

Untersuchungen zur Anwendbarkeit von aktiv und passiv angeregten geführten elastischen Wellen für die Überwachung von faserverstärkten Kunststoffen

Tobias GAUL¹, Kilian TSCHÖKE¹, Alexander PIETZSCH¹, Eberhard SCHULZE¹,
Lars SCHUBERT¹

¹ Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Dresden

Kontakt E-Mail: tobias.gaul@ikts.fraunhofer.de

Kurzfassung. Faserverstärkte Kunststoffe sind heutzutage in zahlreichen industriellen Anwendungen zu finden. Diese Materialien weisen hohe Zug- und Biegefestigkeiten bei geringer Dichte auf. Gezielte Faserausrichtungen der einzelnen Lagen ermöglichen die Realisierung belastungsangepasster Strukturen. Die Anwendung dieser Materialien ist besonders in Bereichen relevant, in den große Massen bewegt und beschleunigt werden müssen, wie in der Luft- und Raumfahrttechnik, im Schienenfahrzeug- und Automobilbau. Allerdings stellt die Prüfung und Überwachung dieser Strukturen eine Herausforderung dar, da sich das Schädigungsverhalten gegenüber dem von Metallen unterscheidet. Es können von außen nicht-sichtbare strukturelle Veränderungen, wie Delaminationen und Zwischenfaserbrüche auftreten, die eine lokale Abschwächung der Steifigkeit verursachen und zum Versagen der Bauteile führen können.

Im Rahmen dieser Arbeit werden aktive und passive Ultraschalltechniken auf der Grundlage von geführten Wellen auf ihre Anwendbarkeit an CFK-Strukturen untersucht. Dazu werden an Prüfkörpern mit unterschiedlichen Faserorientierungen Zugversuche mit zyklisch steigender Last bis zum vollständigen Versagen der Probe durchgeführt. Während der Belastung werden die im Prüfkörper entstehenden akustischen Emissionen erfasst. In den Pausen zwischen den Messrampen werden aktiv angeregte geführte Wellen in den Prüfkörper eingekoppelt und wieder empfangen. Aus den gewonnenen Messdaten werden unterschiedliche Parameter extrahiert, die eine Überwachung der Degradation der Prüfkörper ermöglichen. Abschließend erfolgen eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der aktiven und passiven Methode und ein Vergleich bezüglich ihrer Aussagekraft und Empfindlichkeit.

Einführung

Die Bewertung des Strukturzustandes von faserverstärkten Kunststoffen stellt in den Bereichen Luftfahrt und Automobil immer noch eine Herausforderung dar. Verglichen mit isotropen Materialien weisen Kompositmaterialien ein komplexeres Schadensverhalten auf. Eine Auslegung erfolgt daher oft überdimensioniert, um Fehlstellen einer bestimmten Form und Größe tolerieren zu können. Somit kann das volle Potential faserverstärkter Strukturen nicht ausgenutzt werden und das Gesamtgewicht eines Bauteils steigt.



Zur Ermittlung von Schäden existieren heutzutage unterschiedliche Verfahren. Am weitesten verbreitet sind Volumenprüfmethoden wie Computertomographie und Ultraschallverfahren. Die Anwendung von Röntgenverfahren wird durch geltende Sicherheitsbestimmungen und Zugangsvoraussetzungen zum Prüfobjekt erschwert und wird daher vorrangig für Komponentenprüfung und Laboruntersuchungen verwendet. Ultraschallverfahren wie Puls-Echo und Phased Array werden in der Luftfahrt zur wiederkehrenden Prüfung angewendet. Auch hier muss eine gute Zugänglichkeit zum Prüfobjekt gewährleistet sein. Mit zunehmender Krümmung der Struktur wird eine Prüfung zusätzlich erschwert.

Als Alternative zu den zuvor beschriebenen Techniken bieten sich geführte elastische Wellen an. Im Vergleich zu klassischen Ultraschallwellen breiten sich diese Wellen bei geringeren Frequenzen mit einer komplexeren Wellenbewegung aus. In Abhängigkeit von der Art der Anregung können sie in aktiv und passiv angeregte Wellen unterschieden werden. Für eine zerstörungsfreie Prüfung und Strukturzustandsbewertung können akustische Emissionen bezüglich ihrer Quellmechanismen und Schädigungsmechanismen, welche zu einer Emission führen, bewertet werden. Besonders das Identifizieren von Schädigungsmechanismen ist herausfordernd, da unterschiedliche Schäden gleichzeitig Emissionen aussenden können. Das aufgezeichnete Signal ist für gewöhnlich die Summe unterschiedlicher Schädigungsarten, wodurch eine Interpretation erschwert wird. Bei der Anwendung aktiv angeregter Ultraschallwellen werden Signaleigenschaften des transmittierten Wellenpaketes zwischen mehreren Wandlerpaaren ausgewertet und auf das Hindeuten von strukturellen Änderungen bewertet. Dabei spielen die Anordnungen von Wandlern, die Wahl eines geeigneten Wellenmodes und die Frequenz für eine Wechselwirkung mit einem Schaden eine entscheidende Rolle.

In dieser Arbeit werden in Couponversuchen spezifische Schädigungen in kohlefaserverstärkten Proben erzeugt. Weiterhin erfolgt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der simultan gemessen aktiv und passiv angeregten Wellen.

Methodik

Akustische Emission (AE)

Technische Strukturen stehen unter hoher Beanspruchung, welche durch mechanische oder thermische Spannungen hervorgerufen werden und zu mikroskopischen oder makroskopischen Materialveränderungen führen. Überschreiten diese Spannungen einen Schwellwert wird Energie in Form einer elastischen Welle frei.

Bereits in den 1950er Jahren untersuchte Joseph Kaiser das akustische Verhalten von Metallen unter Spannung. Der daraufhin benannte Kaiser-Effekt beschreibt die Abwesenheit akustischer Emissionen bis zum Überschreiten der zuvor erreichten maximalen Last [1]. Seitdem befassen sich zahlreiche Forscher mit dem Auftreten von akustischen Emission an unterschiedlichen Materialien. In den letzten Jahren gibt es eine zunehmende Anzahl von Untersuchungen an kohlefaserverstärkten Kunststoffverbunden (CFK), welche auch Bestandteil dieser Arbeit sind.

