

Aktive akustische Barriere

Sten Böhme¹, Delf Sachau², Thomas Kletschkowski³

¹ Professur für Mechatronik, HSU HH,22043 Hamburg, Deutschland, Email: stenboehme@hsu-hh.de

² Professur für Mechatronik, HSU HH,22043 Hamburg, Deutschland, Email: sachau@hsu-hh.de

³ Professur für Mechatronik, HSU HH,22043 Hamburg, Deutschland, Email:kletsch@hsu-hh.de

Problemstellung

In vielen technischen Anwendungen werden durch Maschinenlärm, Propellerlärm oder anderen Primärquellen stehende Wellenfelder im niederen Frequenzbereich ($f < 500$ Hz) in Innenräumen induziert. Aufgrund von Komfort oder Arbeitsschutzbestimmungen kann der Einsatz von aktiven Systemen für die Lärmreduktion notwendig sein. Der meist stationäre harmonische Störschall wird oft über eine begrenzte Anzahl von Transmissionswegen durch Körperschall oder Luftschall in den Innenraum übertragen. Bei Schallfeldern die durch Strukturschwingungen dominiert werden, empfiehlt sich die Verwendung von nicht akustischen Komponenten für die aktive Lärmreduktion [1]. Bei Lärm, der primär durch die Anregung von Innenraummoden entsteht, werden in der Regel akustische Aktuatoren und Sensoren verwendet [1]. Dafür ist eine globale Verteilung der Systemkomponenten notwendig. Die Anwendung von Active Noise Control (ANC) – Systemen lohnt sich nur bei einer geringen modalen Dichte und einfachen Raumgeometrien, da bei steigender Modenanzahl die zur Regelung benötigte Menge an Hardware eine Anwendung ausschließt und die Raummoden bekannt sein müssen [1]. Gerade in Flugzeugen und anderen Fahrzeugen ist die globale Dislokalisierung von Systemkomponenten problematisch. Durch eine lokale Anordnung von akustischen Aktuatoren und Sensoren in den Schalltransmissionspfad soll mit Hilfe der destruktiven Interferenz ein globaler Regelungserfolg erzielt werden. Die Idee und erste numerische und experimentelle Resultate bei der Anwendung auf einen rechteckigen Innenraum, der durch tonalen stationären Körperschall im Frequenzbereich $f < 300$ Hz angeregt wird, werden präsentiert.

Idee der aktiven akustischen Barriere

Ein globaler Regelungserfolg durch destruktive Interferenz ist immer dann möglich, wenn in der Nähe der Primärquelle eine Sekundärquelle mit gleicher Abstrahlcharakteristik platziert wird [1]. Der Transmissionspfad wird als Primärquelle betrachtet. Nach dem Huyghensschen Prinzip wird jeder von einer Schallwelle getroffene Punkt selbst Ausgangspunkt einer Elementarwelle [2]. Nach diesem Prinzip kann jede abgestrahlte Schallwelle durch Punktquellen nachgebildet werden [3]. Positioniert man also eine bestimmte Anzahl l von Punktquellen so in den Transmissionspfad, dass das durch die Primärquelle induzierte Schallfeld nachgebildet werden kann, ist es möglich den Störschall durch destruktive Interferenz auszulöschen. Die räumliche Verteilung der Sensoren ist davon unberührt. Als Regler für das ANC – System wird ein Filtered x Least Mean Square (FxLMS) – Algorithmus verwendet, der das mittlere Quadrat der komplexen Schalldrücke an m Fehler-

mikrofonen minimiert [1]. Der Schalldruck an den Sensoren ergibt sich aus der Superposition von dem Sekundärdruck \underline{p}_{Sek} und dem Primärdruck \underline{p}_{Prim} :

$$\underline{p}_{Mic} = \underline{p}_{Prim} + \underline{p}_{Sek} = \underline{p}_{Prim} + \underline{Z}\underline{q}_{Sek}, \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

wobei \underline{Z} die Übertragungszahlen zwischen den Mikrofonen und den Lautsprechern beinhaltet und \underline{q}_{Sek} die Spaltenmatrix der komplexen Lautsprecheransteuerungen ist. Die $m \geq l$ Sensoren sollten weder im Schwingungsknoten des Primärfeldes noch des Sekundärfeldes angeordnet sein.

