

Passive mechanical damping through bioinspiration and hierarchical structuring

Doctoral Thesis

Author(s):

Woigk, Wilhelm

Publication date:

2021

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000522443>

Diss. ETH NO. 27997

Passive mechanical damping through bioinspiration and hierarchical structuring

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCE of ETH ZURICH

(Dr. Sc. ETH Zurich)

presented by

WILHELM WOIGK

Dipl.-Ing. in Mechanical Engineering

Dresden University of Technology, Germany

born on 29 November 1988

citizen of Dresden, Germany

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. André R. Studart, ETH Zurich, examiner

Prof. Dr. Paolo Ermanni, ETH Zurich, co-examiner

Prof. Dr. Alexander Bismarck, University of Vienna, co-examiner

Prof. Dr. Kunal Masania, TU Delft, co-examiner

Summary

Mechanical vibration is widespread in modern society and manufacturing technologies. Vibrations typically occur in systems with dynamically moving parts. The development of materials capable of damping mechanical vibrations is crucial to prevent structural damage and to enable a reliable and seamless functioning of such systems. At the same time, materials need to be stiff, strong and light to also save resources and meet environmental demands. However, stiffness and damping are often antagonistic properties. Amongst the vast selection of construction materials, composites provide attractive potential solutions to this challenge because of their excellent property-to-weight ratio, large design freedom and in general good ability to suppress unwanted mechanical vibrations. While synthetic composites with high damping performance have been developed, current solutions are still limited by the trade-offs between stiffness and the energy dissipation mechanisms required for damping. Recent modelling studies have shown that biological composites known to combine stiffness and damping, such as nacre and bone, might provide powerful design principles for the manufacturing of synthetic materials with enhanced damping performance. Inspired by the evolved design of biological composites, the goal of this thesis is to study the damping behaviour of nacre-like staggered composites and to enhance the dissipation properties of natural fibre composites. To the best of our knowledge, the damping properties of bio-inspired composites featuring reinforcing elements on a similar length scale as observed in biological systems, is studied for the first time. Furthermore, the microstructure of highly anisotropic natural fibre composites is systematically altered to provide materials that offer a wider transverse design space without reducing the inherently high damping properties in the direction of the fibre.

Polymers reinforced with a nacre-like staggered arrangement of stiff inorganic platelets were first prepared using a previously reported magnetic alignment technique. These bio-inspired composites contained up to 30 vol% of aligned platelets distributed in a polymer matrix consisting of either epoxy or poly(methyl methacrylate). Mechanical characterisation of the nacre-inspired composites showed that the loss modulus, which is defined as the damping figure of merit, can be systematically increased by a factor of 5 upon the addition of platelets to the polymer matrix. Interestingly and counter-intuitively, the composite's loss factor remained nearly unaffected. The rise of the damping performance with increasing platelet volume fraction is explained on the basis of micromechanical models developed for compliant materials reinforced with discontinuous stiff elements. Such models can be used to describe the effect of two different structural parameters, namely the platelet volume fraction and the aspect ratio, on the damping behaviour of the bio-inspired composite. This analysis shows the importance of replicating the design principles rather than copying per se the microstructure of the biological material.

To leverage the high damping characteristics of flax fibres, natural composites comprising flax-based laminates reinforced by chopped carbon fibres were also developed and investigated. To achieve enhanced mechanical properties and damping behaviour, ultra-high modulus carbon fibres were introduced into the flax fibre laminate as discontinuous fillers blended into the matrix and aligned

during composite processing. Using matrix suspensions with up to 15 vol% of carbon fibres, a local fibre fraction of 48 vol% can be achieved within the flax fibre laminate. The alignment of such high volume fraction of carbon fibres orthogonally with respect to the principal direction of the flax fibres leads to a composite flexural stiffness that is 1.46-fold higher compared to the pristine coupons, without compromising the longitudinal performance. Furthermore, the damping properties are significantly enhanced, which is manifested by an increase of the loss modulus of the composite up to 2.6-times relative to the laminate without carbon fibres. Such carbon fibres are also introduced into printable inks in order to deposit three-dimensional reinforcing ribs onto pre-fabricated flax fibre composites. Two-layer ribs with a carbon fibre volume fraction of 10 vol% were found to increase the bending stiffness of the composite by 60% and 600% for co-aligned and orthogonal ribs, respectively.

