

Schallemissionsprüfung an einem neuartigen Leichtbau-Drehgestellrahmen aus Kohlenstofffaserverbundwerkstoff während statischer und dynamischer Ermüdungstests

Eberhard SCHULZE¹, Alexander PIETZSCH¹, Lars SCHUBERT¹,
Andreas ULBRICHT²

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden

² CG Rail GmbH, Dresden

Kontakt E-Mail: eberhard.schulze@ikts.fraunhofer.de

Kurzfassung. Die Verwendung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) für Strukturkomponenten gewinnt im modernen Fahrzeugbau aufgrund des enormen Leichtbaupotentials zunehmend an Bedeutung. Bei sicherheitsrelevanten CFK-Bauteilen steht dabei die Zuverlässigkeit an oberster Stelle. So können Missbrauchslasten und Alterungsprozesse während des Betriebs zu Vorschädigungen in CFK-Bauteilen führen, die in einer Verringerung der Lebensdauer resultieren. Derartige Vorschädigungen, wie etwa Zwischenfaserbrüche oder Faserbrüche, müssen daher frühzeitig mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP) detektiert werden, um ein katastrophales Versagen während des Betriebs auszuschließen. Der Beitrag zeigt das Einsatzpotenzial von Schallemissionsprüfungen (AT) zur Detektion von Strukturschäden in dickwandigen CFK-Komponenten eines neuartigen Drehgestellrahmens, der durch die CG Rail GmbH in Dresden entwickelt wurde.

Eine spezielle Eigenschaft von Faserkunststoffverbunden unter Ermüdung ist, dass Faserbrüche und Delaminationsprozesse sehr starke Schallemissionen (AE) erzeugen, weshalb die Schallemissionsprüfung bei Faserverbundbauteilen international auch besonders erfolgreich angewendet wird. Die Messergebnisse belegen, dass sich insbesondere Frequenzparameter der Burstsignale zur Abschätzung der Quellmechanismen von Schallemissionen bei Fatigue-Belastung von Faserverbundbauteilen eignen. Niedrige Werte der gewichteten Vorzugsfrequenz sind für Reibvorgänge vorhandener Risse, Delamination, Rissbildung in der Matrix charakteristisch, hohe Werte für sich aktuell entwickelnde Strukturschäden durch Faserauszug (Pull-out), Ablösen Faser/ Matrix (Debonding) und Faserbruch.

Es wurden statische und dynamische Belastungstests durchgeführt und dabei zwei Messsysteme mit insgesamt 48 Schallemissionssensoren eingesetzt. Mit Schallemissionsanalyse wurden in 42 Einzelmessungen 13 Einzellastfälle statischer Bauteilermüdung begleitet. Während der dynamischen Ermüdungstests in einer zweiten Phase der Messstudie erfolgte AT über 14 Wochen bzw. insgesamt 12 Millionen Lastzyklen.

In den Ergebnissen der statischen Fatigue-Tests dominieren erwartungsgemäß die spezifischen Lastfälle die Lage der Quellorte der akustischen Emissionen. Energie- und Frequenzparameter der Bursts im Verlauf der dynamischen Bauteilermüdung ermöglichen Aussagen zur örtlichen und zeitlichen Schadensentwicklung.

Aufbauend auf den parametrisierten Schallemissions-Ortungsplots kann sowohl eine Einordnung der Ergebnisse lokaler Dehnungsmessungen, hinsichtlich der Schadensentwicklung im Bauteil, als auch die spezifische Inspektion des Prüflings mit ZfP-Verfahren erfolgen.

1. Einführung

Die vormals im Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren angesiedelte Arbeitsgruppe „Systeme für Zustandsüberwachung“ des Fraunhofer-Instituts für Keramische Technologien und Systeme IKTS forscht seit mehr als 10 Jahren an der Ertüchtigung akustischer Verfahren für den Einsatz als Monitoring-Techniken bei der experimentellen Erprobung als auch im realen Betrieb von Strukturen [6-8]. In diesem Rahmen wurde insbesondere das Bruchverhalten von Faserverbundstrukturen unter dynamischer Beanspruchung untersucht. Eine derartige Beanspruchung tritt zumeist über die gesamte Betriebsdauer von Leichtbaustrukturen auf, wobei keine versagenskritischen Schädigungen auftreten dürfen. Zum Nachweis der Tragfähigkeit über die Lebensdauer werden in der Entwicklungsphase gewöhnlich dynamische Ermüdungstests an CFK-Strukturen durchgeführt, bei denen auftretende Schäden möglichst zerstörungsfrei detektiert und deren Wachstum beobachtet werden muss. Zur zerstörungsfreien Schadensdetektion bietet sich hier auf hervorragende Weise die Schallemissionsanalyse an, mit der Schäden identifiziert und präzise lokalisiert werden können. Aber auch im realen Betrieb von Strukturen eröffnen sich Anwendungsgebiete für dieses Verfahren, um noch unkritische Vorschädigungen in der Verbundstruktur frühzeitig zerstörungsfrei zu detektieren und zu reparieren. Damit kann ein katastrophales Versagen im Betrieb ausgeschlossen werden.

