

Aktive Geräuschminderung an einem Lüftungskanal

R. Schirmacher¹, P. Maier², H. Fast², J. Scheuren¹

¹ Müller-BBM, Schalltechnisches Beratungsbüro, Planegg b. München.

² Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München.

1. Einleitung

Aktive Schalldämpfer für Lüftungskanäle werden bereits seit längerer Zeit in der Literatur diskutiert, jedoch sind die Vorbehalte der Praktiker beim Einsatz solcher Systeme nach wie vor groß. Um die praktische Einsatztauglichkeit eines aktiven Schallabsorbers in einem Lüftungskanal zu studieren, wurden im Schalldämpferprüfstand von Müller-BBM verschiedene Konfigurationen aktiver Systeme aufgebaut und experimentell erprobt [1].

2. Vorstellung des Systems

Als Grundtyp des aktiven Systems wurde eine übliche Feed-Forward-Konfiguration mit einem Filtered-X-LMS-Algorithmus [2] gewählt, wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist. Dabei handelt es sich um ein einkanalisches System, mit dem nur die Ausbreitung ebener Wellen aktiv bedämpft werden kann. Die entsprechende obere Grenzfrequenz ergibt sich dabei aus dem Kanaldurchmesser und lag hier bei 498 Hz.

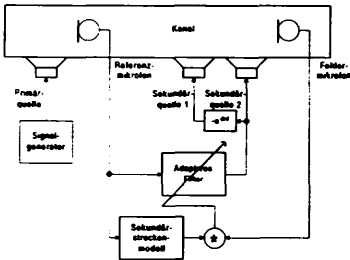


Abb. 1. Schematischer Aufbau des aktiven Systems

Der Versuchskanal bestand aus einem runden Stahlrohr mit einem Durchmesser von 40 cm und einer Wandstärke von 2 mm. Primärquellenseitig befand sich ein Gebläse, das für die Messungen mit Strömung eingesetzt wurde. Zur Verringerung seiner Eigengeräusche im Kanal dienten zwei passive Rohrschalldämpfer. Hinter diesen Schalldämpfern befand sich ein Breitbandlautsprechersystem, mit dem der zu reduzierende Primärschall eingestrahlt wurde. Am anderen Ende war der Kanal offen. Die Mikrofone wurden durch Bohrungen in der Kanalwand gesteckt und ragten 2 cm in das Kanalinnere. Für Messungen mit Strömung konnten Windbälle auf den Mikrofonen befestigt werden. Die Lautsprecher waren so am Kanal angeflanscht, daß ihre Membranaufhängung 5 cm hinter der Tangentialebene des Kanals lag. Der Abstand der beiden Sekundärquellen betrug 52 cm, was eine akustische Laufzeit von 1,5 ms zwischen ihnen ergibt.

Die adaptive Signalverarbeitung wurde auf einem TMS320C31-System mit 40 MHz Taktfrequenz implementiert, es wurden 12-Bit D/A und A/D-Wandler verwendet, die Abtastfrequenz betrug bei allen Experimenten 3,25 kHz.

3. Kompensationsquellen

Wird zur Kompensation des einfallenden Schalls lediglich ein einzelner Lautsprecher verwendet, so stellt die Kompensationsquelle einen Monopol dar, der omnidirektional, hier also in beide Kanalrichtungen abstrahlt. Damit kann das aktive System den einfallenden Schall im optimalen Fall nur noch schallweich reflektieren und

es kommt zu Rückkopplungen zum (omnidirektionalen) Referenzmikrofon bis hin zu einem „aktiven Resonator“ [3]. Durch die Verwendung von zwei Lautsprechern läßt sich im Kanal eine unidirektionale Quelle realisieren, die als echter Absorber wirkt. Nach [4] wird diese Quellenordnung auch als Swinbanks-Quelle bezeichnet, eine wichtige neuere Arbeit zu diesem Ansatz stellt [5] dar. Unter der Voraussetzung einer verschwindenden Schallabstrahlung in Richtung Primärquelle ergibt sich für den abgestrahlten Schalldruck in Richtung Fehlermikrofon im Verhältnis zum abgestrahlten Schalldruck eines Monopols ein sinusförmiger Verlauf mit Amplitude 2 und Nullstellen bei $kd = n\pi$, wobei k die Wellenzahl, d der Abstand der beiden Quellen und n eine natürliche Zahl ist. Erweiterungen dieses Konzeptes zur Verbreiterung des nutzbaren Frequenzbereiches sind in [6,7] zu finden.

