

Bauteilprüfung eines CFK-Hebelarmes mit Schallemissionsanalyse

Bianca WEIHNACHT¹, Alexander PIETZSCH¹, Eberhard SCHULZE¹,
Oliver KÖCHEL¹, Mareike STEPHAN¹
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 misst akustische Wellen, die sich nach Entstehen eines Strukturschadens im Bauteil ausbreiten und von Sensoren am Bauteil erfasst und lokalisiert werden. Durch die Messung während des Belastungsversuches oder des Betriebs kann eine In-situ Messung durchgeführt werden, der Zustand des Bauteils direkt erfasst und ein Bruch durch eine rechtzeitige Betriebsunterbrechung verhindert werden.

Der hier vorgestellte Versuch wurde an einem Hebelarm aus CFK durchgeführt. Auf dem Bauteil wurden 16 Schallemissionssensoren appliziert und mit Spannbändern fixiert. Die Ortung der Ereignisse (Events) erfolgte über 4 Ortungsebenen und im Rahmen der Auswertung wurden verschiedene Schallemissionsparameter betrachtet, so unter anderem die kumulierte Anzahl der gemessenen Schallemissionssignale (Hits), die georteten Schallemissionsereignisse (Events), die Burstenergien der Events sowie die gewichteten Peakfrequenzen der Events.

Der Versuch wurde bis zum Bruch des Bauteiles durchgeführt, wobei die Kraft in 10 kN-Schritten gesteigert und nach Erreichen des jeweiligen Maximums auf 1 kN entlastet wurde. Das Versagen des Hebelarmes trat bei 65,8 kN ein. Während des Versuchs stieg die Anzahl der Schallemissionssignale mit jeder neuen Laststufe an. Ungefähr die Hälfte der Signale konnte geortet werden. Im Bereich der sichtbaren Bruchstellen traten erhebliche Schallemissionen auf.

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.

Einführung

Akustische Verfahren zur Detektion von Schädigungen in industriellen 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, metallischen 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. Im Gegensatz zu dem in diesem geplanten Forschungsvorhaben anvisierten Anwendungsfall für kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffe ist die AT an metallischen Strukturen eine „einfache“ Anwendung. 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 der Vergrößerung von Rissen zu zuordnen sind [1].

Die Anwendung der Schallemissionsprüfung an Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen wird seit ca. 15 Jahren an diversen Forschungseinrichtungen untersucht. Seitens der Antragsteller ist hier vor allem das von der Sächsischen Aufbaubank geförderte Vorgängerprojekt „QuantSHM“ (Fördernummer 100207022) zu nennen. Ziel des Projekts war die Entwicklung eines Verfahrens zur Dauerüberwachung von Bauteilen aus glasfaserverstärkten Kompositen, insbesondere für Windenergieanlage [2]. Darüber hinaus existieren Voruntersuchungen zu Bauteilprüfungen an kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen. Diese beinhalten Versuche an Couponproben sowie vereinzelte Tests an CFK-Bauteilen aus der Luftfahrt, dem Automobilbau, an einem Eisenbahn-Drehgestell und CFK-Rädern [3][4][5].

Weiterhin untersuchen aktuelle Forschungsarbeiten die Anwendbarkeit von Schallemissionsverfahren für kohlefaserverstärkte Strukturen mit vielversprechenden Ergebnissen. 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 Schallemissionsereignisse 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 [9].

1. Versuchsdurchführung

Es wurde für diesen Versuch ein Hebelarm als Modell für ein Strukturbauteil eines Schienenfahrzeuges verwendet und horizontal in einem Versuchsstand eingespannt. Der statische Bauteilversuch des CfK-Hebelarmes fand in zwei Teilen statt, am 9.6.22 (Teil 1) und am 23.6.22 (Teil 2). Die Schallemissionssensoren wurden über 8 Spannbänder fixiert mit jeweils 2 sich gegenüberliegenden Sensoren. Benachbarte Sensorpaare waren um 90° zueinander versetzt, wie in Abb. 1 zu sehen.

