Versuchsträger zur Experimentellen Aktiven Minderung der Schalleinstrahlung Zylindrischer Strukturen

Bernd-Christian Hölscher[1], Stephan Algermissen[2], Christian Hesse[3], Michael Sinapius[1]

[1] *Technische Universität Braunschweig, Institut für Adaptronik und Funktionsintegration, 38106 Braunschweig, Email: b.hoelscher@tu-braunschweig.de*

[2] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 38108 Braunschweig*

[3] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt, 21129 Hamburg*

Moden der Schalleinstrahlung

Aktive Systeme sind effektive Lösungen für tieffrequente Problemstellungen der Schwingungsdämpfung, sowohl zur Unterdrückung von Strukturschwingungen als auch für Probleme der Schallab- und -einstrahlung. Insbesondere für gekoppelte Systeme aus Struktur und Fluid, bei denen unter Verwendung struktureller Fehlersensoren eine globale Reduktion des Schallfeldes erreicht werden soll, ist die Implementierung derartiger Lösungen allerdings häufig sehr ineffizient. Bei der oft verwendeten Behandlung der Schallabstrahlung mittels Singulärwertzerlegung entstehen frequenzabhängige Schallstrahlungsmoden, woraus eine sehr hohe Modellordnung des benötigten Reglers resultiert [6].

Für Phänomene der Schalleinstrahlung in Innenräume erlauben die Fluidmoden jedoch die Formulierung frequenzunabhängiger Moden des gekoppelten Systems. Mit den frequenzabhängigen Schallstrahlungseffizienzen ermöglichen diese eine erhebliche Ordnungsreduktion des Reglers [2, 3, 4].

Die Schallstrahlungsmoden der Innenraumeinstrahlung einer schwingenden Struktur ergeben sich aus der Reduktion der Moden des eingeschlossenen Fluids auf die Interaktionsfläche mit der schwingenden Struktur [2]. Exemplarisch sind (0,0,0)- und (0,0,1)-Eigenform des eingeschlossenen Fluides für eine zylindrische Struktur in Abbildung 1 dargestellt. Beide Eigenformen sind bezüglich

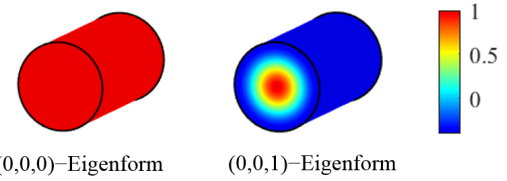

Abbildung 1: Eigenformen identischer Strukturinteraktion

der Interaktionsfläche mit der Struktur identisch und können somit zur (0,0)-Schallstrahlungsmode zusammengefasst werden. Beispielhaft sind in Abbildung 2 einige Schallstrahlungsmoden dargestellt. Diese sind orthogonal bezüglich der akustischen potentiellen Energie im Innenraum und frequenzunabhängig. Gemeinsam mit den zugehörigen frequenzabhängigen Einstrahlungseffizienzen, die sich aus der Überlagerung der beteiligten akustischen Eigenformen ergeben, ermöglichen diese Schallstrahlungsmoden dann eine effiziente Beschreibung des Einstrahlungsverhaltens der schwingenden Struktur [2, 3].

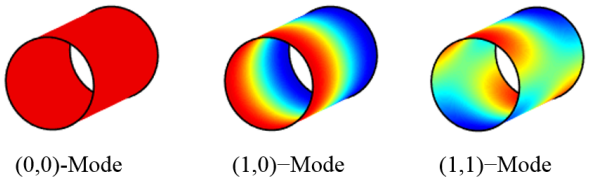

Abbildung 2: Beispielhafte Schallstrahlungsmoden

Der Nachweis dieser Frequenzunabhängigkeit der Schallstrahlungsformen erfolgt in den zitierten Vorarbeiten analytisch und numerisch für generische Geometrien und am Beispiel einer Quaderkavität auch experimentell [2]. Für weitere Untersuchungen wird jedoch ein Versuchsträger für die experimentelle Validierung des Konzepts für weitere, komplexere Geometrien benötigt. In diesem Beitrag wird ein Konzept für einen solchen Versuchsträger sowie die benötigten strukturellen und akustischen Messungen an diesem vorgestellt. Weiterhin werden die Ergebnisse einer ersten strukturellen Identifikation sowie daraus folgende Konsequenzen für die weiteren Untersuchungen dargestellt.

