

Kurzfassung

Der Anteil von Komponenten aus Faserkunststoffverbunden (FKV) ist in den vergangenen Jahren speziell in den leichtbaugetriebenen Branchen stetig gestiegen, da der Einsatz von FKV die Möglichkeit bietet, eine Gewichtsreduktion gegenüber Ausführungen mit klassischen Metallwerkstoffen zu erzielen. Eine optimale Ausnutzung der Vorteile von FKV kann jedoch nur durch faserkunststoffgerechte konstruktive Lösungen, für die bisherige Ausführungen in Frage gestellt werden müssen, erreicht werden. Nicht nur Materialien und Bauweisen für lasttragende Strukturen sind zu überdenken, auch bisherige Lösungsansätze zur Realisierung aktorischer Funktionen, die einen wesentlichen Teil vieler Produkte ausmachen, müssen hinterfragt werden. Klassische diskret angeschlossene Aktoren können in diesem Zuge durch neuartige Festkörperaktoren wie z.B. Formgedächtnislegierungen oder Piezokeramiken substituiert werden. Durch den differenziellen Aufbau der FKV ist die direkte Integration aktiver Formgedächtnislegierungen (engl. Shape Memory Alloys (SMA)) möglich und es ergibt sich ein neues FKV-gerechtes Aktorikprinzip, welches eine material- und flächenintegrierte Aktorik bietet. Wesentliche, bisher ungelöste Fragestellungen aktiver SMA-FKV-Hybridverbunde werden in der vorliegenden Arbeit detailliert beleuchtet und neue Lösungsansätze ausgearbeitet, um für einen zukünftigen industriellen Einsatz die grundlegenden Voraussetzungen zu schaffen.

Um ein ganzheitliches Vorgehen zu gewährleisten, müssen offene Fragestellungen im Bereich der Herstellung und simulativen Auslegung beantwortet werden. Die zentralen Fragen sind:

- **Herstellung:** Wie können zuverlässige aktive SMA-FKV-Hybridverbunde reproduzierbar hergestellt werden?
- **Simulation:** Wie können aktive Komponenten aus SMA-FKV-Hybridverbund auf Bauteilebene effizient ausgelegt werden?

Die Integrationsmethode des Herstellungsprozesses muss möglichst effizient die Aufgaben Kraftübertragung zwischen SMA und FKV, elektronische Kontaktierung

und Handling erfüllen. Dies wird mit einem innovativen Konzept, welches bei der Kraftübertragung auf mechanische Verankerungen zwischen SMA-Elementen und umgebendem FKV setzt, erreicht. Durch den Einsatz eines geschweißten SMA-Gitters und lokal faserverstärkter Bereiche können die erforderlichen Aktorspannungen übertragen werden. Weiterhin gewährleistet ein vorgefertigtes SMA-Gitter einen flexiblen Herstellungsprozess und ein reproduzierbares Herstellungsergebnis.

Zur Konzipierung einer optimalen Prozesstemperaturführung sind komplexe Randbedingungen und auf den ersten Blick widersprüchliche Anforderungen aus den etablierten Herstellungsprozessen von FKV-Materialien und dem thermisch sensiblen SMA-Materialverhalten zu berücksichtigen. Eine Kalthärtung im ersten Schritt der Hybridverbundherstellung aus duromerem FKV und SMA-Gitter erlaubt einen Verzicht auf aufwendige Vorrichtungen zur Unterdrückung einer vorzeitigen Verformung der SMA-Elemente. Eine weitere angepasste Temperatur zur Erhöhung der Vernetzungsdichte des duromeren Polymers verbessert die Leistungsfähigkeit zusätzlich, wodurch die maximale Spitzenauslenkung (ohne äußere Last) bezogen auf die aktive Länge einer Hybridstruktur von anfänglich 17 % auf mehr als 60 % gesteigert werden kann.

Um eine simulative Abbildung dieser SMA-FKV-Hybridverbunde zur Auslegung aktiver Komponenten einsetzen zu können, muss die Modellierung die notwendige Genauigkeit liefern und effizient auf Bauteilskala einsetzbar sein. Das entwickelte Zustandslinien-Modell des SMA-Materials wird diesen Anforderungen durch die Fokussierung auf den Aktorikeffekt gerecht. Vorhergesagt werden kann damit der „aufgeheizte“ und „abgekühlte“ Zustand von Ein- und Zwei-Weg-Effekt-Materialien. Der Einfluss der Steifigkeit der zu verformenden FKV-Komponente wird durch eine anwendungsnahe Charakterisierung erfasst und fließt durch die analytische Beschreibung der Zusammenhänge in das Modell ein. Konkrete Kennwerte stehen für ein Zwei-Weg-Effekt-Material und zwei Ein-Weg-Effekt-Materialien mit unterschiedlicher Umwandlungstemperatur und individueller Vordehnung (1,8 bis 6,3 %) zur Verfügung. Durch die Beschreibung der gesamten Hybridverbunde mittels homogenisierter Schalen in der Finiten-Elemente-Methode (FEM) kann auf die Abbildung der realen

mikroskopischen Geometrie verzichtet werden und die Auslegung ganzer Komponenten aus aktivem SMA-FKV-Hybridverbund wird ermöglicht.