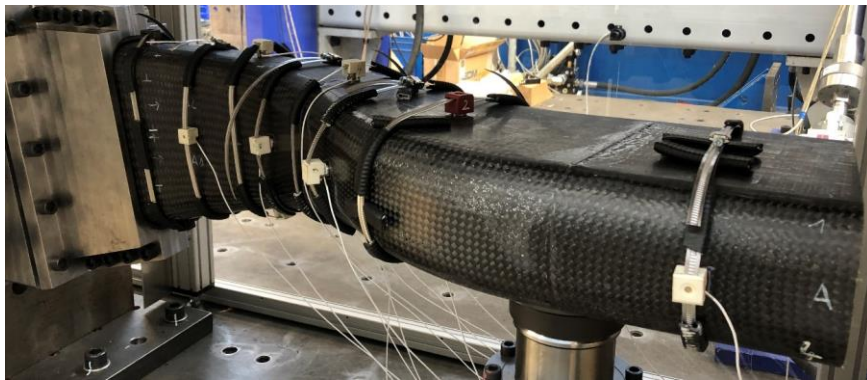


Abb. 1. CfK-Hebelarm im Prüfstand an der IMA instrumentiert mit insgesamt 16 Schallemissionssensoren vom Typ KAR601S

Abbildung 2 zeigt die Verteilung der Sensoren über den Hebelarm und das verwendete 3D-Punktraster mit 5 mm Kantenlänge. Der Lasteinleitungspunkt ist in Schwarz auf der Unterseite markiert.

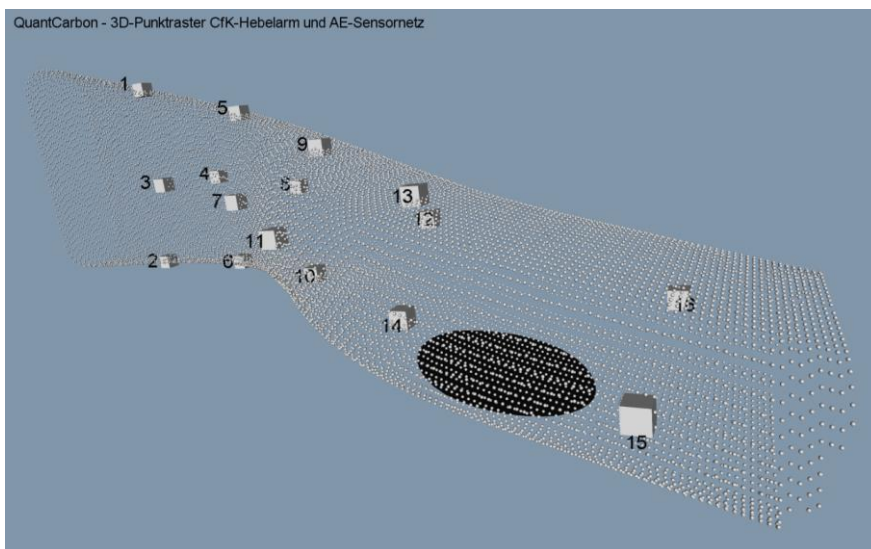


Abbildung 2. Hebelarm mit Sensornetz bestehend aus den 8x2 AE-Sensoren und angedeutete Lasteinleitung (manueller Hydraulikzylinder), 3D-Rasterplot (5x5x5 mm³)

Es wurden folgende Parameter gemessen bzw. ausgewertet:

- schwarz: kumulierte Anzahl gemessener Schallemissionen (Hits) [-]
- rot: kumulierte Anzahl georteter Schallemissionen (Events) [-]
- magenta: kumulierte Burstenergie der Events am Quellort in Pikojoule [pJ]
- grün: Einzelenergie der Burstsignale am Quellort in Pikojoule [pJ]
- blau: Kraftverlauf [kN]

Es ist zu beachten, dass die Kräfte in den Experimenten negativ definiert wurden. Der Versuch wurde stufenweise gefahren, d. h., die Steigerung der Lastniveaus erfolgte jeweils erst nach einer Entlastungsphase auf annähernd 1 kN. Dies ist für die Schallemission notwendig, da nur so neue Schallemissionen angeregt werden können. Die Maximallast im Versuchsteil 1 betrug 50 kN.

