

Entwicklung Multifunktionaler Werkstoffsysteme mit piezokeramischen Folien im Leitprojekt Adaptronik

Autor: Peter Wierach, DLR/Inst. für Strukturmechanik, Braunschweig

Die Entwicklung adaptiver Strukturen auf Basis piezokeramischer Folien spielt eine zentrale Rolle in der Wertschöpfungskette des Leitprojektes Adaptronik. Ziel des Arbeitspaketes „Folienintegration“ war deshalb die Entwicklung und Charakterisierung multifunktionaler Verbundstrukturen mit sensorischen und aktuatorischen Eigenschaften und die Optimierung der zugehörigen Fertigungstechnologien im Hinblick auf die Herstellung von einfachen Funktionsmustern (Balken/Platte/Rohr) und anwendungsnahen prototypischen Baugruppen. Nach eingehender Analyse der zu Beginn des Projektes von den Industriepartnern aufgestellten Lastenhefte wurden Konzepte für die Integration und Applikation piezokeramischer Folien entwickelt. Bei dem ausgewählten Konzept wird die Piezokeramik zunächst mit einer mechanischen Stabilisierung sowie einer elektrischen Kontaktierung und Isolierung versehen. Das so entstandene handhabbare Funktionsmodul mit definierten elektrischen und mechanischen Randbedingungen wird dann in einem zweiten Schritt auf den Strukturwerkstoff appliziert oder in den Strukturwerkstoff integriert. Die multifunktionalen Werkstoffe werden anschließend umfassend charakterisiert und die zugehörigen Fertigungstechnologien im Hinblick auf die Herstellung von einfachen Funktionsmustern (Balken/Platte/Rohr) und prototypischen Baugruppen optimiert. Während an den Funktionsmustern grundlegende Untersuchungen des adaptronischen Gesamtsystems durchgeführt werden, handelt es sich bei den prototypischen Baugruppen um anwendungsnahe technische Systeme.

Einleitung

Die Entwicklung und Bereitstellung einer Technologie für die Herstellung adaptiver Strukturen auf Basis piezokeramischer Werkstoffe ist ein zentrales Ziel des *Leitprojekt Adaptronik*. Diese Technologie soll neue, adaptive Lösungen für sehr unterschiedliche Anwendungen aus den Bereichen Verkehr, Raumfahrt, Medizintechnik, Maschinen- und Anlagenbau, Ultraschall und Optik ermöglichen.

Voraussetzung für die Entwicklung adaptiver Strukturen sind geeignete multifunktionale Werkstoffsysteme, die lasttragende, sensorische und aktuatorische Eigenschaften in sich vereinen. Erreicht werden diese Eigenschaften durch die Kombination von sensorisch und aktuatorisch wirksamen piezokeramischen Materialien mit lasttragenden Werkstoffen wie z.B. Stahl und CFK. Dies kann zum einen durch Applikation (Stahl) oder durch Integration (CFK) erfolgen.

Neben sehr innovativen piezokeramischen Fasern mit Durchmessern von $\leq 30\mu\text{m}$ [1] und entsprechend hohem Entwicklungsrisiko, liegt auf der Materialseite ein weiterer Schwerpunkt auf der Verwendung *piezokeramischer Folien*. Piezokeramische Folien mit Dicken von 100-200 μm haben sich in der Vergangenheit als geeignete Aktuatoren und Sensoren für adaptive Strukturen bewährt und sind Gegenstand zahlreicher internationaler Forschungsarbeiten auf dem Gebiet adaptiver Systeme. Hinzu kommt, daß sie kommerziell in großen Stückzahlen bei konstanter Qualität

erhältlich sind. Die Entwicklungsarbeit konzentriert sich hier insbesondere auf die anforderungsgerechte Vorbereitung der Keramiken bezüglich Elektrodierung, Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit. Durch diesen zweigleisigen Materialansatz können schon frühzeitig, adaptive Strukturkomponenten für das Projekt bereitgestellt werden. Zusätzlich wird ein direkter Vergleich von Vor- und Nachteilen der Faser- bzw. Folientechnologie ermöglicht.

Nach eingehender Analyse der zu Beginn des Projektes von den Industriepartnern aufgestellten Lastenhefte wurden Konzepte für die Integration und Applikation piezokeramischer Folien entwickelt. Bei dem ausgewählten Konzept wird zunächst die Piezokeramik mit einer mechanischen Stabilisierung sowie einer elektrischen Kontaktierung und Isolierung versehen. Das so entstandene *Funktionsmodul* mit definierten elektrischen und mechanischen Randbedingungen wird dann in einem zweiten Schritt auf den Strukturwerkstoff appliziert oder in den Strukturwerkstoff integriert.

Die multifunktionalen Werkstoffe werden anschließend umfassend charakterisiert und die zugehörigen Fertigungstechnologien im Hinblick auf die Herstellung von einfachen Funktionsmustern (Balken/Platte/Rohr) und prototypischen Baugruppen optimiert. Während an den Funktionsmustern grundlegende Untersuchungen des adaptronischen Gesamtsystems durchgeführt werden, handelt es sich bei den prototypischen Baugruppen um anwendungsnahe technische Systeme.

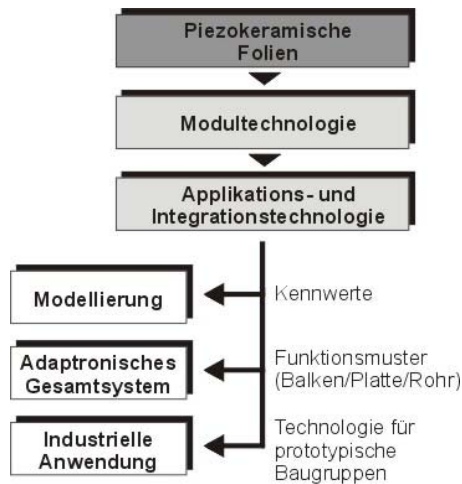


Bild 1: Wertschöpfungskette im Leitprojekt Adaptronik

Mit den am Leitprojekt beteiligten Partnern haben sich Forschungseinrichtungen, Universitäten und Industrieunternehmen zusammengefunden, die den vollständigen Entwicklungsprozeß vom piezokeramischen Grundwerkstoff bis zur Umsetzung in strukturelle Komponenten abdecken. Dadurch ist gewährleistet, daß innerhalb des Leitprojektes entlang der gesamten Wertschöpfungskette Zugriff auf jede Komponente der Technologie besteht (Bild 1). Dies ist eine entscheidende Voraussetzung für eine anwendungsorientierte Ausrichtung der Forschungsarbeit, die bedingt durch die Vielzahl der Anwendungen auf sehr unterschiedliche Anforderungen eingehen muß.

