4: 20 Kugelsektorharmonische für die Werte ν und μ, die die geometrischen Randbedingungen erfüllen

Anordnung der Lautsprecher

Um die Schallschnelle auf dem Kugelsektor optimal zu steuern, müssen geeignete Positionen für die geplanten 20 Lautsprecher gefunden werden. Die Eignung der Lautspreherpositionen wird abgeschätzt über die abgetasteten Kugelsektorharmonischen $\mathbf{Y}$. Eine niedrige Konditionszahl κ garantiert eine gute modale Steuerbarkeit der Oberflächenschnelle. Mit gut ausgewählten Startwerten konnte der MATLAB-Optimierer eine Konditionszahl von $\kappa(\mathbf{Y}) = 1{,}45$ erreichen.

Analytischer Beamformer (idealisiert)

Für ein idealisiertes System ergibt sich folgende Struktur für die Ansteuerung des Schallprojektors:

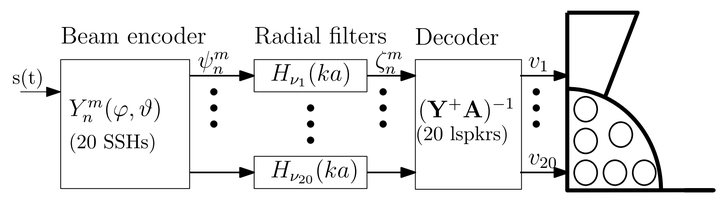

Abbildung 5: Struktur des analytischen Beamformers

Wenngleich die Filterkurven der Radialfilter sich unterscheiden, ergibt sich ein ähnliches Dynamikproblem wie bei Kugelarrays ohne Schallführung:

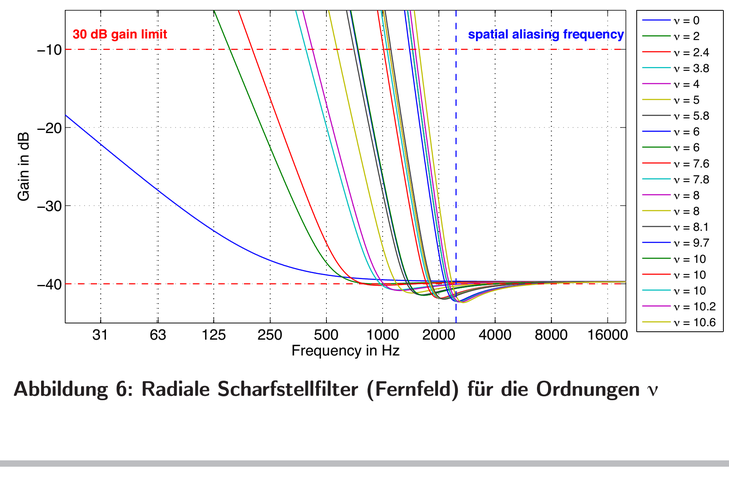

Abbildung 6: Radiale Scharfstellfilter (Fernfeld) für die Ordnungen ν

Vermessung der Abstrahlcharakteristik

Das System **G** an erreichbaren Abstrahlcharakteristiken des Schallprojektors im Frequenzbereich wurde mittels eines Drehtellers und eines Halbkreis-Mikrofonarrays im reflexionsarmen Raum ermittelt, siehe Abb. 7.
Damit ist das Richtmuster **p** des Spannungsvektors **u** an den 648 Punkten des Messrasters definiert:

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{G}\,\boldsymbol{u}$$

Abbildung 7: Messaufbau zur Impulsantwortmessung im reflexionsarmen Raum, 18 Mikrofonpositionen im Zenithwinkel, 36 Azimuthpositionen des Drehtellers

Modales Least-Squares-Beamforming

Fehlerquadratminimierung zwischen $\boldsymbol{G}_{sec}$ (Messwerte auf dem Sektor) und den Kugelsektorharmonischen $\boldsymbol{Y}_{sec}$ als Basis für das Beamforming

$$\min \|\boldsymbol{G}_{sec}\,\boldsymbol{U} - \boldsymbol{Y}_{sec\,SSH}\|^2$$

ergibt die Beam-Steuerung **U**

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{G}_{sec}^{\dagger}\,\boldsymbol{Y}_{sec\,SSH}$$

Für die Pseudoinverse $\boldsymbol{G}_{sec}^{\dagger}$ bewährte sich eine Regularisierung von 0,05. Abb. 8 zeigt die Struktur des datenbasierten, modalen Beamformers für den Schallprojektor.

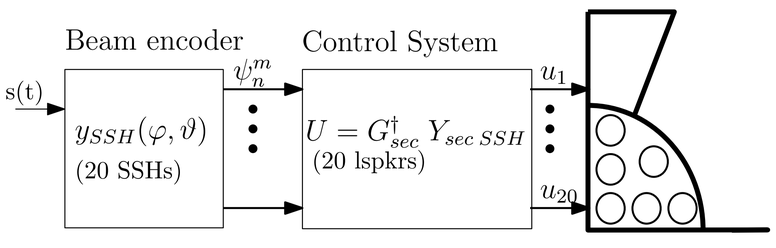

Abbildung 8: Blockschaltbild der vorgeschlagenen Signalverarbeitung für den modalen Least Squares Beamformer

Abb. 9 und 10 zeigen Richtdiagramme eines Schallstrahls bei verschiedenen Frequenzen.

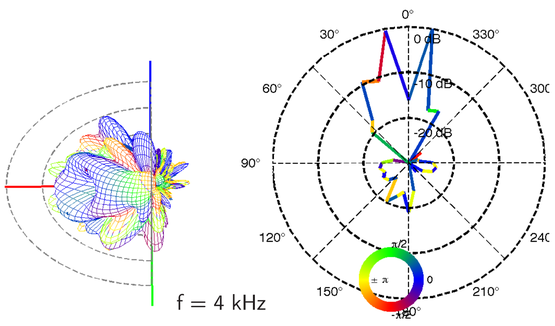

Abbildung 9: Ballondiagramm und vertikales Richtdiagramm des (45°,45°)-Schallstrahls, den der Schallprojektor über der räumlichen Aliasfrequenz erzeugt.

Abbildung 10: Ballondiagramm und vertikales Richtdiagramm des (45°,45°)-Schallstrahls, den der Schallprojektor im Arbeitsbereich erzeugt.

Schlussfolgerung

Die Messung zeigt die starke Bündelung des Schallprojektors. Sie wird durch die Schallführung im Winkel erreicht. Der echtzeitfähige modale Beamformer erlaubt eine intuitive Steuerung von Schallstrahlen und wurde Probe gehört: Die Hervorhebung akustischer Wandreflexionen ist deutlich hörbar.

Wie müssen diffus reflektierende Wände beschaffen sein, auf die der Schallprojektor projizieren kann?

Referenzen

[1] Pomberger, Pausch. Design and Evaluation of a Spherical Segment Array with Double Cone. Acta Acustica u A 2014

[2] Pomberger. Microphone Arrays utilizing rigid cones for sound-field analysis. DAGA, 2010

[3] Williams. Fourier Acoustics. 1999

Institut für Elektronische Musik und Akustik
Inffeldgasse 10 / III, 8010 Graz, http://iem.at