Im Jahr 2017 wurde das IKTS beauftragt, quasi-statische und dynamische Ermüdungstests an einem von der CG Rail GmbH entwickelten, neuartigen Leichtbau-Drehgestellrahmen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) mit Schallemissionsanalyse zu begleiten. Die Bewertung von Schallemissionsmessungen erfolgt auf der Basis der Schallemissionsrate, der räumlichen Verteilung der akustischen Ereignisse und von Burstparametern wie beispielsweise von Energie und Frequenzinhalt der Burstsignale. Zur Signaldetektion kommen Schallemissionssensoren zum Einsatz, die Emissionen im für das Material spezifischen Frequenzbereich aufzeichnen. Ablösungen von CFK-Lamellen könnten bei Frequenzen bis zu 150 kHz detektierbar sein, Faser-Debonding oder Faserrisse emittieren höhere Frequenzen. Störende Effekte können herausgefiltert werden, wenn sie im niedrigen und für die Schadensentwicklung untypischen Frequenzbereich auftreten.

2. Anlage und Durchführung der Messungen

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen die Positionen der insgesamt 48 Schallemissionssensoren auf dem Drehgestellrahmen. Die Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt der Sensorbefestigung.

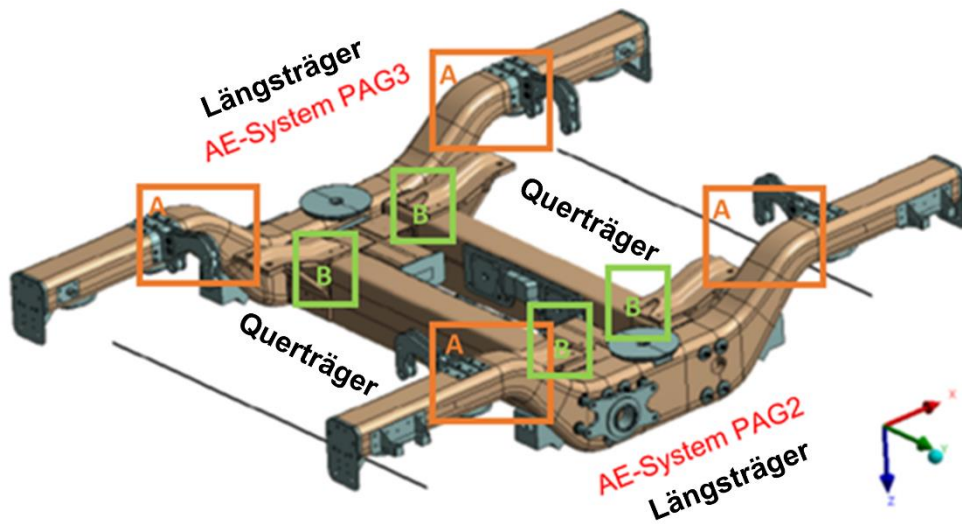


Abb. 1. Instrumentierung der Schallemissionsmesstechnik auf dem Drehgestellrahmen, zwei AE-Messsysteme PAG2 und PAG3 (PAG - Gerätebezeichnungen), in jeder Zone A auf den Längsträgern 8 AE-Sensoren, in jeder Zone B auf den Querträgern 4 AE Sensoren.