Numerische Simulation des ANC - Systems

Im ersten Schritt wurde das Modell einer Aluminiumplatte mit den Abmaßen $1010 \times 1010 \times 3 \text{ mm}^3$ erstellt, die einen Hallraum (HR) durch Körperschall anregen soll [4]. Die Modellparameter wurden mit Hilfe der experimentellen Modalanalyse bestimmt. Der relative Fehler zwischen den Eigenfrequenzen der Platte aus der Numerik und der experimentellen Modalanalyse liegt bei durchschnittlich 4%. Die primäre Anregung wurde mit Hilfe einer stationären harmonischen Punktlast in der Mitte der Platte simuliert. Der Hallraum mit den Maßen $4380 \times 2300 \times 2560 \text{ mm}^3$ wurde mit schallharten Wänden modelliert, siehe auch Abbildung 1. Auf der Rückseite der Platte befindet sich ein Reflexionsarmer Raum (RAR), der durch Freifeldrandbedingungen simuliert wird. Für das ANC – System werden vier Lautsprecher in Arrayform 50 mm mittig vor der Platte positioniert. Sie werden durch Quader der Maße $200 \times 150 \times 200 \text{ mm}^3$ als Kolbenstrahler mit einer kreisförmigen Membran abgebildet. Die verwendeten Geometrien orientieren sich an der für das Experiment verwendeten Hardware [4].

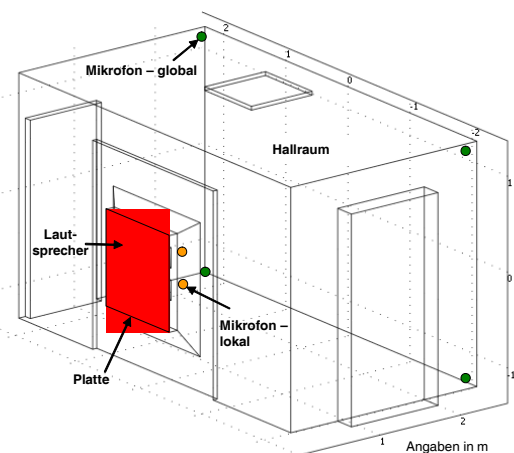


Abbildung 1: Hallraummodell mit ANC – System

Es wurden drei verschiedene Sensorpositionierungen untersucht. Zuerst wurden vier Fehlermikrofone in Arrayform 200 mm vor den Sekundärquellen platziert (lokale

Platzierung). Zweitens wurden vier Mikrofone in die gegenüberliegenden Raumecken positioniert, da dort in der Regel die Druckmaxima zu erwarten sind (globale Verteilung), vgl. Abbildung 1. Als dritte Möglichkeit werden 1224 Sensoren räumlich in einem äquidistanten Abstand von 250mm verteilt, um eine optimale Beobachtbarkeit zu gewährleisten. Somit kann die Wirksamkeit der Aktuatorplatzierung unabhängig von der Sensorpositionierung überprüft werden. Die optimalen Ansteuerungen der Sekundärquellen wurden mit Hilfe eines LSQR – Verfahrens berechnet.

In Abbildung 2 sind für die drei Konfigurationen und das Primärfeld die im Volumen gemittelten Schalldruckpegel und die erzielte Pegelreduktion für den betrachteten Frequenzbereich aufgetragen. Die Regelung bei annähernd optimaler Beobachtbarkeit führt immer zu einer Lärmreduktion. Dabei ist es unerheblich, ob es sich um struktur- oder innenraumdominierte Moden handelt. Die erzielte Lärmreduktion nimmt mit steigender Modendichte ab. Mit vier Mikrofonen in den Raumecken kann unterhalb von 150Hz ebenfalls durchgängig ein globaler Regelungserfolg erzielt werden. Bei höheren Frequenzen kann eine Reduktion der Schalldrücke in den Raumecken zu einer Verstärkung des mittleren Schalldruckpegels im Hallraum führen. Bei der lokalen Platzierung der Sensoren kann der globale Regelungserfolg nur für kleine Frequenzbereiche erzielt werden.

