



Doctoral Thesis

## Integration of monolithic piezoelectric damping devices into adaptive composite structures

**Author(s):**

Bachmann, Florian

**Publication Date:**

2012

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007632409> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 20747

INTEGRATION OF MONOLITHIC  
PIEZOELECTRIC DAMPING  
DEVICES INTO ADAPTIVE  
COMPOSITE STRUCTURES

*A dissertation submitted to*  
ETH ZURICH

*for the degree of*  
Doctor of Sciences ETH Zurich

*presented by*  
FLORIAN BACHMANN  
Dipl.-Ing. Maschinenbau, TU Darmstadt  
born June 17, 1980 in Eschwege  
citizen of Germany

*accepted on recommendation of*  
Prof. Dr. P. Ermanni, examiner  
Prof. Dr. P. Gaudenzi, co-examiner  
Dr. A. Bergamini, co-examiner

2012

# Abstract

The first part of this thesis is dedicated to the problem of finding optimal positions for the placement of piezoelectric transducers in complex composite structures. The proposed procedure is based on the maximization of the strain in the inclusion area of the piezoelectric element and restricts the placement to regions of allowable maximum strain. From the harvested piezo strain energy in relation to the total strain energy of the structure, the generalized electromechanical coupling factor can be derived. A realistic finite element representation of an open rotor blade is developed and validated. The placement procedure is then tested on a composite blade structure. Evaluations are very fast, allowing for exhaustive search for placements in the design domain. Placement results can be displayed in contour plots which illustrate the influence of transducer placement on the coupling efficiency and according sensitivities. Placement layers and areas of equal coupling performance can be identified. The proposed procedure is then compared to experimental results. A full carbon composite rotor blade with structurally integrated piezo modules is manufactured. The generalized electromechanical coupling coefficient is measured in a vibration test stand. Results are compared to calculated values.

The major part of this thesis refers to the investigation of piezoceramic transducer patches with increased strain allowables. Different ways to introduce compressive prestrain in the piezoceramic material are investigated. Most promising is the use of mechanical preloading of the insulating polyimide foil which leads to a compression of the piezoceramic material. We propose a piezo transducer patch that consists of the monolithic piezoelectric material polarized in thickness direction ( $d_{31}$ ), electrodes of thin copper foil, epoxy as matrix material and the mentioned polyimide foil as top and bottom insulating layer. The transducer design matches the demands for structural integration such as flat design for minimum laminate strength reduction, electrical insulation from the conducting CFRP (carbon fibre reinforced plastic) laminate and increased strain allowables.

The basic idea and manufacturing approach is presented and investigated comprehensively. An analytical 1-dimensional model for the achievable prestrain is derived to explain and predict basic influences in the layout of the transducers. Modeling is then extended to 3-dimensional finite element analysis which take also anisotropic material behaviour and geometry (width, thickness) into account. Modeling is validated with 3 point bending strength tests of actuators manufactured at different prestrain levels. Fracture behaviour is analysed to depth with acoustic emission tests in unidirectional tension load testing. The beneficial impact of prestraining is proved. Delamination effects in the edge region of the prestrained modules can lead to early failure onset in acoustic emission testing. A 1-dimensional analysis of the shear stresses in the bonding layers revealed the stress peaks that are a viable explanation for the observed delamination phenomena. An improved transducer design involving epoxy bevels for a smooth load introduction was successfully used to mitigate the delamination effects.

A further chapter is dedicated to a comparative study of piezoelectric shunt damping and shape memory alloy wire damping. Manufactured damping devices are applied to the surface of CFRP plates and tested on a vibration test stand. Both resonant shunt and switching shunt architectures are used. Actuators are also integrated into the blade structure manufactured with a two step RTM (resin transfer moulding) process. A core is manufactured and then equipped with piezoelectric damping devices. This preform is then covered with final carbon fabric layers and more resin is injected into final mould. Blades with integrated damping devices are manufactured and tested on a vibration test stand. The structural integration process is proved feasible and the placement optimisation findings are supported by experimental results. Damping of the plate and blade samples is compared to shape memory alloy wires damping contributed by our project partners of the DREAM project. Piezoelectric shunt damping increases the structural damping (loss factor) of the composite blades significantly. A comparison of the different damping approaches with regard to the added weight is presented.