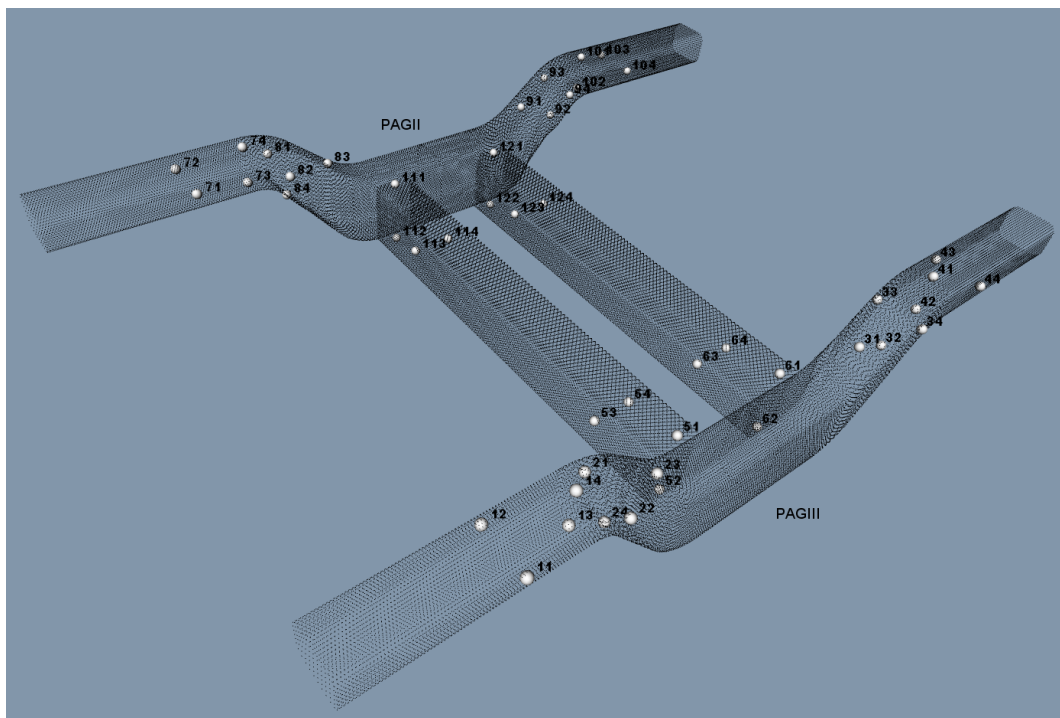


Abb. 2. Positionen der Schallemissionsensoren auf dem Drehgestellrahmen, zwei AE-Messsysteme PAG2 und PAG3 mit je 24 akustischen Sensoren.



Abb. 3. Sensorbefestigung mit Spannbändern, je 2 Sensoren wurden an gegenüberliegenden Seiten der Struktur mit Führungskappen (rot) fixiert, auf den senkrecht dazu liegenden Ebenen verläuft das Spannbänd durch Abstandskappen (rot), an den Radien der Struktur durch Schutzknie aus Gummi.

Die Messungen wurden mit der im IKTS entwickelten Messtechnik, bestehend aus dem Mehrkanal-Akustik-System MAS und den Schallemissionssensoren vom Typ KAR601S mit folgenden Parametern durchgeführt:

Bulk Sampling-Frequency	=	12.5 MHz
Channels/ MAS	=	4
Gain Choice	=	54 dB
Sensor capacity	=	150 pF
Samplerate	=	0.32E-06 s
Pretrigger	=	1024 Samples
Posttrigger	=	15360 Samples

Zwei Sensoren wurden jeweils gegenüber mit einem Spannbänd an die CFK-Struktur angedrückt. Die Ankopplung erfolgt beim Sensortyp KAR601S über eine vorgespannte Membran im Sensorfuß. Die dazu erforderliche Kraft beträgt 50 N. Es wurde Koppelgel eingesetzt.

Vor den statischen Ermüdungstests erfolgten an den Sensorpositionen Messungen zur Funktionstüchtigkeit und Ankopplungsgüte der Sensorik mit einer Hsu-Nielsen Quelle (Bleistiftminenbruch). Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurden die Geschwindigkeiten der unterschiedlichen Plattenwellenmoden bestimmt. Neben dem starken Einfluss der Dispersion der geführten Wellen, d.h. der Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeiten von der Frequenz der Wellenmoden, besteht in dem mehrlagig aufgebauten CFK-Verbundwerkstoff auch eine starke Winkelabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit, d.h. ein Einfluss der Faserorientierung im Laufweg der akustischen Welle auf die Schallgeschwindigkeit. Für den schnelleren und höherfrequenten symmetrischen Wellenmode wurden bei Testmessungen an CFK-Platten winkelabhängige

Variationen der Schallgeschwindigkeit von bis zu 100 % ermittelt. Zur präzisen Ortung von Ereignissen in dem CFK-Verbundwerkstoff wurden die hochfrequenten symmetrischen Wellenmoden durch einen dynamischen Bandfilter unterdrückt und mit dem niederfrequenten aber amplitudenstarken asymmetrischen Wellenmode A0 gearbeitet. Die zur Ortung genutzte mittlere Geschwindigkeit für diesen Mode beträgt 1500 m/s.