Stand der Technik bei der Verarbeitung piezoelektrischer Werkstoffe für multifunktionale Verbundstrukturen

Aufgrund ihrer Beschaffenheit sind piezokeramische Werkstoffe extrem spröde. Dadurch ist die Handhabung und Weiterverarbeitung von dünnen ($d=200\mu\text{m}$) piezokeramischen Folien mit einem hohen Aufwand und entsprechendem Fertigungsrisiko verbunden. Während Piezokeramiken sehr große Druckbelastungen problemlos ertragen können, sind Zugbelastungen unbedingt zu vermeiden. Dies kann durch die Platzierung der Piezokeramik in ausschließlich druckbelastete Bereiche erfolgen oder durch geeignete konstruktive Maßnahmen, die den piezokeramischen Körper mit einer Druckvorspannung versehen. Neben den Anforderungen die sich aus der mechanischen Beschaffenheit der Piezokeramiken ergeben, kommen weitere elektrische Randbedingungen hinzu. Damit der Werkstoff als elektromechanischer Wandler benutzt werden kann, müssen Elektroden, Kontaktierungen und elektrische Anschlüsse vorgesehen werden. Für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb ist eine ausreichende elektrische Isolierung des Wandlers vorzusehen.

Um eine industriegerechte Weiterverarbeitung der empfindlichen und nur gering belastbaren Piezokeramiken zu ermöglichen, und um Probleme hinsichtlich der Kontaktierung und Isolierung zu lösen, stellt die Kapselung der piezokeramischen Folien inklusive aller erforderlichen Komponenten ein vorteilhaftes Konzept dar. So wurden, basierend auf einer vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelten Technologie, von der US-amerikanischen Firma Active Control Experts (ACX) gekapselte piezokeramische Folienaktoren angeboten, die unter der Bezeichnung QuickPack[®], in größerer Stückzahl vor allem in der Sportgeräteindustrie eingesetzt wurden. Dieses Produkt wird mittlerweile von der US-amerikanischen Firma MIDE vertrieben [2]. Die Kapselung erfolgt hier durch das Verkleben der piezokeramischen Folien zwischen zwei mit Kupferleiterbahnen beschichteten Polyimidfolien. Ein ähnliches, bisher noch nicht vermarktetes Konzept, wurde von der NASA unter dem Namen FlexPatch entwickelt [3].

Alle bisher genannten Aktuatoren sind mit flächigen Elektroden versehen und nutzen den piezoelektrischen Quereffekt (d_{31} -Effekt). Soll der größere d_{33} -Effekt genutzt werden, ist eine deutlich komplexere Elektrodengestaltung erforderlich. In diesem Fall ist die Richtung des elektrischen Feldes identisch mit der Richtung der genutzten Dehnung. Der Längseffekt kann bei gleicher Feldstärke deutlich höhere aktive Dehnungen erzeugen. Die hierfür erforderlichen Elektroden bestehen aus zwei ineinander greifenden Elektrodenkämmen mit jeweils positivem und negativem Potential. Diese Elektroden werden als Interdigital Elektroden (IDE-Elektroden) bezeichnet. Bild 2 veranschaulicht den prinzipiellen Elektrodenaufbau.

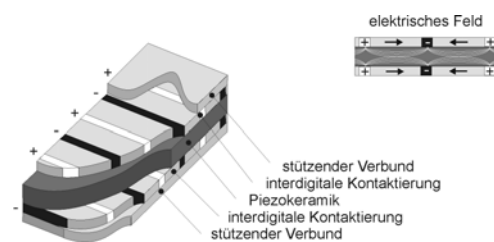


Bild 2: PZT-Folie mit IDE-Elektrode

Bei dieser Konfiguration entstehen jedoch sehr inhomogene elektrische Felder, die zu einer inhomogenen elektromechanischen Belastung des piezokeramischen Werkstoffes führen und bei monolithischen Folien Probleme hinsichtlich der Dauerfestigkeit hervorrufen. Eine Lösung für dieses Problem kann durch die Verwendung von piezokeramischen Fasern oder Streifen gefunden werden, die in eine duktile Matrix eingebettet sind. Risse breiten sich somit nicht durch den gesamten keramischen Körper aus, sondern werden an jedem Übergang zwischen Keramik und

Matrix gestoppt. Die Herstellung multifunktionaler Werkstoffsysteme auf Basis piezokeramischer Fasern wurde Leitprojekt intensiv bearbeitet und kann in [4] nachgelesen werden. International sind vor allem vom MIT richtungsweisende Arbeiten bei der Entwicklung von Aktuatoren auf Basis piezokeramischer Fasern durchgeführt worden [5]. Kommerzielle Einsatzgebiete finden sich auch hier wieder in der Sportgeräteindustrie [6]. Bezugsquelle für diese Aktuatoren ist die US-amerikanische Firma MSI [7]. Um die Kontaktfläche zwischen den Elektroden und dem piezokeramischen Werkstoff zu erhöhen, kommen mittlerweile Fasern mit einem rechteckigen Querschnitt zum Einsatz. Dadurch wird eine bessere Einkopplung des elektrischen Feldes gewährleistet und die Leistungsfähigkeit erhöht.

Alternativ zu den piezoelektrischen Fasern wurden von der NASA Aktuatoren auf Basis gesägter piezokeramischer Folien entwickelt [8]. Der prinzipielle Aufbau dieser Aktuatoren ist in Bild 3 dargestellt. Ein entscheidender Vorteil dieser Bauweise liegt in einer deutlich verbesserten Fertigungsqualität, wodurch auch eine verbesserte Reproduzierbarkeit der aktuatorischen Eigenschaften im Vergleich zu faserbasierten Aktuatoren erreicht werden konnte. Die dünnen Streifen (typische Breite $200\mu\text{m}$) werden mit Hilfe von Wafersägen, die in der Halbleiterindustrie zum Einsatz kommen, aus monolithischen Folien herausgetrennt und im gleichen Fertigungsschritt auf einem Substrat ausgerichtet. Bei den verwendeten Folien handelt es sich um Standardkomponenten, wodurch dieses Verfahren z.Zt. auch Kostenvorteile bietet. Kommerzielle Bezugsquelle für diese Aktuatoren ist die Firma Smart Material [9].

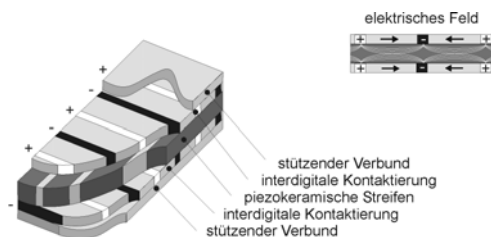


Bild 3: Aufbau eines Aktuators mit piezokeramischen Streifen

Ein Nachteil von Aktuatoren mit IDE-Elektroden sind die sehr hohen Steuerspannungen. Die Abstände der Elektrodenkämme können aufgrund der zuvor beschriebenen Problematik der inhomogenen elektrischen Felder nicht beliebig klein gewählt werden. Bestimmend für die aktive Dehnung der Piezokeramik ist jedoch die anliegende elektrische Feldstärke, und diese ist umgekehrt proportional zum Elektrodenabstand. Für Fasern mit einem Durchmesser von $200\mu\text{m}$ ergibt sich ein optimaler Elektrodenabstand von ca. 1mm. Dieses Optimum stellt einen Kompromiss zwischen Homogenität des elektrischen Feldes und erforderlicher Ansteuerspannung zur Erzeugung

des elektrischen Feldes dar. Für die Erzeugung einer Feldstärke von 1kV/mm sind somit 1000V erforderlich. Ein vergleichbarer Folienaktor benötigt unter Ausnutzung des Quereffektes 200V für die gleiche Feldstärke und erreicht somit trotz des geringeren d_{31} -Effektes die Hälfte der aktiven Dehnung des d_{33} -Wandlers. Die pro Volt erreichbare Dehnung liegt bei d_{31} -Wandlern etwa doppelt so hoch wie bei d_{33} -Wandlern, wobei d_{33} -Wandler bei entsprechend hohen Betriebsspannungen absolut höhere Dehnungen erreichen können.

