

## Untersuchungen an einer linienförmigen aktiven Schallbarriere

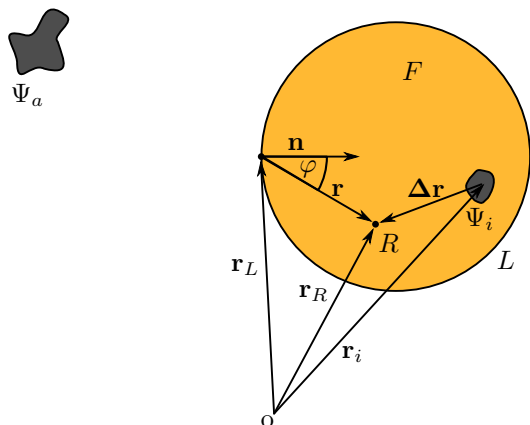
Christian Kleinhenrich, Sönke Schäfer, Detlef Krahe

Bergische Universität Wuppertal, 42119 Wuppertal, Deutschland, Email: c.kleinhenrich@uni-wuppertal.de

### Einleitung

Ein zweidimensionales Active Noise Control System (ANC) dämpft Störschall innerhalb einer kreisförmigen Anordnung aus Mikrofonen und Lautsprechern. Dabei wirkt sich die geschlossene Anordnung günstig auf die Filtersynthese anhand des Kirchhoff-Helmholtz Integrals aus. In dem vorliegenden Beitrag wird dieser zweidimensionale Ansatz für die Verwendung in einer geradlinigen Anordnung untersucht. Es kann gezeigt werden, dass der Ansatz für den kreisförmigen Aufbau übertragbar auf die Linienanordnung ist und das System eine Dämpfung des Störschalls erzielt. Neben theoretischen Betrachtungen werden Ergebnisse aus Simulationen und Messungen an einem Prototyp des Lehrstuhls für Elektroakustik der Bergischen Universität Wuppertal präsentiert.

### Theoretische Grundlagen



**Abbildung 1:** Zweidimensionales Lösungsgebiet  $F$  zur Veranschaulichung des allgemeinen Kirchhoff-Integrals. Die äußere Quellenverteilung  $\Psi_a$  erzeuge in  $F$  das Primärfeld, dass durch die innere Quellenverteilung  $\Psi_i$  am Ort  $R$  ausgelöscht werden soll.

Die Grundlage des ANC-Systems bildet das allgemeine Kirchhoff-Integral in der zweidimensionalen Form [1]

$$P(\mathbf{r}_R) = \frac{j}{4} \int_F \Psi_i(\mathbf{r}_i) H_0^{(2)}(k\Delta r) dF$$

$$\frac{-jk}{4} \oint_L \left( P(\mathbf{r}_L) H_1^{(2)}(kr) \cos \varphi + j\rho c V_n(\mathbf{r}_L) H_0^{(2)}(kr) \right) dL. \quad (1)$$

Darin sind die zweidimensionale Greenschen Funktion und deren Ableitung bereits eingesetzt worden [2]. Abbildung 1 zeigt das zweidimensionale Lösungsgebiet  $F$  mit der Berandung  $L$  und einer äußeren Quellenverteilung  $\Psi_a$  sowie einer inneren Quellenverteilung  $\Psi_i$ .  $\Psi_a$  erzeuge in  $F$  an einem Ort  $R$  das sogenannte Primärfeld

$P_{Prim}(\mathbf{r}_R)$ . Sind auf  $L$  der Schalldruck  $P(\mathbf{r}_L)$  und die Schallschnelle  $V_n(\mathbf{r}_L)$  in Richtung des Normalenvektors  $\mathbf{n}$  bekannt, kann nach (1) der Schalldruckverlauf in  $F$  vollständig bestimmt werden. Wird darüber hinaus angenommen, dass  $\Psi_i$  ein Sekundärfeld  $P_{Sek}(\mathbf{r}_R)$  erzeuge, dass dem Primärfeld destruktiv überlagert werden soll, gilt  $P(\mathbf{r}_R) = P_{Sek}(\mathbf{r}_R) + P_{Prim}(\mathbf{r}_R) = 0$  am Ort  $R$ . Angewendet auf (1) und nach Diskretisierung auf  $L$  in eine endliche Anzahl von Mikrofonen (Schnelle- und Druckempfänger), eine endliche Anzahl von Sekundärquellen in  $F$  und eine endliche Anzahl an Analysepunkten in  $R$ , können die Lautsprechersignale  $\mathbf{I}^T$  anhand der Mikrofon-signale  $\mathbf{p}_M^T$  und  $\mathbf{v}_{n,M}^T$  wie folgt bestimmt werden [3]:

$$\mathbf{I}^T = \mathbf{p}_M^T \cdot \nabla \mathbf{H}_{MR} \cdot \mathbf{S}^{-1} + \mathbf{v}_{n,M}^T \cdot \mathbf{H}_{MR} \cdot \mathbf{S}^{-1}. \quad (2)$$

