

Druck von frequenzgenauen metallischen Tilgerarrays für akustische Metamaterialien aus Metall mit Additive Layer Manufacturing: Entwurfsprozess und erste Ergebnisse

Uwe Christian Müller¹, Peter Faulhaber²

¹ Airbus Defence and Space GmbH, 81633 München, E-Mail: uwe.mueller@airbus.com

² Airbus Defence and Space GmbH, 81633 München, E-Mail: peter.faulhaber@airbus.com

Einleitung

Das Projekt ALMA - "Additive Layer Manufacturing (ALM) für Akustische Metamaterialien" am Ludwig-Boelkow-Campus in Ottobrunn befasst sich mit der Untersuchung von akustischen Metamaterialien, welche durch ALM-Methoden (Lasersinterverfahren) aufgebaut werden. Es sollen vorwiegend ALM-Verfahren für Metalle untersucht werden, um ein größeres Einsatzspektrum der Materialien für Luftfahrtanwendungen zu erreichen. Ein wichtiges Konzept hierbei ist die Fertigung von 1D oder 2D Arrays aus Mikrotilgern, welche genau definierte Frequenzen aufweisen sollen und mit geringem Aufwand durch ALM-Verfahren hergestellt werden können. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie eine parametrische Generierung von Mikrotilgergeometrien auf Basis einer MATLAB®-Optimierung erfolgen kann. Für die Optimierung von Designs ist es hierbei wichtig, auch auf die Fertigungsanforderungen der ALM-Methoden zu achten und sonstige Randbedingungen, wie z.B. den zulässigen Bauraum für den Mikrotilger. Die Ergebnisse der Optimierung gehen dann in eine automatische Geometrieerzeugung durch eine CAD Software ein. Anschließend wird aus der CAD-Geometrie eine STEP-Datei zum Import in die ALM-Fertigungsanlage erzeugt. Nach der ALM-Fertigung werden die Tilgerarrays mechanisch charakterisiert, um die Abweichung zwischen theoretischer Entwurfsfrequenz und der experimentell charakterisierten Frequenz zu bestimmen. Im nächsten Schritt wird dann eine akustische Charakterisierung stattfinden.

1. Akustische Metamaterialien - Definition

Bei der Definition des Begriffs "Metamaterial" kann man sich an [1] orientieren: Ein Metamaterial ist eine künstlich hergestellte, periodische Struktur mit folgenden Eigenschaften:

- Die Durchlässigkeit der Struktur für elektromagnetische oder akustische Wellen unterscheidet sich deutlich von den beteiligten Werkstoffen.
- Die Struktur dient dazu, die Wechselwirkung des Metamaterials mit elektromagnetischen oder akustischen Wellen so zu beeinflussen, dass ein Bandpass-Effekt entsteht oder - generell - eine Änderung des Beugungs- oder Reflektionsverhaltens auftritt.

- Normalerweise ist die räumliche Struktur eine Gitterstruktur, deren Gitterkonstante deutlich kleiner als die Wellenlänge ist ($L \ll \lambda$)
- Manchmal werden photonische (in der Akustik: phononische) Kristalle auch zu den Metamaterialien gezählt, bei denen durch Zellen mit $L = \lambda/4$ Beugungseffekte hergestellt werden.

In der Akustik ist der Begriff noch nicht eindeutig definiert. So könnten z.B. auch Liner in diese Kategorie eingeordnet werden.

2. Metamaterialien – Kurze Historie

Im Folgenden wird ein kurzer historischer Abriss über die Entdeckung der Metamaterialien gegeben. Metamaterialien tauchten zum ersten Mal vor ungefähr 50 Jahren in der Forschung auf. 1968 wurde ein theoretisches Konzept für ein Material mit einem negativen dielektrischen Koeffizienten durch den ukrainischen Physiker Victor Georgievich Veselago veröffentlicht [2]. 1999 präsentierten Sir John Brian Pendry - ein englischer Physiker - und seine Kollegen eine praktische Umsetzung eines Metamaterials für elektromagnetische Wellen [3]. Metamaterialien fanden daraufhin Eingang in der Akustik.

3. Metamaterialien – Anwendungen und Konzepte

Im Bereich der Akustik wurden bislang vorwiegend Metamaterialanwendungen aus dem Bereich des Ultraschalls untersucht, d.h. Anwendungen für einen Frequenzbereich von >20kHz-1 MHz, wie z.B. akustische Linsen, akustische Tarnkappen für medizinische Anwendungen und die Verbesserung der Bildgebung oder Ortung von akustischen Signalen [1].

