

Schädigungsanalyse an textilverstärkten Verbundwerkstoffen auf Basis aktiver und passiver akustischer ZfP-Verfahren

Werner HUFENBACH, Heiko RICHTER, Richard PROTZ, Albert LANGKAMP, Robert BÖHM, Thomas RITSCHHEL, TU Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Dresden

Kurzfassung. Zur Beschreibung des sukzessiven Versagensverhaltens textilverstärkter Verbundwerkstoffe bieten sich werkstoffgerechte Versagensmodelle an, die zum einen zwischen den globalen Versagenstypen Faser- und Zwischenfaserbruch sowie verschiedenen Subbruchmoden differenzieren und zum anderen die Degradation relevanter Materialkennwerte berücksichtigen. Aufgrund vereinfachter Annahmen in Bezug auf Wellenausbreitungseffekte und Werkstoffdämpfung können die anisotropen Steifigkeitskenngrößen auf Basis direkter Laufzeitmessungen mittels Ultraschallwellen hinreichend genau bestimmt werden. Mit der Anfertigung einer geeigneten Schwenkvorrichtung konnte eine hybride Prüfmethode bestehend aus Tauch- und Kontaktankopplungstechniken realisiert werden, welche eine direkte Messung der reduzierten Steifigkeiten eines orthotropen Materials ermöglicht und damit die Basis zur experimentellen Bestimmung des Schädigungstensors bildet.

Zur Verifizierung entsprechender Schädigungsmodelle ist ferner die eindeutige Identifizierung der Versagensmechanismen eine wesentliche Voraussetzung, wobei beispielsweise Faser- und Grenzflächenbrüche sehr starke Schallemissionen erzeugen. Daher stellt die Schallemissionsprüfung eine gute Möglichkeit dar, die graduellen Versagensvorgänge in textilverstärkten Verbundstrukturen online zu erfassen. Auf Basis experimenteller Untersuchungen im Rahmen statischer, dynamischer und hochdynamischer Werkstoffprüfungen können durch die Korrelation des zeitlichen Verlaufes der Schädigungsphänomenologie mit akustischen Aktivitäts- und Intensitätsparametern sowie mechanischen Basiskennwerten in Abhängigkeit vom Faserverbundmaterial kritische Schädigungsphasen charakterisiert werden.

Damit stehen aktive und passive volumensensitive akustische zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Verfügung, welche die experimentelle Verifizierung einschlägiger Berechnungsmodelle zur Beschreibung der sukzessiven Schädigung von textilverstärkten Verbundstrukturen erlauben.

1 Einführung

Die systematische Entwicklung hoch beanspruchter Leichtbaustrukturen aus 3D-textilverstärkten Verbundwerkstoffen mit polymeren, metallischen und keramischen Matrices erfordert gesicherte Dimensionierungskonzepte, die insbesondere das äußerst komplexe Versagensverhalten sowie die daraus resultierenden Degradationsmechanismen wirklichkeitsnah erfassen müssen. Die verbundübergreifende Schädigungsanalyse heterogener Faserverbundwerkstoffe bereitet allerdings aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Bruchmechanismen sowie material- und herstellungsbedingter Einflüsse wie beispielsweise der Fasertyp, das Matrixmaterial, die Art der textilen Verstärkungsarchitektur oder die verwendete Fertigungstechnologie erhebliche Schwierigkeiten. Zur Beschreibung des sukzessiven

Versagensverhaltens faser- und textilverstärkter Verbundwerkstoffe bieten sich daher verbundgerechte Versagens- und Schädigungsmodelle auf analytischer und numerischer Basis an, die zum einen zwischen den globalen Versagenstypen Faser- und Zwischenfaserbruch sowie unterschiedlichen Subbruchmoden unterscheiden und zum anderen die sukzessive Degradation relevanter Materialkennwerte berücksichtigen [1-3].

Die Verifizierung dieser eigens entwickelten Versagensmodelle sowie die experimentelle Ermittlung relevanter Materialkennwerte erfolgt am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) mit Hilfe einer verfahrensübergreifenden Werkstoffanalyse, in dessen Rahmen neben werkstoffmechanischen und –physikalischen Untersuchungen auch zerstörungsfreie Prüfverfahren wie beispielsweise optische Untersuchungsmethoden [4], akustische Prüfmethode [5, 6], thermoanalytische Verfahren oder Durchstrahlungsprüfungen zum Einsatz kommen. Dabei eignen sich insbesondere volumensensitive aktive und passive akustische zerstörungsfreie Prüfverfahren (Bild 1) wie etwa die Schallemissionsanalyse (AT) und das Ultraschallverfahren (UT), welche auf der Ausbreitung elastischer Wellen in einem Werkstoff beruhen, für eine systematische Analyse des sukzessiven Versagensverhaltens von textilverstärkten Verbundstrukturen unter statischer, dynamischer und hochdynamischer Belastung.

