

Untersuchung der Integrität von CFK-Balkenproben mittels Schallemissionsanalyse

Bianca WEIHNACHT¹, Alexander PIETZSCH¹, Eberhard SCHULZE¹,
Kilian TSCHÖKE¹, Oliver KÖCHEL¹
¹ Fraunhofer IKTS, Dresden

Kontakt E-Mail: bianca.weihnacht@ikts.fraunhofer.de

Kurzfassung. Die Diagnose von Bauteilen aus kohlefaserverstärkten Kunststoffverbundwerkstoffen (CFK) auf innere Schädigungen kann mit unterschiedlichen zerstörungsfreien Prüfverfahren bewerkstelligt werden. Das hier betrachtete Verfahren der Schallemissionsanalyse nutzt geführte akustische Wellen, die sich nach Entstehung eines Strukturschadens großflächig im Bauteil ausbreiten und von vereinzelt Sensoren am Bauteil erfasst und lokalisiert werden. Damit können – auch in großem Abstand voneinander angebrachte – akustische Sensoren größere Bauteile überwachen.

Dafür wurden mit den Projektpartnern Bauteilproben mit verschiedenen Lagenaufbauten in 4-Punkt-Biegeversuchen getestet, wobei diese mit Schallemissionsmessungen begleitet wurden. Die 10 Sensoren befanden sich für diese Balkenversuche auf der Oberseite (3 Sensoren), Unterseite (3 Sensoren), seitlich vorn (2 Sensoren) und seitlich hinten (2 Sensoren), wodurch der mittlere Bereich der Probe gut erfasst werden konnte.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die bisher vermessenen 15 Proben teilweise trotz gleicher Fertigung sehr unterschiedlich verhalten und bei unterschiedlichen Lastniveaus versagen. Die Auswertung erfolgte u. a. bezüglich der georteten Ereignisse, der Betriebsparameter, der Frequenzinhalte und der gewichteten Peakfrequenz, die sich als brauchbarer Schadensparameter etabliert hat.

Das hier vorgestellte Projekt QuantCarbon wurde von der Sächsischen Aufbaubank unter der Antragsnummer 100393561 gefördert und mit den Projektpartnern IMA Dresden, Leichtbauzentrum Sachsen und cp.max verwirklicht.

1. Einführung und Motivation

Um Schäden an aus kohlenfaserverstärkten Kunststoffverbundwerkstoffen (CFK) zu diagnostizieren, stehen im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung verschiedenste Verfahren zur Verfügung. Darunter zählen bspw. Röntgen-, Impuls-Echo-Ultraschall-, Wirbelstrom-, Radar- und Terahertz- oder auch magnetische Verfahren. Gemein ist diesen eine besondere Sensitivität in der Nähe des Sensors und damit eine steigende Ungenauigkeit mit wachsendem Sensorabstand. Dies führt dazu, dass diese Verfahren zur Anwendung an komplexen, dickwandigen Geometrien nur unzureichend geeignet sind.

Im hier betrachteten Verfahren der Schallemissionsanalyse werden akustische Wellen, die durch die Entstehung des Schadens erzeugt werden, erfasst. Diese Ereignisse erlauben dann z. B. Rückschlüsse auf Art oder auf Position der Schäden. Besonders ist, dass sich diese Wellen großflächig über das Bauteil hinweg ausbreiten und so auch durch weiter entfernte Sensoren erfasst werden können. Dies erlaubt es, große Objekte mit einer kleinen Anzahl an Sensoren zu überwachen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist, einen weiteren Schritt von der Lokalisierung einzelner Schallemissionsereignisse hin zu einem bauteilbezogenen Modell zur Beschreibung der Gesamtintegrität zu gehen. Dazu wurden Versuche an Bauteilen im Neu- als auch im reparierten Zustand durchgeführt.

2. Stand der Wissenschaft und Technik

Akustische Verfahren zur Detektion von Schädigungen in industriellen, metallischen Strukturen werden seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt. Insbesondere das passive Verfahren der Schallemission (oder Acoustic Emission Testing, kurz AT) ist ein etabliertes, zerstörungsfreies Prüfverfahren bei ausgewählten, sicherheitskritischen Strukturen. Entstehen in einem Objekt unter Lasteinwirkung Strukturschäden, so emittieren diese Schäden Ultraschallwellen, die sich im Objekt ausbreiten. Akustische Sensoren sind in der Lage, diese Ultraschallwellen, die sich im Wesentlichen oberhalb des Hörschallbereichs ausbreiten, also im Frequenzbereich von 10 bis 500 kHz, zu erfassen. Neben der Aussage einer signifikanten Abweichung vom „Ruhezustand“ des Objekts lassen sich durch Analysen der aufgezeichneten Schallsignale ebenfalls Aussagen über mögliche Schadensmechanismen treffen, oder der Schadensort visualisieren.