Der entscheidende Vorteil piezokeramischer Fasern oder Streifen ergibt sich aus ihrer anisotropen Wirkungsweise. Im Vergleich zu Folien, die sich in alle Richtungen gleichermaßen dehnen, ist die aktive Wirkung von Fasern gerichtet. Dadurch lassen sich Bauweisen für aktive Strukturen realisieren, die gezielt nur in eine Richtung aktiviert werden können.

Entwicklung von Funktionsmodulen im Leitprojekt Adaptronik

Motiviert durch Forderungen aus dem Anwenderbereich sollten im Leitprojekt Adaptronik Aktoren mit verbesserten Leistungsparametern unter Berücksichtigung einer materialspezifischen Anpassung der Komponenten im Sinne eines kompatiblen Werkstoffsystems (Keramik, Kontaktierung, Isolation, lasttragende Werkstoffe) entwickelt werden. Im Hinblick auf die Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen wird unmittelbar deutlich, daß es keine standardisierte Lösung für jedes Problem geben kann. Ziel muß es daher sein ein *modulares Fertigungskonzept* aufzubauen, daß es ermöglicht durch eine Anpassung der Komponenten schnell und flexibel eine problemangepaßte Lösung bereitzustellen.

Im Leitprojekt Adaptronik wurde deshalb eine neue modulare Technologie zur Einbettung piezokeramischer Folien in Polymere entwickelt. Die so entstandenen Wandlerelemente werden als Funktionsmodule bezeichnet und können durch Variation der einzelnen Komponenten aufgabengerecht angepaßt werden:

- Auswahl des piezokeramische Materials
- Gestaltung und Material der Elektrodierung
- Geometrie der Piezokeramik
- Auswahl des Isolationswerkstoffes
- Beeinflussung der Oberflächenbeschaffenheit
- Gestaltung der elektrischen Anschlüsse

Durch die Einbettung in das Polymer wird die Keramik mit einer mechanischen Stabilisierung und einer elektrischen Isolierung versehen. Die Funktionsmodule beinhalten weiterhin die elektrische Kontaktierung und die elektrischen An-

schlüsse. Bild 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Elementes. Für den Aufbau eines Funktionsmoduls werden kommerziell erhältliche piezokeramische Folien (Sonox P53 von CeramTec) mit standardmäßigen Abmessungen von $50 \times 25 \times 0,2 \text{ mm}^3$ verwendet. Diese Folien sind beidseitig mit vollflächig gesputterten Metallisierungsschichten (Dicke wenige μm) versehen. Durch diese Art der Elektrodierung wird der piezoelektrische Quereffekt (d_{31}) genutzt.

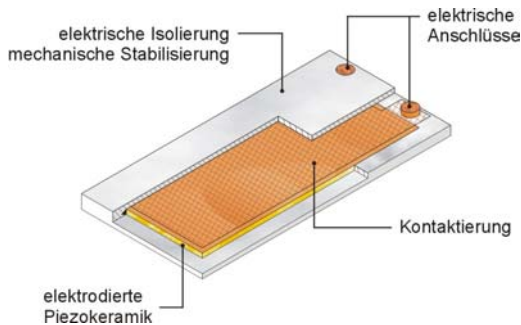


Bild 4: prinzipieller Aufbau eines Funktionsmoduls unter Nutzung des d_{31} -Effektes

Für die im Leitprojekt entwickelten Funktionsmodule wird zur Kontaktierung der vollflächigen Elektrode ein dünnes Metallnetz verwendet, das die Elektrode vollständig abdeckt. Durch die vollständige Abdeckung der Keramik wird gewährleistet, daß im Falle einer Überbelastung des Moduls, die zum Bruch der Keramik führt, alle Bruchstücke weiterhin angesteuert werden können. Somit kann selbst im Schadensfall das Funktionsmodul mit nahezu gleichbleibender Performance betrieben werden. Die Dauerfestigkeitseigenschaften des Wandlers werden durch die elastische Ausführung der Kontaktierung verbessert, da der Übergang vom aktiven zum passiven Bereich anfällig für die Entstehung von Rissen in den elektrischen Anschlußleitungen ist.

Die Piezokeramik und die Kontaktierung sind mit einer isolierenden Bettungsmasse umgeben. Diese Bettungsmasse schützt die empfindliche piezokeramische Folie vor äußeren Einflüssen und gewährleistet die Dehnungsübertragung von der Keramik auf die Struktur. Die Ausbreitung von Mikrorissen in der spröden Piezokeramik wird durch die duktile Bettungsmasse behindert wodurch die Dauerfestigkeitseigenschaften zusätzlich verbessert werden. Die während der Herstellung des Funktionsmoduls stattfindende Aushärtung der Bettungsmasse erfolgt bei hoher Temperatur (120°C). Der thermische Ausdehnungskoeffizient der Bettungsmasse liegt über dem der Keramik, so daß sich eine mechanische Druckvorspannung der Keramik beim Abkühlungsvorgang einstellt. Dadurch ist die eingebettete Keramik in der Lage Zugbelastungen zu ertragen. Versuche haben gezeigt, das Bruchdehnungen von durchschnittlich 0,44% erreicht werden können

ohne das ein Performanceverlust des Funktionsmoduls beobachtet werden konnte [10].

Stichpunktartig sind die Vorteile der Kapselung der Piezokeramiken aufgelistet:

- Schutz der spröden Piezokeramik vor äußeren Belastungen (z.B. Feuchtigkeit)
- Verbesserte Handhabbarkeit
- Definierte mechanische und elektrische Randbedingungen
- Druckvorspannung der Piezokeramik durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der Bettungsmasse und der Piezokeramik
- Hohe Schadenstoleranz durch vollständige Abdeckung der Elektrode
- Erhöhte Lebensdauer durch elastische Kontaktierung
- Behinderung von Rißausbreitung in der Keramik; dadurch größere passive Verformungen möglich; erhöhte Lebensdauer
- Modulare Ausrichtung der Technologie und damit große Flexibilität im Anwendungsbeereich

