

Ein Konzept zur Schwingungs- und Schallabstrahlreduktion unter Ausnutzung des direkten piezoelektrischen Effekts

Oliver M. Fein, Lothar Gaul

Institut A für Mechanik, Universität Stuttgart; Email: {fein, gaul}@mecha.uni-stuttgart.de

Einleitung

Den Vorteilen von Leichtbaustrukturen steht der Nachteil der Gefährdung durch Schwingungen gegenüber. Bei Biegeschwingungen großer Flächen kommt es zu Geräuschemissionen im akustischen Nah- und Fernfeld. Die für die Geräuschemission verantwortlichen Strukturschwingungen können durch passive Maßnahmen reduziert werden. Die dabei zusätzlich aufgebrachte Masse verringert jedoch teilweise wieder die gewonnene Gewichtsersparnis.

Alternativ zu bereits erfolgreich angewandten Konzepten der aktiven Reduktion von Biegeschwingungen mittels piezoelektrischer Materialien [1, 2], können diese Materialien auch in semi-passiven Konzepten genutzt werden. Bei semi-passiven Konzepten wird, unter Ausnutzung des direkten piezoelektrischen Effekts, ein Teil der Schwingungsenergie in elektrische Energie umgewandelt. Werden beiden Elektroden durch ein elektrisches Netzwerk verbunden, so fällt die generierte elektrische Spannung am Netzwerk ab und wird in Joulesche Wärme umgesetzt. Das elektrische Netzwerk stellt somit eine Energiesenke dar. Das semi-passive Konzept läßt sich – im Vergleich zum aktiven Konzept – technisch einfach realisieren. Gegenüber passiven Konzepten mit viskoelastischem Material führt das semi-passive Konzept auf eine signifikante Gewichtsersparnis.

Auswahl der Eigenformen

Die Implementierung des semi-passiven Konzepts erfolgt in dieser Arbeit für eine 500x505x1,5 [mm³] große Rechteckplatte. Die Einspannung läßt sich in guter Näherung als fest-fest charakterisieren. Die Eigenfrequenzen sowie Eigenschwingungsformen werden unter Verwendung des Rayleigh-Verfahrens berechnet [3]. Die sich ergebenden Eigenfrequenzen sind tabellarisch aufgelistet (vgl. Tabelle 1). Die korrespondierenden Moden werden durch die Anzahl der Schwingungsmaxima entlang benachbarter Plattenkanten klassifiziert. Aus der Tabelle (vgl. Tabelle 1) ist eine relativ hohe Modendichte im Frequenzbereich 100 bis 350 Hz ersichtlich.

Mode	1/1	1/2	2/1	2/2	1/3	3/1	2/3	3/2	1/4	4/1	3/3
f_s [Hz]	52	94	112	162	203	212	228	255	295	325	341

Tabelle 1: Eigenformen und –frequenzen der Rechteckplatte

Betrachtungen zum Abstrahlgrad von Plattenschwingungen gestatten die Reduktion der Anzahl von Moden, die bei der Auslegung des Konzepts berücksichtigt werden. Nach Kollmann [4] lassen sich drei Bereiche der Abstrahlung unterscheiden. (1) Ein Bereich, in dem sich die Platte wie ein äquivalenter Kolbenstrahler verhält. Dies ist bei gegebener Platte nur für die erste Eigenschwingungsform (Mode 1/1) möglich. Alle Punkte der Platte schwingen komphas. (2) Ein Bereich, in dem akustischer Kurzschluß auftritt. Dieser zeigt sich ab der Biegewellen-Grenzfrequenz

$$f_g = \frac{c_L^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho h}{B}}, \quad \text{eq. 1}$$

sofern diese größer als die erste Eigenfrequenz der Platte ist. In Gleichung (eq. 1) charakterisiert ρ die Materialdichte, B die Biegesteifigkeit und h die Plattendicke. (3) Der Bereich voller Abstrahlung ab der Grenzfrequenz f^* . Die Grenzfrequenz ergibt sich bei der untersuchten Platte zu 7,4 kHz. Somit tritt im untersuchten Frequenzbereich von 100 bis 370 Hz ausschließlich akustischer Kurzschluß auf; die Schallabstrahlung der Platte ist abhängig von

