

# Miniaturized Piezoelectric Actuators for High-Speed Flow Control Applications

Dissertation

zur Erlangung des Grades

des Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät II

- Physik und Mechatronik -

der Universität des Saarlandes

and

Thèse

pour obtenir le titre de

Docteur de l'École Polytechnique

Spécialité : Mécanique

Cotutelle de thèse

Christian Bolzmacher

Saarbrücken / Palaiseau

2009

**Tag des Kolloquiums :**

04.02.2010

**Dekan :**

Prof. Dr. rer. nat. Christoph Becher

**Mitglieder des**

**Prüfungsausschusses :**

Prof. Dr.-Ing. Andreas Schütze

Prof. Dr. rer. nat. Helmut Seidel

Prof. Dr. Moustapha Hafez

Prof. Dr.-Ing. Ernst Obermeier

Dr. Jean-Marc Breguet

Dr. Charles Baroud

Dr.-Ing. Ortwin Farle

Aktuelle Berichte aus der Mikrosystemtechnik  
Recent Developments in MEMS

Band 13

**Christian Bolzmacher**

**Miniaturized Piezoelectric Actuators  
for High-Speed Flow Control Applications**

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Saarbrücken, Univ. und Ecole Polytechnique, Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9728-2

ISSN 1862-5711

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Abstract

This work investigates the development of miniaturized piezoelectric actuators for high-speed flow control on airfoils. The goal is to delay the laminar-turbulent transition by active wave cancellation of so-called Tollmien-Schlichting waves introducing appropriate counterwaves. The aerodynamic benefit is based on the ten-fold skin friction drag reduction between laminar and turbulent boundary layers. This leads to significantly reduced fuel consumption. For active transition control, robust actuators covering a wide frequency range with high amplitudes and small dimensions are required at the same time. The actuators realized in this work are designed with finite element simulation methods.

The first design concept is based on a mechanically amplified actuator where an external elastic lever-type amplification unit is located above a piezoelectric disc. The membrane is fixed at its outer edge and maximum displacement is reached at the centre. The amplification factor can be set by varying the position of the load transmission point. This actuator provides direct control ability, a linear transfer function, and fast response time facilitating its integration in controller systems.

The second design concept is based on a tapered membrane driven in one of its axisymmetric eigenmodes, excited by a piezoelectric ring placed at the outer edge. The tapered membrane focuses the induced waves at the centre, where maximum amplitudes can be observed. The advantage of this design is the reduced side lobe at higher order axisymmetric eigenmodes and the amplified major lobe with point source character. Amplitude modulation allows the actuator to attain a wide frequency range as required for the active cancellation of Tollmien-Schlichting waves, where the carrier frequency is provided by the eigenfrequencies. Its robustness, simple fabrication, and closed surface qualify this actuator for aircraft implementation.

The effect of both actuators on the airflow around a wing profile at open-loop control has been measured with hot-film anemometers during a wind tunnel experiment. For device dimensions adapted to the flow conditions, both actuators exhibit the desired effect on the airflow required for active transition control. It has been shown that amplitude modulation is an option for this type of flow control, if the carrier frequency is selected adequately ( $> 40$  kHz) in order to not disturb the airflow.



# Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung von miniaturisierten piezoelektrischen Aktoren zur Strömungsbeeinflussung auf Tragflächen. Durch Einkopplung gegenphasiger Wellen zur Auslöschung sogenannter Tollmien-Schlichting Wellen soll der laminar-turbulente Umschlag stromab verschoben werden. Aus aerodynamischen Gesichtspunkten ist dies mit der verminderten Wandreibung von laminaren Grenzschichten gegenüber turbulenten Grenzschichten um den Faktor zehn zu erklären, wodurch Treibstoff eingespart werden kann. Für die aktive Transitionskontrolle werden robuste Aktoren mit großem nutzbaren Frequenzbereich und möglichst großen Amplituden bei geringen Abmessungen benötigt. Die Konzeptentwicklung und Modellierung der Aktoren erfolgte anhand von Finite-Elemente-Simulationsmethoden. Das erste Konzept, ein mechanisch hubverstärkter Aktor, besteht aus einer piezoelektrischen Scheibe, die ein darüber befestigtes elastisches Hebelelement betätigt. Durch Variation des Kraftübertragungspunktes kann der Verstärkungsfaktor und somit die maximale Amplitude in der Membranmitte eingestellt werden. Der hubverstärkte Aktor zeichnet sich durch eine direkte Ansteuerbarkeit, eine lineare Übertragungsfunktion und ein schnelles Ansprechverhalten aus, welches die Integration in ein Regelsystem erleichtert. Das zweite Aktorkonzept, ein Ultraschallaktor, besteht aus einer konischen Membran, die durch ein piezoelektrisches Ringelement in Resonanz betrieben wird. Die konische Form fokussiert die Anregungsenergie des Piezoelements zur Membranmitte hin, wodurch eine Amplitudenverstärkung realisiert wird. Für axialsymmetrische Eigenmoden höherer Ordnung wird eine punktförmige Maximalamplitude kleinster Abmessung erreicht, da die Nebenkeulen durch die konische Form weniger stark ausgeprägt sind. Dies kann als Trägersignal einer Amplitudenmodulation eingesetzt werden, um den großen Frequenzbereich zur Auslöschung von Tollmien-Schlichting Wellen zu erreichen. Das robuste Design mit geschlossener planer Oberfläche, einfache Herstellung und ein geringer Energieverbrauch zeichnen diesen Aktor aus. Der Einfluss beider Aktorkonzepte auf eine transitionale Strömung wurde im offenen Regelkreis mit Heißfilmsensoren im Windkanal untersucht. Bei idealer Anpassung der Aktormaße zeigen beide Aktoren den gewünschten Effekt auf die Strömung. Im Falle des Ultraschallaktors konnte gezeigt werden, dass die Amplitudenmodulation zur aktiven Strömungsbeeinflussung herangezogen werden kann, wenn die Trägerfrequenz ausreichend hoch ( $> 40$  kHz) angesetzt wird.





