Aktive Doppelglasfenster: Vergleich zwischen Luft- und Körperschallgegenquellen

A. Jakob, M. Möser, C. Ohly, L. Panek

Institut für Technische Akustik, Technische Universität Berlin, Einsteinufer 25, D-10587 Berlin
andre.jakob@tu-berlin.de

Einleitung

Im letzten Jahr wurde ein aktives Doppelglas-Fenster mit geringem Scheibenabstand vorgestellt [1]. Durch gegenschall-erzeugende Lautsprecher im Hohlraum zwischen den Scheiben, die mit Hilfe von ebenfalls im Hohlraum befindlichen Mikrofonen eingestellt wurden, konnte die Schalldämmung des Fensters verbessert werden. Der mittlere im Empfangsraum des Fensterprüfstandes gemessene Schalldruckpegel konnte durch die aktive Maßnahme um 3 bis 5 dB(A) bei breitbandigen Geräuschen (7 bis 9 dB in der die Tonpilzresonanz enthaltenden Terz) und 10 bis 16 dB(A) bei stark tonhaltigen Geräuschen (entsprechend 11 bis 18 dB in der Tonpilzresonanz-Terz) abgesenkt werden. Die verwendeten handelsüblichen Lautsprecher ließen einen kleinen Scheibenbstand von 40 mm zu. Bei noch kleinerem gewünschtem Scheibenabstand müssten neue Lautsprecher entwickelt werden.

Ein alternativer Ansatz letzteres Ziel zu erreichen könnte der Einsatz von Schwingerregern auf einer oder beiden Fensterscheiben sein statt der Lautsprecher im Scheibenzwischenraum. Zu diesem Zweck können die Schwingerreger auch von außen auf den Scheiben angebracht werden.

Mit Hilfe eines theoretischen Modells – basierend auf Modalansätzen für die beiden Scheiben und den Hohlraum sowie Kopplung dieser – wurden kürzlich Simulationen sowohl mit Lautsprechergegenanregung des Hohlraums als auch mit Schwingungsgegenanregung der Scheiben durchgeführt [2]. Es zeigte sich eine Überlegenheit der Lautsprecheranregung gegenüber der Schwingungsanregung. Ferner ergaben die Berechnungen, dass eine Krafteinleitung in die „äußere“ Scheibe, also die dem einfallenden Schall zugewandte Scheibe, zu besseren Ergebnissen führt als eine Krafteinleitung in die „innere“ Scheibe und auch zu besseren Ergebnissen als eine Krafteinleitung, die sich quasi zwischen beiden Scheiben abstützt.

In dieser Arbeit nun wird über Messungen sowohl mit Lautsprecher- als auch mit Kraftsekundärquellen und auch mit beidem gleichzeitig berichtet, die am eingangs zitierten aktiven Fenster durchgeführt wurden. Den Ergebnissen der Berechnungen [2] folgend wurden die Sekundärkräfte in die äußere Scheibe eingeleitet.