Konzept des Versuchsträgers

Der Versuchsträger soll eine Testumgebung mit anwendungsnahen Randbedingungen bzgl. Geometrie und Struktur bereitstellen. Hierzu existiert am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR in Annäherung an einen herkömmlichen Flugzeugrumpf ein zylindrischer Versuchsträger aus CFK mit einer Länge von 2 m sowie einem Durchmesser von 1 m. Der CFK-Zylinder weist einen quasi-isotropen Lagenaufbau auf sowie stabilisierende Ringe aus Aluminium an oberem und unterem Abschluss mit Bohrungen zur Montage einer Aufhängung. [1].

Das in [2] verwendete Verfahren zur Auslegung einer akustisch wirksamen Regelung unter Verwendung struktureller Fehlersensoren sieht eine Identifikation sowohl der Strukturdynamik als auch der des eingeschlossenen Fluides vor. Das daraus in Anlehnung an [1] folgende Konzept für den Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt.

Zur strukturellen Vermessung steht ein Laser-Scanning-Vibrometer (LSV) zur Verfügung. Zur Aufhängung der Tonne wird ein dreiarmiges Tragkreuz verwendet. Dieses ist seinerseits drehbar an einem Rahmen aus Konstruktionsprofilen gelagert , was die stationäre Verwendung des LSV ermöglicht (Abbildung 3, links).

Abbildung 3: Konzept des Versuchsträgers
links: Aufbau mit Struktur und Rahmen
rechts: Schnittansicht mit Abschlüssen und Mikrofonstativ

Zum akustischen Abschluss wird der Zylinder am oberen und unteren Ende mit Deckeln versehen. Im oberen Deckel sind darüber hinaus Lautsprecher zur Anregung des Fluides vorgesehen (Abbildung 3, rechts). Zur Vermessung des akustischen Feldes wird ein Stativ zur Montage und Bewegung eines Mikrofonarrays eingeführt. Die Anzahl und Positionen der Mikrofone richteten sich dabei nach den anhand des gewählten Frequenzbereichs zu berücksichtigen akustischen Eigenformen [4].

Verfahren zur Strukturidentifikation

In einem ersten Schritt soll eine Referenz für spätere Untersuchungen der Strukturdynamik bereitgestellt werden. Zur Reduktion möglicher Fehlerquellen wird der Versuchsträger daher zunächst ohne Randabschlüsse, Lautsprecher und Mikrofone vermessen. Der Aufbau zur strukturellen Vermessung ist in Abbildung 4 dargestellt.
Im Hinblick auf spätere akustische Messungen mit Randabschlüssen erfolgen sowohl die Anregung als auch die Messung der strukturellen Schwingungen auf der Außenseite des Zylinders. Um die für eine LSV-Messung erforderlichen Reflektionseigenschaften der Oberfläche sicherzustellen ist diese mit einem Netz von 22*84 Messpunkten (axial*Umfang) aus retroreflektierender Folie versehen. Das Tragkreuz ist mit Seilen an einem Drehwirbel am Rahmen befestigt und kann mit Hilfe von Spannschlössern ausgerichtet werden (Abbildung 4, links). Der CFK-Zylinder hängt am Tragkreuz an elastischen Seilen, um eine möglichst weiche Lagerung zu realisieren, zur Längeneinstellung werden zudem einstellbare Schlauchschellen verwendet (Abbildung 4, oben). Die Anregung erfolgt mit einem Inertialshaker, dieser verfügt über eine interne Führung der seismischen Masse zur Vermeidung von Kippmomenten und Querkräften [5]. Die Messung der Anregung erfolgt mit einem Impedanzprüfkopf zwischen Shaker und Struktur (Abbildung 4, unten).
Die Messung der Übertragungsfunktion von eingeleiteter