Als etabliertes Prüfverfahren wird AT beispielsweise bei der periodischen Prüfung von Druckbehältern aus Metall bei den Dienstleistern TÜV-Nord, TÜV-Süd, TÜV Rheinland und TÜV Austria eingesetzt. Nach der Anfahrt an das Prüfobjekt, wird dieses mit Sensoren instrumentiert. Anschließend wird das Prüfobjekt unter Betriebsdruck gesetzt und auftretende Schallemissionen aufgezeichnet. Die Auswertung der Messung erfolgt offline, d. h., die Bewertung der Messdaten ist erst nach Abschluss der Messung möglich. Die aufgezeichneten Schallereignisse werden lokalisiert und hinsichtlich ihrer Häufigkeit sowie ihres Energieeintrags bewertet. Bedingt durch die konstante und richtungsunabhängige Schallgeschwindigkeit in isotropen Metallen, ist die Lokalisierung von Schallereignissen mit wenigen Sensoren und vergleichsweise simplen Algorithmen möglich. Es ist bekannt, dass die auftretenden Schallsignale den Schadensmechanismen Korrosionswachstum sowie Vergrößerung von Rissen zu zuordnen sind [1].

Anwendungs- und Forschungsgebiete der Schallemissionsprüfung an Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen sind unter anderem die Dauerüberwachung von Bauteilen an Windenergieanlagen [2] oder auch Versuche an Couponproben und Tests von Teilen in der Luftfahrt, dem Automobilbau, Eisenbahn-Drehgestellen und CFK-Rädern, s. [3], [4] und [5]. Insbesondere die komplexen Schadensmechanismen während der Coupon- oder Bauteilbelastung stehen im Fokus aktueller Forschungen. Das Auftreten von Matrixrissen, Matrixversagen, Grenzflächenversagen (Faser-Matrix-Debonding, Faser-Pull-out, Delamination) oder Faserrissen ist u. a. abhängig von der Belastungsart, der

Belastungsrichtung, dem Lagenaufbau der Struktur sowie der Geschwindigkeit, mit der die Belastung eingebracht wird [6]. Es konnte bereits gezeigt werden, dass spezifische Parameter auftretender Schallsignale (Frequenz, Energiegehalt, Leistung) zur Unterscheidung zwischen Delaminationen, Faser-Matrix-Schäden oder rein faserbasierten Schäden herangezogen werden können. Insbesondere die sog. gewichtete Vorzugsfrequenz (Weighted Peak Frequency, kurz WPF) konnte in der Literatur als relevanter Schallemissionsparameter identifiziert werden [7], [8]. Anhand diverser Coupontests konnten Schallemissionsereignissen den Quellmechanismen verschiedener Schadensarten zugeordnet werden. Schadensmechanismen wie Matrixversagen und Delaminationen können nach einer entsprechenden Datenauswertung und Darstellung als Cluster im niederfrequenten Bereich zugeordnet werden, Faserbrüche dagegen im hochfrequenten Bereich. Diese Cluster sind jedoch probenspezifisch und müssen für die Übertragung auf andere Strukturen und Bauteile angepasst werden [8].

3. Experimentelle Umsetzung und Ergebnisse

Als Grundlagen für die Auswahl der Proben wurden von LZS Modellierungen erstellt. Auf Basis der Modellierung wurden zwei Proben vorgeschlagen, BRZ mit einem Wicklungswinkel von 52° und eine Probenart mit einer 0° und 90° Winkel (BRN). Zum Zeitpunkt der Einreichung des vorliegenden Manuskripts konnten 9 BRZ-Proben und 1 BRN-Probe gemessen werden, wie in Tabelle 1 zu sehen ist. Zusätzlich zeigt Abbildung 21 die Proben nach der Versuchsdurchführung.

Tabelle 1: Übersicht der gemessenen Balkenproben

Probenname	Art der Probe
BRZ_BT_01	Biegung – Rechteck – Zweiundfünfzig Grad
BRZ_BT_02	Biegung – Rechteck – Zweiundfünfzig Grad
BRZ_BT_05	Biegung – Rechteck – Zweiundfünfzig Grad
BRN_BT_01	Biegung – Rechteck – Null & Neunzig Grad
BRZ_BT_06	Biegung – Rechteck – Zweiundfünfzig Grad
BRZ_BT_07	Biegung – Rechteck – Zweiundfünfzig Grad
BRZ_BT_08	Biegung – Rechteck – Zweiundfünfzig Grad
BRZ_BT_09	Biegung – Rechteck – Zweiundfünfzig Grad
BRZ_BT_10	Biegung – Rechteck – Zweiundfünfzig Grad

