Active Structural Acoustic Control (ASAC) im Airbus A400M

Christian Köhne[1], Delf Sachau[1], Klaus Renger[2], Martin Wandel[2],
[1] *Helmut-Schmidt-Universität, 22043 Hamburg, E-Mail: Sachau@hsu-hh.de*
[2] *Airbus Operations GmbH, 21129 Hamburg, E-Mail: Klaus.Renger@Airbus.com*

Einleitung

Turboprop-Antriebe bieten gegenüber Mantelstromtriebwerken einen Vorteil beim Treibstoffverbrauch, jedoch stellt der höhere Lärmpegel im tieffrequenten Bereich eine Herausforderung dar. In Flugzeugkabinen können die Schallemissionen mit passiven Lärmminderungsmaßnahmen nur schwer oder gar nicht beherrscht werden. Eine vielversprechende Alternative stellen aktive Maßnahmen dar, von denen eine Variante im vorliegenden Beitrag dargestellt werden soll.

Kern der Arbeit ist ein Flugzeugrumpf aus dem A400M-Programm, der der Helmut-Schmidt-Universität für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt wurde. In diesen Versuchsträger wurde nun ein aktives Schallreduktionssystem eingerüstet und dessen Funktionsfähigkeit unter sehr realitätsnahen Bedingungen überprüft.

Das hier vorgestellte Schallreduktionssystem besteht aus mechanischen Aktoren und akustischen Sensoren. Eine Besonderheit gegenüber anderen Systemen stellt die digitale Kommunikation der Komponenten mit dem zentralen Steuergerät über das CAN-Bus-Protokoll dar.

Versuchsumgebung

Das Flugzeug A400M (Abbildung 1) ist ein neu entwickeltes Transportflugzeug für militärische und humanitäre Einsätze. Es wird mit vier Turboprop-Triebwerken angetrieben, weshalb es hervorragend für Tests von aktiven Schallreduktionsmaßnahmen geeignet ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass die verwendeten Sensoren und Aktoren des Schallreduktionssystems eigens für das A400M-Programm entwickelt wurden und sich daher mit überschaubarem Aufwand in die Struktur integrieren ließen.

Abbildung 1: A400M [1] © Airbus S.A.S

Der Versuchsträger besteht aus der Primärstruktur ohne Cockpit, wie in Abbildung 2 zu erkennen. Die Lagerung erfolgte statisch bestimmt in einer Portalkonstruktion, die in ein Hallengebäude integriert wurde, vgl. Abbildung 3. Inzwischen ist der Aufbau der Versuchsumgebung abgeschlossen und es konnten erste Tests erfolgreich durchgeführt werden ([2][3][4]).

Abbildung 2: Flugzeugrumpf und Portalkonstruktion

Abbildung 3: Gebäude des Versuchsträgers

Systembeschreibung

Systeme zur aktiven Schallreduktion werden in verschiedene Kategorien eingeteilt. Das hier vorgestellte System besteht aus mechanischen Aktoren und akustischen Sensoren, was in der Literatur als ASAC (Active Structural Acoustic Control) bezeichnet wird. Diese Definition ist allerdings nicht einheitlich, vgl. [5][6][7]. Ziel des Systems ist die Reduktion des Schalldrucks im durch die Struktur eingeschlossenen Volumen, in diesem Fall also das Luftvolumen im Frachtraum des Versuchsträgers.

Der schematische Aufbau eines ASAC-Systems ist in Abbildung 4 dargestellt. Die in diesem Fall elektrodynamischen Aktoren sind an festgelegten Positionen der Primärstruktur befestigt. Sie beeinflussen das Schwingungsverhalten und damit die Schallabstrahlung der Struktur derart, dass der Schalldruck an den Mikrofonen (den Fehlersensoren) in der Kabine minimal wird. Die Berechnung der Ansteuerung der Aktoren erfolgt mit einem zentralen Steuergerät. Dazu steht zusätzlich ein Drehzahl-Referenzsignal von einem der Triebwerke zur Verfügung.