Finally, the role of microstructural features on the viscoelastic response of nacre and nacre-like composites was investigated by creating brick-and-mortar structures with tuneable density of mineral bridges and nanoasperities. By keeping the platelet volume fraction of our nacre-like composite constant, we show that the damping performance is enhanced by increasing the fraction of such microstructural features. Samples exhibiting the highest fractions of mineral bridges and nanoasperities display 150% higher loss modulus and 31% higher storage modulus compared to composites displaying a low fraction of these reinforcing elements. This indicates the importance of nanoscale structural features in controlling the stiffness and the energy dissipating behaviour of nacre-inspired composites.

In summary, the research presented in this thesis provides useful guidelines for the design and fabrication of composite materials with ultra-high damping performance. Composites that exploit the inherent hierarchical structure of natural fibres or replicate design principles of nacre and bone can reach damping response that significantly exceed the properties of biological and state-of-the-art materials. The implementation of these design strategies in future composites should enable the fabrication of passive damping elements for a broad range of structural applications.

Zusammenfassung

Mechanische Vibrationen sind weit verbreitet und in unserem Alltag überall zu finden. Nicht wegzudenken sind sie in einer Vielzahl von Anwendungen und deren Herstellungsverfahren. Typischerweise entstehen Vibrationen dort, wo sich Maschinenelemente hochdynamisch bewegen. Die verwendeten Materialien sind dabei sehr hohen Belastungen ausgesetzt. Deshalb ist die Entwicklung von Materialien, die unter solchen Vibrationsbedingungen schadensfrei funktionieren können, das heißt ein hohes Dämpfungsvermögen aufweisen, von sehr großer Bedeutung. Weitere Anforderungen, wie zum Beispiel hohe Steifigkeit, Festigkeit und geringe Werkstoffdichte müssen dabei ebenso erfüllt werden. Der Leichtbaucharakter ist hier von besonderer Bedeutung. Mechanische Systeme und Maschinen mit sehr geringem strukturellem Gewicht können sehr ressourcenschonend arbeiten. Sie sind somit prädestiniert, ökologische Anforderungen einzuhalten. Da aber Steifigkeit und Dämpfung antagonistisch sind, ist es immer wieder eine Herausforderung, diese beiden Eigenschaften in einem Material zu vereinen. Verbundwerkstoffe bilden aufgrund ihres ausgezeichneten Eigenschaft-zu-Gewicht-Verhältnisses unter der Vielzahl von möglichen Konstruktionswerkstoffen eine gute Ausgangslage für die Entwicklung von vibrationsstabilen Werkstoffen. Allerdings weisen auch Verbundwerkstoffe, die typischerweise mittels synthetischer Endlosfaserwerkstoffen gefertigt werden, Kompromisse hinsichtlich Steifigkeit und Dämpfungsvermögen auf. Im Gegensatz dazu haben Studien auf Basis analytischer Modelle gezeigt, dass biologische Verbundwerkstoffe wie das Perlmutter in Muschelschalen und auch Knochen dank ihrer komplexen Mikrostruktur sehr nützliche Gestaltungsvorlagen für die Herstellung von Materialien mit einem erhöhten Dämpfungsvermögen liefern können. Inspiriert durch diese Gestaltungsvorlagen besteht das Ziel dieser Arbeit darin, das Dämpfungsverhalten perlmuttartiger Komposite zu studieren und das Energiedissipationsvermögen von Naturfaserverbundwerkstoffen zu verbessern. Dabei ist zu betonen, dass entsprechend unseres derzeitigen Wissenstandes, die Dämpfungseigenschaften von biologisch inspirierten Werkstoffen mit Verstärkungselementen, die sich auf einer ähnlichen Längenskala wie das natürliche Vorbild befinden, hier zum ersten Mal untersucht werden. Des Weiteren wird systematisch die Mikrostruktur anisotroper Naturfaserverbunde so verändert, dass auch quer zur Faserrichtung die Eigenschaften verbessert werden können, ohne dabei das hervorragende Dämpfungsvermögen in Faserrichtung nachteilig zu beeinflussen.

