

Neue Sensoren für die Messung der Abstrahlmoden als Element des aktiven Lärminderungssystems

Stanislaw Pietrzko¹, Wojciech Batko²

¹ EMPA Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, 8600 Dübendorf, Schweiz,
Email: stanislaw.pietrzko@empa.ch

² AGH University of Science and Technology, 30-059 Krakow, Polen, Email: batko@agh.edu.pl

Einleitung

Die aktive Regelung der Schallabstrahlung schwingender Strukturen verlangt die Messung von akustischen, frequenzabhängigen Abstrahlmoden (Strahlermoden), die im Wesentlichen für die abgestrahlte Schalleistung verantwortlich sind. Diese Eigenschwingungen können mit diskreten oder verteilten Sensoren wie piezoelektrischen Folien (PVDF) oder piezoelektrischen Fasern gemessen werden. Die Kenntnis der Abstrahlmoden erlaubt die Berechnung von lärmrelevanten, akustischen Zielfunktionen und damit auch die Auslegung eines Regelsystems das schallrelevante Schwingungsmoden modifizieren kann und damit auch eine Reduktion der abgestrahlten Schalleistung ermöglicht. In diesem Artikel werden neuartige Entwicklungen von Sensoren für die Messung von Abstrahlmoden sowie ein Sensor für die Messung von Volumenverschiebung am Beispiel eines schwingenden Balkens vorgestellt. Mit den zwei vorgestellten Typen von Sensoren kann man die Messung lärmrelevanter Schwingungsvorgänge direkt auf der Struktur realisieren. Die Messsignale können direkt dem Regelsystem für die Berechnung der Zielfunktionen zugeführt werden.

Abstrahlmodensensor

Die Schalleistung W einer schwingenden ebenen Platte, idealisiert durch aneinandergereihte, rechteckige Elementarstrahler, kann man mit Hilfe der Matrix des Strahlungswiderstandes R als $W = \mathbf{v}^H \mathbf{R} \mathbf{v}$ darstellen, wobei \mathbf{v} ein Vektor der Schallschnelle senkrecht zur Plattoberfläche beschreibt. Die Matrix R (reell, symmetrisch, positivsemidefinit) hat eine Eigenzerlegung in der Form, $R = \mathbf{Q} \mathbf{A} \mathbf{Q}^T$, wobei \mathbf{A} eine diagonale Matrix von Eigenwerten λ_k ist, welche absteigend und monoton auf der Hauptdiagonale angeordnet sind. Die Matrix \mathbf{Q} hingegen, besteht aus den orthogonalen Vektoren $\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \dots, \mathbf{Q}_k, \dots, \mathbf{Q}_J]$, Deformationen der Plattenoberfläche, sogenannten Abstrahlmodevektoren. Die Amplituden eines k -ten Abstrahlmodes \mathbf{Q}_k kann man wie folgt schreiben:

$$y_k = \mathbf{Q}_k^T \mathbf{v} \quad (1)$$

Damit lässt sich die Schalleistung endgültig formulieren als

$$W = \mathbf{v}^H \mathbf{Q} \mathbf{A} \mathbf{Q}^T \mathbf{v} = \sum_{k=1}^J \lambda_k |y_k|^2 \quad (2)$$

Die Gleichung (2) zeigt, dass die Abstrahlmoden unabhängig voneinander zur Schalleistung der Platte beitragen.

Um einen Abstrahlmodesensor zu entwickeln, ist es notwendig z.B. mit Hilfe einer piezoelektrischen Faser einen Strom zu messen, der proportional zum k -ten Abstrahlmode ist. Ein derartiger Sensor für einen Balken ist in der Abbildung 1 dargestellt.