In Schwarz ist in Abbildung 3 die kumulierte Anzahl gemessener Schallemissionen dargestellt. Die Kurve liegt deutlich über der der georteten Schallemissionen (Events) in Rot (Achsen jeweils links zu sehen). Die Differenz sind somit gemessene Signale, die nicht geortet werden konnten, da z. B. nicht mindestens 3 Signale von verschiedenen Sensoren geortet werden konnten. Hohe Burstenergien zeigten sich in Versuchsteil 1 (Bereich Krafteinleitung), in Versuchsteil 2 hingegen nur im vorletzten und letzten Zyklus, in dem es zum Versagen des Bauteiles kam.

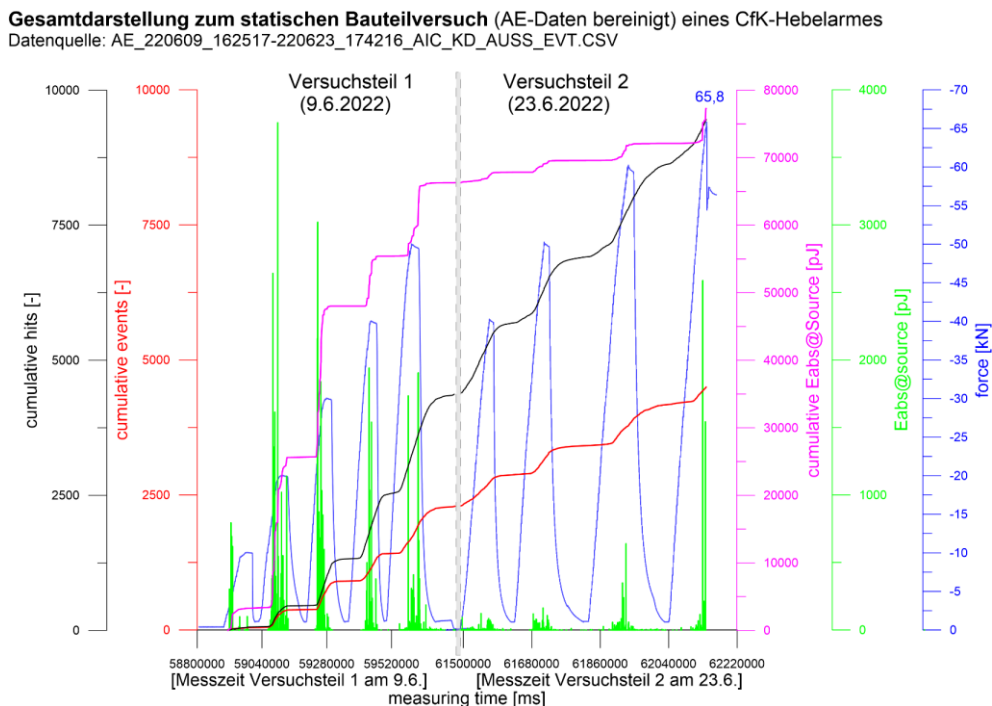


Abbildung 3. Gesamtversuchsverlauf eines statischen Bauteilversuchs

Auffällig ist hier, dass nur im 1. Versuchsteil hohe Burstenergien auftraten, was bereits ein Indiz auf entstandene Strukturschäden ist. Erst zum Ende des 2. Versuchsteiles, also kurz vor dem Bauteilversagen, gehen erneut erhöhte Burstenergien hervor. Außerdem ist hier ableitbar, dass in Versuchsteil 1 die Hitkurve im Wesentlichen nur beim Belasten ansteigt und in Versuchsteil 2 die Hitkurve durchgehend einer Steigung unterliegt, also sowohl beim Belasten als auch beim Entlasten steigt, was auf eine bereits geschädigte Struktur hindeutet.

2. Ergebnisse der Ortung

Abbildung 4 zeigt nun den ersten Versuchsteil 1 kombiniert mit den AE-Daten von Versuchsteil 2 als 3D-Ortungsplot. Dargestellt sind die detektierten Schallemissionssignale bezüglich ihres Auftretens während des Kraftzyklus.