Neben dem Kaiser-Effekt tritt an Kunststoffverbunden eine weitere Charakteristik auf, der sogenannte Felicity-Effekt. Dieser Effekt besagt, dass die Vorschädigung einer Struktur die Schallemissionsaktivität eines nachfolgenden Belastungszyklus beeinflusst. Akustische Emissionen können demnach bei zyklisch oder schrittweise geänderten Lasten bereits vor dem Erreichen der zuvor angefahrenen Maximallast entstehen [2].

Ein erster Ansatz zur Beschreibung unterschiedlicher Schädigungsmechanismen an faserverstärkten Kunststoffen wurde von Bohse durchgeführt [3]. Er untersuchte

glasfaserverstärkte Materialien mithilfe des DCB-Tests (Double Cantilever Beam Test). Dadurch werden Delaminationen im Material erzeugt, deren Entstehung parallel durch AE-Sensoren aufgezeichnet wurde. Er ermittelte spezifische Frequenzbereiche durch die Kombination von Quellortung und Frequenzanalyse, wobei sich Emissionen durch Matrixbrüche in Bereiche zwischen 100 und 350 kHz und Faserrisse in Bereichen von 350 bis 700 kHz abbildeten.

Im Rahmen seiner Dissertation untersuchte Sause die Identifikation von unterschiedlichen Schadensmechanismen mithilfe von Mustererkennung und weiteren Analysemethoden [4, 5]. Dabei betrachtete er vorrangig beschichtete CFK-Proben. Die Auswertung der akustischen Emissionen basierte auf Amplituden- und Energiebewertungen und Clusterung dieser Daten. In weiteren Untersuchungen simulierte Sause die Ausbreitung von AE-Signalen und nutzte die gewonnenen Daten für Clusteranalysen. Anschließend verglich er diese Daten mit experimentellen aus Zug- und Biegeversuchen. Dabei verwendete er Kombinationen unterschiedlicher Parameter im Frequenzbereich wie die gewichtete Vorzugsfrequenz (GVF), die sich gemäß

$$f_{GVF} = \sqrt{\frac{f_{max} \cdot \int f \cdot \hat{U}(f) df}{\int \hat{U}(f) df}} \text{ und } \textit{partielle Energie } n = \frac{\int_{f_1}^{f_2} \hat{U}^2(f) df}{\int_0^{f_a} \hat{U}^2(f) df}$$

berechnet, wobei sich die partielle Energie 1 in den Grenzen $f_1 = 0$ kHz und $f_2 = 150$ kHz und die partielle Energie 2 in den Grenzen $f_1 = 150$ kHz und $f_2 = 350$ kHz ermittelt. Abschließend verglich Sause die Ergebnisse aus Simulation und Experiment mit mikroskopischen Untersuchungen. Durch Clusterung der Daten gelang es ihm, die Schallereignisse anhand ihrer Frequenzeigenschaften in Matrix-, Zwischenfaser- und Faserbruch zu unterteilen. In Abhängigkeit von Material, Geometrie und Abstand der AE-Sensoren können einzelne Cluster nur unzureichend voneinander getrennt werden. Dies muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Aktiv angeregte geführte Wellen

Geführte Wellen breiten sich zwischen den Oberflächen von platten- und schalenförmigen Strukturen aus und sind über lange Distanzen ausbreitungsfähig. Durch Superposition von longitudinalen und transversalen Wellen können dabei unterschiedliche Moden angeregt werden. Dabei werden drei Arten von Moden unterschieden. Zum einen antisymmetrische Moden (A_n), symmetrische Moden (S_n) und Schermoden (SH_n). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Wellenmoden ist neben dem Material auch von der Frequenz abhängig.

Die Anwendung geführter Wellen wird durch unterschiedliche Parameter beeinflusst. Neben den elastischen Materialkonstanten einer Struktur beeinflussen auch Umgebungs- und Einsatzbedingungen, wie Vorspannung, Temperatur und Feuchtigkeit die Wellenausbreitung. Für isotrope Materialien werden geführte Wellen bereits seit mehr als 30 Jahren erforscht. Auch im Bereich anisotroper Materialien nimmt die Anwendung von geführten Wellen zu, da sie die Möglichkeit bieten, Delaminationen zu detektieren, welche mit visueller Inspektion nicht wahrgenommen werden können.

Untersuchungen von Tan [6] zeigen das Potential geführter Wellen bei der Detektionen von Delaminationen an unidirektional verstärkten Proben. Mit unterschiedlichen Klebestreifen wurden künstliche Delaminationen erzeugt. Durch den Einsatz eines Winkelprüfkopfes werden vorrangig S_0 -Moden angeregt und empfangen. Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Einbruch der transmittierten Wellenenergie, wenn der Prüfkopf auf oder hinter der Delamination positioniert wurde. Durch diesen Effekt war es möglich, auch die Größe einer Delamination zu ermitteln, wobei im Vergleich zum klassischen Ultraschall eine höhere Genauigkeit erreicht wurde, wenn die Schäden nah der Oberfläche lagen.

Mit einem verteilten Netzwerk aus piezoelektrischen Wandlern, welche geführte Wellen in einem schmalbandigen Frequenzbereich anregen, wies Su [7] das Vorhandensein und die Position von künstlichen Delaminationen nach. Dabei verwendete er eine quasi-isotrope CFK-Platte mit einer Dicke von 1,3 mm. Durch die Anwendung der Wavelet-Transformation konnte Su zusätzlich Rauschen unterdrücken und den ersten eintreffenden S0-Mode identifizieren. Mithilfe einer einfachen Ortungsroutine gelang die Abschätzung des Schadensortes.