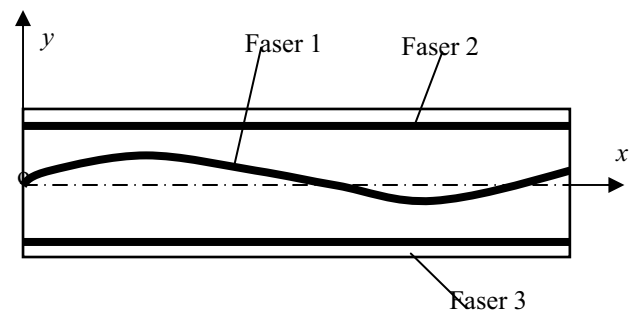


Abbildung 1: Abstrahlmodesensor bestehend aus 3 piezoelektrischen Fasern.

Der Sensor besteht aus 3 Piezofasern, die auf der Oberfläche des Balkens integriert sind. Die Fasern 2 und 3 sind Hilfsfasern, während die gekrümmte Faser 1 direkt für die sensorische Wirkung zuständig ist. Eine detaillierte Beschreibung des Sensors ist in [1] zu finden. Wesentlich ist, dass sich der Strom in der Faser 1 mit den Eigenmoden $\phi_n(x)$ und $\phi_m(x)$ darstellen lässt als:

$$I_T = \sum_{n=1}^M C_n \sum_{m=1}^M A_i \int_0^{l_x} e_{31} B_f \frac{\partial^2 \phi_n(x)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \phi_m(x)}{\partial x^2} dx \quad (3)$$

B_f, A_i, C_n sind Materialkonstanten. Dargestellt in Matrixform gilt:

$$I_T = \mathbf{C}^T \mathbf{K} \mathbf{A} \quad (4)$$

Mit Hilfe der Abstrahlmodeamplitude führt dies direkt auf die Messung eines k -ten Abstrahlmodes \mathbf{Q}_k . Daraus ergibt sich eindeutig die für Abstrahlmodemessung erforderliche Krümmung der Faser 1.

$$y_k = \mathbf{Q}_k^T \Phi \mathbf{A} \quad (5)$$

Φ ist eine Matrix der Strukturmoden des Balkens.

Verifikation des Abstrahlmodensensors, numerisches Beispiel

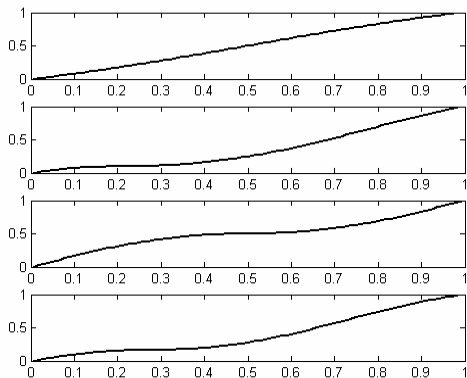


Abbildung 2: Erforderliche Krümmungen der Faser 1, um die Abstrahlmoden 1,2,3,4 eines Balkens zu messen (von oben gezählt).

Numerische Untersuchungen der Sensoreigenschaften wurden am Beispiel eines einseitig aufgespannten Balkens (Länge 500mm, Breite 40mm, Dicke 3.3mm) durchgeführt. Der Balken wurde mit einer Punktkraft angeregt. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Form der Abstrahlmoden eines Balkens unabhängig von den Randbedingungen ist. Im Gegensatz dazu sind die erforderlichen Krümmungen der Faser 1 für die Messung der einzelnen Abstrahlmoden von den Randbedingungen abhängig. Weitere Einzelheiten sind in [1] zu finden.

Volumenverschiebungssensor

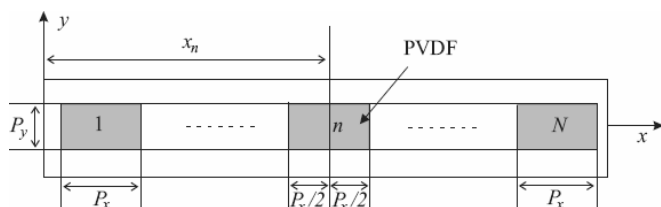


Abbildung 3: Volumenverschiebungssensor mit einer Anordnung von N PVDF Segmenten der Breite P_x und Höhe P_y gleichmäßig verteilt auf einem Balken der Länge L.

