

Zerstörungsfreie Charakterisierung adaptiver CFK-Piezokeramik-Verbunde

(konventionelle Verfahren und health monitoring)

Dr.-Ing. habil. Jürgen Pohl, Magdeburg

Adaptive Werkstoffsysteme

Aus der belebten Natur ist eine Vielzahl von Systemen bekannt, die die Fähigkeit entwickelt haben, angepasst und zweckmäßig auf Veränderungen in ihrer Umwelt zu reagieren. Diese Eigenschaft soll künftig auf technische Objekte übertragen werden: das Ziel sind adaptive Systeme, die Informationen aufnehmen, über autonome, d. h. selbstregelnde Mechanismen reagieren und sich resultierend unterschiedlichen Betriebs- bzw. Umgebungsbedingungen anpassen. Wesentliche Anwendungsziele für adaptive Strukturen sind Formkontrolle, Geometriadaption, Schwingungsdämpfung, Lärmreduzierung und Feinstpositionierung [1-5].

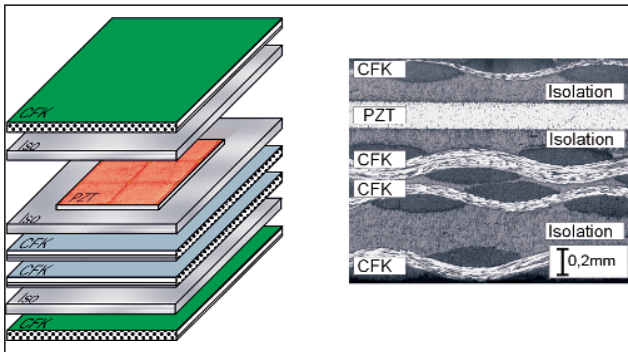


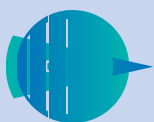
Bild 1: Aufbau adaptiver CFK-Komposite

Neben diesen mechanisch determinierten Aufgabenfeldern ist die Strukturüberwachung (health monitoring) ein weiteres maßgebliches Ziel.

Eine adaptive Struktur besteht aus einer lasttragenden, formgebenden Materialkomponente, kombiniert mit aktuatorischen/sensorischen Komponenten, deren Ansteuerungs- und Signalableitungssystem sowie den Regelungselementen und vorzugsweise künftig auch der Energieversorgung. Die Kombination in einem Werkstoff führt zu einem multifunktionalen adaptiven Werkstoffsystem, das neben den klassischen mechanischen Funktionen sensorische und aktuatorische Fähigkeiten einbezieht. Die mit konventionellen Werkstoffstrukturen zu verbindenden aktuatorischen bzw. sensorischen Komponenten werden stofflich durch spezielle Funktionswerkstoffe, z. B. Piezoelektrika, repräsentiert [1, 5, 6].

Die Integration der Funktionswerkstoffe in das Strukturkonzept stellt eine wichtige Herausforderung dar, da sie zusätzlich lasttragende Funktionen erfüllen müssen. Ziel ist eine strukturkonforme Kombination möglichst auf mikroskopischer Ebene mit maximaler Wirkungseffektivität.

Faserverstärkte Kunststoffe mit integrierten Piezokeramiken sind sowohl hinsichtlich der Herstellungsmöglichkeiten als auch ihrer Eigenschaften attraktive Werkstoffe für adaptive Strukturen. Sie verbinden Leichtbauprinzipien mit gezielten anisotropen Eigenschaften und adaptiven Fähigkeiten.



Gute Gründe, DGZfP-Mitglied zu werden:

- Sie sind immer aktuell informiert.
- Sie sparen Geld durch Ermäßigungen, z. B. bei Kursus- und Tagungsteilnahmen und beim Erwerb von DGZfP-Publikationen.
- Sie können etwas bewegen: Ihr Fachwissen wird gefordert bei aktiver Mitarbeit in unseren Ausschüssen und in den DGZfP-Arbeitskreisen.
- Der regelmäßige Bezug der ZfP-Zeitung ist im Mitgliederbeitrag enthalten.
- Wir veröffentlichen Ihre in der ZfP-Zeitung geschaltete Stellenanzeige auch im Internet.

Ein weiterer Grund: Die DGZfP vertritt die Interessen der in der ZfP beschäftigten Menschen!

Wenn Sie sich jetzt für eine Mitgliedschaft entscheiden und dies auf der Anmeldung für eine DGZfP-Veranstaltung vermerken, gelten für Sie sofort die Mitgliederermäßigungen.

Wir freuen uns auf Ihre aktive Mitarbeit als unser Mitglied.

Weitere Informationen zur Mitgliedschaft finden Sie im Internet:

www.dgzfp.de/?page=verein/mitglied

Eine Variante eines solchen Werkstoffsystems sind Komposite aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff (CFK) mit integrierten dünnen Piezokeramikfolien [5, 7]. Bild 1 zeigt anhand eines Schemas und eines Mikroschliffs ein typisches Beispiel, bei dem Piezoelemente aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) in ein CFK-Laminat eingebunden sind. Schichten aus Polyestervlies sorgen für die notwendige elektrische Isolierung gegen die leitfähigen Kohlenstoffaserschichten.