# Résumé

Cette thèse décrit le développement d'actionneurs piézoélectriques miniaturisés pour le contrôle actif d'écoulement d'air à haute vitesse. L'objectif est de retarder la transition laminaire turbulente par le contrôle actif des ondes de Tollmien-Schlichting par l'introduction d'ondes artificielles à phase inversée. L'effet aérodynamique s'explique par le facteur dix entre le frottement d'une couche limite laminaire et turbulente. La consommation de carburant peut donc être réduite de manière significative. Le contrôle actif de la transition nécessite l'utilisation d'actionneurs ayant à la fois une gamme de fréquence large, des amplitudes élevées et des dimensions petites. Les actionneurs réalisés dans ce travail ont été modélisés par des méthodes par éléments finis.

Le premier concept étudié dans ce travail de thèse est un actionneur amplifié mécaniquement avec une structure de type levier élastique situé au-dessus d'une céramique piézoélectrique. La membrane est fixée au bord extérieur d'un support circulaire et le déplacement maximum est situé au centre. Le facteur d'amplification peut être adapté en fonction de la position du point de transmission de l'effort. Les avantages de cet actionneur sont le contrôle direct, la fonction de transfert linéaire, et le temps de réponse très rapide, ce qui facilite l'intégration dans un système asservi.

Le deuxième concept est basé sur l'utilisation d'une membrane conique actionnée par un anneau piézoélectrique dans un mode propre axisymétrique. La géométrie conique focalise les ondes générées par l'anneau piézoélectrique vers le centre où les amplitudes sont les plus importantes. Les lobes latéraux observables dans les modes d'ordre supérieur sont réduits et le lobe principal est amplifié. Pour le contrôle des ondes de Tollmien-Schlichting, la modulation d'amplitude est appliquée pour atteindre une gamme de fréquence large où la fréquence porteuse est délivrée par les modes propres. Cet actionneur a l'avantage d'utiliser une membrane robuste fermée et une intégration simple.

L'effet des actionneurs sur un écoulement d'air a été mesuré avec des capteurs à film chaud dans une soufflerie en boucle ouverte. L'adaptation des dimensions des actionneurs en fonction de la vitesse de l'écoulement ont permis de montrer l'effet désiré pour le contrôle actif de la transition. Enfin, il a été démontré que la modulation d'amplitude est une alternative intéressante si la fréquence porteuse est sélectionnée de manière optimale pour qu'elle n'agisse pas sur l'écoulement ( $> 40$  kHz).



# Table of Contents

<b>Abstract</b> .....	<b>i</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>iii</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>v</b>
<b>Table of Contents</b> .....	<b>vii</b>
<b>Nomenclature</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
1.1. Relevance of the Subject.....	1
1.2. State of the Art in AWC .....	3
1.3. Objectives of this Investigation.....	5
<b>Aerodynamic Background</b> .....	<b>7</b>
2.1. Boundary Layer Theory.....	7
2.1.1. Boundary Layer Thickness .....	8
2.1.2. Boundary Layer Skin Friction Drag .....	8
2.2. Different Modes to Turbulence .....	10
2.3. Transition Process .....	12
2.4. Linear Stability Theory .....	13
2.5. Active Wave Control .....	15
2.5.1. Active Transition Control.....	16
2.5.2. Active Turbulence Control.....	18
2.6. Conclusion.....	21