BRZ_BT_11	Biegung – Rechteck – Zweiundfünfzig Grad
-----------	--

Für die Instrumentierung wurden IKTS-eigene Schallemissionssensoren vom Sensortyp KAR601S verwendet, welche über eine vorgespannte Membran im Sensorfuß die Schallemissionssignale detektieren. Die dazu erforderliche Kraft beträgt 50 N. Die Proben wurden mit 10 Schallemissionssensoren instrumentiert. Durchgeführt wurden 4-Punkt-Biegeversuche

In Abbildung 1 sind als Ergebnis die Anzahl an Schallemissionsereignissen für die Probe BRZ_BT_01 dargestellt. Hier sind in erster Linie Ereignisse im Bereich der linken Einspannung zu verzeichnen, aber auch ein gewisses Rauschen über die gesamte Probe. Auf der linken Seite in Abbildung 2 ist der Auswerteparameter „Gewichtete Vorzugsfrequenz“ zu sehen. Dieser Parameter erlaubt eine Bewertung der Schallemissionsereignisse bezüglich des Schadensmechanismus. Niedrige Werte (< 100 kHz, dunkelgrün-blau) deuten auf Reibvorgänge vorhandener Risse, Delaminationen sowie Rissbildung in der Matrix hin, während hohe Werte (> 170 kHz, orange-rot) auf sich aktuell entwickelnde Strukturschäden durch Faserauszug (Pull-out), Ablösen Faser/ Matrix (Debonding) und Faserbruch hinweisen. Diese Probe bewegt sich eher im mittleren Bereich.

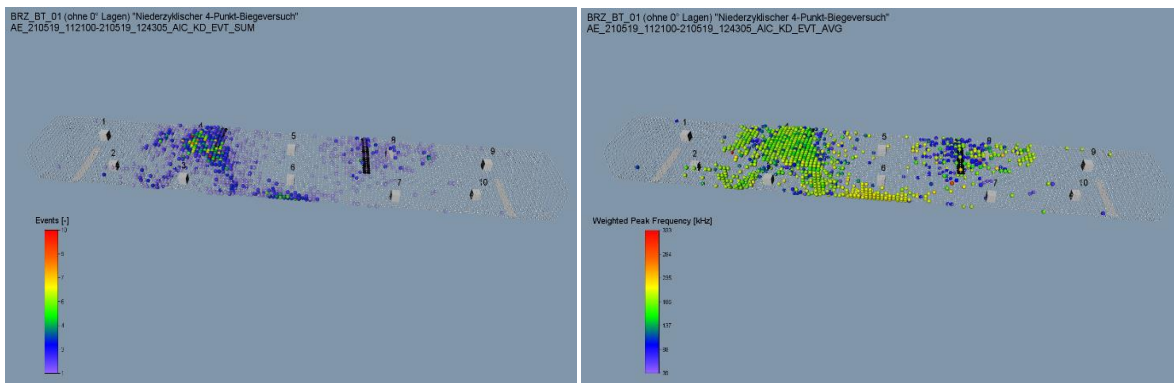


Abbildung 1: Test der Probe BRZ_BT_01 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Anzahl georteter Schallemissionen (Events) in den 4 mm x 5 mm x 5mm großen Berechnungszellen des Raummodelles

Abbildung 2: Test der Probe BRZ_BT_01 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Mittelwert der Gewichteten Vorzugsfrequenz des Burstsignals in kHz

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die Ergebnisse für die Probe BRZ_BT_02. Im Vergleich zur vorherigen Probe sind deutlich höhere Frequenzen zu erkennen (links, in Gelb), was auf sich entwickelnde Strukturschäden hinweist. Auch bei den Schallemissionsereignissen (links) ist ein klarer Hotspot auf der rechten Seite zu erkennen, der dann auch bei den Frequenzanalysen großflächig zu erkennen ist.

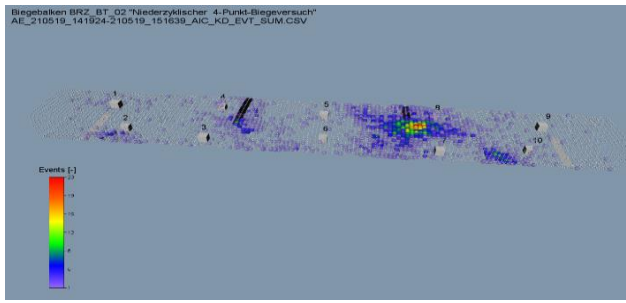


Abbildung 3: Test der Probe BRZ_BT_02 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Anzahl georteter Schallemissionen (Events) in den 4 mm x 5 mm x 5 mm großen Berechnungszellen des Raummodelles

