

Breitbandige aktive Schallreduktion mittels Feedback-Regelung und virtuellen Sensoren

Sergej Jukkert, Oliver Pabst, Delf Sachau

Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, 22043 Hamburg, E-Mail: opabst@hsuhh.de

Einleitung

Systeme zur aktiven Lärmreduktion bieten eine Möglichkeit, Lärm gezielt so zu beeinflussen, dass der Komfort des Menschen verbessert wird. Ist die störende Lärmquelle bekannt, so ist die Regelung mit Referenzsignal möglich (Feedforward-Regelung). Sind jedoch in der Regelumgebung viele unkorrelierte Störschallquellen vorhanden, wie z.B. in einem Linienflugzeug, wird eine exakte Referenzierung des Störsignals für die Regelung erschwert. Aus diesem Grund wird hier die Implementierung der Feedback-Regelung für breitbandigen Störschall untersucht. Dabei wird eine Variante des single channel feedback filtered-X LMS (SISO FBFxLMS) verwendet, algorithmisch erweitert um den Ansatz der virtuellen Sensoren. Der Regelalgorithmus wird mit MATLAB-Simulink implementiert. Um das Verhalten des Reglers zu untersuchen, wird in MATLAB-Simulink ein realitätsnahes Simulationsmodell der Regelumgebung erstellt. Anschließend wird das erstellte Modell auf einer dSpace Rapid Prototyping Hardware implementiert und in einer realen Testumgebung eingesetzt, um die Ergebnisse der Simulation zu validieren.

SISO FBFxLMS-Regler mit virtuellen Mikrofonen

Bei der hier verwendeten Methode der virtuellen Mikrofone wird mit Hilfe des Signals eines physikalisch vorhandenen Mikrophones, des Reglerausgangssignales und der Information über die Systemeigenschaften, das Signal an einem Ort schätzt, der sich in einem Abstand zu dem Ort des physikalisch vorhandenen Sensors befindet. Dieser Ort wird als virtueller Ort bezeichnet und das geschätzte Signal als virtuelles Fehlersignal. Dieser Zusammenhang wird in **Abbildung 1** verdeutlicht. Anstelle des Signals des vorhandenen Mikrophones wird das geschätzte Signal minimiert und somit eine Schalldruckreduktion am virtuellen Ort – an dem kein Regelmikrofon vorhanden ist – erreicht [1].

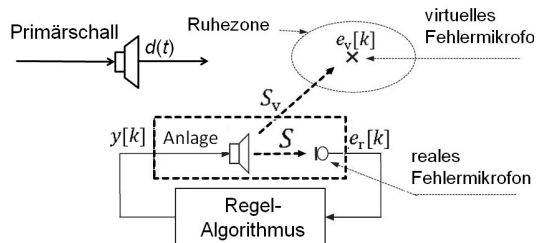


Abbildung 1: Prinzip der aktiven Schallreduktion mit dem virtuellen Mikrofon.

Die hier verwendete Methode der virtuellen Mikrofone (wie in [2]) unterteilt sich in Trainings- und Regelphase. Die Blockschaltbilder des Systems sind in **Abbildungen 2** und **3** dargestellt. Um das Referenzsignal für den FxLMS-Algorithmus zu bilden, arbeitet der Regler intern mit den Modellen der Übertragungsstrecken. In der Trainingsphase minimiert der FBFxLMS-Regler das Fehlersignal $e_v[k]$

(virtueller Ort). Zur gleichen Zeit werden die Koeffizienten des Filters H durch einen weiteren LMS-Block adaptiert, der $e' [k]$ minimiert. Das Signal $e' [k]$ ist die Differenz der Signale $e_r[k]$ (am realen Mikrofon) und $e_h[k]$ (Ausgangssignal des Filters H). Somit enthält das Filter H die Information über das Fehlersignal $e_r[k]$ zum Zeitpunkt, an dem das Fehlersignal $e_v[k]$ minimal ist.

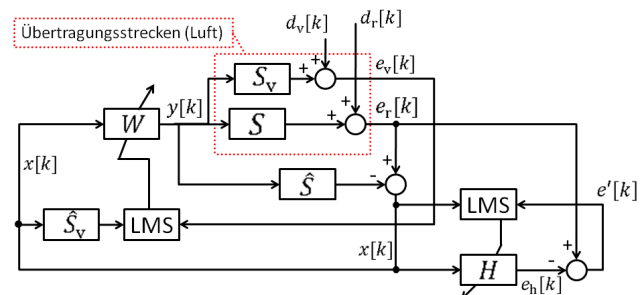


Abbildung 2: SISO FBFxLMS mit virtuellem Mikrofon – Trainingsphase.