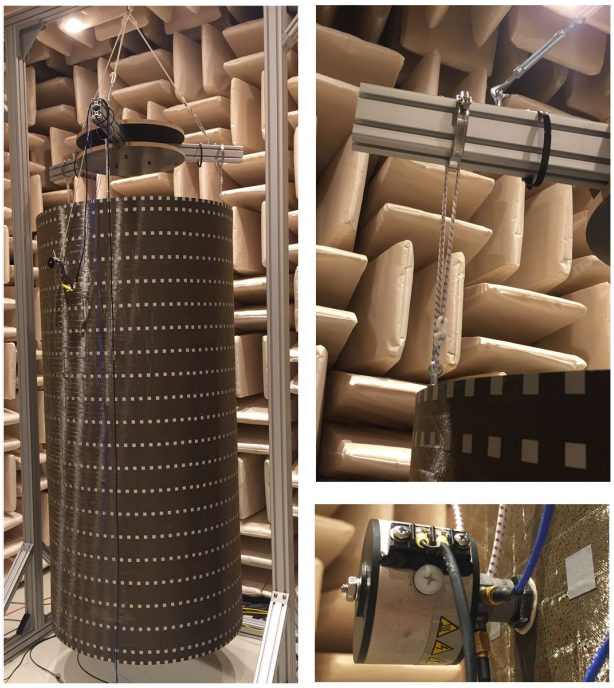

Abbildung 4: Aufbau zur Strukturidentifikation
links: Gesamtaufbau mit Struktur, Messpunkten und Rahmen
oben: Aufhängung an elastischen Seilen
unten: Anregung durch Inertialerreger an Impedanzprüfkopf

Kraft zu Strukturschnelle erfolgt abschnittsweise auf dem Zylinderumfang. Hierzu werden für insgesamt 10 Felder mit je 22*9 Messpunkten die Übertragungsfunktionen ermittelt und anschließend zu einer Messung zusammengefügt. Zur Ermittlung der Übertragungsfunktionen wird ein breitbandiges, periodisches Anregungssignal verwendet und über 5 Messungen gemittelt.

Verifizierung des Identifikationsverfahrens

Die über alle Punkte aus einer vollständigen Messung gemittelten Werte von Amplitudengang und Kohärenzfunktion sind in Abbildung 5 dargestellt.

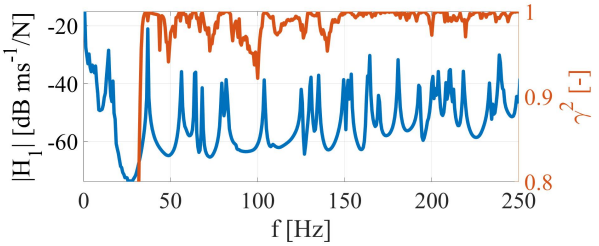

Abbildung 5: Mittelwerte von Amplitudengang $|H_1|$ und Kohärenzfunktion γ^2 über alle Messpunkte

Der Amplitudengang zeigt oberhalb von 30 Hz ein schwach gedämpftes Verhalten mit scharfen Peaks und einer zu höheren Frequenzen hin steigenden Dichte in ihrem Auftreten. Der erste Peak bei 37 Hz entspricht dem Wert der in [1] aufgeführten ersten Resonanzfrequenz.
Der breitbandige Einbruch der Kohärenzfunktion unterhalb von 30 Hz ist zum einen auf den Abfall der Strukturantwort unterhalb des Peaks bei 37 Hz zurückzuführen. Zum anderen wird bei 20 Hz die un-