Zur Berechnung können beispielsweise adaptive Filter mit einem LMS-Algorithmus (Least Mean Square) verwendet werden. Abbildung 5 zeigt das Blockschaltbild eines FxLMS (Filtered Reference Least Mean Square), wie er der Literatur ([8][9]) entnommen werden kann.

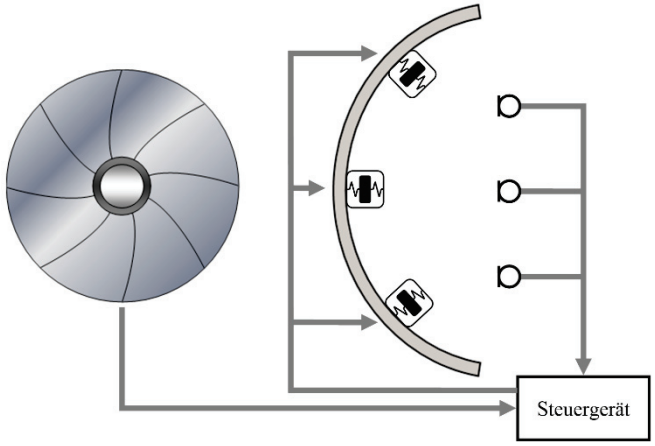

Abbildung 4: schematischer Aufbau ASAC

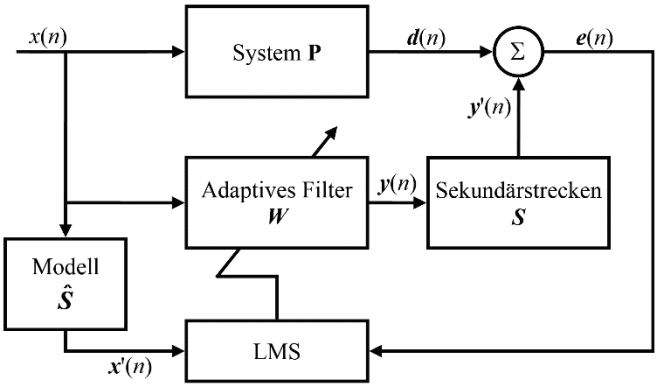

Abbildung 5: Blockschaltbild FxLMS

Als mechanische Aktoren kommen im vorliegenden Fall sogenannte TVAs (Tuneable Vibration Absorber, [10][11]), siehe Abbildung 6, zum Einsatz, die durch Ultra Electronics für das A400M-Programm entwickelt wurden. Einige der zugehörigen Arbeiten zur aktiven Schallreduktion sind in ([12][13][14]) beschrieben.

Die TVAs bestehen im Wesentlichen aus zwei Einmassenschwingern, deren Eigenfrequenzen auf die ersten beiden BPFs (Blade Passage Frequency) der Triebwerke abgestimmt sind. Im Gehäuse befindet sich eine Platine mit einem DSP zur Signalverarbeitung. Es gibt drei interne Sensoren: je einen Kraftsensor für die Einmassenschwinger und einen zentral angeordneten Beschleunigungssensor. Für das Regelsystem sind je TVA zwei externe Sensoren vorgesehen, bei denen es sich in diesem Fall um Kondensatormikrofone handelt, die ebenfalls von Ultra Electronics entwickelt wurden (Abbildung 7). Die Hauptfunktionen der Signalverarbeitung werden mit den im TVA installierten Komponenten ausgeführt, wozu insbesondere Transformationen in und aus dem Frequenzbereich gehören. Es stehen zwei Sensor- und zwei Aktorkanäle zur Verfügung. Aus den Aktordaten werden Zeitsignale erzeugt, mit denen die Schwingspulen an den beiden Einmassenschwingern über eine vorherige Verstärkung angesteuert werden.