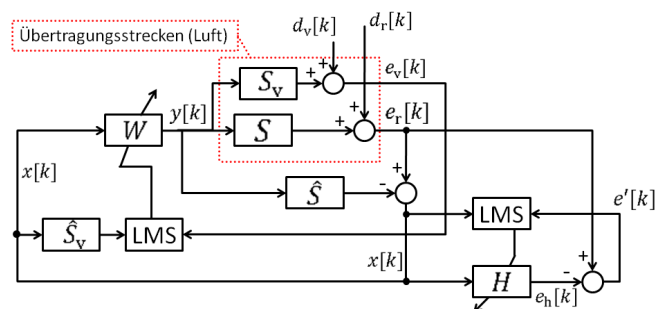


Abbildung 3: SISO FBFxLMS mit virtuellem Mikrofon – Regelphase.

In der Regelphase minimiert der FxLMS-Algorithmus die Differenz zwischen $e_r[k]$ und $e_h[k]$. Somit wird am realen Mikrofon ein Signal eingestellt, dass in der Trainingsphase vorhanden war, als das Fehlersignal $e_v[k]$ minimal war.

Modellierung der Regelumgebung

Um das Verhalten des Regelalgorithmus zu untersuchen wird ein Simulationsmodell der Regelumgebung erstellt. Das Simulationsmodell soll den in **Abbildung 4** dargestellten Versuchsaufbau in der Testkabine (0,7 m x 0,7 m x 2 m) realitätsnahe approximieren. Das Kopfende, der Boden und

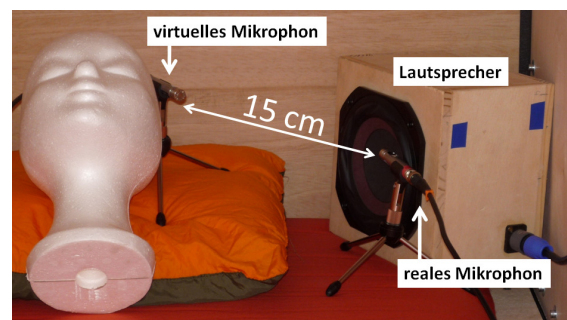


Abbildung 4: Testkabine (Kopfende mit Versuchsaufbau).

eine Seitenwand der Testkabine sind schallhart. Die andere Seitenwand, sowie die Decke sind schwingfähig und somit akustisch mit der Umgebung gekoppelt. Das Fußende der Kabine ist offen. Die Übertragungsstrecken S und S_v aus Abbildung 2 und 3 werden durch jeweils ein digitales Filter (FIR-Filter) mit 512 Koeffizienten modelliert. Die Filterkoeffizienten wurden dabei in der Testkabine mit einem LMS-Verfahren identifiziert. Als Modellierungssignal wurde bandbegrenzt weißes Rauschen in der Bandbreite $0 \text{ kHz} \leq f \leq 3.2 \text{ kHz}$ verwendet. In **Abbildung 5** ist die Identifikation der Übertragungsstrecken schematisch dargestellt.

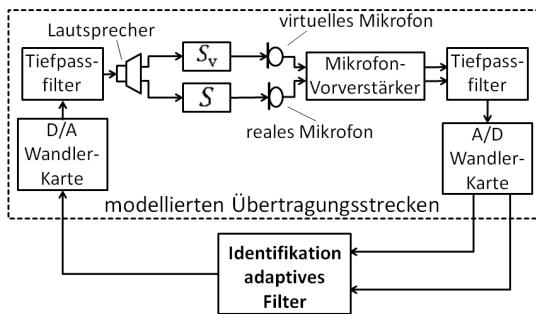


Abbildung 5: Modellierung der Übertragungsstrecken.

Der Regler arbeitet mit der Abtastfrequenz von 8 kHz. Diese ist die höchstmögliche Abtastfrequenz, mit der alle Rechenschritte des Regelalgorithmus innerhalb eines Taktschritts ausgeführt werden können. Der Regler wird nach den Blockschaltbildern in Abbildungen 2 und 3 in MATLAB-Simulink erstellt. In **Abbildung 6** sind die Modelle und der Übertragungsstrecken S und S_v dargestellt. Beide Übertragungsstrecken weisen eine Totzeit in der Impulsantwort auf. Die Totzeit wird zum einen durch die Laufzeit des Signals vom Lautsprecher zum Mikrophon (Schallausbreitung) und zum anderen durch die Verzögerungen der analogen Filter bedingt. Die Übertragungsstrecke S_v weist aufgrund des größeren Abstandes des

