

In-situ Überwachung von Faserverbundwerkstoffen

MARKUS G. R. SAUSE

¹Universität Augsburg, Institut für Materials Resource Management, Mechanical Engineering, D-86135 Augsburg

Der Autor, Prof. Dr. Markus Sause, erhielt für diese Arbeit auf der DACH-Jahrestagung 2019 in Friedrichshafen den Wissenschaftspreis der DGZfP.

Kurzfassung

Das strukturelle Versagen von faserverstärkten Verbundwerkstoffen ist ein Vorgang, der auf mikroskopischer Skala beginnt, und sich über mehrere Größenskalen hinweg ausbreitet und letztlich ein strukturell relevantes Ausmaß auf makroskopischer Skala erreicht. Aufgrund der komplexen Faserarchitektur in modernen Verbundwerkstoffen ist die Beschreibung der Initiierung und Ausbreitung solcher Schädigungen immer noch eine große Herausforderung. Aus der zerstörenden Werkstoffprüfung resultieren oft nur die Extremwerte, z.B. die Festigkeit, welche das Versagensverhalten der Verbundwerkstoffe aber nur unzureichend abbilden. Mittlerweile existieren viele ausgereifte Prüfmethode, um das Auftreten von Schäden, sowie deren Ausbreitung in einem Verbundwerkstoff in-situ zu erkennen. Als Funktion der aufgetragenen Belastung ermöglicht dies ein detailliertes Studium der Schadensentwicklung, welches Eingabedaten für moderne Theorien der Schädigungsbildung bietet, aber auch dazu genutzt werden kann, um mechanische Prüfverfahren weiter zu verbessern. Als Teilmenge der verfügbaren Verfahren werden digitale Bildkorrelation, Schallemissionsanalyse, elektromagnetische Emission und Computertomographie näher betrachtet. Letztlich ist aber insbesondere die Kombination der Information verschiedener Verfahren zielführend. Die gleichzeitige Anwendung mehrerer Verfahren bei einer mechanischen Belastung komplettiert unser Bild der Vorgänge und erlaubt die Schwächen einzelner Verfahren gezielt zu eliminieren.

1 Schädigungsentstehung in Faserverbundwerkstoffen

Etablierte Normen zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Faserverbundwerkstoffen konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Signaturen in Last-Weg-Kurven oder Spannungs-Dehnungs-Kurven, um Materialsteifigkeiten oder Festigkeiten zu bestimmen. Für einige Verbundwerkstoffe, z.B. Metall/Kunststoff hybride Systeme oder hoch duktile Materialien haben solche globalen Werte in den Spannungs-Dehnungskurven jedoch nur eine begrenzte Relevanz für die Bestimmung der Materialeigenschaften [1]. Da das mikroskopische Versagen dem endgültigen Versagen des Materials im makroskopischen Maßstab voraussetzt, ist es grundsätzlich zweifelhaft, ob die Maximalwerte der Spannungs-Dehnungskurven der richtige Weg sind, um tatsächliche Materialeigenschaften zu bestimmen. Die Heterogenität und Anisotropie auf der mesoskopischen Skala bedingt oftmals Spannungs- und Dehnungszustände, welche deutlich von der makroskopisch induzierten Belastungsart abweichen. Insbesondere die einzelnen Schichten eines Laminats unterliegen der Wechselwirkung mit benachbarten Schichten und besitzen daher deutlich andere Spannungszustände als der globale Durchschnitt des Laminats. Auch textile Faserarchitekturen, oder Materialien mit ausgeprägten Steifigkeitssprüngen, wie z.B. Faser-Metall-Lamine führen zu starken Diskrepanzen der Spannungszustände auf makroskopischer und mikroskopischer Skala. Nach Entstehung des ersten Versagens auf mikroskopischer Skala entsteht dadurch ein komplexes Zusammenspiel von Versagensmechanismen, welches Vorgänge auf Längenskalen umfasst, die sich vom atomaren Maßstab bis zu den Abmessungen des Prüfkörpers oder der Struktur erstrecken. Die Belastungsbedingungen, die Faserarchitektur, der Faservolumenanteil und das Bruchverhalten des Matrixmaterials tragen wesentlich dazu bei, dass das Material trotz erster Brüche im Inneren weiterer Belastung standhalten kann, bis es irgendwann schließlich zum makroskopischen Trennbruch kommt.

Faserverstärkte Werkstoffe haben zudem den Ruf, eine große Streuung der „Materialeigenschaften“ zu zeigen. Gemeint sind dabei die makroskopischen Eigenschaften, welche ihren Ursprung allerdings in der statistischen Entstehung von ersten Schäden auf mikroskopischer Skala haben. Es ist also generell erstrebenswert, Prüfmethode für die Erkennung von ersten Schädigungen bereitzustellen, um die Prozesse in-situ, d.h. während der Belastung auf den involvierten Längenskalen besser nachvollziehen zu können.

In diesem Zusammenhang ist eine naheliegende Möglichkeit die Anwendung der In-situ Mikroskopie. Diese bietet eine kontinuierliche Beobachtungsmöglichkeit, wobei sich dies auf die Oberfläche beschränkt. Als Alternative zu klassischer Mikroskopie kann für oberflächennahe Beobachtung die digitale Bildkorrelation (DIC) genutzt werden. Durch die Messung des Dehnungsfeldes erlaubt sie das Auftreten von Schädigungen durch lokale Veränderungen der Dehnung zu erkennen. Die Limitierung auf oberflächliche Betrachtung lässt sich weiterhin durch die Nutzung volumetrischer Verfahren, wie Computertomographie (CT) vermeiden. Aber auch hier ist man für hinreichend hohe Auflösung auf relativ kleine Probengrößen beschränkt. So wie das Ohr aber das Auge ergänzt, kann die Detektion der Schallemission (SE) als Ergänzung zu bildgebenden Verfahren dienen, um relevante Bereiche im Material zu orten. Der Vorteil ist hierbei die hohe Sensitivität zur Detektion kleinster mikroskopischer Schädigungen im gesamten Volumen des Materials oder der Struktur. Auch die Erzeugung von elektromagnetischer Emission (EME) während der Rissinitiierung und des Risswachstums ist eine zerstörungsfreie Prüfmethode, die für die in-situ Überwachung von aktiven Schädigungen in faserverstärkten Polymeren geeignet ist. Darüber hinaus wurden Verfahren wie Thermografie, Prüfung mit geführten Wellen, Vibrometrie, Röntgenbeugung, elektrische Widerstandsmessungen und vieles mehr eingesetzt, um in-situ das Auftreten von ersten Schädigungen zu erkennen [2]–[11]. Aus der Vielzahl der Fortschritte, die in den letzten Jahren gemacht wurden, werden im Folgenden nur wenige repräsentative

