

DISS. ETH NO. 19945

COMPOSITE LAMINATES WITH  
INTEGRATED VIBRATION DAMPING  
TREATMENTS

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

GRÉGOIRE LEPOITTEVIN

MSc in Engineering, Chalmers University of Technology

born on September 5, 1983

citizen of France

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. P. Ermanni, examiner

Prof. Dr. D. Saravanos, co-examiner

2012

# Abstract

This thesis deals with the design of composite laminates with integrated damping layers. The damping capability of structural elements is an important design aspect. It enables to reduce the amplitude of vibrations which increases the long-term reliability and fatigue life. In transportation systems, it also improves the acoustical comfort of the passengers. A typical solution is to bond a viscoelastic material layer on the surface of the load-carrying structure. When the damping treatment is constrained by a stiff layer, high damping rates can be obtained. With the use of fiber-reinforced composite materials, it is possible to have one of the layers made of a soft damping layer. In that case, the damping treatment is constrained by composite laminates that have also to fulfill mechanical requirements. The goal of this PhD thesis is to propose design guidelines for composite laminates with integrated damping treatments. The objective is to obtain a structural component having simultaneously high mechanical and vibration damping properties at the lowest possible weight. The first part of the work deals with the design and the optimization of segments of constrained layer damping treatment. It is shown that free edges of the damping layer have to be placed where the bending curvature of the load-carrying structure is the highest. The results also demonstrate that there is a number of segments of constrained layer damping treatments for each bending modes that maximizes their modal loss factor. An optimization technique has been developed with the goal to maximize the damping rate by adjusting the segments' position. This enables to further increase the damping rates. In the second part, a numerical model of a composite beam with a soft core layer is validated using an analytical solution. The presence of the damping layer tends to decouple the sublaminates: they behave as two separate bodies experiencing the same bending cur-

vature. This effect vanishes by increasing the length-to-thickness ratio of the structure. In the third part, the influence of the different damping layer design variables on the laminate's deflection, maximal flexural force, stability and in-plane stiffnesses is studied. Different integration solutions are considered: a damping layer integrated with open edges (like a sandwich configuration), a damping layer integrated with closed edges along its width and a damping layer integrated with closed edges both along its length and width. The results show that two distinctive design rules have to be followed depending on whether the goal is to achieve high mechanical properties or high damping rates. The damping layer should be integrated with open edges, should be placed in the middle of the laminate lay-up, should be significantly long and should have a low shear modulus to obtain high damping rates. The damping layer should be integrated with closed edges, should be placed as far away as possible from the plate's mid-plane, should be short and should have a high shear modulus to obtain high mechanical performances. The most promising solution is for a damping layer integrated with all edges closed. This enables to reduce the decoupling effect. As a consequence, the structural bending stiffness and strength and stability properties are significantly improved. Nonetheless, the damping material has to have special properties. It must have simultaneously high shear modulus to ensure high mechanical properties and high loss factor to ensure a high damping rate. Additionally, such damping treatment has to have much larger dimensions than a classical constrained layer damping treatment. Therefore, the latter is the most suitable solution as it ensures to have high mechanical properties, high damping rate at the lowest weight.