tere Grenze des Frequenzbereichs des Inertialshakers erreicht [5], sodass unterhalb dieser Frequenz die Anregung stark abnimmt. Oberhalb von 30 Hz nimmt die Kohärenzfunktion im dargestellten Bereich durchgängig Werte $\geq 0,9$ an, in den Peaks des Amplitudengangs Werte $\geq 0,98$. Sowohl der Vergleich mit Referenzmessungen in [1] als auch gemittelter Amplitudengang und Kohärenzfunktion weisen somit keine Anzeichen für erhebliche Fehler im Konzept zur Strukturidentifikation auf.
Die betrachteten Amplitudengänge und Kohärenzen ermöglichen allerdings keine Aussage über die Zulässigkeit der abschnittsweisen Vermessung, da sie jeweils innerhalb einer Teilmessung gebildet werden. Hierzu wird im Folgenden die mit Hilfe des Impedanzprüfkopfs (Abbildung 4, unten) aus Kraft- und Beschleunigung gebildete Inertanz im Anregungspunkt verwendet. In Abbildung 6 sind, analog zu Abbildung 5, Amplitudengang und Kohärenzfunktion der Inertanz im Anregungspunkt dargestellt.

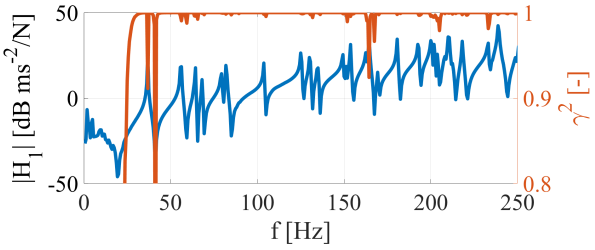

Abbildung 6: Amplitudengang $|H_1|$ und Kohärenzfunktion γ^2 der Inertanz im Anregungspunkt

Im Gegensatz zu Abbildung 5, wo die Mittelwerte von Amplitudengang und Kohärenzfunktion vieler unterschiedlicher Übertragungsfunktionen aufgetragen sind, sind hier Amplitudengang und Kohärenzfunktion für eine einzige Übertragungsfunktion dargestellt. Diese berechnet sich aus allen im Rahmen der 10 Teilmessungen aufgenommenen Kraft- und Beschleunigungsspektren am Anregungspunkt.
Neben dem bereits zuvor beschriebenen breitbandigen Einbruch unterhalb von 30 Hz fallen 3 schmale Einbrüche der Kohärenzfunktion bei 37 Hz, 41 Hz und 164 Hz auf. Hierbei von besonderem Interesse sind die Einbrüche bei 37 Hz und 164 Hz, da sie mit Peaks des Amplitudengangs zusammenfallen.
Zur näheren Betrachtung der Ursache dieser Einbrüche ist exemplarisch in Abbildung 7 die Betriebsschwingform bei 37 Hz im Vergleich zur Betriebsschwingform bei 104 Hz dargestellt, für die der Kohärenz-Wert nahe 1 liegt.
Dargestellt sind in der oberen Hälfte der Abbildung die beiden Schwingformen und in der unteren Hälfte die Lage der H_1-Werte der einzelnen Messpunkte in der komplexen Zahlenebene. Die H_1-Werte für die 104 Hz-Schwingform befinden sich annähernd auf einer gemeinsamen Ursprungsgeraden. Die Messpunkte schwingen somit phasengleich. Dies ist für die 37 Hz-Schwingform nicht der Fall. Anhand der farblichen Trennung nach Messfeld ist erkennbar, dass zwar

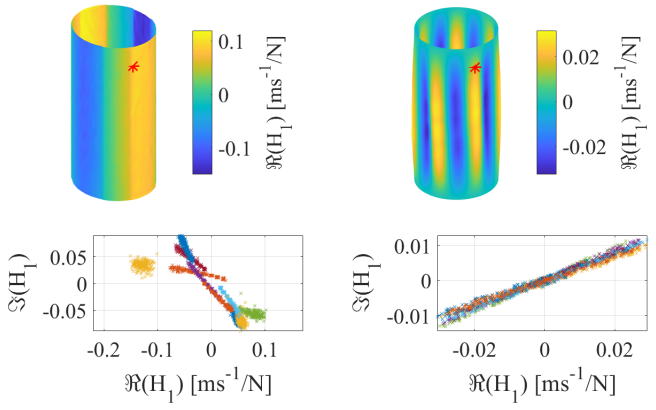

Abbildung 7: Betriebsschwingformen bei 37 Hz (links) und 104 Hz (rechts)
oben: Schwingform anhand gemessener H_1-Werte mit Markierung des Anregungspunktes
unten: gemessene H_1-Werte in komplexer Zahlenebene, Färbung nach Messfeld