Variationen des Aufbaus betreffen die Schichtanzahl und -folge, den Einsatz unterschiedlicher Ausgangsmaterialien (unidirektional, Gewebe, Vlies) und die elektrische Kontaktierung der Piezokeramik. Neben der Integration der Piezoelemente ist auch deren oberflächliche Applikation eine weitere Strukturvariante.

Zerstörungsfreie Charakterisierung

Strukturelle und adaptive Funktionsfähigkeit werden durch in Herstellung und im Einsatz generierte Defekte bis zum Versagen beeinträchtigt. Ursachen sind separate oder kombinierte mechanische, thermische und elektrische Belastungen. Adaptive CFK-Strukturen zeichnen sich dabei durch eine Vielzahl möglicher Defektarten und variierende Schädigungsmechanismen aus. Bild 2 zeigt schematisch typische Beispiele von wichtigen Materialdefekten.

Durch eine zerstörungsfreie Charakterisierung müssen die relevanten Defekte und Struktureigenschaften sicher erfasst werden. So ist z. B. aus dem Einsatz konventioneller CFK-Strukturen bekannt, dass ein visuell kaum erkennbarer Impactschaden (barely visible impact damage) mehr als 50% Verlust der statischen Festigkeit bewirken kann [8].

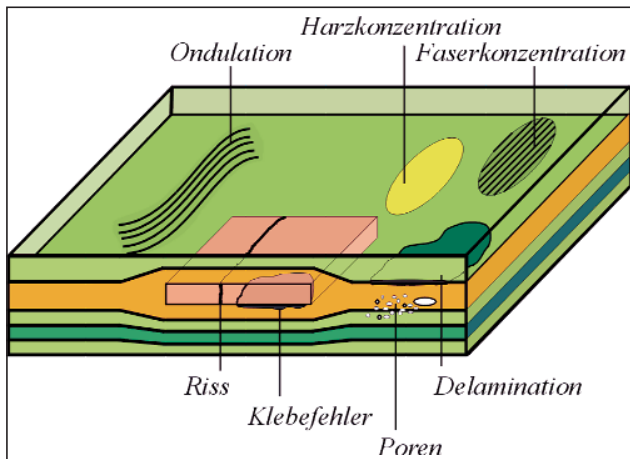


Bild 2: Typische Defekte in adaptiven CFK-Kompositen

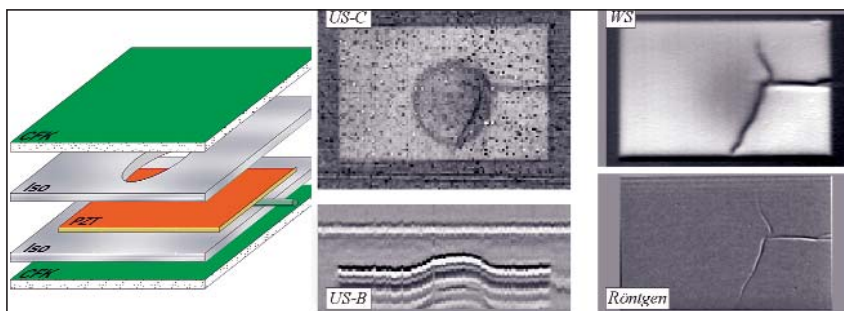


Bild 3: Verformung und Risse in einer Piezokeramik durch die Kontaktierung: Aufbauschema links, Ultraschall-C- und B-Bild Mitte, Wirbelstrom- und Durchstrahlungsbild rechts

Neben Defekten sind in Entwicklung und Herstellung qualitätsbestimmende Strukturparameter wie z. B. Dicken und Laminatschichtdicken, Komponentenpositionen, Faserorientierung oder Lagenaufbau zu ermitteln. In Forschung und Entwicklung stehen die Optimierung des Werkstoffsystems und der Herstellungstechnologie im Mittelpunkt.

Besondere Bedeutung kommt den Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung für die Entwicklung von Schadens-toleranzkonzepten zu [9]. Schadenstoleranzkonzepte erfordern sowohl die Einschätzung der Defektauswirkung auf das mechanische Verhalten der Struktur unter Einbeziehung der Material-, Objekt-, Beanspruchungs- und Umgebungskennwerte als auch die Kenntnis der Defektarten, der Schädigungsmechanismen, des Schädigungsfortschritts und des Versagensverhaltens.

Mit Hilfe zerstörungsfreier Charakterisierungsverfahren werden relevante Fehlstellen nachgewiesen, geortet und ihre Größe, Geometrie und Orientierung bestimmt. Darüber hinaus wird zur Aufdeckung von Schädigungsmechanismen und der Verfolgung des Fehlerwachstums beigetragen.