Herstellung der Funktionsmodule

Die Herstellung der Funktionsmodule erfolgt auf Basis des im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelten DP-RTM-Verfahren (Differential-Pressure-Resin-Transfer-Moulding-Verfahren) [11]. Dieses Verfahren ermöglicht die Verwendung beliebiger Fasermaterialien und eine optimale Einstellung der einzelnen Prozessparameter wie Druck, Temperatur und Fließgeschwindigkeit der Matrix. Dies ist insbesondere für die Verarbeitung der empfindlichen piezokeramischen Bauelemente von entscheidender Bedeutung. Beim DP-RTM-Verfahren wird das trockene Fasermaterial in eine Injektionsform mit den Konturen des späteren Bauteils gebracht. Im Vergleich zum konventionellen RTM-Verfahren kann jedoch auf die massiven und druckfesten Formen verzichtet werden, da die Schließkräfte nicht mechanisch durch das Werkzeug, sondern in einem Autoklaven durch einen Differenzdruck aufgebracht werden. Das Werkzeug kann als einfache Blechkonstruktion ausgelegt sein, da diese nur durch das Eigengewicht des Bauteils belastet und nicht wie beim herkömmlichen RTM-Verfahren durch den Injektionsdruck beansprucht wird. Anschließend wird das Bauteil durch eine flexible Oberform vakuumdicht abgeschlossen. Als flexible Oberform kann im einfachsten Fall eine Vakuumfolie dienen. Dadurch ist die mechanische Belastung der spröden Piezokeramik gering (z.B. im Vergleich zu Pressverfahren) und das Risiko fertigungsbedingter Schädigungen minimiert.

Das Funktionsmodul besteht aus der piezokeramischen Folie, Polyestervliesschichten zur elektrischen Isolation, den Kontaktierungsstrukturen aus Kupfermesh und aus der Bettungsmatrix (Bild 5.a-5.d). Diese Komponenten müssen vor dem eigentlichen Herstellungsprozess vorbereitet und zugeschnitten werden.



Bild 5.a: Cu-Mesh (Kontaktierung)



Bild 5.b: Polyestervlies (Isolierung)



Bild 5.c: Fixierte und strukturierte Kontaktierung



Bild 5.d: Zwischenlagen

Bild 6 zeigt den Lagenaufbau für die Fertigung von vier Modulen. Im Hinblick auf die Produktivität des Herstellungsprozesses werden mehrere Module gleichzeitig angefertigt und nach der Aushärtung des Matrixmaterials vereinzelt. In Bild 7 ist ein für die Technologieentwicklung verwendetes Standardmodul beispielhaft dargestellt. Deutlich wird auch die Flexibilität der Piezokeramik, die sie durch die Einbettung in ein Polymer erhält.

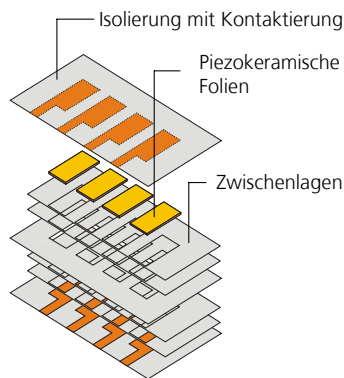


Bild 6: Lagenaufbau bei der Fertigung der Funktionsmodule

Im Rahmen des Projektes wurden vom Projektpartner Panacol Einkomponenten-Vergussmassen entwickelt und qualifiziert. Durch die Reduzierung der Aushärtezeiten (30min) im Vergleich zu kommerziellen Vergussmassen (12h) wurde eine deutliche Steigerung der Produktivität bei der Herstellung der Funktionsmodule erreicht, was insbesondere für die Serientauglichkeit des Verfahrens von großer Bedeutung ist.

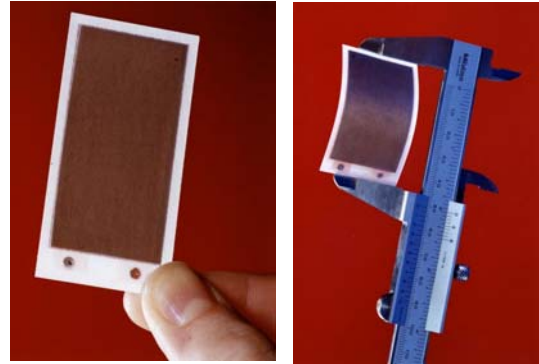


Bild 7: Standardmodul

Aktuatorische und Mechanische Kennwerte der Funktionsmodule

Die aktuatorischen Eigenschaften der Funktionsmodule werden in erster Linie durch die Leistungsfähigkeit der verwendeten Piezokeramik bestimmt. Für die folgenden Untersuchungen wurden ausschließlich Keramiken der Fa. CeramTec vom Typ Sonox P53 (Abmessungen $50 \times 25 \times 0,2 \text{ mm}^3$). Dabei handelt es sich um eine Keramik mit hohem Kopplungsfaktor und hoher piezoelektrischer Konstante, wodurch sich diese Keramik als Werkstoff für aktuatorische Anwendungen eignet.

Freie Dehnung

Zur Bestimmung der freien Dehnung wurden standardmäßige Funktionsmodule mit Dehnungsmessstreifen bestückt. Die Ansteuerung der Aktuatoren erfolgte quasistatisch mit einer Dreiecksspannung von 0,1Hz und einer Amplitude von 200V bzw. 400V. Die gemessenen Dehnungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Steuerspannung [V]	Max. Auslenkung	
	200V	219,5
Mittelwert [μm]	219,5	368
Std. Abw. [μm]	9,2	9,9
Std. Abw. [%]	4,2	2,7

Tabelle 1: Freie Dehnungen

Blockierkräfte

Die Blockierkräfte wurden mit Probenkörper bestimmt, die in Bild 8 schematisch dargestellt sind. An das Funktionsmodul wurden zusätzliche

Aufleimer angebracht, die zur Kräfteinleitung dienen und eine Beschädigung der Keramik beim Einspannen der Probe in die Prüfmaschine verhindern. Zur Aufnahme von Längs- und Querdehnungen wurden zwei Dehnungsmessstreifen in der Mitte der Probe angebracht.

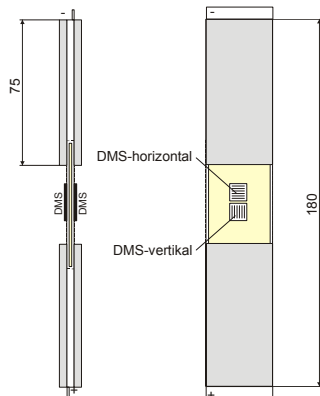


Bild 8: Probenkörper

Die Funktionsmodule wurden dann an beiden Enden fest in eine Zugprüfmaschine eingespannt. Die Ansteuerung der Piezokeramik erfolgte Analog zur Messung der freien Dehnung. Die Keramik zieht sich bei Anlegen einer Spannung entsprechend dem d31-Effekt zusammen und übt auf die Einspannung der Zugprüfmaschine eine Kraft aus. Da die Probe in ihrer Kontraktion behindert wird handelt es sich dabei annähernd um die Blockierkraft. Die Verformungen der Prüfmaschine wurden aufgrund der vergleichsweise geringen Kräfte vernachlässigt.

