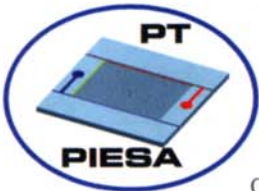


Großserienfähige Produktionstechnologien für leichtmetall- und faserverbundbasierte Komponenten mit integrierten Piezosensoren und -aktoren



Das Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse der TU Chemnitz, geleitet von Univ.-Prof. Dr.-Ing.

habil. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. **Reimund Neugebauer**, führte am 14. November 2007 ein erstes wissenschaftliches Symposium des Sonderforschungsbereichs/Transregio 39 PT-PIESA durch. Als Sprecher des Transregio hatte Prof. Neugebauer in das Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) nach Chemnitz geladen und umriss in seinem Eröffnungsbeitrag die fachliche Aufgabenstellung dieses von der DFG geförderten Forschungsvorhabens.

Zielstellung des Forschungsvorhabens

Ausgehend vom Leichtbau mit flächigen Strukturen, der besonders für den Maschinen- und Fahrzeugbau relevant ist, könnte mit integrierten Sensoren und Aktoren die verstärkte Neigung von Leichtbauteilen zu Strukturschwingungen und hoher Schallabstrahlung wirksam unterdrückt werden. Was gegenwärtig noch durch passive akustische Sekundärmaßnahmen mittels schwerer Dämmstoffe den Gewichtsvorteil des stofflichen Leichtbaus drastisch einschränkt, könnte wirksamer erreicht werden durch aktive Strukturbauteile bei niedrigerem Komponentengewicht. Diese Effekte und damit der Funktionsnachweis aktiver Systemkonzepte der Adaptronik wurden weltweit im Labormaßstab erbracht. Jedoch ist ein entscheidendes Defizit für eine industrielle Umsetzung der Mangel an Fertigungstechnologien für die Realisierung derartiger Bauteile in Serie. Folglich ist das Entwicklungsziel des Vorhabens die Erarbeitung wissenschaftlicher Grundlagen für serienfähige Produktionstechnologien aktiver Strukturbauteile, im speziellen für Leichtbau-Komponenten mit

stofflich integrierten piezokeramischen Fasern und Laminaten (Bild 1). Unter der Vision einer Großserie ist das mechatronische Systemkonzept in die Werkstoff- und Bauteilebene zu überführen, wobei zwecks Überwindung funktioneller und ökonomischer Grenzen die bisher getrennten Prozessketten der Fertigung des mechanischen Bauteils und der Fertigung der Sensor-Aktor-Module

fusionieren, d.h. die stoffliche Integration des Wandler-Werkstoffs muss direkt im Prozess der Bauteilfertigung erfolgen (Bild 2).

Damit steht die Herausforderung, die bisher zwischen dem mechanischen Bauteil und dem Sensor-Aktor-Modul mit einem Füge- und Montageprozess eingebrachte funktionelle Bindung von Bauteil und Modul mit dem Prozess der Bauteilfertigung in das