Infolge der ausgeprägten Heterogenität des Verbundes, der Anisotropie und des laminaren Aufbaus sowie durch die Vielfalt und Komplexität der Defekte ist kein zerstörungsfreies Prüfverfahren allein in der Lage, das Werkstoffsystem umfassend zu beurteilen. Konventionelle Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung wie Ultraschall-, Durchstrahlungs-, Wirbelstrom- und Thermografieverfahren ergeben ein komplementäres, z. T. redundantes Ergebnisbild. Mechanische Resonanz- und Impedanzverfahren und die optische Interferometrie sind gleichermaßen einzuordnen. Schallemissionsanalyse, elektrische und Röntgenfeinstrukturverfahren sind besonders befähigt, mikrostrukturelle Schädigungen im Anfangsbereich der Materialdegradation zu detektieren.

Zum Nachweis relevanter Defekte sind vorteilhaft hochauflösende bildgebende Prüfverfahren mit unterschiedlichen Wechselwirkungsmechanismen einzusetzen, die durch komplementäre Informationen eine umfassende Aussage liefern [10].

Das erste Beispiel dokumentiert hierfür die Auswirkungen von Kontaktierungsvarianten der piezokeramischen Folien bei Modellstrukturen. Im Bild 3 links ist eine Variante dargestellt, bei der ein Fenster in der Isolierschicht den Kontakt zur leitfähigen CFK-Lage als gemeinsamer Elektrode für mehrere Aktuatoren herstellt. Rückseitig erfolgt der Kontakt über ein Kohlenstofffaserbündel (Roving). Roving und Kontaktfenster verursachen eine inhomogene Druckverteilung während des Aushärtens. Eine daraus resultierende Verformung der Piezokeramik zeigen die Ultraschall- und Wirbelstrombilder, wobei die Deformationsgrad bei Kenntnis der Schallgeschwindigkeit der Systemkomponenten mit hoher Genauigkeit (bis 20 µm) bestimmt werden kann.

Zusätzlich bewirkt die Deformation die Bildung von Rissen, die vollständig in den Röntgen- und Wirbelstrombildern erkennbar werden.

Zusätzlich bewirkt die Deformation die Bildung von Rissen, die vollständig in den Röntgen- und Wirbelstrombildern erkennbar werden.

Ein weiteres Beispiel ist der Nachweis und die Charakterisierung von Poren. Adaptive CFK-Strukturen weisen sowohl in der Piezokeramik als auch in der CFK/Isolationsmaterial-Matrix herstellungsbedingt Poren auf. In zu großer Konzentration beeinträchtigen sie die mechanischen Eigenschaften und tragen zur Entwicklung von anderen Schädigungen unter Belastung bei.

Porenansammlungen sowohl im Isolationsvlies als auch innerhalb von CFK-Lagen sind mittels Ultraschallprüfung in der Regel gut detektierbar, da sie (in Abhängigkeit von Porenkonzentration und -größe) zu deutlichen Veränderungen der örtlichen Reflexions- bzw. Streuverhältnisse führen können. Quantifizierte Aussagen zum Porengehalt sind über Schallgeschwindigkeitsmessungen möglich.

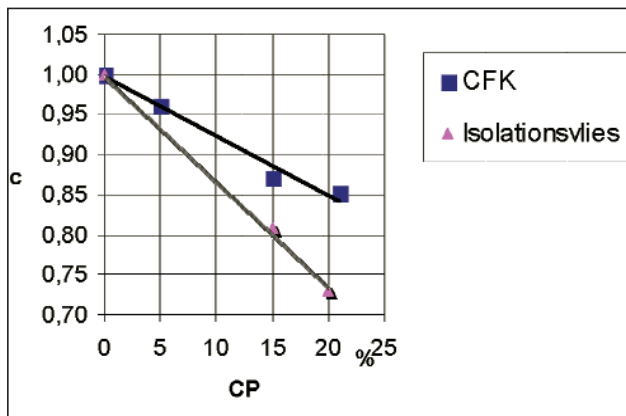


Bild 4: Normierte Schallgeschwindigkeiten *c* in Abhängigkeit vom Porengehalt CP im CFK und im Isolationsvlies

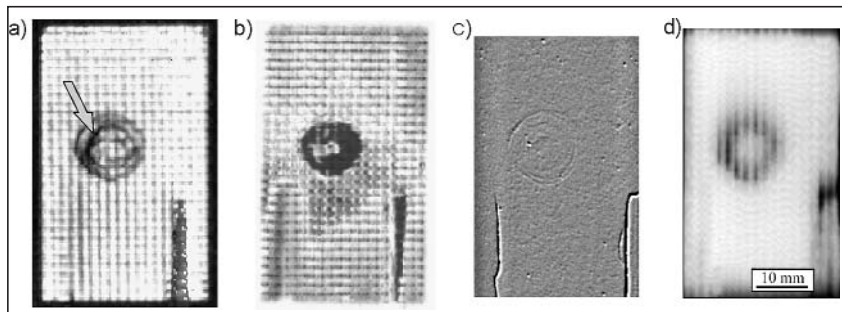


Bild 5: Schädigungen durch einen 0,5 J-Impact: a) Ultraschall-C-Bild Rückseite, b) Ultraschall-C-Bild Impactseite, c) Durchstrahlungsbild, d) Wirbelstrombild

