Aktive Verbesserung der Schalldämmung eines Doppelfensters: Vergleich zwischen Feedback- und Feedforward-Anordnungen

A. Jakob, M. Möser, Institut für Technische Akustik, TU Berlin, Einsteinufer 25, D-10587 Berlin

Einleitung Die beiden Scheiben eines Doppelglasfensters bilden zusammen mit dem Lufthohlraum zwischen ihnen ein Masse-Feder-Masse-System, das bei einer bestimmten Frequenz eine Resonanz besitzt. In dieser Resonanzfrequenz schwingen die beiden Scheiben mit großer Amplitude gegenphasig zueinander. Die Schalldämmung eines Doppelglasfensters ist dadurch in diesem Frequenzbereich gering. In den Arbeiten am Institut für Technische Akustik wird die Schalldämmung einer Laborversion eines Doppelfensters durch zusätzliche Beschallung des Hohlraumes über Lautsprecher verbessert, also durch aktive Maßnahmen. Die Lautsprecher werden so angesteuert, dass der Schalldruck im Innern des Fensters minimal wird. Zur Schätzung des Hohlraumschallfeldes wurden vier Mikrofone in den Hohlraum eingebracht, die als Fehlermikrofone für das aktive System arbeiten. Verschiedene Kombinationen der in der Nähe der Fensterecken eingebauten Lautsprecher und Mikrofone wurden bereits eingehend mit verschiedenen Anregesignalen, wie z.B. reinen Tönen, Rauschen und Verkehrslärmgeräuschen, untersucht [1, 2, 3]. In der vorliegenden Arbeit werden anhand eines mehrkanaligen Systems die Unterschiede zwischen Feedforward- und Feedback-Anordnungen erläutert. Bei der Feedforward-Anordnung wird auf Schwierigkeiten durch den konkreten Einbau in einen Fensterprüfstand eingegangen. Abschließend wird anhand eines ausgewählten Lärmbeispieles einerseits die Notwendigkeit adaptiver Verfahren und andererseits die Schwierigkeit der Bewertung von adaptiv-aktiven Systemen, wie dem hier diskutierten aktiven Fenster, erörtert.

In allen hier geschilderten Versuchen wurden die Signale der vier Fehlermikrofone mit Hilfe von ebenfalls vier Lautsprechern minimiert. Es wurden also immer ANC-Systeme mit 4 Fehlersensoren und 4 Sekundärquellen verwendet. Die Abtastrate des digitalen Systems wurde zu 800Hz gewählt und der wirksame Bereich der aktiven Maßnahme auf unter 400Hz eingestellt. Alle verwendeten digitalen Filter waren FIR-Filter und für die jeweils notwendigen Sekundärstreckenfilter, die zuvor off-line geschätzt wurden, wurde eine minimale Filterlänge von 100 Koeffizienten ermittelt und für alle Anordnungen verwendet. Die Filter zur Ansteuerung der Lautsprecher wurden mit dem bekannten filtered-x LMS-Algorithmus in seiner mehrkanaligen Variante adaptiert.

Feedforward Abb. 1 zeigt die Versuchsanordnung für die Versuche mit Feedforward-ANC-System. Es ist der Einbau des Fensters in den institutseigenen Fensterprüfstand zu erkennen, mit den Fehlermikrofonen und Sekundärlautsprechern zwischen den Scheiben. Im Empfangsraum wurde zur Bewertung der Maßnahmen über 6 Mikrofone der mittlere Schalldruck mit und ohne aktive Maßnahme gemessen. Im Senderaum wurde über einen Signalgenerator und Lautsprecher entsprechend der Abtastrate bandbegrenztes weißes Rauschen zur Anregung eingespielt.

In einem ersten Versuch wurde das für ein Feedforward-System nötige Referenzsignal direkt vom Signalgenerator abgegriffen. Diese Anordnung stellt einen idealisierten Fall dar und liefert quasi die bestmöglich erreichbaren Ergebnisse für diese Anzahl und Anordnung an Lautsprechern und Mikrofonen. Im zweiten Versuch wurde sich einem realistischeren Aufbau genähert und zur Referenzsignalgewinnung ein Mikrofon vor dem Fenster aufgestellt. Bei einer Realisierung eines solchen aktiven Fensters würde man dieses Mikrofon zweckmäßigerweise in den äußeren Rahmen einbauen. Die verwendete Hardware des digitalen Systems erlaubte zusammen mit den anderen oben erwähnten Parametern eine maximale Länge der (vier) adaptiven FIR-Filter von je 256 Koeffizienten.

