

DISS. ETH Nr. 12003

STATISCHE VERFORMUNGSBEEINFLUSSUNG
HOCHGENAUER FASERVERBUNDREFLEKTORSCHALEN
MIT HILFE APPLIZIERTER ODER INTEGRIERTER AKTIVER ELEMENTE

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

Rolf Helmut Paradies
Dipl.-Ing. TU Braunschweig

geboren am 17.02.1964
von Wermelskirchen, Deutschland

Angenommen auf Antrag von:

Prof.em.Dr.-Ing.E.h.Dr.-Ing. M. Flemming, Referent
Prof. Dr. W. Charon, Korreferent
Prof. Dr. M. Meier, Korreferent

1997

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit ist ein einführender Beitrag in die Thematik der adaptiven Strukturen mit dem Schwerpunkt in der Auslegung und Herstellung adaptiver, flächiger Faserverbundstrukturen für die statische Verformungsbeeinflussung. Im Sinne dieser Einführung werden alle zur Realisierung einer adaptiven Struktur notwendigen Schritte, wie die Evaluation der Komponenten, die Strukturauslegung, ihre Fertigung und die experimentelle Verifikation des Strukturkonzeptes an einer konkreten Teststruktur erläutert. Aus den einzelnen Teilaspekten dieser Untersuchung resultieren folgende Erkenntnisse:

- Die piezoelektrischen keramischen Aktoren weisen aus der Vielzahl der zur Verfügung stehenden elektromechanischen Wandler die meisten Vorteile für die Verformungsbeeinflussung flächiger Faserverbundlaminat auf. Neben der direkten Umwandlung der elektrischen Energie in eine mechanische Energie können sie vergleichsweise einfach in dünne Faserverbunde integriert werden. Auch tritt bei deren quasi-statischer Ansteuerung keine thermisch induzierte Strukturbeeinflussung auf, wie es bei anderen Festkörperaktoren der Fall sein kann.
- Die präsentierte in-situ Fertigungstechnik ermöglicht infolge der Integration der aktiven Elemente während der Herstellung des Faserverbundlaminates eine bessere Aktorankopplung als bei deren nachträglicher Applikation. Die Gefahr einer thermischen Zerstörung der piezoelektrischen Aktoren kann dabei durch den Einsatz duroplastischer Matrixsysteme mit niedriger Verarbeitungstemperatur zu Lasten langer Fertigungszyklen vermieden werden.
- Im Mittelpunkt der numerischen/analytischen Modellierung steht die Auslegung eines ebenen adaptiven Laminates, das sich durch ein weitgehend richtungsunabhängiges Verhalten bezüglich der passiven gewichtsinduzierten und aktiven aktorinduzierten Belastung auszeichnet. Durch diese Untersuchung kann im Rahmen der statischen Verformungskontrolle bei einem zentrisch eingespannten adaptiven Laminat unter Eigengewicht eine Verbesserung des Konturfehlers von mehr als 80% mit einer aktiven Fläche von lediglich 14% erzielt werden. Diese numerischen Ergebnisse konnten durch einen neu entwickelten Messaufbau, der die Messung von Reflektorschalen unter Eigengewicht ermöglicht, experimentell bestätigt werden.
- Die darüber hinausgehenden Untersuchungen zeigen, dass ein Transfer der gewonnenen Ergebnisse auf eine Struktur mit doppeltgekrümmter Oberfläche aufgrund der geometrisch bedingten Kopplung nur für grosse Krümmungsradien (Brennweiten) möglich ist. Auch nimmt der Aufwand zur Applikation ebener Aktoren mit sinkendem Krümmungsradius zu. Ein Lösungs-

ansatz zur Verformung doppeltgekrümmter Oberflächen mit Hilfe ebener piezoelektrischer Aktoren stellt der vorgestellte Sandwichreflektor mit sphärischer Deckschicht dar.

Angehts des interdisziplinären Charakters dieses Forschungsgebietes können die einzelnen Themengebiete nicht erschöpfend behandelt werden. Es werden jedoch soweit möglich Ansätze für weitergehende Forschungsarbeiten zum vorliegenden Konzept der aktiven Verformungskontrolle von Faserverbundstrukturen aufgeführt. Dazu gehört auch die Bestimmung des Verformungszustandes mit Hilfe diskret integrierter Sensoren, der Einfluss des Aktoranteils auf das passive und aktive Verformungsverhalten eines adaptiven Kragarms und die Auslegung eines piezoelektrischen Aktors mit orthotroper Dehnungscharakteristik.

Summary

The research work presented is a contribution to the topic of adaptive structures with the main focus on the design and fabrication of adaptive laminates for static shape control purposes. Having an introducing character all necessary steps towards the realisation of an adaptive structure like the evaluation of the different components, the structural design, the fabrication and the experimental verification are explained for a given test structure in this report. The results gained in the different fields of investigations can be summarised as follows:

- Of the different electromechanical transformer available the piezoceramic actuators are best suited for the shape control of fibre reinforced composites. Next to their direct transformation of the electrical energy into mechanical energy, they can easily be integrated into thin laminates. Furthermore, no thermal induced structural deformations occur at static control purposes, as they can by the use of other actuator types.
- The in-situ fabrication technique for adaptive laminates presented, enables the integration of the actuators into the laminate during the fabrication of the composite and, therefore, allows for a better mechanical coupling between structure and actuator compared to actuators, which have to be glued onto a cured laminate. The danger of a thermal induced depolarisation of the integrated piezoelectric actuators can be avoided by the use of a thermosetting plastic with a low cure temperature, which do require a long cure cycle.
- The main focus of the numerical and analytical investigations is the design of a plane adaptive laminate, which is isotropic with respect to weight induced and actuator induced loading. Based on this investigation the contour

error of an adaptive test laminate, which is fixed at its centre and loaded by its own weight, can be reduced by more than 80% with an active surface of less than 14%. The numerical results for the adaptive laminate have been verified by experiments using a new designed measurement set-up, which facilitates the measurement of gravity induced deformations of reflector dishes for different angles of inclination.

- Further investigations show, that the results gained for this laminate can only be transferred to doubly curved laminates with a large curvature (focal distance). With decreasing focal distance the geometric induced coupling increases as well as the design efforts necessary for the application of plane actuators to a doubly curved surface. A possibility for the shape control of spherical surfaces by the use of plane piezoelectric actuators is the shown sandwich reflector with a flat and a doubly curved surface.

Due to the interdisciplinary character of this research project, the single topics can not be treated completely. Where possible, there are starting points given for further investigations into the concept of shape control of surfaces made of fibre reinforced composites. Examples are the description of the deformed shape of a laminate based on discrete integrated sensors, the influence of the actuators on the self-weight- and actuator-induced shape of a cantilever beam and the design of a piezoelectric actuator with orthotropic strain characteristics.