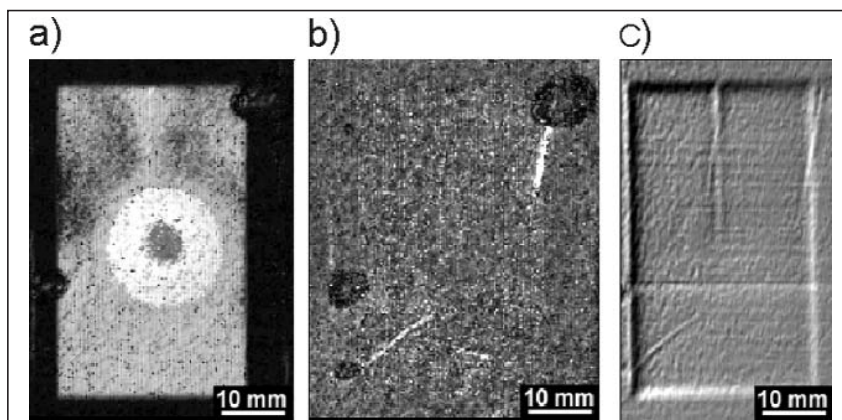


Bild 6: elektrische Durchschläge in einer adaptiven Struktur: a) und b) Ultraschallbilder, c) Wirbelstrombild

Die Variation der relativen Schallgeschwindigkeit für eine Änderung des Porengehaltes im CFK und im Isolationsvlies adaptiver CFK-Strukturen zeigt das Bild 4.

Die komplementäre Aussagefähigkeit unterschiedlicher Prüfverfahren machen auch die Ergebnisbilder von Impactschäden anhand der dargestellten Schadensdetails im Bild 5 offensichtlich.

Der Impact auf ein Objekt mit lediglich 0,5 J Energie im Bereich der integrierten Piezokeramik führte zu keinen visuell detektierbaren Schädigungen. Hingegen zeigen die Durchstrahlungsaufnahme und das Ultraschallbild von der impactabgewandten Seite ein ringförmiges Rissnetzwerk in der Piezokeramik um die Impactstelle.

Das Wirbelstrombild zeichnet ein analoges Bild, das die ringförmige Schädigung der Metallisierungsschicht der Piezokeramik wiedergibt. Zusätzlich konnte durch die Ultraschallprüfung eine schmale sichelförmige Delamination zwischen CFK- und Isolationsvlies detektiert werden, die im Bild durch den Pfeil gekennzeichnet ist.

Die Ultraschallprüfung von der Impactseite zeigt schließlich, dass auf dieser Seite eine ringförmige Delamination an der Piezokeramik entstanden ist. Das Schlibbild bestätigte die detektierten Schädigungen, wobei eine leichte Schräglage der Risse in der Piezokeramik konstatiert wurde, was ihre gute Detektierbarkeit bei der Ultraschall-Senkrechtenschallung erklärt.

In adaptiven CFK-Strukturen können zu den Schädigungen durch herkömmliche mechanische Beanspruchung auch neuartig Defekte in Folge von elektrischen Beanspruchungen auftreten. Überschreitet die Ansteuerspannung von Piezoaktoren das Isolationsvermögen der elektrisch isolierenden Strukturkomponenten oder existieren leitfähige Kanäle, kommt es zu elektrischen Durchschlägen, die durch thermische Einwirkung die Gesamtstruktur schädigen.

Das Bild 6 verdeutlicht dies am Beispiel eines eingebetteten piezokeramischen Aktuators.

Die Ultraschall-C-Bilder a) und b) aus unterschiedlichen Tiefenebenen zeigen die Durchschlagstellen zwischen den Ansteuerleitungen und der Piezokeramik als dunkle Gebiete an den Piezokeramikanten.

Gleichzeitig werden in beiden Teilbildern von den Durchschlagstellen ausgehende Linien sichtbar, die (im Wirbelstrombild durch ihr Leitfähigkeitsverhalten, bei den Ultraschallergebnissen durch ihr Reflexionsvermögen) eindeutig als unerwünschte Kohlenstoffaeroversing zu identifizieren sind.

Damit konnte das elektrische Versagen auf Mängel der Herstellungstechnologie zurückgeführt werden.

Health monitoring

Ein attraktives Ziel ist die Entwicklung interner kontinuierlicher Methoden, die mit dem Begriff health monitoring beschrieben werden. Es stellt einen neuartigen Ansatz der Strukturdiagnostik dar, der mittels eines Netzwerks hochintegrierter Sensoren/Aktuatoren kontinuierlich Schädigungsdetektion und Beobachtung des Strukturzustandes während des Einsatzes realisiert [1, 4, 11, 12].