den angeregten Eigenschwingungsformen. Die Schallabstrahlung ist besonders für solche Moden ausgeprägt, welche eine ungerade Anzahl von Maxima entlang einer oder beider Plattenkanten aufzeigen. Gemäß dieser Überlegung werden die Plattenbereiche für die Auslegung des semi-passiven Konzepts berücksichtigt, die hohe Schwingamplituden bei den Moden 3/1, 3/2 oder 3/3 aufweisen.

Semi-passives Konzept

Piezoelektrische Materialien, wie beispielsweise Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), lassen sich unter Ausnutzung des direkten piezoelektrischen Effekts zur Schwingungsreduktion verwenden. Hierzu ist die schubsteife Applikation der PZT-Elemente auf die Strukturoberfläche notwendig, so daß sich Dehnungen von der Struktur auf das PZT-Element übertragen. Die generierte elektrische Spannung, welche aus dem direkten piezoelektrischen Effekt resultiert, läßt sich an den Elektroden abgreifen. Werden beide Elektroden über ein passives elektrisches Netzwerk (PEN) verbunden, so resultiert daraus die Energieumwandlung in Wärme. Im einfachsten Fall besteht das PEN aus einem ohmschen Widerstand R_s .

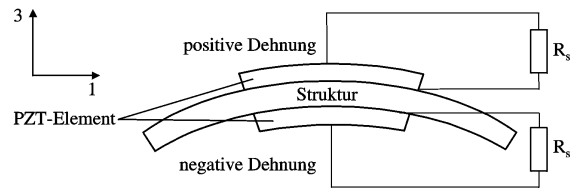


Abbildung 1: Piezoelektrisches Material mit Widerstand kurzgeschlossen

Bei dem vorgestellten Konzept werden PZT-Elemente auf beiden Seiten der Platte appliziert und die Elektroden durch R_s verbunden (Abbildung 1). Aufgrund besonderer Materialeigenschaften des PZTs (mono-orientiert) vereinfacht sich die Modellierung des Systems PZT-PEN, da eine Dehnung in 1-Richtung lediglich ein elektrisches Feld in 3-Richtung hervorruft. Dies gestattet die Modellierung des PZTs als elektrische Kapazität

$$C^T = A \epsilon_3^T / L. \quad \text{eq. 2}$$

Die Kapazität C^T ist proportional zur Fläche A der Elektrode senkrecht zur 3-Richtung sowie zur Permeabilität ϵ_3^T des PZTs in 3-Richtung und umgekehrt proportional zur Länge L . Der hochgestellte Index T kennzeichnet die entsprechenden Parameter bei konstanter mechanischer Spannung. Eine wichtige Werkstoffkonstante zur Charakterisierung des direkten piezoelektrischen Effekts stellt der elektromechanische Kopplungsfaktor k_{31} dar. Dieser ist ein Maß für die umgewandelte Energie und ergibt sich zu

$$k_{31} = d_{31} / \sqrt{s_{11}^E \epsilon_3^T}, \quad \text{eq. 3}$$

wobei d_{31} die piezoelektrische Konstante und s_{11}^E die Nachgiebigkeit bei konstantem elektrischem Feld des piezoelektrischen Materials angibt. Nach Hagood [5] ergibt sich bei Parallelschaltung einer ohmschen Last mit dem piezoelektrischen Material eine komplexwertige Nachgiebigkeit des PZTs. Der sich ergebende Verlustfaktor ist frequenzabhängig. Der maximale Verlustfaktor beträgt η^{\max} , wobei v die dimensionslose Frequenz charakterisiert [5]

$$\eta^{\max} = k_{31}^2 / 2 \sqrt{1 - k_{31}^2} \quad \text{bei } v = R_s C^S \omega = \sqrt{1 - k_{31}^2}. \quad \text{eq. 4}$$

