Numerische Studie zur Sensor- und Aktuatorplatzierung für die aktive Ausbreitungssteuerung von Biegewellen in einer finiten und semi-infiniten isotropen Platte

Alexander Kokott[1], Hans Peter Monner[1]

[1] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 38108 Braunschweig, Deutschland, E-Mail: alexander.kokott@dlr.de*

Einleitung

Zu Zeiten der Klimakrise gewinnt die Steigerung der Energieeffizienz von Fahr- und Flugzeugen umso mehr an Bedeutung. Leichtbau und neue Antriebskonzepte führen jedoch oft zu einer Schmälerung des akustischen Komforts für die Passagiere, sei es durch den höheren Abstrahlgrad leichter, steifer Strukturen oder höhere Vibrations- und Schalldruckpegel durch beispielsweise offene gegenläufige Rotoren (CROR).

Methoden der Lärmreduktion waren und sind weiterhin Thema aktueller Forschung. Dabei werden sowohl passive als auch aktive Methoden untersucht. Zu den passiven Methoden zählen beispielsweise Material- und Strukturanpassungen in einer Form, die die Dämpfung oder Abstrahlung von Schall beeinflusst. Diese Prinzipien sind jedoch nur in höheren Frequenzbereichen effektiv und bringen oft einen signifikanten Massezuwachs mit. Aktive Systeme bieten die Möglichkeit, durch zusätzliche Sensorik, Aktuatorik und Steuerungselektronik Gegenschwingungen zu erzeugen, um Schwingungsamplituden (Active Noise/Vibration Control) oder den Abstrahlgrad (Active Structural Acoustics Control) zu reduzieren. Um eine globale Beruhigung, beispielsweise in der Passagierkabine eines Flugzeuges, zu erreichen, ist dementsprechend ein großer Aufwand für die Applikation der Sensoren und Aktuatoren in der gesamten Kabine nötig.

Die Idee der aktiven Körperschallbarriere, wie sie in vorherigen Veröffentlichungen [Kokott et al., 2019] bereits vorgestellt wurde, verfolgt einen anderen Ansatz. Auch hier sollen mittels zusätzlicher Aktuatoren Gegenschwingungen eingebracht werden, jedoch wird sich einer anderen Zielgröße bedient: Der Strukturintensität. Diese ist ein Maß für die flächenbezogene Körperschallleistung. Bei Applikation eines Rings aus Sensoren und Aktuatoren in einem hinteren Segment des Flugzeugsrumpfes beispielsweise könnte der Energietransfer von im Heck befindlichen Triebwerken und Aggregaten aktiv unterbrochen werden, sodass in der Kabine keine dadurch verursachten Vibrationen mehr ankommen und folglich auch keinen Schall abstrahlen können. Die bereits erwähnten Voruntersuchungen beschäftigen sich hauptsächlich mit der Methodik zur Messung der Strukturintensität sowie Voruntersuchungen des Steuerungskonzeptes an Balken. Dieses Werk behandelt den folgenden Schritt der Untersuchung der Sensor- und Aktuatorplatzierung. Es soll ermittelt werden, welche Dichte an Sensoren und Aktuatoren notwendig ist, um den gewünschten Barriereeffekt zu erreichen. Dabei soll auch ein Vergleich zur herkömmlichen Methode der Active Vibration Control getätigt werden, welche lediglich die Normalenschnelle der Struktur als Zielgröße nutzt. Aufgrund der Voruntersuchungen wird erwartet, dass die Körperschallbarriere vor allem beim Auftreten laufender Wellen, wie etwa in inhomogen gedämpften Strukturen, deutlich effektiver ist. Zu diesem Zweck wird eine semi-infinite Platte modelliert, dessen Rand keine Reflexion von Wellen zulässt.