Gleichung (2) veranschaulicht, wie die Matrizen  $\nabla \mathbf{H}_{MR}$  und  $\mathbf{H}_{MR}$  das Primärfeld an die Orte  $R$  extrapolieren (siehe dazu auch [2] oder [4]). Die Matrix  $\mathbf{S}$  stellt alle Sekundärpfade zwischen den Sekundärquellen und den Analysepunkten  $R$  dar. Durch die Invertierung  $\mathbf{S}^{-1}$  wird der extrapolierte Druck als Quellfunktion in die Sekundärquellen verlagert, die das Sekundärfeld synthetisieren. Zu beachten ist, dass nun eine diskrete Abtastung des Schallfeldes vorliegt und zur Vermeidung von Aliasing-Produkten  $f \leq c/2d$  eingehalten werden sollte. Darin ist  $c$  die Schallgeschwindigkeit und  $d$  der Abstand der Mikrofone bzw. Sekundärquellen.

### Aufbau als linienförmige ANC-Barriere

Für die Anwendung der Wellenfeldanalyse und -synthese mit geradlinigen Mikrofon- und Lautsprecherarrays sei an dieser Stelle auf [4] und [5] verwiesen. Der Aufbau des ANC-Systems als linienförmige Barriere und die Filtersynthese nach dem beschriebenen Verfahren sind daher grundsätzlich möglich, jedoch werden sowohl bei der Analyse des Primärfeldes als auch bei der Synthese des Sekundärfeldes zusätzliche Fehler durch die endliche Messapertur erzeugt.

In Abbildung 3 ist der Testaufbau der ANC-Barriere im reflexionsarmen Halbraum der Bergischen Universität Wuppertal von oben dargestellt. Als Primärquelle (PQ) diente ein Canton Popsmarts Lautsprecher, der auf den Boden gelegt wurde. Ein Referenzmikrofon-Paar (RM) bildeten jeweils ein Behringer EMC 8000 und ein AKG Perception 420 in Dipolstellung. Zwar ist das AKG Großmembran-Kondensatormikrofon kein Schnellempfänger, kann aber nach leichter Modifikation von (1) für das System verwendet werden. Die Fehlermikrofone (FM) bestanden ebenfalls aus Behringer ECM 8000 und als Sekundärquellen (SQ) wurden Canton CD 300 Lautsprechersäulen eingesetzt. Alle Mikrofone waren in