	Blockierkräfte bei verschiedenen Steuerspg.			
Steuerspg.	50V	100V	150V	200V
Mittelwert [N]	12,47	26,48	40,00	52,47
Std.Abw [N]	0,99	1,54	2,43	3,35
Std.Abw [%]	7,95	5,80	6,08	6,38

Tabelle 2: Blockierkräfte

Mechanische Kennwerte

Die Bestimmung der mechanischen Kennwerte des Funktionsmoduls erfolgte in einem Zugversuch. Für die Untersuchungen wurden die Probenkörper verwendet, mit denen zuvor die Blockierkräfte bestimmt wurden. Während des Belastungsvorgangs wurden die von den DMS gemessenen Dehnungen in Längs- und Querrichtung aufgezeichnet. Das Sensorsignal der Piezokeramik wurde durch einen geeigneten Ladungsverstärker aufbereitet und als Spannungssignal ebenfalls aufgezeichnet. Um den Einfluss des elektrischen Zustandes der Piezokeramik untersuchen zu können wurde der Versuch bei offener und kurzgeschlossener Elektrode durchgeführt. Die Ergebnisse des Zugversuchs sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

	E-Modul kurz	E-Modul offen
Mittelwert [GPa]	19,02	22,30
Std.Abw. [GPa]	2,90	3,02
Std.Abw. [%]	15,23	13,53

Tabelle 3: E-Modul

Für eine spätere Auslegung adaptiver Strukturen ist es unbedingt erforderlich neben den elastischen Kennwerten, auch Aussagen über die Festigkeit der Funktionsmodule machen zu können. Hierfür wurden die Proben bis zum Bruch belastet. Betrachtet man den in Bild 9 dargestellten Verlauf des piezokeramischen Signals über der Dehnung, so ist keine Unstetigkeit im Spannungsverlauf bis zum Bruch der Probe zu erkennen. Das Versagen der Probe wird weder durch eine mechanische Depolarisation, noch durch ein Bruch der Keramik im Laminat angekündigt.

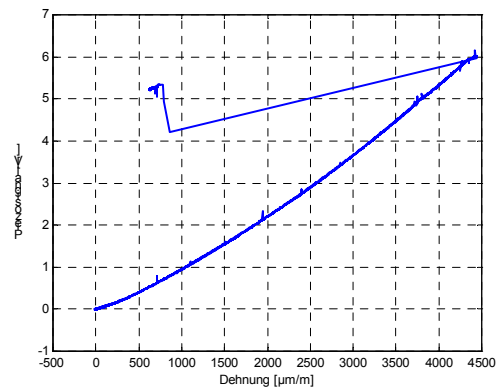


Bild 9: Beispiel einer Signal-Dehnungskurve bis zum Bruch

	Bruchkraft [N]	Bruchspg. [MPa]	Bruchdehn. [%]
Mittelwert	639,12	37,82	0,44
Std.Abw.	40,89	5,31	-
Std.Abw. [%]	6,4	14,04	-

Tabelle 4: Ergebnisse des Bruchversuchs

Aufbau und Charakterisierung der multifunktionalen Materialsysteme

Der Aufbau des multifunktionalen Materialsystems erfolgt durch Applikation bzw. Integration der Funktionsmodule als aktuatorische und sensorische Komponenten auf bzw. in einen Strukturwerkstoff. Für die Entwicklung der Applikations- und Integrationstechnologie wurden drei verschiedene Strukturwerkstoffe ausgewählt:

- Verzinkter Stahl (nur Applikation)
- CFK/DP-RTM (Applikation und Integration)
- CFK/Prepreg (Applikation und Integration)

Für die Herstellung der Kohlenstoffaserlaminat kamen das Pregpreg- und das DP-RTM-Verfahren zum Einsatz.

Für die Entwicklung und Bewertung der Technologie zur Applikation und Integration der Funktionsmodule wurde ein Versuchsprogramm mit folgenden Zielen definiert:

- Experimentelle Untersuchung des festigkeitsmindernden Einflusses von in CFK integrierten Funktionsmodulen auf Basis piezokeramischer Folien in Abhängigkeit von der für die Integration gewählten geometrischen Konfiguration.
- Bestimmung der Bruchdehnung integrierter Funktionsmodule
- Bereitstellung einer Datenbasis bestehend aus Versagenslasten und Versagensmustern zur Validierung entsprechender Berechnungsverfahren
- Bewertung des Arbeitsvermögens der verschiedenen Konfigurationen anhand von Arbeitsdiagrammen

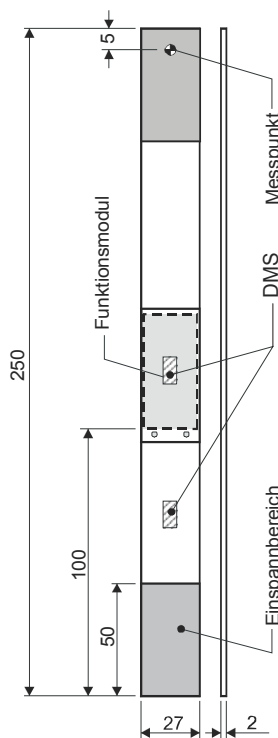


Bild 10: Probenkörper zur Untersuchung integrierter Funktionsmodule

Die Versuche wurden mit Probenkörper entsprechend des in Bild 10 dargestellten Aufbaus durchgeführt. Alle Probenkörpertypen enthalten ein asymmetrisch integriertes Funktionsmodul mit zwei Decklagen über dem Funktionsmodul. Jeder Probenkörper wurde mit 4 Dehnungsmessstreifen zur Erfassung der Dehnung im Nahbereich des integrierten Funktionsmoduls bzw. zur Kompensation von Biegedehnungen versehen. Weiterhin

wurde ein Satz Referenzproben ohne Funktionsmodule vorgesehen.

Für die Proben wurde ein quasiisotroper Lagenaufbau gewählt $[0/+45/90/-45]_2$. Die Integration der Funktionsmodule erfolgt abgestimmt auf die Dicke der Funktionsmodule in drei verschiedenen geometrischen Konfiguration (Bild 11a-c).

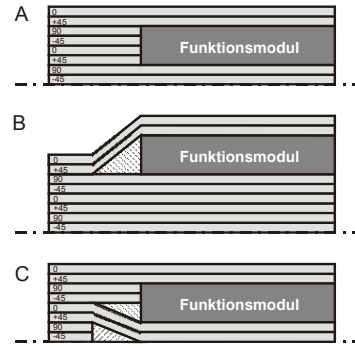


Bild 11: Variation des Lagenaufbaus bei der Einbettung der Funktionsmodule in CFK

- Integration in einen Ausschnitt (Bild 11-A)
- Kein Lage durchtrennt (Bild 11-B)
- Integration in einen partiellen Ausschnitt (Bild 11-C)

Arbeitsvermögen integrierter und applizierter Funktionsmodule

Bevor die zerstörende Prüfung in der Zugprüfmaschine durchgeführt wurde, wurden die Arbeitsdiagramme der Probenkörper bestimmt. Zur Bewertung des Arbeitsvermögens unter dem Einfluss unterschiedlicher Integrationskonfigurationen wurden die maximale Auslenkung und Kraft eines einseitig Fest eingespannten Probenkörpers mittels eines Lasertriangulators und einer Wägezelle an einem Messpunkt in 5 mm Entfernung vom freien Ende erfasst (Bimorph). Die Einspannlänge betrug 50 mm. Die Ansteuerung des Funktionsmoduls erfolgte quasistatisch mit einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Ansteuerspannung von -60V bis 200V. Für jede Messung wurden fünf Zyklen durchfahren und die zugehörigen Werte aufgezeichnet (Bild 12).