Modellierung

Die numerische Simulation der Plattenkonfigurationen erfolgt in Ansys®. Gegenstand der Untersuchungen ist eine rechteckige Stahlplatte der Dimensionen 1200 mm x 1000 mm x 2 mm konstanter Dicke. Alle Ränder sind frei gelagert. Materialparameter können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Materialparameter

E-Modul	$1.82e11$	N/m^2
Querkontraktionszahl	0.3	–
Dichte	7953.82	kg/m^3
Materialdämpfung	0.1	%

Die Platte wurde mit Elementen des Typs $SHELL281$ mit einer Elementlänge von 10 mm diskretisiert. Die Störanregung erfolgt über eine Kraft im Punkt $x = 0.2m$, $y = 0.3m$. Die Sekundäranregung wird über Kraftpaare bei $x = 0.4..0.45m$ realisiert, um sowohl Querkräfte als auch Biegemomente einbringen zu können. Die virtuellen Fehlersensoren befinden sich bei $x = 0.6m$. Virtuell bedeutet hier, dass die Fehlersensoren direkt die nötigen Querschnittgrößen für die Bestimmung der Strukturintensität ausgeben, also Normalenschnelle $\dot{\eta}$, Winkelgeschwindigkeiten ω_x und ω_y, Biege- und Drillmomente M_{xx} und M_{xy} sowie die Querkräfte Q_x (siehe Gleichung 1 nach [Noiseux, 1970] und Abbildung 1).

$$P_{SIx} = Q_x \cdot \dot{\eta} + M_{xx} \cdot \omega_x + M_{xy} \cdot \omega_y \qquad (1)$$

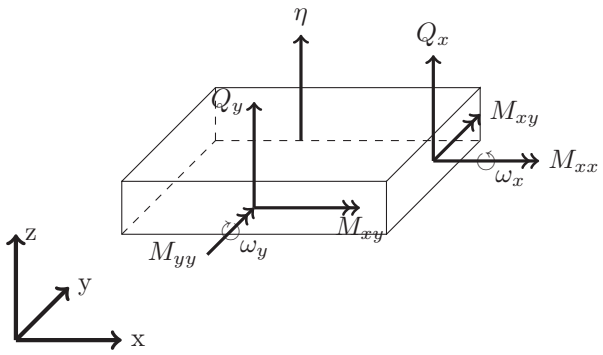

Abbildung 1: Koordinatensystem und Querschnittgrößen eines Plattenelements (positives Schnittufer): η Verschiebung, ω Rotationen, M Biege- und Drillmomente, Q Querkräfte

Momente und Querkräfte sind in der Praxis nicht direkt bestimmbar und müssen approximiert werden. Der Fehler durch Approximation soll hier aber nicht von Bedeutung sein, weshalb die direkten Größen für die Steuerung implementiert werden. Um verschiedene Dichten an Fehlersensoren und Sekundäraktuatoren zu untersuchen, werden unterschiedliche Zahlen ebendieser gleichmäßig über die y-Dimension der Platte verteilt. Für die Untersuchung laufender Wellen wird ein nicht-reflektierender Rand modelliert. Dazu wird die Platte am rechten Rand um Plattenstreifen mit exponentiell steigender Materialdämpfung erweitert. Die Dämpfung der einzelnen Streifen ergibt sich zu 2^n mit n als jeweilige Nummer des Streifens [Heinze, 2015]. Das gesamte Setup ist in Abbildung 2 veranschaulicht.

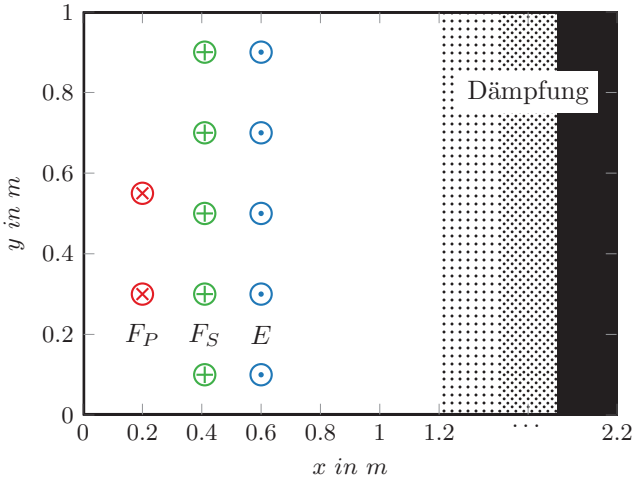

Abbildung 2: Schema des Plattenmodells mit Störkraft F_P, Sekundärkraftpaaren F_S und Fehlersensoren E mit nichtreflektierendem Rand