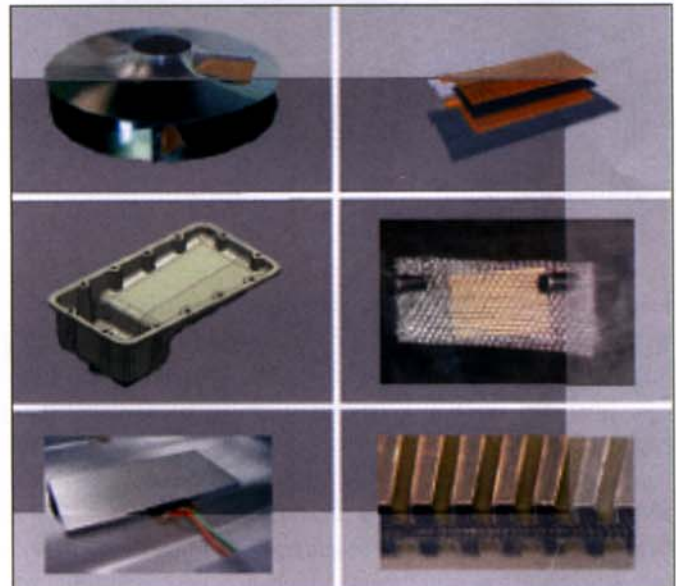


Bild 1 • Beispiele für die stoffliche Integration piezokeramischer Komponenten

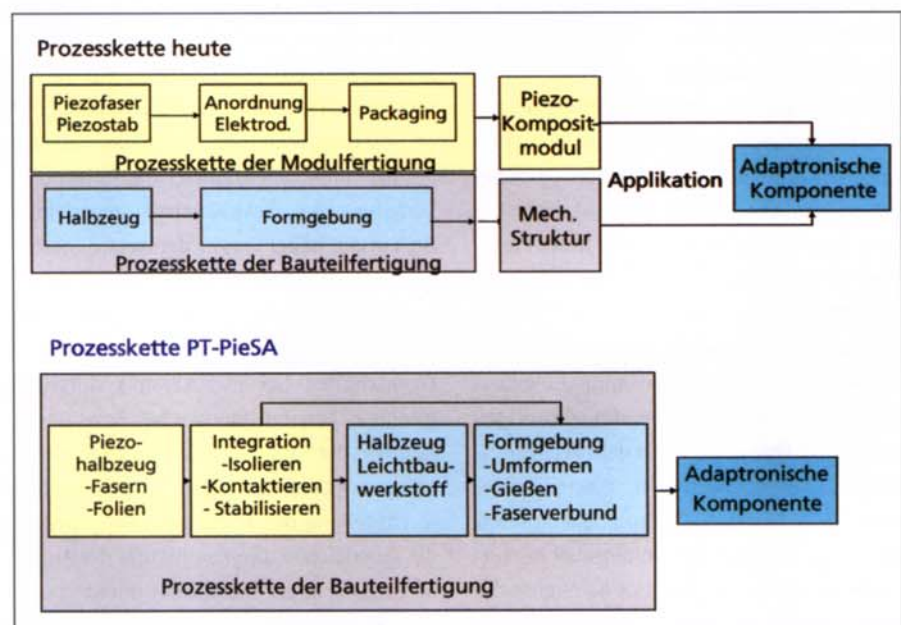


Bild 2 • Konzipierte Veränderung der Prozessketten bei der Fertigung aktiver Strukturbauteile

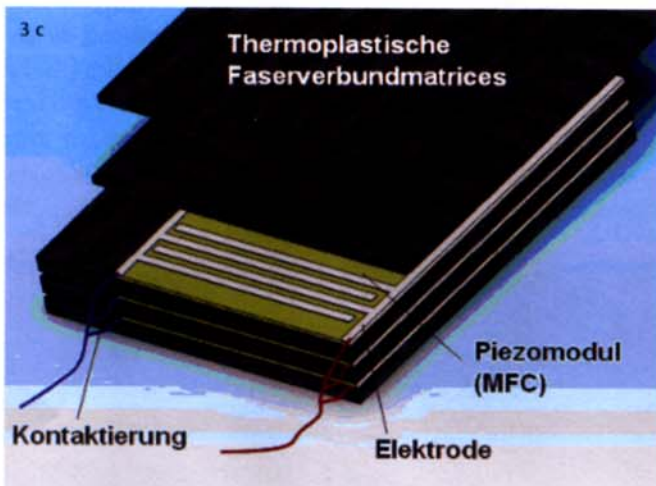
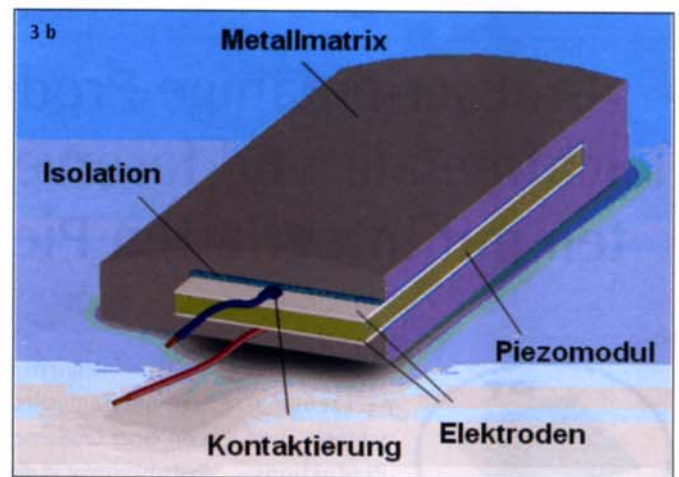
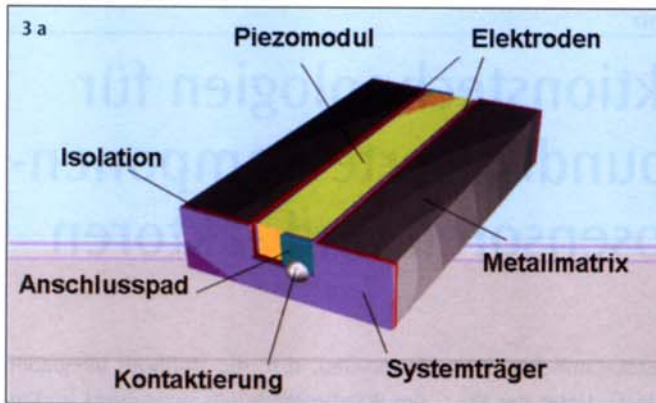