tive Beispiele vorgestellt, um einen Überblick der jeweiligen Möglichkeiten zu bekommen. Ein besonderes Augenmerk wird dann im Anschluss auf die Möglichkeiten der Methodenkombination gelegt.

2 Digitale Bildkorrelation (DIC)

Spätestens seit der Gründung von eigenen Fachverbänden, wie beispielsweise der iDICs (International Digital Image Correlation Society) hat sich die digitale Bildkorrelation als eigenständige Prüfmethode für Werkstoffe etabliert. Die Idee der DIC-Techniken besteht darin, ein quantitatives Maß für Bewegung, Bewegungsgeschwindigkeit und Verformung zu liefern, das zwischen zwei nachfolgend aufgenommenen Bildern eines Objekts unter äußerer Last auftritt [12]. Bei der Aufnahme von Objekten mit Speckle-Mustern, die auf die Oberfläche aufgebracht werden, können so die Dehnungswerte des Objekts im gesamten Sichtfeld quantitativ gemessen werden. Als eine naheliegende Anwendung kann dies verwendet werden, um einen „optischen Dehnmessstreifen“ umzusetzen. Moderne Systeme erzielen dabei mittlerweile vergleichbare Genauigkeiten, wie herkömmliche Dehnmessstreifen [13], [14]. Sie zeigen aber bei anisotropen Materialien keine Verfälschung durch Beiträge der Querkontraktion und keine Temperaturabhängigkeit. Besonders wichtig für die Kennwertermittlung sind standardisierte Herangehensweisen und ein Verständnis für die Messtechnik, welches erstmals in einem Dokument eines internationalen Expertengremiums zusammengeführt wurde [15]. Die Verfügbarkeit von hochauflösenden Kameras ermöglicht heutzutage aber auch eine weiterführende Analyse der Bildinformationen. Typischerweise entstehen bei einer Messung Vollfeld-Darstellungen der gemessenen Dehnungskomponenten (s. Abb. 1). Diese sind von hohem Wert, um sie mit numerischen Berechnungsergebnissen zu vergleichen, aber auch um Dehnungskonzentrationseffekte zu visualisieren. Im Beispiel in Abb. 1 ist die Bildung von Zwischenfaserbrüchen in einem quasi-isotropen Faserverbundlaminat dargestellt. Die Orientierung der entstandenen Brüche ist in den lokalen, streifenförmigen Dehnungskonzentrationen gut zu erkennen und erlaubt den Entstehungszeitpunkt exakt zu vermessen, aber auch Effekte der Rissättigung zu studieren. Die Sensitivität der DIC in Abhängigkeit von Rissgröße, Laminattyp und Tiefenlage wurde erst kürzlich durch Experimente und numerische Methoden herausgearbeitet [1], [16]. Besonders die mechanischen Prüfmethoden, welche eine Bestimmung des Ersteinsatzs von Schädigungen erfordern, können von solchen Methoden profitieren.

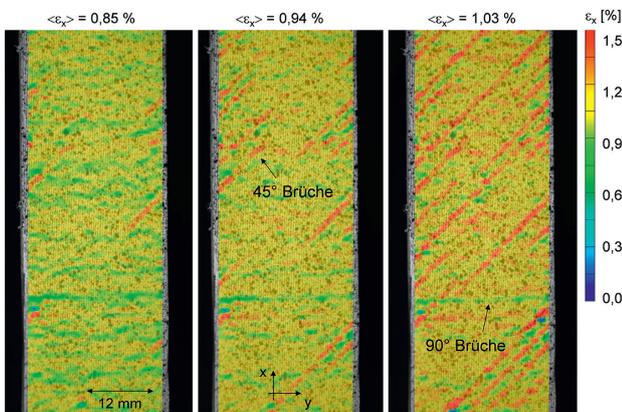


Abb. 1. Beispiel für Dehnungskonzentrationseffekte durch die Bildung von Zwischenfaserbrüchen in einem quasi-isotropen Laminat.

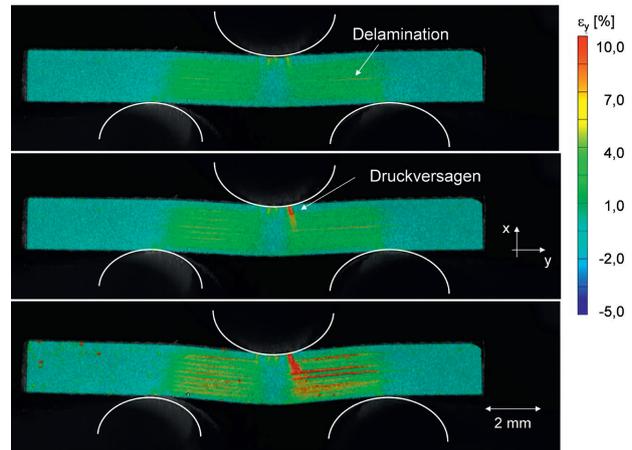


Abb. 2. Dehnungskonzentration auf der Seitenfläche eines Laminats im Kurzbalkenbiegeversuch.