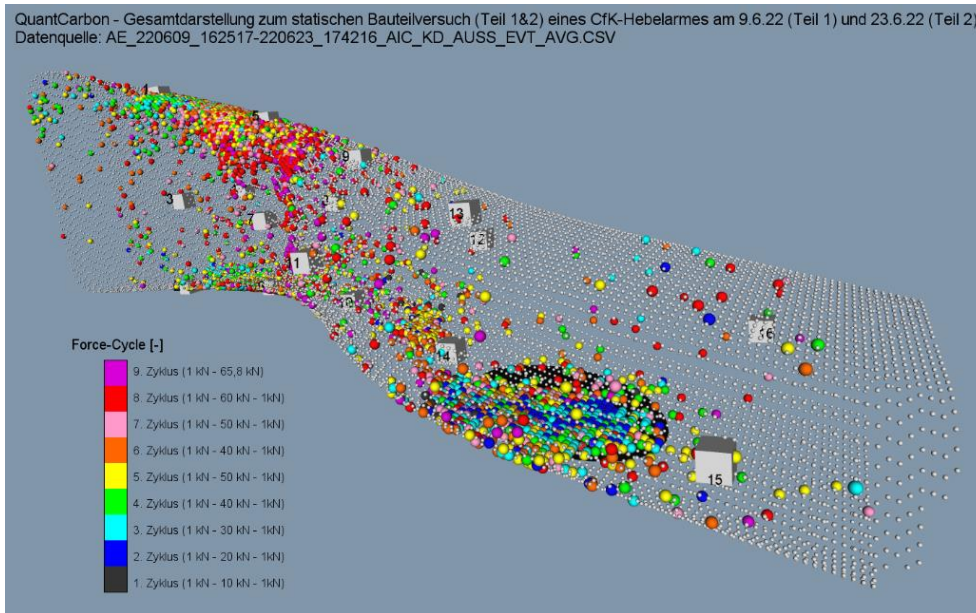


Abbildung 4. 3D-Ortungsplot bezüglich der Events und deren Zuordnung zum Kraftzyklus

Schaut man sich die Ergebnisse im Detail an (s. Abbildung 5), zeigen sich massive Schallemissionen (Events) bereits im Versuchsteil 1 ab dem 4/5. Kraftzyklus sowohl im oberen als auch im unteren Bereich des Hebelarmes im zu erwartenden Bruchbereich. Zur Illustration des Bereichs ist in Abbildung 6 der in Abbildung 5 dargestellte Ausschnitt mit den Versagensbereichen als Foto zu sehen.

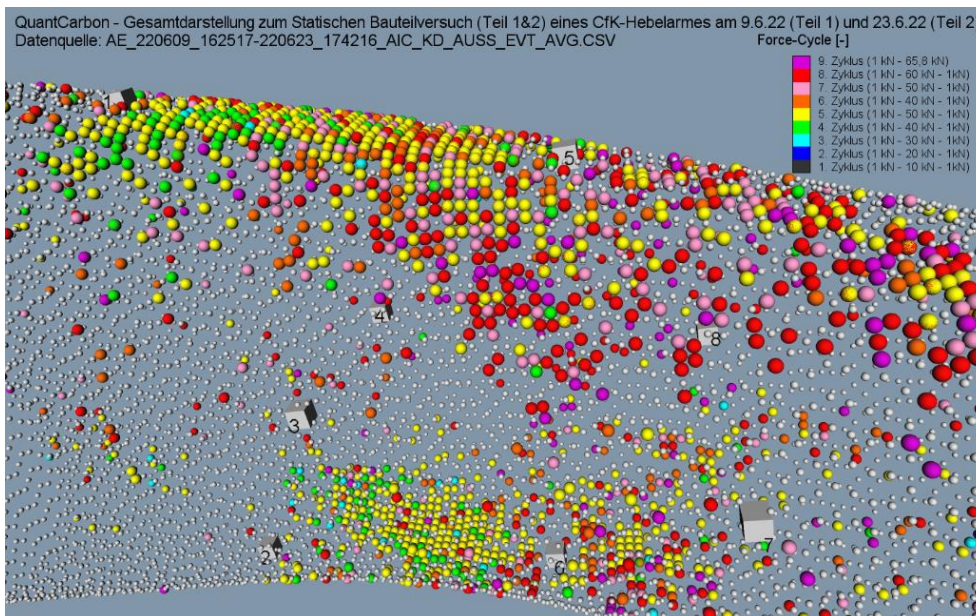


Abbildung 5. 3D-Ortungsplot bezüglich der Events und deren Zuordnung zum Kraftzyklus, Ausschnitt