Bild 3 • Integration von Wandlermodulen im Verfahren „Umformen“ (a), „Druckguss“ (b) und „Faserverbund“ (c)

Innere des aktiven Strukturbauteils zu verlagern. Damit ist ein grundlegender Paradigmenwechsel im Grenzschichtdesign verbunden. Über den stofflichen Zusammenhalt hinaus müssen jetzt die Übertragbarkeit von Dehnung und Kraft und die elektrische Isolation im Betriebsfall nach der Belastung durch einen mechanischen Fertigungsprozess sichergestellt werden. Damit entstehen besondere Anforderungen an die Ausbildung des Werkstoffverbundes. Es gilt die Reaktions- und Diffusionsprozesse und die Ausbildung der Eigenspannungszustände in der Kontaktzone von Funktions- und Konstruktionswerkstoff zu beherrschen. Schwerpunkt der technologischen Forschung ist die Sicherung der mechanischen Integrität der Piezokeramik während der hohen mechanischen und thermischen Belastungen im Prozess der Bauteilherstellung. Ziel ist eine optimale Aktorfunktion durch hohe Anbindungssteifigkeiten bei gleichzeitig bestmöglicher Ableitung der Belastungen aus dem Fertigungsprozess. Werkstoffauswahl, Bauteil-Auslegung und Fertigungstechnologie können dafür nur im engen Zusammenspiel miteinander betrachtet werden. Das beinhaltet die Bereitstellung integrierbarer piezokeramischer und Verbundhalbzeuge, die Technolo-

gien für Isolation und Kontaktierung sowie die Erforschung von Prozessfenstern und Variationen der Fertigungstechnologien Druckguss, Blechumformung und Faserverbund zur Minimierung der Belastungen auf Piezokeramik, Isolation und Kontaktierung. Zur Sicherung der Sensor-Aktor-Funktion werden Grundlagenuntersuchungen zur Auslegung des Materialverbundes bezüglich der elektromechanischen Interaktion von Piezokeramik und Konstruktionswerkstoff im Bauteil durchgeführt, die die Wechselwirkung zwischen der mechanisch-geometrischen Auslegung mit der elektromechanischen Funktion für die Piezokeramik klären sollen, u.a. hinsichtlich Verteilung des elektrischen Ansteuerfeldes. Bedeutsam ist der Einsatz der elektro-mechanischen Aktivierungsprozesse für eine Erweiterung der fertigungstechnischen Prozessfenster. Ziel ist es, den Verlust von Sensor-Aktor-Eigenschaften der Piezokeramik aufgrund mechanischer und thermischer Belastungen während der Bauteilfertigung durch Repolarisation rückgängig zu machen und eine gezielte Einstellung des Kontaktspannungszustandes zu erreichen. Die Komplexität der Aufgabenstellung in der Prozesskette erfordert eine ganzheitliche Simulationsumgebung. Die bisher verwendeten Simulationstools sind für

den jeweiligen speziellen Prozessschritt optimiert. Ziel ist eine schrittweise Integration der Ergebnisse von Teilprojekten in eine ganzheitliche Simulationsumgebung, die die Technologiesimulation der Bauteilfertigung mit der durchgängigen Beschreibung der verkoppelten Feldphänomene der Sensor-Aktor-Funktion verbindet.