# Zusammenfassung

Diese Dissertation behandelt die Auslegung von Faserverbundlaminaten mit integrierten Dämpfungsschichten. Das Dämpfungsvermögen von Strukturelementen ist eine bedeutende Auslegungsgrösse, welche es erlaubt, Schwingungsamplituden zu reduzieren und damit Langzeitzuverlässigkeit und Lebensdauer zu vergrössern. In Verkehrssystemen führt eine Schwingungsdämpfung überdies zu verbessertem akustischem Komfort für die Passagiere. Das Aufbringen einer viskoelastischen Materialschicht auf die Oberfläche einer lasttragenden Struktur stellt eine typische Lösung hierfür dar. Wenn das Dämpfungselement durch eine steife Deckschicht begrenzt wird (sog. "Constrained-layer damping"), lässt sich eine grosse Dämpfung erzielen. Werden Faserverbundwerkstoffe verwendet, so kann eine der Lagen des Schichtverbundes als weiche Dämpfungslage ausgeführt werden. In diesem Fall ist das Dämpfungselement durch ein Faserlaminat begrenzt, welches zudem mechanische Anforderungen erfüllen muss. Das Ziel dieser Doktorarbeit besteht darin, Richtlinien für die Auslegung von Faserverbundlaminaten mit integrierten Dämpfungselementen zu entwickeln. Auf diese Weise sollen Strukturbauteile realisiert werden, die bei geringstmöglichem Gewicht sowohl gute mechanische als auch schwingungsdämpfende Eigenschaften aufweisen. Der erste Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Auslegung und Optimierung segmentierter "Constrained-layer damping"-Elemente. Es wird gezeigt, dass die freien Ränder eines Dämpfungselements dort platziert werden müssen, wo die Krümmung infolge Biegung der lasttragenden Struktur am grössten ist. Die Ergebnisse demonstrieren zudem, dass für jede Biegeeigenform eine Anzahl von Segmenten existiert, welche den modalen Verlustfaktor maximiert. Mit dem Ziel, die Dämpfung durch Anpassung der Segmentlängen zu maximieren, wurde ein Optimierungsverfahren entwickelt, welches er-

laubt, das Dämpfungsvermögen leicht zu erhöhen. Im zweiten Teil wird das numerische Modell eines Faserverbundbalkens mit einer weichen Kernschicht mithilfe einer analytischen Lösung validiert. Es zeigt sich, dass das Vorhandensein der Dämpfungsschicht zu einer Entkopplung der Unterlamine des Faserverbundes führt. Diese verhalten sich wie zwei getrennte Elemente, welche die gleiche Biegung erfahren. Dieser Effekt verschwindet bei Strukturen mit grösserem Schlankheitsgrad. Im dritten Teil wird der Einfluss der verschiedenen Variablen für die Auslegung der Dämpfungsschichten auf die Durchbiegung der Lamine sowie auf deren maximale Biegespannung, deren Stabilität und deren Steifigkeit in der Ebene untersucht. Hinsichtlich der Integration werden mehrere Lösungsvarianten betrachtet: eine integrierte Dämpfungsschicht mit offenen Rändern (wie bei einer Sandwichkonfiguration), eine Schicht mit geschlossenen Querrändern sowie eine mit geschlossenen Längs- und Querrändern. Die Ergebnisse zeigen, dass zwei unterschiedliche Auslegungsregeln befolgt werden müssen, abhängig davon, ob gute mechanische Eigenschaften oder eine grosse Schwingungsdämpfung angestrebt werden. Die Dämpfungsschicht sollte mit offenen Rändern integriert werden, in der Mitte des Laminats positioniert werden und einen niedrigen Schubmodul aufweisen, um ein grosses Dämpfungsvermögen zu erreichen. Falls gute mechanische Eigenschaften erzielt werden sollen, sind geschlossene Ränder, eine Platzierung mit grösstmöglichem Abstand von der Plattenmittelebene sowie ein hoher Schubmodul vorzusehen. Die meistversprechende Lösung besteht in einer integrierten Dämpfungsschicht mit allseitig geschlossenen Rändern. Es ist möglich, den Effekt der Entkopplung zu verringern, was zu einer signifikanten Verbesserung der Biegesteifigkeit, -festigkeit und Stabilität führt. Gleichwohl muss das Dämpfungsmaterial spezielle Eigenschaften aufweisen: sowohl einen hohen Schubmodul, um gute mechanische Eigenschaften zu gewährleisten, als auch einen hohen Verlustfaktor, um eine grosse Dämpfung zu erreichen. Darüber hinaus sind Dämpfungselemente mit viel grösseren Abmessungen als im Fall des klassischen "Constrained-layer damping" erforderlich. Somit handelt es sich bei der letztgenannten Variante, welche gute mechanische Eigenschaften und grosses Dämpfungsvermögen bei geringem Gewicht verspricht, um die geeignetste Lösung.