Dazu zählen unter anderem bruchmechanische Prüfmethoden, wie die gekerbte 3-Punkt-Biegeprüfung zur Bestimmung der kritischen Bruchzähigkeit unter Mode II oder der Kurzbalkenbiegeversuch zur Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit. Die Entstehung der Delamination lässt sich in diesen Fällen besonders gut durch die Betrachtung der Seitenflächen des Laminats nachvollziehen (s. Abb. 2) [17]–[19].

3 Schallemission (SE)

Bei der Methode der Schallemissionsanalyse geht es um die Detektion und Interpretation von Ultraschallwellen, die durch ruckartige innere Verschiebungen verursacht werden. Im Falle von faserverstärkten Materialien erzeugen selbst kleinste mikroskopische Schädigungen messbare Schallemission, weshalb die Nutzung dieser Information hier besonders gewinnbringend ist. Bei der Ausbreitung der von der Schallquelle abgestrahlten akustischen Welle wird die Quellcharakteristik durch Dämpfung, Dispersion und Ausbildung von geführten Wellen beeinflusst. Darüber hinaus wird das Messsignal durch den Detektionsprozess mit piezoelektrischen Sensoren an der Materialoberfläche weiter verändert. All dies führt zu einer systematischen Veränderung der Signalinformation auf dem Weg von der Quelle bis zur Speicherung im Messgerät. Die SE-Prüfung wird bereits seit langem eingesetzt, um das Auftreten von aktiven Schädigungen in Verbundwerkstoffen sowohl auf Materialebene als auch in Strukturbauteilen zu überwachen [20], [21].

Dabei kann primär unterschieden werden zwischen der reinen Detektion von SE-Signalen als Hinweis auf einen aktiven Schädigungsprozess, der Ortung von Signalen mit Hilfe von Sensornetzwerken (s. Abb. 3-a), der Klassifizierung von SE-Signalen zur Erkennung bestimmter Schädigungsarten (s. Abb. 4) und der Schädigungsprognose. Insbesondere bei der Quellortung und der Quellenidentifikation wurden erhebliche Fortschritte erzielt, um eine zuverlässige Messmethode für die Untersuchung von Verbundwerkstoffen bereitzustellen. Neuere Methoden für Quellortungsverfahren verwenden künstliche neuronale Netze, um die Komplexität der Wellenausbreitung zu bewältigen, die bei faserverstärkten Verbundwerkstoffen auftritt [22]. Dabei wird im Trainingsschritt die akustische Charakteristik des Bauteils auf Basis der gemessenen Ankunftszeitdifferenzen (Δt -Werte der SE-Signale aus Abb.3-b) auf die bekannte Position der Testquelle abgebildet. Das trainierte

neuronalen Netz kann dann verwendet werden, um im Anwendungsfall die unbekannte Position von realen SE-Quellen zu ermitteln. Damit wird erstmals die Ortung von Signalquellen in beliebig akustisch und geometrisch komplexen Strukturen ermöglicht.

Mittlerweile existieren etablierte numerische Methoden zur Abbildung der gesamten SE-Kette einschließlich der Beschreibung von Quellmechanik, Wellenausbreitung und Signaldektion [23]–[25]. Dies erlaubt die direkte numerische Modellierung der SE-Signale und liefert damit einen Schlüssel zur Beschreibung von SE-Quellen.

Für die experimentelle Quellenidentifikation wurde ein Mustererkennungsansatz vorgeschlagen [26], der eine frequenzbasierte Trennung der Schädigungsarten in Verbundwerkstoffen erlaubt, was auch von vielen anderen Forschungsgruppen [27], [28], [37]–[41], [29]–[36] beobachtet wurde. Die Zuordnung erfolgt dabei anhand der numerisch berechneten SE-Signale (s. Abb. 4), oder mittels Kombination mit anderen in-situ Methoden (z.B. [42]). Der gezeigte Ansatz verwendet dazu ein repräsentatives Volumenelement zur Berücksichtigung der Eigenschaften von Faser, Matrix und Interface, lässt aber auch die Berechnung großflächiger Schädigungen mit entsprechend homogenisierten Eigenschaften zu [1]. Mit solchen Ansätzen kann das Auftreten verschiedener Schädigungsmechanismen wie Matrixrisse, Rissbildung an der Faser-Matrix Grenzfläche oder Faserbruch detailliert anhand der Abstrahlcharakteristik untersucht werden und bei Berücksichtigung von Wellenpro-

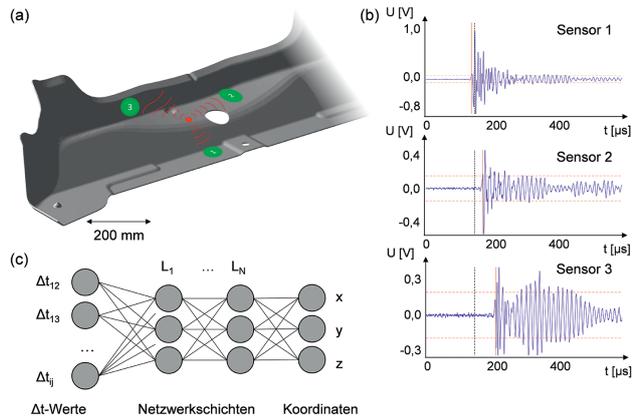


Abb. 3. Ortung von Schallemissionsquellen in komplexen Faserverbundstrukturen (a) auf Basis der Erstankunftszeiten detektierter SE-Signale (b). Die Laufzeitdifferenzen dienen als Eingabedaten für das Training eines künstlichen neuronalen Netzwerks (c).

pagation und Sensorcharakteristik direkt mit einem experimentellen Signal verglichen werden.

Insgesamt stellt die SE-Analyse damit für Faserverbundwerkstoffe verschiedene quantitative Ansätze zur Verfügung, welche aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung eine Beobachtung von Schädigungen in Echtzeit ermöglicht.