Inhaltliche Schwerpunkte der Projekte entsprechend dem Stofffluss sind die Umformung von Blechstrukturen mit integrierten Piezomodulen, die Integration der Module in Leichtmetallbauteile durch Druckguss und neue Verfahren zur Herstellung aktiver Faserverbundstrukturen (Bild 3). Übergreifende Aspekte dabei sind das Design von Piezomodulen, die Herstellung piezokeramischer Halbzeuge, die Isolierung, Kontaktierung und Polarisierung. Nachstehend sind die seit Arbeitsbeginn ab 1. Juli 2006 gemeinsam mit Verbundpartnern erzielten Ergebnisse zu einzelnen Teilprojekten dargestellt.

Prozesskette Umformen

B. Kranz und W.-G. Drossel, Fraunhofer IWU Chemnitz/Dresden, stellten ein parametrisiertes Finite-Elemente-Modell bereit, mit dem homogenisierte Werkstoffparameter zur Beschreibung des elektromechanischen Verhaltens flächiger Piezofaser-Metall-Module ermittelt werden können. Mit Aussagen zu den Beanspruchungen der Komponenten dieses Verbundes wird eine Bewertung konkreter Parameter der Module (Abmessungen, Werkstoffe) bezüglich günstiger Gestaltung der Integration (Mikrostrukturierung, Integrationstechnologie) sowie zulässiger Belastung, z.B. bei der Umformung, möglich sein. Betreffs Mikrostrukturierung zeigen Untersuchungen von A. Schubert und R. Pohl, TU Chemnitz, zur umformtechnischen Realisierung von Präzisionskavitäten

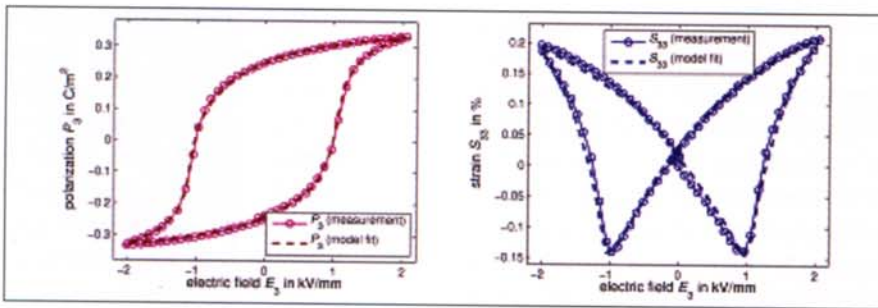


Bild 4 • Hysteresis der dielektrischen Polarisation und Schmetterlingskurve der mechanischen Dehnung im Vergleich zwischen Simulation und Messung

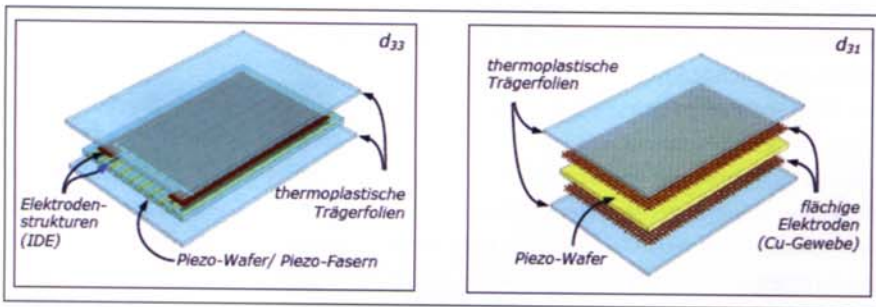


Bild 5 • Prinzipieller Schichtaufbau von TPM mit d_{33} - und d_{31} -Wirkprinzip

in Aluminiumlegierungen, dass dafür ein modulares Werkzeugsystem grundsätzlich nutzbar ist, dessen Weiterentwicklung besonders unter dem Gesichtspunkt des Werkstoffflusses beim Fließpressen erforderlich ist.

