Strukturberuhigung eines spiralförmigen Akustischen Schwarzen Lochs (ASL)

Peter Schrader¹, Christian Heinrichs¹, Fabian Duvigneau¹, Hermann Rottengruber¹ ¹ Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 39106 Magdeburg, E-Mail: peter.schrader@ovgu.de

Parameter und Potenziale des ASL-Konzeptes

Das Konzept der Festkörper-ASL nutzt den dispersiven Charakter der Biegewellen einer Platte und die Abnahme ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit mit sinkender Plattendicke, die bei einer Kantenhöhe von Null ebenfalls Null wird. Die Entdeckung und grundlegende analytische Beschreibung des Effektes leistete M. A. Mironov 1988 [1]; die für eine praktische Anwendung des Effekts entscheidende Erweiterung, die Applikation eines dämpfenden Materials an der "Klinge" des ASL mit endlicher Klingenhöhe h_t , ihre analytische Beschreibung und experimentelle Erprobung ist Verdienst von V. V. Krylov, u. a. in [2]. Die durch Mironov und Krylov zum ASL-Konzept weiterentwickelte Theorie der Biegewellen in Platten ermöglicht die Vorhersage des Einflusses von geometrischen Gestaltungsparametern und frequenzabhängigen Materialkenngrößen. Die wichtigsten geometrischen Parameter sind in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Geometrie einer ASL-Plattenkante nach [3]

Für die ASL-Platte ohne zusätzliches Dämpfungsmaterial der Höhe h_l ergibt sich für einen Dickenverlauf der Form $h(x)=\varepsilon \cdot x^n$ mit n=2 der Betrag des Reflexionskoeffizienten |r|der in das ASL-Profil einlaufenden Biegewelle der Wellenzahl k zu:

$$|r| = exp\left(-2\int_{x_0}^{x_t} \mathfrak{I}(k)dx\right) = \left(\frac{h_t}{h_0}\right)^{\frac{\eta_{pl}}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \sqrt[4]{\frac{12(1-\mu^2)\rho_{pl}\omega^2}{E_{pl}}}}.$$
 (1)

Darin sind ρ_{Pl} die Dichte, E_{Pl} der E-Modul, η_{Pl} der die Materialdämpfung charakterisierende Verlustfaktor der Platte und ω die Kreisfrequenz. Aus dieser Gleichung geht hervor, dass ein Plattenmaterial mit nur geringer Werkstoffdämpfung, wie Aluminium oder Stahl, keine nennenswerte Verringerung des Reflexionsfaktors zu leisten vermag - außer bei unrealisierbar geringen h_t und ε (d. h. sehr hohen Klingenlängen x_0). Deshalb lässt sich der ASL-Effekt ohne zusätzliches Dämpfungsmaterial ausschließlich mit selbstdämpfenden Plattenmaterialien, wie z. B. Kunststoffen, effektiv ausnutzen. Für PVC wird in der Literatur beispielsweise ein Verlustfaktor von 0,04 angegeben. Wird dieser frequenzunabhängig angenommen, ergibt sich für ein festes h_t von 0,1 mm der in Abbildung 2 dargestellte Einfluss der Profillänge auf das Dämpfungsverhalten. Laut der Ergebnisse in Abbildung 2 ist für die Strukturdämpfung niedriger Schwingungsfrequenzen eine hohe Profillänge des

ASL anzustreben. Nach Gl. (1) sind eine geringe Kantenhöhe h_t , eine niedrige Plattendicke, sowie eine hohe Dichte und ein niedriger E-Modul des ASL-Materials von Vorteil.