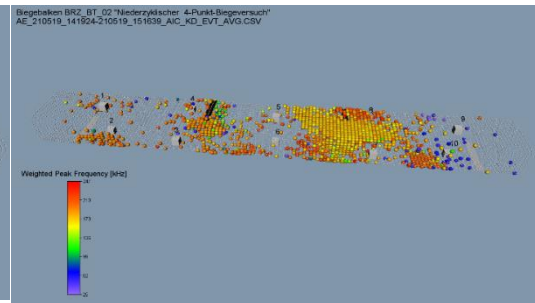


Abbildung 4: Test der Probe BRZ_BT_02 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Mittelwert der Gewichteten Vorzugsfrequenz des Burstsignals in kHz

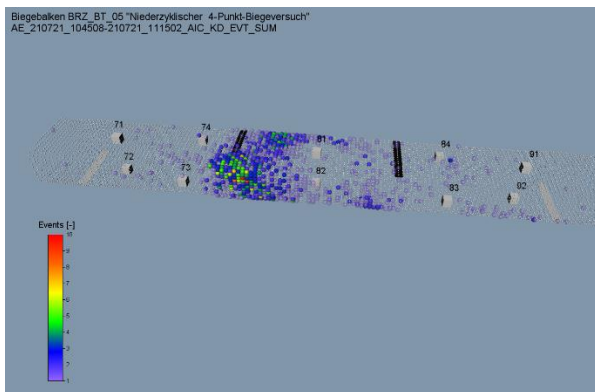


Abbildung 5: Test der Probe BRZ_BT_05 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Anzahl georteter Schallemissionen (Events) in den 4 mm x 5 mm x 5mm großen Berechnungszellen des Raummodelles

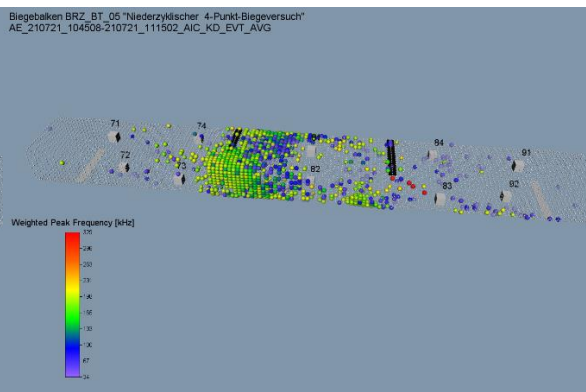


Abbildung 61: Test der Probe BRZ_BT_05 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Mittelwert der Gewichteten Vorzugsfrequenz des Burstsignals in kHz

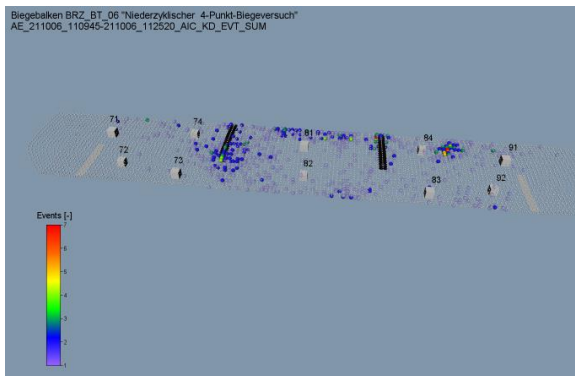


Abbildung 7: Test der Probe BRZ_BT_06 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Anzahl georteter Schallemissionen (Events) in den 4 mm x 5 mm x 5mm großen Berechnungszellen des Raummodelles

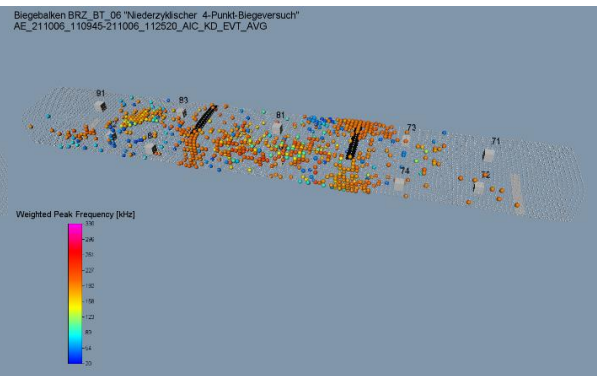


Abbildung 8: Test der Probe BRZ_BT_06 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Mittelwert der Gewichteten Vorzugsfrequenz des Burstsignals in kHz

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die Ergebnisse für die Probe BRZ_BT_05. Diese Probe ähnelt BRZ_BT_01 mit niedrigeren Frequenzen und einer Häufung der Schallemissionsereignisse im linken Bereich der Einspannung. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen die Ergebnisse für die Probe BRZ_BT_06. Hier sind im linken Bild nur wenige Schallemissionsereignisse zu erkennen. Allerdings deutet die hohe Frequenz (rechts) auf ein deutliches Strukturversagen hin. Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die Ergebnisse für die Probe BRZ_BT_07. Bezüglich der detektierten Frequenzen ähnelt diese Probe sehr der Vorgängerprobe, zeigt aber mehr Schallemissionsereignisse.