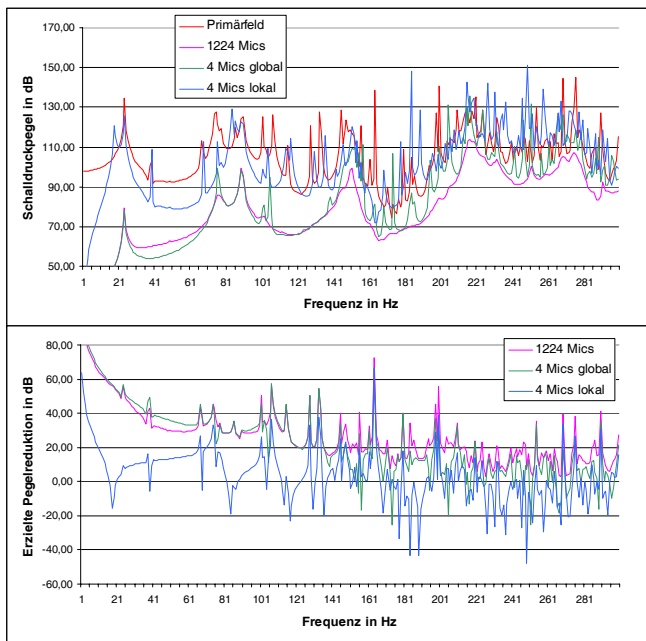


Abbildung 2: Gemittelte Schalldruckpegel in dB bei optimaler ANC im Hallraum für 0 – 300Hz

Experimentelle Validierung des ANC – Systems

Für die experimentelle Überprüfung wurde das ANC System analog zu dem Simulationsmodell mit lokaler Anordnung der Systemkomponenten aufgebaut [4], siehe auch Abbildung 3. Für die Darstellung der punktförmigen Erregerkraft wurde ein Shaker verwendet, der mit einem Sinussignal angesteuert wurde. Für ausgewählte Frequenzen wurden die Schalldruckpegel in den Raumecken vermessen, gemittelt und mit den numerischen Ergebnissen verglichen,

da diese mit dem Verhalten des gesamten Hallraumes korrelieren, siehe Abbildung 4.

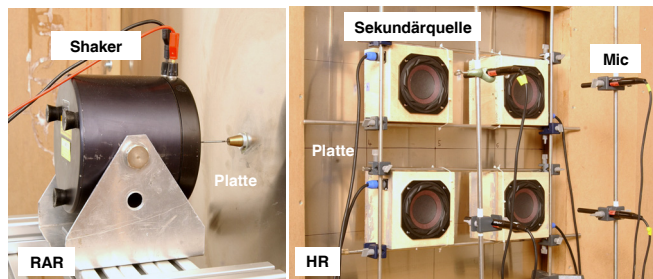


Abbildung 3: Experimenteller Aufbau: RAR mit Shaker, HR mit aktiver akustischer Barriere

Tendenziell stimmen die numerischen und experimentellen Ergebnisse überein. Allerdings sind frequenzabhängig auch größere Abweichungen zu verzeichnen, was mit einer Verschiebung der Eigenfrequenzen (Struktur oder Innenraum) und der maximal verfügbaren Lautsprecheransteuerung begründet werden kann.

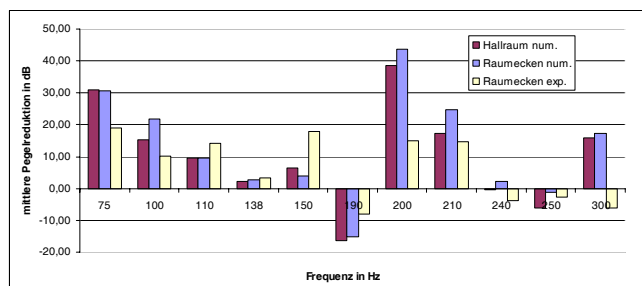


Abbildung 4: Vergleich der gemittelten Pegelreduktion aus Simulation und Experiment

Zusammenfassung und Ausblick

Die numerische Simulation hat die allgemeine Wirksamkeit der Platzierung eines Lautsprecherarrays in den Transmissionspfad gezeigt. Dabei wird in dem betrachteten Innenraum ein globaler Regelungserfolg erzielt, wenn die notwendige Beobachtbarkeit durch die Sensoren gewährleistet ist. Erste experimentelle Ergebnisse zeigen eine tendenzielle Übereinstimmung mit den numerischen Resultaten. Bei der Sensorplatzierung besteht weiterer Forschungsbedarf, um das volle Potenzial dieser Anordnung auszuschöpfen. Zukünftig soll der Ansatz auf Flugzeugkabinen angewendet werden, in denen durch Propellerlärm Störschall über eine begrenzte Anzahl von Übertragungswegen induziert wird.

Literatur

- [1] Hansen, C. H.; Snyder S. D.: Active Control of Noise and Vibration. E & FN Spon, London, 1997
- [2] Kuttruff, H.: Akustik, Eine Einführung. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 2004
- [3] Berkhout, A. J.: A Holographic Approach to Acoustic Control. J. Audio. Eng. Soc.(1988), Vol. 32, 977-995
- [4] Greßkowski, J.: Numerische und experimentelle Überprüfung eines aktiven Gegenschallsystems für geschlossene Innenräume. Mechatronik, HSU-HH, Hamburg, Diplomarbeit, 2007