

# Numerische und experimentelle Untersuchungen zur adaptiven Lärminderung unter Berücksichtigung von Schalldruck und Druckgradient

Thomas Kletschkowski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> HAW Hamburg, 20099 Hamburg, E-Mail: thomas.kletschkowski@haw-hamburg.de

## Einleitung

Ein ausschließlich den Schallwechseldruck verwendendes Verfahren zur aktiven Lärminderung führt, insbesondere bei voll bestimmten Systemen, bei denen die Anzahl der Fehlersensoren der Anzahl der Aktuatoren entspricht, zu signifikanten (theoretisch unendlichen) Pegelreduktionen am Ort der Fehlersensoren. Beim Verlassen der sich um diese Positionen ausbreitenden Ruhezone können jedoch starke Druckgradienten wahrgenommen werden. Kommen aufgrund fehlender Referenzsignale adaptive Regelungen anstelle adaptiver Vorwärtsführungen zum Einsatz, lassen sich die Ruhezone aufgrund von Laufzeiteinschränkungen nicht beliebig vom Ort der Regelung (Kontrollposition) auf den zu beruhigenden Bereich (Monitorposition) ausdehnen.

Eine Möglichkeit dieses Problem zu beheben, besteht im Einsatz virtueller Mikrophone, die sich dem Verfahren der Vorwärtsprädiktion [1], mit Hilfe von Transferfunktionen [2] – [4] oder unter Verwendung von Reglerparametermatrizen [5] konstruieren lassen.

Eine weitere Alternative bietet der Versuch der Ausweitung der Ruhezone durch Berücksichtigung des Druckgradienten in der dem adaptiven Verfahren zugrundeliegenden Kostenfunktion. Die vorliegende Arbeit diskutiert diesen Ansatz, wobei theoretische Vorüberlegungen anhand des sich in einem Schallrohr ausbreitenden ebenen Wellenfeldes erläutert werden. Experimentelle Ergebnisse werden vergleichend anhand mehrkanaliger Implementierungen auf einem digitalen Signalprozessor für die adaptive Regelung des Schallwechseldruckes (zwei benachbarte Mikrofone) und für die adaptive Regelung von Schallwechseldruck und Druckgradient (Hälfte des Mikrofonabstandes) unter Verwendung preisgünstiger Sensorik und Aktorik diskutiert. Die experimentellen Ergebnisse belegen, dass sich die Ruhezone bei Berücksichtigung des Druckgradienten ausdehnen und eine Lokalisierung der Pegelreduktion an den Positionen einzelner Fehlermikrophone vermeiden lässt.

## Theoretische Betrachtungen

Die Vorüberlegungen erfolgen anhand der Ausbreitung ebener Wellen in einem verlustfreien Schallrohr der Länge  $L$ , das links- und rechtsseitig durch Lautsprecher begrenzt ist. Letztere werden als ideale Volumenschallquellen modelliert. Für die numerische Auswertung werden unter Verwendung der Schallgeschwindigkeit  $c$  die nachfolgenden dimensionslosen (dl) Größen eingeführt:

- dl Position:  $\tilde{x} = x/L$
- dl Kreisfrequenz:  $\tilde{\omega} = \omega \cdot L/c$
- dl Volumenschnelle:  $\tilde{Q} = Q(\tilde{x} = 1)/Q(\tilde{x} = 0)$ .

Die zeitharmonische Analyse des oben skizzierten Problems, ermöglicht die Angabe des dl Schalldruckes und des dl Druckgradienten am rechten Rand

$$\tilde{P}(\tilde{x} = 1) = \frac{1 + \cos(\tilde{\omega}) \cdot \tilde{Q}}{j \sin(\tilde{\omega})}, \quad [-] \quad (1)$$

und

$$\nabla \tilde{P}(\tilde{x} = 1) = -j\tilde{\omega}\tilde{Q}, \quad [-] \quad (2)$$

mit deren Hilfe eine durch den reellen Parameter  $\alpha \in (0,1)$  gewichtete Kostenfunktion definiert werden kann

$$J = \frac{1}{2} \alpha |\tilde{P}|^2 + \frac{1}{2} (1 - \alpha) |\nabla \tilde{P}|^2. \quad [-] \quad (3)$$