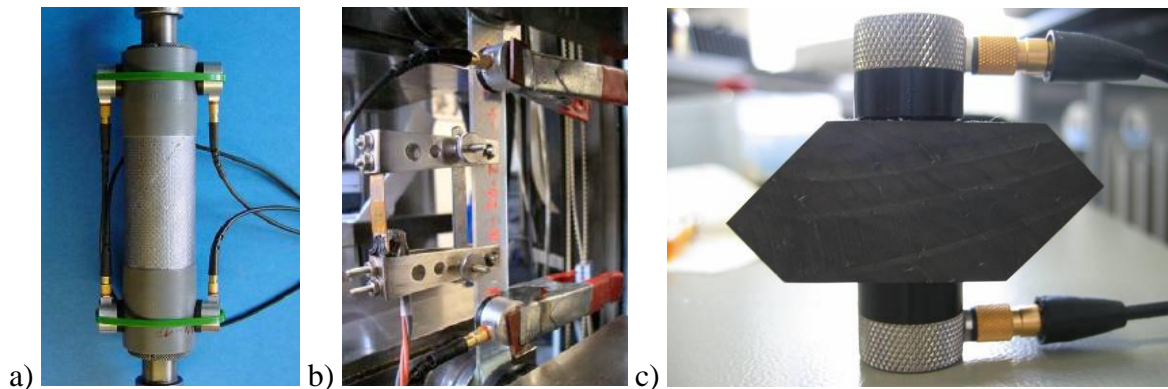


Bild 1. Schallemissionsuntersuchungen an textilverstärkten Keramiken (a) und glasfaserverstärkten Kunststoffen (b) sowie Ultraschall-Laufzeitmessungen an kohlenstofffaserverstärkten Polymeren (c)

Die hier vorgestellten experimentellen Untersuchungen geben einen kurzen Einblick in potentielle Anwendungsmöglichkeiten aktiver und passiver akustischer Prüfverfahren bei der Schädigungsanalyse an textilverstärkten Verbundmaterialien. Neben simultan durchgeführten Schallemissionsuntersuchungen an textilverstärkten Duro- und Thermoplasten bei quasistatischen Zug- und Biegeprüfungen sowie hochdynamischen Impacttests wurden auch Ultraschall-Laufzeitmessungen zur Ermittlung elastischer Materialkennwerte an textilarmierten Kunststoffen erfolgreich durchgeführt.

2 Sukzessive Schädigungsanalyse an 3D-textilverstärkten Kunststoffen

Zur analytischen und experimentellen Analyse des sukzessiven Versagensverhaltens textilverstärkter Faserverbundstrukturen wurden unterschiedliche multiaxial verstärkte CF/PEEK-Verbundwerkstoffe unter quasistatischer Zugbeanspruchung untersucht und deren zeit- und bruchmodeabhängige Versagensvorgänge mit Hilfe der Schallemissionsprüfung simultan aufgezeichnet (Bild 2a). Auf Basis der experimentellen Ergebnisse ist festzustellen, dass mit dem Einsatz der Schallemissionsanalyse selbst bei einem quasi linear-elastischen Verformungsverlauf Rissinitiierungspunkte, in denen der Schädigungsprozess einsetzt, objektiv bestimmt werden können. Ferner dient diese akustische Prüfmethode zur

Erfassung des sukzessiven Schädigungsfortschrittes und dokumentiert das Erreichen eines kritischen Schädigungsstadiums beispielsweise beim Übergang von einem kontinuierlichen zu einem progressiven akustischen Aktivitäts- und Intensitätsverhalten [7]. Des Weiteren kann das katastrophale Endversagen durch einen stark exponentiellen Anstieg der akustischen Aktivität, begleitet von einem schmalen, hochenergetischen Intensitätsband, bereits weit vor dem endgültigen Versagen diagnostiziert werden.

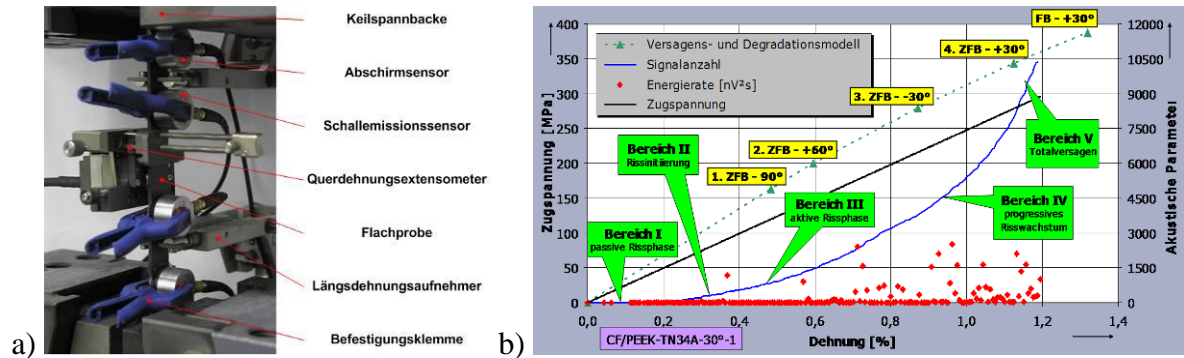


Bild 2. a) Experimenteller Versuchsaufbau für Schallemissionsmessungen, b) anhand akustischer Kenngrößen ermittelte charakteristische Schädigungsphasen eines textilverstärkten CF/PEEK-Verbundes