Bisherige Untersuchungen zeigen das Potential Schädigungen, wie Delaminationen und Faserbrüche, in faserverstärkten Kunststoffen zu detektieren. Jedoch weisen die beschriebenen Arbeiten vorrangig künstliche Fehlstellen auf. Nur wenige Arbeiten befassen sich mit der Untersuchung an real geschädigten Proben und verwenden dynamische Belastungsversuche, um faserverstärkte Strukturen zu schädigen. Daher werden die in dieser Arbeit vorgestellten Prüfkörper in einem Zugversuch schrittweise bis zur Maximallast gefahren, wobei sich Faserrisse und Fasermatrixablösungen ausbilden.

Versuchsergebnisse

Aufbau

Für die durchgeführten Untersuchungen wurden in einem Zugversuch spezielle Zugprüfkörper bis zum mechanischen Versagen belastet. Für die Versuche wurde die Prüfmaschine AllroundLine Zwick 100 der Firma Zwick und Roell mit hydraulischen Spannbacken verwendet. Die Prüfung erfolgte als stufenweiser Zugversuch, wobei ein periodisches Be- und Entlasten des Prüfkörpers durchgeführt wurde. Mit jeder Prüfstufe wurde die Maximallast der vorherigen Stufe, bis zum Erreichen der Bruchlast, überschritten. Als Ausgangszustand wurde an der Prüfmaschine eine Vorlast von 50 N aufgebracht. Ausgehend von der Vorlast wurde die Prüflast mit jeder Stufe um 1000 N bis zum vollständigen Versagen des Prüfkörpers erhöht. Während der Belastung der Probe wurden kontinuierlich akustische Emissionen aufgezeichnet und eine Prüfung mit geführten Wellen wurde während der Unterbrechung zwischen den Prüfzyklen bei aufgebrachter Vorlast durchgeführt (Abb. 1). Da die Phasengeschwindigkeit elastischer Wellen durch eine Vorspannung im Material beeinflusst wird, sollte diese Vorspannung für jede Messung konstant gehalten werden.

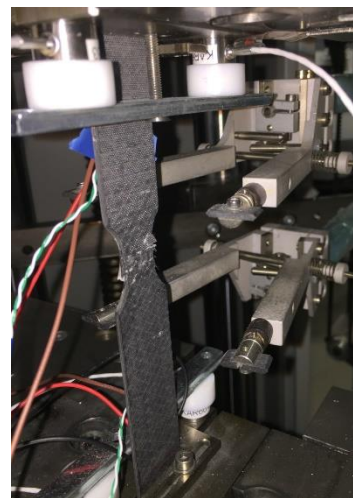
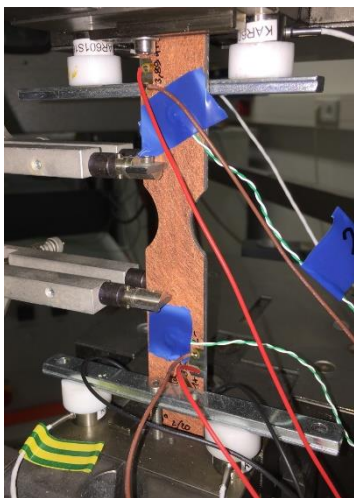


Abb. 1: Eingespannter Prüfkörper mit eingebetteten Sensoren zur Messung mit geführten Wellen und auf den Klemmbacken angebrachte Sensoren zur Messung akustischer Emissionen. Links: Prüfkörper vor Beginn der Messungen. Rechts: Prüfkörper nach erfolgreichem Prüfablauf.

Bei den verwendeten Prüfkörpern handelte es sich um Zugprüfkörper mit einer Länge von 250 mm, einer Breite von 25 mm und einer Dicke von 2 mm. Für die Versuche wurden insgesamt 10 Prüfkörper mit zwei unterschiedlichen Lagenaufbauten verwendet. Bei dem einen Lagenaufbau handelt es sich um einen symmetrischen $0^\circ/90^\circ$ -Verbund während der andere Lagenaufbau ein symmetrischer $+45^\circ/-45^\circ$ -Verbund ist. Für Messungen mit aktiv angeregten geführten Wellen wurden zwei DuraAct P-876.K025 der Firma PI Ceramic verwendet, die während der Fertigung in den Verbund integriert wurden. Passive Messungen werden mit vier KAR601 Schallemissionssensoren, welche an den Klemmbacken der Prüfmaschine angebracht sind, durchgeführt. Um die Ankopplung der Schallemissionssensoren zu verbessern, wurde ein Koppelmittel verwendet und die Sensoren mittels Joch an die Klemmbacken gedrückt. Als Messsystem kommt das am Fraunhofer IKTS entwickelte MAS 2 zum Einsatz. Damit können auf einer Hardwareplattform sowohl aktive und passive Messungen durchgeführt werden.

Ergebnisse AE-Messungen

Während den Belastungszyklen wurde an allen Proben die akustische Aktivität aufgezeichnet. In einem ersten Schritt wurden für alle Schallereignisse die gewichtete Vorzugsfrequenz und die partielle Energie in mehreren Bändern berechnet. In Abb. 2 ist die gewichtete Vorzugsfrequenz und die partielle Energie 2 für alle Prüfkörper dargestellt. Es ergeben sich drei Cluster, welche den unterschiedlichen Schadensmechanismen im CFK zugeordnet werden können, vgl. [8]. Im ersten Cluster konzentrieren sich die Schallemissionsereignisse vorrangig um eine Frequenz von 150 kHz und weisen eine partielle Energie zwischen 1 und 60 % auf. Diese Ereignisse können Matrixrisse im Material zugeordnet werden. Im zweiten Cluster sammeln sich Schallereignisse vorrangig um 170 kHz, wobei die partielle Energie zwischen 5 und 45 % liegt. Diese Ereignisse können auf Faser-Matrix-Ablösungen zurückgeführt werden. Ein dritter Cluster bildet sich um eine Frequenz von 250 kHz mit partiellen Energien zwischen 60 und 95 % aus. Dieser Cluster kann auf Faserrisse zurückgeführt werden. Im weiteren Verlauf werden diese Cluster dazu verwendet, um den auftretenden AE-Signalen entsprechende Quellmechanismen zuzuordnen.