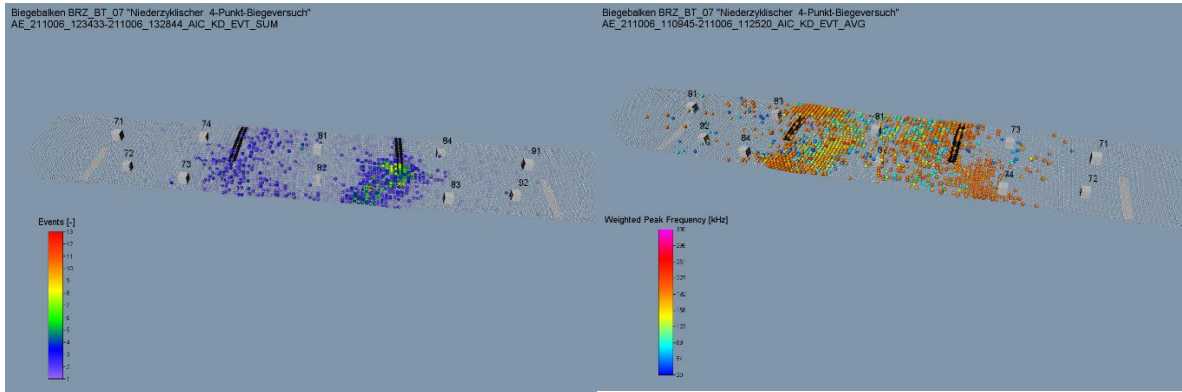


Abbildung 92: Test der Probe BRZ_BT_07 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Anzahl georteter Schallemissionen (Events) in den 4 mm x 5 mm x 5mm großen Berechnungszellen des Raummodelles

Abbildung 103: Test der Probe BRZ_BT_07 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Mittelwert der Gewichteten Vorzugsfrequenz des Burstsignals in kHz

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die Ergebnisse für die Probe BRZ_BT_08. Besonders an den Einspannstellen zeigen sich hier Schallemissionsereignisse, der Rest der Probe verzeichnet fast keine Ereignisse. Der Frequenzbereich ähnelt dem der Vorgängerproben und deutet somit auch hier auf eine Strukturschädigung hin.

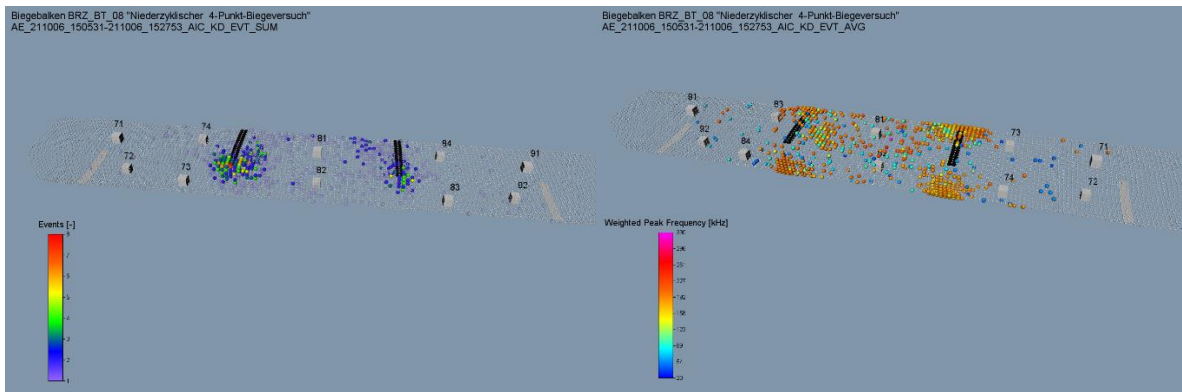


Abbildung 111: Test der Probe BRZ_BT_08 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Anzahl georteter Schallemissionen (Events) in den 4 mm x 5 mm x 5mm großen Berechnungszellen des Raummodelles

Abbildung 122: Test der Probe BRZ_BT_08 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Mittelwert der Gewichteten Vorzugsfrequenz des Burstsignals in kHz

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die Ergebnisse für die Probe BRZ_BT_09. Diese Probe zeigt, im Vergleich zu den vorherigen Proben, fast keine Schallemissionsereignisse. Die Frequenz ist deutlich niedriger.