Nach **M. Herrmann, P. Belsky, S. Peter und F. Richter, TU Chemnitz**, liegt bei der Entwicklung von Isolatorschichten für metallbasierte Piezomodule der Schwerpunkt bei der Abscheidung sowohl elektrisch als auch mechanisch hochbelastbarer Dünnschichten auf mikrostrukturierten Leichtmetallträgern. Insbesondere die Sicherung der Funktionalität der Schichten auch auf den Seitenwänden der Mikrokavitäten stellt besonders hohe Anforderungen an das Beschichtungsverfahren. Dabei schließt die geringe thermische Belastbarkeit von Aluminium-Konstruktionswerkstoffen eine Anwendung thermisch aktivierter CVD-Verfahren aus. Orientiert wird auf einen Nichtgleichgewichtsprozess mittels plasmagestützter chemischer Dampfphasenabscheidung (PECVD). Bei geeigneter Parameterwahl können aus kohlenstoffhaltigen Precursoren (Methan oder Acetylen) sehr harte und isolierende a-C:H-Schichten erzeugt werden. Jedoch zeigte sich ein sehr ungünstiges Verhältnis der Abscheideraten auf Grabenwand und -boden, sodass bei Weiterentwicklung des Verfahrens die Ionenstromdichte auf die Grabenwände deutlich zu erhöhen ist. Ferner sind neben elektrischen Schichtparametern (Durchschlagsfeldstärke, Leckstromdichte) die me-

chanischen Eigenschaften der Isolatorschicht und des Isolator-Piezowerkstoff-Kontaktes zu optimieren.

Mittels laserstrahlbasierter elektrisch-mechanischer Kontaktierung von Piezokeramiken sollen dauerhaft zuverlässige Fügeverbindungen zwischen elektrodotierter Piezokeramik und den Zuleitungen realisiert werden. Eingesetzt wurden dafür von **F. Albert, M. Kastens, M. Schmidt und M. Geiger, Bayerisches Laserzentrum gGmbH**, folgende Verfahren: Laserstrahl-Mikrolöten, Laser Droplet Welding und zukünftig noch das Laserstrahl-Mikroschweißen, angewandt auf LTCC-Keramiken mit im Siebdruck aufgebrachtem Silber sowie durch Sputtern erzeugten CuNi-Metallisierungen. Mittels laserstrahlbasiertem Löten können bereits Fügestellen auf den metallisierten LTCC-Keramiken realisiert werden, die derzeit nach Temperaturlagerung, Temperaturwechsel und Klimatests auf ihre Langzeitstabilität untersucht werden. Im Gegensatz zu anderen Laserfügetechniken ist das Laser-Droplet Welding noch in der Entwicklungsphase.

Experimentelle und numerische Untersuchungen zu MFC-Metall-Schichtverbunden führten **R. Neugebauer, L. Lachmann, Th. Lieber, St. Meinel und R. Müller, Fraunhofer IWU, Chemnitz**, sowie **R. Kreißig, TU Chemnitz**, mit dem Ziel einer Integration spezieller MFC-Module in Blechstrukturen durch. Und das in der Weise, dass bei moderater Umformung die Funktionstüchtigkeit

der Piezo-Sensorik bzw. -aktorik trotz geringer mechanischer Umformbarkeit der Keramiken erhalten bleibt. Erste Experimente zeigten, dass eine „schwimmende Lagerung“ eines mittels teilgeliertem Klebstoff eingebetteten MFC eine Umformung des Schichtverbundes unter Beibehaltung der Funktionstüchtigkeit des Piezomoduls erlaubt. Weitere Ermittlungen der umformtechnischen Grenzen dieses Blech-MFC-Verbundes sind erforderlich.