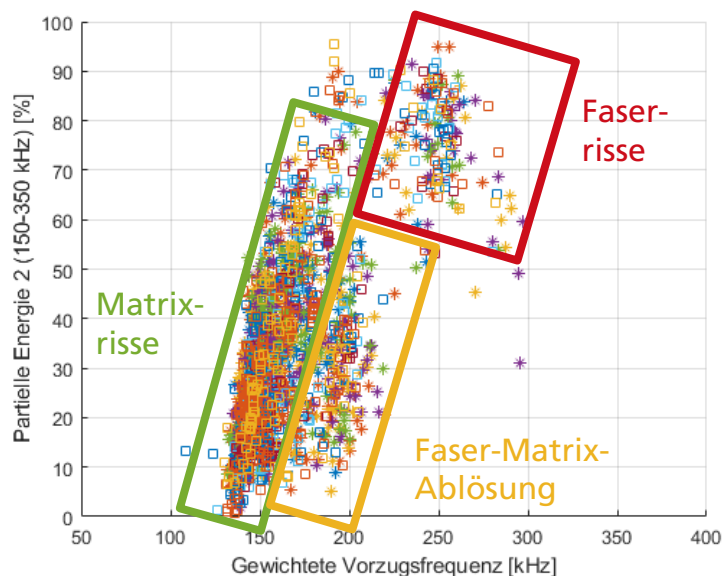


Abb. 2: Partielle Energie 2 dargestellt über der gewichteten Vorzugsfrequenz für alle Prüfkörper. Zusätzlich eingetragen sind die Cluster der Schadensmechanismen.

Abb. 3 zeigt beispielhaft den Ablauf der Prüfung für eine gekerbte 0/90-Probe. Dabei werden über der Messzeit die gewichtete Vorzugsfrequenz (rote Punkte) und die über eine 1D-Ortung berechnete Position (blaue Kreuze) der aufgetretenen Schallereignisse dargestellt. Es zeigt sich, dass zu Beginn des Lastzyklus nur wenige AE-Ereignisse mit geringer gewichteter Vorzugsfrequenz auftreten. Die Ereignisse sind dabei unregelmäßig verteilt und sind in der Nähe der integrierten DuraAct-Wandler zu finden. Mit zunehmender Kraft steigt auch die Anzahl der Schallereignisse sichtlich an. Die Position der Ereignisse konzentriert sich dabei zunehmend um den Bereich der Einschnürung der Probe, in dem ein Versagen erwartet wird. Neben zahlreichen Ereignissen mit einer gewichteten Vorzugsfrequenz um 150 kHz, welche auf eine Degradation der Matrix hindeuten, treten vermehrt Ereignisse mit einer gewichteten Vorzugsfrequenz um 200 kHz und darüber auf. Diese Ereignisse werden durch Faserrisse und Fasermatrixablösungen verursacht und deuten auf ein Versagen der Probe hin.

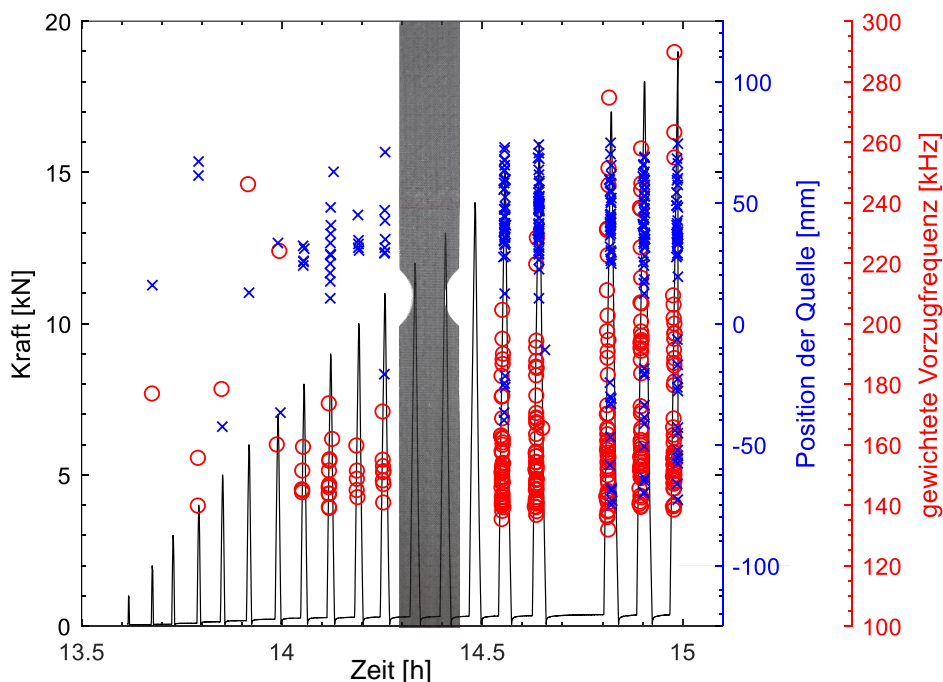


Abb. 3: Verhalten des Probekörpers während des Zugversuchs. Zu Beginn tritt vorrangig Matrixversagen (rote Punkte im unteren Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz) auf, wobei die Ereignisse im Bereich der eingebetteten Sensoren auftreten. Am Ende des Versuchs treten verstärkt Faserrisse und Faserauszüge (rote Punkte im oberen Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz) auf, wobei sich die Ereignisse im Bereich der Einschnürung konzentrieren.