Abbildung 6. Detailfoto vom Abschnitt der SE-Ergebnisse aus Abbildung 5

In Abbildung 7 ist ein 3D-Ortungsplot mit einer weiteren, für die Schadensinterpretation wichtigen Größe zu sehen, der gewichteten Vorzugsfrequenz. Niedrige Werte (< 100 kHz, blau) deuten auf Reibvorgänge vorhandener Risse, Delaminationen sowie Rissbildung in der Matrix hin und hohe Werte (> 150 kHz, gelb bis violett) weisen auf sich aktuell entwickelnde Strukturschäden durch Faserauszug (Pull-out), Ablösen Faser/ Matrix (Debonding) und Faserbruch hin. Somit ist dieser Parameter ein wichtiges Kriterium für die Interpretation der Daten hinsichtlich der Fehlerquelle. Die Daten umfassen, wie in dem vorherigen 3D-Ortungsplot, Daten beider Versuchsteile.

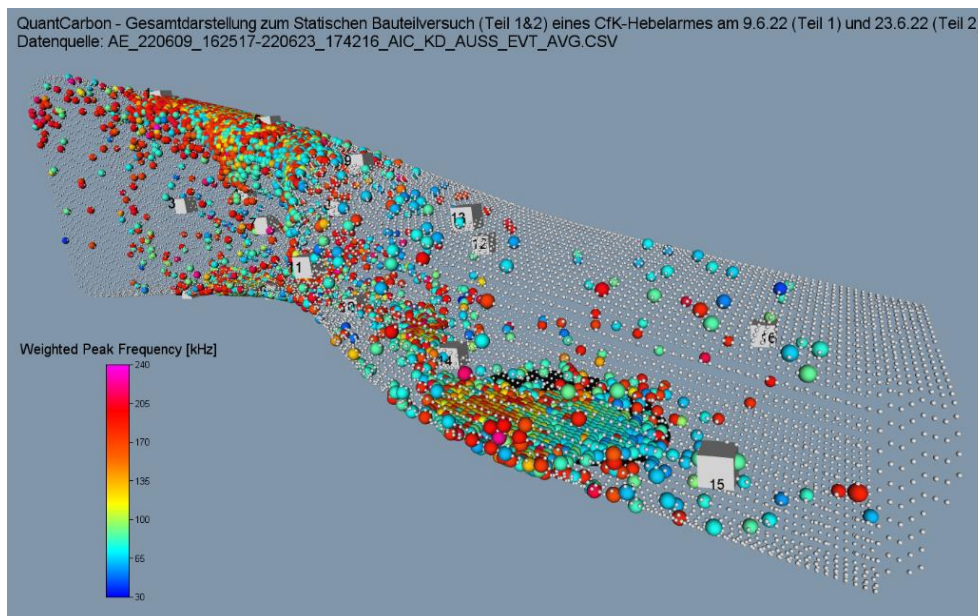


Abbildung 7. 3D-Ortungsplot bezüglich der gewichteten Vorzugsfrequenz, Ansicht 1

Für eine bessere Sichtbarkeit der Events ist in Abbildung 8 der Hebelarm von einer anderen Seite dargestellt. Ein zugehöriges Foto findet sich in Abbildung 9.