Auf einem Balken der Länge L , Breite b und Dicke h , wurden N rechteckige PVDF Segmente gleicher Form, mit einer Breite P_x und Höhe P_y in gleichem Abstand angebracht. Von Interesse ist die Volumenverschiebung des Balkens zwischen den Koordinaten x_1 bis x_2 ($0 \leq x_1 < x_2 \leq L$). Das Integral D der Volumenverschiebung kann man darstellen als

$$D = b \int_{x_1}^{x_2} w(x) dx \approx \sum_{n=1}^N W_n Q_n \tag{6}$$

Der Ausgang aus dem Volumenverschiebungssensor ist eine gewichtete Summe der einzelnen Ladungsbeiträge vom n ten PVDF mit dem unbekanntem Gewichtskoeffizienten W_n

Im weiterem besteht die Aufgabe, den Vektor der Gewichtskoeffizienten W_n W zu finden. Dies erfolgt z.B. mittels der

Singularwertzerlegung oder mit Hilfe der Tichonovschen Regularisierung. Die Details der Analyse sind im [2] zu finden.

Verifikation des Volumenverschiebungssensors, numerisches Beispiel

Der Sensor wird hier numerisch und experimentell für die Messung der Volumenverschiebungen eines Balkens für folgende 3 Fälle untersucht (s. Abbildung 4): a) Balken völlig mit PVDF bedecken, b) und c) Balken teilweise mit PVDF-Segmenten bedeckt.

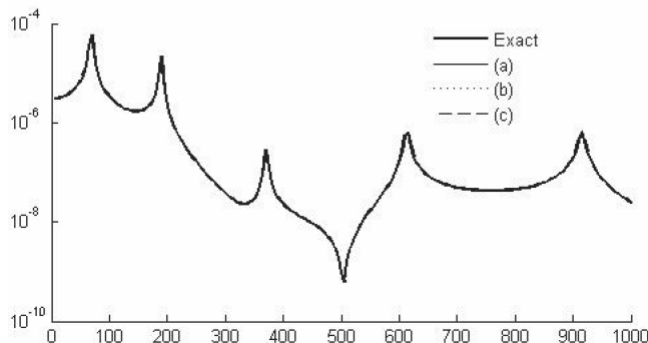
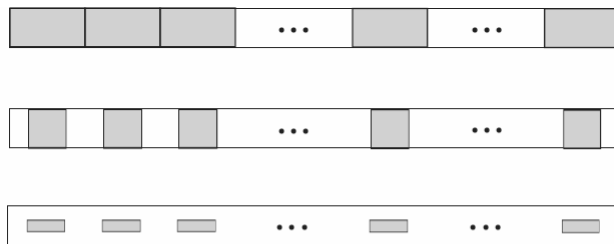


Abbildung 4: Oben, Verteilung von PVDF-Segmenten auf dem Balken. Unten, Gegenüberstellung der Volumenverschiebungen w als Funktion der Frequenzen f (Hz) mit exakten und gemessenen Werten (Kurven a, b, c).

Mit Hilfe der in [2] vorgeschlagenen Verfahren hat man die Gewichtungsmatrix W und in allen 3 Fällen exzellente Übereinstimmungen zwischen exakten und gemessenen Werten gefunden.

Zusammenfassung

Es werden Sensoren für die Messung von Abstrahlmoden und Volumenverschiebung präsentiert. Für die vorgeschlagenen Sensoren werden sowohl analytische als auch numerische und experimentelle Verifikationen durchgeführt und die Brauchbarkeit der Sensoren zur Ermittlung der Abstrahlmoden und Volumenverschiebungen bestätigt. Damit kann man die ermittelten Zielfunktionen im Regelsystem zur aktiven Lärminderung nutzen.

Literatur

[1] S. Pietrzko, Q. Mao, Design of radiation mode sensors by means of piezoelectric fibers, ACTIVE 2006 18-20, Adelaide Australia, September 2006
 [2] Q. Mao, S. Pietrzko, Measurements of local volume displacement using a piezoelectric array, Acta Acustica united with Acustica, vol. 92, 2006, pp 556-566