Eingesetzte Schwingungsquellen

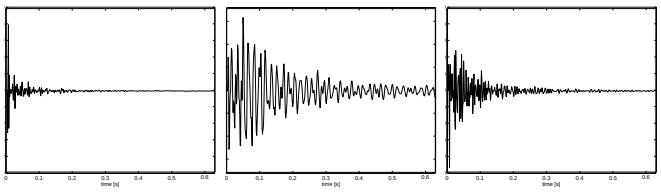
Als Schwingungsquellen wurden zwei Typen verwendet: 1.) kleine elektrodynamische Shaker (Hersteller: Peerless) und 2.) piezoelektrische Schwingerreger aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) (Hersteller: ACX). Es wurden jeweils zwei Exemplare auf die äußere Scheibe geklebt: die Shaker in der Nähe der oberen Ecken und die Piezoelemente in der Nähe der unteren Ecken, alle in ca. 10% Entfernung von ihrer jeweiligen Ecke (vgl. Abb. 1). Die Shaker sind für den Einsatz als Schwingerreger für Flachmembran-Lautsprecher konzipiert. Sie können mit herkömmlichen Lautsprecherverstärkern betrieben werden, wohingegen die Piezoelemente spezielle Verstärker benötigen, die deren hohe kapazitive Lasten bei Spannungen bis zu ±200 V im gewünschten Frequenzbereich treiben können. Die Piezoelemente sind als sogenannte „Patches“ ausgeführt, d.h. als flache Scheiben, bei denen eine in Richtung der Dicke angelegte elektrische Spannung eine Längenänderung in Richtung einer der langen Seiten bewirkt. Die Ausdehnungen sind äußerst gering, die erzeugten Kräfte dabei aber äußerst hoch. Werden die Piezo-Patches einseitig auf die Fensterscheibe aufgeklebt, leiten diese Biegemomente in die Scheibe ein und sind damit ebenso in der Lage Biegewellen anzuregen wie Punktkräfte.

Abbildung 1: **Shaker und Piezoelement am Fenster.**

Sekundärstrecken

Unterschiede zwischen den drei Anregemechanismen ergaben sich schon bei der Realisierung der adaptiven Algorithmen für die aktive Maßnahme. Während wie in früheren Messungen die Impulsantworten der Sekundärstrecken bei Lautsprecheranregung relativ kurz waren (ca. 100 Filterkoeffizienten bei einer Abtastfrequenz von 800 Hz), zeigten sich bei den verwendeten Schwingerregern längere Ausschwingzeiten. Insbesonde-

re die elektrodynamischen Shaker wiesen vergleichsweise große Zeitkonstanten auf. Letzteres Verhalten ist nicht auf die Glasscheiben zurückzuführen, wie auch ein Vergleich mit den Piezoelementen bestätigt, sondern auf eine Resonanz der Shaker bei ca. 55 Hz. Die verwendete Signalprozessor-Hardware erlaubte eine maximale Länge der Sekundärstreckenfilter von 512 Koeffizienten. Abb. 2 zeigt qualitativ die unterschiedlichen Impulsantworten (Filterkoeffizienten).



„Lautsprecher“ „Shaker“ „Piezoelement“

Abbildung 2: Impulsantworten der Sekundärstrecken

Messergebnisse

Das Fenster war wie bei allen früher geschilderten Experimenten im Fensterprüfstand installiert. Die Daten waren: Fensterscheiben jeweils 1000×1250×4 mm Floatglas, Scheibenabstand 40 mm, Tonpilzresonanz ca. 125 Hz, unterste Scheibenresonanz ca. 15 Hz, unterste Hohlraumquerresonanz ca. 140 Hz.

Für die Experimente wurde ein adaptives Feedforward-System mit multiple error LMS-Algorithmus eingesetzt. Die von der Hardware erlaubte maximale Anzahl der Filterkoeffizienten der adaptiven Filter und der der Sekundärstrecken variierte je nach Anzahl der Kanäle. Das Referenzsignal wurde direkt vom Signalgenerator abgenommen. Es wurde mit bandbegrenztem weißen Rauschen nach einer Adaptionszeit von ca. 5 Minuten der mittlere Schalldruckpegel im Empfangsraum gemessen.

Die Ergebnisse für Shaker und Piezoelemente unterscheiden sich nur marginal und sind daher hier nur für die Piezoelemente dargestellt. Die folgenden Aussagen gelten ebenso für die Shaker. Beispielhaft sind hier die Ergebnisse für wenige ausgewählte Konfigurationen gezeigt. In Abb. 3 wurden jeweils zwei Aktoren verwendet, also zwei zu adaptierende Filter, d.h. entweder zwei Lautsprecher oder zwei Piezoelemente oder ein Lautsprecher und ein Piezoelement gleichzeitig. Es wurden stets vier Fehlermikrofone verwendet (4i2o). Die Lautsprecher lieferten Verbesserungen von knapp 4 dB, während die beiden Kräfte praktisch kaum Verbesserungen erzielten. Bemerkenswert ist, dass die „gemischte“ Variante (1 LS + 1 Piezo) annähernd gleiche Ergebnisse lieferte wie zwei Lautsprecher.