Das Minimum dieser quadratischen Form ist durch die optimale dl Volumenschnelle in Abhängigkeit von  $\alpha$  charakterisiert

$$\tilde{Q}_{opt} = - \frac{\alpha \cos(\tilde{\omega})}{\alpha \cos^2(\tilde{\omega}) + (1 - \alpha) \tilde{\omega}^2 \sin^2(\tilde{\omega})} \cdot [-] \quad (4)$$

Wird lediglich der Schallruck am rechten Rand minimiert ( $\alpha = 1$ ), ergeben sich für die Nullstellen der cos-Funktion in den Antiresonanzen des Systems Polstellen, die theoretisch unendlich große dl Volumenschnellen zur Folge hätten.

Werden jedoch Kostenfunktionen mit  $0 < \alpha < 1$  zugrundegelegt, ist nicht nur eine Division durch Null ausgeschlossen, wodurch Instabilitäten vermieden werden. Vielmehr wird die Quellstärke der Sekundärquelle in den Antiresonanzen zu Null gesetzt, so dass dem sich bereits in einem Zustand minimaler potentieller akustischer Energie befindlichen System keine (weitere) externe Anregung aufgeprägt wird.

Bild 1 illustriert die globale Wirkung der nach Gleichung (4) für  $\alpha = 0.995$  berechneten und auf Gleichung (1) angewendeten optimalen Quellstärke in der ersten Mode im Vergleich zur konventionellen Druckregelung ( $\alpha = 1$ ).

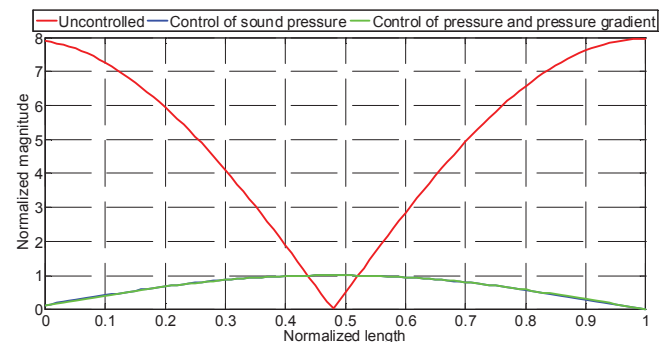
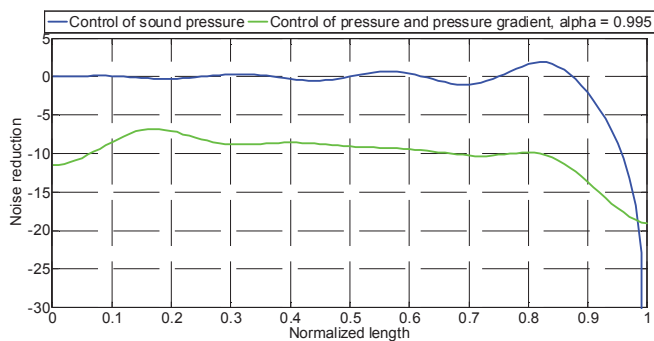


Bild 1: Geregeltes und ungeregeltes Schallfeld (1. Mode)



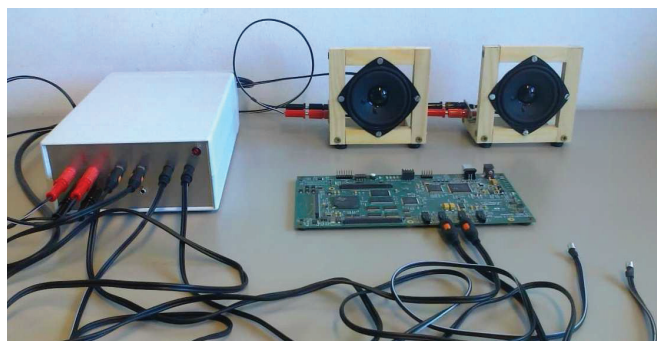
**Bild 2:** Pegelreduktion im Schallrohr

