

Simulationen adaptiver Ansätze zur Optimierung der Dämpfungswirkung eines MIMO-ANC-Systems unter Verwendung reflektierter Feldgrößen

Christian Kleinenrich¹, Tobias Weigler¹, Detlef Krahe¹

¹ Bergische Universität Wuppertal, 42119 Wuppertal

E-Mail: c.kleinenrich@uni-wuppertal.de t.weigler@uni-wuppertal.de, krahe@uni-wuppertal.de

Einleitung

Ein gegebenes ANC-System (Active Noise Control) dämpft eine horizontal verlaufende Schallwelle (Primärfeld) innerhalb eines 2-dimensional begrenzten horizontalen Bereiches (Zone der Ruhe), ober- und unterhalb der horizontalen Fläche mit abnehmender Wirkung. Die Erfassung von Schalldruck und -schnelle entlang der Berandung der Fläche (Multiple Input) ermöglicht die Bestimmung des Schalldruckverlaufs an diskreten Punkten innerhalb der Zone der Ruhe. An diesen Punkten können virtuelle Mikrofone angenommen werden, die ausschließlich das Primärfeld aufnehmen. Ein Lautsprecherarray (Multiple Output) strahlt daraus abgeleitet eine phasengedrehte Nachbildung (Sekundärfeld) des Primärfeldes ab, sodass aus der destruktiven Interferenz eine Dämpfung des Primärfeldes resultiert. Hierfür müssen die Transferfunktionen zwischen realen und virtuellen Mikrofonen sowie zwischen virtuellen Mikrofonen und Lautsprechern bekannt sein. Die Güte des Systems hängt hiervon ab und die Transferfunktionen können sich zeitlich verändern. Daher sind zur Optimierung der Dämpfungswirkung adaptive Mechanismen notwendig, die Veränderungen erfassen und darauf reagieren. Dieser Beitrag untersucht zwei verschiedene Ansätze anhand von Simulationen im Zeitbereich, die das System an die jeweilig vorherrschenden Bedingungen möglichst gut anpassen sollen. Dabei wird eine neue Methode näher betrachtet, die reflektierte Feldgrößen des ANC-Systems für die Abschätzung eines mehrdimensionalen Fehlereingangs heranzieht. Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit erfolgt der Vergleich mit einem herkömmlichen Verfahren, das zusätzliche Fehlermikrofone für diese Aufgabe verwendet.

Grundlagen

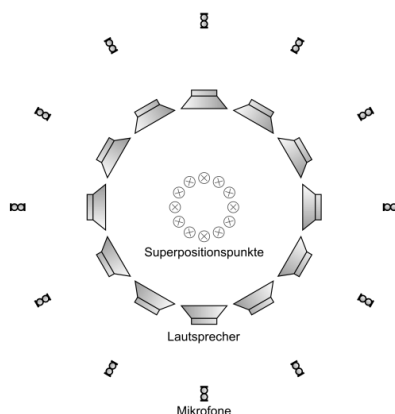


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des ANC-Systems

Das ANC-System ist kreisförmig aufgebaut. Im Innern des Systems soll der von außen eindringende Schall (Primärfeld) möglichst gut gedämpft werden. Die Messung des

Primärfeldes erfolgt über eine Kombination von 12 Druck- und 12 Schnelleempfängern. Das Gegenfeld (Sekundärfeld) wird mit jeweils 12 Lautsprechern synthetisiert. Die Berechnung der Übertragungsfunktionen kann auf das Kirchhoff-Integral zurückgeführt werden, das sich auf eine geschlossene, dreidimensionale Oberfläche bezieht, die ein Volumen umschließt [1]. Überführt man dieses in die zweidimensionale Form und setzt für den Schalldruckgradienten mit Hilfe der Eulerschen Bewegungsgleichung die Schallschnelle ein, so ergibt sich [2]:

$$\begin{aligned}
 & - \oint_{C(F)} (G_{2D}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}, \omega) j\omega\rho_0 \mathbf{V}(\mathbf{r}_0, \omega) + \nabla G_{2D}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}, \omega) P(\mathbf{r}_0, \omega)) \mathbf{n} ds \\
 & + \iint_F \Psi_i(\mathbf{r}_i, \omega) G_{2D}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}, \omega) df \\
 & = \begin{cases} P(\mathbf{r}, \omega) & \text{wenn } \mathbf{r} \text{ in } F \\ \frac{1}{2} P(\mathbf{r}, \omega) & \text{wenn } \mathbf{r} \text{ auf } C(F) \\ 0 & \text{wenn } \mathbf{r} \text{ außerhalb } F \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