4 Elektromagnetische Emission (EME)

Die EME-Analyse ist eine noch weitgehend unbekannte zerstörungsfreie Prüfmethode zur Überwachung der Rissbildung und -ausbreitung. In der Literatur wurden bereits zahlreiche Vorschläge zur Beschreibung des Ursprungs von EME in Materialien gemacht. Bisher konnte aber noch kein allgemeiner Konsens über den genauen Quellmechanismus

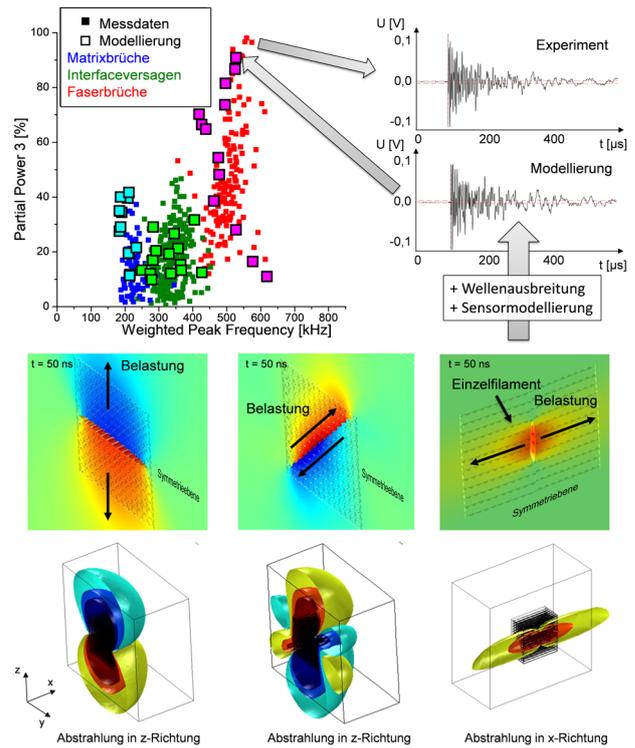


Abb. 4. Modellgestützte Klassifizierung von Schallemissionssignalen zur Identifikation von Schädigungsarten.

erzielt werden. Die meisten theoretischen Modelle sind sich darin einig, dass das Aufbrechen von chemischen Bindungen während der Rissbildung mit einer Erzeugung elektrischer Ladungen an der Oberfläche des Risses einhergeht. Erfahren diese Ladungen dann eine räumliche Verschiebung (durch die dynamischen Bewegungen der Rissfläche), so erzeugen diese bewegten Ladungen ein elektromagnetisches Feld. Die zugrundeliegende Dynamik der Rissfläche stellt gleichzeitig auch die Quelle der SE dar, weshalb die SE-Signale und EME-Signale beide die Beobachtung der Rissdynamik erlauben (s. Abb. 5). Das Detektionsprinzip der EME ist jedoch deutlich anders als bei der SE. Verwendet werden elektrisch leitfähige Materialien als Sensoren, welche im Nahfeld der EME-Quelle an die elektrischen Feldanteile koppeln. Dies bietet gegenüber der SE mehrere Vorteile. Erstens wird die Charakteristik der EME-Signale nur marginal durch die Signalausbreitung beeinflusst,

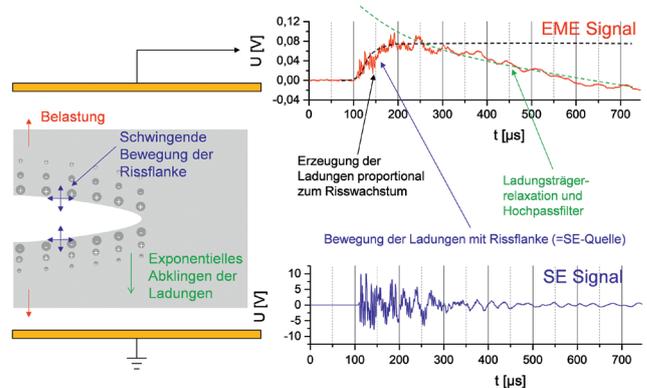


Abb. 5. Schematische Darstellung der EME-Quelle und Vergleich von SE-Signal und EME-Signal zur Erklärung der Einzelbeiträge.

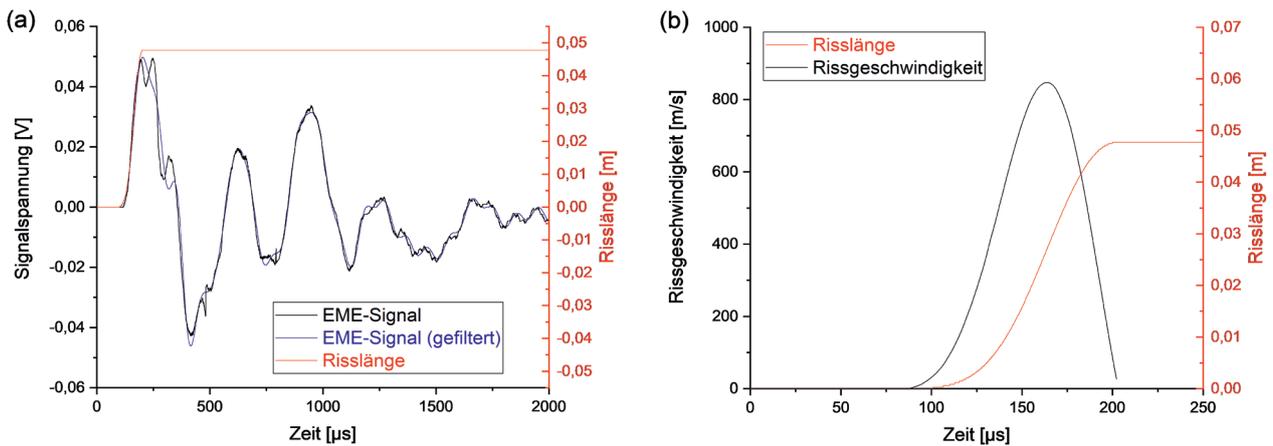


Abb. 6. Bestimmung der Position der Risslänge (a) über EME-Signalanstieg und daraus bestimmtes Geschwindigkeitsprofil der Risspitze

(b) (Details s. [44]).