Aufgrund der registrierten Schallemissionen konnte das Schädigungsverhalten der untersuchten CF/PEEK-Verbunde hinsichtlich ihres akustischen Aktivitäts- und Intensitätsverhaltens in ein elementares Modell mit fünf charakteristischen Schädigungsphasen unterteilt werden (Bild 2b). Das erste Stadium, die so genannte passive Rissphase, ist mit dem Auftreten vereinzelter Schallemissionen niedriger Amplitude und geringer Energie verbunden, was auf herstellungsinduzierte Inhomogenitäten sowie diffuse Schädigungsmechanismen im Verbundmaterial hindeutet. Technisch relevante Schädigungen sind hier nicht zu erwarten. In der zweiten Phase treten Schallereignisse mit mittleren Amplitudenstärken und einer konstanten Energiefreisetzungsrate auf, was auf erste Rissinitiiierungen schließen lässt. Mit Überschreiten dieser Rissbildungsgrenze setzt der Schädigungsprozess ein, der vorläufig mit einer geringfügigen Rissbildungsrate verbunden ist. Von einer kontinuierlichen Freisetzung von Schallenergie ist der dritte Bereich, das aktive Rissstadium, gekennzeichnet. Die Schallereignisse steigen linear an, was zweifelsfrei mit der Entstehung neuer Matrixrisse erklärt werden kann. Zu Beginn des vierten Abschnittes ist eine erhöhte Freisetzung von akustischer Energie zu beobachten, infolgedessen eine exponentielle Zunahme der Schallereignisse mit stetig steigenden Energie- und Amplitudeninhalten zu verzeichnen ist. Die Vielzahl der registrierten Schallereignisse und die hohen Amplituden charakterisieren einen von vielen Materialschädigungen durchzogenen Prüfbereich. In dieser Phase setzt in den von Zwischenfaserbrüchen durchzogenen Einzelschichten eine Risssättigung ein, womit ein charakteristischer Schädigungszustand erreicht wird. In der letzten Schädigungsphase kündigt ein schlagartig progressiver Anstieg des Schallemissionsverhaltens das katastrophale Endversagen an. Dieses ist durch einen plötzlichen Sprung im Aktivitätsverlauf sowie ein schmales hochenergetisches Intensitätsband gekennzeichnet.

Wie aufgezeigt werden konnte, besitzen die einzelnen Prozesse der sukzessiven Schädigung von textilverstärkten Verbundstrukturen eine individuelle Charakteristik hinsichtlich ihres Schallemissionsverhaltens. Daher ist die Schallemissionsanalyse zur Bewertung von Schädigungs- und Bruchstadien von multiaxial textilverstärkten Faserverbundwerkstoffen essentiell bedeutsam.

3 Ermittlung des Erstsichtversagens von CFK bei Drei-Punkt-Biegeprüfungen

Bei der Herstellung endkonturidentischer Verbundstrukturen aus kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffen (CFK) werden im textilen Preforming-Prozess häufig adhäsive Bindersysteme wie beispielsweise Sprühkleber zur Fixierung der einzelnen Textilhälfte eingesetzt. Zur Untersuchung des Einflusses dieser Bindersysteme auf das Werkstoffverhalten von CFK-Verbunden wurden interlaminare Scherfestigkeitsuntersuchungen mittels Drei-Punkt-Biegeprüfungen an unterschiedlichen CFK-Verbunden unter statischer Beanspruchung bei Raumtemperatur durchgeführt (Bild 3a). Aus den gemessenen Kraft- und Dehnungswerten werden die Schubspannungsverläufe berechnet und wie in Bild 3b zu sehen grafisch dargestellt. Hierbei konnte der Einfluss der Bindemittel auf das Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten quantifiziert werden.

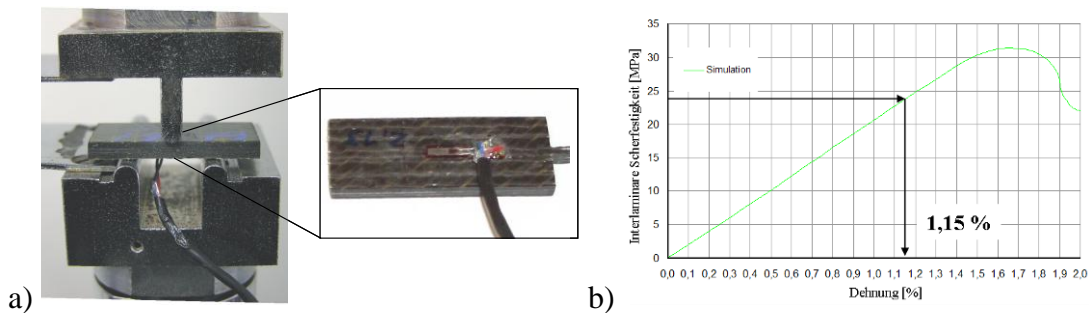


Bild 3. a) Einspannung mit CFK-Probekörper für den interlaminaren Scherversuch, b) durch FE-Simulation ermittelter Spannungs-Dehnungs-Verlauf während des ILSS-Versuches

Darüber hinaus erfolgte eine Finite-Elemente-Simulation des interlaminaren Scherversagens auf Grundlage des bruchmodebezogenen Versagenskriteriums nach CUNTZE [8]. Hierzu wurden die Spannungszustände, die sich während der Analyse der interlaminaren Scherfestigkeit (ILSS) in der Verbundstruktur einstellen, berechnet und bezüglich ihrer bruchtypbezogenen Schädigungswirkung unter separater Berücksichtigung der jeweiligen Versagensarten bewertet (Bild 4a). Die Farbverteilung signalisiert dabei eine besonders stark ausgeprägte Wahrscheinlichkeit der Rissentstehung zwischen den Schichten in der Bauteilmitte als auch im Randbereich. Dies lässt sich ferner mit einer qualitativ-statistischen Auswertung der beim ILSS-Versuch untersuchten Werkstoffproben und deren Bruchbilder belegen. Eine Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse der ILSS-Versuche mit den Ergebnissen der numerischen Simulation belegt auch quantitativ die zutreffende Prognose des Versagensverhaltens der hier untersuchten CFK-Materialien.