Für die Ergebnisse der Abb. 4 wurde zunächst eine Anordnung bestehend aus sechs parallel geschalteten Lautsprechern, von denen sich jeweils drei an den senkrechten Seiten gegenüberliegend befanden, verwendet, so dass nur ein digitales Filter zu adaptieren war (4i1o). Auch hier wurden alle vier Fehlermikrofone eingesetzt. Diese symmetrische Lautsprecheranordnung war schon aus früheren Versuchen als besonders günstig bekannt. Sie liefert deutlich höhere Erfolge als die aufwendigere Variante mit zwei adaptiven Filter aus Abb. 3. Allerdings konnte hier die doppelte Anzahl an Filterkoeffizienten sowohl des adaptiven Filters als auch der Sekundärstreckenfilter verwendet werden. In einem zweiten Experiment wurden zusätzlich zu diesen Lautsprechern die beiden Piezoelemente verwendet, so dass drei Filter – mit jeweils wieder der Hälfte der Koeffizienten – zu adaptieren waren (4i3o). Es konnte keine Steigerung der Verbesserungen durch die zusätzlichen Kräfte beobachtet werden, sondern vielmehr eine deutliche Verringerung derselben.

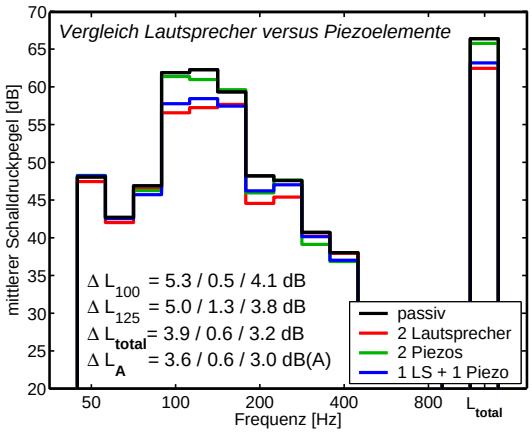


Abbildung 3: Messungen mit zwei Aktoren

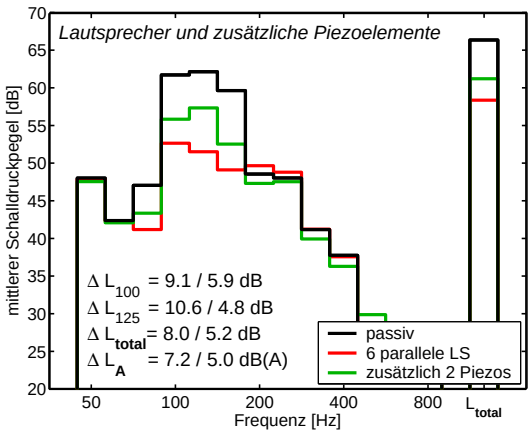


Abbildung 4: Messungen mit ein und drei Aktoren

Zusammenfassung

Es hat sich gezeigt, dass der Einsatz von Körperschallgegenquellen beim „aktiven Fenster“ aus akustischer Sicht keine Vorteile gegenüber Lautsprechern im Scheibenzwischenraum bietet. Der einzige Vorteil überhaupt scheint die Möglichkeit zu sein den Scheibenabstand beliebig klein machen zu können.

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

Literatur

[1] A. Jakob, M. Möser, and C. Ohly. Ein aktives Doppelglas-Fenster mit geringem Scheibenabstand. In *Fortschritte der Akustik – DAGA 2002*, 2002.

[2] A. Jakob and M. Möser. A modal model for actively controlled double-glazed windows. *zur Veröffentlichung angenommen bei ACUSTICA – acta acustica*, 2003.