Abbildung 2: Reflexionskoeffizient nach Gl. (1) für ASL aus PVC (E=2700 MPa, $\rho=1380$ kg/m³) unterschiedlicher Profillänge x_0 mit Plattenhöhe $h_0=2$ mm, Profilexponent n=2 und Kantenhöhe $h_{i}=0,1$ mm

Für typische metallische Plattenmaterialien wie Aluminium und Stahl ist hingegen die Anbringung eines Dämpfungsbelages mit der Länge $l_d = x_l - x_t$ und der Dicke $h_l(x)$ erforderlich. Das in Gl. (1) dargestellte Dämpfungsintegral zerfällt im Falle $x_l < x_0$ in zwei Bereiche, von denen einer die Wirkung des Dämpfungsmaterials einbezieht. Das Integral für den zusätzlich gedämpften Bereich wird in [2] hergeleitet und besitzt ausschließlich für Dämpfungsschichten mit $h_l \ll h_t$ eine analytische Lösung. Es wird hier auf die Darstellung des langen Integrals des Dämpfungsbereiches verzichtet. Stattdessen werden anhand der Abbildungen 3 und 4 die Ergebnisse der numerischen Lösung des selbigen diskutiert.



Abbildung 3: Reflexionskoeffizient mit Dämpfungsmaterial der Höhe h_l =0,1 mm oder 1,0 mm aus Nitrilkautschuk mit E_l =300 MPa und η_d =0,4. Plattenhöhe h_0 =2 mm, h_t =100 µm. Variation der Länge l_d bezogen auf x_0 - x_t in %. ASL-Profil mit n=2 und einer Klingenlänge von x_0 =100 mm

Abbildung 3 zeigt die berechnete Wirkung einer Veränderung der Länge und Höhe des dämpfenden Materials an einem dämpfungsschwachen ASL aus Aluminium. Es zeigt sich eine starke Wirkung der Erhöhung der Höhe h_l von 0,1 mm auf 1 mm. Eine Erhöhung der Länge des Dämpfungsfilms von 20% auf 50% ist erst bei dieser Dicke besonders wirksam. Diese Betrachtung legt nahe, dass mit steigender Dicke des Dämpfungsmaterials eine Verbesserung des Absorptionsverhaltens des ASL bzw. eine weitere Verringerung seines Reflexionskoeffizienten erzielt werden könnte.



Abbildung 4: Reflexionskoeffizient eines Aluminium-ASL mit n=2, $h_0=2$ mm ohne (rot) und mit voller Dämpfungsfüllung (schwarz) aus Nitrilkautschuk $E_l=300$ MPa und $\eta_d=0,4$. Klingenlänge von $x_0=100$ mm (oben) und 400 mm (unten). Verschiedene Kantenhöhen $h_t=0,1$ und 0,05 mm.

Abbildung 4 zeigt daher den Reflexionskoeffizienten eines Aluminium-ASL mit unterschiedlichen Profillängen x_0 und Kantenhöhen h_t ohne (rot) und mit vollständiger Füllung des Profilbereiches mit Nitrilkautschuk (schwarz). Der Vergleich der beiden durchgezogenen schwarzen Kurven im Diagramm von Abbildung 3 und im oberen von Abbildung 4 zeigt, dass die vollständige Füllung des Profilbereiches mit dämpfendem Material gegenüber einer 1 mm hohen Schicht auf 50% der Profillänge nur eine geringfügige zusätzliche Verringerung des Reflexionskoeffizienten bewirkt. Die Dämpfung des Profilbereiches demzufolge dünnsten leistet den entscheidenden Beitrag zur Dissipation der Schwingungsenergie. Das untere Diagramm in Abbildung 4 zeigt, dass analog zu dem in Abbildung 2 dargestellten selbstdämpfenden Material eine Verbesserung der absorbierenden Wirkung durch Verlängerung der ASL-Klingenlänge erzielt wird, die insbesondere für tiefe Frequenzen, bei denen passive Maßnahmen üblicherweise kaum wirken, sehr interessant ist. Die fertigungstechnisch herausfordernde Verringerung der Kantenhöhe h_t von 0,1 auf 0,05 mm liefert, insofern das ASL-Profil zusätzlich gedämpft wird, eine zusätzliche Erhöhung der Schwingungsabsorption. Dies steht im Einklang mit den