da diese kaum mit der umgebenden Materie wechselwirken, so dass sich ein direktes Beobachtungsfenster der Dynamik der Rissquelle ergibt. Zweitens zeigen EME-Quellen eine ausgeprägte Richtcharakteristik [43], mit deren Hilfe die räumliche Ausrichtung der Bruchfläche bestimmt werden kann, wenn ein Sensorarray die EME-Signale aus verschiedenen Richtungen aufzeichnet. Drittens besitzen die EME-Detektionssysteme eine nahezu perfekt glatte Transferfunktion, deren Bandbreite nur durch das verwendete Erfassungssystem begrenzt wird. Damit kann z.B. die tatsächliche Entstehungszeit eines Risses, als auch seine Rissgeschwindigkeit als Funktion des Rissfortschritts quantifiziert werden [44] (s. Abb. 6). Hierzu kann die Dynamik der Risspitze über die ansteigende Flanke des gefilterten EME Signals bestimmt werden (Abb. 6-a) und durch die Ableitung nach der Zeit auf die Rissgeschwindigkeit geschlossen werden (Abb. 6-b).

5 In-situ Computertomographie (CT)

Der Einsatz von hochauflösender Computertomographie wurde in den letzten Jahren zunehmend zum Standard für die Untersuchung von faserverstärkten Materialien. Wird im Strahlengang zusätzlich eine Belastungsvorrichtung eingebracht, so kann das Material in-situ belastet werden und damit auch entsprechende Schädigungen erzeugt werden. Bereits zahlreiche Arbeitsgruppen demonstrierten die Verwendung von in-situ Computertomographie, um Informationen über den Schädigungsverlauf in faserverstärkten Materialien zu erhalten [45]–[51]. Besonders zu Beginn wurde vorwiegend Synchrotronstrahlung für die Computertomographie verwendet. Mittlerweile bieten aber auch einige kommerzielle Röntgencomputertomographen vergleichbare Bildqualität, wobei aber erheblich längere Scanzeiten notwendig sind.

Das volumetrische Abbild der Probe mit sehr hoher Auflösung erlaubt es intuitiv, die Entstehung von Schäden im Inneren zu verfolgen und die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Versagensmechanismen bei zunehmender Belastung zu erschließen. Wie in Abb. 7 in exemplarischen Röntgencomputertomographien zu sehen ist, reicht die erzielbare Auflösung (< 1 µm Voxelgröße) gut aus, um einzelne Faserfilamente, sowie Einschlüsse und Risse zu erkennen. Der Ansatz wurde daher mittlerweile recht umfassend auf alle gängigen Materialklassen und Verbundwerkstoffe angewendet.

Allerdings beschränkt sich die in-situ Analyse in diesem Zusammenhang typischerweise auf eine stufenweise Lasterhöhung mit Haltestufen zur Durchführung des Scans. Dabei ist eine ausreichende Relaxation des Materials vor dem Scan eine Notwendigkeit, um Rekonstruktionsfehler des Volumenbildes zu minimieren. Auch muss ein geeigneter Zeitpunkt für den Scan festgelegt werden. Dies kann vorab erfolgen, aber auch durch simultane Aufzeichnung von SE gezielt vorgenommen werden.

6 Kombinationen von in-situ Prüfmethoden

Neben den einzelnen, bereits detaillierter ausgeführten, in-situ Methoden bietet es sich in vielen Fällen an, Methoden zusätzlich miteinander zu kombinieren. Dies kann entweder dazu dienen, Schwachstellen einer einzelnen Methode zu eliminieren, oder die Information über den Zustand des Verbundwerkstoffs zu komplettieren.

Eine der leistungsfähigsten Kombinationen ist die Ergänzung der Computertomographie mit zusätzlicher Schallemissionsanalyse. Wie bereits erwähnt muss für die in-situ CT festgelegt werden, wann ein Scan durchgeführt werden soll. Durch die Aufzeichnung der Schädigung mittels SE kann dies beim Erreichen einer kritischen Anzahl oder beim Einsatz eines bestimm-

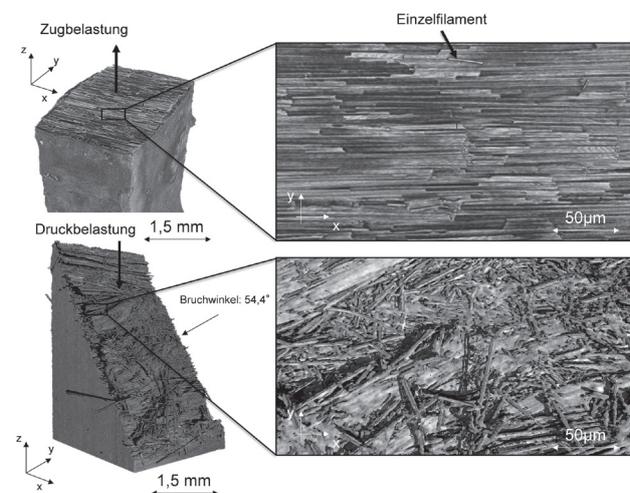


Abb. 7. Beispiele für in-situ Aufnahmen von Bruchflächen in einer kommerziellen Röntgencomputertomographieanlage (Voxelgröße < 1 µm) für Zugbelastung (oben) und Druckbelastung (unten).

