



Bauweisen und Anwendungen von Piezokompositen in der Adaptronik

Autoren: *Peter Wierach, DLR e.V., Inst. für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig*
Andreas Schönecker, FhG, Inst. für Keramische Technologie und Sinterwerkstoffe, Dresden

Multifunktionale Werkstoffe oder Werkstoffsysteme, die aktuatorische, sensorische und lasttragenden Eigenschaften auf sich vereinen, sind ein wesentlicher Bestandteil adaptiver Strukturen. Aufgrund vielfältiger Vorteile werden piezokeramische Werkstoffe am häufigsten für den Aufbau adaptiver Strukturen eingesetzt. Problematisch sind jedoch die mechanischen Eigenschaften dieses Werkstoffes. In der Vergangenheit hat sich deshalb die Verwendung von Piezokompositen durchgesetzt, die eine Kombination aus dem spröden keramischen mit einem duktilen Polymerwerkstoff darstellen. Piezokomposite enthalten auch notwendige zusätzliche Komponenten wie Elektroden, Energiezuleitungen, Isolatoren usw. Für die Adaptronik kommen insbesondere flächige Komposite zum Einsatz, bei denen die Kräfteinleitung nicht an diskreten Punkten erfolgt, sondern flächig über eine Klebschicht. Technisch relevante Flächenkomposite basieren im Wesentlichen auf dem piezoelektrischen Quer- und Längseffekt, wobei dünne piezokeramische Folien und Fasern zum Einsatz kommen. Es werden die prinzipiellen Eigenschaften und Einflussparameter bei der Gestaltung von Flächenkompositen betrachtet. Mittlerweile sind verschiedene Konfigurationen von Flächenaktuatoren als kommerzielle Produkte erhältlich. Es wird dargestellt, welche Bauformen von Flächenkompositen derzeit verfügbar sind und deren Eigenschaftsprofil diskutiert.

Einleitung

Aktuatoren und Sensoren auf Basis multifunktionaler Werkstoffe sind ein wesentlicher Bestandteil adaptiver Strukturen. Als integrale Komponenten der Struktur übernehmen sie im günstigsten Fall auch lasttragende Funktion. Multifunktionale Werkstoffe (häufig auch als Smart Materials oder Intelligente Werkstoffe bezeichnet) sind Energiewandler, die in einer technisch nutzbaren Weise auf einen äußeren Stimulus reagieren. Am häufigsten eingesetzt werden Werkstoffe, die auf ein elektrisches-, thermisches- oder magnetisches Feld mit einer Änderung ihrer mechanischen Eigenschaften reagieren. Die bekanntesten Vertreter sind Piezokeramiken (Kraftwirkung/Deformation im elektrischen Feld), Formgedächtnislegierungen (temperaturabhängige Kraftwirkung/ Deformation) oder elektrorheologische- und magnetorheologische Flüssigkeiten (Beeinflussung der Schubübertragung im elektrischen bzw. magnetischen Feld). Häufig funktioniert der Effekt in beide Richtungen, so dass die entsprechenden Werkstoffe nicht nur aktuatorisch, sondern auch sensorisch genutzt werden können.

Aufgrund einer Reihe von Vorteilen sind Piezokeramiken die gegenwärtig am häufigsten verwendeten multifunktionalen Werkstoffe. Die Funktion von Piezokeramiken basiert auf dem piezoelektrischen Effekt, der die Wechselwirkung zwischen

dem mechanischen und elektrischen Zustand einer speziellen Klasse von Kristallen beschreibt. Entstehen proportional zur Deformation des Kristalls elektrische Ladungen, spricht man vom direkten piezoelektrischen Effekt. Dieser Effekt kann sensorisch genutzt werden, indem die elektrischen Ladungen über ein geeignetes Messinstrument detektiert werden. Die Umkehrung dieses Effekts wird inverser piezoelektrischer Effekt genannt, bei dem das Kristall seine Form unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes ändert. Über diesen Effekt erfolgt die aktuatorische Nutzung der Piezokeramik.

Die Gründe für die Beliebtheit piezokeramischer Werkstoffe sind zum einen „technischer“ Natur, zum anderen liegen aber auch überzeugende „praktische“ Gründe vor. Auf der technischen Seite sind es insbesondere der große Frequenzbereich, bis weit in den kHz-Bereich, der mit piezokeramischen Sensoren und Aktuatoren abgedeckt werden kann, die hohe Steifigkeit des Keramikmaterials (typisch 60 GPa), die für den Einsatz als Aktuator von besonderer Bedeutung ist, sowie die vergleichsweise einfache Ansteuerung des Werkstoffes über ein elektrisches Feld.

Die praktischen Gründe liegen vor allem in der guten Verfügbarkeit und verlässlichen Qualität des Werkstoffes. Piezokeramiken werden mittlerweile großindustriell hergestellt und sind von verschiedenen Anbietern in unterschiedlichen Bauformen erhältlich. Auch der Preis ist im Vergleich zu exotischeren Werkstoffen günstig.

Ein Nachteil von Piezokeramiken liegt jedoch in der Natur keramischer Werkstoffe begründet. Piezokeramiken sind spröde und damit bruchempfindlich. Während sie Druckbelastungen sehr gut standhalten können, sind Zugbelastungen auf jeden Fall zu vermeiden. Die zuverlässige Weiterverarbeitung und strukturelle Integration der in der Regel höchst empfindlichen Werkstoffe ist daher mit einigem Aufwand und Risiko verbunden.

Piezokomposite

Ein vorteilhaftes und industriegerechtes Konzept ist es daher, die jeweiligen Werkstoffe zunächst zu kompakten und handhabbaren Bauelementen in Form von Piezokompositen weiterzuverarbeiten. Piezokomposite sind Verbundwerkstoffe bestehend aus piezokeramischen Materialien und Polymerwerkstoffen (z.B. Kunstharze). Durch Kombination mit duktilen Polymerwerkstoffen (z.B. durch Eingießen oder Verkleben) können für bestimmte Anwendungen Eigenschaftsverbesserung erzielt werden. Die so entstandenen Piezokomposite zeichnen sich insbesondere durch eine reduzierte Bruchempfindlichkeit aus. Durch die Anordnung der piezokeramischen Werkstoffe im Verbund lassen sich zusätzlich Materialeigenschaften wie z.B. Steifigkeit oder Dämpfung gezielt einstellen. Weiterhin können auch notwendige zusätzliche Komponenten wie Elektroden, Energiezuleitungen, Isolatoren usw. eingebracht werden. Erst in einem zweiten Schritt werden die Aktuatoren und Sensoren mit dem Strukturwerkstoff bzw. der Struktur kombiniert. Die Entwicklung solcher Piezokomposite ist daher ein zentrales Forschungsthema in der Adaptronik.

Die Idee der Piezokomposite ist jedoch um einiges älter als die Adaptronik. Ein wesentliches Anwendungsfeld ist der Einsatz von Piezokompositen in der Ultraschalltechnik. Ultraschallwandler werden hauptsächlich in der medizinischen Diagnostik, für zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und in der Sonartechnik eingesetzt. Für den Aufbau der Ultraschallköpfe kommen Piezokeramiken zum Einsatz, die sowohl als Ultraschallsender wie auch als Empfänger verwendet werden.