<b>Actuation Technologies .....</b>	<b>23</b>
3.1. Requirements on the Actuator.....	23
3.2. Actuation Technologies .....	24
3.2.1. Piezoceramics .....	25
3.2.2. Piezoelectric Polymers .....	25
3.2.3. Electrostrictive Ceramics.....	26
3.2.4. Electrostrictive Polymers.....	27
3.2.5. Electrostrictive Graft Elastomers.....	28
3.2.6. Dielectric Elastomer Actuators.....	29
3.2.7. Magnetostrictive Actuators.....	30
3.2.8. Ferromagnetic Shape Memory Alloys.....	31
3.2.9. Electromagnetic Actuators.....	32
3.2.10. Electrostatic Actuators .....	33
3.3. Comparison of Actuation Technologies for Transition Control .....	33
<b>Piezoelectric Actuators .....</b>	<b>37</b>
4.1. Properties of Piezoelectric Materials .....	37
4.1.2. Piezoelectricity.....	38
4.1.3. Pyroelectricity.....	38
4.1.4. Ferroelectricity .....	39
4.1.5. Relaxor Ferroelectricity.....	39
4.2. Material Characteristics of PZT and PMN-PT.....	40
4.2.1. Structural Phases.....	40
4.2.2. Piezoelectric Properties.....	42
4.2.3. Nonlinearities .....	43
4.3. Modelling of Piezoelectric Actuators .....	44
4.3.1. Notation.....	44

4.3.2. Constitutive Equations of Piezoelectric Materials.....	45
4.3.3. Finite Element Method Formulation.....	47
4.4. Piezoelectric Actuator Design Variations.....	48
4.4.1. Internal Amplification Mechanisms.....	49
4.4.2. External Amplification Mechanisms.....	51
4.4.2.1. Hydraulically Amplified Actuators.....	51
4.4.2.2. Mechanically Amplified Actuators.....	52
4.4.3. Frequency Leveraged Actuators.....	53
4.5. Discussion.....	53
4.6. Conclusion.....	54
<b>Mechanically Amplified Piezoelectric Actuator.....</b>	<b>55</b>
5.1. Single Crystal Silicon Amplification Unit.....	55
5.1.1. Design.....	56
5.1.2. Simulation.....	57
5.1.2.1. Static Analysis.....	58
5.1.2.2. Buckling Analysis.....	60
5.1.2.3. Dynamic Analysis.....	62
5.1.2.4. Membrane Efficiency.....	65
5.1.3. Manufacturing and Integration.....	66
5.1.4. Characterization.....	68
5.2. Superelastic Nickel Titanium Amplification Unit.....	75
5.2.1. Design.....	75
5.2.2. Simulation.....	77
5.2.2.1. Static Analysis.....	77
5.2.2.2. Dynamic Analysis.....	79
5.2.3. Manufacturing and Integration.....	81

5.2.4. Characterization.....	82
5.3. Discussion.....	87
<b>Ultrasonic Actuator .....</b>	<b>89</b>
6.1. Resonant Piezoelectric Actuator.....	89
6.2. Vibration of Plates.....	90
6.3. Acoustic Wave Propagation in Plates .....	93
6.4. Design.....	97
6.5. Simulation.....	99
6.5.1. Modal Analysis .....	100
6.5.2. Harmonic Analysis.....	102
6.6. Manufacturing and Integration.....	106
6.7. Characterization .....	106
6.8. Discussion.....	111
<b>Aerodynamic Validation .....</b>	<b>113</b>
7.1. Experimental Set-Up .....	113
7.1.1. Transonic Wind Tunnel Test Facility .....	114
7.1.2. Wing Section.....	114
7.1.3. Microstructured Hot-Film Sensor Array.....	115
7.1.4. Integration and Experiment Outline.....	116
7.2. Mechanically Amplified Piezoelectric Actuator Experiments .....	117
7.2.1. Time Traces and Power Spectra.....	118
7.2.2. Standard Deviation.....	121
7.3. Ultrasonic Piezoelectric Actuator Experiments.....	122
7.3.1. First Axisymmetric Mode (0,1).....	122
7.3.1.1. Time Traces and Power Spectra .....	123
7.3.1.2. Standard Deviation .....	124

7.3.2. Second Axisymmetric Mode (0,2).....	125
7.3.2.2. Time Traces and Power Spectra .....	125
7.3.2.3. Standard Deviation .....	127
7.3.3. Third Axisymmetric Mode (0,3).....	128
7.3.3.1. Time Traces and Power Spectra .....	129
7.3.3.2. Standard Deviation .....	132
7.4. Discussion.....	133
<b>Summary, Conclusion and Future Work.....</b>	<b>135</b>
<b>References .....</b>	<b>139</b>
<b>List of Figures.....</b>	<b>151</b>
<b>List of Tables .....</b>	<b>159</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>161</b>