Im Vergleich zu applizierten Funktionsmodulen weisen die integrierten Funktionsmodule aufgrund des geringeren Abstands von der neutralen Faser des Probenkörpers ein geringeres Arbeitsvermögen auf. Während die Integrationsvarianten „partieller Ausschnitt“ und „ganzer Ausschnitt“ ähnliche Eigenschaften aufweisen, zeigt die Variante „keine Lage durchtrennt“ ein deutlich geringeres Arbeitsvermögen. Bei der letztgenannten Konfiguration konnte auch eine große Streuung zwischen den Proben festgestellt werden.

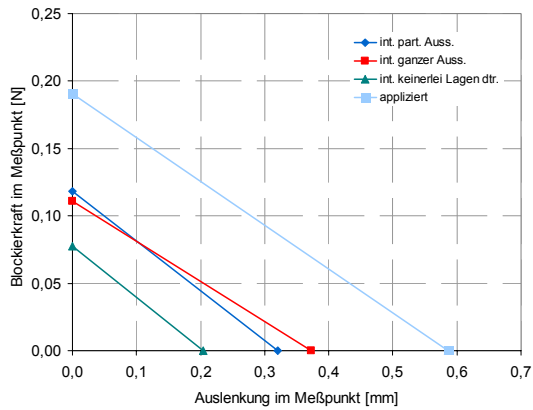


Bild 12: Arbeitsdiagramme (Bimorph) der verschiedenen Integrationskonfiguration im Vergleich zu applizierten Funktionsmodulen

Ergänzend wurden Untersuchungen mit jeweils einer Probe jeder Konfiguration durchgeführt, die in einer Zug-Prüfmaschine bis zu einem Wert von durchschnittlich $2600\mu\text{m/m}$ gedehnt wurden. Mit diesen Proben wurde anschließend eine erneute Messung des Arbeitsdiagramms durchgeführt. Es

konnten auch nach der Vorbelastung die gleichen Dehnungs- und Blockierkraftwerte erreicht werden. Es hat sich ebenfalls gezeigt, dass die Messungen gut reproduzierbar waren.

Experimentelle Untersuchung des festigkeitsmindernden Einflusses von in CFK integrierten Funktionsmodulen

Um den Festigkeitsmindernden Einfluss von in CFK integrierten Funktionsmodulen zu untersuchen, wurden die Probenkörper in eine Zugprüfmaschine eingespannt und bis zum Versagen belastet.

In Bild 13 sind beispielhaft die Daten dargestellt, die während des Zugversuchs an einer Probe aufgezeichnet wurden. Die Integration des Funktionsmoduls erfolgte bei dieser Probe entsprechend der Konfiguration „keine Lage durchtrennt“ (Bild 11-B).