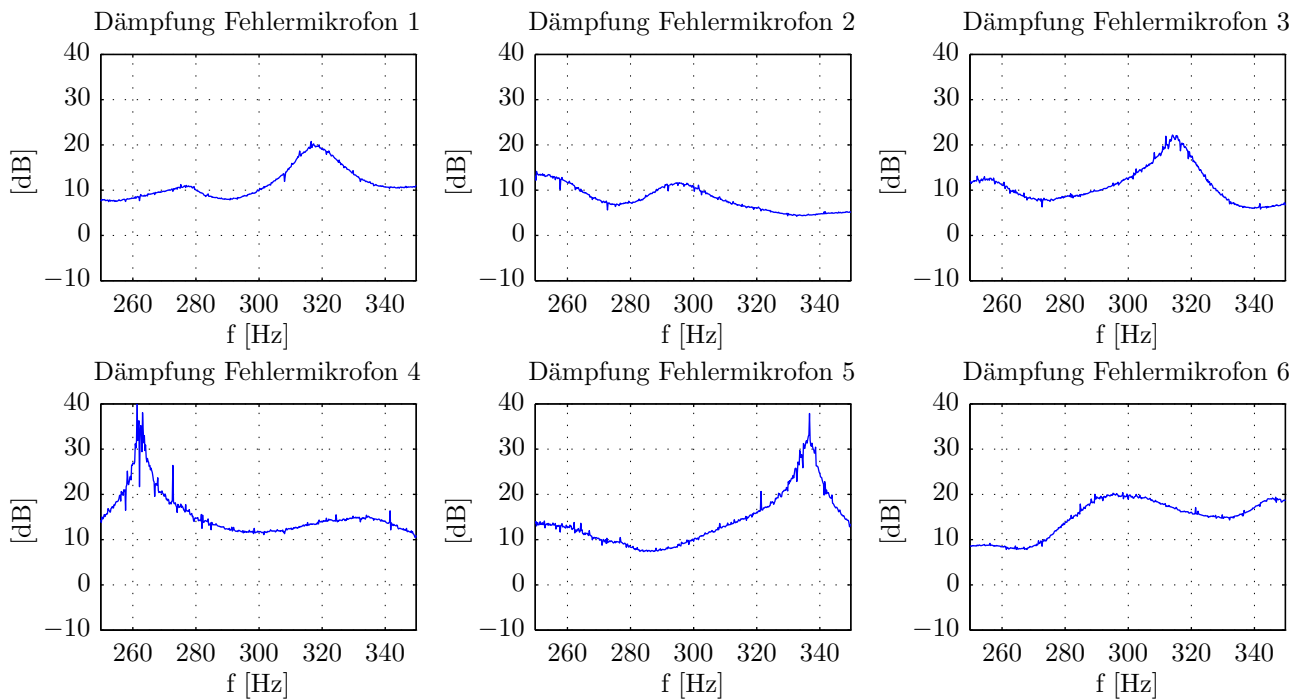


Abbildung 2: Gemessene frequenzabhängige Dämpfungen an den Fehlermikrofonen FM1 - FM6.

einer Höhe von 0,90 m angebracht. Die Signalverarbeitung wurde in MATLAB<sup>®</sup> unter Verwendung von *playrec* durchgeführt [6]. Als Audio-Interfaces dienen ein *Focusrite Saffire Pro 26 i/o*, ein *Focusrite OctoPre MKII Dynamics* und ein *Behringer Ultragain Pro 8 Digital*. Da mit diesem Aufbau keine Echtzeit-Verarbeitung möglich ist, sind alle Messungen offline durchgeführt worden.

## Messergebnisse

Für die Inbetriebnahme des Systems wurden die Referenzmikrofone in Phase und Amplitude aufeinander abgeglichen. Die Sekundärpfade wurden nach dem in [7] beschriebenen Verfahren ausgemessen und anschließend invertiert. Darüber hinaus war ein Abgleich der Extrapolationskoeffizienten aus  $\nabla \mathbf{H}_{MR}$  und  $\mathbf{H}_{MR}$  in der Amplitude notwendig, da keine zweidimensionale Wellenausbreitung vorlag. Abbildung 2 zeigt die erzielten

Dämpfungen an den sechs Fehlermikrofon-Positionen an. Grundsätzlich wurden zwischen 250 Hz und 350 Hz durchwegs Dämpfungen zwischen 6 dB und 16 dB und vereinzelt auch wesentlich höhere Werte erreicht. Die obere Grenzfrequenz ist systembedingt, während die untere Grenzfrequenz durch die Keillänge des Messraums vorgegeben ist. Die Messergebnisse decken sich gut mit im Vorfeld durchgeführten Simulation. Dort zeigte sich bereits, dass aufgrund der Apertur keine gleichmäßige Dämpfung an allen Positionen zu erwarten ist.

## Literatur

- [1] Fahy, F.: Foundations of Engineering Acoustics, Academic Press, London, 2nd printing, 2003
- [2] Spors, S.: Active Listening Room Compensation for Spatial Sound Reproduction Systems, Diss., Friedrich-Alexander-Univ. Erlangen-Nürnberg, 2005
- [3] Kleinhenrich, C., Krahé, D.: An adaptive Approach to enhance Damping in a two dimensional Feed Forward Active Noise Control System using Velocity Microphones, Proceedings of 20th Int. Congress on Acoustics, ICA 2010, Sydney
- [4] Hulsebos, E.M.: Auralization using Wave Field Synthesis, Diss., Technische Univ. Delft, 2004
- [5] Start, E.W.: Direct Sound Enhancement by Wave Field Synthesis, Diss., Technische Univ. Delft, 1997
- [6] playrec, URL: [www.playrec.co.uk/](http://www.playrec.co.uk/)
- [7] Farina, A.: Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, Presented at the 108th Convention 2000, Paris

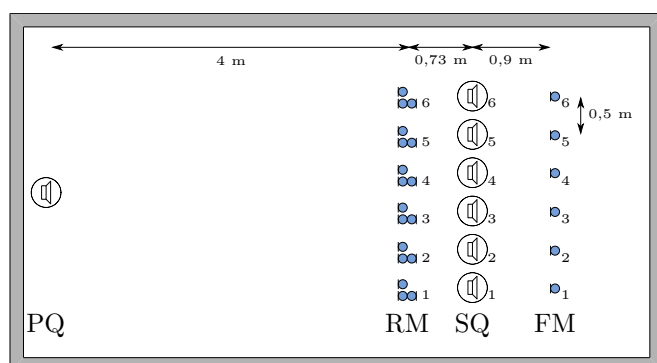


Abbildung 3: Systemaufbau im Reflexionsarmen Halbraum mit Primärquelle (PQ), Referenzmikrofonen (RM), Sekundärquellen (SQ) und Fehlermikrofonen (FM) in der Draufsicht.