Ergebnissen von Denis et al. in [3]. Dort ergibt die Verringerung von h_t eine Erhöhung der modalen Dichte und damit eine Verkleinerung der Amplituden. Eine Verlängerung des ASL-Profils erhöht generell die modale Dichte desselben; besonders lange ASL ermöglichen daher eine Schwingungsdämpfung im gesamten Hörfrequenzbereich. Die von Lee und Jeon in [4] vorgestellte Untersuchung spiralförmiger ASL liefert einen Ansatz zur platzsparenden Gestaltung solcher ASL und zeigt die Absenkung der Schwingungsamplituden auch bei niedrigen Frequenzen durch Erhöhung der modalen Dichte mit länger werdenden ASL-Profilen mit einer Profillänge von bis zu 350 mm. Dieses Spiralkonzept wird hier aufgegriffen und um eine Dämpfungsfüllung erweitert, die den Hohlraum zwischen den Spiralwindungen ausfüllt und damit sowohl eine vorteilhafte beidseitige Dämpfung erzeugt als auch die Möglichkeit einer zu steifen Kopplung, bei der die Dämpfungsfüllung nur noch wenig Schwingungsenergie dissipiert, als vielmehr die einfallende Welle wieder reflektiert. Das Konzept des Spiral-ASL mit Dämpfungsfüllung wird im Folgenden numerisch und experimentell untersucht.

Simulation einer ASL-Spirale mit Dämpfung

Für die Untersuchung wurde ein spiralförmiges ASL mit einer Profillänge von 1050 mm entworfen, simuliert, gefertigt und im Versuch erprobt. Das in Abbildung 5 gezeigte FE-Modell entspricht dem gefertigten ASL hinsichtlich der dargestellten Einspannung, Kraftanregung (F_A) und der für die Auswertung des Schwingungsverhaltens genutzten Außenfläche (siehe Versuchsaufbau in Abbildung 9). Als Vernetzung für das ASL und die Dämpfungsfüllung wurden Tetraeder-Elemente mit quadratischen Ansatzfunktionen gewählt. In einer vorangegangenen Konvergenzanalyse wurde das Modell des ASL aus Stahl ohne dämpfende Füllung in unterschiedlichen Vernetzungsfeinheiten berechnet und die mittlere Schwingschnelle an der "Außenfläche" ausgewertet. Basierend auf den Ergebnissen wurde eine maximale Elementkantenlänge von 1,0 mm gewählt, die zu 388.044 Elementen im Modell ohne Füllung führt. Diese Vernetzung ist in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5: FEM-Modell des gefertigten und untersuchten ASL mit Dämpfungsfüllungen (weiß) in exemplarischen Längen

Dieselbe Vernetzungsfeinheit wurde bei den Dämpfungsfüllungen gewählt, die, ausgehend von der innenliegenden Profilkante der Höhe h_i =0,1 mm, Längen von

30 mm, 60 mm, 90 mm, 210 mm, 410 mm, und 1050 mm (volle Länge) aufweisen. Die Dämpfungsfüllungen wurden mit den Daten von fünf verschiedenen Kunststoffschäumen parametriert, wobei der Speicher- und Verlustmodul E' und E'' bzw. der entsprechende Real- und Imaginärteil des komplexen Schubmoduls G^* frequenzabhängig sind. Abbildung 6 zeigt für fünf Kunststoffschäume farbig die Charakteristik des Verlustfaktors $\eta_d = E''/E'$, basierend auf Messungen aus [5]. Die grauen Kurven sind die zur Auswahl stehende Grundgesamtheit, in der die gewählten Materialien besonders charakteristische Verläufe darstellen.



Abbildung 6: Verlustfaktor-Verlauf der hier in die Darstellungen einbezogenen Kunststoffschäume nach [5]

Die Dämpfermaterialien unterscheiden sich nicht nur in der Verlustfaktor-Charakteristik sondern auch in ihrer Elastizität. Der Melaminharz-Schaum und der Polyester 1 haben einen etwa 3-fach höheren E-Modul als die weicheren Polyether 1 und 2 und der Polyester 2. Zudem sind die Dichten unterschiedlich (siehe Legende der Abbildung 6). Die Berechnung des Schwingungsverhaltens wird im Frequenzbereich mit einer sinusförmigen Kraftanregung F_A der Amplitude 1 N durchgeführt. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen in Schmalband- und in Terzdarstellung in 10 Hz-Schritten von 0,01 bis 10 kHz am Beispiel der Fülllänge von 60 mm.