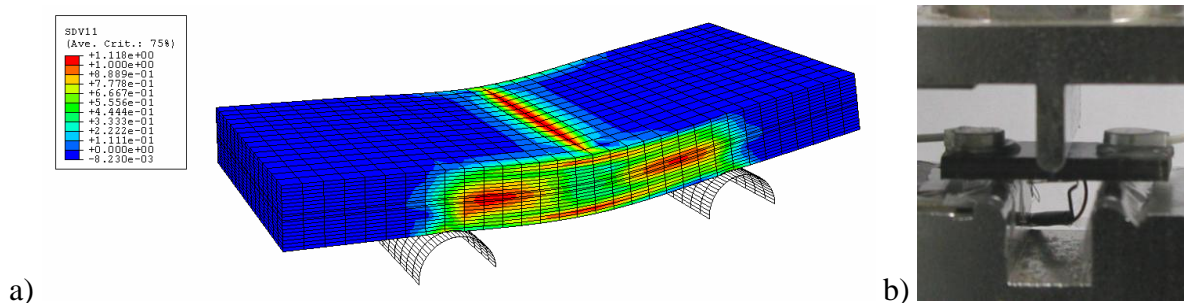


Bild 4. a) Mittels FEM ermittelte Werkstoffanstrengungen, b) CFK-Biegeprobe mit Schallaufnehmern

Das numerisch ermittelte Erstsichtversagen der Verbundstruktur wurde anschließend im Rahmen experimenteller Untersuchungen mit Hilfe der Schallemissionsanalyse überprüft,

wobei die Applikation piezoelektrischer Schallaufnehmer auf die vorhandenen Probenkörper erfolgte (Bild 4b). Während der Schallemissionsprüfungen wurden die Energieinhalte der im Versuch auftretenden Schallemissionen als akustische Intensitätsparameter erfasst und den entsprechenden Scherspannungen (ILSS) zugeordnet. Dabei deuten insbesondere plötzliche Sprünge im aufsummierten Energieverlauf auf diskrete Schädigungen wie etwa Faser- oder Zwischenfaserbrüche hin. Zur Minimierung von Rückkopplungs- und Setzungseffekten der Prüfmaschine und Einspannvorrichtung wurde der Versuch nach dem ersten Sprung im Energieverlauf abgebrochen, die Probe entlastet (blaue Kurve) und anschließend erneut belastet (violette Kurve). Dabei zeigte sich ein Ausbleiben von detektierbaren Schallemissionen bis die vorangegangene Maximalbelastung überschritten worden ist. Dieses Phänomen ist einschlägig als Kaiser-Effekt bekannt. Der erste detektierte Sprung im aufsummierten Energieverlauf des zweiten Versuchsdurchlaufes deutet nachweislich auf das Erstschichtversagen der Verbundstruktur hin (Bild 5a). Dabei entsprach die entsprechende Scherspannung (Bild 5b) näherungsweise dem rechnerisch ermittelten Wert aus der numerischen Simulation (Bild 3b).

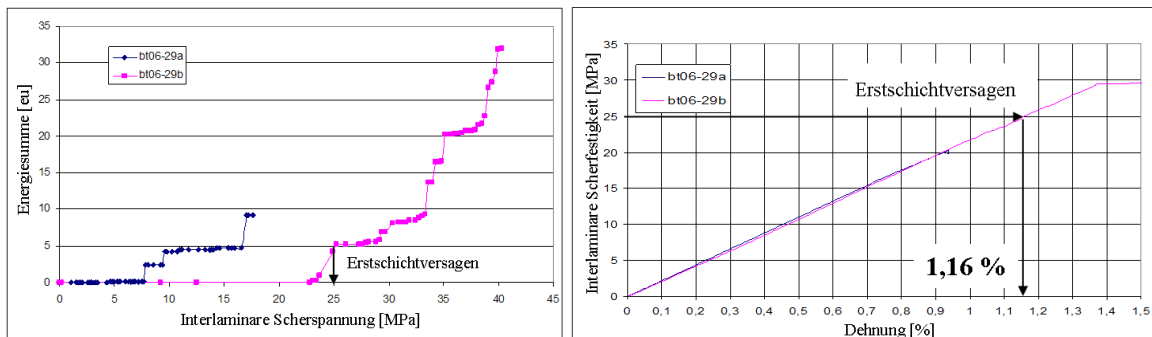


Bild 5. Mittels Schallemissionsanalyse detektiertes Erstschichtversagen einer ILSS-Probe aus CFK

4 Impactanalyse an Hybridgarn-Textil-Thermoplasten mittels AT

Neuartige hybridgarnbasierte textilverstärkte Verbundmaterialien mit thermoplastischer Matrix bieten neben einem hohen Leichtbaupotential insbesondere ein ausgezeichnetes Energieabsorptionsvermögen bei hochdynamischen Belastungen wie beispielsweise Crash und Impact [9-10]. Um diese werkstoffspezifischen Vorteile in Bezug auf eine leichtbauorientierten Crash- und Impactkompatibilität für industrielle Anwendungen synergetisch zu nutzen, ist die Entwicklung von zuverlässigen Berechnungs- und Dimensionierungskonzepten zwingend erforderlich [11-12]. Im Rahmen theoretischer und experimenteller Untersuchungen wurden daher verbundangepasste Werkstoff- und Simulationsmodelle, die eine beanspruchungs- und funktionsgerechte Auslegung von textilverstärkten Verbundenstrukturen bei hochdynamischer Belastung erlauben [13], erarbeitet und experimentell verifiziert.