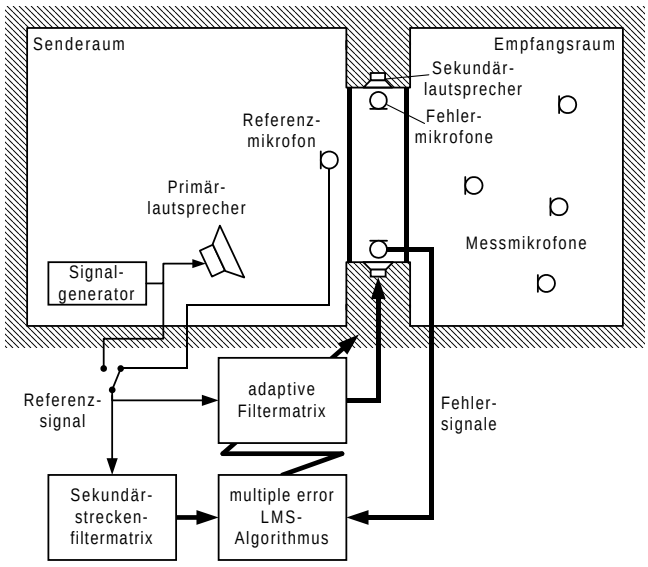

Abbildung 1: Skizze zum Versuchsaufbau des aktiven Fensters mit ANC-System in Feedforward-Anordnung.

Abb. 2 zeigt die gemessenen mittleren Terzpegel im Empfangsraum. Deutlich zu erkennen ist, dass das Maximum ohne aktive Maßnahme (durchgezogene Linie) bei 100Hz liegt. Dort liegt auch die Tonpilzresonanz des verwendeten Fensters. Bei „idealisierter“ Feedforward-Anordnung (gestrichelte Linie) konnte in allen Terzen eine hohe Pegelminderung erzielt werden. Die Verbesserung des aus den Terzpegeln ermittelten Summenpegels betrug in diesem Fall 9,7dB.

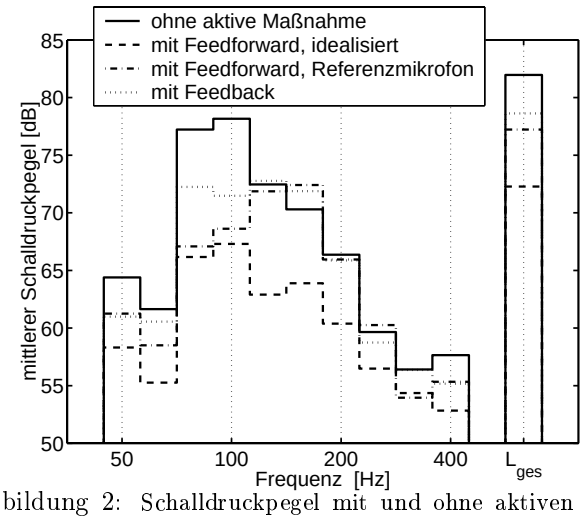

Abbildung 2: Schalldruckpegel mit und ohne aktiven Maßnahmen bei Anregung mit bandbegrenztem weißem Rauschen in Feedforward-Anordnung und Referenzsignalgewinnung über ein Mikrofon oder über den Signalgenerator („idealisiert“) sowie in Feedback-Anordnung.

