Antischall-Fenster in Theorie und (Labor)-Praxis

André Jakob

Institut für Technische Akustik, Technische Universität Berlin, 10587 Berlin, Deutschland, Email: andre.jakob@tu-berlin.de

Einleitung

In den letzten Jahren wurden am Institut für Technische Akustik der TU Berlin die Möglichkeiten der Verbesserung der Schalldämmung von Doppelglasfenstern durch aktive Maßnahmen in Theorie und Praxis erforscht. Es wurde sowohl die Einleitung von Luftschall in den Fensterhohlraum als auch die Einleitung von Kräften in die Scheiben in Betracht gezogen (vgl. Abb. 1). Für die theoretischen Untersuchungen wurde ein modales Modell eines aktiven Doppelglasfensters aufgestellt und umfangreiche Parametervariationen mit diesem durchgeführt. Zur praktischen Laboruntersuchung wurde ein Antischall-Versuchsfenster aufgebaut und zahlreiche Messungen in Feedforward- und Feedback-Anordnung, mit unterschiedlichen Lautsprecher- und Mikrofonanzahlen sowie -anordnungen bzw. -kombinationen, mit verschiedenen Geräuschszenarien und auch mit Schwingerregern als Alternative durchgeführt.

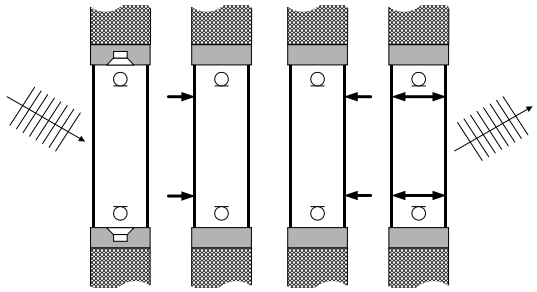

Abbildung 1: Ausführungsbeispiele (Schnitt) für Antischallfenster mit Lautsprechern im Hohlraum (ganz links) oder Kräften auf den Scheiben sowie Mikrofonen als Fehlersensoren im Hohlraum.

Theorie

Es wurde ein analytisches Modell erstellt, das auf Modensummen für Scheiben und Fensterhohlraum basiert. Das System Doppelglasfenster lässt sich durch jeweils eine Biegewellendifferentialgleichung für die Scheiben und durch eine Luftschallwellendifferentialgleichung für den Hohlraum beschreiben. Die einfallende Schallwelle, die Lautsprecher und/oder Kräfte sowie das bzw. die jeweils benachbarte(n) Teilsystem(e) stellen dabei die jeweiligen Anregungen für die Teilsysteme dar. Durch letztere sind die drei Differentialgleichungen gekoppelt. Die ausführliche Herleitung dieses Modells ist in [2] gegeben. Mögliche zu minimierende Größen sind z.B.:

- abgestrahlte Schallleistung empfangsseitig,
- mittleres Schnellequadrat einer der beiden Scheiben,
- mittleres Schalldruckquadrat im Fensterhohlraum,
- lokales Schnellequadrat auf einer der Scheiben,
- lokales Schalldruckquadrat im Fensterhohlraum.

Während die ersten drei eher prinzipiellen Untersuchungen dienen, entsprechen die letzten beiden praktischen Realisierungsmöglichkeiten durch Mikrofone im Hohlraum als Fehlersensoren oder Beschleunigungsaufnehmer auf einer der Scheiben. Natürlich lassen sich Kombinationen der Größen als Minimierungskriterien denken. In [3] sind die Ergebnisse einer umfangreichen Parameterstudie dargestellt, hier nur die wichtigsten Trends aufgelistet:

- Eine Minimierung der abgestrahlten Schallleistung ist besser als eine Minimierung der inneren Scheibenschwingung, diese ist besser als eine Minimierung des Hohlraumschallfeldes und diese ist besser als eine Minimierung der äußeren Scheibenschwingung.
- Die lokale Schalldruckminimierung ist meist besser als die lokale Schnelleminimierung der inneren Scheibe (zumindest in dB(A)).
- Bei Lautsprecheranregung entfaltet sich die Wirkung vor allem im Bereich der Tonpilzresonanz des Masse-Feder-Masse-Schwingers, der durch das Scheibe-Hohlraum-Scheibe-System gebildet wird.
- Lautsprecher im Hohlraum sind besser als Kräfte auf den Scheiben.
- Kräfte auf der äußeren (sendeseitigen) Scheibe sind besser als Kräfte auf der inneren (empfangsseitigen).
- Gemischte Varianten mit Lautsprechern und Kräften bringen keine Verbesserungen gegenüber der gleichen Anzahl an Lautsprechern.
- Quadratische Fenster sind leichter zu kontrollieren, da Resonanzfrequenzen unterschiedlicher Moden zusammenfallen.
- Größere Scheibenabstände sind für die Kontrolle vorteilhaft.
- Unterschiedliche Scheiben können Vorteile bringen.

(Labor)-Praxis

Es wurden zwei Antischallfenster aufgebaut und im Fensterprüfstand des Institutes untersucht. Zuerst wurde mit einem Scheibenabstand von 20 cm gearbeitet um relativ große Lautsprecher einbauen zu können. Die erreichten Verbesserungen dieses Fensters lagen bei bis zu 8 dB im Summenpegel und bei bis zu 10 dB in der die Tonpilzresonanz enthaltenden „besten“ Terz. Die Messergebnisse sind ausführlich in [4, 5] dokumentiert.

Für das zweite Fenster wurde der Scheibenabstand auf 4 cm reduziert und sehr schmale aber gleichzeitig recht lange Lautsprecher eingebaut. Diese außerdem sehr preiswerten und wahrscheinlich ursprünglich für Fernsehgeräte gedachten Lautsprecher arbeiteten sehr gut im tieffrequenten Bereich der Tonpilzresonanz bei Außengeräuschpegeln bis zu 100 dB und mehr [6, 7], obwohl sie laut Hersteller eigentlich nur für einen höheren Fre-

quenzbereich eingesetzt werden sollten. Es ist eben ein Unterschied, ob nur ein kleines Volumen, wie ein Fensterhohlraum beschallt werden soll oder ein ganzes Zimmer. Die Verbesserungen durch die aktive Maßnahme, betrugen bei diesem Fenster je nach Lautsprecheranzahl und -anordnung bis zu 5 - 7 dB bei breitbandigen Signalen und deutlich über 10 dB bei stark tonhaltigen Signalen wie Geräuschen von Propellerflugzeugen und Hubschraubern. Diese unterschiedlichen Ergebnisse deuten auch darauf hin, dass der Einfluss der Controller-Hardware nicht unerheblich ist. Bei den breitbandigen bzw. sehr unregelmäßigen Signalen macht sich die Verzögerungszeit der Controller-Hardware klar bemerkbar.

Im Fensterprüfstand lässt sich sinnvoll nur mit einer Feedback-Anordnung also ohne Referenzmikrofon messen. Der Grund ist, dass sich ein Referenzmikrofon im Senderaum des Fensterprüfstandes bei den tiefen hier betrachteten Frequenzen stets in einer Knotenlinie einer oder mehrerer Moden befinden würde. Das aktive System würde dann bei den zugehörigen Frequenzen nicht reagieren und das Messergebnis somit von der zufälligen Position des Referenzmikrofons abhängen [8].

Als eine sehr erfolgverbessernde Maßnahme hat sich ein Verschalten von Lautsprechern und Mikrofonen zu parallelbetriebenen Lautsprechergruppen und Mikrofonsummen [9, 10] gezeigt. Dadurch können auch einkanalige Regler schon recht gute Ergebnisse liefern [11].

Eine messtechnische Überprüfung und Bestätigung der durch Simulation gefundenen Aussage, dass Lautsprecher im Hohlraum Kräften auf den Scheiben vorzuziehen sind, ist in [12] dokumentiert.