Gegenüber monolithischen Piezokeramiken bieten Piezokomposite eine Reihe von Vorteilen für Ultraschallwandler. Bei hoher Sendeleistung und Empfangsempfindlichkeit kann eine deutliche Erhöhung der Arbeitsfrequenz und der Bandbreite erreicht werden. Für Ultraschallwandler werden überwiegend sogenannte 1-3 Komposite eingesetzt. Bei der 1-3-Anordnung handelt es sich um parallel ausgerichtete Keramikstäbchen, die in eine Epoxidharz-Matrix eingebettet sind (Bild 1). Die Querschnitte der Keramikstäbchen sind in Abhängigkeit vom Herstellungsprozess recht-

eckig oder rund ausgeführt, wobei auch andere Formen denkbar sind. Die Vorteile resultieren aus der Filigranität des Piezokomposites, der verbesserten akustischen Impedanzanpassung, der extrem geringen radialen Kopplung sowie der Möglichkeit der gezielten Erzeugung piezoelektrischer Inhomogenitäten (statistische Schwankungen in der Keramikdichte) und Anisotropien (Gradienten in den piezoelektrischen und akustischen Eigenschaften in Schwingungsrichtung)

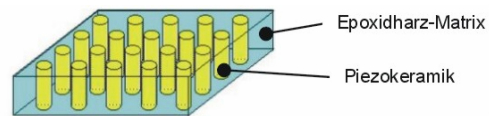


Bild 1: 1-3 Piezokomposit, piezokeramische Stäbchen mit rundem Querschnitt

Piezokomposite in der Adaptronik

In der Adaptronik werden Piezokomposite im Wesentlichen zur Reduzierung, Erzeugung oder Detektierung von Strukturverformungen zur Lärm-, Vibrations- und Formkontrolle eingesetzt. Die Adaptronik setzt hierbei einen besonderen Schwerpunkt auf „verteilte“ Aktuatorik und Sensorik. Im Gegensatz zu diskreten Aktuatoren (wie z.B. bei Piezostapelaktuatoren) erfolgt die Kräfteinleitung nicht an zwei expliziten Punkten sondern durch Schub über eine flächige Verbindung, (in der Regel über eine Klebschicht). Bild 2 stellt dies schematisch dar.

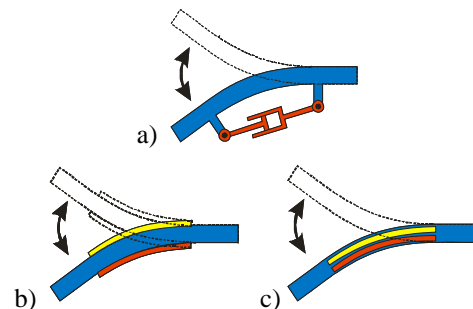


Bild 2: (a) Diskrete (b,c) und flächige Kräfteinleitung

Insbesondere für den Leichtbau besitzen flächige Aktuatoren/Sensoren, die im Folgenden als **Flächenaktuatoren/Sensoren** bzw. **Flächenkomposite** bezeichnet werden, eine große Bedeutung, da keine massiven Kräfteinleitungspunkte erforderlich sind. Gewichts- und bauraumoptimiert werden die Aktuatoren und Sensoren in dünnwandige Leichtbaustrukturen eingebracht und beeinflussen Schwingungen und Deformationen direkt am Ort ihrer Entstehung.

Im Vergleich zu diskreten Aktuatoren, deren Steifigkeit und damit verbunden deren Effizienz, prinzipbedingt mit zunehmender Länge abnimmt,

können Flächenaktuatoren ohne Effizienzverlust in beliebiger Länge ausgeführt werden.

Auch hier gilt, dass durch die Kombination des spröden keramischen Materials mit einem Polymerwerkstoff verbesserte Eigenschaften erzielt werden. Der Verguss mit dem Polymer erfolgt in der Regel bei erhöhten Temperaturen (typisch 120°C). Durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten des Polymerwerkstoffes und der Keramik sowie durch den Schrumpf des Polymers bei der Aushärtung ergibt sich eine Druckvorspannung des keramischen Materials in der Ebene. Dadurch können Piezokomposite in gewissen Grenzen auch auf Zug belastet werden.

Die wesentlichen Vorteile bei der Verwendung von Piezokompositen als Aktuatoren und Sensoren in der Adaptronik sind im Folgenden zusammengefasst:

- Schutz der spröden Piezokeramik vor äußeren Belastungen
- Verbesserte Handhabbarkeit
- Einfache elektrische Kontaktierung
- Elektrisch Isolierter Aktuator
- Druckvorspannung der Piezokeramik durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten des Isolationsmaterials/Bettungsmasse und der Piezokeramik
- Abbau von Spannungsspitzen in der Keramik, dadurch Behinderung von Rissausbreitung; größere passive Verformungen möglich (Flexibilität); erhöhte Lebensdauer der Wandler
- Möglichkeit zur Realisierung komplexer Architekturen

Piezokeramische Materialien für Flächenkomposite

Ausgangsmaterialien für die Herstellung von piezokeramischen Flächenaktuatoren sind hauptsächlich dünne piezokeramische Plättchen, die auch als Piezofolien bezeichnet werden (Bild 3a); und piezokeramische Fasern (Bild 3b), die mit unterschiedlichen Verfahren, Zusammensetzungen und Abmessungen hergestellt werden [1-3].

Ein übliches Verfahren für die Herstellung von Keramikfolien ist das Schlickergießen. Hier wird der Keramikschlicker, bestehend aus Keramikpulver, Binde-, und Lösemittel über einen Ziehschuh zu einer Grünfolie gezogen, vereinzelt und anschließend gesintert. Übliche Foliendicken liegen zwischen 100-300µm. Ein weiteres Verfahren basiert auf dem Sägen gesintertter Keramikblöcke in Scheiben. Mit diesem Verfahren können insbesondere größere Dicken realisiert werden. Die größten Abmessungen kommerziell verfügbarer Keramikfolien liegen derzeit etwa bei 87x57mm².

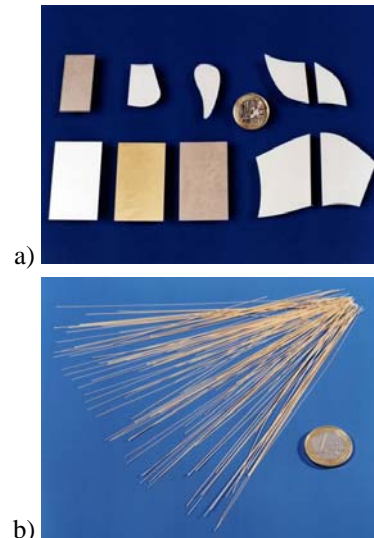


Bild 3: a) piezokeramische Folien mit unterschiedlichen Formen und einer typischen Dicke von 200µm; b) piezokeramische Fasern mit einem Durchmesser von 250µm

Für die Herstellung piezokeramischer Fasern werden hauptsächlich drei Verfahren angewendet:

- **Extrudieren** aus einem Schlicker mit hohem Feststoffanteil – vergleichbar mit Schlickergießen
- **Naßspinnverfahren:** Das Keramikpulver befindet sich in einer (Cellulose) Lösung, wird durch eine Spinnöse gedrückt und durchläuft ein chemisches Bad, in dem die Cellulose wieder ausgefällt wird
- **Sol-Gel-Spinnen:** Aus metallorganischen Verbindungen und organischen Lösungsmitteln wird eine Suspension mit kleinsten keramischen Partikel hergestellt (Sol). Das Sol wird durch eine Spinnöse gedrückt und geliert zu einer Faser

Die mit den drei Verfahren hergestellte Grünfasern werden anschließend gelängt und gesintert, wobei die Größe des Sinterofens die maximale Länge der Faser definiert. Üblich sind Längen von bis zu 250mm. Eine Auswahl von Anbietern piezokeramischer Fasern und Folien ist unter [4-13] aufgelistet.

