

Einfluss von akustischen schwarzen Löchern auf die Energieverteilung von dünnwandigen Plattenstrukturen

Matthias Miksch¹, Uwe Christian Müller², Alexander Peiffer² und Gerhard Müller¹

¹ Technische Universität München, Deutschland, Email: matthias.miksch@tum.de

² Airbus Group, 81663 Ottobrunn, Deutschland

Einleitung

In dünnwandigen Strukturen kann die Ausbreitung von Biegewellen durch eine Variation der Dicke der Struktur moduliert werden. Sogenannte akustische schwarze Löcher (ASL) nutzen diese Modulation, um gezielt Schwingungsenergie aus der Struktur zu absorbieren. Hierbei wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Amplitude der Biegewelle durch die Reduktion der Dicke der Struktur beeinflusst.

Der Vorteil der ASL gegenüber klassischen Dämpfungsmechanismen liegt in der geringen Masse, die für diese Maßnahme nötig ist. Durch die lokale Modulation der Biegewellen innerhalb des ASL kann die Effizienz des lokalen Dämpfungsmechanismus gesteigert werden. Für die Dämpfungseffizienz spielt neben der lokalen Dimensionierung eines ASL auch die Konfiguration der Gesamtstruktur eine wesentliche Rolle [1, 4]. Um den Einfluss verschiedener ASL-Konfigurationen zu bewerten liefert die Untersuchung der Energieverteilung in solchen Strukturen wichtige Erkenntnisse.

Akustische schwarze Löcher (ASL)

Der Einfluss einer Dickenänderung auf die Ausbreitung von Biegewellen wurde bereits 1988 von Mironov beschrieben [5]. Eine lokale Reduktion der Plattendicke hat zur Folge, dass die Biegesteifigkeit der Struktur abnimmt.

$$D(x) = \left(\frac{Eh(x)^3}{12(1-\nu^2)} \right) \quad [\text{Nm}] \quad (1)$$

E und ν sind der E-Modul und die Querdehnzahl des Materials. $h(x)$ beschreibt die Dicke an der Stelle x . Aufgrund der Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Biegesteifigkeit der Struktur reduziert sich so auch die Wellengeschwindigkeit der Biegewellen.

$$c_p(x) = \left(\frac{D(x)\omega^2}{h(x)\rho} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (2)$$

ρ bezeichnet die Dichte des Materials der Struktur und ω die Kreisfrequenz der Biegewelle.

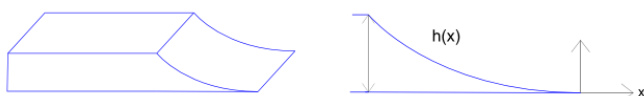


Abbildung 1: Platte mit Dickenverjüngung am Rand

In der Theorie kann die Biegewelle bei einer ausreichend glatten Profilverjüngung lokal bis zum Stillstand „ausgebremst“ werden [5]. Die Biegewelle, die durch die Profilverjüngung läuft, kann nicht mehr entkommen, da die Wellengeschwindigkeit „verschwindet“. Hierfür wird eine stetige Dickenänderung der Form $h(x) = \epsilon x^m$ mit $m > 2$ und $\epsilon \ll (3\rho\omega^2/E)^{1/2}$ benötigt.

Der in der Theorie existierende Grenzfall einer ideal verschwindenden Dicke ist in der Praxis nicht umzusetzen. Jedoch können die aus der reduzierten Steifigkeit resultierenden hohen Schwingungsamplituden der Biegewellen genutzt werden, um durch lokal angebrachte Dämpfungsmechanismen Schwingungsenergie besonders effizient zu absorbieren (vgl. [2], [3]).

Energetische Betrachtung

Im Folgenden werden die Ergebnisse numerischer Studien, die an Platten mit verschiedenen Profilverjüngungen unter Körperschallanregung durchgeführt wurden, diskutiert. Um den Einfluss dieser Profilvariationen zu bewerten werden Platten mit unterschiedlichen Maßnahmen mit einer gleichförmigen Platte ohne Maßnahmen verglichen. Hierfür wird die Einfügedämpfung aus dem Verhältnis der normalisierten Energien in der jeweiligen Struktur berechnet. Als Referenz wird hier die gleichförmige Platte ohne zusätzliche Maßnahmen herangezogen.

$$\Delta L = 10 \log \left(\frac{E_{uni}/P_{uni}}{E_{...}/P_{...}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