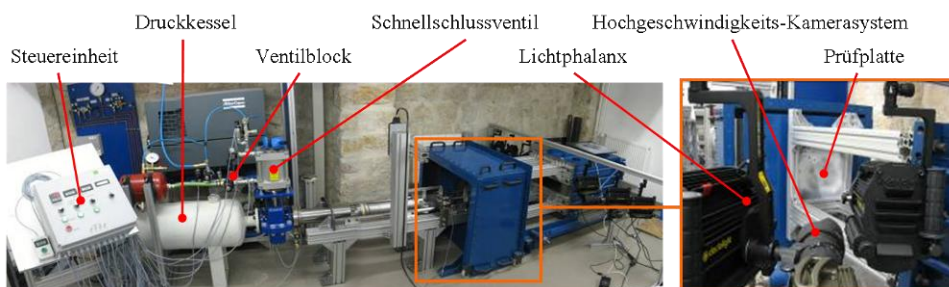


Bild 6. Aufbau des Impact- und Crash-Prüfstandes

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden in einem Impact- und Crash-Prüfstand (Bild 6) unter Variation der Prüfgeschwindigkeit Probenplatten aus hybridgarn-basiertem glasfaserverstärktem Polypropylen (GF/PP) mit standardisierten Impactkörpern beschossen. Der vorhandene Prüfstand ermöglicht durch den modularen Aufbau die Untersuchung vielfältiger Aufprallvorgänge wie beispielsweise Impactvorgänge in Containmentstrukturen und Schutzausrüstungen, Vogelschlag an Luftfahrtkomponenten oder Crash mit Energie absorbierenden Strukturen. Zur Überwachung dieser hochdynamischen Impactversuche bietet sich insbesondere die Schallemissionsprüfung an [14-15]. Dabei wurden drei Schallaufnehmer in einer definierten Anordnung auf der Prüfplatte appliziert (Bild 7a), um das akustische Verhalten des GF/PP-Materials kurz nach dem Impact (Bild 7b) erfassen zu können.

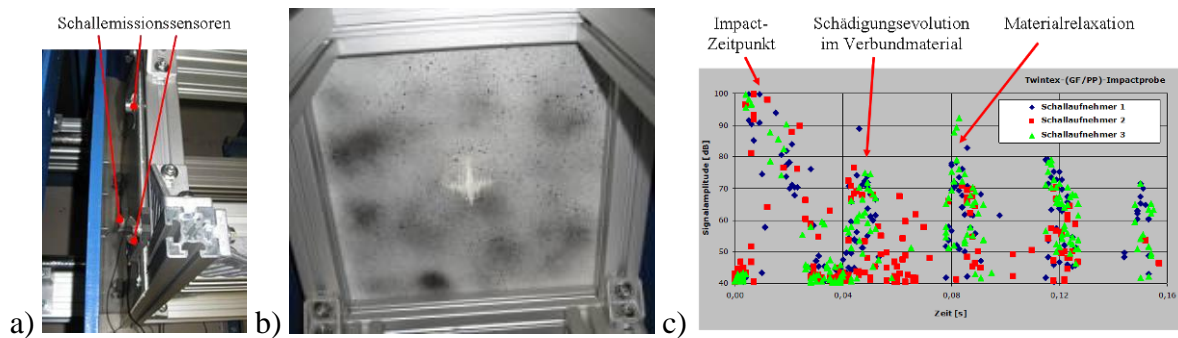


Bild 7. a) Auf eine eingespannte Prüfplatte applizierte Schallemissionssensoren , b) Rückseite einer GF/PP-Platte mit signifikantem Impactschaden, c) Schallemissionsverhalten der GF/PP-Platte kurz nach dem Impact

Aufgrund einer exakten Triggerung des Schallemissionsanalyse-systems konnte der Zeitpunkt des Aufpralls präzise bestimmt werden. Ferner war es mit Hilfe der Schallemissionsprüfung möglich die Schädigungsentwicklung direkt nach dem Aufprall zu analysieren. Wie aus Bild 7c ersichtlich ist, konnten die Schädigungsevolution im Verbundmaterial sowie mehrere Phasen der Materialrelaxation kurz nach dem Aufprall bestimmt werden. Des Weiteren war es möglich, über Laufzeitunterschiede den genauen Einschlagort des Aufprallkörpers auf der Prüfplatte anhand der Bestimmung der Signalquellorte der eingesetzten Schallaufnehmer zu lokalisieren. Damit konnte nachgewiesen werden, dass der simultane Einsatz der Schallemissionsanalyse bei hochdynamischen Untersuchungen wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich des Versagensverhaltens direkt nach dem Impact liefern kann.

