

Akustisch optimiertes Leiterbahnlayout aktiver Schalenstrukturen

J. Tschesche¹, M. Ibis², C. Thyse¹, S. Herold³, J. Bös¹, P. Groche², H. Hanselka^{1,3}

¹ LOEWE-Zentrum AdRIA, Fachgebiet SzM, TU Darmstadt

² LOEWE-Zentrum AdRIA, Fachgebiet PTU, TU Darmstadt

³ LOEWE-Zentrum AdRIA, Fraunhofer LBF, Darmstadt

tschesche@szm.tu-darmstadt.de

Einleitung

Die Schallabstrahlung flächiger Strukturen kann mit aktiven Materialien, wie beispielsweise Piezokeramiken, gezielt reduziert werden. Für den Informations- und Energiefluss zwischen aktiven Materialien und der notwendigen Regelungstechnik und Leistungselektronik sind elektrische Leiterbahnen erforderlich. Hierbei können die Leiterbahnen so optimiert werden, dass die Schallabstrahlung reduziert wird. Die Forderung nach Effizienz und vollständiger Funktionsintegration eines aktiven Strukturbauteils macht neben der optimierten Positionierung der aktiven Komponenten auch eine Optimierung von Leiterbahnen und Anschlüssen nötig. Auf diese Weise können die Leiterbahnen zur Reduzierung von Strukturschwingungen und somit zur Reduktion von abgestrahltem Luftschall eingesetzt werden. Die Umstellung auf Hochvoltnetzwerke im Automobilbau im Zuge der Förderung der Elektromobilität eröffnet darüber hinaus weitere Möglichkeiten zur Einflussnahme auf die Schallabstrahlung mit Hilfe zusätzlicher elektrischer Leiterbahnen.

Am LOEWE-Zentrum AdRIA werden Entwicklungsmethoden und das Verhalten aktiver Struktursysteme interdisziplinär erforscht. Im Rahmen einer Demonstratorentwicklung wird an einer Schalenstruktur erprobt, inwiefern sich die Gestaltung von elektrischen Leiterbahnen auf das akustische Verhalten der Struktur auswirkt. Als Größe zur Beurteilung des akustischen Verhaltens dient die Wellenadmittanz \underline{H}_W der Struktur

$$\underline{H}_W = \frac{\underline{v}}{\underline{p}} \quad (1)$$

Sie ist das komplexe Verhältnis aus der mittleren Schnelle \underline{v} der Strukturoberfläche, die sich aufgrund der Anregung einstellt, und dem anregenden Druck \underline{p} [1]. Ihre Betrachtung ist insbesondere dann sinnvoll, wenn die Anregung flächig durch ein einfallendes Schallfeld erfolgt. Dies ist beispielsweise bei Karosserieblechen, Maschinenverkleidungen oder Fassadenelementen der Fall.

Untersuchte Schalenstruktur

Die untersuchte Schale ist ein umgeformtes Stahlblech mit einer Stärke von 1 mm. Auf der Innenseite sind zwei Piezokeramik-Flächenwandler und die nötigen Leiterbahnen angebracht. Weitere Leiterbahnen befinden sich auf der Außenseite der Schale. Diese zusätzlichen Leiterbahnen stellen eine Funktionserweiterung der Struktur dar. Mit Blick auf zukünftige Hochvoltnetzwerke im Automobilbau sollen

diese Leiter, z. B. zum Anschluss von Bremsleuchten oder Blinkerleuchten, den Verzicht auf zusätzliche Verkabelung ermöglichen. Die Krümmung der Schale ergibt sich geometrisch aus einer parametrischen NURBS-Fläche, wie sie beispielsweise in [2] beschrieben werden. Abbildung 1 zeigt die Schalenstruktur und ihre Abmessungen.