Der Zusammenhang zwischen Kapazität bei konstanter Dehnung C^S und der Kapazität bei konstanter mechanischer Spannung C^T ist durch

$$C^S = C^T (1 - k_{31}^2) \quad \text{eq. 5}$$

gegeben. Die Gleichung (eq. 4) gestattet somit eine Verschiebung des maximalen Verlustfaktors zu einer bestimmten Frequenz mittels Wahl des Widerstands R_s . Die Verlustfaktoren, welche sich bei Aufbringen eines viskoelastischen Belags ergeben würden, fallen im Allgemeinen höher aus [5]. Sie gelten jedoch nur innerhalb eines relativ schmalen Temperaturbereichs. Die piezoelektrischen Materialeigenschaften sind jedoch bis zur Curie-Temperatur weitgehend konstant.

Experimentelle Umsetzung

Aus der bereits dargelegten Diskussion wird ersichtlich, daß die dissipierte Energie proportional zur Krümmung an der Stelle der Struktur ist, auf der das PZT-Element appliziert wird. Dies findet bei der Auslegung der Struktur Berücksichtigung, um die Dämpfung

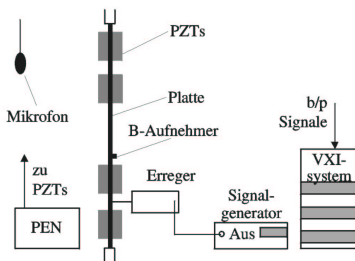


Abbildung 2: Experimenteller Aufbau

ausgewählter Moden zu erhöhen und somit den abgestrahlten Schall zu reduzieren. Durch Modellierung des PZT-Elements als Bernoulli-Euler Balken läßt sich die ‚effektive‘ Formänderungsenergie V für ein PZT-Element der Länge L berechnen. Im weiteren wird die ‚effektive‘ Formänderungsenergie verwendet, um die dissipierte Energie für die ausgewählten Moden zu maximieren. Die ‚effektive‘ Formänderungsenergie berücksichtigt dabei das Vorzeichen der Krümmung, wohingegen die Formänderungsenergie U das Integral über das Quadrat der Krümmungen darstellt

$$U = \frac{1}{2} EI \int_0^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx, \quad \text{eq. 6}$$

worin w die senkrechte Plattenauslenkung kennzeichnet. Wird beispielsweise das PZT-Element symmetrisch zu einem Schwingungsknoten appliziert, so erfährt eine Hälfte des PZT-Elements eine positive die andere Hälfte des PZT-Elements eine negative Dehnung. Es entsteht ein elektrisches Feld, welches in der einen Hälfte des PZT-Elements genau entgegengesetzt orientiert ist wie in der zweiten Hälfte; daraus resultiert keine generierte elektrische Spannung, obwohl das PZT-Element Formänderungsenergie gespeichert hat. Wird hingegen das Vorzeichen der Krümmung durch geeignete Betragsbildung berücksichtigt, so ergibt sich die sog. ‚effektive‘ Formänderungsenergie, die im geschilderten Fall zu Null wird [6]

$$V = \frac{1}{2} EI \int_0^L \left| \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right| \left| \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right| dx. \quad \text{eq. 7}$$

Hierin wird die vorzeichenbehaftete Krümmung mit dem Betrag der Krümmung multipliziert und integriert. Anschließend erfolgt die Betragsbildung der sich ergebenden Energiegröße. Mittels Gleichung (eq. 7) werden acht Positionen auf der Platte bestimmt, so daß sich eine Energiedissipation für die drei genannten Moden ergibt. Die PZT-Elemente werden beidseitig appliziert, was annähernd eine Verdopplung der Energiedissipation zur Folge hat. Die Elektroden eines PZTs werden durch den Widerstand R_s verbunden. Zusätzlich erfolgt die Anpassung des PENs gemäß der Gleichung (eq. 4), so daß die Energiedissipation für Mode 3/2 maximiert wird. Die Verifikation des semi-passiven Konzepts erfolgt in einem Experiment. Hierbei wird die Platte mittels eines elektro-

namischen Schwingerregers zu Biegeschwingungen angeregt und die resultierende Amplitude der Strukturschwingung sowie der emittierte Schalldruck in einer Entfernung von ca. 1,2m senkrecht zur Platte bestimmt. Der experimentelle Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