Typische Querschnittsformen und Abmessungen für piezokeramische Fasern sind in Bild 4 dargestellt.

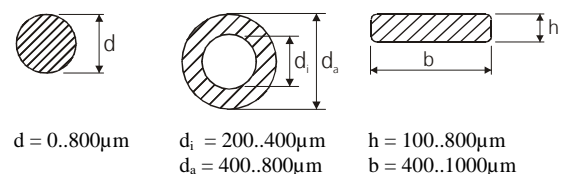


Bild 4: Querschnittsformen und typische Abmessungen von Piezofasern

Funktionsweisen und Eigenschaften von Flächenaktuatoren

Von den drei richtungsabhängigen piezoelektrischen Teileffekten

- Längseffekt oder d_{33} -Effekt,
- Quereffekt oder d_{31} -Effekt und
- Schereffekt oder d_{15} -Effekt

werden für Piezokomposite in der Adaptronik fast ausschließlich der Längs- und Quereffekt genutzt. In letzter Zeit wurden zwar einige Forschungsarbeiten über adaptive Strukturen mit Scheraktuatoren veröffentlicht [14], diese sind jedoch noch weit davon entfernt, in kommerzielle Produkte umgesetzt zu werden und sollen deshalb nicht weiter betrachtet werden.

Der Zusammenhang zwischen Dehnung und elektrischem Feld wird über die materialspezifische Ladungskonstante „ d “ beschrieben, wobei vereinfachend von einem linearen Zusammenhang zwischen Dehnung und elektrischem Feld ausgegangen wird. Die Indizes kennzeichnen dabei Ursache und Wirkung und beziehen sich auf Koordinatenrichtungen eines in der Materialwissenschaft gebräuchlichen Koordinatensystems.

Beim d_{31} -Effekt wird die Dehnung genutzt, die quer zum anliegenden elektrischen Feld entsteht. Das elektrische Feld wird in 3-Richtung aufgebracht (Ursache) und in 1-Richtung genutzt (Wirkung). Die d_{31} -Konstante ist negativ, da bei Anlegen eines positiven elektrischen Feldes in 3-Richtung eine Kontraktion der Piezokeramik in 1-Richtung erfolgt. Analog hierzu wird beim d_{33} -Effekt die Dehnung der Piezokeramik in 3-Richtung bei Anlegen eines positiven elektrischen Feldes in 3-Richtung genutzt. Da sich der keramische Körper in dieser Konfiguration ausdehnt ist die d_{33} -Konstante positiv. Je nachdem welcher der beiden Effekte genutzt wird, wird auch von „Elongatoren“ oder „Kontraktoren“ gesprochen.

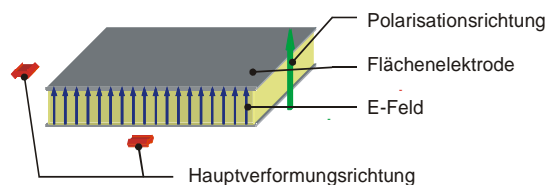


Bild 5: Elektrodenanordnung und Deformation im elektrischen Feld unter Ausnutzung des d_{31} -Effektes

Die Anordnung der Elektroden ist daher entscheidend dafür, welcher der beiden Effekte genutzt wird. Der einfachste Aufbau für einen Flächenaktor ergibt sich für den d_{31} -Effekt (Bild 5). In diesem Fall reicht eine einfache flächige Elektrode, die beidseitig auf einer dünnen Piezofolie aufgetragen wird. Das elektrische Feld bildet sich

dann homogen zwischen den Elektroden aus. Die Dicke der Piezokeramik definiert dabei den Elektrodenabstand und damit die erforderliche Spannung um ein bestimmtes elektrisches Feld aufzubringen. Üblich ist eine Dicke von 0,2mm, bei der eine Spannung von 200V erforderlich ist, um ein elektrisches Feld von 1kV/mm zu erzeugen.

Komplizierter wird es wenn der d_{33} -Effekt für Flächenaktuatoren genutzt werden soll. Hier hat sich in der Vergangenheit ein Konzept durchgesetzt, das auf so genannten „interdigitated - Electrodes“ beruht. Dieser Begriff leitet sich vom englischen Wort „interdigitate“ für „ineinander greifen“ ab. Es handelt sich hierbei um zwei ineinander greifende Elektrodenkämme mit unterschiedlicher Polarität, so dass sich zwischen den Elektrodenfingern wechselnde elektrische Felder ausbilden. Da mit vertretbarem Aufwand die Elektrodenkämme nur auf den Oberflächen des Piezokomposites aufgebracht werden können, bilden sich sehr inhomogene elektrische Felder aus (Bild 6). Dies hat direkte Auswirkung auf den minimalen Elektrodenabstand und damit auf die Betriebsspannung. Werden die Abstände der Elektrodenfinger im Verhältnis zur Keramikdicke zu gering gewählt, dringt das elektrische Feld nicht in ausreichendem Maße in die Keramik ein und die Effizienz des Aktuators ist reduziert. In Abhängigkeit von der Keramikdicke ergeben sich somit minimale Elektrodenabstände. Hinzu kommt, dass der Bereich unterhalb der Elektrodenfinger nicht zur Dehnung der Keramik beiträgt. Bei geringem Elektrodenabstand steigt die Anzahl der Elektrodenfinger und damit der Anteil des „toten“ Materials. Dieser Effekt kann nur bedingt mit sehr dünnen Elektrodenfingern ausgeglichen werden, da sich bei sehr dünnen Elektrodenfingern hohe Gradienten in der elektrischen Feldverteilung ergeben, die zu einer hohen mechanischen Belastung des keramischen Werkstoffes führen. Für einen piezokeramischen Körper mit einer Dicke von 0,2mm ergeben sich günstige Elektrodenabstände zwischen 0,5 mm - 1 mm. Ohne Berücksichtigung der Feldinhomogenität sind somit 500-1000V erforderlich, um ein elektrisches Feld von 1kV/mm zu erzeugen.

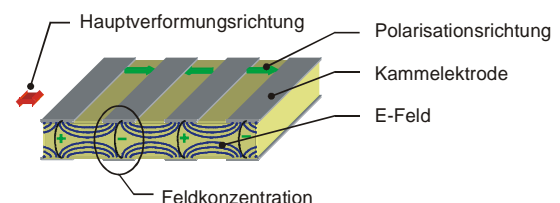


Bild 6: Elektrodenanordnung und Deformation im elektrischen Feld unter Ausnutzung des d_{33} -Effektes

Der Vorteil von Flächenaktuatoren, die den d_{33} -Effekt nutzen, liegt darin, dass der d_{33} -Koeffizient durchschnittlich etwa dreimal so hoch ist wie der d_{31} -Koeffizient. Dementsprechend können deut-

lich höhere Dehnungen mit d_{33} -Wandlern erreicht werden. Allerdings zum Preis von deutlich erhöhten Betriebsspannungen. Sinnvoll ist es daher, den Quotienten zwischen angelegter Spannung und erreichbarer Dehnung zu betrachten. Dieser ist für d_{31} -Flächenaktuatoren deutlich günstiger als für d_{33} -Flächenaktuatoren. Die absolut erreichbare Dehnung ist jedoch für d_{33} -Aktuatoren in jedem Fall größer. Es ist daher im Einzelfall zu prüfen, ob für die vorliegende Anwendung eine hohe absolute Dehnung erforderlich ist und ob eine entsprechend hohe Spannung zur Verfügung gestellt werden kann.