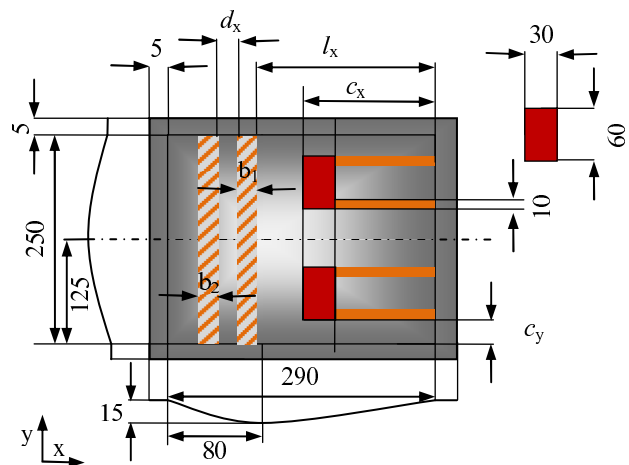


Abbildung 1: Schalengeometrie mit Abmessungen in mm und Lagen der Piezokeramiken (rot dargestellt) und Leiterbahnen (orange dargestellt; Position an Innenseite voll, Position an Außenseite schraffiert)

Die Anordnung der Piezokeramiken sowie der zugehörigen Leiterbahnen ist symmetrisch. Daher wird die Position der Keramiken mit den beiden Variablen c_x und c_y definiert. Die kupfernen Leiter zum Anschluss der Keramiken sind 10 mm breit, 0,1 mm stark und schließen, wie aus Abbildung 1 hervorgeht, an den Rändern der Keramiken ab. Die Leiterbahnen der Hochvoltnetzwerke an der Außenseite der Schale haben eine Stärke von 0,15 mm. Ihre Breite sowie ihre Position werden durch die Parameter l_x , d_x , b_1 und b_2 festgelegt.

Optimierungen und Ergebnisse

Die Optimierung erfolgt sequentiell in zwei Stufen. Zunächst wird der elektromechanische Kopplungsfaktor der ersten Eigenmode k_1 optimiert, um die bestmögliche Positionierung der Piezokeramiken zu gewährleisten. Anschließend erfolgt die Optimierung der Wellenadmittanz, ohne dabei Änderungen des Kopplungsfaktors aufgrund der geänderten Plattenimpedanz zu berücksichtigen. Dabei werden die Positionen und Abmessungen der elektrischen Leiterbahnen mit den vorhandenen Parametern variiert. Als Optimierungswerkzeug kommt ein adaptives Antwortflächenverfahren der Software OptiY zum Einsatz, dessen Antwortfläche durch

quadratische Funktionen beschrieben wird. Als Simulationsumgebung zur Berechnung der Strukturantworten kommt die FE-Software ANSYS zum Einsatz.

Das erste Optimierungsproblem lautet

$$\min \left(\frac{1}{k_1(c_x, c_y)} \right), \quad (2)$$

da sich bei ω_1 ein ausgeprägter Peak der Admittanz befindet. Als Lösung des Optimierungsproblems ergibt sich mit einem Parametersatz von $c_x=110$ mm und $c_y=24$ mm ein optimaler Kopplungsfaktor von $k_1=0,10$. Die allgemeinen elektromechanischen Kopplungsfaktoren k_n ergeben sich nach [3] aus den unterschiedlichen Eigenfrequenzen des Systems mit elektrisch freien und elektrisch kurzgeschlossenen Piezokeramiken zu

$$k_n = \sqrt{\frac{(\omega_n^K)^2 - (\omega_n^F)^2}{(\omega_n^F)^2}}, \quad (3)$$

wobei die hochgestellten Indizes K und F kennzeichnen, dass es sich um die Eigenfrequenzen des Systems mit elektrisch freier Piezokeramik (F) und kurzgeschlossener Piezokeramik (K) handelt. Die Antwortfläche des elektromechanischen Kopplungsfaktors ist in Abbildung 2 dargestellt.