Für die planare Ortung wurden die Oberflächen beider CFK-Längsträger und beider CFK-Querträger des Drehgestellrahmens in je 4 Ortungsebenen abgewickelt, die sich in der Seite des Auftrennens des 3D-Modells unterscheiden. Abhängig von der Lage des Triggerkanals wurde diejenige der vier Ebenen für die planare Ortung gewählt, in der der triggernde Sensor möglichst zentral liegt. Abschließend wurden die planaren Ortungsergebnisse in den insgesamt 16 Ortungsebenen für beide Messsysteme in das 3D-Modell rücktransformiert.

3. Messergebnisse

Im Rahmen der quasistatischen Belastungstests wurden insgesamt 14 Lastfälle mit unterschiedlichen Lasteinleitungspunkten durch Schallemissionsmessungen mit beiden Messsystemen begleitet. Parallel zu den Schallemissionsdaten wurden ausgewählte Kraftsignale als analoge Messgrößen aufgezeichnet.

Das LOG-File des Ortungsprogrammes für den Messzyklus 1-1 (Lastfall2, 90% Last) mit dem Messsystem PAG2 gab beispielhaft folgende Statistik aus:

Located Hits (Events): 914 (76 % of recorded Hits)
Processing Error 1, Plane not found for Sensors: 0 (0 % of recorded Hits)
Processing Error 2, Pick-Time-Differences too high: 18 (2 % of recorded Hits)
Processing Error 3, AIC-Amplitude-Differences too low: 188 (16 % of recorded Hits)
Processing Error 4, Pick-Time-Differences too low (EMP): 10 (1 % of recorded Hits)
Processing Error 5, Localisation-Matrix singular: 28 (2 % of recorded Hits)
Processing Error 6, Distance Focus-Trigger too large: 31 (3 % of recorded Hits)
Processing Error 7, Time-Residue too large: 0 (0 % of recorded Hits)
Processing Error 8, AE-Focus outside of Structure: 6 (1 % of recorded Hits)

66 % aller Ortungen erfolgte mit mehr als drei Sensoren, dabei beträgt das maximale Zeitresiduum 25 μ s, so dass mit einer guten Ortungsgenauigkeit von wenigen cm gerechnet werden kann. Die parametrisierten Ortungsplots bilden Mittelwerte der Schallemissionsparameter in den 5x5x5 mm³ Raumzellen ab. Erwartungsgemäß dominieren die spezifischen Lastfälle die Lage der Quellorte der akustischen Emissionen.

Für ZiF wie die Schallemissionsanalyse bildet die zuverlässige Identifizierung der unterschiedlichen Versagensmoden (Faserbruch „FB“, Zwischenfaserbruch „ZFB“) mit ihren verschiedenen Ausprägungen in CFK-Werkstoffen gewöhnlich eine besondere Herausforderung (zu Versagensmoden von CFK-Werkstoffen siehe etwa [3], [4] und [5]). Zur Unterscheidung zwischen einer Delamination (interlaminaer „ZFB“) und einem Faserbruch muss etwa der Schädigungsfortschritt direkt mit den Schallemissionsparametern korreliert werden. Dafür haben sich Messungen im Rahmen von Zug- und Biegeversuchen etabliert [2]. Bisherige Messungen an CFK-Werkstoffen belegen, dass sich insbesondere Frequenzparameter der Burstsignale zur Abschätzung der Quellmechanismen von Schallemissionen bei Fatigue-Belastung von Faserverbundbauteilen eignen. Die beispielhaft in Abbildung 4 dargestellte gewichtete Vorzugsfrequenz (WPF) [2] zeigt niedrige Werte (< 100 kHz, blau) für Reibvorgänge vorhandener Risse, Delaminationen sowie Rissbildung in der Matrix und hohe Werte (> 160 kHz, gelb) für sich aktuell entwickelnde Strukturschäden durch Faserauszug (Pull-out), Ablösen Faser/ Matrix (Debonding), Faserbruch.