Für Luftfahrtanwendungen ist hingegen der Frequenzbereich von 50Hz - 2 kHz relevant. Potentielle Lärmquellen sind z.B. tonaler Lärm durch Propeller oder tonaler Lärm durch Triebwerke. Für diese Anwendungsfälle wurde die Generierung von Stop-Bändern durch verteilte Tilger zur Untersuchung ausgewählt.

Für die Generierung von Stop-Bändern durch verteilte Tilger finden sich in der Literatur etliche Vorgehensweisen, so z.B. den Aufbau eines Tilgerarrays mit Tilgern im Abstand < der Wellenlänge [4]. Ein weiteres Beispiel ist die 2D/3D Strukturierung des Werkstoffs [5]: hierbei werden rotierenden Zellen in die Struktur eingebracht, die bei einer definierten Frequenz schwingen. In einem weiteren Beispiel

werden Massekörper auf Membranen gebracht, um ein Stop-Band bei niedrigen Frequenzen zu erzeugen [6].

4. Konzepte für ALM Mikrotilger

Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Konzeptentwicklung für Mikrotilger bestand aus den folgenden Schritten. Zunächst wurden in Metall fertigmögliche ALM-Geometrien für Tilger entworfen, wobei insbesondere die Fertigbarkeit ohne die teilweise für Metalle erforderlichen ALM-Supportstrukturen im Vordergrund stand. Generell sollte die ALM-Fertigbarkeit (keine großen Überhänge, keine zu dünnen Wandstärken) für die untersuchten Metalle berücksichtigt werden. Die Geometrie der Tilger sollte in parametrischer Form in CAD vorliegen. Für die Tilger sollte dann eine Trägerstruktur entworfen werden. Am Ende wurde ein Optimierungsalgorithmus entwickelt, der eine Auslegung der Tilger auf einen Bauraum und eine Zieleigenfrequenz f_1 durchführt.

Folgende Tilgergeometrien wurden untersucht

- A – rechteckiger Biegebalken
- B – rechteckiger Biegebalken mit Endmasse m_t
- C – runder Biegebalken mit Endmasse m_t

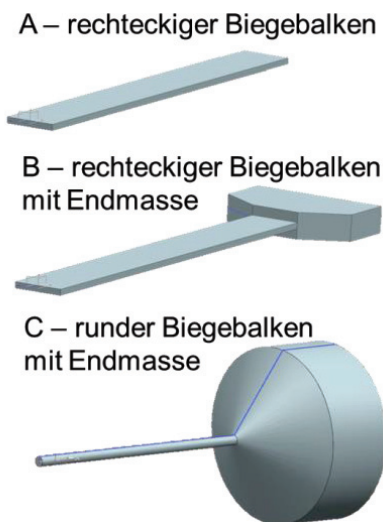


Abbildung 1: im Rahmen der Studie für ALM untersuchte Mikrotilgergeometrien A, B und C.

5. Geometrieparametrisierung und Optimierung

Zur automatischen Geometriegenerierung der Tilger A, B und C für eine Zieleigenfrequenz, wurde ein Programm in MATLAB zur Optimierung der Biegeeigenfrequenz geschrieben:

- Das Programm ermittelt für diverse ALM-Metalle zu einer gewünschten Eigenfrequenz des Tilgers die notwendigen Designvariablen
- Gleichzeitig können der Bauraum und die min. Wandstärken als Randbedingungen gesetzt werden.
- Die Eigenfrequenzen werden aus einem analytischen Modell berechnet und in einen Gradientenoptimierer gegeben

Als Input für die Optimierung dienen die analytischen Formeln für die Berechnung der Eigenfrequenzen aus [7]. So lauten die Formeln für die erste Biegeeigenfrequenz von

A – Biegebalken

$$f_1 = \frac{\lambda_1^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E * I_y}{m_B * L_B^3}} \quad [\text{m}^2] \quad (1)$$

mit $\lambda_1 = 1.87510407$

und von B,C – Biegebalken mit Endmasse:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3 * E * I_y}{(m_t + 0.24 m_B) * L_B^3}} \quad [\text{m}^2] \quad (2)$$

Die gewonnenen Designvariablen werden dann an die CAD-Software SIEMENS NX CAE übergeben und anschließend die stp.-Geometrie für ALM erzeugt.