Als Steuerungsalgorithmus wird ein optimales Wiener Filter nach [Fuller et al., 1996] berechnet. Dabei ist die Störanregung das Referenzsignal und die Querschnittgrößen die Fehlersignale. Mithilfe der in der Simulation ermittelten Transferfunktionen werden Primär- und Sekundärpfade bestimmt. Die gesamte Simulation erfolgt im Frequenzbereich von $0 - 500Hz$. Die Störanregung erfolgt für jeder betrachtete Konfiguration monotonal.

Bewertung des Barriereeffektes

Im folgenden sollen einige ausgewählte Ergebnisse gezeigt werden. Als Vergleichsgröße wird die Normalenschnelle im Barrierebereich verwendet, da diese ausschlaggebend für die Schallabstrahlung einer Struktur ist. Der Barrierebereich sei hier der Plattenabschnitt $0.6m < x < 1.2m$. Der Bereich $x > 1.2m$ für die semi-infinite Platte wird nicht weiter betrachtet, da dieser nur zur Umsetzung eines nicht-reflektierenden Randes genutzt wird.

Finite Platte

Für die finite Platte, d.h. bei Auftreten stehender Wellen, kann bereits mit einer einfachen Schnellesteuerung eine signifikante Reduktion der Schnelle im Barrierebereich erreicht werden (siehe Abbildung 3). Durch Hinzuziehen weiterer Querschnittgrößen bis hin zur Steuerung der vollständigen Strukturintensität (Abbildung 4) kann dieser Barriereeffekt zwar noch verstärkt werden, jedoch ist hier zu beachten, dass die Messung der Querschnittgrößen in der Praxis mit erheblich höherem Aufwand und Fehleranfälligkeit verbunden ist und deshalb in keinem Verhältnis zum Nutzen steht. Hier wird bereits deutlich, dass die Dichte der Steuerkräfte von untergeordneter Wichtigkeit ist und die Relevanz in der Dichte der Fehlersensoren liegt.

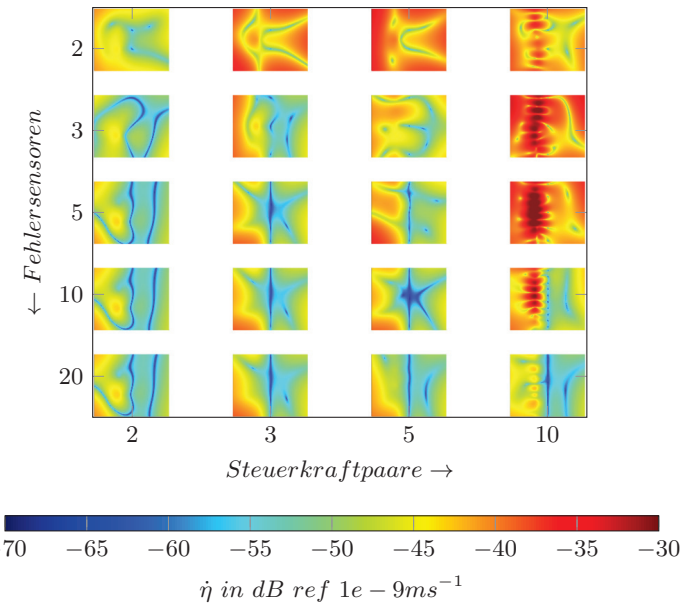

Abbildung 3: Geschwindigkeitsverteilung der finiten Platte bei $39Hz$, Steuergröße: Schnelle