Die Platten haben die Maße $60 \times 50 \times 0,3 \text{ cm}$ und

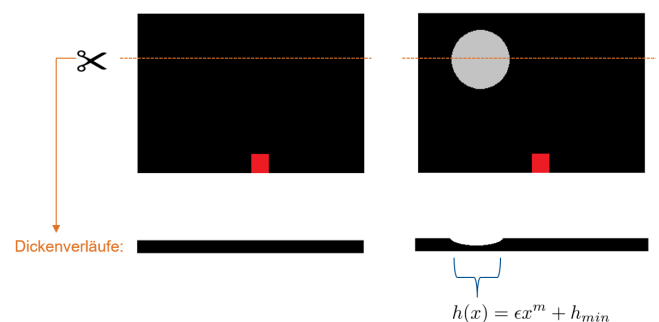


Abbildung 2: Platte mit Dickenverjüngung am Rand; rot: harmonische Flächenlast; grau: Bereich der Dickenänderung

sind aus Titan gefertigt. Der Profilverlauf der lokalen Dickenvariation ist rotationssymmetrisch und ist über $h(x) = \epsilon x^m + h_{min}$ beschrieben.

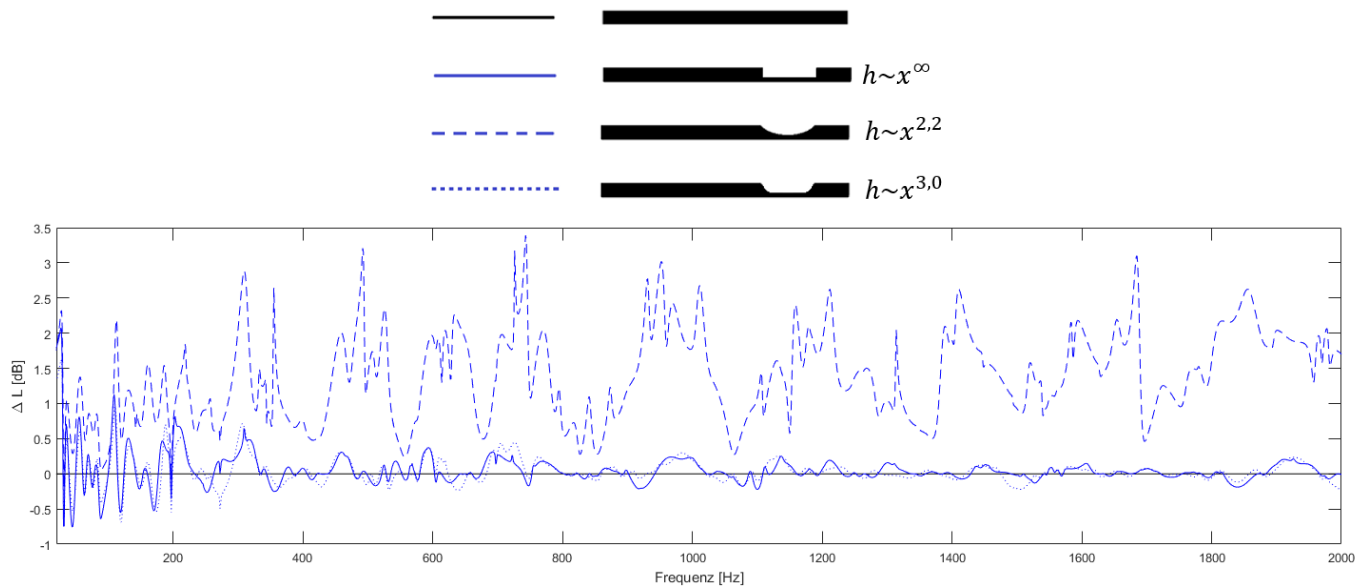


Abbildung 3: Einfluss verschiedener Profilverjüngungen auf die Einfügedämpfung einer Platte