6. Ergebnisse der Vordimensionierung

Im folgenden Abschnitt werden einige Beispiele für die Ergebnisse der Geometrieparametrisierung und Optimierung aus Abschnitt 5 diskutiert.

Das erste Ergebnis zeigt die mögliche erste Biegeeigenfrequenz der Tilgergeometrie A - rechteckiger Biegebalken - aus Titan mit einer Materialstärke $t_0 \sim 0.3$ mm und einer Breite von $WB = 2.0$ mm. Die Tilgergeometrie A (Balken ohne Endmasse) benötigt einen hohen Bauraum für einen tieffrequenten Tilger ($L > 50$ mm für $f < 100$ Hz). Die Ergebnisse für einen kreisförmigen Tilger mit $D = 0,3$ mm oder $D = 0,4$ mm fallen ähnlich aus.

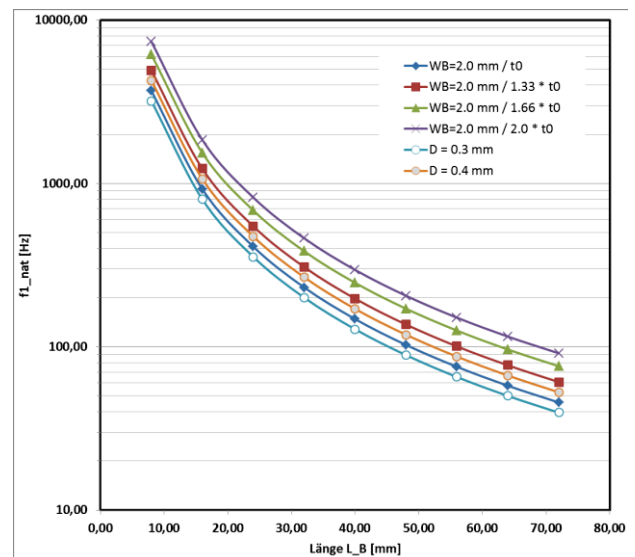


Abbildung 2: Eigenfrequenzen für Mikrotilgergeometrie A - rechteckiger Biegebalken

Um eine kompaktere Geometrie zu erzeugen, muss daher ein Design mit Endmasse (B, C) ausgewählt werden. Im direkten Vergleich für den ALM-Druck zeigt sich, dass das Design C mit einem runden Querschnitt nicht so gut geeignet ist, wie das Design B mit einem rechteckigen Querschnitt, da das min. Trägheitsmoment von $C > B$ ist,

weil $D_{\min} > t0_{\min}$ ist. Deshalb wurden für die weiteren experimentellen Betrachtungen Tilger der Bauform B verwendet. In der Abbildung 2 werden Ergebnisse für Bauformen B und C der Tilger dargestellt. Die max. Gesamtlänge der Tilger für B betrug im Fall von 85 Hz ~ 24.0 mm.

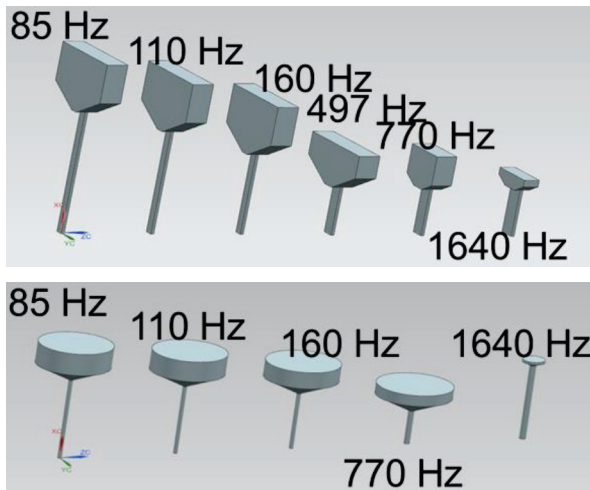


Abbildung 3: Beispielergebnisse für die Mikrotilgergeometrien B - rechteckiger Biegebalken mit Endmasse (oben) und C - runder Biegebalken mit Endmasse (unten).

7. Experimentelle Verifikation

Im folgenden Abschnitt werden die experimentellen Ergebnisse der Untersuchung dargestellt. Es wurden 1D Arrays aus Tilgern für verschiedene Frequenzen in ALM-Bauweise aus Titan gedruckt (Typ A, B mit 6 Tilgern, C mit 4 Tilgern) - s. Abb. 3.