Abbildung 6: TVA (Tuneable Vibration Absorber)

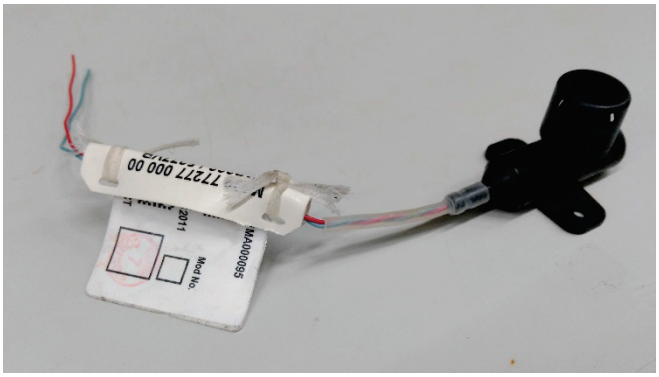

Abbildung 7: Kondensatormikrofon als Fehlersensor

Die Kommunikation zwischen den TVAs und dem zentralen Steuergerät erfolgt über CAN Bus ([15]). Das bietet gegenüber der analogen Signalübertragung den Vorteil, dass nicht jede Systemkomponente direkt mit dem Steuergerät verbunden sein muss und sich somit eine erhebliche Menge an elektrischen Leitungen einsparen lässt. Die übertragenen Informationen bestehen aus der Zeitsynchronisation aller Komponenten, Zahlenwerten für die zu regelnden Frequenzen und aus komplexen Zahlen für die Sensor- und Aktordaten.

In Anlehnung an den oben beschriebenen FxLMS-Algorithmus wurde ein Algorithmus implementiert, wie er in Abbildung 8 dargestellt ist. Als wesentliche Merkmale sind die CAN-Kommunikation sowie die adaptive Filterung im Frequenzbereich zu nennen.

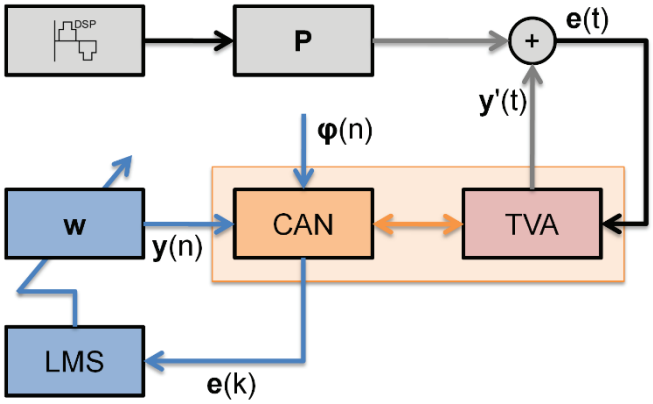

Abbildung 8: Blockschaltbild des Systems

Hardware-Aufbau

Das ASAC-System besteht aus 160 Aktoren (TVAs) und 320 Mikrofonen als Sensoren. Die maximale Anzahl an Teilnehmern in diesem CAN-System beträgt 20, sodass die TVAs auf acht CAN-Kanäle verteilt sind. Dieser Aufbau ist schematisch in Abbildung 9 dargestellt. Die Mikrofone sind direkt mit den zugehörigen TVAs verbunden und die TVAs sind untereinander und mit dem Steuergerät in Linientopologie angeordnet.