Ergebnisse

Aus der Anwendung des semi-passiven Konzepts, realisiert durch Parallelschaltung eines PZTs mit dem Widerstand R_s , resultiert eine Reduktion der Strukturschwingung um 3,5, 6,5 bzw. 2,0 dB für die Mode 3/1, 3/2 bzw. 3/3.

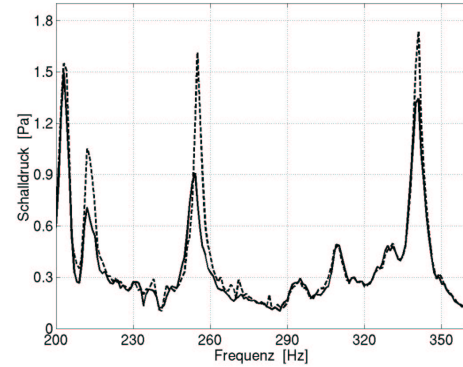


Abbildung 3: Frequenzgang des emittierten Schalldrucks ohne (Strichlinie) und mit (Vollinie) semi-passivem Konzept

Zusätzliche Messungen des abgestrahlten Schalldrucks belegen die Reduktion der Schallemission durch das semi-passive Konzept. Der emittierte Schalldruck einer Platte mit (Vollinie) und ohne (Strichlinie) semi-passivem Konzept ist graphisch gegenübergestellt (Abbildung 3). Die Reduktion der Schallemission, resultierend aus der 3/2 Mode ist deutlich zu erkennen. Die Abnahme der Schallemission beträgt für die 3/2 Mode 5,5 dB. Für die Schallabstrahlung der Moden 3/1 und 3/3, welche nicht explizit bei der Auslegung des PENs berücksichtigt wurden, ergibt sich eine Reduktion um 3,1 bzw. 1,7 dB.

Zusammenfassung

Durch Anwendung des semi-passiven Konzepts konnte die Strukturschwingung, sowie die damit verbundene Schallemission, signifikant reduziert werden. Die Vorteile des Konzepts liegen in der einfachen technischen Realisierung sowie der daraus resultierenden geringen zusätzlichen Masse. Im Vergleich zu passiven Verfahren mittels viskoelastischen Materialien, ist der breite Temperaturbereich hervorzuheben, in dem das Konzept angewendet werden kann. Ein Nachteil des Konzepts ist darin zu sehen, daß die maximale Dämpfung bei Verwendung eines ohmschen Widerstands nur bei einer Frequenz erreicht werden kann. Eine Verbesserung könnte durch eine frequenzabhängige Adaption des elektrischen Widerstands erreicht werden.

[1] Stöbener, U., Gaul, L. Active Control of a Car Body Based on Experimentally Evaluated Modal Parameters – MSSP 15 (1), S. 173-188, 2001.

[2] Fein, O., Gaul, L. Reduction of Sound Emission from Submerged Structures Using Piezoelectric Sensors and Actuators - Proc. Ninth Congress on Sound and Vibration, S. 316-323, 2002.

[3] Warburton, G. The Vibration of Rectangular Plates - Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, S. 371-384, 1954.

[4] Kollmann, F. Maschinenakustik – Springer Verlag, 1993.

[5] Hagood, N., Flowtow, A. Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and a Passive Electrical Network – JSV 146(2), S. 243-268, 1991.

[6] Davis, C., Lesieutre, G. A Modal Strain Energy Approach to the Prediction of Resistively Shunted Piezoceramic Damping – JSV 184(1), S. 129-139, 1995.