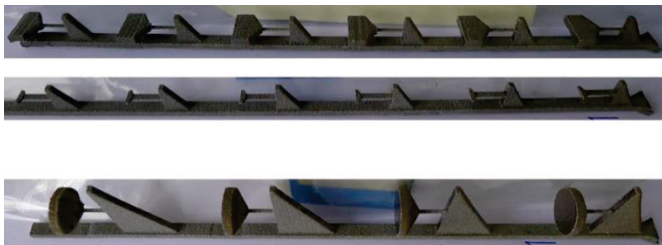


Abbildung 3: ALM-Druck Beispiele für die Mikrotilgergeometrien B - rechteckiger Biegebalken mit Endmasse (oben) und C - runder Biegebalken mit Endmasse (unten).

Die Ergebnisse aus der ALM Fertigung zeigen, dass schlanke Bauformen im Prinzip möglich sind. Die Bauform B mit rechteckigem Balkenquerschnitt erlaubt hohe Federwege. Teilweise - bei sehr langen Biegebalken mit niedriger Frequenz - kam es zu Problemen in der ALM-Fertigung, weil die Tilger während des Druckvorgangs zu Schwingungen angeregt wurden (es sollte ja explizit auf Stützstrukturen verzichtet werden, um eine spätere Entgratung bei vielen Tilgern zu vermeiden).

Zur Verifikation des Auslegungsprozess wurde eine dynamische Charakterisierung der ALM Tilger vorgenommen. Hierzu fand eine berührungslose von Eigenmoden mit Hilfe eines Laservibrometers für den Tilger Typ B - rechteckiger Biegebalken mit Endmasse statt. Die Messrichtung war horizontal, zur Kompensation des

Gewichts. Dann wurden die theoretischen Frequenzen mit den gemessenen Frequenzen verglichen, um den Auslegungsprozess zu verifizieren.



Abbildung 4: Messung an Mikrotilgergeometrie mit Laservibrometer (Typ B - rechteckiger Biegebalken mit Endmasse).

In einer ersten experimentellen Untersuchung wurden mehrere 1D-Arrays aus jeweils 6 Mikrotilgern des Typs B mit Laser vermessen. Die Entwurfsfrequenzen der Mikrotilger lagen zwischen 80 Hz und 800 Hz. Für die Frequenz von 160 Hz wurden 3 verschiedene Mikrotilgerdesigns mit unterschiedlichen Längen optimiert, um einen Vergleich unterschiedlicher Bauformen zu erhalten.

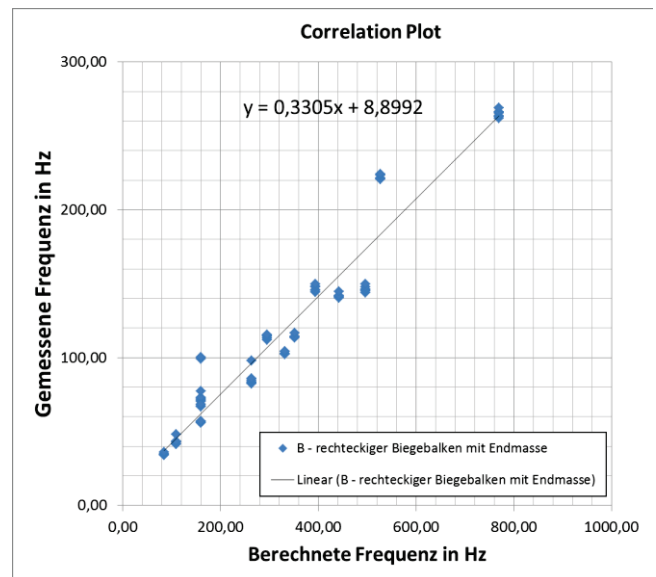


Abbildung 5: Messung an Mikrotilgergeometrie mit Laservibrometer (Typ B - rechteckiger Biegebalken mit Endmasse) - Vergleich der gemessenen Eigenfrequenz mit der berechneten Eigenfrequenz.

Die Ergebnisse der Messung in Abb. 5 zeigten eine hohe Abweichung von gemessener zur berechneten Eigenfrequenz der Mikrotilger. Hierbei lag die gemessene Frequenz bei ca. 33 % der theoretischen Eigenfrequenz. Der Versuch, einen Mikrotilger mit 160 Hz Eigenfrequenz aus 3 verschiedenen Parametersätzen zu drucken, führte zu hohen Unterschieden der gemessenen Frequenz für die verschiedenen Designs.