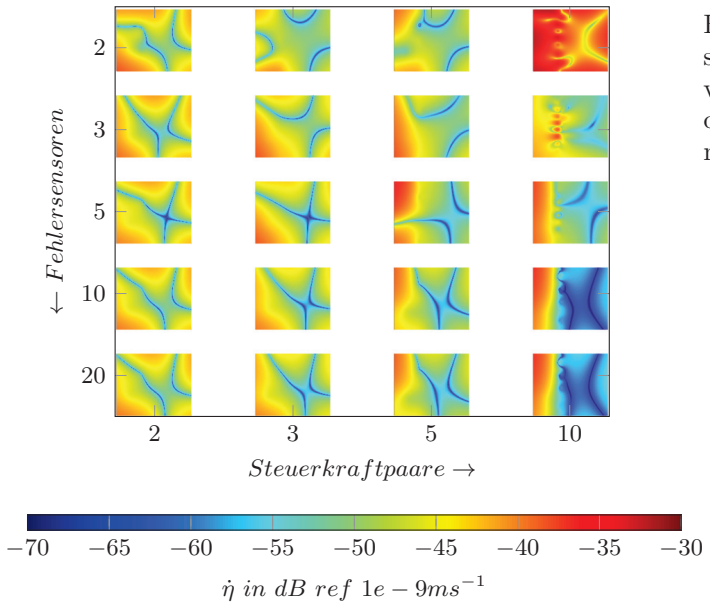

Abbildung 4: Geschwindigkeitsverteilung der finiten Platte bei $39Hz$, Steuergröße: Strukturintensität

Semi-infinite Platte

Der größere Effekt sowie die Empfindlichkeit gegenüber der Fehlersensordichte wird umso deutlicher, wenn eine semi-infinite Platte, d.h. vornehmlich laufende Wellen, betrachtet wird. Mithilfe reiner Schnellesteuerung (Abbildung 5) kann nur eine lokale Schnellereduktion erreicht werden. Im Bereich hinter den Fehlersensoren ändert sich zwar die Schwingform, eine vollständige Abschirmung der Energieübertragung ist jedoch nicht möglich. Naheliegend ist an dieser Stelle, dass durch die Reduktion der lokalen Schnelle der Querkraftanteil der Strukturintensität reduziert wird, der Momentenanteil, welcher von der Winkelgeschwindigkeit abhängt, hingegen nicht.

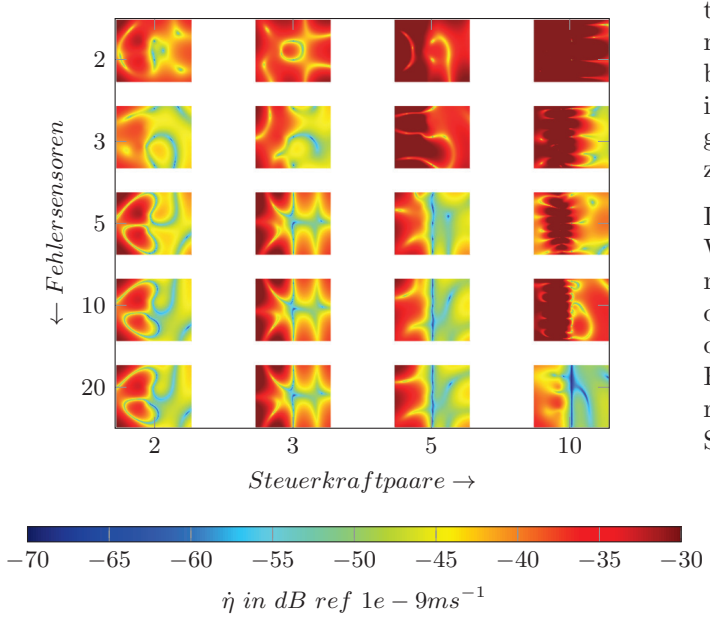

Abbildung 5: Geschwindigkeitsverteilung der semi-infiniten Platte bei $71Hz$, Steuergröße: Schnelle

Bei Betrachtung der Steuerung mit der Strukturintensität (Abbildung 6) als Zielgröße wird eine defacto vollständige Blockade des Energieflusses erreicht, wodurch die Schnelleamplituden im Barrierebereich minimal sind.

