

DISS. ETH NO. 21804

Adaptive-twist airfoils based on variable stiffness

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

presented by
WOLFRAM RAITHER
MSc ETH in Mechanical Engineering
born on 14th August 1984
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Paolo Ermanni, examiner
Prof. Dr.-Ing. Horst Baier, co-examiner
Dr. Andrea Bergamini, co-examiner

2014

Abstract

This doctoral thesis presents a new structural concept for shape-adaptable airfoils based on adjustable elastic twist. The adaptive-twist concept rests upon the idea that stiffness changes in the load-carrying structure of an airfoil put into effect by an integrated smart material can be utilised to induce variations in the airfoil's shear centre location and torsional stiffness that allow for controllable bending-twist coupling. No actuators are required in such a system, since aerodynamic loads are exploited to realise shape adaptations. This semi-passive approach, in which energy has to be spent only for the activation of the smart material that effects the changes in stiffness, promises high energy and lightweight efficiency, not least by the high degree of structural integration resulting from its compliant and smart nature.

Theoretical and experimental investigations of this dissertation evolve from the local level of the smart material and interface, carrying over the findings to the level of the adaptive wing box and, finally, to the global one of the adaptive airfoil. Two different smart material systems relying on temperature-controlled polymeric glass transition and voltage-regulated electrostatic adhesion are considered.

Based on the analytical foundation of the structural concept and on the examination of the smart materials and interfaces, a comprehensive analytical, numerical and experimental investigation of adaptive wing box structures, which represent the constitutive element of the adaptive-twist concept, is performed, showing the effectiveness of the elastic working principle. Building upon the results of this study, a structural design for the adaptive-twist airfoil is devised. The results obtained by numerical simulation and static testing of experimental airfoil structures based on this design demonstrate the structural concept to be effective when applied in a realistically sized wing structure. By numerical scalability investigations on the basis of aeroelastic simulations considering the dimensions and flight conditions of a wing of a glider plane the proof of concept in an application-oriented environment is accomplished. For certain upscaled configurations changes in lift coefficient of the same order of magnitude as the ones of conventional wing attachments can be achieved by the novel airfoil concept, for which also the

feasibility of aeroelastically stable designs is demonstrated.

An applicability survey highlights the strong dependence of the performance of the adaptive-twist airfoil on the smart material system employed. Very different, contrary characteristics of the two materials investigated are revealed. Regardless of this, an application of the adaptive-twist concept for functions that either require only few adaptations under constant loading or allow for lift alleviation during operation is considered feasible.

Implying a design philosophy of variable, and notably reduced, stiffness for lightweight structures, the proposed structural concept represents an alternative conception to the paradigm of stiffness maximisation of classical lightweight design.

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation behandelt ein neuartiges Strukturkonzept für formveränderliche Tragflügel, welches auf elastischer Verdrillung basiert. Dieses Konzept baut auf der Idee auf, dass Steifigkeitsänderungen in der lasttragenden Struktur einer Tragfläche, die mittels eines integrierten smarten Werkstoffes realisiert werden, für eine variable Schubmittelpunktlage und Torsionssteifigkeit und damit für eine adaptive Biegetorsionskopplung eingesetzt werden können. Ein solches System benötigt keine Aktuatoren, da aerodynamische Lasten für die Formänderungen genutzt werden. Dieser semipassive Ansatz, bei welchem nur für die Aktivierung des smarten Materials zur Steifigkeitsänderung Energie aufgewandt werden muss, verspricht eine hohe Energie- und Leichtbaueffizienz, nicht zuletzt durch den mit der Nachgiebigkeit und dem smarten Werkstoff einhergehenden hohen Integrationsgrad.

Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen dieser Doktorarbeit gehen von der lokalen Ebene des smarten Werkstoffes und der smarten Schnittstelle aus. Von dort werden die Ergebnisse auf die Ebene des adaptiven Flügelkastens und schliesslich auf die globale Ebene des adaptiven Tragflügels übertragen. Zwei verschiedene smarte Materialsysteme werden betrachtet: Während das eine auf dem temperaturgesteuertem Glasübergang polymerer Werkstoffe basiert, besteht das Wirkprinzip des anderen in spannungsgesteuertem, elektrostatisch induziertem Kraftschluss.

Aufbauend auf der analytischen Begründung des Strukturkonzepts und auf der Charakterisierung der smarten Werkstoffe und Schnittstellen wird eine umfangreiche analytische, numerische und experimentelle Untersuchung der adaptiven Flügelkastenstrukturen durchgeführt, welche das konstitutive Element des vorgeschlagenen Konzeptes darstellen. Auf diese Weise kann die Wirksamkeit des elastischen Wirkprinzips aufgezeigt werden. Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Studie wird die Konstruktion einer adaptiven Tragfläche ausgearbeitet. Die Resultate numerischer Simulationen und statischer Strukturversuche an Flügelstrukturen, in welchen diese Konstruktion realisiert ist, zeigen die Effektivität des Strukturkonzepts für eine realistisch ausgelegte Tragfläche. Numerische Skalierbarkeitsuntersuchungen

mittels aeroelastischer Simulationen, welchen die Abmessungen und Flugbedingungen des Tragflügels eines Segelflugzeugs zugrunde liegen, erlauben den Machbarkeitsnachweis unter anwendungsnahen Bedingungen. Für bestimmte hochskalierte Konfigurationen erreicht das neuartige Flügelkonzept Auftriebsänderungen, die in ihrer Größenordnung denjenigen konventioneller Klappensysteme entsprechen. Auch die Machbarkeit aeroelastisch stabiler Auslegungen wird in diesem Zusammenhang gezeigt.

Eine Untersuchung der Anwendbarkeit des Konzepts hebt hervor, dass die Leistungsfähigkeit der Tragfläche mit adaptiver Verdrillung stark vom verwendeten smarten Materialsystem abhängt, wobei die beiden untersuchten Werkstoffe sehr verschiedene, gegensätzliche Eigenschaften erkennen lassen. Unabhängig hiervon wird ein Einsatz des Strukturkonzeptes für Anwendungen, die entweder eine geringe Zahl von Aktivierungen unter Last erfordern oder eine Entlastung während des Betriebs erlauben, als realisierbar erachtet.

Das vorgeschlagene Strukturkonzept impliziert eine Konstruktionsphilosophie, für die Änderungen und insbesondere Minderungen der Struktursteifigkeit konstitutiv sind. Auf diese Weise repräsentiert es einen Gegenentwurf zum Paradigma der Steifigkeitsmaximierung, welches den klassischen Leichtbau auszeichnet.