Die Wiederholbarkeit der Eigenfrequenz innerhalb eines Arrays ist jedoch gut. Oft ist die Standardabweichung vom Mittelwert $< 5\%$.

Die Untersuchung der ALM-Probenkörper steht in dieser Phase des Projektes noch am Anfang. Die möglichen Ursachen für die hohe Abweichung zwischen berechneter und gemessener Frequenz werden im ALM-Fertigungsprozess vermutet: die sehr dünnen Wandstärken ($< 0,5$ mm) der Biegebalken führen evtl. zu einer Reduktion des tragenden Querschnitts des Balkens durch die hohe Körnigkeit des Materials. Zusätzlich muss der Einfluss der Randbedingung des Übergangs zwischen Balken und Halterungsgeometrie untersucht werden. Außerdem führen die schlanken Biegebalkengeometrien zu Vibrationen im während der ALM-Fertigung.

8. Diskussion - Ausblick

Mit der Arbeit wurde ein Optimierungsprozess für ALM-Mikrotilger aus Metall entwickelt, die als Komponenten für ein akustisches Metamaterial dienen können. Für verschiedene Materialien und Designs können ALM-Biegetilger auf eine Wunscheigenfrequenz hin optimiert werden. Eine automatische Optimierung der Tilger wurde mit der Geometrieerzeugung in einer CAD-Software (NX CAE) gekoppelt. Der Prozess wurde anhand von ALM-Tilgern aus Titan demonstriert. Die Titantilger zeigen eine hohe Auslenkung bei geringer Dämpfung. Es wurden verschiedene Biegetilgerdesigns für Frequenzen zwischen 80 Hz – 800 Hz untersucht. Die Bauräume für die Tilger lagen bei einer Länge von < 23 mm. Diese Tilger wurden vermessen und eine hohe Abweichung zwischen berechneter und gemessener Frequenz festgestellt. Weitere Untersuchungen (CT) müssen nun klären, ob das ALM-Material bei sehr dünnen Wandstärken und hoher Körnigkeit, die Querschnittsfläche reduziert. Ebenfalls müssen die Einspannungsbedingungen berücksichtigt werden. Im nächsten Schritt müssen dann die Einflüsse einzelner Geometrieparameter auf die Eigenfrequenz der Mikrotilger korreliert werden. Im Folgenden sollen dann die untersuchten Tilgerarrays auf eine Struktur aufgebracht werden und deren akustische Wirksamkeit messtechnisch untersucht werden.

Danksagung

Das Vorhaben ALMA wird durch das Bayerische Wirtschaftsministerium im Rahmen des Ludwig-Bölkow-Campus (LBC) in Ottobrunn/Taufkirchen gefördert (Förderkennzeichen: LABAY92A).



Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft und Medien, Energie
und Technologie

Literatur

- [1] Craster, R.V., Guenneau, S., Eds.: Acoustic Metamaterials - Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking, Springer Verlag, Heidelberg, Germany, 2013
- [2] Veselago, V.G.: THE ELECTRODYNAMICS OF SUBSTANCES WITH SIMULTANEOUSLY NEGATIVE VALUES OF ϵ AND μ . Sov. Phys. Uspekhi 10, no. 4, (Jan 1968), 509–514
- [3] Pendry J.B, Holden A.J., Robbins, D.J., Stewart, W.J.: Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 47, no. 11, (Nov 1999), 2075–2084
- [4] Claeys C., Geraldo Rocha De Melo Filho N., Deckers N., Pluymers B., Desmet W.: Experimental demonstrators of vibro-acoustic metamaterials for low frequent NVH insulation, in Proceedings of the INTER-NOISE 2016, Hamburg, Germany, 2016, pp. 7451–7461.
- [5] Ruzzene M.: Internally Resonating Metamaterials for Wave and Vibration Control in Proceedings of NOVEM 2015, Dubrovnik, Croatia, 2015, vol. Forum III3, pp. 1–26.
- [6] Langfeldt F., Gleine W, von Estorff O.: Enhancing the low-frequency noise reduction of a double wall with membrane-type acoustic metamaterials, in Proceedings of the INTER-NOISE 2016, Hamburg, Germany, 2016.
- [7] Blevins R.D., Formulas for natural frequency and modeshape. Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY, U.S.A., 1979.