Adaptive CFK-Piezokeramik-Verbunde bieten hierfür durch ihre sensorische und aktuatorische Funktionalität die notwendigen Voraussetzungen.

In Analogie zu den klassischen Verfahren der zerstörungsfreien Charakterisierung hat das health monitoring neben der Detektion der Schädigungen die weiterführenden Auf-

gabenstellungen der Ortung und Größenbestimmung von Inhomogenitäten bis hin zur Bewertung, beispielsweise in Form einer Bestimmung der Restlebensdauer.

Durch das health monitoring gelingt es, von der traditionellen periodischen Instandhaltung zu einer zustandsorientierten Instandhaltung überzugehen und zu einer vorhersagenden und präventiven Wartung zu gelangen.

Ausgehend von konventionellen Charakterisierungsverfahren der zerstörungsfreien Prüfung lässt sich der Entwicklungsweg zum health monitoring, wie im Bild 7 dargestellt, beschreiben [13].

Die erste Stufe repräsentiert konventionelle Verfahren. Die erforderlichen diagnostischen Signale werden von externen Systemen, entweder punktförmig und scannend oder flächenhaft generiert. Gleichfalls extern ist die Erfassung der Signale nach der Wechselwirkung mit dem Objekt.

Das Bild stellt beispielhaft eine Situation dar, die typisch für eine Ultraschall- oder Wirbelstromprüfung ist. In einer zweiten Stufe kann das adaptive Objekt aktiv an der Generierung der Signale beteiligt werden.

Eine geeignete elektrische Anregung bewirkt unterschiedliche aktuatorische Effekte: Die Piezokeramik strahlt elastische Wellen z. B. als Ultraschall ab; es kommt zur Erzeugung von Wärmestrahlung und es werden elektromagnetische Felder von Leitern produziert. Diese Signale können von externen Wandlern erfasst, bildhaft dargestellt und ausgewertet werden.

Mit diesen aktiven Prüftechniken ist eine Bewertung der Aktivität der Piezokeramik möglich.

Darüber hinaus lassen sich auch strukturelle Merkmale in der Umgebung der Piezokeramik erfassen. Der dritte Schritt schließlich ist das oben beschriebene health monitoring, hier in der Form, dass der integrierte Wandler die diagnostischen Signale aktuatorisch erzeugt, die von den verteilten Sensoren des Netzwerkes empfangen werden.

Ein Beispiel aktiver Prüftechniken ist die aktive Thermografie, bei der die Wärmeerzeugung in der adaptiven Struktur genutzt wird.

Der Umsatz von elektrischer Energie in Wärme durch dielektrische und mechanische Dissipation sowie ohmsche Erwärmung bilden die Grundlage hierfür. Während bei niedrigen Frequenzen die piezoelektrischen Komponenten maßgeblich die Wärmeerzeugung dominieren, ist im Bereich hoher Frequenzen die durch die Resistenzen der Kontakte und Leitungen bedingte ohmsche Erwärmung von Bedeutung.