Im Falle mit Referenzmikrofon fielen die Verbesserungen im Bereich der Tonpilzresonanz fast ebenso hoch aus, in den Bereichen darüber aber deutlich geringer. Vor allem in der 160Hz-Terz fällt eine Verschlechterung im Vergleich zum Fall ohne ak-

tive Maßnahme auf. Im Summenpegel ergibt sich daraus nur noch eine Verbesserung von 4,7dB. Schaut man auf die Leistungsspektren der mittleren Fehlerenergie (Abb. 3), d.h. auf die mittleren Leistungsspektren an den Mikrofonen zwischen den Fensterscheiben, stellt man fest, dass im Bereich dieser Terz die Regelung bei Verwendung des Referenzmikrofons nicht funktioniert. Auch die Kohärenz - hier nicht dargestellt - zwischen Signalgeneratorausgang und Referenzmikrofon bricht dort ein, was daran liegt, dass sich im Senderaum natürlich auch stehende Wellen ausbilden und sich das Referenzmikrofon in einem Knoten einer oder mehrerer Moden befindet. Das bedeutet, dass die Position des z.B. im Fensterrahmen eingebauten Referenzmikrofons relativ zum Senderaum zu einem großen Teil die gemessene Schalldämmung bestimmt. Messungen in anderen Fensterprüfständen mit anderen Eigenschaften bzw. Geometrien würden andere - zufällige - Schalldämmmaße liefern. An Hauserfassaden würden aus Sicht des Referenzmikrofons wieder andere Gegebenheiten vorliegen. Für untereinander vergleichbare Messungen müssten daher eigentlich Freifeldbedingungen auf der Sendeseite vorliegen.

Ein weiterer Grund für die geringere Wirksamkeit gegenüber der idealisierten Anordnung ist die Rückkopplung zwischen Sekundärlautsprechern und Referenzmikrofon. Eine eigentlich nötige Feedback-Kompensation wurde hier nicht realisiert.

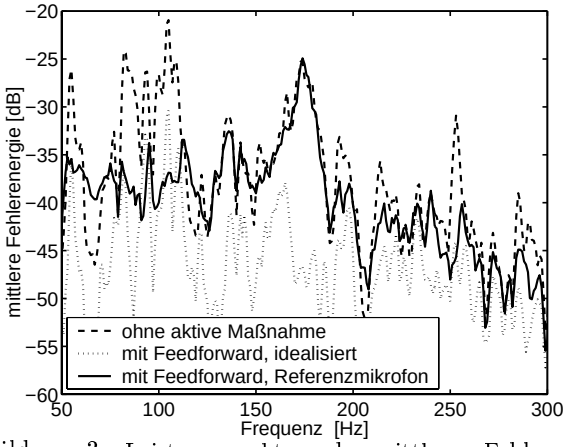

Abbildung 3: Leistungsspektren der mittleren Fehlerenergie ohne und mit aktiven Maßnahmen in Feedforward-Anordnung.

Feedback Feedback-Anordnungen bieten den Vorteil ohne Referenzmikrofon auszukommen. Eine Möglichkeit, einen adaptiven Feedback-Regler zu realisieren, ist in [4] angegeben. Bei bekannten Sekundärstrecken kann die Feedback-Anordnung in eine Feedforward-Anordnung umgedeutet werden, bei der das Störsignal als Referenzsignal dient. Das Störsignal wird aus den Fehler- und Lautsprechersignalen geschätzt (vgl. Abb. 4). Es ergeben sich so viele Referenzsignale wie Fehlermikrofone vorhanden sind. Gegenüber der Feedforward-Anordnung ergibt sich erheblicher zusätzlicher Rechen- und Speicheraufwand für nun mehrere adaptive Filter sowie den Referenzsignalschätzer, der im wesentlichen eine zusätzliche Filterung mit allen Sekundärstrecken enthält. Mit der vorhandenen Hardware konnten trotz Reduzierung des Referenzsignalschätzers auf einige wenige Sekundärstrecken nur adaptive Filter bis zu einer Länge von 128 realisiert werden. Diese Einschränkungen haben natürlich negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des ANC-Systems, weshalb die Pegelminderungen (punktierte Linie in Abb. 2) auch deutlich geringer ausfallen: in der Summe nur noch 3,3dB.