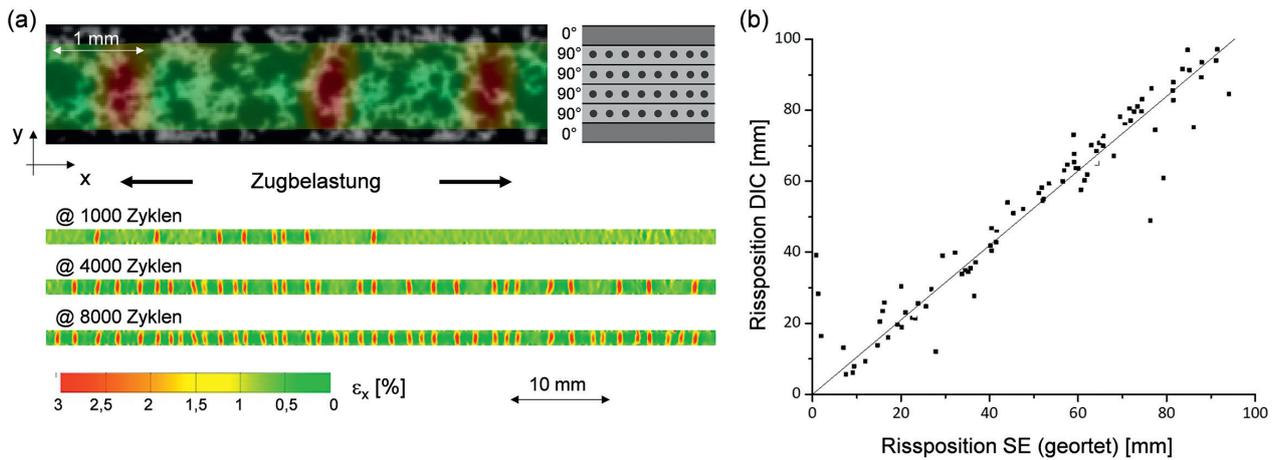


Abb. 8. Korrelation von bildgebenden Methoden (DIC) und akustischen Methoden (SE) zur Erfassung der Zwischenfaserbrüche in einem Kreuzlagenaufbau bei zyklischer Lastwechselbeanspruchung.

ten Schädigungstyps erfolgen. Zudem verfolgt die SE auch kontinuierlich den Zustand zwischen zwei Volumenbildern, was die Interpretation neuer Indikationen in den Volumendaten erleichtert. Wird dies zusätzlich mit digitaler Volumenkorrelation kombiniert, so lassen sich analog der DIC die Dehnungen im Material bestimmen und Dehnungskonzentration in ihrer Relevanz für die Entstehung von Schädigungen interpretieren.

Eine artverwandte Kombination besteht in der Hinzunahme von SE und DIC bei einer klassischen mechanischen Prüfung. Wie in Abb. 8 für eine zyklische Lastwechselbelastung dargestellt, lassen sich mittels DIC leicht die Zwischenfaserbrüche auf der Seitenfläche eines Laminats mit Kreuzlagenaufbau aufspüren. Diese stimmen gut mit den Quellorten besonders starker SE-Signale überein. Allerdings stellt diese in DIC sichtbare Information nur 0,5% der SE-Signale dar. Sie erlaubt aber die direkte Verifikation der SE-Ergebnisse und darüber hinaus eine Abschätzung bis zu welcher Größenordnung SE-Quellen registriert werden.

Bruchvorgänge stellen aber auch ausgeprägte Wärmequellen dar. Mit empfindlichen Thermographiekameras kann die freigesetzte Wärme dargestellt werden. Dies stellt ebenfalls ein interessantes bildgebendes Verfahren zur Kombination mit SE oder EME dar, wobei die Thermographie den wesentlichen Vorteil besitzt, dass die Wärme erst beim Bruchvorgang freigesetzt wird, wohingegen bei der DIC eine Indikation in Form einer Dehnungskonzentration auch teilweise schon vor dem Bruch entsteht.

Eine weitere leistungsfähige Kombinationsart ist das Zusammenspiel einer passiven und einer aktiven in-situ fähigen Methode. Als Beispiel kann hier die Kombination der aktiven Ultraschallprüfung mit der passiven SE genannt werden [52]. Wieder besteht der Bedarf, dass die aktive Methode zum richtigen Zeitpunkt eine Überprüfung des Zustands vornimmt. Dies kann in fixen Zeitintervallen geschehen, aber auch durch besondere Vorkommnisse in der SE getriggert werden. Hier erlaubt die Kombination insbesondere wechselseitig die Schwächen zu eliminieren. Bei der SE kann das bedeuten, dass eine aktive Schädigung durch falsche Wahl der Einstellungen möglicherweise „überhört“ wird. Die periodische Nachprüfung mit aktiven Ultraschall (z.B. geführte Wellen) kann eine solche

Schädigung aber dennoch nachweisen. Tauchen hingegen vermehrt SE-Signale auf, ohne dass Anzeigen in der aktiven Ultraschallprüfung resultieren, so kann dies möglicherweise an der geringeren Nachweisgrenze liegen. Die Kombination erlaubt dann aber dennoch die Einleitung wirksamer Maßnahmen, z.B. die Verwendung einer anderen Prüffrequenz.

8 Zusammenfassung

In-situ Prüfmethode ermöglichen uns ein vollständigeres Bild der Vorgänge im Inneren von Faserverbundwerkstoffen zu entwickeln. Die damit geschaffene Datengrundlage ist eine hervorragende Ausgangsbasis für moderne, werkstofforientierte Modellierungsverfahren. Die bessere Berechenbarkeit der Schädigungsinitiation und – ausbreitung in faserverstärkten Materialien trägt dabei in erheblichem Maße zur Erhöhung der Betriebssicherheit solcher Strukturen bei.

Die in-situ Überwachung erhebt zudem den Anspruch, Informationen über den Zustand des Materials in Echtzeit bereit zu stellen. Auch wenn dies bislang noch nicht für alle vorgestellten Methoden der Fall ist, so ist dies doch eindeutig die Zielrichtung. Dahinter verbirgt sich nicht zuletzt die Vision einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung von Strukturen aus faserverstärkten Materialien.

Diese Kurzrezension kann natürlich nur einen ersten Einblick in dieses umfassende Thema bieten, so dass der interessierte Leser ermutigt wird, einen genaueren Blick auf die im gesamten Text zitierten Originalpublikationen zu werfen.