Ergebnisse aktiv angeregter geführter Wellen

Die Ergebnisse der gemessenen Schallemissionsereignisse zeigen deutlich die fortschreitende Schädigung der geprüften Strukturen mit zunehmend aufgebrachtener Last. Im Vergleich zu den Schallemissionsereignissen stehen für die Prüfung mit aktiv angeregten geführten Wellen weniger Daten zur Verfügung. Für jede Laststufe kann nur ein Datensatz mit neuen Informationen extrahiert werden. Dabei werden unterschiedliche Merkmale, sogenannte Schädigungsindizes, aus den Zeitreihen ermittelt. In Abb. 4 werden exemplarisch die gemessenen Zeitreihen zweier Prüfkörper über der erreichten Laststufe dargestellt. In der Darstellung ist ein dominierender Wellenmode bei 45 μ s bzw. 50 μ s zu erkennen. Dieser weist eine signifikante Reduktion der Amplitude und eine zunehmende Phasenverschiebung, bzw. Abnahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit, ab einer Laststufe von 10 kN auf. Ab dieser Laststufe konnte auch in den Schallemissionsergebnissen eine erhöhte Aktivität

festgestellt werden. Daraus kann auf eine nachhaltige Schädigung der Probe geschlossen werden.

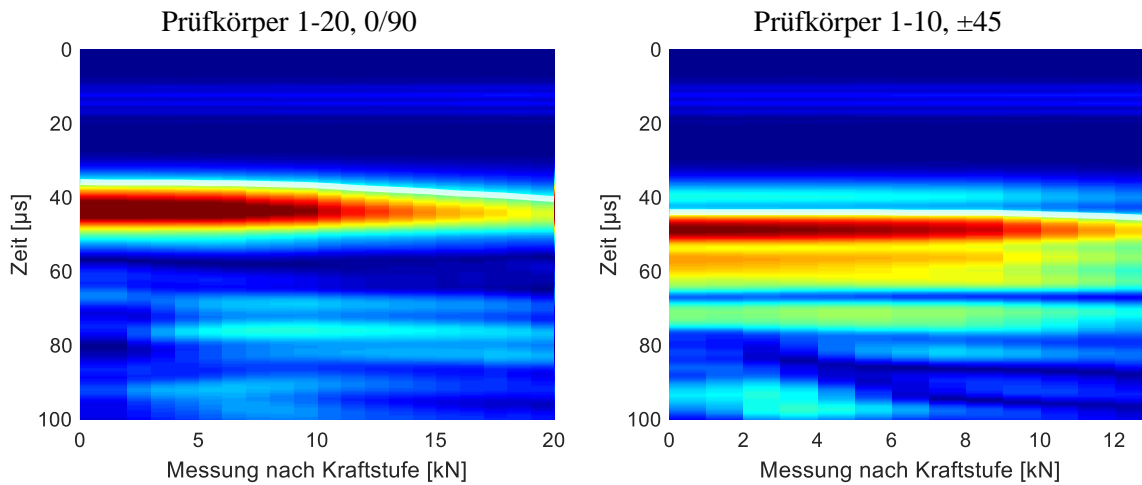


Abb. 4: Hüllkurve der gemessenen Zeitsignale nach jeder Kraftstufe für einen 0/90- und einen ± 45 -verstärkten Prüfkörper. Die weiße Linie beschreibt die Ankunftszeit des Wellenpaketes am Sensor.

Der dominierende Wellenmode wird aus dem Zeitsignal extrahiert und zur Berechnung der Schädigungsindizes DI (engl. *damage index*) verwendet. Die DIs werden zur Beschreibung der Änderung im Zeitsignal, und damit des Probenzustandes, verwendet. Die Änderung des Energiegehaltes des Modes wird über die Differenz des quadratischen Mittelwertes zwischen einem Referenzzustand x und dem Lastzustand y gemäß Park [9] berechnet:

$$DI_{rmsd} = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^M x_i^2}}$$

Die Phasenänderung des Modes wird über den Korrelationskoeffizienten aus der Kovarianzmatrix V der beiden Signale gemäß Mueller [10] berechnet:

$$DI_{cc} = 1 - \left| \frac{V_{12}}{\sqrt{V_{11}V_{22}}} \right|$$

In Abb. 5 ist die Änderung der Energie des Wellenmodes für alle untersuchten Proben getrennt nach den Faserverstärkungsrichtungen 0/90 und ± 45 über dem Mittelwert und die Standardabweichung dargestellt. Es zeigt sich, dass sich für beide Verstärkungsrichtungen vergleichbare Verläufe des Schädigungsindex ausbilden. Die 0/90-verstärkten Proben weisen bis 10 kN eine geringe Amplitudenabnahme und ab 10 kN einen steileren, stetigen, negativen Anstieg auf. Ab 20 kN kann keine Standardabweichung mehr angegeben werden, da nur eine Probe eine Last von über 20 kN erreicht hat. Bei den ± 45 -verstärkten Proben tritt das Abknicken des Schädigungsindex bei 7 kN auf und weist einen negativen Anstieg bis zur Zerstörschwelle bei 14 kN auf. In beiden Verläufen sind drei Bereiche erkennbar. Im ersten Bereich, bei geringen Laststufen, treten geringe Änderungen des Schädigungsindex auf. Es ist davon auszugehen, dass sich durch die Dehnung der Probe der Ausgangszustand bei der Vorlast von 50 N geringfügig zum Referenzzustand ändert und sich diese Änderung im Schädigungsindex abbildet. In einem zweiten Bereich tritt eine stärkere Änderung des DI_{rmsd} auf, welches auf einsetzende Bildung von Schäden wie Zwischenfaserbrüche schließen lässt. Steigt die Kraft in den Laststufen weiter, kommt es zu einem Abknicken des Verlaufes und der DI_{rmsd} verändert sich annähernd linear mit steilem Anstieg bis zum vollständigen Versagen der Probe. Dabei bilden sich neben zahlreichen Zwischenfaserbrüchen auch Faserbrüche im Bereich der Einschnürung aus.