Messpunkte eines Messfeldes phasengleich schwingen, nicht jedoch Messpunkte unterschiedlicher Messfelder. Zwischen den Teilmessungen liegen also Phasenverschiebungen der Übertragungsfunktionen vor. Dies führt zum einen zu den teilweise sehr abrupten Übergängen in der Darstellung der Betriebsschwingform (Abbildung 7, oben links), zum anderen zum Einbruch der Kohärenzfunktion in Abbildung 6 bei 37 Hz. Die wahrscheinliche Ursache dieser Phasenverschiebung liegt in einer leichten Änderung der Randbedingungen zwischen zwei Teilmessungen durch das Drehen des Versuchsträgers. Die mit einer solchen Änderung einhergehende Verschiebung der Resonanzfrequenzen führt insbesondere bei einem schwach gedämpften System wie dem vorliegenden zu einer erheblichen Änderung der Phasenlage.
Zur weiteren Betrachtung, warum die Kohärenz nur für die Peaks bei 37 Hz und 164 Hz einbricht, ist in Abbildung 8 analog zu Abbildung 7 die Schwingform bei 164 Hz dargestellt.

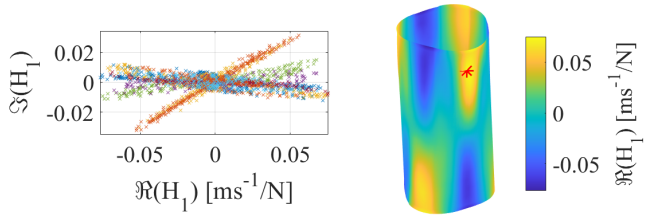

Abbildung 8: Betriebsschwingform bei 164 Hz
links: gemessene H_1-Werte in komplexer Zahlenebene
rechts: Schwingform anhand gemessener H_1-Werte

Wie zuvor befinden sich auch hier die Messpunkte je nach Teilmessung auf verschiedenen Ursprungsgeraden in der komplexen Ebene und schwingen somit nicht phasengleich, was zum Einbruch der Kohärenz in Abbildung 6 führt. Im Vergleich der drei Schwingformen treten die Einbrüche der Kohärenz bei den Schwingformen auf, die eine Beteiligung des Randes aufweisen. Dies erscheint plausibel, da eine Änderung der Lagerung

insbesondere diese Schwingformen beeinflussen sollte. Im dargestellten Ausmaß sind davon allerdings nur die Betriebsschwingformen bei 37 Hz und 164 Hz betroffen. In Abbildung 9 ist exemplarisch die Schwingform zum Peak bei 82 Hz dargestellt.

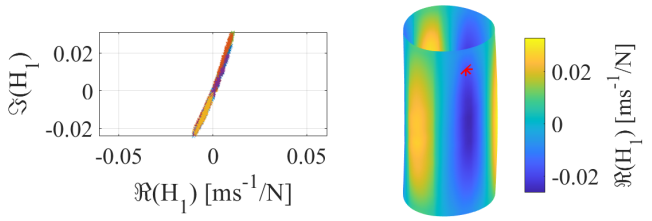

Abbildung 9: Betriebsschwingform bei 82 Hz
links: gemessene H_1-Werte in komplexer Zahlenebene
rechts: Schwingform anhand gemessener H_1-Werte

Trotz einer signifikanten Beteiligung der Strukturränder befinden sich die H_1-Werte für die 82 Hz-Schwingform annähernd auf einer gemeinsamen Ursprungsgeraden, der Wert der Kohärenzfunktion in Abbildung 6 ist nahe 1. Die abschnittsweise Vermessung in ihrer hier vorgestellten Form erscheint daher bis auf die beiden genannten Ausnahmen zulässig, zumal sie auch für höhere Frequenzen gute Ergebnisse liefert. Beispielhaft ist in Abbildung 10 die Schwingform zum letzten Peak im hier betrachteten Frequenzbereich bei 239 Hz dargestellt.