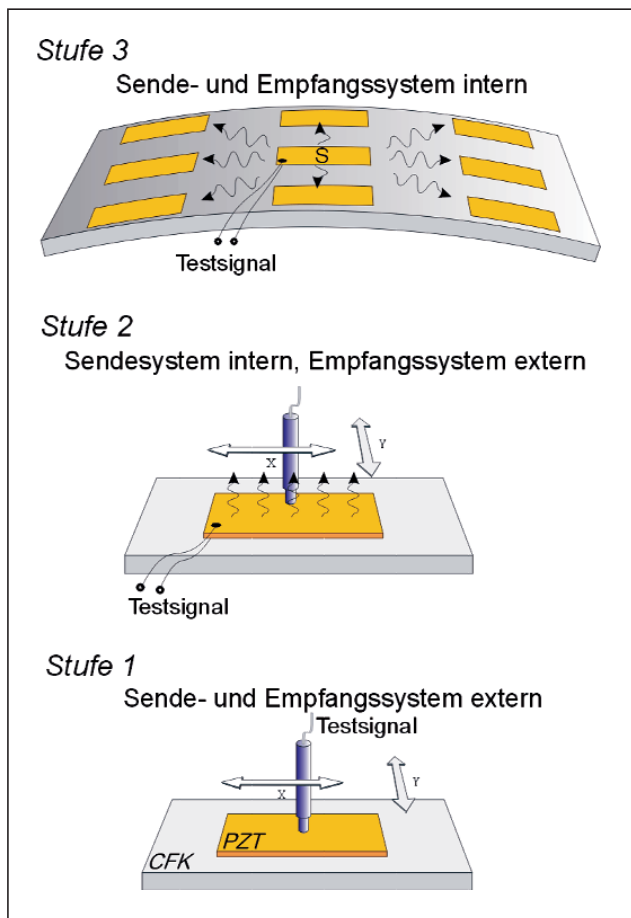


Bild 7: Schritte auf dem Weg zum health monitoring

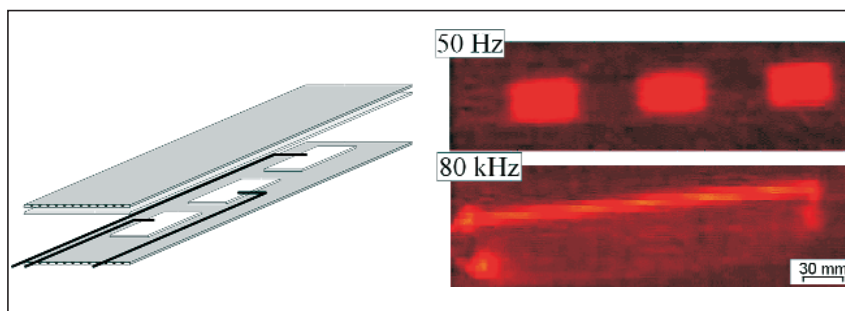


Bild 8: Thermografiebilder einer elektrisch angeregten adaptiven CFK-Struktur: untersuchte Struktur, Anregung mit 50Hz, Anregung mit 80kHz

Damit werden, wie im Bild 8 sichtbar, je nach eingesetzter Anregungsfrequenz entweder nur die Piezokeramiken oder die Zuleitungen im Thermografiebild sichtbar. Besonders perspektivreich ist diese Untersuchungsmethode folglich für die Bewertung der elektrischen Kontaktierung.

Aussichtsreiche Varianten für das health monitoring bei Piezokeramik-CFK-Verbunden sind die Impedanzspektroskopie und aktive bzw. passive Verfahren auf Basis von LAMBwellen [4, 11].

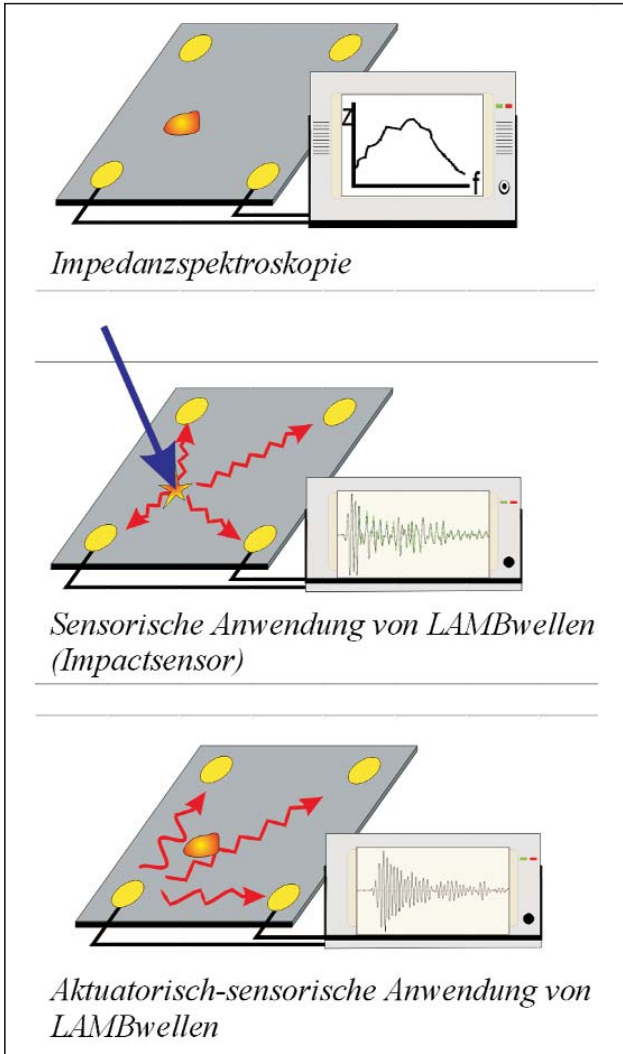


Bild 9: Health monitoring-Varianten für Piezokeramik-CFK-Verbunde

Das Bild 9 zeigt schematisch die Grundprinzipien dieser Verfahren.

Die auf Erfassung der gekoppelten elektro-mechanischen Impedanz basierende Impedanzspektroskopie ist bevorzugt auf eine lokalisierte Charakterisierung ausgerichtet [14].

Das Bild 10 demonstriert ein Beispiel schädigungsinduzierter Impedanzänderungen in einer adaptiven Modellstruktur mit applizierten runden Piezokeramiken.