In Gleichung (1) sind die Übertragungsfunktionen zwischen der Kreiskontur \mathbf{r}_0 und den Aufpunkten \mathbf{r} , bzw. zwischen inneren Quellen \mathbf{r}_i und den Aufpunkten durch die zweidimensionale Greensche Funktion gegeben:

$$G_{2D} = \frac{1}{4j} H_0^{(2)}(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|) = \frac{1}{4j} (J_0(kr) - jN_0(kr)) \quad (2)$$

Der Schalldruck kann nun für das Innere einer Fläche F mit der Kontur $C(F)$ bei Kenntnis von Druck- und Schnelle auf der Kontur (Mikrofonkreis), sowie der inneren Quellenverteilung (Lautsprecherkreis) bestimmt werden (siehe Abbildung 1). Soll der Schalldruck an den Superpositionspunkten folgt letztendlich in Vektor- und Matrixschreibweise für die Lautsprechersignale \mathbf{I}^T :

$$\mathbf{I}^T = \mathbf{v}_M^T \cdot \mathbf{G}_{MSP} \cdot \mathbf{S}^{-1} + \mathbf{p}_M^T \cdot \nabla \mathbf{G}_{MSP} \cdot \mathbf{S}^{-1} \quad (3)$$

\mathbf{v}_M^T sind die Schnellesignale und \mathbf{p}_M^T die Drucksignale der Mikrofone. Die Übertragungsmatrizen \mathbf{G}_{MSP} und $\nabla \mathbf{G}_{MSP}$ werden durch die Greenschen Funktion, bzw. deren Gradient gebildet. Die Matrix \mathbf{S}^{-1} beschreibt die Inversion der Übertragungsfunktionen der Sekundärpfade von Lautsprechern zu Superpositionspunkten.

Simulationsmethode

Für die Simulation des ANC-Systems in Interaktion mit dem Schallfeld wurde eine dreidimensionale Finite Differenzen im Zeitbreich (FDTD) Simulation verwendet. Die simulierte Fläche beträgt ca. 5 mal 7 Meter und ist, um Reflexionen zu vermeiden, an den Seiten mit der Wellenimpedanz

abgeschlossen. Die z-Dimension ist auf eine Höhe von 30 cm schallhart begrenzt. Dadurch entsteht eine angenäherte Wellenausbreitung in zylinderförmig. Sämtliche Quellen sind als transparente Quellen implementiert. Hinsichtlich der Quellen haben dreidimensionale Simulationen gegenüber zweidimensionalen den Vorteil, dass die Impulsantworten des FDTD-Gitters für lange Simulationslängen durch eine Konstante angenähert werden können [3]. Alle Simulationen wurden für eine Abtastrate von 8 kHz durchgeführt, was gemäß der Courant-Bedingung einer örtlichen Schrittweite von 7,36 cm entspricht [3]. Als Eingangssignal wurde Bandbegrenztes Phasenrauschen mit den Grenzfrequenzen von 100 Hz und 300 Hz, sowie den Stopp-Frequenzen 0 Hz und 400 Hz verwendet.

Adaptiver Ansatz I

Der erste adaptive Ansatz beruht auf der Annahme von Fehlersensoren an den Superpositionspunkten, sodass Abweichungen in der Dämpfungswirkung direkt als Fehlersignal gemessen werden können. Diese Fehlersignale finden Verwendung in einem 24x12x12 MIMO FXLMS Algorithmus wie in [4] beschrieben. Die Adaption wird für 16000 Zeitschritte, bzw. 2 Sekunden durchgeführt. Alle Sekundärpfade werden per FDTD virtuell ausgemessen. Zu Beginn der Simulation sind die theoretisch berechneten Übertragungsfunktionen um den Faktor 5 verstärkt vorgegeben. Im Vorfeld hatte sich gezeigt, dass mit dieser Einstellung bereits eine geringe Dämpfung erzielt werden kann und der Algorithmus somit eine gute Ausgangsbasis besitzt.