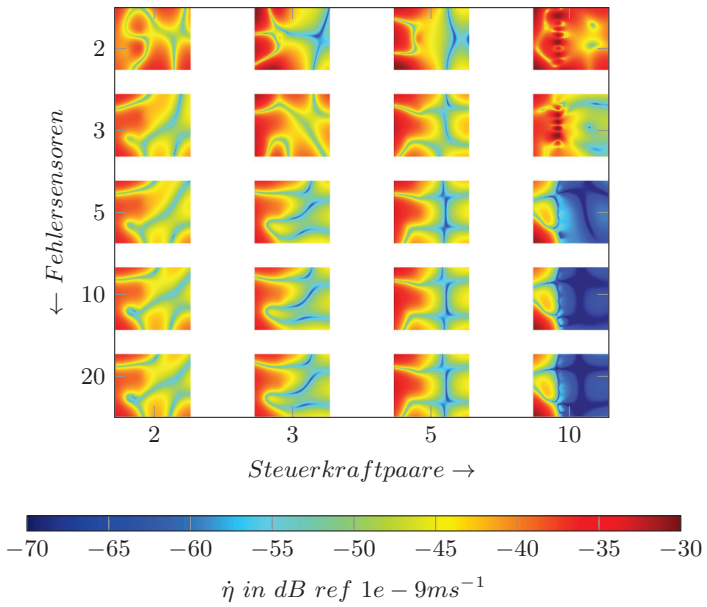

Abbildung 6: Geschwindigkeitsverteilung der semi-infiniten Platte bei $71Hz$, Steuergröße: Strukturintensität

Wie bereits erwähnt bringt die Nutzung der Strukturintensität als Steuergröße das Problem mit sich, dass die Messung bzw. Approximation der Komponenten sensorisch aufwendig und sehr fehleranfällig ist. Für die Bestimmung der Querkraft in einem Punkt werden beispielsweise acht Beschleunigungssensoren benötigt, aus deren Signalen mithilfe finiter Differenzen bis zur dritten Ordnung die Querkraft ermittelt werden kann. Messfehler und ein schlechtes Signal zu Rausch Verhältnis potenzieren sich dadurch und machen die sinnvolle Bestimmung der Strukturintensität in der Praxis äußerst problematisch. Dieses Problem lässt sich teilweise umgehen, indem nicht alle Anteile der Strukturintensität als Zielgröße der Steuerung verwendet werden, sondern nur Einzelfaktoren.

Im konkreten Fall bedeutet dies, dass Schnelle und Winkelgeschwindigkeit gleichzeitig als Steuergröße dienen und Querkraft sowie Momente vernachlässigt werden. Mathematisch führt dies immer noch zur Reduktion der gesamten Strukturintensität. Abbildung 7 zeigt die Reduktion der mittleren quadratischen Schnelle im Barrierebereich. Dabei werden folgende Zielgrößen für die Steuerung betrachtet:

- Schnelle
- Schnelle + Winkelgeschwindigkeit
- Momentenanteil (Momente + Winkelgeschwindigkeit)
- Strukturintensität (Schnelle + Querkraft + Momente + Winkelgeschwindigkeit)