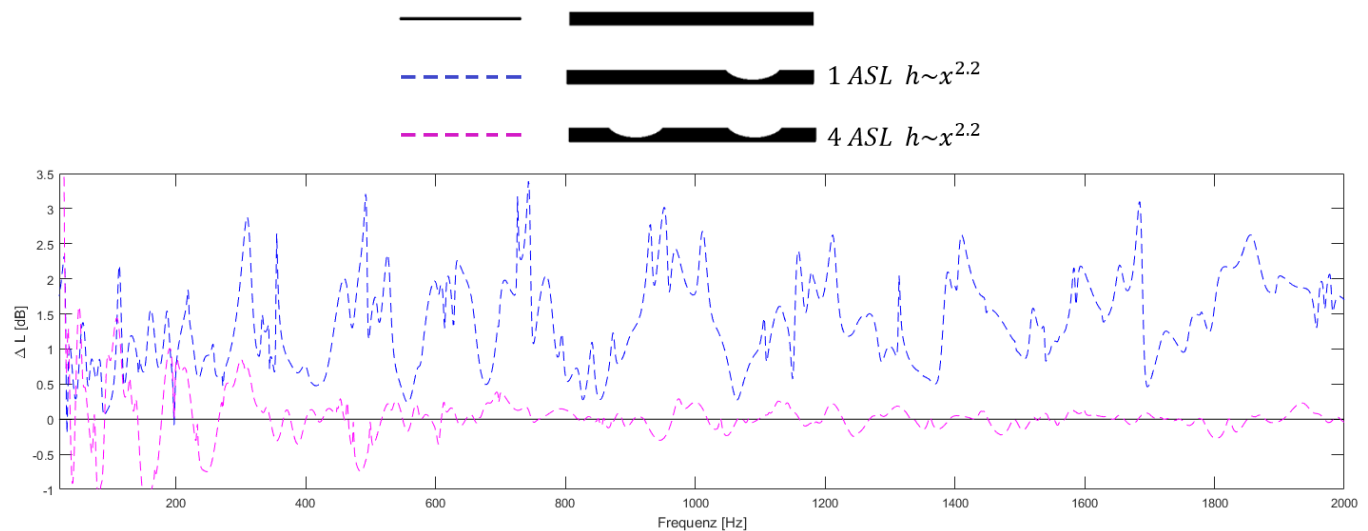


Abbildung 4: Vergleich der Dämpfungswirkung eines ASL mit der Dämpfungswirkung von vier solcher ASL

In Abbildung 2 ist die Lage der Profilvariationen aufgezeigt. Die Platten sind frei gelagert und werden an einer der Kanten durch eine harmonische Flächenlast angeregt. Als einfaches Dämpfungsmodell wird die Platte mit einer konstanten Strukturdämpfung von 0,1 % angesetzt. Die Dicke der Platte beträgt in den folgenden Beispielen 3 mm. Im Bereich der Profilvariation wird die Dicke auf 1 mm reduziert. Der Parameter ϵ wird so gewählt, dass der Bereich, in dem sich die Dicke der Platte reduziert, einen Durchmesser von 20 cm aufweist.

Abbildung 3 zeigt die in Gleichung 3 vorgestellte Einfügedämpfung in Bezug auf die gleichförmige Platte für verschiedene Profilverläufe über einen Frequenzbereich von 0 bis 2 kHz. Es ist erkennbar, dass das Profil mit dem Exponenten $m = 2,2$ die größte Dämpfungswirkung erzeugt. Mit diesem Profilverlauf wird auch das Gesamtgewicht der Platte um 3,7% reduziert. Der flache und der kubische Dickenverlauf erzeugt

keine Verbesserung.

Vergleicht man die Wirkung von einem einzelnen akustischen schwarzen Loch mit der Wirkung von vier identischer Profilverläufe, ist zu erkennen, dass sich durch eine sehr dichte Anordnung solcher Dickenverjüngungen die Dämpfungswirkung wieder aufhebt (Abbildung 4). Durch vier quadratischen Profilverjüngungen wird die Dicke der Platte hinsichtlich der Gesamtfläche der Platte stark reduziert. Dadurch verringert sich auch die Biegefestigkeit der Platte vergleichsweise gleichförmig, wodurch sich die Gesamtstruktur ähnlich wie eine gleichförmige Platte mit reduzierter Dicke verhält.

Da sich mit der hier dargestellten Profilverjüngung lediglich eine Verbesserung von durchschnittlich 1,6 dB erreichen lässt, soll in einem nächsten Schritt die Dämpfungswirkung erhöht werden. Hierfür wird eine Dämpfungsschicht lokal im Bereich des ASL angebracht.