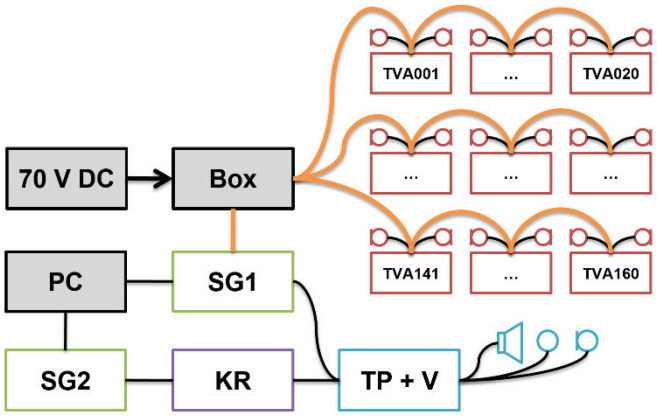

Abbildung 9: schematischer Aufbau des Systems

Die TVAs werden mit einer Gleichspannung von 70 V betrieben, die über eine Schaltbox in den Kabelbaum integriert wird. Das zentrale Steuergerät (SG1) wird von einem handelsüblichen PC bedient. Ein weiteres Steuergerät (SG2) dient dem Betrieb eines Kartierungsroboters (KR), welcher im folgenden Abschnitt näher erläutert wird. Zur Erzeugung des Primärschalls wird ein Lautsprechersystem verwendet, welches zusätzlich zur Gewinnung von Referenzsignalen mit einem Mikrofon und einem Beschleunigungssensor versehen ist. Die drei genannten Komponenten sind über Tiefpassfilter und Verstärker (TP+V) mit den jeweiligen Steuergeräten verbunden.

Testergebnisse

Die Funktionsfähigkeit des Regelungssystems wurde zum einen mit der Reduktion des Schalldruckpegels an den Fehlermikrofonen überprüft. Zum anderen wurde ein sogenannter Monitorbereich definiert, in dem der Schalldruck mit einem Kartierungsroboter vollautomatisch gemessen wurde. Das Mikrofon-Array ist in Abbildung 10 dargestellt. Es ist auf einem Gestell montiert, welches nach einem vorgegebenen Raster entlang der Flugzeuglängsachse bewegt werden kann. Die 108 Messmikrofone sind in sechs Reihen angeordnet und decken in der Breite einen Bereich von 4,59 m ab. In vertikaler Richtung liegt der Messbereich zwischen 0,88 m und 2,23 m über dem Fußboden. In Längsrichtung wird ein Bereich von etwa 14 m erfasst.

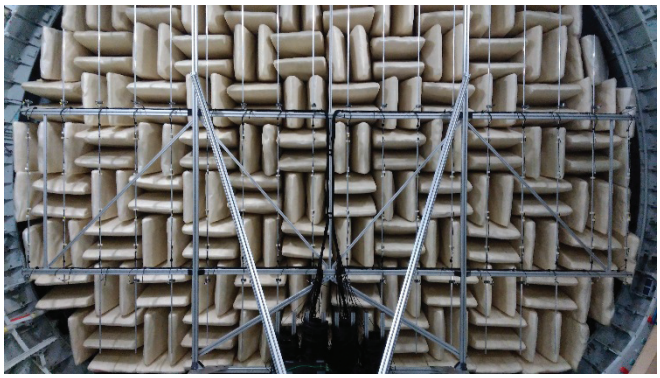

Abbildung 10: Kartierungssystem

Für die Versuchsreihen wurden im Bereich der 1. und 2. BPF einige Frequenzen ausgewählt, wie in Abbildung 11 zu sehen. Die Messungen der Schallpegel erfolgten zunächst nur für das Primärschallfeld und anschließend mit aktivierter Regelung. Im Diagramm sind die Differenzen der Messwerte dargestellt. Die blauen Säulen beziehen sich auf die Fehlermikrofone und die anderen beiden auf das Kartierungssystem. Die roten Säulen stellen die Werte für das bereits beschriebene Gesamtvolumen dar, während für die grauen Säulen ein Bereich definiert wurde, in dem sich die TVAs befinden. Das sind in Richtung der Flugzeuglängsachse etwa 7,30 m im vorderen Teil des Kartierungsvolumens.