Bild 7 zeigt die Spannungs-Dehnungskurven zweier typischer Flächenaktuatoren, die auf dem d_{33} - bzw. d_{31} -Effekt beruhen über einen Spannungsbereich von 0V bis 400V. Zur Verdeutlichung und Vergleichbarkeit wurde der Betrag der Dehnung des d_{31} -Wandlers verwendet. Vorzeichenbehaftet würde sich keine Ausdehnung, sondern eine Kontraktion des Wandlers ergeben. Deutlich ist die Überlegenheit des d_{31} -Wandlers in diesem Spannungsbereich zu erkennen.

Wird, wie Bild 8 zeigt, der d_{33} -Wandler über seinen gesamten Spannungsbereich von -500V bis +1500 V betrieben, ergeben sich dagegen sehr viel größere aktive Dehnungen.

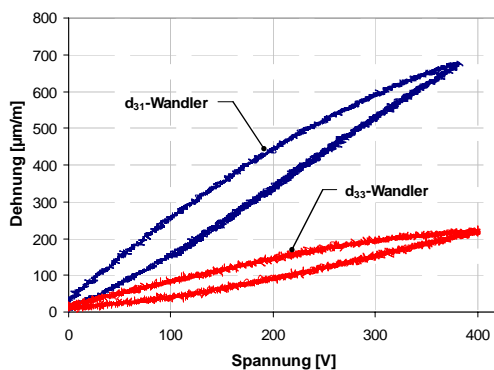


Bild 7: Vergleich der Dehnungshysteresen eines d_{33} - und d_{31} -Flächenaktuators gleicher Dicke über einen Spannungsbereich von 0-400V

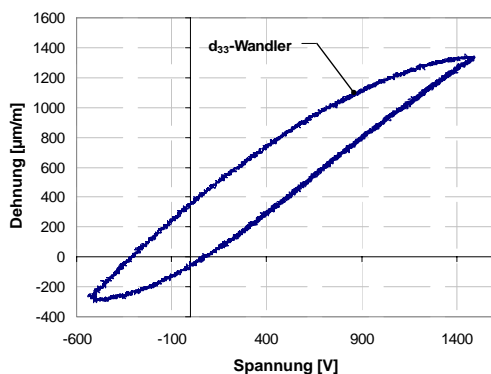


Bild 8: Dehnungshysterese eines d_{33} -Flächenaktuators über einen Spannungsbereich von -500 bis +1500V

Für praktische Anwendungen ist jedoch nicht nur die Höhe der Spannung von Bedeutung, sondern auch die elektrische Leistung, die für den Betrieb bei einer bestimmten Frequenz erforderlich ist. Diese wird in entscheidendem Maße von der Kapazität des Aktuators bestimmt. Je größer die Kapazität, desto größer die elektrische Leistung, wobei annähernd von einem linearem Zusammenhang ausgegangen werden kann. Aufgrund der besonderen Elektrodengeometrie ergeben sich bei gleicher Dicke und Fläche für d_{33} -Aktuatoren mit Kammelektroden deutlich geringere Kapazitäten als für d_{31} -Aktuatoren. Die elektrische Leistung für d_{33} -Flächenaktuatoren ist daher trotz höherer Spannungen nicht zwangsläufig höher als die Leistung für d_{31} -Flächenaktuatoren.

Typische Kennwerte von kommerziellen d_{31} - und d_{33} -Flächenaktuatoren sind in Tabelle 1 gegenübergestellt [15].

Typ		d_{33}	d_{31}
Ansteuerspg.	U_{max} [V]	1500	360
	U_{min} [V]	-500	-60
Kapazität	[nF/cm ²]	0,42	4,5
Piezokonstante	[pm/V]	460	-370
Dehnung/Volt	[µm/m/V]	0,7..0,9	-2
Max. Dehnung	[µm/m]	1600	500
Ladung/Dehnung	[pC/ppm]	1670	3250

Tabelle 1: Typische Kennwerte kommerzieller Flächenaktuatoren [15]

Die Ansteuerung einer Piezokeramik erfolgt hauptsächlich in Polarisationsrichtung, da so deutlich höhere elektrische Feldstärken aufgebracht werden können. In geringem Maße können auch elektrische Felder entgegen der Polarisationsrichtung der Keramik angelegt werden. Die maximale negative Feldstärke ergibt sich dann aus der Koerzitivfeldstärke des verwendeten Piezowerkstoffes. Die Koerzitivfeldstärke definiert den Punkt, bei dem die Umpolarisierung des Werkstoffes einsetzt. Im dauerhaften Betrieb sollten 30-50% der Koerzitivfeldstärke nicht überschritten werden. Dabei ist ein dynamischer Betrieb der Keramik, bei dem immer wieder Felder in Polarisationsrichtung aufgebracht werden und damit für eine kontinuierliche Repolarisierung sorgen, deutlich günstiger als ein statischer Betrieb, bei dem über lange Zeiträume Felder entgegengesetzt der Polarisationsrichtung aufgebracht werden.

Ein weiterer wesentlicher Faktor hinsichtlich der Leistungsfähigkeit eines Flächenaktuators ist seine Steifigkeit. Mit Hilfe der Aktuatorsteifigkeit und der freien Dehnung kann die Blockierkraft des Aktuators bestimmt werden. Die Steifigkeit

wird in erster Linie durch das verwendete Piezomaterial bestimmt. Durch den Anteil an Polymerwerkstoff im Komposit wird die Steifigkeit reduziert. Je nach Herstellungsprozess und Querschnittsgeometrie der verwendeten Piezomaterialien ergeben sich daher unterschiedliche Steifigkeiten. Für die meisten bekannten Bauformen ergeben sich vergleichbare Steifigkeitswerte.

Einfluss von Isolations- und Klebschichten auf die Leistungsfähigkeit von Flächenkompositen

Durch die Einbettung in ein Polymer wird die Dehnung der Keramik durch die Steifigkeit des Polymers behindert. Bild 9 zeigt beispielhaft die Spannungs-Dehnungskurve einer keramischen Folie mit einer Dicke von 0,2mm und einem Piezokomposit, das mit einer Piezofolie vom gleichen Typ aufgebaut wurde. Die Dicke der Isolationsschicht des Piezokomposits beträgt 0,12mm. Wie das Diagramm zeigt, ist eine deutliche Reduzierung der freien Dehnung durch die Einbettung in das Komposit zu erkennen.