5 Ermittlung elastischer Materialkennwerte mittels Ultraschall-Laufzeitmessung

Im Gegensatz zur Schallemissionsanalyse stellt die Ultraschalltechnik ein aktives Messverfahren zur Ermittlung der Schädigungsevolution in textilverstärkten Verbundwerkstoffen dar. Durch die Ausnutzung der Proportionalität von Wellengeschwindigkeit, deren Ausbreitungsrichtung und den elastischen Konstanten kann mittels Laufzeitmessungen von Ultraschallwellen die Steifigkeitsreduktion anisotroper Materialien direkt ermittelt werden. Dabei beruht die Anwendung ultraschallbasierter Verfahren zur Bestimmung des Schädigungsverhaltens von Verbundwerkstoffen auf einigen vereinfachenden Annahmen. So wird von einem elastischen Materialverhalten bezüglich der Wellenausbreitungsvorgänge ausgegangen. Die gekoppelten Phänomene Dämpfung und Dispersion werden nicht berücksichtigt [16]. Aus dieser Vereinfachung folgt, dass zwischen statischen und dynamischen Steifigkeiten nicht unterschieden wird.

Zur Charakterisierung des anisotropen Schädigungsverhaltens textiler Basisverbunde werden die entsprechenden Verbundstrukturen sukzessive und stufenweise bis zum Bruch geschädigt, wobei jeweils nach definierten Lastschritten die notwendigen Geschwindigkeitsprofile ermittelt werden. Im verwendeten Immersionsverfahren (Bild 8a) werden dazu die Phasengeschwindigkeiten in einem definierten Winkelspektrum gemessen, das durch die materialspezifischen kritischen Winkel begrenzt wird. Dafür wurde eigens eine Schwenkvorrichtung (Bild 8b) für das Tauchtechnikverfahren konstruiert und angefertigt, welche direkt in den ILK-Immersions-Prüfstand (Bild 8c) integriert wurde.

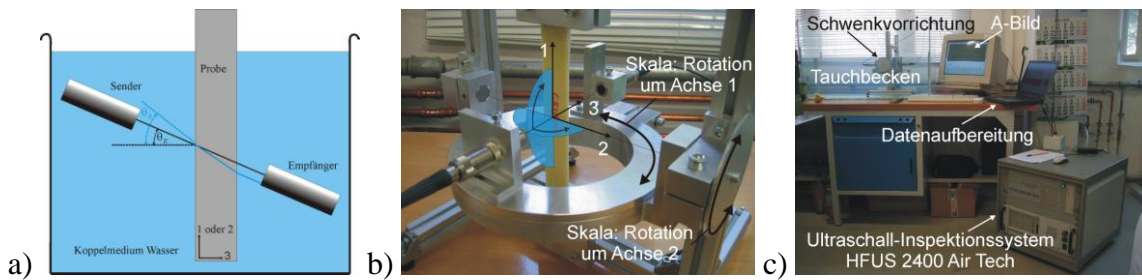


Bild 8. a) Schematische Darstellung der Versuchsanordnung beim Tauchtechnik-Verfahren, b) Schwenkvorrichtung für die Tauchtechnik-Ultraschallsensoren, c) Immersions-Prüfstand des ILK

Beim Immersionsverfahren können die Laufzeiten durch einen Probekörper nicht direkt gemessen werden. Üblicherweise wird die Phasengeschwindigkeit des Materials aus der Zeitdifferenz ermittelt, die sich aus der Laufzeit der Welle zwischen den Sensoren mit Probekörper und der Laufzeit ohne Probekörper ergibt. Standardisierte Probekörper sind nur in den Ebenen 1-3 und 2-3 (Bild 9) für Ultraschallmessungen zugänglich [17, 18]. Folglich ergeben sich aus den Messungen in diesen Ebenen sieben von neun Steifigkeitskomponenten orthotroper Materialien. In der 1-3-Ebene werden die Steifigkeitskomponenten C_{22} , C_{33} , C_{44} und C_{23} ermittelt, wogegen sich die Komponenten C_{11} , C_{33} , C_{55} und C_{13} aus Messungen in der 2-3-Ebene ergeben. Die Steifigkeiten C_{12} und C_{66} müssen in Nichtsymmetrieebenen ermittelt werden, was nach bisherigen Erkenntnissen für faser- und textilverstärkte Verbundwerkstoffe keine exakte Steifigkeitsermittlung erlaubt [19]. Wird jedoch das Immersionsverfahren mit der Kontaktankopplungstechnik (Bild 1c) kombiniert, so kann zusätzlich die Steifigkeitskomponente C_{66} ermittelt werden.

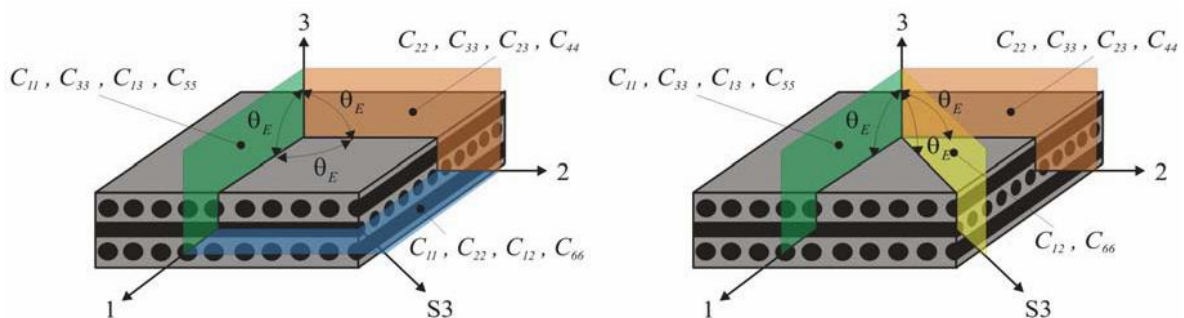


Bild 9. Ermittlung der Komponenten des Steifigkeitstensors in den Symmetrieebenen (links) und alternative Bestimmung bei fehlenden in-plane-Eigenschaften (rechts)