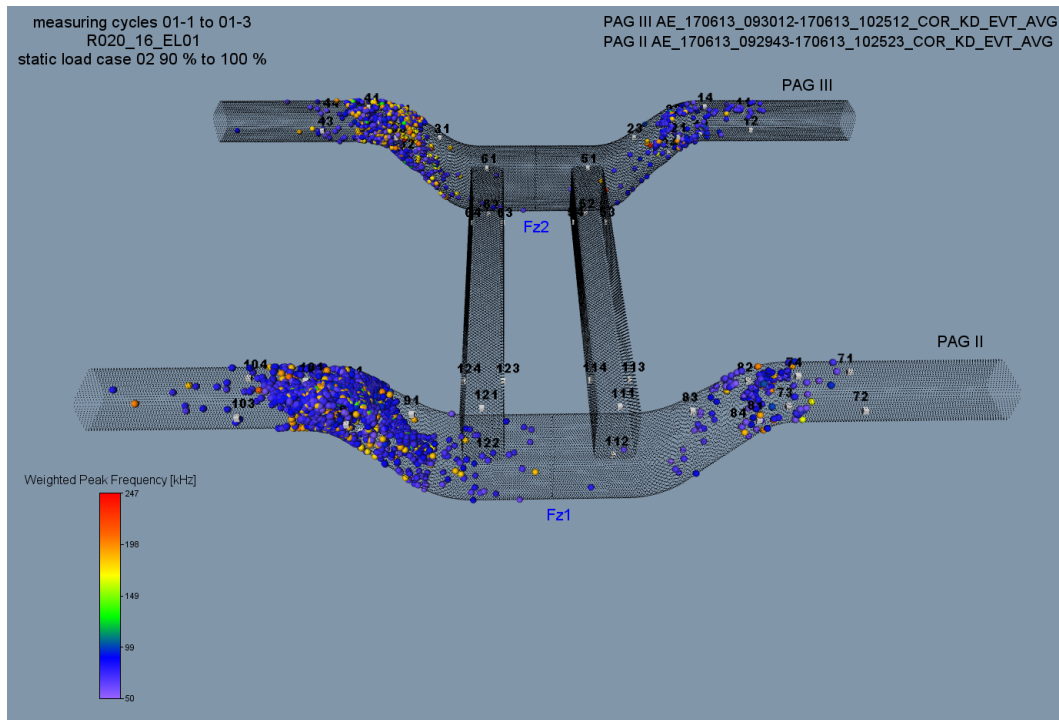


Abb. 4. Quasistatischer Belastungstest des Drehgestellrahmens, Lastfall 2 (Lasteinleitung Fz1), Einzelmessungen 1 bis 3 (90% bis 100 % Last), 3D-Schallemissions-Ortungsplot, farbkodiert: Gewichtete Vorzugsfrequenz (WPF) der Bursts.

Die sich an die quasistatischen Belastungstests des Drehgestellrahmens anschließende Phase der dynamischen Belastungstests nach DIN EN 13749:2011 dauerte 14 Wochen und wurde in analoger Messkonfiguration vollständig mit Schallemissionsanalyse begleitet. Es wurden insgesamt 12 Millionen Lastzyklen mit einer Frequenz von ca. 1,5 Hz eingebracht, wobei nach der Norm lediglich 10 Millionen Lastzyklen zu absolvieren sind. Jeweils eine Million Lastzyklen wurden mit einem konstanten Lastregime durchgeführt, d.h. mit oder ohne Zusatzlasten, wie z.B. Bremskräfte simulierende Torsionslasten.

Wesentliche Herausforderungen bei der Anwendung der Schallemissionsanalyse bei dynamischer Strukturbelastung sind das starke Umgebungsrauschen und die ungünstigen akustischen Eigenschaften der CFK-Werkstoffe, insbesondere die hohe Dämpfung hochfrequenter Wellenmoden. Diesen Anforderungen begegnet das akustische Messsystem durch eine hohe Messwertdynamik, durch Speicherung und Bewertung der vollständigen Wellenformen sowie durch spezielle Auswertelgorithmen. Das prinzipielle Vorgehen bei der Auswertung und Angaben zum Messsystem wurden bereits ausführlich im Rahmen des 19. Kolloquiums Schallemission [1] vorgestellt.