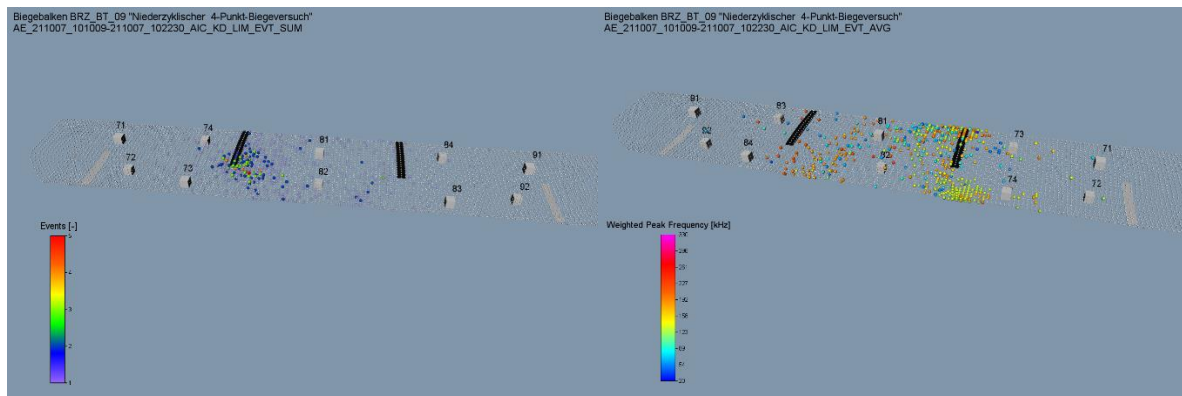


Abbildung 13: Test der Probe BRZ_BT_09 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Anzahl georteter Schallemissionen (Events) in den 4 mm x 5 mm x 5mm großen Berechnungszellen des Raummodelles

Abbildung 14: Test der Probe BRZ_BT_09 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Mittelwert der Gewichteten Vorzugsfrequenz des Burstsignals in kHz

Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die Ergebnisse für die Probe BRZ_BT_10. Auch hier wurden über die Probe verteilt nur wenige Schallemissionsereignisse detektiert. Allerdings sind die Frequenzen recht hoch und deuten auf eine Strukturschädigung hin.

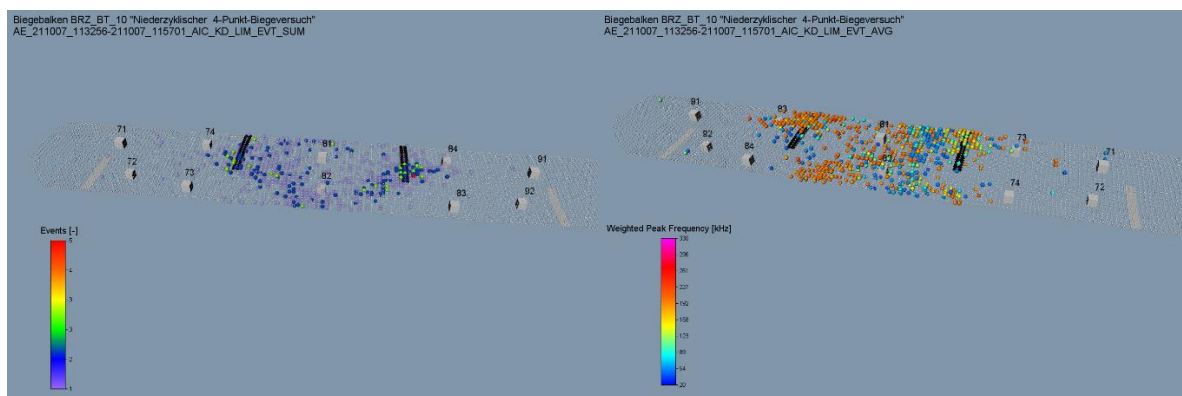


Abbildung 15: Test der Probe BRZ_BT_10 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Anzahl georteter Schallemissionen (Events) in den 4 mm x 5 mm x 5mm großen Berechnungszellen des Raummodelles

Abbildung 16: Test der Probe BRZ_BT_10 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Mittelwert der Gewichteten Vorzugsfrequenz des Burstsignals in kHz

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die Ergebnisse für die Probe BRZ_BT_11. Die Probe ähnelt BRZ_BT_10 sowohl in der Anzahl als auch im Frequenzbereich der Schallemissionsereignisse.