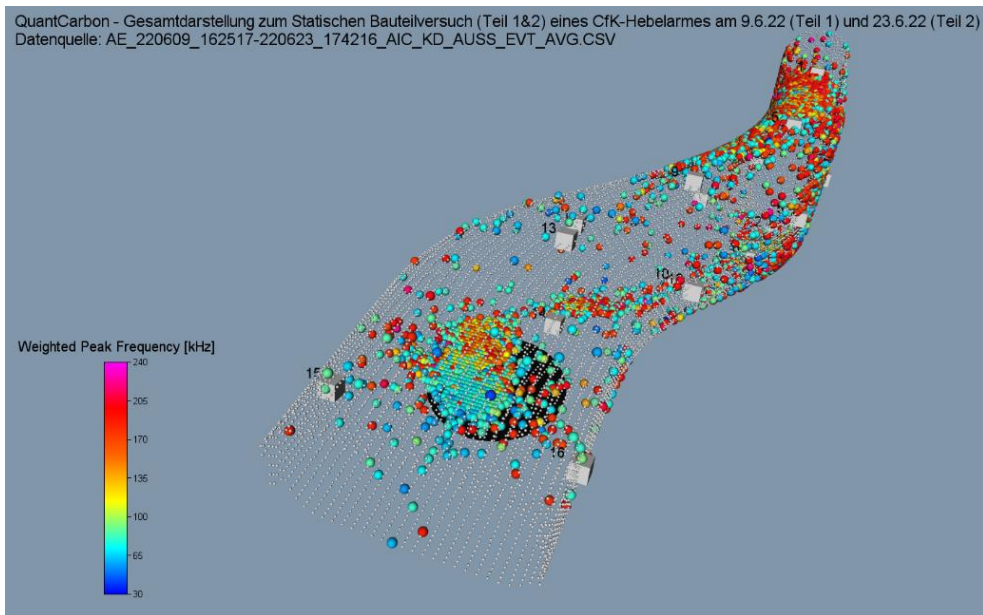


Abbildung 8: 3D-Ortungsplot bezüglich der gewichteten Vorzugsfrequenz, Ansicht 2

Grundsätzlich brachte der Versuch weitere Erkenntnisse zu den Versagensmechanismen komplexer Bauteile. Die frühzeitig im Versagensbereich der Struktur detektierten Schallemissionen (Events) lassen auf Strukturdefekte bereits ab dem 3. Belastungszyklus bis 30 kN schließen. Der geschädigte Bereich verschiebt sich mit jedem Belastungszyklus von der Einspannung weg, auf den Bereich zu, in dem die Struktur bei knapp 66 kN versagte. Die Schallemissionsanalyse ermöglichte die Visualisierung der zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Strukturschäden, eine Prognose des Versagens ist kurz vor dem Bruch möglich. Insbesondere letzteres ist für die Durchführung von Fatigue Tests essenziell, wenn das Bauteil nicht bis zum Bruch belastet werden soll.



Abbildung 9. Detailfoto vom Abschnitt der SE-Ergebnisse aus Abbildung 8

3. Zusammenfassung

Die Versuche wurden erfolgreich durchgeführt und ausgewertet. Ungefähr die Hälfte der Signale konnte geortet und in 3D-Plots dargestellt werden. Es zeigt sich insbesondere in der räumlichen Verteilung, dass bestimmte Teile des Bauteils deutlich höhere Schallemissionsanzeigen hervorbringen als andere und dass diese sich während des Versuchs verschieben. Viele hochfrequente Anzeigen indizieren Strukturversagen wie Faserbrüche und Debonding.

4. Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die sehr gute Zusammenarbeit mit den Partnern im Konsortium des Projektes QuantCarbon, in dessen Rahmen diese Ergebnisse entstanden. Das Bauteil wurde beim Leichtbauzentrum Sachsen GmbH gefertigt und die Versuche fanden an der IMA Dresden statt. Die Förderung erfolgte durch die Sächsische Aufbaubank mit der Antragsnummer 100393561.

Referenzen

- [1] Schallemissionsprüfverfahren, Kompendium Schallemissionsprüfung Acoustic Emission Testing (AT) - Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung, DGZFP 2018.
- [2] D.-F. Schallemissionsprüfverfahren, Kompendium Schallemissionsprüfung Acoustic Emission Testing (AT) - Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung, 2018.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] K. Tschöke, T. Gaul, L. Schubert, F. Dungern und J. Guerrero Santafe, „Strukturüberwachung von Kohlefaserkunststoffverbunden im Automobilbau mittels integrierten Wandlernetzwerken,“ in 4SMARTS - Symposium für Smarte Strukturen und Systeme, 2019.
- [7] D. R. Askeland und W. J. Wright, Essentials of Materials Science and Engineering, CENEGAGE Learning Custom Publishing, 2013.
- [8] M. Sause, „Acoustic Emission Signal Propagation in Damaged Composite Structures,“ Journal of Acoustic Emission, Bd. 31, pp. 1-18, 2013.
- [9] M. Sause, In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites, Bd. 242, M. Sause, Hrsg., Springer Series in Materials Science, 2016.