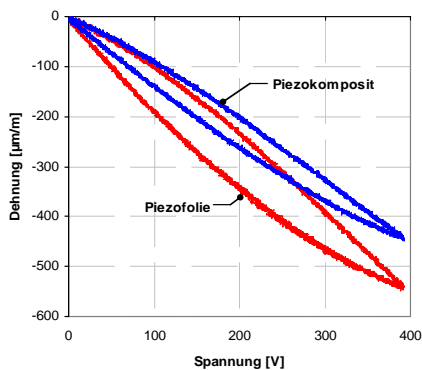


Bild 9: Freie Dehnung einer Piezofolie (PIC255) im Vergleich zur Dehnung eines Piezokomposits mit gleichem Folientyp

Wird der Piezokomposit bzw. die „nackte“ Folie auf einen 1mm dicken Stahlstreifen appliziert und die Durchbiegung des Stahlstreifens bei Ansteuerung der Keramik gemessen, so ist nahezu kein Unterschied in der Auslenkung feststellbar (Bild 10). Es ist unmittelbar anschaulich, dass die Steifigkeit der 0,12mm dicken Isolationsschicht im Vergleich zur Steifigkeit des 1mm dicken Stahlstreifens keine Rolle spielt. Im Vergleich zur Piezofolie wird sogar eine etwas höhere Durchbiegung erzielt. Schwankungen in den Eigenschaften der Piezofolie und der aufgrund der Isolationsschicht etwas größere Abstand des Piezokomposits von der neutralen Achse haben einen deutlich größeren Einfluss.

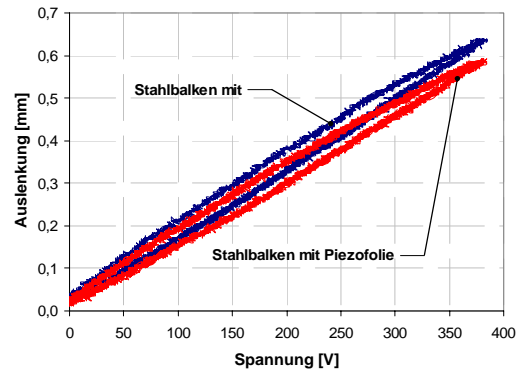


Bild 10: Durchbiegung eines 40mm breiten Stahlstreifens mit applizierter Piezofolie und Piezokomposit mit identischer Piezofolie (PIC255; 50x30x0,2mm³; Klebschichtdicke 0,1mm, 75mm Abstand von der Einspannung) gemessen in 255mm Entfernung von der Einspannung

Da bei flächigen Piezokompositen der keramische Werkstoff nicht in direkter Verbindung mit dem zu verformenden Werkstoff steht, sondern der Dehnungstransfer über mehrere Polymerschichten (Isolationsschicht, Klebschicht) mit vergleichsweise geringen Steifigkeiten erfolgt, stellt sich die Frage, inwieweit dadurch die Leistungsfähigkeit der Aktuatoren reduziert wird.

Zur Diskussion dieser Frage soll ein analytisches Modell herangezogen werden, das von Crawley und DeLuis in [16] vorgestellt wurde und die wesentlichen Zusammenhänge beschreibt. Beispielhaft wird eine typische Konfiguration betrachtet, bei der eine 40 mm lange und 0,2 mm dicke Piezokeramik auf einen 2 mm dicken Stahlstreifen appliziert wurde. Die Dicke der Klebschicht und der Isolationsschicht des Komposites beträgt zusammen 0,15mm. Klebschicht und Isolationsschicht sollen dabei die gleichen elastischen Eigenschaften besitzen.

Die wesentlichen Einflussfaktoren bei der Dehnungsübertragung sind:

$G_{\text{Kleb.+Iso}} = 2,2 \text{ GPa}$	Schubmodul der Kleb- und Isolationsschicht
$E_{\text{Kleb.+Iso}} = 3 \text{ GPa}$	E-Modul der Kleb- und Isolationsschicht
$E_{\text{Stahl}} = 210 \text{ GPa}$	E-Modul des Stahlstreifens
$E_{\text{Piezo}} = 50 \text{ GPa}$	E-Modul der Piezokeramik
$d_{\text{Kleb.+Iso.}} = 0,15 \text{ mm}$	Dicke der Isolations- und Klebschicht
$d_{\text{Stahl}} = 2 \text{ mm}$	Dicke des Stahlstreifens
$d_{\text{Piezo}} = 0,2 \text{ mm}$	Dicke der Piezokeramik
$l = 50 \text{ mm}$	Länge der Piezokeramik

Auf Basis der Gleichungen 1-4 [16] kann mit den oben angegebenen Werten das Dehnungsverhalten des Gesamtsystems unter Berücksichtigung der Kleb- und Isolationsschicht bewertet werden. Beschrieben wird dabei der Fall, dass sich der Stahlstreifen bei Ansteuerung der Piezokeramik biegt (Bimorph).

$$\varepsilon_{\text{Piezo}} = \frac{6}{\psi + 6} + \frac{\psi \cosh(\Gamma x)}{(\psi + 6) \cosh(\Gamma)} \quad \text{Dehnung der Piezokeramik} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{Stahl}} = \frac{6}{\psi + 6} - \frac{6 \cosh(\Gamma x)}{(\psi + 6) \cosh(\Gamma)} \quad \text{Dehnung des Stahlstreifens} \quad (2)$$

$$\psi = \frac{(E \cdot d)_{\text{Stahl}}}{(E \cdot d)_{\text{Piezo}}} \quad \text{Steifigkeitsverhältnis} \quad (3)$$

$$\Gamma^2 = \frac{G_{\text{Kleb+Iso}} I_{\text{Piezo}}}{E_{\text{Piezo}} d_{\text{Piezo}} d_{\text{Kleb+Iso}}} \left(\frac{\psi + 6}{\psi} \right) \quad \text{Schubverlustfaktor der Klebschicht} \quad (4)$$

Eine grafische Auswertung dieser Gleichungen ist in Bild 11 dargestellt. Das Diagramm zeigt die Dehnung des Systems aufgetragen über die Länge der Piezokeramik. Der rechte bzw. linke Rand des Diagramms spiegelt die Ränder der Piezokeramik wider. Die Ordinate ist bezüglich der unbehinderten (freien) Dehnung der Piezokeramik normiert. Da die Piezokeramik zusammen mit dem Stahlstreifen als ein System aus zwei parallel geschalteten Steifigkeiten betrachtet werden kann, ergibt sich ein Gleichgewichtszustand, der unterhalb der freien Dehnung der Piezokeramik liegt. Dies ist auf die deutlich größere Steifigkeit des Stahlstreifens gegenüber der Piezokeramik zurückzuführen. Bei einer perfekten Verklebung würde über die gesamte Länge der Piezokeramik die Dehnung von Keramik und Stahlstreifen identisch sein. Dieser Zustand entspricht der mittleren Geraden in dem Diagramm. Durch die Klebschicht entstehen jedoch Verluste. Das verwendete Modell geht davon aus, dass die Dehnung der aufgeklebten Piezokeramik an den Rändern der freien Dehnung entspricht (obere Kurve). Der Stahlstreifen verformt sich dagegen nicht an den Rändern (untere Kurve). Über die Länge der Piezokeramik nähern sich beide Kurven dem Grenzwert der perfekten Klebung an. Der Verlust durch die Klebschicht entspricht der Differenz zwischen dem Gleichgewichtszustand der perfekten Klebung und der Dehnungskurve des Stahlstreifens und ist damit an den Rändern der Piezokeramik am größten. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Randeinflüsse bei dem vorliegenden System relativ schnell abklingen, und dass die Dehnungen der Piezokeramik und des Stahlstreifens den Wert der perfekten Klebung fast erreichen. Der Verlust liegt in diesem Fall bei nur ca. 3%.