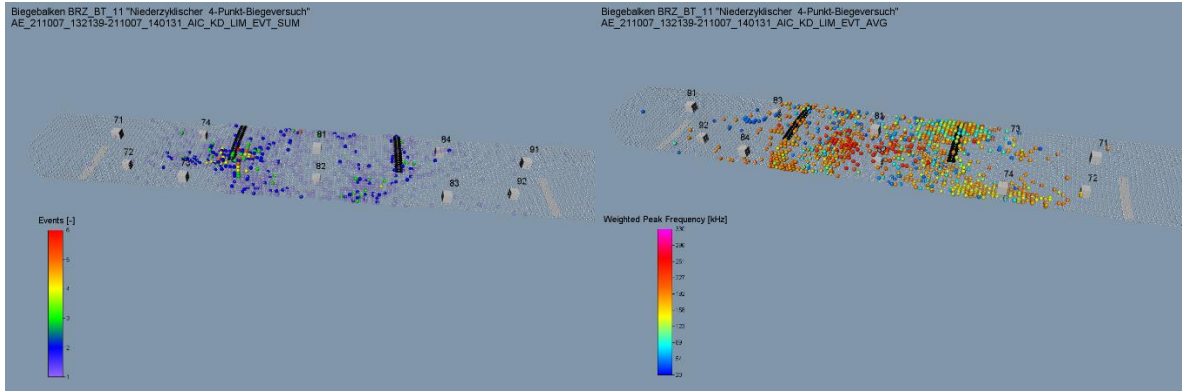


Abbildung 174: Test der Probe BRZ_BT_11 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Anzahl georteter Schallemissionen (Events) in den 4 mm x 5 mm x 5mm großen Berechnungszellen des Raummodelles

Abbildung 18: Test der Probe BRZ_BT_11 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Mittelwert der Gewichteten Vorzugsfrequenz des Burstsignals in kHz

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen die Ergebnisse für die Probe BRN_BT_01. Grundsätzlich wurden wenige Schallemissionsereignisse detektiert und die Frequenzen liegen deutlich unter denen der BRZ-Proben, sind aber auch in großen Teilen der Probe relevant und deuten eher auf Reibvorgänge als auf Faserversagen hin.

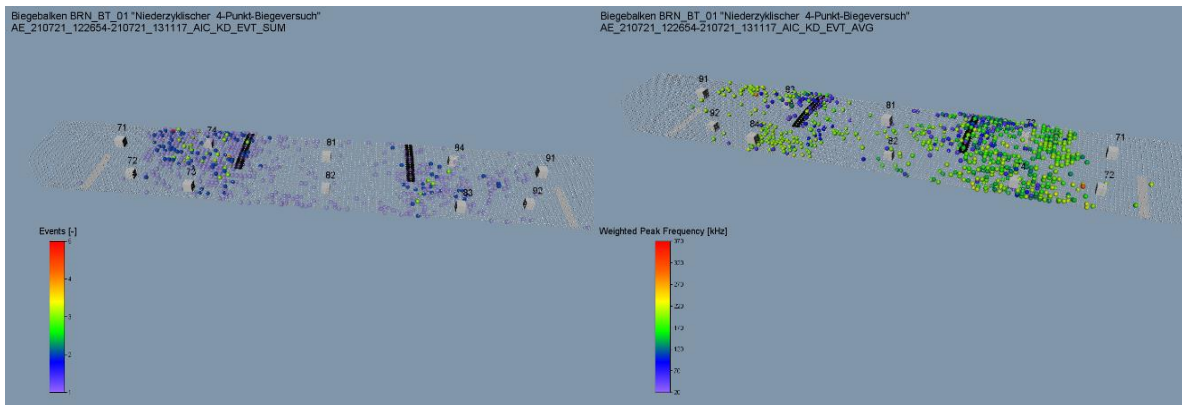


Abbildung 195: Test der Probe BRN_BT_01 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Anzahl georteter Schallemissionen (Events) in den 4 mm x 5 mm x 5mm großen Berechnungszellen des Raummodelles

Abbildung 20: Test der Probe BRN_BT_01 im 3D-Ortungsplot, Ortung mit max. 5 Sensoren; Farbparameter: Mittelwert der Gewichteten Vorzugsfrequenz des Burstsignals in kHz

Abbildung 21 zeigt die Proben der letzten Probenserie. In Grün gepunktet ist der Ort des Versagens der Probe markiert. Dass dieser immer auf einer Seite liegt, ist nicht zwangsläufig und wird derzeit untersucht, um Produktionsfehler oder Anlagendefizite auszuschließen.