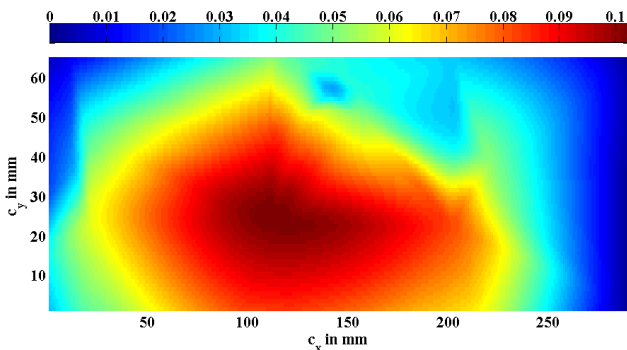


Abbildung 2: Antwortfläche des Kopplungsfaktors k_1

Mit den nun fest im Inneren der Schale positionierten Keramiken mit ihren elektrischen Leitern erfolgt im nächsten Schritt die Optimierung der Wellenadmittanz. Dabei wird das Leiterbahnlayout zusätzlicher Leiterbahnen angepasst. Als einschränkende Randbedingung gilt $0 < b_1 = b_2 \geq 30$ mm. Da sich ein ausgeprägter Peak in der ersten Resonanz der Schale zeigt, wird als Zielfunktion der Betrag der Admittanz der ersten Eigenfrequenz der aktiven Schale mit elektrisch freien Piezokeramiken verwendet. Das Optimierungsproblem lautet

$$\min(|Y_W(\omega_1^F, l_x, d_x, b_1, b_2)|). \quad (4)$$

Die Optimierung des Leiterbahnlayouts verringert die Wellenadmittanz der Schalenstruktur um über 8 dB gegenüber der Schale, auf der lediglich Piezokeramiken appliziert sind. Dieses Ergebnis wird mit den Parametern der zusätzlichen Leiterbahnen $l_x=99,65$ mm, $d_x=20,28$ mm, $b_1=26,63$ mm und $b_2=26,63$ mm erreicht. Abbildung 3

veranschaulicht die Veränderungen der Wellenadmittanz der Schalenstruktur in drei verschiedenen Stadien.

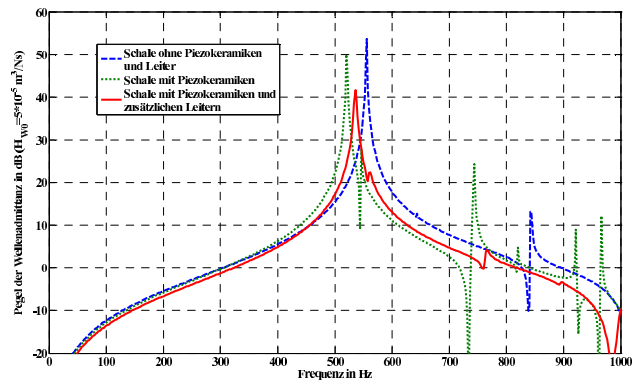


Abbildung 3: Wellenadmittanz der passiven Schale, der Schale mit applizierten Piezokeramiken ohne zusätzliche Leiterbahnen und mit optimiertem Leiterbahnlayout (Piezokeramiken jeweils elektrisch frei)

Da der elektromechanische Kopplungsfaktor im letzten Optimierungsschritt nicht berücksichtigt wird, erfolgt seine Berechnung separat am Ende. Der Betrag des Kopplungsfaktors hat sich durch das Anbringen zusätzlicher Leiter nicht verschlechtert. Er liegt nach wie vor bei $k_1=0,10$.

Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Entwicklung aktiver Strukturen können sämtliche aktiven und passiven Elemente so angeordnet werden, dass sich durch die Integration weiterer Funktionen in das Strukturbauteil zusätzliche Effekte erzielen lassen. Im konkreten Fall wird durch das Integrieren von elektrischen Leitern die Verbesserung des akustischen Verhaltens einer Schalenstruktur erreicht. Die Ergebnisse dieser numerischen Vorstudie konnten in Teilen bereits messtechnisch verifiziert werden. Insbesondere die Wechselwirkungen mit semi-aktiven Dämpfungsmechanismen gilt es noch simulativ und experimentell zu untersuchen. In weiteren Arbeiten sollen Vorteile und Grenzen derartiger Strukturbauteile genauer betrachtet werden. Auch eine integrierte Optimierungsstrategie, die sämtliche Systemgrößen miteinander in Verbindung setzt, muss noch entwickelt werden.

Danksagung

Der Dank der Autoren gilt dem Land Hessen, dem Bund sowie der Fraunhofer-Gesellschaft, durch deren Förderung die Forschung am LOEWE-Zentrum AdRIA ermöglicht wird.

Literatur

- [1] Cremer, L; Heckl, M.: Körperschall. Springer, 1967
- [2] Farin, G. E.: NURBS from projective geometry to practical use. Verlag A. K. Peters, 1999
- [3] Hering, E.; Modler, K.-H.: Grundwissen des Ingenieurs. Fachbuchverlag Leipzig, 2007