Danksagung

Die finanzielle Unterstützung dieser Arbeiten erfolgte aus einer Reihe von Quellen. Ich bedanke mich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) zur Förderung der Forschungsprojekte MAI zfp und MAI plast im Spitzencluster MAI Carbon, für das von der Bayerischen Forschungsförderung geförderte Verbundprojekt FORCIM³A, bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zur Förderung der Forschungsprojekte HO 955/8-1 und HO 955/8-2, dem Freistaat Bayern für die Förderung des Projekts ComBo im Rahmen des Programms „BayernFIT“ und für

die Förderung des Projekts CFK-Integral im Rahmen des Programms „Neue Materialien für Bayern“. Ein besonderer Dank geht auch an die Personen, die in erheblichem Maße zum Werk „In Situ Monitoring of Fiber Reinforced Composites“ beigetragen haben, sowie insbesondere die Unterstützenden dieses Beitrags Sinan Kalafat, Sebastian Gade, Nora Schorer und Dr.- Ing. Andreas Monden.

Literatur

- [1] M. G. R. Sause, *In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites*, vol. 242. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [2] B. R. Müller, M. P. Hentschel, K.-W. Harbich, A. Lange, and J. Schors, “X-Ray Refraction Topography for Non-Destructive Evaluation of Advanced Materials,” in *15th World Conference on NDT, Roma, Italy, 2000*.
- [3] V. Trappe, S. Günzel, and S. Hickmann, “Non-destructive evaluation of micro cracking in short fibre reinforced thermoplastics with X-ray-refraction,” in *ICCM 17 - 17th International Conference on Composite Materials, 2009*.
- [4] I. Solodov and G. Busse, “Nonlinear air-coupled emission: The signature to reveal and image microdamage in solid materials,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 25, p. 251910, Dec. 2007.
- [5] I. Solodov, J. Wackerl, K. Pfeleiderer, and G. Busse, “Nonlinear self-modulation and subharmonic acoustic spectroscopy for damage detection and location,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 26, p. 5386, Jun. 2004.
- [6] N. Krohn, R. Stoessel, and G. Busse, “Acoustic non-linearity for defect selective imaging,” *Ultrasonics*, vol. 40, no. 1–8, pp. 633–637, May 2002.
- [7] Y. Nishio, a Todoroki, Y. Mizutani, and Y. Suzuki, “Electrical Resistance Change of Interlaminar Woven-Fabric Cfrp in Mode II Fracture,” no. June, pp. 22–26, 2014.
- [8] V. Munoz et al., “Coupling infrared thermography and acoustic emission for damage study in CFRP composites,” in *The 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography - QIRT 2014, 2014*.
- [9] B. Rodriguez, C. Galleguillos, R. Fernández, and F. Lasagni, “Passive Infrared Thermography for Damage Monitoring During Structural Testing of Cfrp Parts,” no. June, pp. 22–26, 2014.
- [10] I. R. T. J. Verne and C. Chaffault, “Defect Localization in Plane Composite : a Non-,” no. June, pp. 22–26, 2014.
- [11] A. Raghavan and C. E. S. Cesnik, “Review of guided-wave structural health monitoring,” *Shock Vib. Dig.*, vol. 39, no. 2, pp. 91–114.
- [12] M. A. Sutton, J. J. Orteu, and H. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer Verlag, Berlin, 2009.
- [13] M. A. Sutton, J. H. Yan, V. Tiwari, H. W. Schreier, and J. J. Orteu, “The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 46, no. 10, pp. 746–757, Oct. 2008.
- [14] Y. Q. Wang, M. A. Sutton, H. A. Bruck, and H. W. Schreier, “Quantitative Error Assessment in Pattern Matching: Effects of Intensity Pattern Noise, Interpolation, Strain and Image Contrast on Motion Measurements,” *Strain*, vol. 45, no. 2, pp. 160–178, Apr. 2009.
- [15] R. Bigger et al., “A Good Practices Guide for Digital Image Correlation,” Oct. 2018.
- [16] N. Schorer and M. G. R. Sause, “Identification of failure mechanisms in CFRP laminates using 3D digital image correlation,” in *20th International Conference on Composite Materials, 2015*, pp. 1–8.
- [17] A. Monden, M. G. R. Sause, and S. Horn, “Surface modified Steel/Epoxy-based CFRP Hybrid Laminates under Mode I, Mode II and Mixed-Mode Load Conditions,” in *Proceedings of ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials, 2016*.
- [18] A. Monden et al., “Evaluation of Surface modified CFRP-Metal Hybrid Laminates,” in *Proceedings of Euro Hybrid Materials and Structures 2014, 2014*, pp. 1–8.
- [19] Markus G.R. Sause, *In Situ Monitoring of Fiber Reinforced Composites*. 2016.
- [20] M. A. Hamstad, “Thirty years of advances and some remaining challenges in the application of acoustic emission to composite materials,” in *Acoustic Emission Beyond the Millennium*, S. Y. T. Kishi, M. Ohtsu, Ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2000, pp. 77–91.
- [21] K. Ono and A. Gallego, “Research and Applications of AE on Advanced Composites,” *J Acoust. Emiss.*, vol. 30, pp. 180–229, 2012.
- [22] S. Kalafat and M. G. R. Sause, “Acoustic emission source localization by artificial neural networks,” *Struct. Heal. Monit.*, vol. 14, no. 6, pp. 633–647, Nov. 2015.
- [23] M. G. R. Sause, M. A. Hamstad, and S. Horn, “Finite element modeling of conical acoustic emission sensors and corresponding experiments,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 184, pp. 64–71, Sep. 2012.
- [24] M. G. R. Sause and S. Richler, “Finite Element Modelling of Cracks as Acoustic Emission Sources,” *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 34, no. 1, p. 4, Mar. 2015.
- [25] M. G. R. Sause, M. A. Hamstad, and S. Horn, “Finite element modeling of lamb wave propagation in anisotropic hybrid materials,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 53, pp. 249–257, Oct. 2013.
- [26] M. G. R. Sause, A. Gribov, A. R. Unwin, and S. Horn, “Pattern recognition approach to identify natural clusters of acoustic emission signals,” *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 33, no. 1, pp. 17–23, Jan. 2012.
- [27] A. A. Anastassopoulos and T. P. Philippidis, “Clustering Methodology for the Evaluation of Acoustic Emission from Composites,” *J. Acoust. Emiss.*, vol. 13, pp. 11–21, 1995.
- [28] T. Philippidis, V. Nikolaidis, and A. Anastassopoulos, “Damage Characterisation of C/C laminates using Neural Network Techniques on AE signals,” *NDT&E Int.*, vol. 31, pp. 329–340, 1998.