Kunststoffe mit einer perlmuttartigen, staffelförmigen Verstärkungsstruktur sind in einem ersten Schritt mittels eines magnetischen Ausrichtungsverfahrens hergestellt worden. Diese Komposite bestehen aus bis zu 30 vol% Keramikplättchen. Diese Plättchen wurden gezielt in eine Matrix aus Epoxidharz oder Polymethylmethacrylat eingebettet. Mechanische Messungen zeigten, dass der Verlustmodul, welcher als charakteristischer Kennwert für die Dämpfung gilt, systematisch um den Faktor 5 erhöht werden kann. Bemerkenswert und gleichzeitig entgegen jeglicher Intuition ist, dass der Verlustfaktor dabei annähernd unverändert bleibt. Die Erhöhung des Dämpfungsvermögens mit steigendem Plättchengehalt ist mithilfe eines mikromechanischen Modells zu erklären, das ursprünglich zur Beschreibung der Steifigkeit von diskontinuierlich verstärkten Polymeren entwickelt

wurde. Das Modell bietet zusätzlich die Möglichkeit, den Zusammenhang zwischen Dämpfung und geometrischen Parametern wie Volumenanteil und Längenverhältnis der Plättchen zu beschreiben. Ausgehend von diesen Erkenntnissen sollte man das dem biologischen Verbundwerkstoff zugrundeliegendem Gestaltungsprinzip reproduzieren und nicht die Mikrostruktur unverändert kopieren.

In einem weiteren Schritt wurden die Dämpfungseigenschaften von Flachsfaserverbundwerkstoffen mittels Kohlenstofffasern erweitert und deren Einfluss auf die Energiedissipation untersucht. Um eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften zu erreichen, wurden sog. Ultra-Hochmodul-Fasern in Form von Kurzfasern in den Verbund integriert. Dabei erhielten die Fasern während des Herstellungsverfahrens definierte Ausrichtungen. Durch die anschließende Konsolidierung und die damit verbundene Naturfaserinfiltration kann der lokale Kohlenstofffaservolumenanteil von ursprünglich 15% auf bis zu 48% angehoben werden. Aufgrund dieser dichten Schicht aus hochsteifen Kohlenstofffasern, die beispielsweise orthogonal zu den Flachsfasern ausgerichtet wurden, konnte die Biegesteifigkeit um das 1.46-fache erhöht werden, ohne dabei die Eigenschaften in Faserrichtung zu kompromittieren. Darüber hinaus war eine Erhöhung der Dämpfung um den Faktor 3.6 zu ermitteln. Die Eigenschaftssteigerung gab Anlass, diese Kurzfasern in 3D-Druck-Materialien einzuarbeiten und mithilfe druckbarer Pasten dreidimensionale Versteifungselemente auf vorgefertigte Flachsfaserlamine zu applizieren. Doppellagige Versteifungsrippen mit einem Kohlenstofffaservolumenanteil von 10% sorgten dabei für einen Anstieg der Biegesteifigkeit von 60% für parallel gedruckte Rippen und sogar von 600% für senkrecht gedruckte Rippen.

Der dritte Schritt bestand darin, das Verständnis des Dämpfungsverhaltens und -mechanismen von perlmuttinspirierten Verbundwerkstoffen zu erweitern. Der Fokus lag dabei auf der Bestimmung des Effektes unterschiedlich hoher einstellbarer Dichten von Mineralbrücken und Oberflächenunebenheiten auf die Dämpfungseigenschaften. Unter der Voraussetzung eines konstanten Volumenanteils an Plättchen konnte gezeigt werden, dass vor allem der Anteil an Mikrostrukturen zwischen den Plättchen und auf den Plättchenoberflächen für den Anstieg des Dämpfungsvermögens verantwortlich ist. Die Probekörper mit dem höchsten Anteil an Mineralbrücken und Oberflächenunebenheiten wiesen einen Anstieg des Verlustmoduls von mehr als 150% und einen Steifigkeitsanstieg von 31% auf. Diese Eigenschaftssteigerungen verdeutlichen die Relevanz dieser strukturellen Merkmale für die Steifigkeit und das Dämpfungsvermögen perlmuttinspirierter Verbundwerkstoffe.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Forschungsaktivitäten, die in dieser Thesis enthalten sind, wichtige Anhaltspunkte für die Gestaltung und Herstellung von Verbundwerkstoffen mit besonders hohen Dämpfungseigenschaften zur Verfügung stellen. Dabei ist zu unterstreichen, dass mithilfe der vorgestellten Konzepte und Materialien verbesserte Energiedissipationsvermögen erreicht werden können. Diese Materialien zeigen ein wesentlich höheres Potenzial als moderne synthetische und natürlich verfügbare Verbundwerkstoffe. Die Erkenntnisse, die im Rahmen dieser Dissertation gewonnen wurden, bilden eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung neuartiger Leichtbaumaterialien und können bei der Gestaltung struktureller Bauteile mit hohem passivem Dämpfungsvermögen in zukünftigen Hochleistungsanwendungen sehr hilfreich sein.