Verkehrslärmbeispiel Abschließend wird noch ein Beispiel für Verkehrslärm gegeben. Eingesetzt wurde der o.a. adaptive Feedback-Regler. Abb. 5 zeigt die Terzpegel eines warmlaufenden und anschließend startenden Hubschraubers mit starken tonalen Anteilen im Bereich der Tonpilzresonanz des Fensters. Mit diesem Geräusch wurden zwei Messungen durchgeführt: Feedback-Regler 1 bezeichnet einen Regler, der zunächst auf das weiße Rauschen der vorherigen Versuche adaptiert und die

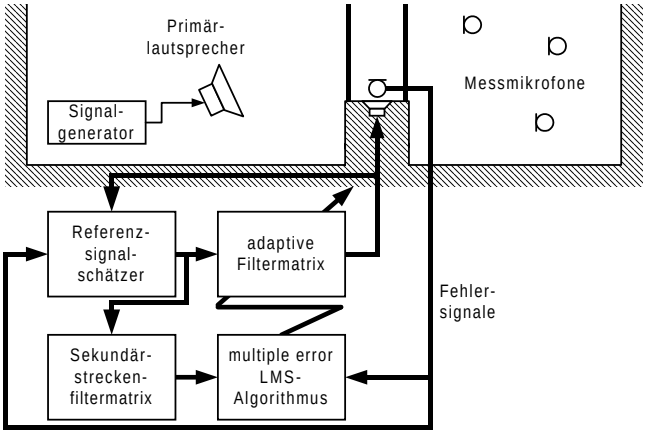

Abbildung 4: Skizze zum Versuchsaufbau des aktiven Fensters mit ANC-System in Feedback-Anordnung.

Adaption dann angehalten wurde. Regler 2 wurde ausgehend von Regler 1 auf das Hubschraubergeräusch weiter-adaptiert. Die Unterschiede sind deutlich (>5dB) und waren auch hörbar, da vor allem die tonalen Anteile bei Regler 2 deutlich stärker reduziert wurden. Dieser einfache Versuch zeigt einerseits die Notwendigkeit adaptiver Regler für die gegebene Anwendung und andererseits, dass eine Messung mit weißem Rauschen nur bedingt eine verwertbare Aussage für die Schalldämmung eines adaptiv-aktiven Fensters darstellt. Während es bei passiven - also zeitinvarianten - Systemen im Prinzip relativ einfach möglich ist aus einem mit Rauschen gemessenen Frequenzgang die Antwort für beliebige Anregespektren abzuschätzen, ist dies natürlich für adaptive - also zeitvariante - Systeme nur unter genauer Kenntnis des verwendeten Algorithmus überhaupt möglich und deutlich schwieriger.

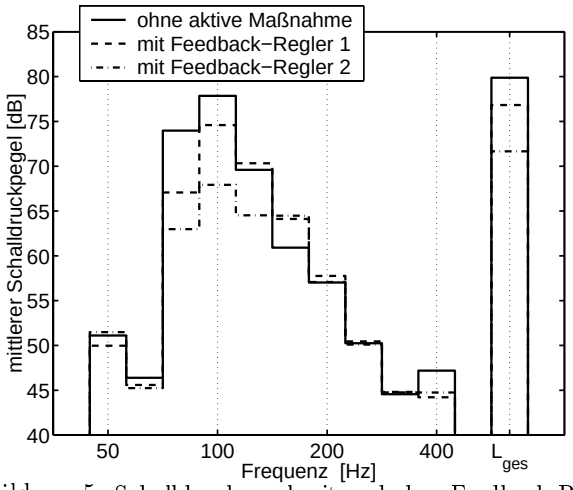

Abbildung 5: Schalldruckpegel mit und ohne Feedback-Regler bei Anregung durch einen sich warm laufenden und anschließend startenden Hubschrauber.

Diese Arbeit wird von der DFG im Rahmen des Projektes „Aktive Doppelschalen“ gefördert.

Literatur

[1] A. Jakob, M. Möser. Enhancement of the transmission loss of double panels by means of actively controlling the cavity sound field. In *Active 99*, pages 363–374, 1999.

[2] A. Jakob, M. Möser. Verbesserung der Schalldämmwirkung von Doppelschalen durch aktive Minderung des Hohlraumfeldes. In *Fortschritte der Akustik — DAGA 2000*, 2000.

[3] A. Jakob, M. Möser. Active control of the cavity sound field of double panels with a feedback controller. In *7th International Congress on Sound and Vibration — ICSV7*, 2000.

[4] S.M. Kuo, D.R. Morgan. *Active noise control systems.* John Wiley & Sons, 1996.