# Zusammenfassung

Der erste Teil dieser Arbeit behandelt die optimale Platzierung von piezoelektrischen Wandlermodulen in komplexen Bauteilen aus Faserkunststoffverbunden. Die vorgeschlagene Methode basiert auf der Maximierung der Dehnungsenergie im Integrationsgebiet des Piezomoduls. Die möglichen Platzierungen werden limitiert durch die maximal ertragbaren Dehnungen der Keramik. Aus dem Verhältnis der Dehnungsenergien von Piezo und Gesamtstruktur kann der generalisierte elektromechanische Kopplungskoeffizient berechnet werden. Ein realistisches Finite Elemente Modell einer Open Rotor Triebwerksschaufel wurde entwickelt und validiert. Die Platzierungsmethode wurde mit einer Triebwerksschaufel aus Faserkunststoffverbund getestet. Die benötigte Rechenzeit pro Auswertung ist sehr gering und erlaubt deshalb eine sehr grosse Anzahl von möglichen Platzierungen zu berechnen. Die Suchergebnisse können deshalb auch als Konturplots dargestellt werden. Aus diesen kann der Einfluss von Platzierung des Piezos auf die Kopplungsgüte abgelesen werden. Verschiedene Integrations-schichten können getestet werden und Gebiete gleicher Kopplungsgüte können identifiziert werden. Rotorblätter aus Kohlenstofffaserkunststoffverbund mit strukturell integrierten Piezos wurden hergestellt. Die Rotorblätter wurden dann in einem Schwingungsprüfstand untersucht und die Kopplungsgüte gemessen und mit berechneten Werten verglichen.

Der Hauptteil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung von Piezomodulen mit erhöhten ertragbaren Dehnungen. Verschiedene Wege zur Druckvorspannung des piezokeramischen Materials wurden untersucht. Die vielversprechendste Variante ist das Druckvorspannen mittels Polyimidfolie. Die Entwicklung bezieht sich auf ein piezoelektrisches Modul, welches aus einem monolithischen piezokeramischen Material besteht, dass in Dickenrichtung polarisiert ist ( $d_{31}$ ). Die Piezokeramik wird von dünnen Elektroden kontaktiert und ist mit Epoxydharz zwischen zwei isolierenden Polyimidfolien fixiert. Dieses Design erfüllt die Anforderungen im Hinblick auf Strukturintegration in Faserkunststoffverbunden, minimale

Schwächung der Laminatfestigkeit, elektrische Isolation von leitfähigen Kohlenstoffasern und erhöhten ertragbaren Dehnungen. Die Grundidee und das Herstellungsverfahren im Labor werden untersucht. Ein analytisches Berechnungsmodell wurde entwickelt, um die ertragbaren Dehnungen der vorgespannten Keramiken a priori berechnen zu können. Auf diese Weise können verschiedene Einflussgrößen bei der Herstellung der Wandler berücksichtigt werden. Die Modellierung wurde dann auf dreidimensionale Einflussgrößen erweitert, um auch anisotropes Materialverhalten und geometrische Inhomogenitäten berücksichtigen zu können. Drei-Punkt-Biegeversuche von Aktoren mit verschiedenen Vorspannungsniveaus wurden durchgeführt, um den festigkeitssteigernden Einfluss der Vorspannung experimentell zu untersuchen und mit Berechnungsergebnissen zu vergleichen. Höhere ertragbare Dehnungen der Module konnten nachgewiesen werden. Das Versagensverhalten wurde weiterhin mit unidirektionalen Zugversuchen und paralleler Acoustic Emission Auswertung charakterisiert. Delaminationen im Randbereich der Keramik können zu vorzeitigem Versagen führen. Ein eindimensionales Modell zur Berechnung der Scherspannungen in den betreffenden Klebschichten zeigte, dass die übertragbaren Kräfte überschritten werden, was zu den Delaminationen und vorzeitigem Versagen führt. Ein verbessertes Design mit einem schonenderem Querschnittsübergang wurde entwickelt und getestet. Die Delaminationseffekte konnten damit wesentlich verbessert werden.

Ein weiterer Teil dieser Arbeit widmet sich einer Vergleichsstudie zwischen piezoelektrischer Dämpfungsmassnahmen und Dämpfung durch Formgedächtnislegierungen. Die Dämpfungselemente wurden zuerst auf Platten aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff aufgebracht und in einem Schwingprüfstand getestet. Für die piezoelektrischen Platten wurden Resonant Shunt und Switching Shunt Architekturen als elektronische Schaltkreise getestet. In einem weiteren Schritt wurden die Piezoaktoren dann in ein Rotorblatt aus Kohlenstofffaserkunststoffverbund integriert. Hierbei wurde ein zweistufiges RTM (resin transfer moulding) Injektionsverfahren eingesetzt. Zuerst wurde ein Kern hergestellt auf den die Dämpfungselemente platziert wurden. Danach wurde dieser Kern mit weiteren Kohlenstofffaserlagen in die zweite RTM-Form eingebracht und das finale Bauteil mit integrierten Dämpfungselementen hergestellt. Die Compositerotoblätter wurden dann auf dem Schwingprüfstand untersucht. Die Funktionalität nach der Integration konnte nachgewiesen werden. Die Ergebnisse der optimalen Platzierung aus dem ersten Teil dieser Arbeit konnten mit den Schwingungsmessungen validiert werden. Die durch die Dämpfungselemente zusätzlich erzeugte Dämpfung wurde sowohl für die Platten als auch für die Rotorblätter ermitteln und bewertet im Hinblick

auf das Zusatzgewicht. Alle getesteten Prüfkörper erhöhten die Dämpfung signifikant. Die höchste Zusatzdämpfung wurde von den piezoelektrischen Rotorblättern erzielt bei gleichzeitig höchstem Zusatzgewicht.