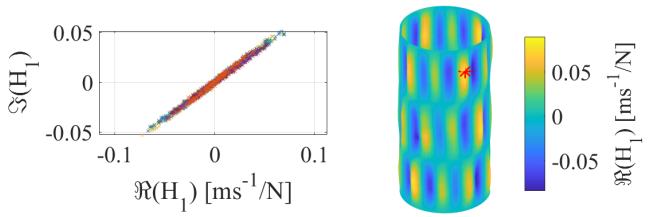

Abbildung 10: Betriebsschwingform bei 239 Hz
links: gemessene H_1-Werte in komplexer Zahlenebene
rechts: Schwingform anhand gemessener H_1-Werte

Auch für diese Schwingform ordnen sich die H_1-Werte auf einer Ursprungsgerade an, die auf der Struktur in Abbildung 10 erscheinenden Felder schwingen also in konstanter Phase zur Anregung.

Zusammenfassung und Ausblick

Das verwendete Verfahren zur abschnittsweisen Identifikation der Strukturdynamik mit anschließender Zusammenführung der Teilmessungen erzielt mit wenigen Einschränkungen gute Ergebnisse und kann daher auch für zukünftige Untersuchungen des gekoppelten Struktur-Fluid-Systems genutzt werden.
Aufgrund der komplexen Interaktion von Struktur und Fluid können bestimmte Eigenformen allerdings für die Schallstrahlungsminderung in großen Frequenzbereichen relevant sein [6]. Im Hinblick auf die beobachteten Eigenfrequenzverschiebungen ist für weitere strukturelle Messungen daher zum einen eine Verbesserung der Entkopplung des Versuchsträgers vom Trägerkreuz vorgesehen. Zum anderen ist eine Minimierung der Interaktion mit dem Versuchsträger beim Wechsel zwischen zwei Teilmessungen notwendig. Für verbleibende Fehler ist der Einfluss fehlerhafter Modelldaten simulativ abzuschätzen. Hierzu können allerdings die vorhandenen Modelle und Methoden verwendet werden [3, 4]. Abschließend wird bei der Gestaltung der akustischen Abschlüsse und des Mikrofonstativs aufgrund der vorgestellten Ergebnisse eine möglichst geringe Interaktion mit der Struktur anzustreben sein.

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die DFG im Rahmen des Projektes „Aktive Schalleinstrahlungsminderung in Innenräume“ gefördert. Darüber hinaus möchten die Autoren der Firma PCB Synotech GmbH für ihre Unterstützung durch die Bereitstellung von Messtechnik danken.

Literatur

[1] Biedermann, J.; Winter, R.; Wandel, M.; Böswald, M.: Energy based correlation criteria in the mid-frequency range. In: Journal of Sound and Vibration 400 (2017), 457–480.

[2] Hesse, C.; Vivar Perez, J.; Sinapius, M.: Frequency-Independent Radiation Modes of Interior Sound Radiation. An Analytical Study. Journal of Sound and Vibration 392 (2017), 31–40.

[3] Hesse, C.: Active Control of Composite Fuselage Type Structures with Enclosed Acoustic Cavity. Journal of Fluids and Structures 81 (2018), 565–573.

[4] Hölscher, B.; Hesse, C.; Haase, T.; Sinapius, M.: Aktive Reduktion des Schallfeldes in einer Zylindrischen Kompositstruktur anhand Struktureller Fehlersensoren. In: 45. Deutsche Jahrestagung für Akustik. Rostock, 2019

[5] PCB Group Inc.: Miniature Electrodynamic Inertial Shaker 2002E, abgerufen am 30.03.2020, URL: `https://www.synotech.de/produkte_skript/downloads/marketing/TMS_2002_Miniature_Shaker_Produktinformation_ENG.pdf`

[6] Sinapius, M.; Misol, M.: Aktive Schallbeeinflussung. In: Sinapius, M.: Adaptronik. Prinzipe - Funktionswerkstoffe - Funktionselemente - Zielfelder mit Forschungsbeispielen. Springer, Berlin Heidelberg, 2018