In beiden Darstellungen der Abbildung 7 wird eine um bis zu 10 dB stärkere Schwingungsdämpfung durch die weichen Dämpfungsmaterialien im Vergleich zu den steiferen sichtbar. Die höhere Steifigkeit des Melaminharz- und des Polyester 1-Schaums führt zum Eintreten der oben genannten Möglichkeit einer zu steifen Kopplung und in Folge dessen zu dem nahezu vollständigen Ausbleiben der dissipativen Wirkung des ASL. Die Unterschiede der Verlustfaktoren von Melaminharz und Polyester 1 zeigen sich in den Ergebnissen kaum. Bei den weichen Schäumen hingegen werden die Schwingungen oberhalb von 0,15 kHz kontinuierlich um 3 dB bis 12 dB reduziert - mit zu höheren Frequenzen abnehmender Tendenz. Im Vergleich der Charakteristiken der in Dichte und E-Modul ähnlichen Polyether 1 und 2-Schäume zeigt sich der Einfluss des höheren Verlustfaktors (Polyether 1) deutlich mit um bis zu 3 dB höheren Pegelreduktionen oberhalb von 1,5 kHz. Die Polyester 2Füllung liegt im Verlustfaktor-Verlauf zwischen den beiden Materialien, was sich auch in der Schwingungsdämpfung zeigt. Unterhalb von 1 kHz schlagen sich die Unterschiede der Verlustfaktoren nicht im Dämpfungsverhalten nieder.



Abbildung 7: Simulierte gemittelte Schwingschnelle der Außenfläche in Schmalband- (oben) und Terzdarstellung (unten) für unterschiedliche Dämpfungsmaterialien der Länge 60 mm

Fertigung und experimentelle Erprobung

Das numerisch untersuchte ASL wurde an der OvGU mit dem SLM-Verfahren aus Edelstahl gefertigt (siehe Abbildung 8).



Abbildung 8: Fertigung des spiralförmigen ASL (rechts erkennbar) aus pulverförmigem X2CrNiMo17-12-2 im Selective-Laser-Melting (SLM)-Verfahren an der OvGU [6]

Die hergestellte Kantenhöhe h_t ist mit 0,15 mm etwas höher als die im Modell (0,1 mm). Weitere Unterschiede zwischen Modell und gefertigtem ASL sind nicht bekannt; beide basieren auf identischen CAD-Daten. Das gefertigte ASL wurde entsprechend Abbildung 9 eingespannt und mit weißem Rauschen im untersuchten Frequenzbereich angeregt. Einspannung und "Außenfläche" sowie die Kraftanregung entsprechen den Positionen in der Simulation. Die Schwingschnelle wird über die Außenfläche sowie an verschiedenen in Abbildung 9 hervorgehobenen Punkten mittels Laservibrometrie erfasst.



Abbildung 9: Versuchsaufbau der Laservibrometer-Messung am gefertigten ASL analog zum Simulationsmodell

Aufgrund der Messeinstellungen ergibt sich oberhalb von 6 kHz eine Unschärfe der Messwerte um bis zu 10 dB, wie sich in einer Reproduzierbarkeitsbetrachtung zeigt. Daher ist oberhalb dieser Frequenz ein Vergleich der Werte untereinander und mit den Simulationsergebnissen nicht sinnvoll. Insgesamt kommen Simulation und Experiment einander in den Ergebnissen nahe, wie der Vergleich des grauen und schwarzen Graphen in Abbildung 10 zeigt.



Abbildung 10: Gemittelter Schnellepegel der Außenfläche aus Simulation (grau) und Experiment. ASL mit verschieden langen Dämpfungsfüllungen aus weichem PUR-Kunststoffschaum. Grüner Graph der 150 mm Füllung entspricht einer 210 mm Füllung mit Aussparung der ersten 60 mm ab der ASL-Kante.