Mit dem Messsystem PAGII/Fz1 wurden während der 12 Millionen Lastzyklen 6.121.257 Schallemissionen geortet und parametrisiert, mit dem System PAGIII/Fz2 5.195.775. Als Burstparameter stehen u.a. Maximalamplitude, Burstlänge, Anstiegszeit, Energie, Leistung, Vorzugsfrequenz sowie die gewichtete Vorzugsfrequenz für eine versuchszeit-, versuchslast- oder raumbezogene Auswertung zur Verfügung. 3D-Schallemissions-Ortungsplots gestatten die farbkodierte Darstellung von Mittelwerten oder Summen der Burstparameter in den $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ Raumzellen des Drehgestellrahmen-Modells. Zonen erhöhte Schallemissionsaktivität bilden sich neben den Darstellungen der Anzahl von Events besonders gut in den Ortungsplots mit der farbkodierten Summe der Energie in den Raumzellen ab. Die Abbildungen 5 und 6 beinhalten diese 3D-Ortungsplots für die finale Testperiode zwischen 11 und 12 Millionen Lastzyklen.

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen die Mittelwerte der gewichteten Vorzugsfrequenz als Farbparameter der Ortungsplots für die finale Periode der dynamischen Bauteilbelastung. Hier gilt, wie bereits oben angeführt, das sich aus den Frequenzparametern auf dominante Quellmechanismen schließen lässt. Niedrige WPF-Werte (<100 kHz, blau) sind charakteristisch für Reibung vorhandener Risse/ Delaminationen, hohe WPF-Werte (>160 kHz, gelb) für sich aktuell entwickelnde Strukturschäden (Faserauszug, Ablösen Faser/ Matrix und Faserbruch). Nach 11 Millionen Lastzyklen sind nur noch wenige Zonen am Längsträger PAGIII/Fz2 mit hohen WPF-Werten zu erkennen. Das deutet darauf hin, dass nach 11 Millionen Lastwechseln sich kaum noch neue Vorschädigungen in der CFK-Struktur des Längsträgers PAGII/Fz1 entwickelt haben. Dies belegt die Robustheit des Designs.

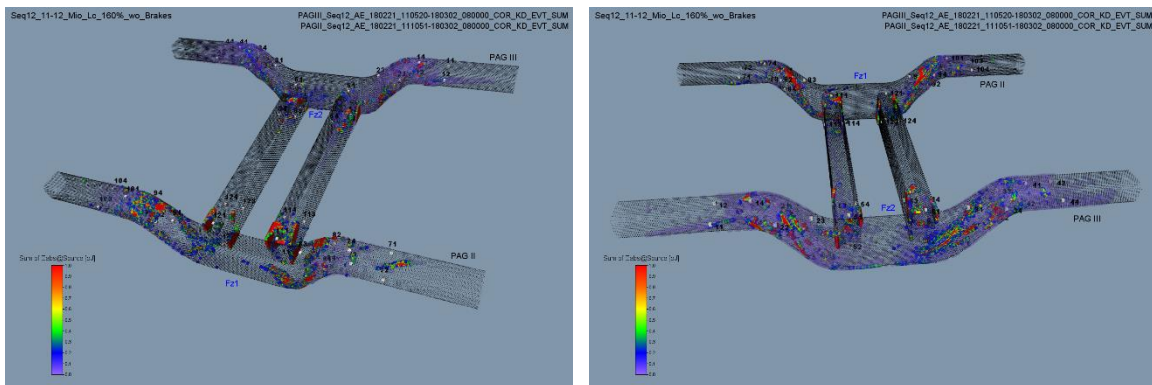


Abb. 5. Dynamischer Belastungstest des Drehgestellrahmens, 3D-Schallemissions-Ortungsplot, Testperiode zwischen 11 und 12 Millionen Lastzyklen, farbkodiert: Summe der Energie der Burstsignale in den $5 \times 5 \times 5$ mm³ Raumzellen in pJ, berechnet für den Quellort, links: Vorderansicht des Längsträgers PAGII/Fz1, rechts: Vorderansicht des Längsträgers PAGIII/Fz2.

