



Doctoral Thesis

Methods and techniques in composite design for structural vibration suppression via shunted piezoelectric elements

Author(s):

Belloli, Alberto

Publication Date:

2009

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006022061> →

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. 18352

Methods and Techniques in Composite Design for Structural Vibration Suppression via Shunted Piezoelectric Elements

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
Alberto Belloli
Dipl. Masch.-Ing. ETH
born November 29, 1976
citizen of Isorno (TI)

accepted on recommendation of
Prof. Dr. Paolo Ermanni, examiner
Prof. Dr. h.c. Urs Meier, co-examiner
Prof. Dr. Manfred Morari, co-examiner

2009

Abstract

The structural vibration suppression via shunted piezoelectric elements is studied in this work, covering the whole range from the single smart component to the finished prototype smart system.

Part I is devoted to piezoelectric ceramic fibers, the core component of Active Fiber Composites. A novel characterization procedure for the ferroelectric characterization of single piezoelectric fibers yielded butterfly and hysteresis loops and force-displacement curves for three different commercially available fibers and fibers under development at Empa Duebendorf. The observed response was correlated to the respective microstructural properties and fibers were identified for manufacturing AFC later embedded into the test object.

In Part II the micromechanical properties of so-called Active Fiber Composites were investigated both numerically and experimentally. Configurations were optimized in terms of free-strain, force and capacitance response, respectively. Even so, only marginal improvements could be achieved with respect to the requirements imposed to active components for use in structural vibration control.

Part III presents efforts towards proper integration of sensors and actuators into load-carrying composite structures. A laboratory method provides for prototyping large area circuitry with moderate resolution on electrically and thermally stable polyimide. While encapsulation of piezoelectric ce-

ramic wafers allowed for larger modules, perfect insulation and ease of handling, numerical and extensive experimental investigations quantified the impact of their inclusion onto GFRP and CFRP laminate strength.

Part IV focuses on the ultimate goal: the suppression of structural vibration. The performance of Active Fibre Composites and traditional piezoelectric ceramic elements in suppressing structural vibration was compared both experimentally and numerically. Traditional monolithic actuators offer best performance and turned out to be better suited for shunt damping, due to their larger inherent capacitance. AFC, due to their larger voltage output and anisotropic response, seem to be predestined for use as sensing elements. Both monolithic actuators and AFC sensors were successfully placed for optimum vibration suppression using *R-L* and switching *R-L* shunts. The optimization approach includes a CAD-model, an FE-model and evolutionary algorithms and proved a valuable tool in finding optimum solutions for real-world, highly constrained structures.

A rear wing of a racing car was selected as test object for verification of all methods and techniques previously introduced. Experimental validation proved the technology to be effective in suppressing structural vibration, with the trailing edge's flutter mode on the endplates being reduced by 12.5dB (or 76%).

Zusammenfassung

Diese Arbeit untersuchte die Schwingungsdämpfung lasttragender Strukturen mittels piezoelektrischen Elementen und passiven elektrischen Netzwerken. Sie befasste sich mit Problemstellungen, welche von der einzelnen aktiven Materialkomponente bis hin zum fertigen intelligenten Prototypensystem reichen.

Teil I ist den piezoelektrischen keramischen Fasern gewidmet, der wichtigsten Komponente von sogenannten Active Fiber Composites (AFC). Eine neu entwickelte Prozedur erlaubte die ferroelektrische Charakterisierung von einzelnen piezoelektrischen Fasern. Schmetterlings- und Hysteresekurven sowie Kraft-Weg-Diagramme konnten für drei verschiedene, kommerziell verfügbare Fasern sowie für Fasern ermittelt werden, welche zurzeit an der Empa Dübendorf weiterentwickelt werden. Eine enge Korrelation zwischen der gemessenen ferroelektrischen Antwort und der jeweiligen Mikrostruktur ist erkennbar. Die Studie identifizierte die Faser zur Herstellung von AFC, welche später in das Testobjekt integriert wurden.

Teil II beschreibt die numerische und experimentelle Untersuchung der mikromechanischen Eigenschaften von Active Fiber Composites. Es wurden optimale Konfigurationen für die maximale freie Dehnung, die maximale Kraft beziehungsweise die maximale elektrische Kapazität ermittelt. Die erreichten Verbesserungen sind hinsichtlich des Einsatzes von AFC zur Schwingungsunterdrückung leider nur marginal.

Teil III vertieft ausgewählte Aspekte zur korrekten Einbettung von Sensoren und Aktoren in lasttragenden Strukturen. Eine neue Methode ermöglicht die labormässige Herstellung von grossflächigen leitfähigen Kupferbahnen auf Polyimid-Folien, einem elektrisch und thermisch stabilen Polymermaterial. Dank der darauffolgenden Einkapselung von piezoelektrischen keramischen Platten konnten grössere Module mit perfekter elektrischer Isolierung und vereinfachtem Handling hergestellt werden. Numerische und umfangreiche experimentelle Untersuchungen quantifizierten den Einfluss der Einbettung auf die Festigkeit von glasfaser- und kohlenstoffaserverstärkten Laminaten.

Teil IV fokussiert auf die Schwingungsdämpfung lasttragender Strukturen - das Gesamtziel der vorliegenden Arbeit. Die Schwingungsdämpfung mittels Active Fibre Composites und herkömmlichen piezoelektrischen keramischen Modulen wurde sowohl numerisch als auch experimentell untersucht. Aufgrund der höheren inhärenten Kapazität sind monolithische Aktoren besser für den Einsatz mit passiven elektrischen Netzwerken geeignet. AFC hingegen, sollten Dank der höheren generierten Spannung und der anisotropen Antwort Einsatz als Sensoren finden. Sowohl monolithische Aktoren als auch AFC Sensoren wurden so platziert, dass eine optimale Schwingungsdämpfung mittels $R-L$ und schaltbaren $R-L$ Netzwerken erreicht werden konnte. Die Optimierungsprozedur besteht aus einem CAD-Modell, einem FE-Modell und evolutionären Algorithmen. Damit konnten optimale Lösungen für reellen, komplexen Strukturen gefunden werden.

Der Heckflügel eines Rennautos diente als Testobjekt zur Verifizierung aller entwickelten Methoden und Techniken. Die experimentelle Validierung bestätigte, dass die angewandten Technologien effektiv zu einer Schwingungsdämpfung führen. Ein Schwingungsmode der Endplatten konnte um 12.5dB (oder 76%) reduziert werden.