4. Experimente

Bei dem beschriebenen Aufbau ergab sich die notwendige Verzögerung für eine Swinbanksquelle zu 5 Sample, die auf dem DSP realisiert wurde. Gemäß dem Swinbanks-Kriterium läßt sich so der Frequenzbereich von 55 - 275 Hz erfassen, die erste Nullstelle liegt bei 330 Hz. Das Sekundärstreckenmodell war 64 Koeffizienten lang und wurde vorab durch ein adaptives Filter bestimmt.

4.1. Experimente ohne Strömung

4.1.1. Breitbandanregung

Bei Experimenten ohne Strömung und breitbandiger Störsignalanregung ergaben sich in guter Übereinstimmung mit der Literatur breitbandige Reduktionen von über 20 dB und Spitzenreduktionen von 40 dB. Bei einer Monopolkompensationsquelle zeigten sich wie erwartet eine erhöhte Stehvermögen und stark ausgeprägte Resonanzen am Referenzmikrofon sowie am Fehlermikrofon eine Resonanz bei ca. 165 Hz, die zu Langzeitinstabilitäten auch mit „eingefrorenem“ Regler führte. Diese Effekte treten bei der Swinbanksquelle aufgrund der Richtwirkung der Quelle für Adaptionszeiten bis einige Stunden nicht auf, mit ihr lassen sich zwischen 100 Hz und 250 Hz die aufgrund der Kohärenz vorhergesagten maximalen Reduktionen erreichen.

Ein Problem besteht jedoch auch bei der Swinbanksquelle in Frequenzbereichen, in denen keine oder nur sehr schwache Abstrahlung durch die Kompensationsquelle möglich ist, da die korrekten Anteile von Referenz- und Fehlersignal in diesen Bereichen trotz der Bewertung mit der (hier betragsmäßig sehr kleinen) Sekundärstrecke dennoch zur Adaption beitragen. Da im Primärfilter auch die inverse Übertragungsfunktion der Kompensationsquelle modelliert ist, kommt es in den Bereichen schwacher Abstrahlung zu einem „Aufdrehen“ der Filterübertragungsfunktion, was nach längerer Adaptionszeit zu einer Verschlechterung der Nachbildung und letztlich zu Instabilitäten der Regelung führt.

Daher ist es notwendig, alle in diesen Frequenzbereichen vorhandenen korrelierten Signalanteile vor der A/D-Wandlung durch zusätzliche Filter soweit abzusenken, das sie im unkorrelierten Wandlerrauschen verschwinden. Dafür sind jedoch in der Regel Filter mit sehr großer Flankensteilheit notwendig, deren Laufzeiten die Einhaltung der Kausalitätsbedingung schwierig machen.

Beim eingesetzten System war eine Überhöhung der Koeffizienten nach 1 h erkennbar und führte nach ca. 8 h zur Instabilität des Systems. Zur Gewährleistung der Stabilität wären Filter mit einer Flankensteilheit von 72 dB/Oct notwendig gewesen, deren Lauf-

zeiten jedoch so groß waren, daß die Länge des Prüfstandes zur Einhaltung der Kausalitätsbedingung nicht ausreichte. Um den beschriebenen Effekt und die bestehende Lösungsmöglichkeit dennoch belegen zu können, wurde die Wanderauflösung des Systems von 12 bit auf 6 bit und damit deren Dynamik von 72 dB auf 36 dB reduziert. Dadurch war eine kausal realisierbare Flankensteilheit der Filter von 48 dB/Oct ausreichend. Beim Betrieb des modifizierten Systems war eine Erhöhung der Filterkoeffizienten noch nach 12 Stunden Adaptionszeit nicht zu beobachten.

4.1.2. Stationäre monofrequente Anregung

Abbildung 2 zeigt die mit monofrequenter Störerschall gemessenen Sumschallpegel ohne und mit aktivem System mit Swinbanksquelle, die mit einem Gleitsinus mit einer Änderungsgeschwindigkeit von 0,02 Hz/s ermittelt wurden. Hierdurch kann von stationären Verhältnissen ausgegangen werden. Die erreichten Reduktionen sind praktisch im gesamten wirksamen Bereich durch die Dynamik der Signalverarbeitung bzw. das Hintergrundgeräusch begrenzt.

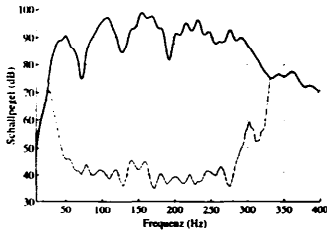


Abb. 2. Sumschallpegel am Fehlermikrofon bei monofrequenter Störerschall ohne (dick) und mit (dünn) aktivem System.