Prozesskette Gießen

Entwicklungen piezokeramischer Laminate und Fasern zur Integration in Leichtbaustrukturen stellten **M. Flössel und U. Scheithauer, TU Dresden**, sowie **S. Gebhardt und A. Michaelis, Fraunhofer IKTS, Dresden**, vor. Dafür sollen die Piezolamine als Verbunde aus Piezokeramikschichten oder -platten und weiteren Funktionsschichten so realisiert werden, dass sie den Fertigungsschritt des Druckgießens schadungsfrei und funktionstüchtig überstehen. Die Piezofasern sollen in Thermoplast-Verbundstrukturen und in für Umformprozesse geeignete mikrostrukturierte Leichtmetall-Träger integriert werden, wofür Fasern verschiedener Geometrie mit optimierten Sensor- bzw. Aktoreigenschaften für eine schadungsarme Montage erforderlich sind. Die Entwicklung von Piezokeramikfasern mit Durchmesser größer 50 μm erfolgte nach dem Polysulfon-Verfahren auf Basis PZT-SKN Material („Sonox P 505“ von Fa. CeramTec). Durch gezielte Variation der Spinnbedingungen werden Fasern hergestellt, die frei von Vakuolen sind und nach dem Sintern nur noch eine Restporosität von etwa 6 % aufweisen.

Für die druckgusstechnische Integration piezokeramischer Module in Al-Bauteile entwickeln **V. Bräutigam, M. Rübner, C. Körner und R.F. Singer, Universität Erlangen-Nürnberg**, eine entsprechende Fertigungstechnologie für die Bauteile. Die Module (d_{31} -Wandler) bestehen aus einer monolithischen PZT-Folie, eingebettet in eine Polyimidmatrix. Durch diese Einbettung sind sie sehr schadenstolerant und können sogar auf gekrümmte Flächen appliziert werden. Beim Druckguss werden während der Formfüllphase die in die Kavität eingelegten Module aufgrund der schnell strömenden Schmelze dynamisch belastet und unterliegen in der Nachdruckphase noch einer hydrostatischen Belastung. Das erfordert eine entsprechende

Fixiertechnik, die in einer Ummantelung der Module mit Drahtgewebe oder Streckmetall besteht. Durch Variation der Anzahl an Streckmetalllagen beiderseits des Moduls oder durch Verwendung von Streckmetallen unterschiedlicher Geometrie kann eine außermittige Platzierung erzielt werden, die für bestimmte adaptiv-anatronische Anwendungen essenziell ist. Ein aktorischer Funktionsnachweis zeigte, dass die Module auch nach dem Gießprozess bei ca. 650 °C noch polarisiert vorliegen und die Polymereinbettung der Module den Gießprozess schädigungsfrei übersteht, dank der Kurzzeitigkeit der wirkenden Temperaturbelastung.

Zwecks numerischer Simulation und Charakterisierung piezokeramischer Module konzentrierten sich **M. Kaltenbacher, R. Lerch** und **Th. Hegewald, Universität Erlangen-Nürnberg**, auf zwei Schwerpunkte: Modellierung des nichtlinearen Verhaltens von Piezokeramiken und messtechnische Validierung des numerischen Verfahrens. Eine Berücksichtigung der nichtlinearen Abhängigkeiten von der elektrischen Feldstärke und der mechanischen Spannung in piezoelektrischen Werkstoffen stellt für die präzise numerische Simulation eine große Herausforderung dar. Bekanntlich äußern sich ferroelektrische Eigenschaften in Form einer Polarisationshysterese auf der elektrischen Seite und durch eine schmetterlingsförmige Dehnungshysterese auf der mechanischen Seite der Aktoren (Bild 4). Das entwickelte Hysteresemodell wurde in ein Finite-Elemente-Programm implementiert und anhand von Messungen an einem piezoelektrischen Stapelaktor, der zur Kraftstoffeinspritzung dient, messtechnisch validiert. Mittels sehr genauer FEM-Berechnungen eines in Al-Druckgusstechnik hergestellten Piezokeramik-Kunststoff-Metall-Verbundes hinsichtlich seiner Materialeigenschaften wurde nachgewiesen, dass die Piezokeramik beim Druckguss weder depolarisiert noch sonst irgendwie geschädigt wird.