- [29] J. M. Richardson, R. K. Elsley, and L. J. Graham, "Nonadaptive, semi-adaptive and adaptive approaches to signal processing problems in nondestructive evaluation," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 2, no. 6, pp. 387–394, Dec. 1984.
- [30] E. Vi-Tong and P. Gaillard, "An algorithm for non-supervised sequential classification of signals," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 5, no. 5, pp. 307–313, 1987.
- [31] S. Huguet, N. Godin, R. Gaertner, L. Salmon, and D. Villard, "Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 62, pp. 1433–1444, 2002.
- [32] C. R. Ramirez-Jimenez, N. Papadakis, N. Reynolds, T. H. Gan, P. Purnell, and M. Pharaoh, "Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, pp. 1819–1827, 2004.
- [33] A. Marec, J.-H. Thomas, and R. Guerjouna, "Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 22, pp. 1441–1464, 2008.
- [34] M. G. R. Sause, F. Haider, and S. Horn, "Quantification of metallic coating failure on carbon fiber reinforced plastics using acoustic emission," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 204, no. 3, pp. 300–308, Oct. 2009.
- [35] M. G. R. Sause and S. Horn, "Simulation of Acoustic Emission in Planar Carbon Fiber Reinforced Plastic Specimens," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 29, no. 2, pp. 123–142, Jun. 2010.
- [36] D. D. Doan, E. Ramasso, V. Placet, L. Boubakar, and N. Zerhouni, "Application of an Unsupervised Pattern Recognition Approach for AE Data Originating from Fatigue Tests on CFRP," in *31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission*, 2014, pp. 1–8.
- [37] A. A. Anastassopoulos, V. N. Nikolaidis, and T. P. Philippidis, "A Comparative Study of Pattern Recognition Algorithms for Classification of Ultrasonic Signals," *Neural Comput. Appl.*, vol. 8, no. 1, pp. 53–66, 1999.
- [38] P. Yu, V. Anastassopoulos, and a. N. Venetsanopoulos, "Pattern recognition based on morphological shape analysis and neural networks," *Math. Comput. Simul.*, vol. 40, no. 5–6, pp. 577–595, 1996.
- [39] F. Baensch, M. G. R. Sause, A. J. Brunner, and P. Niemz, "Damage evolution in wood – pattern recognition based on acoustic emission (AE) frequency spectra," *Holzforschung*, vol. 69, no. 3, pp. 1–9, Jan. 2015.
- [40] V. Kostopoulos, T. Loutas, A. Kontsos, G. Sotiriadis, and Y. Pappas, "On the identification of the failure mechanisms in oxide/oxide composites using acoustic emission," *NDT E Int.*, vol. 36, no. 8, pp. 571–580, Dec. 2003.
- [41] R. de Oliveira, O. Frazão, J. L. Santos, and A. T. Marques, "Optic fibre sensor for real-time damage detection in smart composite," *Comput. Struct.*, vol. 82, no. 17–19, pp. 1315–1321, Jul. 2004.
- [42] P. Potstada, S. Rosini, M. Mavrogordato, I. Sinclair, M. Spearing, and M. G. R. Sause, "Cross-validation of single filament failure by acoustic emission and high-resolution synchrotron computed tomography," in *ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials*, 2018, pp. 1–8.
- [43] S. O. Gade, U. Weiss, M. A. Peter, and M. G. R. Sause, "Relation of Electromagnetic Emission and Crack Dynamics in Epoxy Resin Materials," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 33, no. 4, pp. 711–723, Dec. 2014.
- [44] S. O. Gade and M. G. R. Sause, "Measurement and Study of Electromagnetic Emission Generated by Tensile Fracture of Polymers and Carbon Fibres," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 36, no. 1, p. 9, Mar. 2017.
- [45] A. E. Scott, I. Sinclair, S. M. Spearing, M. Mavrogordato, A. R. Bunsell, and A. Thionnet, "Comparison of the accumulation of fibre breaks occurring in a unidirectional carbon / epoxy composite identified in a multi-scale micro-mechanical model with that of experimental observations using high resolution computed tomography," in *Matériaux 2010*, 2010, pp. 1–9.
- [46] A. E. Scott et al., "High resolution damage detection of loaded carbon/epoxy laminates using synchrotron radiation computed tomography," in *ICCM-18 18th International Conference on Composite Materials*, 2011, pp. 1–6.
- [47] A. E. Scott, I. Sinclair, S. M. Spearing, M. N. Mavrogordato, and W. Hepples, "Influence of voids on damage mechanisms in carbon/epoxy composites determined via high resolution computed tomography," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 90, pp. 147–153, Jan. 2014.
- [48] A. J. Patel, N. R. Sottos, E. D. Wetzel, and S. R. White, "Autonomic healing of low-velocity impact damage in fiber-reinforced composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 3, pp. 360–368, 2010.
- [49] A. E. Scott, I. Sinclair, S. M. Spearing, A. Thionnet, and A. R. Bunsell, "Damage accumulation in a carbon/epoxy composite: Comparison between a multiscale model and computed tomography experimental results," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 9, pp. 1514–1522, Sep. 2012.
- [50] D. S. Ivanov, F. Baudry, B. Van Den Broucke, S. V. Lomov, H. Xie, and I. Verpoest, "Failure analysis of triaxial braided composite," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 9, pp. 1372–1380, Jul. 2009.
- [51] F. Baensch et al., "Damage evolution in wood: synchrotron radiation micro-computed tomography (SR μ CT) as a complementary tool for interpreting acoustic emission (AE) behavior," *Holzforschung*, vol. 69, no. 8, Jan. 2015.
- [52] R. El Guerjouna et al., "Non-destructive evaluation of damage and failure of fibre reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission," *Adv. Eng. Mater.*, 2001.