Im Zuge der Validierung wird das experimentell bestimmte Aktorikverhalten mit der simulativen Vorhersage abgeglichen. Da dieser Validierung die entwickelten Lösungen in den Bereichen Herstellung und Simulation zugrunde liegen, verifiziert die erfolgreiche Validierung die Anwendbarkeit der entwickelten Gesamtmethodik. Eine gute Übereinstimmung kann bei Coupontests für Vordehnungen von bis zu 3 % sowie für teilaktivierte Zustände der SMA-Elemente festgestellt werden.

Um zu verdeutlichen, wieso und unter welchen Randbedingungen der Einsatz aktiver SMA-FKV-Hybridverbunde technisch sinnvoll sein kann, werden verschiedene neuartige Anwendungskonzepte beschrieben. Die wesentlichen Vorteile eines aktiven Hybridverbundes gegenüber klassischer Aktorik-Struktur-Kombinationen werden durch die abschließende Entwicklung eines aerodynamischen Profils als Demonstrator hervorgehoben. Die wichtigsten Vorteile sind:

- Stark reduzierte Bauraumanforderungen
- Geringes Systemgewicht
- Große Designfreiheit
- Geschlossene kontinuierliche Oberfläche
- Geringer Montageaufwand

Der Demonstrator verdeutlicht außerdem, wie es mit den Ergebnissen dieser Arbeit möglich ist, aktive Bauteile aus SMA-FKV-Hybridverbund im Hinblick auf eine konkrete Anwendung systematisch und rechnergestützt auszulegen. Durch die entwickelte Herstellungsmethodik können diese Hybridverbunde mit hoher Leistungsfähigkeit bei minimalem Bauraum und geringer zusätzlicher Masse in reproduzierbarer Qualität gefertigt werden. Neue innovative Funktionen, die sich nicht im Rahmen klassischer Aktorikprinzipien realisieren lassen, werden umsetzbar und ermöglichen signifikante Wertsteigerungen diverser Produkte.

Abstract

The application of fiber reinforced polymers (FRP) offers the possibility to reduce weight compared to design solutions with common metal alloys. However, the full exploitation of the advantages of FRP requires an optimized design and the questioning of established design solutions. Not only the materials and the constructional methods of load carrying structures have to be questioned, but also the common solutions for actuation functions. Classical actuators with discrete connection points can be substituted by advanced solid state actuators as shape memory alloys (SMA) or piezoceramics. The differential structure of FRP allows for a direct integration of active SMA elements. An FRP appropriate actuator principle, which shows material and shell integrated actuation, is developed. Essential unsolved problems of SMA-FRP hybrid structures are analyzed and new approaches are developed within this work, defining the fundamental prerequisites conditions for an industrial application in future products.

To ensure a holistic approach, questions in the field of manufacturing and design have to be answered:

- **Manufacturing:** How to manufacture reliable active hybrid structures with a high reproducibility?
- **Design:** How can active structures be effectively designed on component scale?

The integration method must combine the following functions: force transition between SMA and FRP, electronic connection and handling. This is achieved by means of an innovative approach using material interlocking for force transition between SMA elements and surrounding FRP. A welded SMA grid supported by local fiber reinforcements is able to bear and introduce the required actuator stress. Furthermore, the semi-finished SMA grid ensures a flexible manufacturing process and a reproducible manufacturing result.

Determining optimal process temperatures requires the consideration of complex boundary conditions and, at first glance, the contradictory requirements of established FRP manufacturing processes and the thermal sensitive SMA behavior. As a first step, the thermoset polymer and the SMA grid are brought together in a “cold” (room temperature) curing process, avoiding extensive rigs to suppress the premature contraction of SMA elements. The curing state of the thermoset polymer is improved by an individual adjusted annealing step, finally enabling an increase of tip deflection of the cured hybrid structure in ratio to structure length from 17% to over 60%.

A simulation model of these SMA-FRP hybrid structures applicable for design process of active components the necessary accuracy as well as a high efficiency on component scale. The developed State-Line-Model of the SMA material meets these requirements by focusing on the actuation effect. This allows the prediction of the “heated” and “cooled” state of one- and two-way-effect materials. An application-related actuation characterization captures the influence on the stiffness of the deflected structure. These relations are incorporated in the model via analytic description. Precise values are provided for one two-way-effect material and two one-way-effect materials with different transition temperature and individual pre-strain from 1.8% to 6.3%. Describing the real microscopic geometry is not necessary when modelling the whole hybrid structure with a homogenization to shell elements in the finite element method. This enables to use the model as a design tool in the development of active components.

For validation purposes the actuation behavior in experimental test is compared to the simulative prediction. Since the developed approaches for manufacturing and design form the basis of the validation, the success verifies the applicability of the whole approach. A good conformity is determined with test specimen for actuation pre-strain values up to 3% as well as for partly activated states of SMA elements.

To clarify why and under which boundary conditions the application of active SMA-FRP hybrid structure is technically reasonable, various application concepts are be-

ing illustrated. The essential advantages of active hybrid structure compared to classical actuator-structure combinations are highlighted by the development, manufacturing and testing of an active airfoil. The major advantages are:

- Strongly reduced space requirements
- Low system weight
- High degree of design freedom
- Closed, continuous surface
- Low assembly effort

Furthermore, the active airfoil demonstrates how active components can be systematically and computer-based designed for a specific application. A high performance at minimum size and low additional weight in a reproducible quality is ensured applying the developed manufacturing method. New innovative functions, not possible with classical actuator principles, are now feasible and promise significant additional value for various products.