Am Beispiel des Steifigkeitsparameters C_{11} , welcher an einem gewebeverstärktem GF/PP-Verbundmaterial bestimmt wurde, wird in Bild 10a ersichtlich, dass die Reduktion der Steifigkeit infolge diffuser und diskreter Schädigungsphänomene (Bild 11) mit Hilfe der Ultra-

schall-Laufzeitmessung im Vergleich zu klassischen Untersuchungsmethoden (Bild 10b) hinreichend genau bestimmt werden kann.

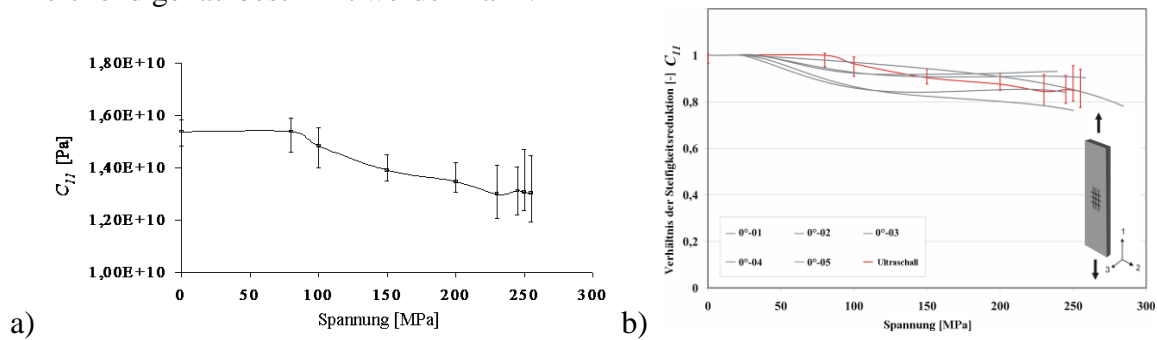


Bild 10. a) Degradation des Steifigkeitsparameters C_{11} eines gewebeverstärkten GF/PP-Materials und b) Vergleich mit klassischen werkstoffmechanischen Untersuchungen

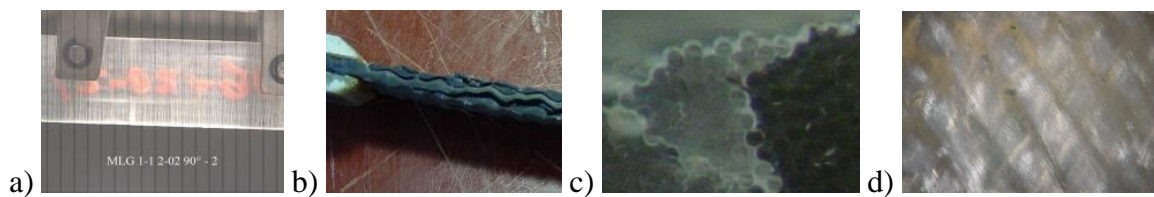


Bild 11. Diffuse und diskrete Schädigungsphänomene bei textilverstärkten Verbundwerkstoffen: a) Matrixbruch, b) Delamination, c) Grenzflächenversagen, d) Whitening

Die Leistungsfähigkeit bestehender Werkstoffmodelle hängt stark von der sachgerechten Ermittlung der Materialparameter für die jeweiligen textilen Basisschichten ab. In herkömmlichen experimentellen Messungen können jedoch nur wenige der veränderlichen Steifigkeitskomponenten ermittelt werden. Aus dieser Problemstellung resultierend wurde die hier vorgestellte experimentelle Messmethode auf Grundlage der Ultraschalltechnik entwickelt, die eine komplette Messung der degradierenden Steifigkeitskomponenten erlaubt. Für verschiedene textilverstärkte Materialien (u. a. CFK, GFK, GF/PP) wurde im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen das anisotrope Schädigungsverhalten mit Hilfe der entwickelten Ultraschall-Messtechnik ermittelt und die daraus resultierenden Schädigungsparameter abgeleitet. Das entwickelte Verfahren bildet eine wesentliche Grundlage, um in weiteren Forschungsaktivitäten die veränderlichen Steifigkeitseigenschaften auch anderer Leichtbauwerkstoffe zu untersuchen.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen der umfassenden und hier kurzerhand dargestellten Untersuchungen an textilverstärkten Kunststoffen konnte nachgewiesen werden, dass aktive und passive akustische zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Verfügung stehen, welche die experimentelle Verifizierung und Optimierung einschlägiger Berechnungsmodelle zur Beschreibung der sukzessiven Schädigung von textilverstärkten Verbundstrukturen erlauben und unterstützen. Ferner wird mit der Anwendung dieser Untersuchungsmethoden eine wesentliche Grundlage für die Steigerung der Leistungsfähigkeit bestehender Werkstoffmodelle geschaffen. Zukünftig sollte es das Ziel weiterer Untersuchungen sein, die unterschiedlichen akustischen zerstörungsfreien Prüfverfahren miteinander zu kombinieren, um die Strategien zur Interpretation der erhaltenen Ergebnisse signifikant zu verbessern.