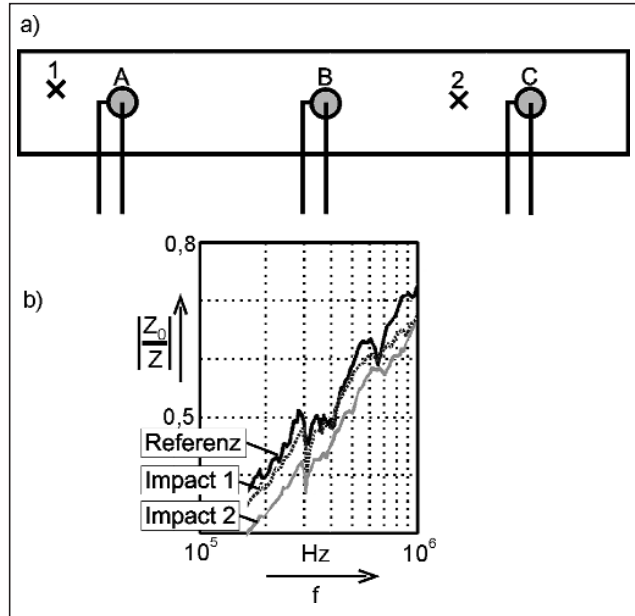


Bild 10: Sequentielle Impacts auf Streifenprobe mit applizierten Piezokeramiken a) Probendesign und Impactpositionen, b) Impedanzmessung mittels Piezokeramik A

Diese Struktur wurde durch sequentielle Impacts an verschiedenen Positionen geschädigt, die zu Delaminationen führten. Der Verlauf der an der Piezokeramik A gemessenen Impedanz dokumentiert den progressiven Schädigungsprozess durch die Veränderung von Lage und Form der Kurve. Die sequentiellen Impacte verursachten zusätzlich zu den Schädigungen am Impactort Anrisse und Risse in der applizierten Piezokeramik, die die Piezokeramik in einzelne Teilflächen auflöste. Die damit verursachte Abnahme der Kapazität nach dem letzten Impact auf ca. 50% des Ausgangswerts erklärt die schrittweise Verschiebung der Admittanzkurve zu niedrigeren Werten.

Bei der aktuatorisch-sensorischen Nutzung von LAMBwellen generieren und empfangen flächenhaft verteilte Aktuatoren bzw. Sensoren die Signale zur zerstörungsfreien Charakterisierung. Die rein sensorische Anwendung detektiert die im Schädigungsprozess generierten LAMBwellen. In beiden Fällen können größere Objektbereiche erfasst werden. Es sind die komplexen Eigenschaften von LAMBwellen in adaptiven CFK-Strukturen zu berücksichtigen.

So können, wie Bild 11 a) zeigt, von integrierten Piezokeramiken sowohl der asymmetrische Grundmode a_0 als auch

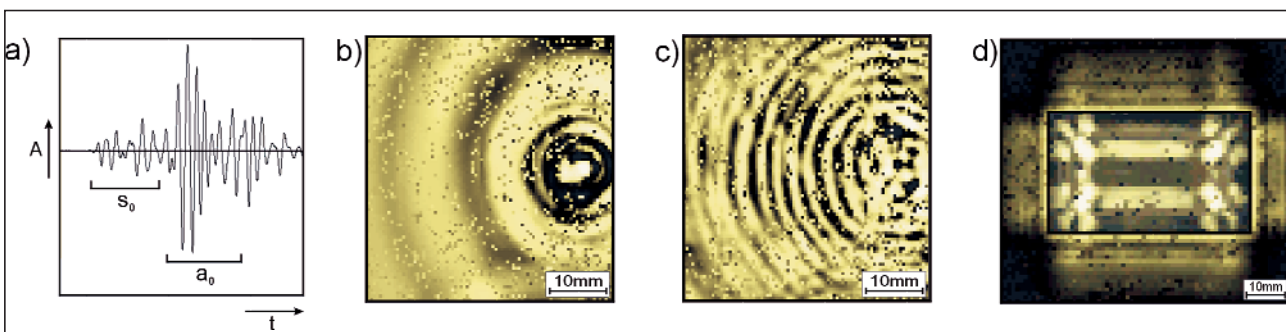


Bild 11: LAMBwellenfelder: a) A-Bild, b) s_0 -Feld einer runden Piezokeramik, c) a_0 -Feld einer runden Piezokeramik, d) Feld einer rechteckigen Piezokeramik

der symmetrische Grundmode s_0 generiert werden. Als gemeinsamer Quellort tritt die Kante der Piezokeramik auf.

Die Schallfeldform des von der Piezokeramik abgestrahlten LAMBwellenfeldes wird von der geometrischen Form des Senders definiert. Ein rechteckiger Wandler hat ausgehend von den Kanten eine markante Richtcharakteristik des LAMBwellenfeldes zur Folge, die in den Diagonalenrichtungen stark verminderte Amplituden aufweist.

Im Bild 11 d) ist die Größe der Piezokeramik durch ein Rechteck markiert. Hingegen erzeugt eine runde Piezokeramik erwartungsgemäß ein zirkulares Wellenfeld, das in den Bildern 11 b) und c) für die beiden Grundmoden abgebildet ist.

Für die Nutzung von LAMBwellen sind ferner ihr Ausbreitungsverhalten und die Wechselwirkungen mit Reflektoren zu beachten. Die ausgeprägte Beeinflussung von Schwächung und Geschwindigkeit der LAMBwellen in adaptiven CFK-Strukturen durch Materialaufbau, Geometrie und Randbedingungen muss bei der Gestaltung aktiver oder passiver health monitoring-Systeme unbedingt einbezogen werden.