Prozesskette Faserverbund

Numerische und experimentelle Studien zur systematischen Entwicklung thermoplastverbundkompatibler Piezokeramik-Module (TPM) werden von **W. Hufenbach, M. Gude, C. Kirvel** und **T. Heber, TU Dresden**, durchgeführt. Für den großserienfähigen Einsatz adaptiver Leichtbaukomponenten ist ein Übergang von der bisher montage- zur tech-

nologieorientierten Aktorintegration notwendig. Hierfür werden neuartige piezoelektrische Aktoren mit einer an das Verbundbauteil angepassten thermoplastischen Trägerfolie entwickelt (Bild 5). Sie sind für einen kontinuierlichen Fertigungsprozess geeignet und ermöglichen eine werkstofflich homogene Integration in faserverstärkte Thermoplastverbunde. Aufbauend auf theoretischen und experimentellen Untersuchungen zur Konzeption von d_{33} - und d_{31} -Piezokeramik-Modulen wurden vorteilhafte geometrische und werkstoffliche Gestaltungsvarianten neuer TPM erarbeitet. Begleitende Simulationsrechnungen und Fertigungsstudien belegen die Möglichkeiten zur gezielten Ausnutzung von Druckeigenstressungen in der Piezokomponente, zur beanspruchungsgerechten Metallisierung von thermoplastischen Trägerfolien mit strukturierten Elektroden hoher Dimensionsstabilität sowie zur nachträglichen Polarisierung der Piezokeramiken. **W. Hufenbach, O. Träger** und **A. Winkler, TU Dresden**, führten weiterhin Untersuchungen zur Integration von werkstoffkompatiblen Piezokeramik-Modulen in faserverstärkte Thermoplastverbunde durch. Ziel ist die Entwicklung eines durchgängigen Verarbeitungsverfahrens von endlosfaser- bzw. textilverstärkten thermoplastischen Faserverbund-Halbzeugen mit bereits vorkonvektionierten und thermoplastverbundkompatiblen TPM zu einem funktionsfähigen aktiven Bauteil. Dieses Direktverfahren basiert auf der Heißpresstechnologie und vermeidet so nachgeschaltete Fertigungsschritte, folglich sind kurze Zykluszeiten erreichbar. Wichtig sind dabei eine gezielte Positionierung sowie eine werkstoff- und verfahrensgerechte Integration der TPM. Zur Analyse des Einflusses verschiedener Prozessparameter auf das Interface zwischen Matrix, Verstärkungsmaterial und Piezokeramik wurden vielfältige Press- und Einbettungsversuche sowie begleitende Werkstoffcharakterisierungen durchgeführt, als Basis für eine werkstoff- und verarbeitungsgerechte Auslegung der heterogenen Faser-Matrix-Aktor-Verbunde, um lokale versagenskritische Verformungen der TPM während des Pressvorgangs auszuschließen.

Untersuchungen zur Polarisierung piezoelektrischer Keramiken unter Mehrfeldbelastung führten **A. Schönecker** und **M. Nicolai, Fraunhofer IKTS, Dresden**, zur Erforschung der Bedingungen für eine anwendungsgerechte Einstellung der Aktor- und Sensorfunktionen der Piezokeramik in Werkstoff-

verbunden durch. Dazu erfolgten experimentelle Untersuchungen zum Polarisations- und Deformationsverhalten (Einfluss von Temperatur und mechanischem Druck auf die Polarisierung) und die experimentelle Erkundung der Formierungs- und Schädigungsprozesse. Langfristiges Ziel ist die Erarbeitung experimenteller und theoretischer Methoden zur Auslegung der Polarisations-technologie für eine großserientaugliche Fertigung adaptiver Strukturkomponenten.

Resümee

Die nach 18 Monaten Bearbeitungszeit dargelegten Arbeitsergebnisse des Transregio 39 bestätigen einerseits die Richtigkeit des anvisierten Forschungsziels, zeigen aber andererseits auch die Fülle der noch im ersten Antragszeitraum bis 30. Juni 2010 zu lösenden Problemstellungen.

F. Kerbe

(Bildnachweis: 1, 2: TU Chemnitz; 3: Bayerisches Laserzentrum; 4: Uni Erlangen-Nürnberg; 5: TU Dresden)

RUSSIG
ERU FÖRDERTECHNIK

- Becherwerke*
- Schneckenförderer*
- Zellenradschleusen*
- Doppelwellenmischer*
- Verladegarnituren*
- Absperrorgane*

Komponenten für die Fördertechnik
bewährt seit über 50 Jahren

RUSSIG Fördertechnik GmbH & Co. KG
D-59269 Beckum · Auf dem Tigge 58
Telefon 025 21 / 1 40 91 · Fax 1 36 21
info@russig.de · www.russig.de