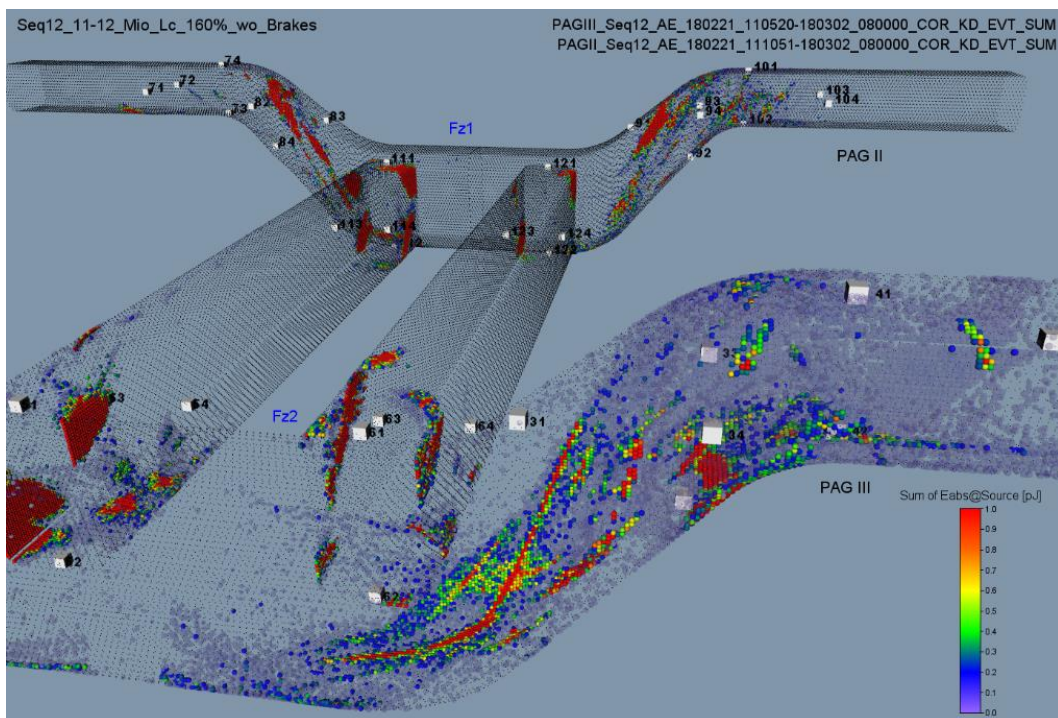


Abb. 6. Dynamischer Belastungstest des Drehgestellrahmens, 3D-Schallemissions-Ortungsplot, Testperiode zwischen 11 und 12 Millionen Lastzyklen, farbkodiert: Summe der Energie der Burstsignale in den $5 \times 5 \times 5$ mm³ Raumzellen in pJ, berechnet für den Quellort, Ausschnitt aus der Vorderansicht des Längsträgers PAGIII/Fz2.

Aufbauend auf den Ortungsplots kann eine spezifische Inspektion des Prüflings mit ZfP-Verfahren erfolgen. Der Schädigungsverlauf während des gesamten dynamischen Belastungsversuches kann alternativ durch Mittelwertbildung im Parameterraum (X-Koordinate des Längsträgers, Z1 Lastzyklus) visualisiert werden. Abbildung 9 zeigt dies beispielhaft für die Gewichtete Vorzugsfrequenz der Bursts. In dieser Darstellung wird die unterschiedliche Schadensentwicklung in den beiden Längsträgern deutlich. Bereits nach ca. 10 Millionen Lastzyklen sind am Längsträger PAGII/Fz1 nur noch vereinzelt hohe WPF-Werte zu erkennen, d.h. an diesem Längsträger dominieren bereits nach ca. 10 Millionen Lastzyklen Reibvorgänge vorhandener Risse und Delaminationen. Auch an diesem Längsträger zeigt sich das robuste Design dadurch, dass es zu keiner signifikanten Entwicklung von neuen Strukturschäden durch Faserauszug, Ablösen Faser/ Matrix und Faserbrüche kam.