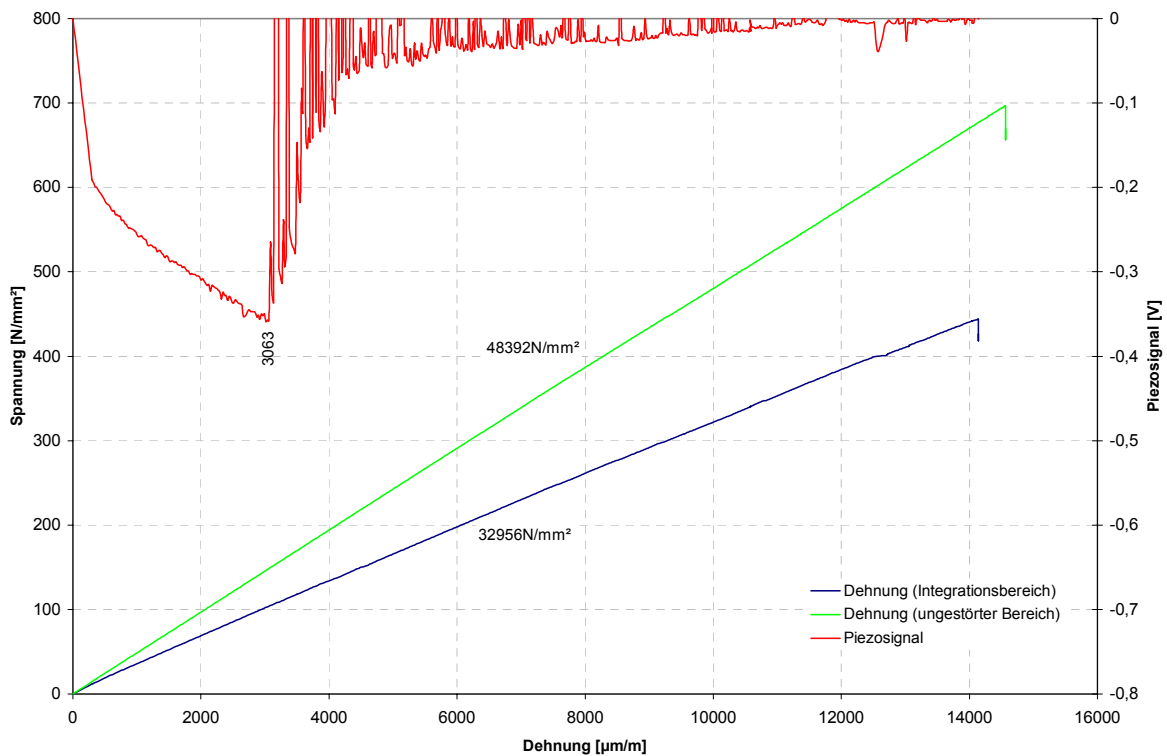


Bild 13: Spannungs- Dehnungskurve und Piezosignal- Dehnungskurve im Zugversuch

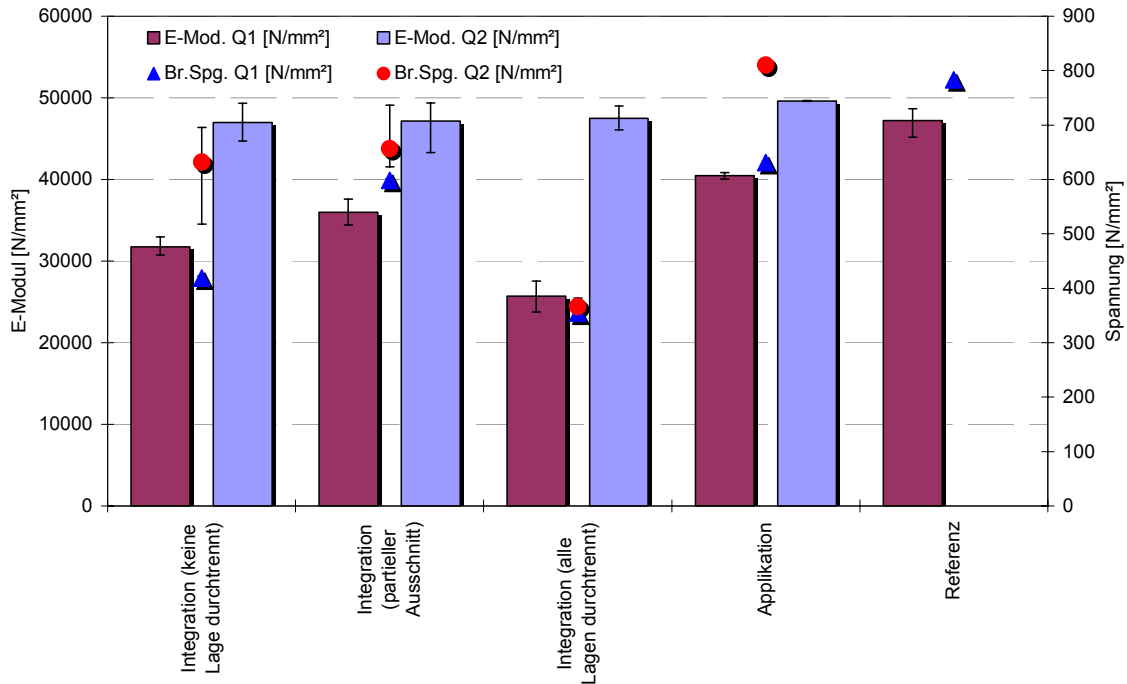


Bild 14: Ergebnis des Zugversuchs für verschiedene Integrationsvarianten

Auf der linken Ordinate im Diagramm in Bild 13 ist die Spannung in N/mm^2 aufgetragen. Für die zwei untersuchten Querschnitte wurde die Spannung aus der zuvor gemessenen Fläche im jeweiligen Querschnitt und der Prüfkraft berechnet. Die Steigung der aufgetragenen Spannungs-Dehnungskurve gibt den E-Modul im betrachteten Querschnitt wieder. Die Bruchdehnung der Probenkörper konnte in der Regel nicht bestimmt werden, da die DMS vor Erreichen der Bruchdehnung versagten.

Bild 14 fasst die Ergebnisse des Zugversuchs zusammen. Es sind jeweils die Bruchspannung und das E-Modul für beide Querschnitte dargestellt. Gegenüber der Referenzprobe ergeben sich deutlich reduzierte Werte für E-Modul und Bruchspannung im Querschnitt 1. Erwartungsgemäß schneidet die Konfiguration in der alle Lagen durchtrennt wurden am schlechtesten ab. Die besten Ergebnisse erzielt die Konfiguration „Integration in partiellen Ausschnitt“, bei der die in Zugrichtung lasttragenden 0-Gradlagen intakt geblieben sind, obwohl auch in dieser Konfiguration insgesamt vier Lagen durchtrennt wurden. Die Konfiguration, bei der keine Lage durchtrennt wurde erreicht ebenfalls geringere Werte. Durch die große Aufdickung der Proben, verursacht durch die eingebetteten Funktionsmodule, haben sich an den Rändern der Module große Harztaschen ausgebildet. Dadurch wurden auch die C-Fasern in diesem Bereich stark umgelenkt. Während der Belastung konnte beobachtet werden, dass das Versagen des Bauteils durch Risse initiiert wurde, die sich um diese Harztaschen gebildet haben. Bei den beiden anderen Konfigurationen

war eine solch eindeutige Zuordnung nicht möglich.

Bruchdehnung integrierter Funktionsmodule

Ein weiteres, wichtiges Kriterium für die Auslegung multifunktionaler Verbundstrukturen ist die Belastbarkeit des integrierten Funktionsmoduls. Bedingt durch die spröde Keramik ist an dieser Stelle schon sehr viel früher mit einem Versagen zu rechnen. Um hierüber Aussagen treffen zu können, wurde während des Zugversuchs das Sensorsignal der Piezokeramik aufgezeichnet. In dem Diagramm in Bild 13 ist der Verlauf des Sensorsignals über Dehnung für eine Probe dargestellt. Ein Versagen des Funktionsmoduls wird durch Diskontinuitäten im Sensorsignal angezeigt. Die höchsten Bruchdehnungswerte für integrierte Module werden für die Konfiguration „Integration in partiellen Ausschnitt“ erreicht. Die Abweichungen zwischen den verschiedenen Integrationskonfigurationen sind jedoch nicht sehr groß und liegen zwischen 0,23% und 0,26%. Geringfügig höhere Bruchdehnungen werden für applizierte Funktionsmodule erreicht 0,28%. Eine Ursache für die gemessenen Schwankungen der Bruchdehnungswerte können neben dem unterschiedlichen Aufbau der Proben auch auf Ungenauigkeiten bei der Fertigung der Probenkörper sein.

Bei Vergleich der Bruchdehnungswerte der integrierten bzw. applizierten Funktionsmodule (im Mittel 0,26%) mit der Bruchdehnung des reinen Funktionsmoduls (0,44%; siehe [10]), fällt der deutliche Unterschied auf. Die Ursachen hierfür

liegen wahrscheinlich in der unterschiedlichen Art der Krafteinleitung in das Funktionsmodul. Während bei den Zugversuchen mit dem reinen Funktionsmodul die Krafteinleitung über zwei an den Modulenden aufgebrachtene Aufklebern erfolgte und die Dehnung direkt am Funktionsmodul gemessen wurde, handelt es sich bei den applizierten/integrierten Funktionsmodulen, um ein flächige Krafteinleitung, die über Klebschichten erfolgt. Weiterhin wird bei den integrierten Modulen die Dehnung nicht am Modul selbst, sondern an den außenliegenden CFK-Schichten gemessen. Für eine endgültige Klärung dieser Problematik sollten jedoch weitere Modellrechnungen durchgeführt werden.

Prototypische Baugruppen

Der Einsatz der Technologie auf prototypische Baugruppen ist der letzte Schritt innerhalb der Wertschöpfungskette des Leitprojekts. Während zuvor grundlegende Fragen für ein breites Anwendungsspektrum betrachtet wurden, rückt hier die anwendungsspezifische Anpassung der Technologie ins Zentrum. Im folgenden sollen kurz einige Anwendungsbeispiele für prototypische Baugruppen vorgestellt werden, die mit Hilfe der im Leitprojekt Adaptronik entwickelten Funktionsmodule auf Basis piezokeramischer Folien aufgebaut wurden.