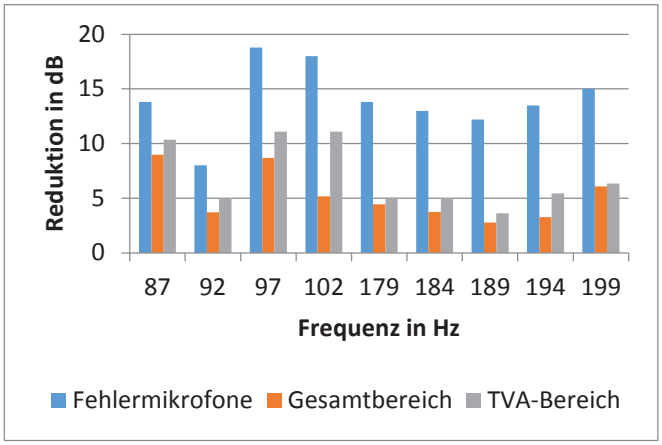

Abbildung 11: Messergebnisse Schallpegelreduktion

An den Fehlermikrofonen lässt sich insgesamt eine deutliche Schallreduktion im Bereich zwischen 10 und 20 dB erkennen, wobei es sich bei 92 Hz wahrscheinlich um einen Ausreißer handelt, dessen Ursachen bisher noch nicht näher untersucht wurden. Im Monitorbereich, der letztlich Ziel der gewünschten Schallreduktion ist, lässt sich eine globale Reduktion erkennen. Dabei ist der Regelungserfolg in dem Bereich der TVAs natürlich stets größer als im gesamten Frachtraum des Versuchsträgers.

Zusammenfassung

Mit den hier beschriebenen Arbeiten konnte nachgewiesen werden, dass ein ASAC-System in einer großen Flugzeugkabine und mit einer vergleichsweise großen Anzahl an Sensoren und Aktoren erfolgreich in Betrieb genommen werden kann. Bereits mit diesem ersten Entwurf konnte ein signifikanter Regelungserfolg erzielt werden. Mit tiefergehenden Untersuchungen bzw. Verbesserungen am Regelungskonzept und an der Positionierung der Komponenten sind noch höhere Schallpegelreduktionen zu erwarten.

Literatur

[1] Airbus Defence & Space, URL: `http://militaryaircraft-airbusds.com`

[2] Koehne, C.: Vibro-acoustic research on a full-scale aircraft structure. International Modal Analysis Conference (2013), 67-76

[3] Sachau, D.: Vibroacoustic test bed with Airbus A400M-fuselage. Conference on Noise and Vibration Engineering (2014), 55-62

[4] Sachau, D.: Airbus A400M-fuselage as vibroacoustic test bed. International Workshop on Aircraft System Technologies (2015), 197-206

[5] Fuller, C. Active Control of Vibration. Academic Press, London, 1997

[6] Fahy, F. Sound and Structural Vibration. Elsevier, Amsterdam, 2007

[7] Kletschkowski, T. Adaptive Feed-Forward Control of Low Frequency Interior Noise, Springer, Dordrecht, 2012

[8] Elliott, S. Signal Processing for Active Control, Academic Press, London, 2001

[9] Kuo, S. Active Noise Control Systems, Wiley-Interscience, New York, 1996

[10] Stothers, I.: Active Vibration Absorber and Method. United States Patent US 2007/0028885

[11] Stothers, I.: Active Tuned Vibration Absorber. United States Patent US 2010/0131114

[12] Benassi, L.: Modular Systems for the Control of Sound and Vibration. International Symposium on Active Control of Sound and Vibration (2004)

[13] Gorman, J.: Active Sound Control on the Flight Deck of a C130 Hercules. International Symposium on Active Control of Sound and Vibration (2004)

[14] Hinchliffe, R.: Tonal Active Control in Production on a Large Turbo-Prop Aircraft. International Symposium on Active Control of Sound and Vibration (2002)

[15] ISO 11898: Road Vehicles – Controller Area Network (2013)