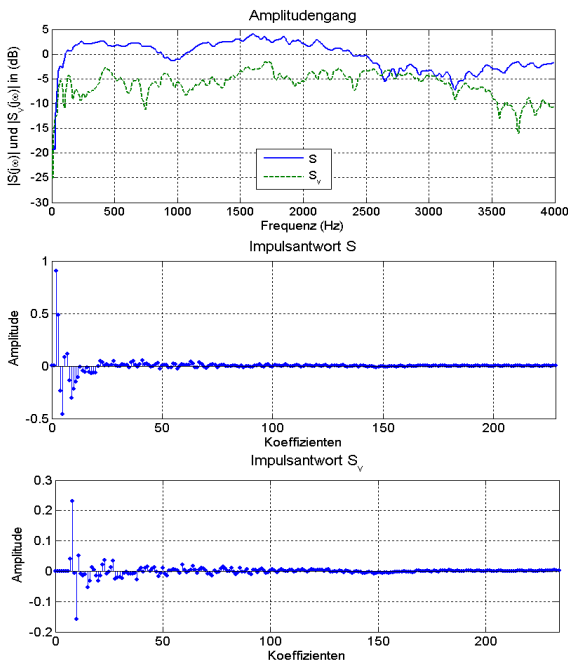


Abbildung 6: Amplitudengang und Impulsantwort der Übertragungsstrecken S und S_v .

virtuellen Mikrofons zum Lautsprecher eine höhere Totzeit und eine stärkere Dämpfung auf.

Für die Störsignale $d_r[k]$ und $d_v[k]$ wird jeweils ein bandbegrenzt weißes Rauschsignal in der Bandbreite $100 \text{ Hz} \leq f \leq 300 \text{ Hz}$ verwendet.

Simulation und Ergebnisse

In der Simulation werden die Auswirkungen folgender Faktoren auf den Regelerfolg untersucht: Unterschiedliche Koeffizientenanzahl für das Filter W (FIR-Filter), für das Filter H und für die reglerinterne Übertragungsstreckenmodelle \hat{S} und \hat{S}_v . Mit zunehmender Anzahl der Koeffizienten für das Filter W kann die optimale Lösung (Wiener Filter) besser geschätzt werden, die Gruppenlaufzeit nimmt jedoch zu, was zur Minderung des Regelerfolges führt. Auch bei dem Übertragungsmodell muss die Filterlänge hinreichend groß gewählt werden, um die Impulsantwort der Übertragungsstrecke genau abzubilden. Das Abklingverhalten der Impulsantwort wird mit 200 - 300 Koeffizienten hinreichend gut modelliert (siehe Abbildung 6). **Tabelle 1** zeigt eine Übersicht über den Regelerfolg bei unterschiedlichen Filterlängen. Ein Ergebnis der Simulation ist in **Abbildung 7** als Beispiel dargestellt.

Tabelle 1: Regelerfolge am virtuellen Mikrophon bei verschiedenen Filterlängen

W -Filter-Länge	H -Filter-Länge	Reduktion in dB
300	300	9,3
500	400	18,3
600	600	21,2
800	600	19,6

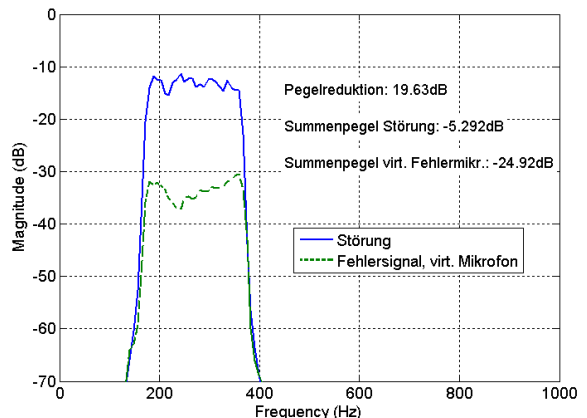


Abbildung 7: Schallpegelreduktion am virtuellen Ort (Simulation).

Experimente in der Testkabine, mit einem der Simulation entsprechendem Aufbau, zeigen eine Pegelreduktion von 15-20 dB am virtuellen Mikrophon. Das Simulationsmodell ist zur Abschätzung des Regelverhaltens in der realen Testkabine einsetzbar.

Literatur

- [1] Moreau D., Cazzolato B., Zander A., Petersen C.: A Review of Virtual Sensing Algorithms for Active Noise Control, in: Algorithms, 2008
- [2] Pawelczyk M.: Adaptive noise control algorithms for active headrest system, in: Control Engineering Practice, 2004
- [3] Elliton S.: Signal Processing, London: Academic Press, 2001
- [4] Moschytz G., Hofbauer M.: Adaptive Filter, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2000