4.1.3. Instationäre monofrequente Anregung

Zur Untersuchung des Verhaltens bei instationärer Anregung wurden Messungen mit verschiedenen Änderungsgeschwindigkeiten des Gleitsinus durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt.

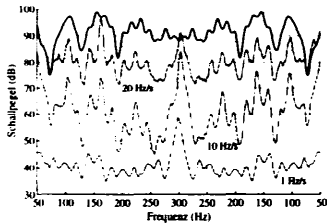


Abb. 3. Sumschallpegel am Fehlermikrofon bei Sinus-Sweeps ohne (dick) und mit (dünn) aktivem System bei verschiedenen Sweep-Geschwindigkeiten.

Es zeigt sich, daß der hier eingesetzte LMS-Algorithmus den schnelleren Änderungen nur noch eingeschränkt folgen kann. Wird das System jedoch mit einem mit weißem Rauschen adaptierten, festen Kompensationsfilter betrieben, so ergeben sich erwartungsgemäß unabhängig von der Sweepgeschwindigkeit die gleichen Reduktionen wie bei der entsprechenden Frequenz bei breitbandigen Signalen gemessen. Zur Verbesserung der Folgefähigkeit instationärer Signale kann der Einsatz anderer Filteralgorithmen in Erwägung gezogen werden [2].

4.2. Experimente mit Strömung

Mit dem Schalldämpferprüfstand ist es möglich, den Störerschallpegel unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit zu verän-

dem. Abbildung 4 zeigt die so ohne und mit aktivem System gemessenen Pegel am Fehlermikrofon bei Breitbandanregung. In Abbildung 5 sind die so erreichte und die aufgrund der Kohärenz mögliche Pegelminderung dargestellt. Die Übereinstimmung ist hervorragend und belegt, daß die reduzierte Leistungsfähigkeit auf die unkorrelierten Strömungsgeräusche und turbulente Druckschwankungen zurückzuführen ist.

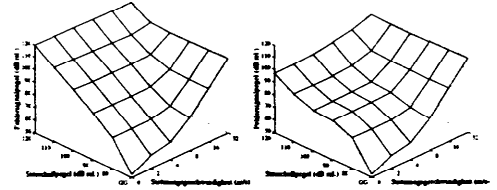


Abb. 4. Sumschallpegel am Fehlermikrofon ohne (links) und mit (rechts) aktivem System in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und Lautsprecherstörerschallpegel.

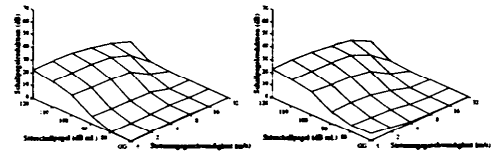


Abb. 5. Gemessene (links) und aus Kohärenzmessungen abgeleitete Sumschallpegelreduktion am Fehlermikrofon in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und Störerschallpegel

5. Zusammenfassung

Ein aktives System mit Swinbanksquelle stellt ein sehr robustes und stabiles Absorbersystem dar, dessen Langzeitstabilität auf die beschriebene Weise durch Ausnutzen grundlegender Eigenschaften digitaler Signalverarbeitungssysteme gewährleistet werden kann. Durch den Filtered-X-LMS-Algorithmus ist die Folgefähigkeit bei instationären Signalen begrenzt. Eine Vorhersage der Kompensation durch die Kohärenz ist auch bei Strömung möglich, diese wird mit einem realen System praktisch erreicht.

6. Literatur

- [1] Maier, P., Aktive Schallkompensation in Lüftungskanälen, Diplomarbeit, TU München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, 1996.
- [2] Schirmacher, R., Algorithmen und Modellierungskonzepte zur aktiven Schallfeldbeeinflussung mit Feed-Forward-Systemen. DAGA '96, S. 116.
- [3] Wicker, K., Schirmacher, R. und Guicking, D., One-dimensional active noise control in two directions, ACUSTICA - acta acustica, Vol. 82 (1996), p. 667-670.
- [4] Swinbanks, M.A., The active control of sound propagating in long ducts, J. Sound Vib., Vol. 27 (1973), p. 411-436.
- [5] Winkler, J. und Elliott, S.J., Adaptive control of broadband sound in ducts using a pair of loudspeakers, Acustica, Vol. 81 (1995), p. 475 - 488.
- [6] Eghtesadi, Kh. and Leventhal, H.G., A study of n-source active attenuator arrays for noise in ducts. J. Sound Vib., Vol. 91 (1983), p. 11-19.
- [7] Freienstein, H. und Guicking, D., Experimentelle Untersuchung von linearen Lautsprecheranordnungen als aktive Absorber in einem Kanal. DAGA '96, S. 112.