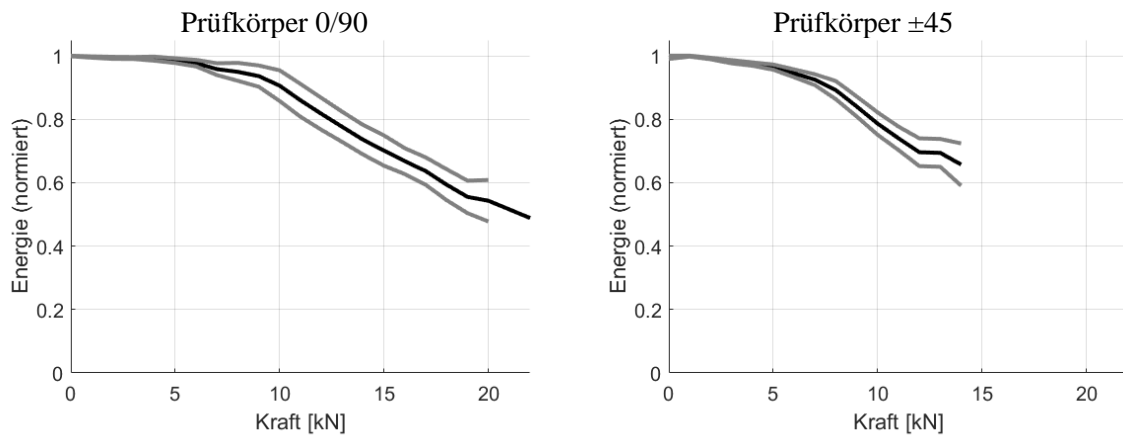


Abb. 5: Mittelwert (schwarz) und Standardabweichung (grau) der Energie des bewerteten Wellenpaketes getrennt nach der Richtung der Faserverstärkung aller Prüfkörper.

Kombination der Ergebnisse

Die zuvor dargestellten Ergebnisse stellen die Resultate der AE- und AU-Messungen getrennt dar. Anschließend soll eine Kombination dieser Ergebnisse erfolgen. Insbesondere aufgrund des monotonen Anstieges des DI der AU-Messungen kann dieser Anstieg zur Wichtung der AE-Ergebnisse angewendet werden.

Abb. 6 stellt exemplarisch eine solche Kombination der Ergebnisse für zwei Prüfkörper mit unterschiedlichen Faserverstärkungen dar. In der Abbildung ist die Häufigkeit von AE-Ereignissen in einem bestimmten Frequenzintervall (Breite 12 kHz) farbcodiert und der Verlauf des Schädigungsindex DI_{CC} dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein signifikanter Anstieg des Schädigungsindex ab 12 kN für die 0/90-verstärkte Probe und ab 10 kN für die +45/-45-verstärkte Probe auftritt. Beide Anstiege korrelieren mit einer generellen Zunahme von akustischen Ereignissen ab der genannten Kraftstufe und einer Zunahme von Ereignissen im Frequenzbereich zwischen 144 und 156 kHz im speziellen. Bis zum vollständigen Zerstören der Probe steigen Schadensindex und Schallereignisse weiter an.

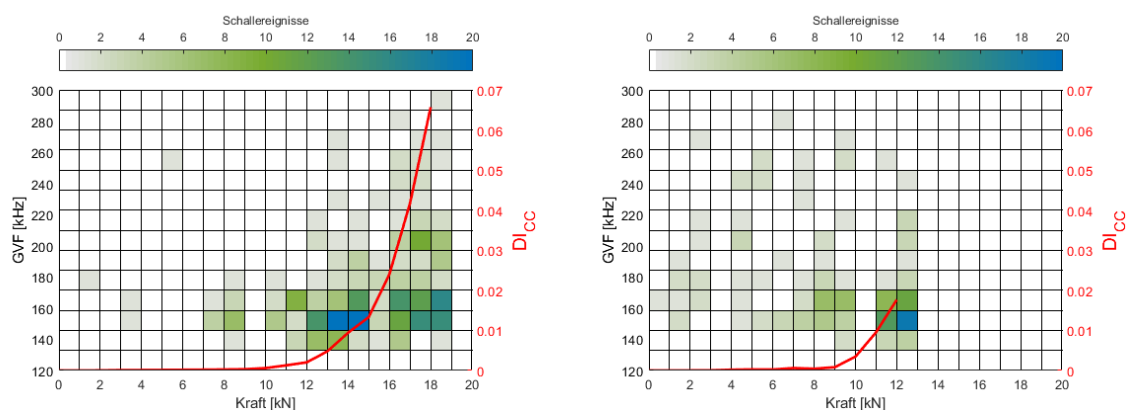


Abb. 6: Kombination der Ergebnisse von AE- und AU-Messung. Aufgetragen sind der Schädigungsindex DI_{CC} (rote Linie) und die aufgezeichneten Schallereignisse (farbcodiert) über dem Kraftverlauf und der gewichteten Vorzugsfrequenz. Links: Probe 2-20, 0/90-verstärkt. Rechts: Probe 1-10, +45/-45-verstärkt.

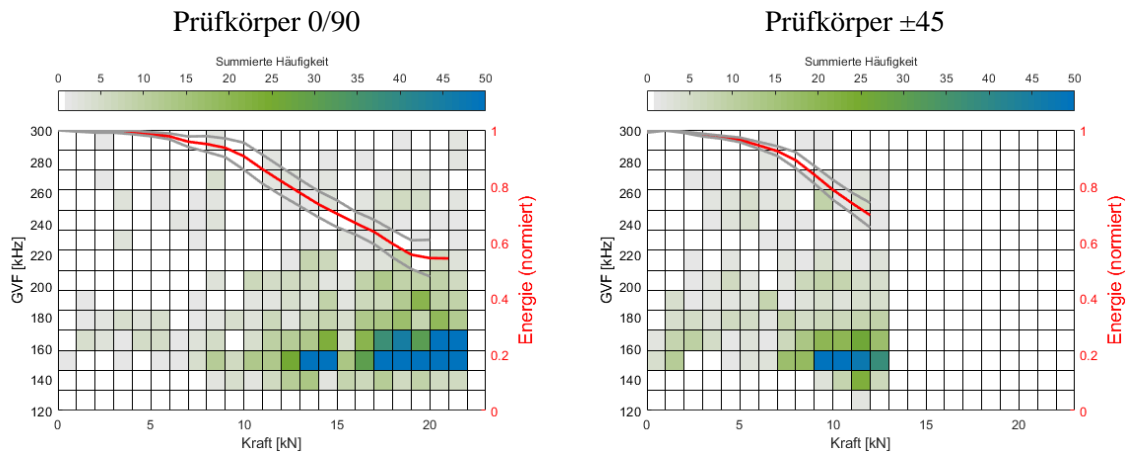


Abb. 7: Dargestellt sind Mittelwert (rot) und Standardabweichung (grau) der Energie des bewerteten Wellenpaketes und farbcodiert ist die summierte Häufigkeit der gewichteten Vorzugsfrequenz in einem Frequenzintervall für jede Laststufe.