7 Referenzen

- [1] LANGKAMP, A.: *Bruchmodebezogene Versagensmodelle für faser- und textilverstärkte Basisverbunde mit polymeren, keramischen und metallischen Matrices*. Dresden, Technische Univ., Diss., 2002
- [2] HUFENBACH, W., LANGKAMP, A., KROLL, L.: Bruchmodebezogene Versagensmodelle für textilverstärkte Verbundwerkstoffe. In: DEGISCHER, H.-P. (Hrsg.): *Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*. Weinheim : Wiley-VCH, 2003, S. 569-574. – ISBN 978-3527307623
- [3] GUDE, M., HUFENBACH, W., KOCH, I., et al.: Fatigue failure criteria and degradation rules for composites under multiaxial loading. In: *Mechanics of Composite Materials* 42 (2006), No. 5, pp. 443-450
- [4] HUFENBACH, W., JASCHINSKI, J., MODLER, N.: PONTOS in lightweight engineering applications. In: *GOM-Anwendertagung - Optical Deformation Measurement in Material Testing and Conceptual Design (Braunschweig 2006)*
- [5] HUFENBACH, W.; LANGKAMP, A., BÖHM, R., et al.: Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Schädigungsvorgängen bei faser- und textilverstärkten Verbundwerkstoffen. In: DGZfP (Veranst.): *15. Kolloquium Schallemission : Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse (Berlin-Adlershof 2005)*. Berlin : DGZfP, 2005, S. 33-44 (DGZfP-Berichtsband 99-CD). – ISBN 3-931381-69-2
- [6] HUFENBACH, W., BÖHM, R., LANGKAMP, A., et al.: Ultrasonic evaluation of anisotropic damage in multiaxially textile-reinforced thermoplastic composites made from hybrid yarns. In: *Mechanics of Composite Materials* 42 (2006), No. 2, pp. 151-162
- [7] HUFENBACH, W., RICHTER, H., LANGKAMP, A., et al.: Application of acoustic emission analysis for damage investigations in fibre and textile reinforced composites. In: *NDT.net - The e-Journal of Nondestructive Testing* 11 (2006), No. 12
- [8] CUNTZE, R. G.: Efficient 3D and 2D failure conditions for UD laminae and their application within the verification of the laminate design. In: *Composite Science and Technology* 66 (2006), No. 7/8, pp. 1081-1096
- [9] HUFENBACH, W., GUDE, M., EBERT, C.: Analysis of the failure behaviour of 3D-textile reinforced composites under crash and impact loads. In: *15th International Conference on Composite Materials (Durbon 2005)*
- [10] HUFENBACH, W. ; PETRINIC, N. ; HORNIG, A. ; et al.: Experimental investigations on 3D reinforced multilayer weft knitted fabric laminates under impact loading conditions. In: *Kompozyty - Composites* 6 (2006), No. 4, S. 14-18
- [11] HUFENBACH, W. ; GUDE, M. ; EBERT, C.: Tailored 3D-textile reinforced composites with load-adapted property profiles for crash and impact applications. In: *Kompozyty - Composites* 6 (2006), No. 3, S. 8-13
- [12] HUFENBACH, W. ; GUDE, M. ; EBERT, C.: Hybrid 3D-textile reinforced composites with tailored property profiles for crash and impact applications. In: *12th European Conference on Composite Materials (Biarritz 2006)*
- [13] HUFENBACH, W. ; KROLL, L. ; GUDE, M. ; et al.: Versagensanalyse von textilverstärkten Verbundwerkstoffen bei hochdynamischer Belastung. In: *17. Workshop „Composite Forschung in der Mechanik“ (Paderborn 2004)*
- [14] AMOROSO, M. P. ; CANEVA, C. ; NANNI, F. ; et al.: Acoustic emission performance for damage monitoring of impacted FRP composite laminates. In: *29th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (Bellingham 2002)*
- [15] FINLAYSON, R. D. ; LUZIO, M. A. ; GODINEZ-AZCUAGA, V. ; et al.: Impact damage detection and evaluation in graphite epoxy motorcases (GEM). In: VAN HEMELRIJCK, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd International Conference on Emerging Technologies in Non Destructive Testing*. Lisse : Balkema, 2003, S. 131-136. – ISBN 90-5809-645-9
- [16] BOUAZZAOUI, R. E., BASTE, S., CAMUS, G.: Development of damage in a 2D woven C/SiC composite under mechanical loading: II. Ultrasonic characterization. In: *Composite Science and Technology* 56 (1996), No. 12, pp. 1373-1382
- [17] ARISTEGUI, C., BASTE, S.: Optimal recovery of the elasticity tensor of general anisotropic materials from ultrasonic velocity data. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 101 (1997), No. 2, pp. 813-833
- [18] AUDOIN, B., BASTE, S.: Ultrasonic evaluation of stiffness tensor changes and associated anisotropic damage in a ceramic matrix composite. In: *Journal of Applied Mechanics* 61 (1994), No. 2 , pp. 309-316
- [19] HUFENBACH, W., RITSCHEL, T., BÖHM, R., et al.: Ultrasonic determination of anisotropic damage in fibre and textile reinforced composite materials. In: *NDT.net – The e-Journal of Nondestructive Testing* 11 (2006), No. 12