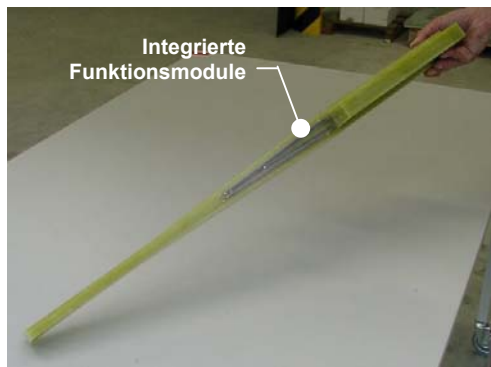


Bild 15: Adaptive Blattfeder mit integrierten Funktionsmodulen

Für den Bau einer adaptiven Blattfeder [12] wurden komplexe Funktionsmodule zur Erhöhung des Schwingungskomforts in Zügen entwickelt. Bei diesen Funktionsmodulen wurden die Piezokeramikfolien in vier Lagen zweireihig und je nach Modultyp mit zwei oder drei Keramikfolien hintereinander aufgebaut sind. Es wurden 8 Module mit insgesamt 176 Keramikfolien bereitgestellt. Die Abmessungen der einzelnen Keramiken betragen jeweils $70 \times 25 \times 0,3 \text{ mm}^3$. Diese große Menge an aktuatorischem Material war notwendig, um eine Verformung der steifen Blattfeder unter den auftretenden Lasten zu ermöglichen (Bild 15).

Weiterhin wurden spezielle Module für hochgenaue Formkontrolle an einem adaptiven Satellitenreflektor entwickelt [13].

Durch die geometrische Gestaltung der Funktionsmodule kann eine sehr hohe Bedeckung der Reflektoroberfläche mit aktuatorisch wirksamen Material verwirklicht werden. Begrenzt werden die Gestaltungsmöglichkeiten bei der Formgebung durch die maximalen Abmessungen der verfügbaren Rohkeramiken, die bei $50 \times 50 \text{ mm}^2$ liegen. Obwohl der Reflektor eine leichte sphärische Krümmung aufweist, wurde darauf verzichtet entsprechend vorgekrümmte Module herzustellen. Dies hätte einen enormen Mehraufwand bei der Sinterung der Keramiken und der Herstellung der Module zur Folge gehabt. Versuche haben jedoch gezeigt, dass es durchaus möglich ist, auch sphärisch gekrümmte Oberflächen mit ebenen Modulen zu versehen ohne dass die Keramik geschädigt, oder die Funktion beeinträchtigt wird (Bild 16).

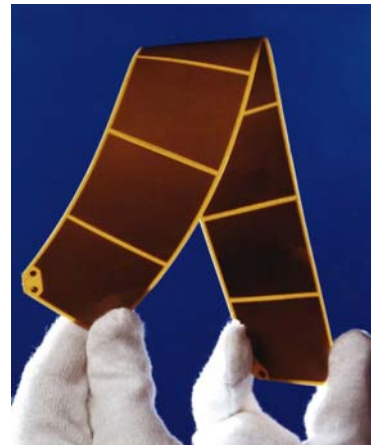


Bild 16: oben: Spezielles Funktionsmodul für den adaptiven Reflektor; unten: 36 Segmente für eine Deckschicht des adaptiven Reflektors

Neben der Anfertigung spezieller Module, wurden mit dem Ziel der aktiven Lärmreduktion Standardmodule auf ein PKW Dachblech bzw. eine Verkleidungskomponente eines Magnetresonanztomographen appliziert [14, 15]. Die Bilder 17 und 18 zeigen das Dach einer Bora Karosserie bzw. die MRT Verkleidung mit applizierten Funktionsmodulen. Zur Erhöhung der aktorischen Wirkung wurden die Aktormodule doppellagig, d.h. mit zwei übereinanderliegenden Folien aufgebaut, die gleichsinnig angesteuert werden.



Bild 17: Verkleidungskomponente eines MRT mit applizierten Funktionsmodulen



Bild 18: PKW-Dachblech mit applizierten Funktionsmodulen

Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte eine modulare Technologie zur Kapselung piezokeramischer Folien entwickelt werden, die sich durch vielfältige Anpassungsmöglichkeiten auszeichnet. Auf Basis dieser Technologie wurde eine Applikations bzw. Integrationstechnologie entwickelt. Damit konnte auch die Versorgung des Projektes mit Funktionsmustern (Balken, Platte, Rohr) für weitergehende Untersuchungen des adaptronischen Gesamtsystems im Zusammenspiel mit verschiedenen Regelungsstrategien sichergestellt werden. Mit der Bereitstellung spezieller Funktionsmodule für verschiedene prototypische Baugruppen ist der erste Schritt unternommen worden diese Technologie in den Anwendungsbereich zu übertragen.

Danksagung

Der Autor bedankt sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und für die ausge-

zeichnete Zusammenarbeit mit den Partnern DaimlerChrysler F&T, EADS Dornier, Volkswagen, Panacol-Elosol, Invent GmbH, Fraunhofergesellschaft, Uni-Magdeburg und TU-Dresden im Arbeitspaket „Folienintegration“ im Leitprojekt Adaptronik.

Literatur

1. K.Pannkoke, *Strukturkonform integrierbare Funktionsmodule auf der Basis von PZT-Fasern*“, AC 1999, S.169-174, Potsdam, 1998
2. <http://www.mide.com>
3. G. Horner, *Smart Actuator Research*, Adaptronic Congress 2001, Berlin, 2001
4. T. Gesang, *Herstellung und Eigenschaften aktorischer Fasermodule*, Adaptronic Congress 2003, Wolfsburg, 2003
5. A. Bent, N.W Hagood, *Piezoelectric Fiber Composites with Interdigitated Electrodes*, J. of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 8, No. 11, pp 903-919, Nov. 1997.
6. <http://www.head.com>
7. <http://www.matsysinc.com>
8. K. Wilkie, R. G. Bryant, J. W. High, J. A. Ligman, *Free strain electromechanical characterization of the NASA macrofiber composite piezoceramic actuator*; SPIE 2001, Vol. 4333, New Port Beach, 2001
9. <http://www.smart-material.com>
10. P.Wierach, H.C. Goetting, A. Schönecker, „*Development of Encapsulated PZT.Patches for Adaptive Structures*“, Adaptronic Congress 2000, S. 91-95, Potsdam, 2000
11. M.Kleineberg, A. Pabsch, C. Siegle, „*Ermittlung und Charakterisierung der Prozessparameter eines weiterentwickelten RTM-Verfahrens*“, DLR-Braunschweig, IB 131-95/34, 1995
12. W. Martin, *Aktive Schwingungsdämpfung am Beispiel eines Drehgestells von Hochgeschwindigkeits Schienenfahrzeugen*, Adaptronic Congress 2003, Wolfsburg, 2003
13. J.K. Dürr, *Entwicklung eines adaptiven Leitbauspiegels für orbitale Anwendungen*, Adaptronic Congress 2003, Wolfsburg, 2003
14. K. Schmidt, *Aktive Schwingungskompensation an einer PKW-Dachstruktur*, Adaptronic Congress 2003, Wolfsburg, 2003
15. von Garßen, *Piezoelektrische Schalenbelegungen für den Magnetresonanztomographen*, Adaptronic Congress 2003, Wolfsburg, 2003