Die Pegelreduktion ist in Bild 2 über der dl Position aufgetragen, wobei für die Berechnung der Summenpegel an jeder dl Position zweihundert äquidistant verteilte Frequenzlinien in einem sich bis zur vierten Mode erstreckenden Frequenzbereich berücksichtigt wurden.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die konventionelle Druckregelung einerseits an der Position  $\tilde{x} = 1$  theoretisch unendlich hohe Pegelreduktionen ermöglicht. Andererseits ist zu erkennen, dass die Zunahme der Lärmbelastung beim Verlassen des Regelungsortes, bereits bei minimaler Berücksichtigung des Druckgradienten, erheblich moderater ausfällt und im gesamten Schallrohr eine Minderung der ursprünglichen Lärmbelastung erreicht wird.

### Experimentelle Untersuchungen

Zur Durchführung von Experimenten wurden die in Bild 3 dargestellten Komponenten verwendet. Hierbei handelt es sich um einen digitalen Signalprozessor (DSK6713), zwei analoge Elektretmikrophone, eine eigens entworfenen Verstärkereinheit und zwei elektrodynamische Lautsprecher.

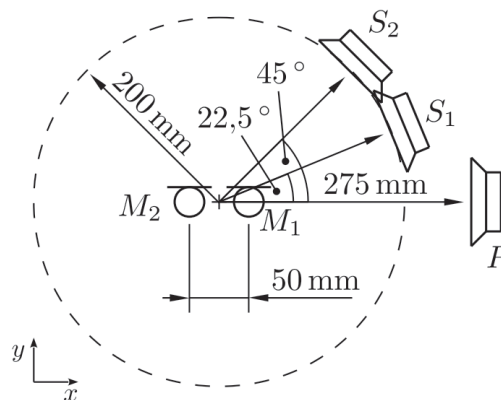


**Bild 3:** Komponenten des Gegenschallsystems

Die adaptive Signalverarbeitung erfolgte im Zeitbereich und basiert auf dem FxLMS, vergleiche [6], wobei, mit Hilfe interner Modelle der Sekundärstrecken, eine zweikanalige adaptive Regelung in der Struktur einer adaptiven Vorwärtsführung implementiert wurde, siehe [7].

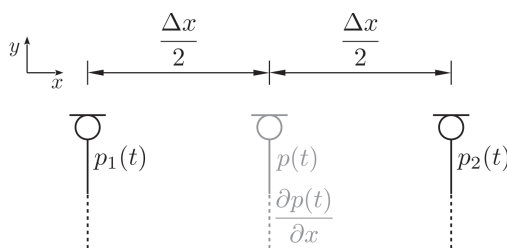
Der verwendete Versuchsaufbau ist in Bild 4 skizziert. Als Lärmquelle dienten die Lautsprecher eines handelsüblichen Personalcomputers. Alle nachfolgend beschriebenen Experimente wurden bei einer Anregungsfrequenz von 570Hz in einer Wohnraumumgebung durchgeführt. Jeweils zwei Filterkoeffizienten wurden verwendet, um das Übertragungsverhalten auf den vier Sekundärstellen mit FIR-Filtern (engl. Finite Impuls Response) mit Hilfe des LMS-Verfahrens [6]

zu identifizieren. Für die zwei während der Regelung adaptiv optimierten FIR-Filter wurden ebenfalls jeweils zwei Koeffizienten verwendet. Die Abtastfrequenz betrug 48Hz.



**Bild 4:** Skizze des Versuchsaufbaues

Bild 5 verdeutlicht, wie die zur Minimierung der in den Gleichungen (5) und (6) angegebenen Kostenfunktionen benötigten Fehlersignale  $e_1$  und  $e_2$  gewonnen wurden. Sollte eine konventionelle Druckregelung erfolgen, dienen die an den Mikrophenen vermessenen Schalldrücke  $p_1$  und  $p_2$  als Fehlergrößen.