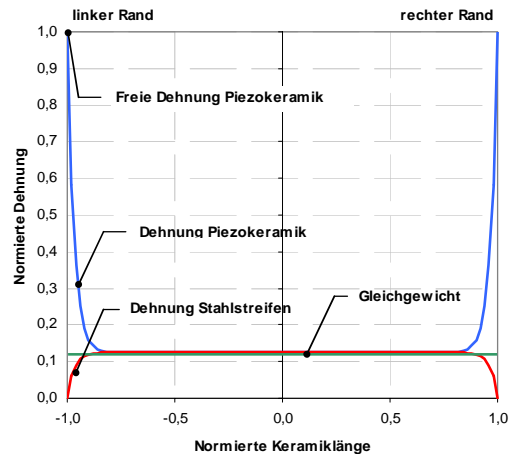


Bild 11: Dehnungstransfer bei Biegung zwischen einem 2mm Dicken Stahlstreifen und einer 0,2mm dicken Piezokeramik mit einer Klebschichtdicke von 0,15mm

Die gewählte Konfiguration ist typisch für Anwendungen in der Adaptronik und beschreibt aufgrund der hohen Steifigkeit des Stahlstreifens einen eher ungünstigen Fall. Grundsätzlich beeinflussen lange Piezokeramiken sowie dünne und steife Kleb- bzw. Isolationsschichten den Dehnungstransfer günstig. Die Dicke der Klebschicht sollte dabei aus Festigkeitsgründen nicht unterhalb von 0,1mm liegen [31]. Diese Zusammenhänge wurden durch eine Reihe von experimentellen Untersuchungen in verschiedenen Veröffentlichungen bestätigt.

Bauformen von d_{31} -Flächenkompositen

Piezokomposite, die auf dem d_{31} -Effekt basieren sind aufgrund des vergleichsweise einfachen Aufbaus als erstes für Anwendungen in der Adaptronik entwickelt worden.

Erste d_{31} -Flächenaktuatoren wurden Anfang der achtziger Jahre in den USA entwickelt und patentiert. Kommerzialisiert wurden diese Aktuatoren unter dem Namen „Quickpack[®]“ von der US-Firma Active Control Experts (ACX). Mittlerweile werden diese Aktuatoren von der US-Firma Midé Technology Corp., Medford [17] vertrieben.

Zwischen zwei ätztechnisch hergestellten flexiblen Leiterbahnen aus Kupfer beschichteter Polyimidfolie wird eine piezokeramische Folie mit flächiger Elektroderung verklebt. Als Abstandhalter kommen thermoplastische Werkstoffe zum Einsatz.

Die Angebotspalette umfasst 19 Standardkomponenten mit unterschiedlichem Aufbau. Beispielfähig sind zwei Aktuatorkonfigurationen in Bild 12 dargestellt. Die Dicke der eingesetzten Keramikfolien variiert zwischen 125 μ m und 250 μ m. Die Abmessungen der Aktuatoren liegen zwischen

40x25mm² und 110x40mm² mit einer oder zwei nebeneinander angeordneten Piezofolien. Zur Erhöhung der Blockierkraft bei gleich bleibender Betriebsspannung werden Aktuatoren mit zwei Lagen Piezofolien angeboten.



Bild 12: Quickpack® Flächenaktuatoren von Midé mit einer aktiven Fläche von 92x21mm² und 46x33mm²

Eine vergleichbare Technologie wurde von der NASA unter dem Namen „Flexpatch“ entwickelt [18, 19]. Auch hier wird eine elektrodierte piezokeramische Folie zwischen zwei Polyimidfolien verklebt. Zur Kontaktierung werden Streifen aus dünner Nickelfolie verwendet. Die Verklebung erfolgt jedoch bei einer vergleichsweise hohen Temperatur von 325°C, bei der die thermoplastische Polyimidfolie aufschmilzt und als Klebstoff fungiert. Eine Kommerzialisierung hat bis jetzt jedoch noch nicht stattgefunden.



Bild 13: Flexpatch Aktuator mit einer aktiven Fläche von 76x55mm²

Im Rahmen des BMBF-Leitprojektes Adaptronik [20] wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) d₃₁-Flächenaktuatoren mit verbessertem Eigenschaftsprofil entwickelt [21]. Im Vordergrund stand die Entwicklung eines modularen Fertigungskonzeptes, das es ermöglicht, durch eine Anpassung der Komponenten schnell und flexibel aufgabengerechte Aktuatoren bereitzustellen. Die im Leitprojekt Adaptronik als „Funktionsmodule“ bezeichneten Wandler-elemente können durch Variation der einzelnen Komponenten aufgabengerecht angepasst werden. Dies bezieht sich auf:

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

Ein wesentlicher Vorteil der vom DLR entwickelten Funktionsmodule ist die besondere Art der Kontaktierung der Elektroden. Wie bei den Quickpack® Aktuatoren werden elektrodierte, monolithische Piezofolien verwendet. Zur Kontaktierung der Elektroden wird jedoch ein feines Netz aus Kupferdrähten verwendet, das während des Fertigungsprozesses ebenfalls in ein Polymer

eingebettet wird und die Elektroden nahezu vollständig abdeckt. Dadurch ergibt sich insbesondere im Übergangsbereich vom aktivem zum passiven Bereich eine flexible und zuverlässige elektrische Verbindung, die auch bei hohen dynamischen Belastungen unempfindlich gegenüber der Entstehung von Rissen ist. Durch die vollständige Abdeckung der Elektrode ist sichergestellt, dass selbst bei einem Bruch, alle Bruchstücke weiterhin kontaktiert und die Leistungsfähigkeit der Keramik nur geringfügig beeinflusst wird (Bild 14).

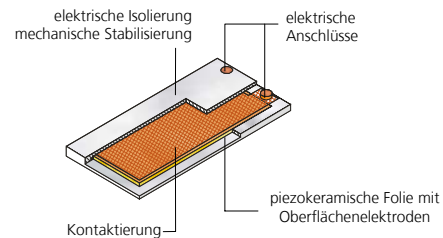


Bild 14: Schematischer Aufbau eines Funktionsmoduls

Als Abstandshalter kommen beliebige Faserwerkstoffe in Frage, wobei standardmäßig Polyestervliese verwendet werden. Je nach Anwendung können verschiedene Isolationsfolien beispielsweise aus Polyimid oder Polyester aufgebracht werden. Der Verguss bzw. die Verklebung der Komponenten erfolgt über ein Harzinjektionsverfahren, wodurch eine hohe und gleichmäßige Qualität des Komposites gewährleistet ist.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Keramischer Werkstoffe und Sintertechnologien (IKTS) wurde die Technologie auf Komposite mit frei formbaren Konturen erweitert (Bild 15). Mit Hilfe eines Laserstrahlschneidprozesses wird die gewünschte Keramikkontur aus der Piezofolie herausgetrennt, ohne dass die Keramik durch die Wärmenwicklung des Lasers geschädigt wird.

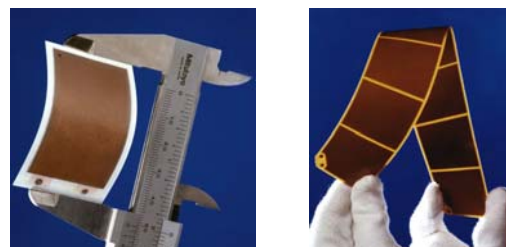


Bild 15: Beispiel für Standard- und Freiformmodule

Eine Kommerzialisierung der Funktionsmodule ist bisher noch nicht erfolgt, steht jedoch unmittelbar bevor.