Auf dem Weg zum health-monitoring besteht insgesamt noch deutlicher Forschungsbedarf hinsichtlich der Struktureigenschaften, der Fehlerauswirkungen auf mechanische, sensorische und aktorische Eigenschaften, zur Signalentstehung, -ausbreitung, -erfassung und -verarbeitung sowie zur Quantifizierung und Bewertung der Schädigungen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die gezeigten Beispiele dokumentieren die Vielfältigkeit der zerstörungsfreien Charakterisierung adaptiver CFK-Komposite. Die Mannigfaltigkeit der Inhomogenitäten und Komplexität der Strukturen erfordern adäquate Mittel zu ihrer Untersuchung. Perspektivreich erscheinen Methoden, die die inhärenten aktiven Fähigkeiten der Strukturen zur Funktions- bzw. Strukturdiagnose nutzen.

Infolge der ausgeprägten Heterogenität des Verbundes, der Anisotropie und des laminaren Aufbaus sowie durch die Vielfalt und Komplexität der Defekte ist kein zerstörungsfreies Prüfverfahren allein in der Lage, das Werkstoffsystem umfassend zu beurteilen. Konventionelle Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung ergeben ein komplementäres, z. T. redundantes Ergebnisbild.

Die zerstörungsfreie Charakterisierung adaptiver CFK-Strukturen erfordert eine Optimierung des Verfahrenseinsatzes unter Abwägung der komplementären und redundanten Eigenschaften der Prüfverfahren sowie die Anpassung an die spezifischen Besonderheiten der untersuchten Objekte. Die hohe Variabilität und Individualität adaptiver CFK-Strukturen ist hierbei zu beachten.

Durch die aktuatorischen und sensorischen Komponenten werden in adaptiven CFK-Piezokeramik-Verbunden neuartige, über konventionelle Möglichkeiten hinausgehende Chancen zur zerstörungsfreien Charakterisierung eröffnet. Ziel ist dabei das health monitoring als interne kontinuierliche Überwachung.

Literatur

- [1] Rogers, C. A.: Science of Machine Journal, 46 (1994) 9, 977-983
- [2] Janocha, H. (Ed.): Adaptronics and smart structures: basics, materials, design, and applications. Berlin (u. a.) Springer, 1999, ISBN 3-540-61484-2
- [3] Spillman, W. B.; Sirkis, J. S.; Gardiner, P. T.: Smart Mater. Struct. 5 (1996) 247-254
- [4] Schmidt, W.; Boller, C.: AGARD Conf. Proc. 531, Sect. 1, 1992, 1-14
- [5] Hanselka, H.: K. Schulte und K. U. Kainer (Hrsg): Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Wiley VCH, 1999, 557-569
- [6] Hornbogen, E.; Mertmann, M.: Werkstoffwoche '96, DGM-Informationsgesellschaft, 1997, 117-124
- [7] Wada, B. K.; Fanson, J. L.; Crawley, E. F.: J. Intell. Mater. Struct. 1 (1990) 157-174
- [8] Baker, A. A.; Jones, R.; Callinan, R. J.: Composite Structures 4 (1985) 15-44
- [9] Blumenauer, H.; Dehne, G.; Michel, F.; Mook, G.; Pohl, J.: Intern. J. Mat. Product Technol. 14 (1999), Nr. 2/4, 291-303
- [10] Mook, G.; Pohl, J.; Hilbig, A.; Köser, O.: Adaptive Werkstoffsysteme -Zerstörungsfreie Charakterisierung von Herstellungsfehlern in CFK-Piezokeramik-Verbunden. Materialprüfung 39 (1997) 10, S. 395-401
- [12] Egawa, K.: Intern. Workshop on Struct. Health Mon. 1997, Ed. Fu-Kuo-Chang, Technomic Publ. 1997, 603-614
- [11] Chang, F.-K.: ICCM12, Paris, 1999, paper 799
- [13] Pohl, J.; Mook, G.; Michel, F.; Benziger, T.: Adaptronic Congress 99, 3.-4.03.99 in Potsdam, Conf. Proc. 34 - 44
- [14] Pohl, J.; Herold, S.; Mook, G.; Michel, F.: Smart Mat. Struct. 10 (2001) 834-842

Der Autor:

Dr.-Ing. habil. Jürgen Pohl, geb. 1957, studierte Werkstofftechnik und promovierte an der TU Magdeburg.

Nachfolgend arbeitete er im Schwermaschinenbau SKL Magdeburg im Qualitätswesen und war ab 1991 Dozent bei der DGZfP in Berlin.

1995 bis 2001 Tätigkeit am Institut für Werkstofftechnik und Werkstoffprüfung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Ab 2002 bei der Fa. PLR GmbH Magdeburg.

2003 Verteidigung der Habilitation.