Weiter zeigt Abbildung 10 die Wirkung einer weichen Polyurethan-Dämpfungsfüllung, welche eine Klingenlänge von 210 mm (20% Profillänge, blauer Graph) und 410 mm (39 % Profillänge, gelber Graph) abdeckt. Bei dem grünen Graphen wurden von der 210 mm langen Füllung 60 mm ausgehend von der ASL-Kante entfernt. Damit ist hier der dünnste Bereich des ASL-Profils nahezu ungedämpft. Bei allen Füllungen wird gegenüber den zuvor erörterten Simulationsergebnissen eine Dämpfung erst oberhalb von 0.2 kHz wirksam. Diese etwas höhere minimale Dämpfungsfrequenz ist auf die bereits erwähnte höhere Kantenhöhe des ASL-Profils zurückzuführen und bestätigt die in Gl. (1) gegebene und in Abbildung 4 dargestellte Wirkung einer Erhöhung von h_t . Der Vergleich des blauen und des gelben Graphen zeigt, dass eine Verdopplung der

Länge des Dämpfungsmaterials, entsprechend Abbildung 3, nur geringfügige zusätzliche Dämpfung bewirkt. Demgegenüber führt ein Entfernen des Dämpfungsmaterials einer Länge von 5,7% der Profillänge an der Profilkante zu einer deutlichen Verringerung der Dämpfungswirkung oberhalb von 0,4 kHz. Dies zeigt, dass die Positionierung des Dämpfungsmaterials nahe der ASL-Kante die wesentlichste funktionale Bedeutung hat. Die Terzdarstellung der Ergebnisse in Abbildung 10 liefert Pegelreduktionen von 2 dB bis 6 dB. Die Tendenz der Abnahme der Wirkung mit höher werdenden Frequenzen ist hier dieselbe wie in der Simulation (Abbildung 7). Die geringere Pegelreduktion ist auf die größere Kantenhöhe des gefertigten ASL sowie die Vorspannung des Schaumes beim Einbau zurückzuführen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulationen und Experimente bestätigen das Potenzial des ASL-Konzeptes zur breitbandigen und effektiven Schwingungsabsorption auch bei dämpfungsuntypisch tiefen Frequenzen. Es wurde gezeigt, dass bei der neuen Dämpfungsfüllung eines spiralförmigen ASL die Auswahl besonders weicher Dämpfungswerkstoffe für die Funktion entscheidend ist, noch vor einem hohen Verlustfaktor. Bei dem hier vorgestellten, bisher unübertroffen langen ASL bleibt die Dämpfung des dünnen Kantenbereichs am Ende des ASL die entscheidende Maßnahme – wie bei allen bisherigen Veröffentlichungen, und im Einklang mit der Theorie. Eine Verlängerung der Dämpfer bis zu 50% der Profillänge verbessert die Wirkung wenig, aber noch messbar; als wichtig erweist sich ebenfalls die geringe Kantenhöhe h_t .

In weiteren Untersuchungen werden u. a. die Gestaltung der ASL-Kante betrachtet, die Auswirkung der hier untersuchten, optimiert dämpfenden ASL-Spirale auf das Schwingungsverhalten einer Ölwanne behandelt, sowie Fertigungsverfahren zur Erzeugung von $h_t < 0.1$ mm gezeigt.

Literatur

- Mironov, M. A., Propagation of a flexural wave in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval, Soviet Physics – Acoustics, Vol. 34, 1988, pp. 318-319
- [2] Krylov, V. V., New type of vibration dampers utilizing the effect of acoustic ,black holes', Acta Acustica united with Acustica, Vol. 90, 2004, pp. 830-837
- [3] Denis, V. et al., Modal Overlap Factor of a beam with an acoustic black hole termination, Journal of Sound and vibration, Vol. 333, 2014, pp. 2475-2488
- [4] Lee, J. Y., Jeon, W., Vibration damping using a spiral acoustic black hole, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 141, 2017, pp. 1437-1445
- [5] Schrader, P. et al., Finite element analysis of the acoustic behavior of poroelastic materials based on experimentally determined frequency dependent material properties, 28th edition of the Biennial ISMA conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, 2018
- [6] Heinrichs, C., Herstellung und erste Untersuchungen neuer Acoustic-Black-Hole (ABH)-Strukturen zur Reduktion der Schallabstrahlung schwingender Oberflächen, Masterarbeit, Magdeburg, 2019