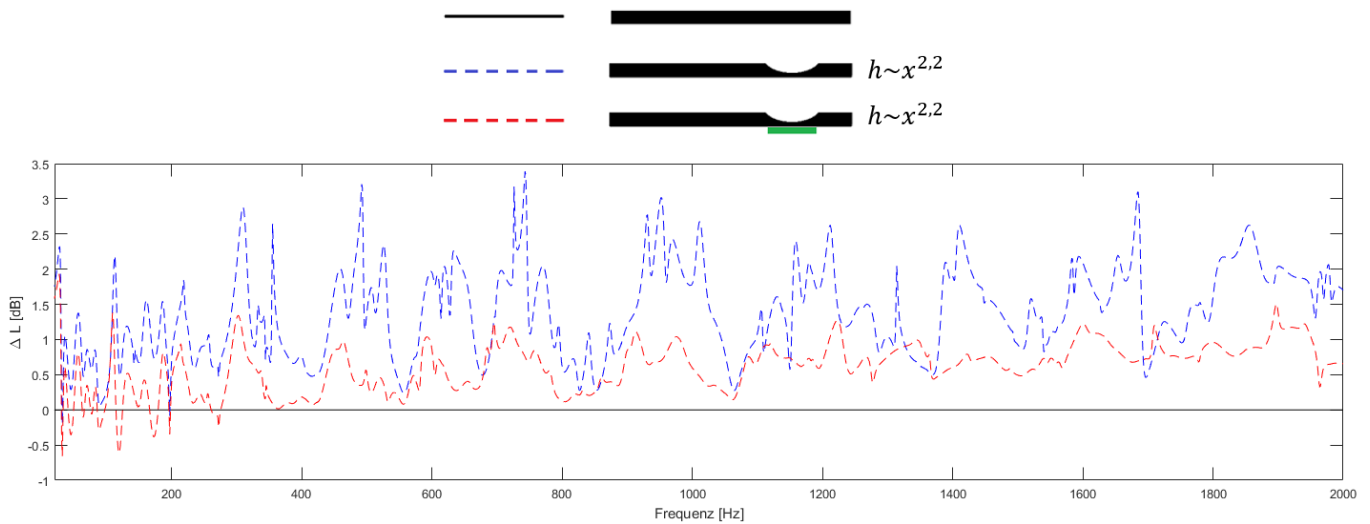


Abbildung 5: Einfluss einer zusätzlichen Dämpfungsschicht im Bereich des ASL; schwarz: Platte; grün: Dämpfungsschicht