Von der Firma Smart Material GmbH wurden in Zusammenarbeit mit der NASA d₃₁-Flächenaktuatoren auf Basis gesägter piezokeramischer Folien entwickelt. Die Herstellung der

Flächenaktuatoren erfolgt analog zu den im folgenden Abschnitt beschriebenen d_{33} -Flächenaktuatoren, die als Macro Fiber Composites (MFC) bezeichnet werden. Zur Nutzung des d_{31} -Effektes wurde lediglich die Art der Elektrodringung und Kontaktierung modifiziert.



Bild 16: d_{31} -MFC von Smart Material

Bauformen von d_{33} -Flächenkompositen

Von Midé werden neben d_{31} -Wandlern auch d_{33} -Flächenaktuatoren auf Basis monolithischer Folien angeboten (Bild 17). Der Aufbau der Aktuatoren erfolgt analog zu den d_{31} -Aktuatoren. Bei der d_{33} -Variante werden jedoch Piezofolien ohne Elektrodringung verwendet. Zur Einbringung des elektrischen Feldes in 3-Richtung wird eine Kammelektrode in die kupferbeschichtete Polyimidfolie geätzt und mit der Folie verklebt. Die Leistungsdaten dieser Konfiguration sind jedoch nur geringfügig höher als für d_{31} -Wandler. Der Hersteller gibt bei einer Spannung von $\pm 1200V$ eine freie Dehnung von $\pm 347\mu m/m$ an. Der d_{31} -Wandler erreicht $\pm 200\mu m/m$ bei $\pm 200V$. Problematisch ist der Einsatz von monolithischen Folien im Zusammenhang mit Kammelektroden. Elektrodenabstände und die Breite der Fingerelektrode sind vergleichsweise groß, damit die Auswirkung des inhomogenen elektrischen Feldes nicht zu Beschädigungen der Keramik im Betrieb führen.



Bild 17: Midé d_{33} Quickpack[®] Aktuator und Midé d_{33} -Poweract[™] Aktuator

Eine modifizierte Variante des d_{33} -Wandlers, der ursprünglich von Midé selbst entwickelt wurde [22], wird unter dem Namen PowerAct[™] angeboten. Bei dieser Konfiguration wurde die monolithische Piezofolie mit Hilfe eines Lasers in Aktuatorlängsrichtung mehrfach eingeritzt aber nicht völlig durchtrennt. Durch diese Maßnahme wird

eine gerichtete Wirkung des Wandlers erreicht, da die Steifigkeit in Richtung der Rillen größer ist, als quer dazu.

Es wurde bereits angedeutet, dass aufgrund der inhomogenen elektrischen Felder monolithische Piezofolien nur bedingt für den Aufbau von d_{33} -Wandlern mit Kammelektroden geeignete sind. Es wurde daher eine Reihe von Entwicklungen durchgeführt, die auf faserartige Architekturen des piezokeramischen Ausgangsmaterials setzen. Auch sollen dadurch die Dauerfestigkeitseigenschaften von Piezokompositen günstig beeinflusst werden, da Risse, die in einzelnen Piezofasern entstehen, sich nicht durch den ganzen Keramikkörper fortsetzen, sondern an den Grenzen zum Polymer gestoppt werden.

Erste Piezofaserkomposite wurden Ende der neunziger Jahre vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) unter dem Namen „Active Fiber Composite (AFC)“ entwickelt. Die Technologie basiert auf der Verwendung piezokeramischer Fasern, die in einer Monolage mit einem Polymer vergossen werden (Bild 18). Die Einbringung des elektrischen Feldes erfolgt wiederum über eine Kammelektrode, wobei sowohl ätztechnisch hergestellte flexible Leiterbahnen (Polyimidfolien), als auch mit Leitlebstoff bedruckte Polyesterfolien verwendet werden.

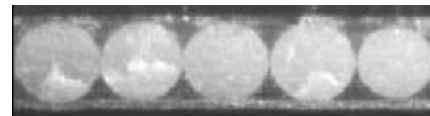


Bild 18: Querschnitt eines AFC mit einer Monolage Piezofasern. [23]

Die Durchmesser der Einzelfasern liegen bei diesen Kompositen zwischen $150-250\mu m$. Ein wesentlicher Nachteil der Technologie liegt in der sehr aufwendigen Herstellung. Jede Faser muss einzeln eingebracht und im Komposit ausgerichtet werden. Maschinelle Verfahren wurden bisher nicht entwickelt, wodurch die Herstellung sehr arbeitsintensiv und teuer ist. Weiterhin ist der Ausgangswerkstoff, die Piezofaser, im Vergleich zu Piezofolien um ein vielfaches teurer.



Bild 19: Piezofaserkomposit mit von CCC

Die Leistungsdaten von d_{33} -Faserkompositen übersteigen die der d_{33} -Folienkomposite deutlich. Bei einer Spannung von $2800V$ werden Dehnungen von $1200-1400\mu m/m$ erreicht. Entscheidend für die Qualität und Leistungsfähigkeit des Komposites ist die Ausrichtung der Fasern. Nur bei

exakt ausgerichteten Fasern wird eine hohe Packungsdichte und Steifigkeit erreicht. Die Qualität hängt daher sehr stark von der Geradheit der verwendeten Piezofasern ab, die herstellungsbedingt leichte Krümmungen aufweisen.

Kommerziell wurden diese Composite zeitweise von der US-Firma Continuum Control Corporation (CCC jetzt Continuum Photonics Inc.) angeboten, die das Geschäft jedoch nach kurzer Zeit wieder aufgegeben hat (Bild 19). Mittlerweile sind drei Lizenznehmer mit dieser Technologie auf dem Markt. Dies sind die US-Firmen Materials Systems Inc. (MSI) [24] und Advanced Ceramatrix (ACI) [12] sowie die österreichische Firma Head Sport AG [25]. Letztere vertreibt jedoch keine Piezokomposite, sondern produziert und nutzt diese Technologie zur Ausstattung von Schwingungsdämpfungssystemen in verschiedenen Sportartikeln [26]. ACI ist selbst Produzent von Piezofasern und bietet die Aktuatoren als Veredelung der eigenen Produkte an. Eine technische Verbesserung der Faserkomposite wurde von MSI entwickelt [27]. Basierend auf einem Verfahren zur Herstellung piezokeramischer Abformkomposite werden nicht mehr einzelne Fasern, sondern bereits ausgerichtete Fasern mit rechteckigem Querschnitt verarbeitet (Bild 20). Dadurch wird zum einen der Aufwand bei der Ablage der Piezofasern reduziert und zum anderen die Kontaktfläche des piezokeramischen Materials zur Elektrode vergrößert. Bei Piezofasern mit rundem Querschnitt berührt die Fingerelektrode die Faser im Extremfall nur an einem Punkt. Bei einer Faser mit rechteckigem Querschnitt liegt der Elektrodenfinger dagegen über der gesamten Breite der Faser auf. Dadurch wird die Einbringung des elektrischen Feldes wesentlich verbessert und der piezoelektrische Werkstoff effizienter genutzt. MSI gibt hier Dehnungswerte von $1830\mu\text{m}/\text{m}$ bei $0..3000\text{V}$ an [27].