Alternativ kombiniert Abb. 7 die Ergebnisse von AE- und AU-Messungen, indem der Mittelwert (rote Linie) sowie die Standardabweichung (graue Linien) der Energie des bewerteten Wellenpaketes jeweils für alle 0/90- und +45/-45-verstärkten Prüfkörper dargestellt werden. Farbcodiert ist die summierte Häufigkeit der gewichteten Vorzugsfrequenzen in einem Frequenzintervall für jede Laststufe. Es zeigt sich, dass die Schallereignisse ab einer Kraft von 13 kN bei den 0/90- bzw. von 9 kN bei den +45/-45-verstärkten Probekörpern signifikant zunehmen. Diese Ereignisse weisen überwiegend eine gewichtete Vorzugsfrequenz um 150 kHz auf und zeigen somit Mechanismen an, die Matrixversagen entsprechen. Ab diesen genannten Kraftstufen beginnen die Probekörper also Schäden zu erleiden, die letztendlich zum Versagen führen. Gleichzeitig zeigt der Verlauf der Energiekurven einen deutlichen Knick bereits bei Kraftstufen unten diesen genannten Werten. Der Verlauf des Schadensindex, welcher die Energie des ausgewählten Wellenpaketes betrachtet, zeigt also ebenfalls eine deutliche Änderung sobald Matrixversagen im Prüfkörper beginnt. Umgekehrt lässt sich durch die Kombination der Messergebnisse aus dem Verlauf des Schadensindex daher schlussfolgern, dass dieser ebenfalls genutzt werden kann, um relevante Schadensmechanismen zu identifizieren.

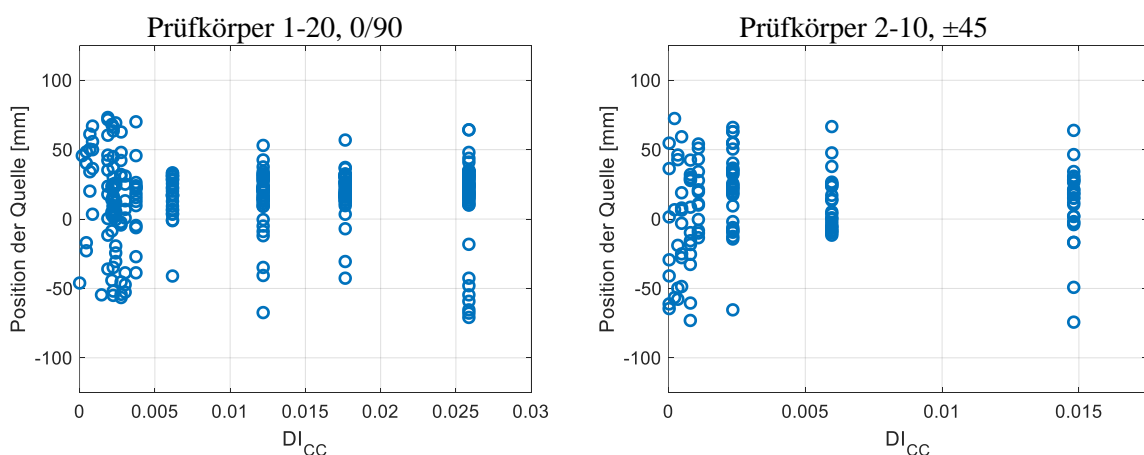


Abb. 8: Position des georteten Schallereignisses über dem nach einer Laststufe ermittelten Schadensindex DI_{CC} für einen 0/90 und ± 45 -verstärkten Prüfkörper.

Abb. 8 stellt für zwei ausgewählte Prüfkörper die Positionen der georteten Schallereignisse über dem Schadensindex DI_{CC} dar. Für den 0/90-verstärkten Prüfkörper zeigt sich, dass sich für einen Wert von DI_{CC} von unter 0,005 die georteten Schallereignisse im gesamten Prüfkörper lokalisieren lassen. Erst wenn der Schadensindex den Wert von

0,005 überschreitet, konzentrieren sich die Schallereignisse am Ort der Einschnürung des Prüfkörpers. Da in diesem Bereich des Prüflings das Versagen erwartet wird, lässt sich schlussfolgern, dass erst ab diesem Wert des Schadensindex DI_{CC} ein beginnendes Versagen des Prüfkörpers nachgewiesen werden kann. Ein analoges Verhalten zeigt sich für die +45/-45-verstärkten Prüfkörper, wobei der Wert des Schadensindex, ab dem sich die Schallereignisse in der Einschnürung konzentrieren, mit ca. 0,0025 geringer ist als bei den 0/90-Prüfkörpern. Somit lässt sich zum einen ein Schwellwert für den Schadensindex angeben, ab dem dieser eine Schädigung der Struktur anzeigt und zum anderen lassen sich die Daten der AE-Messung signifikant reduzieren ohne die Aussagekraft über die nachgewiesenen Schädigungen zu verlieren.

Abb. 9 zeigt gegenübergestellt die partielle Energie 2 über der gewichteten Vorzugsfrequenz für die aufgezeichneten Schallereignisse für alle Prüfkörper. Die linke Darstellung entspricht Abb. 2 und die rechte Darstellung zeigt das Ergebnis nachdem durch den Schwellwert des Schadensindex Schallereignisse reduziert wurden. Grau dargestellt sind die AE-Ereignisse, die nach Festlegung des Schwellwerts ausgeblendet werden können, blau dargestellt die weiterhin betrachteten. Die Menge an AE-Daten konnte so um ca. 30-40 % reduziert werden. Die Cluster, die der Beurteilung der Schadensmechanismen dienen, sind dennoch deutlich erkennbar.