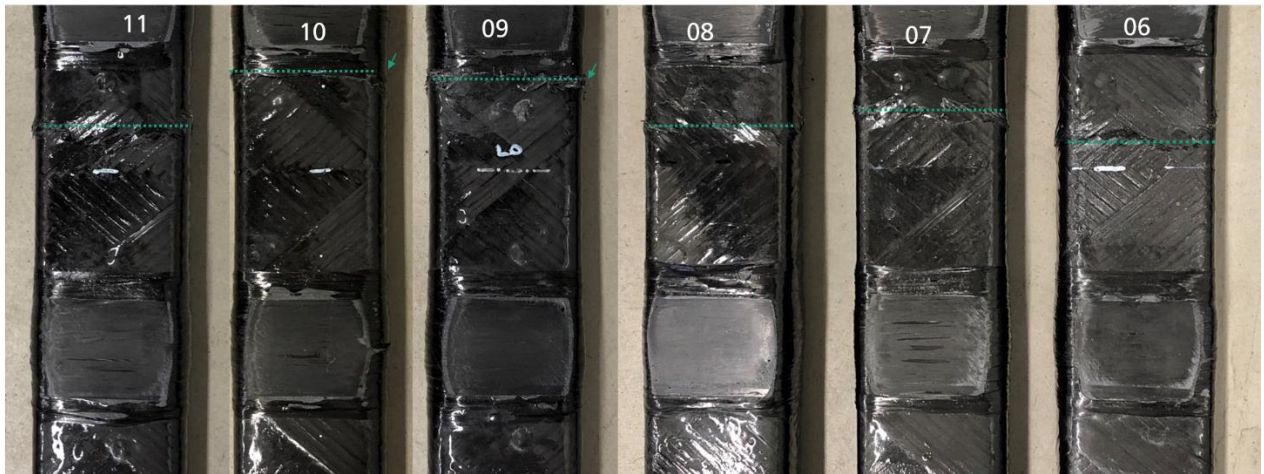


Abbildung 216: Bruchstellen der Proben BRZ_BT_06-11 in grün gepunktet markiert

4. Zusammenfassung und Ausblick

Bis zur Einreichung des vorliegenden Manuskripts wurden 9 BRZ-Proben und 1 BRN-Probe gemessen und die Ergebnisse dargestellt. Die abschließende Interpretation der Daten steht noch aus und wird nach Messung aller Proben erfolgen. Grundsätzlich lässt sich aber feststellen, dass sowohl die Probenauslegung als auch der Versuchsaufbau für die in der Versuchsreihe gestellte Aufgabe geeignet sind. Es werden bis zum Bruch ausreichend Schallemissionsereignisse gemessen, so dass eine detaillierte Interpretation erfolgen kann.

Da für die Balken und Couponproben eine einfache Abwicklung der 3D-Struktur erfolgen kann, wird diese für die Ortung genutzt. Dies ist bei komplexen Geometrien so nicht möglich. Zukünftig sollen als Modell für ein Experimente an einem Hebelarm durchgeführt werden. Für diese Anwendung werden parallel neue Ortungsalgorithmen entwickelt.

- [1] D.-F. Schallemissionsprüfverfahren, *Kompendium Schallemissionsprüfung Acoustic Emission Testing (AT) - Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung*, 2018.
- [2] B. Weihnacht, E. Schulze, A. Pietzsch, L. Schubert, A. Vandenbrande, B. Cerbe und K.-W. Borchers, „Schallemissionsmessungen während der Durchführung von Zugversuchen an GFK-Proben,“ in *DGZFP-Jahrestagung*, 2018.
- [3] T. Gaul, K. Tschöke, A. Pietzsch, E. Schulze und L. Schubert, „Untersuchungen zur Anwendbarkeit von aktiv und passiv angeregten geführten elastischen Wellen für die Überwachung von faserverstärkten Kunststoffen,“ in *22. Kolloquium Schallemission und 3. Anwenderseminar Zustandsüberwachung mit geführten Wellen*, 2019.
- [4] E. Schulze, A. Pietzsch, L. Schubert und A. Ulbricht, „Schallemissionsprüfung an einem neuartigen Leichtbau-Drehgestellrahmen aus Kohlenstofffaserverbundwerkstoff während statischer und dynamischer Ermüdungstests,“ in *22. Kolloquium Schallemission und 3. Anwenderseminar Zustandsüberwachung mit geführten Wellen*, 2019.
- [5] K. Tschöke, T. Gaul, L. Schubert, F. Dungen und J. Guerrero Santafe, „Strukturüberwachung von Kohlefaserkunststoffverbunden im Automobilbau mittels integrierten Wandlernetzwerken,“ in *4SMARTS - Symposium für Smarte Strukturen und Systeme*, 2019.