

DISS. ETH NO. 21839

DESIGN OF ADAPTIVE STRUCTURES WITH  
PIEZOELECTRIC MATERIALS

*A thesis submitted to attain the degree of*  
DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

*presented by*

TOMMASO DELPERO

Laurea Specialistica in Aeronautical Engineering, Politecnico di Milano

born July 28, 1984  
citizen of Italy

*accepted on the recommendation of*

Prof. Dr. Paolo Ermanni, examiner  
Prof. Dr. Massimo Ruzzene, co-examiner  
Dr. Andrea Bergamini, co-examiner

2014

## ABSTRACT

---

This doctoral thesis investigates the application of shunted piezoelectric transducers in the design of adaptive structures. The implications of including adaptive materials in the design are considered beyond their immediate intended purpose: while shunted piezoelectric transducers are already known to be an effective technology for reducing structural vibrations, in this work they are considered as additional degrees of freedom to extend the design space and to obtain a qualitative improvement in the dynamic response of the system.

The focus is initially set on controlling structural vibrations by means of piezoelectric shunt damping. A non-conventional design approach, based on finding a compromise between structural stiffness and damping, is proposed in order to extend the design space to lighter, less stiff and more easily damped structures. Achieving this goal requires a high degree of robustness of the shunt damping techniques and of the modeling of their damping performance, which are therefore important intermediate goals. The acquired knowledge is applied to the realistic case study of a scaled model of a rotating blade.

In the second part of this work, the transducers are integrated in the design of structures even at a deeper level, i.e. the metamaterial level. A periodic array of shunted piezoelectric elements exhibits a collective behavior that suggests the application of a metamaterial approach for the investigation of the dynamic properties of the adaptive system. The wave propagation properties of the resulting electromechanical metamaterial are defined by the effective stiffness of the shunted piezoelectric transducers that can be therefore exploited to obtain adaptive bandgaps. Bandgaps are particularly significant because they represent forbidden energy states that, for instance, in a mechanical structure would lead to frequency ranges free from vibrations. Two examples of metamaterials are proposed where resonant shunted piezoelectric discs are arranged in a periodic

configuration to create, cancel or shift acoustic bandgaps. The presented results demonstrate how, thanks to the periodicity of the system, the multi-field coupling of piezoelectric materials allows obtaining remarkable effects in the mechanical response of the system by manipulating energy in the electrical domain, which can be easily done with simple analog circuits.

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Diese Dissertation untersucht die Anwendung geschalteter piezoelektrischer Wandler im Designprozess adaptiver Strukturen. Die Auswirkungen der adaptiven Materialien werden über ihre unmittelbare Verwendung hinaus betrachtet: Obwohl geschaltete piezoelektrische Wandler bereits als wirksame Technik zur Dämpfung von Strukturschwingungen bekannt sind, werden sie in dieser Arbeit als zusätzliche Freiheitsgrade betrachtet, um den Design-Raum zu erweitern und eine Verbesserung der dynamischen Antwort des Systems zu erhalten.

Der Augenmerk des ersten Teils dieser Arbeit liegt auf der Dämpfung von Strukturschwingungen. Ein unkonventioneller Designansatz, der auf der Suche nach einem Kompromiss zwischen Struktursteifigkeit und Dämpfung basiert, wird vorgeschlagen, um den Design-Raum mit leichteren, weniger steifen und leicht gedämpften Strukturen zu erweitern. Um dieses Ziel zu erreichen, ist die Robustheit der Dämpfungstechniken und der Modellierung ihrer Leistungsfähigkeit notwendig, und stellt daher ein wichtiges Zwischenziel dar. Das erworbene Wissen wird an der realistischen Fallstudie des skalierten Modells eines Propellerblatts angewandt.

Im zweiten Teil dieser Arbeit werden die piezoelektrischen Wandler auch in eine tiefere Ebene des Strukturdesigns integriert, d.h. die Metamaterial-Ebene. Eine periodische Anordnung geschalteter Wandler zeigt ein kollektives Verhalten, das es nahelegt, einen Metamaterial-Ansatz zur Untersuchung des periodischen Systems zu verwenden. Die effektive Steifigkeit der geschalteter Wandler kann benutzt werden, um die Wellenausbreitungseigenschaften des elektromechanischen Metamaterials, mit Schwerpunkt auf adaptiven Bandlücken, zu ändern. Bandlücken repräsentieren verbotene Energiezustände, die z.B. in einer mechanischen Struktur zu schwingungsfreien Frequenzbereichen führen würden. Zwei Beispiele von Metamaterialien werden vorgeschlagen, in welchen resonante Wandler in peri-

odischen Konfigurationen angeordnet werden, um akustische Bandlücken zu erzeugen, auszulöschen oder zu verschieben. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, wie die elektromechanische Kopplung piezoelektrischer Materialien ermöglicht, die Energie im elektrischen Bereich mit einfachen analogen Schaltungen zu beeinflussen, und durch die Periodizität bemerkenswerte Effekte in der mechanischen Antwort des Systems zu erhalten.