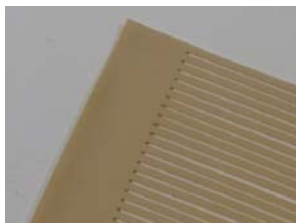


Bild 20: Formkomposit mit ausgerichteten Piezofasern mit rechteckigem Querschnitt ($0,7 \times 0,3\text{mm}^2$) [27]

Eine Palette von Standardprodukten wird von ACI und MSI nicht angeboten. Auch Preise sind nur schwer in Erfahrung zu bringen

Ende der neunziger Jahre wurde von der NASA eine Reihe von Forschungsprojekten bearbeitet, die auf den Einsatz von Piezofaserkompositen gesetzt haben. Wegen mangelnder Qualität und Verfügbarkeit von Faserkompositen mit Rundfasern, wurde von der NASA eine eigene Entwick-

lung initiiert, die auf gesägten piezokeramischen Folien basiert. Die Vorteile dieser als „Macro Fiber Composite (MFC)“ bezeichneten Composite liegen in der Nutzung preiswerter Piezofolien und der exakten Ausrichtung der rechteckigen „Fasern“ durch den maschinellen Zuschnitt der Piezofolie. Für den Zuschnitt der Folien werden Wafersägen aus der Halbleiterindustrie eingesetzt.

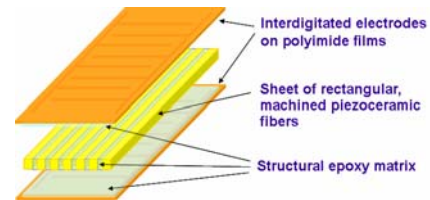


Bild 21: Prinzipieller Aufbau eines MFC [28,29]

Wie Bild 21 zeigt, werden nichtelektrodierte, monolithische Folien in dünne Streifen gesägt und anschließend mit flexiblen Leiterbahnen aus Polyimid und geätzter Kammelektrodenstruktur verklebt. Durch das Sägen der Folie ist die Steifigkeit des Aktuators quer zur Sägerichtung deutlich reduziert, wodurch sich auch für dieses Komposit eine gerichtete aktuatorische Wirkung ergibt. Durch den rechteckigen Faserquerschnitt und eine optimierte Elektrodengeometrie ergeben sich typische Dehnungswerte von $1600\mu\text{m}/\text{m}$ bei einer Spannung von 1500V .

Die Lizenz für das MFC-Verfahren wurde 2002 von der NASA an die US-Firma Smart Material Corp. [11] vergeben. Produziert werden die MFC's seit 2003 von der deutschen Smart Material GmbH in Dresden. Smart Material bietet sechs verschiedene Standardgrößen und Bauformen für d_{33} -Wandler an. Die aktive Fläche liegt bei $85 \times 57\text{mm}^2$ und $85 \times 28\text{mm}^2$. Angeboten werden, unter anderem, spezielle Bauformen bei denen die Piezofasern unter einem Winkel von 45° ausgerichtet sind, wodurch die Erzeugung von Torsionsverformungen vereinfacht wird. Eine weitere Spezialkonfiguration besitzt einen integrierten, jedoch elektrisch separaten Sensorbereich. Hinzu kommen die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen d_{31} -Wandler. Die Dicke des piezokeramischen Materials liegt standardmäßig bei 125, 170 und $200\mu\text{m}$.



Bild 22: d_{33} -MFC von Smart Material



Eine weitere Variante von Piezofaserkompositen wurde von verschiedenen Fraunhofer Instituten im Rahmen des BMBF Leitprojekt Adaptronik entwickelt [30]. Im Gegensatz zu allen anderen Verfahren werden keine Polyimid- oder Polyesterfolien zur Aufbringung der Elektroden genutzt. Das Verfahren erlaubt, die direkte Einbringung der aus leitfähigem Polymer bestehenden Kamm-elektrodenstruktur in das Vergusspolymer. Die Firma Neue Materialien Würzburg GmbH [13] bietet diese Komposite kommerziell an. Zum Einsatz kommt ein besonderer Fasertyp mit sehr kleinem Durchmesser (20-30µm), der ebenfalls im Leitprojekt Adaptronik entwickelt wurde [2]. Der Verguss der Fasern erfolgt mehrlagig, um die Querschnittsfläche des aktiven Materials zu erhöhen. Aufgrund des geringen Faserdurchmessers und der nur bedingten Geradheit dünner Fasern eignen sich die so hergestellten Komposite primär für sensorische Anwendungen. Eine Palette von Standardprodukten und Preise sowie Leistungsdaten sind dem Autor nicht bekannt.

Literatur

- [1] Schönecker A.; *Piezokeramische Folien für den Aufbau multifunktionaler Materialsysteme*,
- [2] Helbig, J. Entwicklung von PZT-Fasern nach dem Sol-Gel-Prozess und deren Technologie, Adaptronic Congress 2003, April 2003
- [3] Helke, G.; *Mit dem Lyocell-Verfahren hergestellte piezokeramische Fasern- Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten*; Adaptronic Congress 2001, April 2001
- Anbieter von Piezofolien:
- [4] www.piceramic.de
- [5] www.stelco.de
- [6] www.argillon.com
- [7] www.marco.de
- [8] www.morganelectroceramics.com
- [9] www.ceramtec.de
- Anbieter von Piezofasern
- [10] www.ceranova.com
- [11] www.smart-material.com
- [12] www.advancedcerametrics.com
- [13] www.nmwgmbh.de
- [14] Benjeddou A. ; Deu J.F.; *Piezoelectric Transverse Shear Actuation and Sensing of Plates*; Journal of Intelligent Material Systems and Structures 12 (2001), Nr. 7, 435-449; Juni 2001
- [15] Schoenecker A.; Roedig T.; Gebhardt S.; Keitel U.; Daue T.; *Piezocomposite transducers for smart structure applications*; SPIE Conference on Smart Structures and Materials; San Diego; März 2005
- [16] Crawley, E.F.; DeLuis, J.; *Use of Piezoceramic Actuators as Elements of Intelligent Structures*; AIAA Journal, Volume 25 (10), pp. 1373-1385, 1987
- [17] www.mide.com
- [18] Horner, Garnet; *Piezoelectric composite device and method for making same*; United States Patent Application 20020038990; April 2002
- [19] Horner G., *Smart Actuator Research*, Adaptronic Congress 2001, Berlin, 2001
- [20] Breitbach, E.; Hanselka, H.; *Entstehung des Leitprojektes Adaptronik und seine Erfolge*, Adaptronic-Congress 2003, April 2003
- [21] Wierach, P.; *Entwicklung multifunktionaler Werkstoffsysteme mit piezokeramischen Folien im Leitprojekt Adaptronik*; Adaptronic-Congress 2003, April 2003
- [22] Master, Brett P.; *Laser machining of electroactive ceramics*; United States Patent 6,337,465; Januar 2002
- [23] 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.
- [24] www.matsysinc.com
- [25] www.head.com
- [26] Lammer H.; *Einsatz adaptiver Materialien und deren Wirkungen bei Sportgeräten an Beispiel Tennisschläger Is18 sowie Ski Ic 300 der Fa HEAD Sport*; Adaptronic Congress 2003, April 2003
- [27] Gentilman, R.; McNeal, K.; Schmidt, G.; Pizzochero, A.; Rossetti, G. A.; *Enhanced performance active fiber composites*; SPIE 10th Symposium on Smart Structures and Materials, March 2003
- [28] 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
- [29] Wilkie, W. Keats; *Method of fabricating a piezoelectric composite apparatus*; United States Patent 6,629,341; Oktober 2003
- [30] Gesang T.; *Herstellung und Eigenschaften aktorischer Fasermodule*; Adaptronic Congress 2003, April 2003