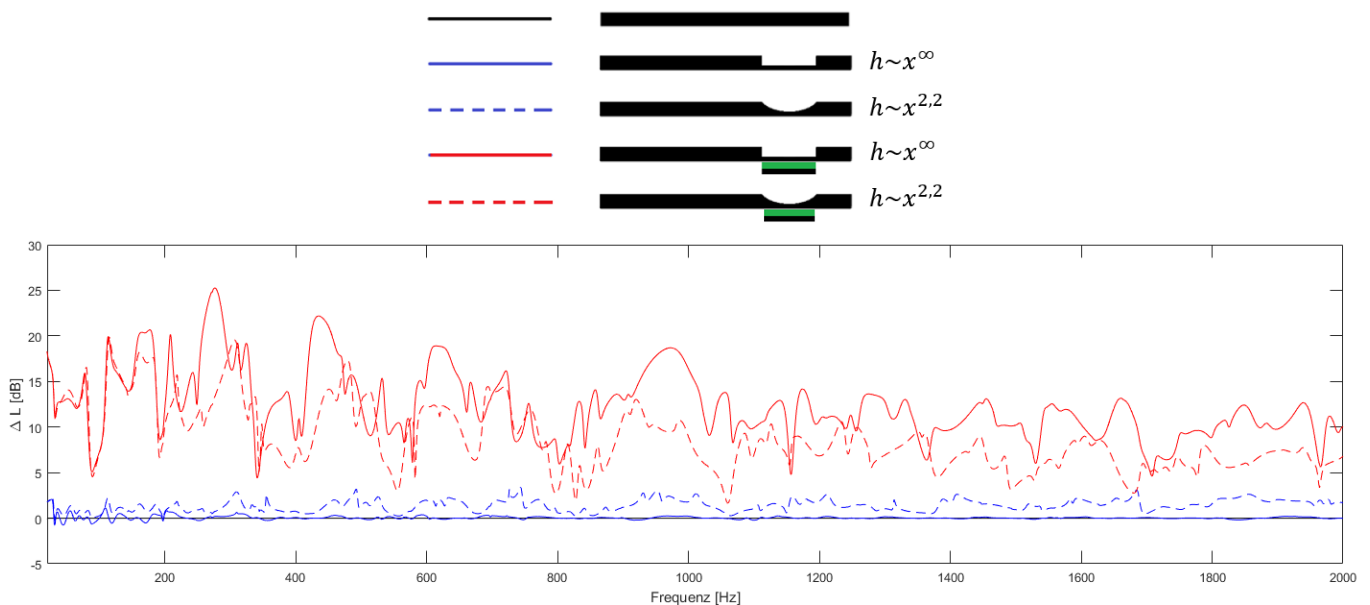


Abbildung 6: Vergleich verschiedener Profilverläufe mit und ohne eingezwängten Dämpfungsbelag im Bereich des ASL; schwarz: Platte; grün: Dämpfungsschicht

In Abbildung 5 wird ein ASL ohne zusätzliches Dämpfungsmaterial mit einem ASL mit einer zusätzlich angebrachten Dämpfungsschicht miteinander verglichen. Als Materialdaten werden die in Tabelle 1 gelisteten Werte benutzt.

Tabelle 1: Materialeigenschaften von Titan und einem Dämpfungsmaterial

	Titan	Dämpfungsmaterial
E	104 GPa	0,01 GPa
ρ	4430 kg/m ³	1000 kg/m ³
ν	0,31	0,45
η	0,001	0,1

Die Dämpfungsschicht wird im ASL-Bereich angebracht und hat eine konstante Dicke von 1 mm.

Zwar ist die Dämpfungswirkung der Platte mit ASL und dem zusätzlichem Dämpfungsmaterial insgesamt besser als die der gleichförmigen Platte, jedoch ist zu beobachten, dass die Dämpfungswirkung des quadratischen Profils durch das zusätzlich angebrachte Dämpfungsmaterial verschlechtert wird. Eine Erklärung hierfür ist der Impedanzsprung, der durch das zusätzliche Dämpfungsmaterial erzeugt wird. Durch das Dämpfungsmaterial wird der ideal glatte Verlauf des ASL gestört und somit auch die Dämpfungswirkung stark beeinträchtigt. Die erhöhte Dämpfung im Dämpfungsmaterial kann diesen Effekt nicht kompensieren. Da im Allgemeinen die Dämpfungswirkung eines eingezwängten Belages erheblich höher ist, soll die einfache Dämpfungsschicht durch einen eingezwängten Belag im Bereich des ASL ersetzt werden.

Vergleicht man die Einfügedämpfung eines ASL mit eingezwängtem Belag und ohne eingezwängten Belag (Abbildung 6), ist eindeutig erkennbar, dass nur mit einem eingezwängtem Belag eine erhebliche Reduktion der Schwingungsenergie möglich ist (durchschnittl. 10 dB). Außerdem lässt sich beobachten, dass bei der Verwendung eines eingezwängten Belages das ASL mit einem glatten Profilverlauf ab 250 Hz eine leicht größere Einfügedämpfung hervorruft als das quadratische Profil mit eingezwängtem Belag.