# Nomenclature

## Latin Symbols

$A_f$	Austenite finish temperature
$A_s$	Austenite start temperature
$A_0$	Zero-order antisymmetric mode
$\mathbf{c}, \mathbf{c}^E$	Elasticity matrices
$C_f$	Total skin friction coefficient
$c_{fx}$	Skin friction coefficient
$c_p$	Pressure wave speed
$c_r$	Wave group velocity
$c_s$	Shear wave speed
$\mathbf{C}_{\text{um}}$	Damping matrix
$\mathbf{d}$	Piezoelectric strain coefficient matrix
$d_{31}, d_{32}, d_{33}, d_{15}$	Piezoelectric strain coefficients
$D$	Flexural rigidity
$\mathbf{D}$	Electric displacement matrix
$\mathbf{e}$	Piezoelectric stress matrix
$E$	Electric field
$\mathbf{E}$	Electric field matrix
$\mathbf{F}$	Force
$h$	Plate thickness
$H$	Transformation hysteresis
$I_n$	Modified Bessel function of the first kind
$J_n$	Bessel function of the first kind
$k_{xx}$	Coupling factor

$K_n$	Modified Bessel function of the second kind
$\mathbf{K}_{uu}$	Stiffness Matrix
$\mathbf{K}_{u\phi}, \mathbf{K}_{\phi u}$	Piezoelectric matrices
$\mathbf{K}_{\phi\phi}, \mathbf{K}_{xx}^T$	Dielectric matrices
$m$	Number of nodal diameters
$M_f$	Martensite finish temperature
$M_s$	Martensite start temperature
$\mathbf{M}_{uu}$	Mass matrix
$n$	Number of nodal circles
$p$	Pressure
$\mathbf{Q}$	Electric charge
$q_\infty$	Dynamic pressure
$r$	Radius of the membrane
$Re_x$	Reynolds number
$\mathbf{s}, \mathbf{s}^E$	Elastic compliance matrices
$s_{xx}^E$	Elastic compliance
$\mathbf{S}$	Strain matrix
$s_x, s_y$	Planar strains
$s_z$	Thickness strain
$S0$	Zero-order symmetric mode
$\mathbf{T}$	Stress matrix
$T_c$	Curie temperature
$T_{max}$	Temperature of maximum dielectric permittivity
$\mathbf{u}_i$	Displacement matrix
$u_r, u_z$	Displacements
$V$	Mean fluid velocity
$V_\infty$	Free stream velocity
$Y$	Young's modulus, modulus of elasticity
$Y_n$	Bessel function of the second kind

## Greek Symbols

$\alpha, \beta$	Non-dimensional variables
$\gamma$	Frequency parameter
$\delta$	Boundary layer thickness
$\epsilon_0$	Permittivity of free space
$\epsilon_r$	Relative permittivity
$\epsilon, \epsilon^S, \epsilon^T$	Dielectric constant matrices
$\lambda$	Wavelength
$\lambda_L, \mu_L$	Lamé constants
$\mu$	Dynamic viscosity
$\nu$	Poisson's ratio
$\xi$	Non-dimensional variable
$\rho$	Density
$\rho_\infty$	Fluid density in freestream condition
$\tau_w$	Shear stress
$\phi_i$	Electric potential matrix
$\omega$	Natural frequency

## Abbreviations

AC	Alternating current
ACARE	Advisory council for aeronautics research in Europe
AM	Amplitude modulation
AoA	Angle of attack
AWC	Active wave control
CF	Crossflow
CFD	Computational Fluid Dynamics
DC	Direct current
DE	Dielectric elastomer
DRIE	Deep reactive ion etching
EAP	Electroactive polymer
FEM	Finite element method
FSMA	Ferromagnetic shape memory alloy
HLFC	Hybrid laminar flow control
ID	Inner diameter
LE	Leading edge
LFC	Laminar flow control
Ma	Mach number
MEMS	Microelectromechanical system
MPB	Morphotropic phase boundary
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NiTi	Nickel titanium
NLF	Natural laminar flow
OD	Outer diameter
PLZT	Lead lanthanum zirconate titanate
PMN	Lead magnesium niobate
PMN-PT	Lead magnesium niobate – lead titanate
PVDF	Polyvinylidene fluoride

PVDF-TFE	Polyvinylidene fluoride - tetrafluoroethylene
PVDF-TrFE	Polyvinylidene fluoride - trifluoroethylene
PZN-PT	Lead zinc niobate – lead titanate
PZT	Lead zirconate titanate
Pz26	Hard piezoelectric ceramic from Ferroperm
Pz29	Soft piezoelectric ceramic from Ferroperm
RAINBOW	Reduced and internally biased oxide wafer
RMS	Root mean square
SD	Standard deviation
Terfenol-D	Terbium iron naval ordnance laboratory dysprosium
THUNDER	Thin layer unimorph driver and sensor
TS	Tollmien-Schlichting
VG	Vortex generator