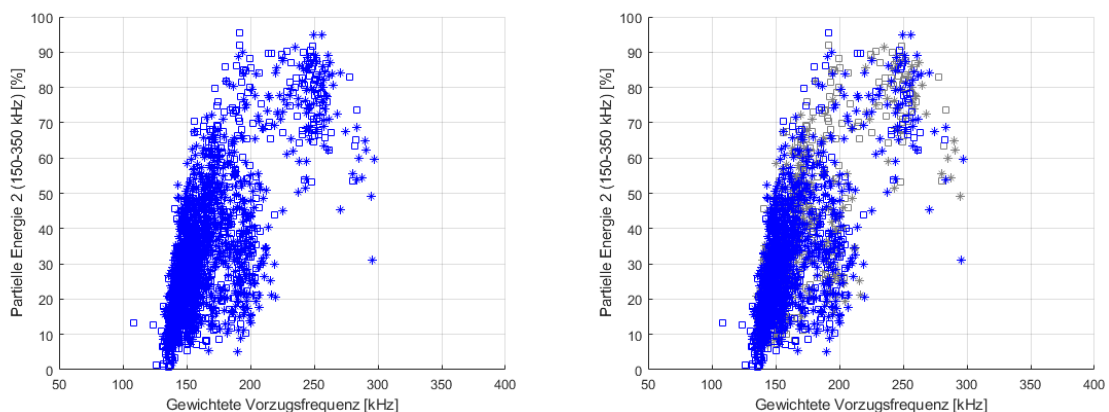


Abb. 9: Partielle Energie 2 dargestellt über der gewichteten Vorzugsfrequenz für alle Prüfkörper. Links: Alle Schallereignisse (vgl. Abb. 2). Rechts: Schallereignisse nach Festlegung eines Schadensindex DI basierend auf Abb. 8. Grau markiert sind die ausgeblendeten AE-Ereignisse, blau die weiterhin betrachteten. Zu erkennen ist eine Reduzierung der Daten um 30-40 %.

Zusammenfassung

Die durchgeführten Arbeiten zeigen das Potential zur Defekterkennung in kohlefaserverstärkten Strukturen durch Verfahrenskombination von aktiv und passiv angeregten elastischen Wellen. Es konnte gezeigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Häufigkeit und Intensität von Schallemissionsereignissen und der Änderungsrate eines berechneten Schadensindex auf einem geschädigten Pfad zwischen zwei Sensoren besteht. In nachfolgenden Arbeiten ist zu untersuchen, inwiefern sich die gewonnenen Resultate im Labormaßstab auf reale Strukturen übertragen lassen, wie sie im Luftfahrtbereich, im Automobilbau oder in der Energietechnik eingesetzt werden. Insbesondere für Großstrukturen ist es notwendig, ein Netzwerk an Sensoren auf oder in das Bauteil einzubringen, zwischen denen sich eine Vielzahl von Pfaden ergibt, entlang derer die präsentierten Auswertungen eines Schadensindex erfolgen können.

Weiterhin kann der berechnete Schadensindex genutzt werden, um die Datenmenge der AE-Signale signifikant zu reduzieren ohne an Aussagekraft zu verlieren. Zu untersuchen ist jedoch, inwiefern diese Reduktion der AE-Daten auch für sich schnell ändernde Prozesse sinnvoll sein kann. Gleichzeitig lässt sich ein Schwellwert angeben, ab dem der Schadensindex einen Schadensprozess innerhalb der Struktur nachweist. Die verwendeten Schallemissionsparameter gewichtete Vorzugsfrequenz und partielle Energie dienen der Identifizierung und Charakterisierung des Schadens.

Danksagung

Die Arbeiten wurden unterstützt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Schwerpunktprogramms KMU Innovativ als Förderprojekt „CarbonSafe“ (Förderkennzeichen: 16ES0333).

Referenzen

- [1] H. Vallen, Schallemissionsprüfung, Wuppertal: Castell-Verlag GmbH, 2005.
- [2] C. Rowland, „Acoustic emission technique to assist the formula one designer in structural design,“ in *European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE)*, 2004.
- [3] J. Bohse und J. Chen, „Acoustic emission examination of Mode I, Mode II and mixed Mode I/II interlaminar fracture of unidirectional fibre reinforced polymer,“ *Journal of Acoustic Emission Vol. 19*, pp. 1-10, 2001.
- [4] M. Sause, „Identification of failure mechanisms in hybrid materials utilizing pattern recognition techniques applied to acoustic emission signals,“ dissertation, Augsburg University, 2010.
- [5] M. Sause, D. Schultheiß und S. Horn, „Acoustic emission investigation of coating fracture and delamination in hybrid carbon fiber reinforced plastic structures,“ *Journal of Acoustic Emission Vol. 26*, pp. 1-13, 2008.
- [6] K. S. Tan, N. Guo und B. S. Wong, „Experimental evaluation of delaminations in composite plates by the use of Lamb waves,“ *Composites Science and Technology 55 (1)*, pp. 77-84, 1995.
- [7] Z. Su, L. Ye und X. Bu, „A damage identification technique for CF/EP composite laminates using distributed piezoelectric transducers,“ *Composite Structures Vol. 57*, pp. 465-471, 2002.
- [8] U. Hönig, U. Holder, A. Pietzsch, E. Schulze, B. Frankenstein und L. Schubert, „Definition of requirements for reference experiments to determine and evaluate various damage mechanisms in fibre composites by acoustic emission,“ in *19th World Conference of Non-Destructive Testing*, Munich, 2016.
- [9] I. Mueller und C.-P. Fritzen, „Inspection of Piezoceramic Transducers Used for Structural Health Monitoring,“ *Materials*, pp. 1-17, 2017.
- [10] S. Park, C.-B. Yun, Y. Roh und J.-J. Lee, „PZT-based active damage detection techniques for steel bridge components,“ *Smart Materials and Structures 15 (4)*, pp. 957-966, 2006.