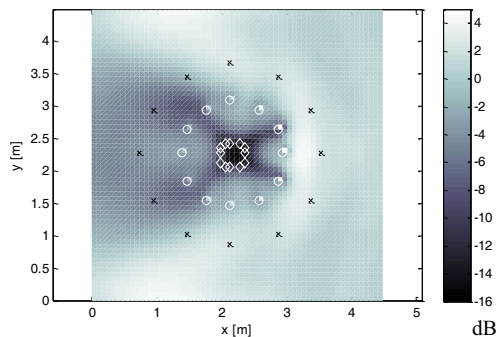


Abbildung 2: Zeitlich gemittelter Dämpfungsverlauf im ANC-System nach Optimierung mit Fehlersensoren

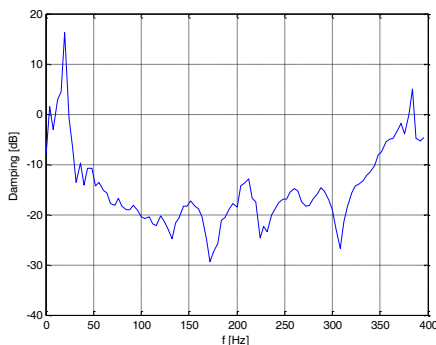


Abbildung 3: Frequenzabhängiger Dämpfungsverlauf in der Mitte des ANC-Systems nach Optimierung mit Fehlersensoren

Abbildungen 2 und 3 zeigen, dass der MIMO FXLMS bei geeigneter Wahl der Schrittweiten für Druck und Schnellesignal konvergiert und eine deutliche, breitbandige Dämpfung im Innern des Kreises erzielt.

Adaptiver Ansatz II

In diesem Fall soll auf weitere Fehlersensoren im Innern verzichtet werden, da diese für die Anwendung des ANC-Systems nicht praktikabel wären. Daher müssen die Führungssensoren zur Ermittlung des Fehlersignals herangezogen werden. Betrachtet man Gleichung (1) erneut, so kann per Vorzeichenwechsel im Konturintegral der Feldverlauf aus dem Kreis heraus vom Feldverlauf in den Kreis hinein unterschieden werden. Der Druck an den Superpositionspunkten kann dann folgendermaßen mit Hilfe der rücklaufenden Welle abgeschätzt werden:

$$\hat{p}(\mathbf{r}_{SP}, \omega) = \mathbf{p}_{\text{rück}}(\mathbf{r}_M, \omega) \cdot \mathbf{F}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{S}} \quad (4)$$

In Gleichung 4 finden die Feedbackpfade \mathbf{F} Verwendung, die im Vorfeld ausgemessen werden können. Die Sekundärpfade werden für die Simulation über die Greensche Funktion abgeschätzt. Da sich aufgrund der Inversion ein nichtkausales Filter ergibt, muss das prädierte Signal zurück geschoben werden. Den Vergleich zwischen Prädiktion und der Simulation entnommener Werte zeigt Abbildung 4. Demnach scheint es möglich, unter Akzeptanz eines gewissen Fehlers, die abgeschätzten Fehlersignale für die Adaption heranzuziehen.

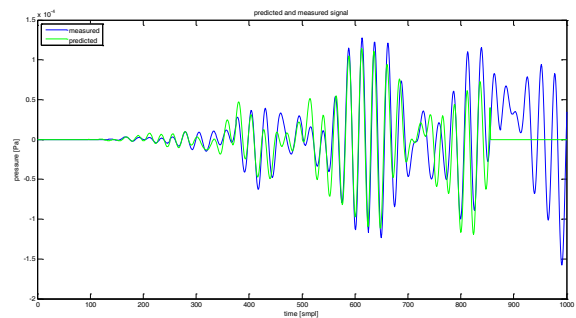


Abbildung 4: Vergleich Prädiktion (grün) und aus Simulation entnommener Werte (blau) an den Superpositionspunkten

Literatur

- [1] Fahy, F.; *Foundations of Engineering Acoustics*, Academic Press, London, 2nd printing, 2003.
- [2] Zollner, M; Zwicker, E. *Elektroakustik*, Springer, Berlin, 3rd ed., 1998.
- [3] Schneider, J.B. et al. Implementation of transparent sources embedded in acoustic finite difference time domain grids, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.133, 1998, pp. 136-142.
- [4] Kuo, S.M.; Morgan, D.R. *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*, Wiley-Interscience, New York, 1st ed., 1996