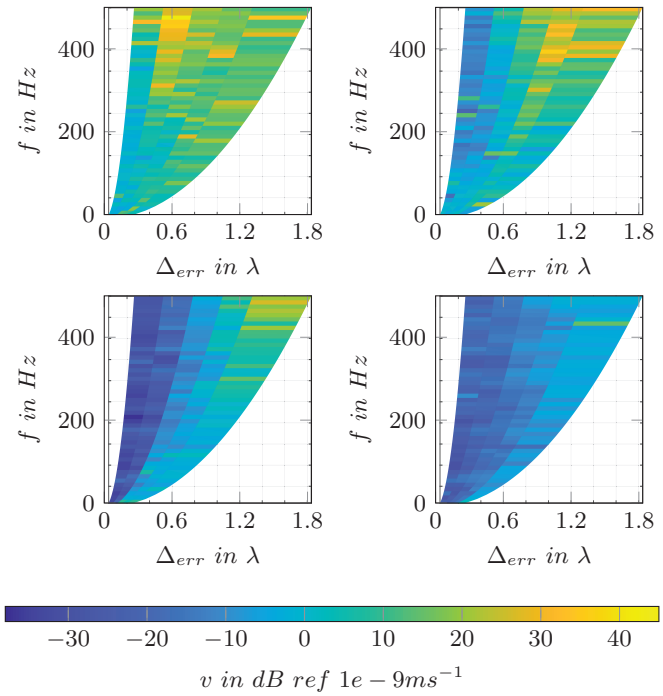

Abbildung 7: Globale Schnellereduktion für verschiedene Fehlersensordichten (10 Steuerkraftpaare): X-Achse - Fehlersensorabstand Δ_{err} in Wellenlängen λ, Y-Achse - Anregungsfrequenz f in Hz, Steuergrößen: oben links Schnelle, oben rechts Schnelle + Winkelgeschwindigkeit, unten links Momente + Winkelgeschwindigkeit, unten rechts Strukturintensität

Betrachtet man eine Dämpfung von 0 dB als Schwellenwert, so wird deutlich, dass mit einer Geschwindigkeitsregelung keine signifikante globale Dämpfung der Plattenschwingung erreicht werden kann. Bei einigen Frequenzen ist eine Dämpfung von etwa 5 dB zu erkennen, wenn ein vergleichsweise dichter Fehlersensorabstand mit weniger als $0,3\lambda$ verwendet wird. Die Hinzunahme Winkelgeschwindigkeiten bringt eine höhere Dämpfung bei weniger dichten Fehlersensoren. In diesem Fall wird eine Dämpfung von 5 dB bereits mit Sensoren in einem Abstand von $0,5\lambda$ erreicht. Die Auswirkung der Einbeziehung von Querkräften und Momenten ist jedoch wesentlich höher. Bei $0,5\lambda$ ist eine Gesamtdämpfung von mehr als 20 dB zu verzeichnen. Wird nur die Momentenkomponente berücksichtigt, liegt der Schwellenwert bei etwa 1λ. Bei vollständiger Strukturintensitätssteuerung kann eine globale Dämpfung bereits mit einem Sensorabstand von $1,2\lambda$ erreicht werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Diese numerische Studie hat die Vorteile der Steuerung der Strukturintensität bzw. der Komponenten im Vergleich zur Schnelle gezeigt. Es stellt sich heraus, dass die Verwendung von weniger dicht angeordneten Sensoren ausreicht, um eine globale Verringerung der Schwingungen nachgeschalteter Bereiche zu erreichen, wenn zusätzlich zur Schnelle und Winkelgeschwindigkeit auch Schnittgrößen und/oder Momente als Steuergrößen verwendet werden. Bei laufenden Wellen, wie sie mit diesem Modell simuliert werden, ist eine globale Abschwächung zu erkennen. Diese Studie befasst sich jedoch mit einer einfachen Platte ohne Versteifungen oder Krümmung. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die Eigenschaften der Strukturintensitätssteuerung für zylindrische Schalen und versteifte Strukturen zu bewerten, da dies den Energiefluss und damit die Sensorplatzierung erheblich beeinflusst. Außerdem muss die Größe des Nahfelds für Strukturintensität berücksichtigt werden. Da die Strukturintensität nicht wie in dieser Studie mit einem Punktsensor sondern mit einem Array aus Sensoren bestimmt werden kann, muss der Einfluss der Größe des Sensorarrays bewertet werden. Nicht zuletzt müssen die Ergebnisse experimentell überprüft werden, da die Leistung der vollständigen Strukturintensitätssteuerung aufgrund von Approximationsfehlern, die durch die notwendigen Ableitungen hoher Ordnung verstärkt werden, voraussichtlich deutlich schlechter sein wird.

Literatur

[Fuller et al., 1996] Fuller, C. R., Elliott, S. J., and Nelson, P. A. (1996). *Active control of vibration*. Acad. Press, London.

[Heinze, 2015] Heinze, C. (2015). Nicht-reflektierende ränder zur einfachen anwendung in der fem bei transienten und harmonischen analysen von faserverbundstrukturen.

[Kokott et al., 2019] Kokott, A., Haase, T., and Monner, H. P. (2019). Entwicklung einer körperschallbarriere auf basis der strukturintensität: Teil 2. In *Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA) 2019*.

[Noiseux, 1970] Noiseux, D. U. (1970). Measurement of power flow in uniform beams and plates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 47(1B):238–247.