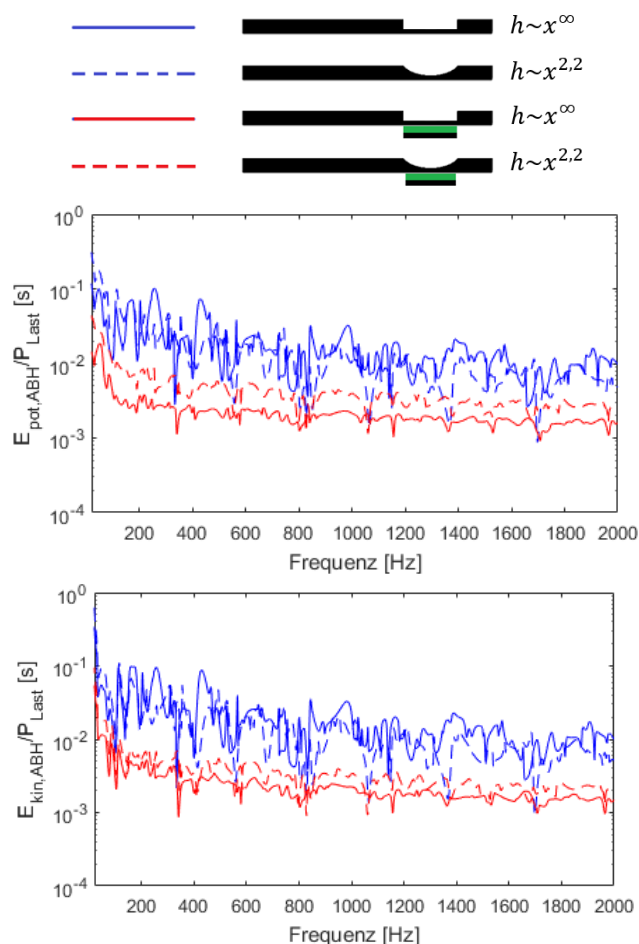


Abbildung 7: Potentielle und kinetische Energie (jeweils normalisiert mit der eingebrachten Leistung) im Bereich der Profilverjüngung der Platte

Eine Erklärung hierfür kann die Betrachtung der Energie im Bereich des ASL für die entsprechenden Konfigurationen liefern (Abbildung 7). Der Vergleich mit ASL ohne eingezwängten Belag, zeigt, dass das flache ASL-Profil durch die geringere Dämpfungswirkung etwas mehr Energie im Bereich des ASL ansammelt. Der ASL-Effekt führt nur bei einem ausreichend glatten Profilverlauf zu einer Verbesserung der Dämpfungswirkung. Durch den eingezwängten Belag wird der besonders vorteilhafte ASL-Effekt des quadratischen Profilverlaufes aufgelöst. Das flache ASL hat durch den größeren Materialabtrag eine geringere Steifigkeit im Bereich des Dämpfungsmaterials, wodurch größere Verformungen erreicht werden und so mehr Energie im Dämpfungsmaterial dissipiert werden

kann. So ist auch das Energieniveau im ASL-Bereich für die Platte mit einem flachen ASL mit eingezwängtem Belag niedriger.

Zusammenfassung

Anhand der durchgeführten numerischen Studien konnte gezeigt werden, dass sich ASL als Lösungen für dünnwandige Leichtbaustrukturen anbieten, um ohne Gewichtserhöhungen die Schwingungsenergie bei Körperschallanregung in der Gesamtstruktur zu reduzieren. Grundsätzlich kann die Dämpfungswirkung durch mehrere ASL-Profile in einer Platte nicht erhöht werden. Außerdem wurde gezeigt, dass der ASL-Effekt nur dann zu einer Reduktion der Schwingungsenergie beiträgt, wenn die Biegesteifigkeit ausreichend „glatt“ variiert wird. Durch einen zusätzlichen Dämpfungsbelaag, der aufgrund der deutlich größeren Dämpfungswirkung auch eingezwängt angebracht werden sollte, wird der eigentliche ASL-Effekt, der aus einer stetigen Dickenreduktion resultiert, vernachlässigbar. Um die Vorteile des ASL-Effektes mit der hohen Dämpfungswirkung eines eingezwängten Belages zu kombinieren, muss der eingezwängte Belag sehr viel dünner sein als die minimale Dicke im ASL-Bereich. Inwiefern dies für die praktische Anwendung realisierbar ist, muss weiter untersucht werden.

Danksagung

Das Vorhaben ALMA wird durch das Bayerische Wirtschaftsministerium im Rahmen des Ludwig-Bölkow-Campus (LBC) in Ottobrunn/Taufkirchen gefördert (Förderkennzeichen: LABAY92C).

gefördert von
Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie



Literatur

- [1] Conlon, S. C.; Fahnline, J. B. and Semperlotti, F.: Numerical analysis of the vibroacoustic properties of plates with embedded grids of acoustic black holes. *J. Acoust. Soc. Am.* 137 (2015), 447–457
- [2] Krylov, V. V.: Laminated plates of variable thickness as effective absorbers for flexural vibrations. *17th ICA Proceedings, Rome, Vol. 1 (2001)*, 270-271
- [3] Krylov, V. V.: Acoustic black holes and their applications for vibration damping and sound absorption. *Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA) (2012)*, 933-944
- [4] Miksch, M.: Modeling Aspects for Acoustic Metamaterials in Vibroacoustics. Masterarbeit, Technische Universität München, 2017
- [5] Mironov, M. A.: Propagation of a flexural wave in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval. *Soviet Physics Acoustics* 34 (1988), 318-319