Zusammenfassung und Ausblick

Antischallfenster mit Lautsprechern und Mikrofonen zwischen den Scheiben können den Schalldruckpegel im Empfangsraum bei breitbandigen Geräuschen um ca. 5 - 7 dB(A) senken und um deutlich mehr als 10 dB(A) bei stark tonhaltigen tieffrequenten („Brumm“)-Geräuschen. Der Einsatz von schmalen Billiglautsprechern ist auch bei sehr hohen Außengeräuschpegeln möglich. Krafteinleitung in die Scheiben als Alternative zu den Lautsprechern im Hohlraum erscheint nicht sinnvoll. Zur Aufrechterhaltung der guten thermischen Eigenschaften heutiger Isolierglasfenster erscheint ein Dreischeibenaufbau sinnvoll [13]. Eine modernere bessere DSP-Hardware als die in den bisherigen Versuchen verwendete dürfte sich günstig auswirken, vor allem auf unregelmäßige, d.h. nicht periodische, Signale.

Eine Realisierung als Produkt ab heutigem Wissensstand könnte vermutlich in 1,5 - 2 Jahren erfolgt sein. Dazu sind vor allem folgende Schritte notwendig:
Eventuell auftretende Instabilitäten des Regelalgorithmus müssen unbedingt vermieden bzw. wenigstens schnell erkannt werden. Ebenso muss ein Ausfall von Lautsprechern und Mikrofonen erkannt werden. Geeignete Fensterrahmen und -flügel zur Aufnahme eines evtl. „drei-scheibigen“ Fensters mit Lautsprechern und Mikrofonen im Fensterhohlraum müssen entwickelt werden. Eine kompakte Elektronik (DSP, A/D-, D/A-Umsetzer, Stromversorgung) muss entwickelt und möglichst zusammen mit der Verkabelung in den Fensterflügel integriert werden.

Die Hauptkosten eines solchen Fensters dürften durch die noch durchzuführenden Entwicklungsarbeiten sowie durch die handwerkliche Herstellung bzw. Umstellung auf eine evtl. maschinelle Produktion entstehen — nicht so sehr dagegen durch die verwendeten Komponenten selbst, wie Lautsprecher, Fehlermikrofone und, bei entsprechend hoher Stückzahl, die DSP-Hardware.

Literatur

[1] Möser M, Jakob A. Abschlussbericht zum DFG-Projekt Mo 390/6-2 „Aktive Doppelschalen“, 2003

[2] Jakob A, Möser M. A modal model for actively controlled double-glazed windows, Acta Acustica united with Acustica, 89(3):479–493, 2003.

[3] Jakob A, Möser M. Parameter study with a modal model for actively controlled double-glazed windows, Acta Acustica united with Acustica, 90(3):467–480, 2004.

[4] Jakob A, Möser M. Active control of double-glazed windows. Part I: Feedforward control, Applied Acoustics, 64(2):163-182, 2003

[5] Jakob A, Möser M. Active control of double-glazed windows. Part II: Feedback control, Applied Acoustics, 64(2):183-196, 2003

[6] Jakob A, Möser M, Ohly C. Ein aktives Doppelglas-Fenster mit geringem Scheibenabstand, DAGA 2002

[7] Jakob A, Möser M. An actively controlled double-glazed window with small pane distance, Forum Acusticum, 2002

[8] Jakob A, Möser M. Aktive Verbesserung der Schalldämmung eines Doppelfensters: Vergleich zwischen Feedback- und Feedforward-Anordnungen, DAGA 2001

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

[10] Jakob A, Möser M. Verbesserung der Schalldämmwirkung von Doppelschalen durch aktive Minderung des Hohlraumfeldes, DAGA 2000

[11] Jakob A, Möser M. Active control of the cavity sound field of double panels with a feedback controller, 7th International Congress on Sound and Vibration - ICSV7, 2000, p. 281–288

[12] Jakob A, Möser M, Ohly C, Panek L. Aktive Doppelglasfenster: Vergleich zwischen Luft- und Körperschallgegenquellen, DAGA 2003

[13] Bauers R, Jakob A, Möser M. Ein aktives Dreischeiben-Fenster, DAGA 2005