**Bild 5:** Fehlergrößen der adaptiven Regelung

$$J_{pp} = e_1^2 + e_2^2, \quad [-] \quad (5)$$

$$J_{pvp} = \left[ \frac{\alpha_1 (e_1 + e_2)}{2p_0} \right]^2 + \left[ \frac{\alpha_2 (e_2 - e_1)}{\rho_0 a_0 \Delta x} \right]^2, \quad [-] \quad (6)$$

Die in Gleichung (6) enthaltene Summe und Differenz der Fehlersignale  $e_1$  und  $e_2$  entspricht der Berechnung des mittleren Schalldruckes und der Approximation des Druckgradienten auf der Hälfte des Mikrophenabstandes

$$\nabla p \approx (e_2 - e_1) / 2, \quad [\text{Pa/m}] \quad (7)$$

$$p = (e_1 + e_2) / 2. \quad [\text{Pa}] \quad (8)$$

Unter Berücksichtigung der Bezugsgrößen für Schalldruck und Beschleunigung sowie des Mikrophenabstandes

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}, a_0 = 10^{-6} \text{ ms}^{-2}, \Delta x = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m} \quad (9)$$

wurde für die in Gleichung (6) angegebenen Parameter  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  ein Verhältnis von  $\alpha_2 / \alpha_1 \approx 0.15\%$  eingestellt. Die Versuchsergebnisse sind in den Bildern (6)-(9) dargestellt.

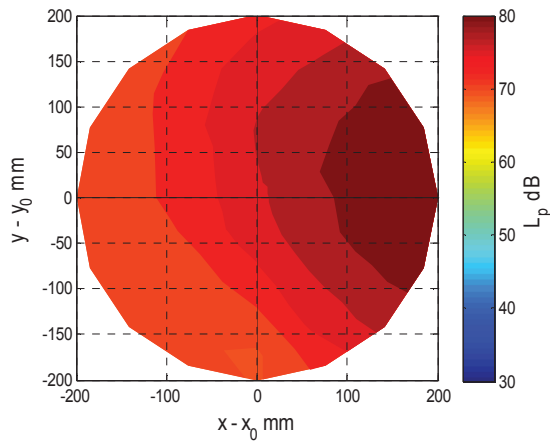


Bild 6: Ungeregeltes Schallfeld bei 570Hz

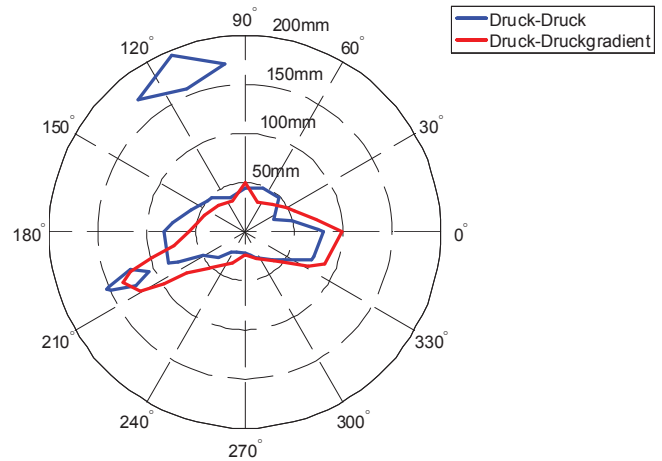


Bild 9: Vergleich der 10dB Ruhezonon

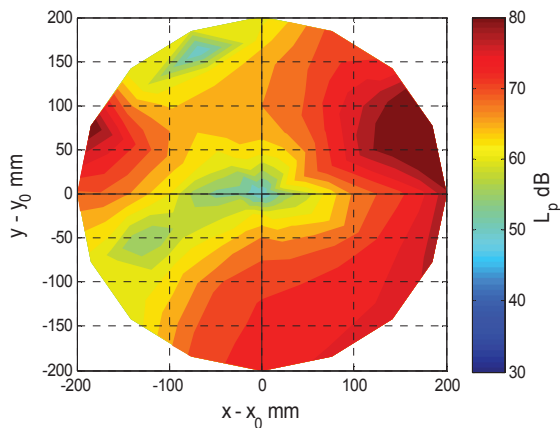


Bild 7: Druckregelung bei 570Hz

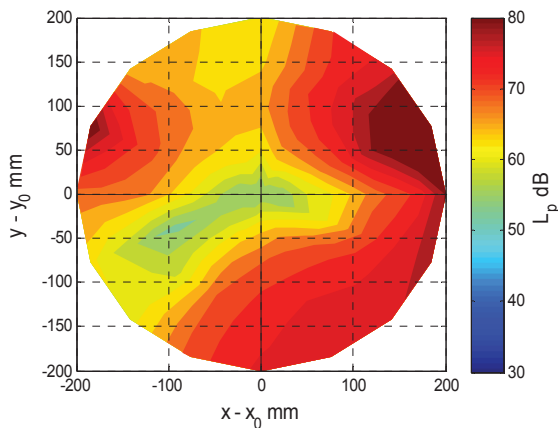


Bild 8: Druck- und Druckgradientenregelung bei 570Hz

Bild 6 zeigt das unregelmäßige Schallfeld. Die mit Hilfe des Experimentalsystems erreichten Veränderungen sind in den Bildern 7 und 8 dargestellt. Der Vergleich verdeutlicht die größere Lokalisierung der Lärminderung, die eintritt, wenn die an den Mikrofonen vermessenen Schalldrücke unmittelbar als Fehlersignale verwendet werden. Die Ausbildung der 10dB Ruhezonon (Pegelreduktion von mindestens 10dB im Vergleich zum unregelmäßigen Schallfeld) ist in Bild 9 dargestellt und verdeutlicht, dass eine auf der Verwendung des Schalldruckes und des Druckgradienten basierende aktive Lärminderung zu einer Verbreiterung der durch Gegenschall erzeugten Ruhezone führen kann.

## Resümee

Die vorgestellten Ergebnisse belegen die Machbarkeit und das Potential einer kombinierten Druck- und Druckgradientenregelung. Aussagen zu optimalen Gewichtsparametern oder zur breitbandigen Wirksamkeit können jedoch noch nicht getroffen werden und sollen daher Gegenstand zukünftiger Arbeiten werden.

## Danksagung

Besonderer Dank gebühren Herrn Dennis Crantz (B.Eng.), der im Rahmen seiner Bachelor-Arbeit wertvolle Beiträge zur experimentellen Umsetzung leistete, sowie dem Lehrstuhl für Mechatronik der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg für die freundliche Unterstützung in Form der Leihgabe eines digitalen Signalprozessors.

## Literatur

- [1] Munn, J. M.: Virtual sensors for active noise control, Dissertation, University of Adelaide, Australia, (2005)
- [2] Garcia-Bonito J., Elliott S. J., Boucher C. C.: Generation of zones of quiet using a virtual microphone arrangement, J. Acoust. Soc. Am. 101 (6), June 1997
- [3] Kletschkowski T., Sachau D.: Aktive Lärminderung in Schlafräumen mit realen und virtuellen Fehlersensoren, DAGA '07, Stuttgart, März 19 - 22, (2007)
- [4] Pawelczyk, M.: Adaptive noise control algorithms for active headrest system, Control Engineering Practice, 1101-1112, (2004)
- [5] Kochan K., Sachau, D.: Robust parameter design of an adaptive multi-channel activenoise controller, NAG/DAGA, Rotterdam, 23.-26. März, (2009)
- [6] Kuo S. M., Morgan D. R.: Active noise control systems – Algorithms and DSP implementations. John Wiley & Sons, Inc, Canada, (1996)
- [7] Crantz D.: Aktive Regelung von Schalldruck und -schnelle mit einem digitalen Signalprozessor. Bachelor-Thesis, HAW Hamburg, (2014)