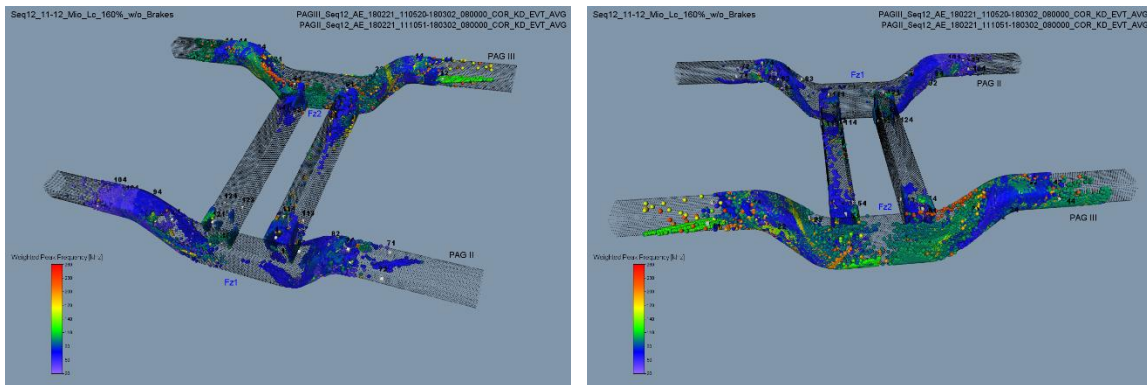


Abb. 7. Dynamischer Belastungstest des Drehgestellrahmens, 3D-Schallemissions-Ortungsplot, Testperiode zwischen 11 und 12 Millionen Lastzyklen, farbkodiert: Mittelwerte der Gewichteten Vorzugsfrequenz der Burstsignale in den $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ Raumzellen in kHz, links: Vorderansicht des Längsträgers PAGII/Fz1, rechts: Vorderansicht des Längsträgers PAGIII/Fz2.

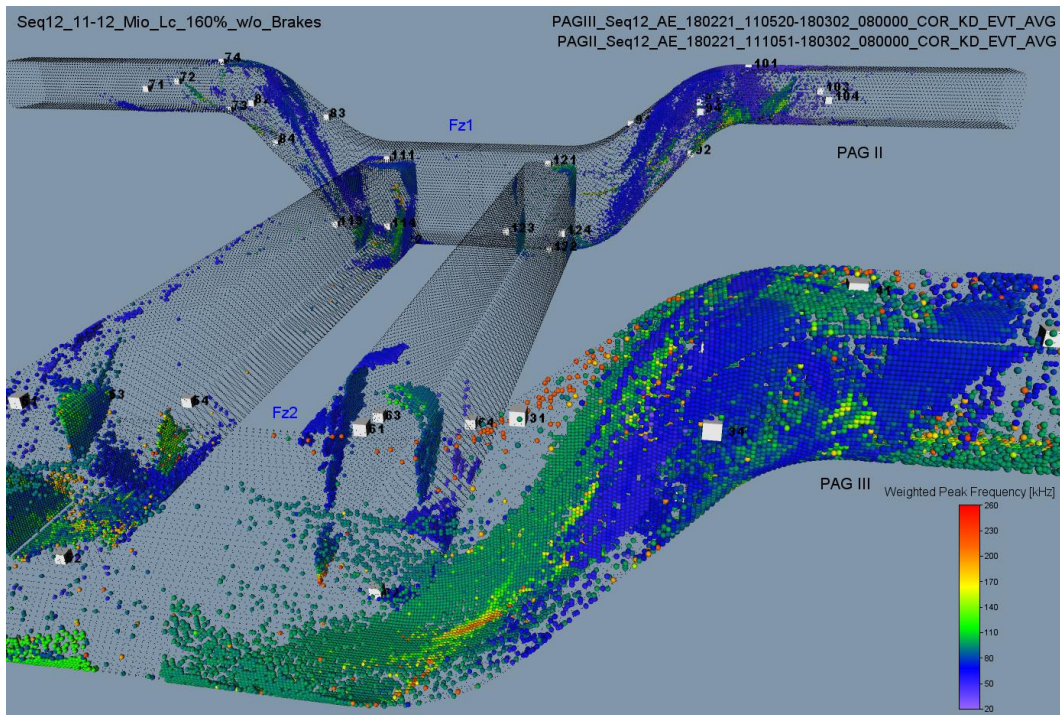


Abb. 8. Dynamischer Belastungstest des Drehgestellrahmens, 3D-Schallemissions-Ortungsplot, Testperiode zwischen 11 und 12 Millionen Lastzyklen, farbkodiert: Mittelwerte der Gewichteten Vorzugsfrequenz der Burstsignale in den $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ Raumzellen in kHz, Ausschnitt aus der Vorderansicht des Längsträgers PAGIII/Fz2.

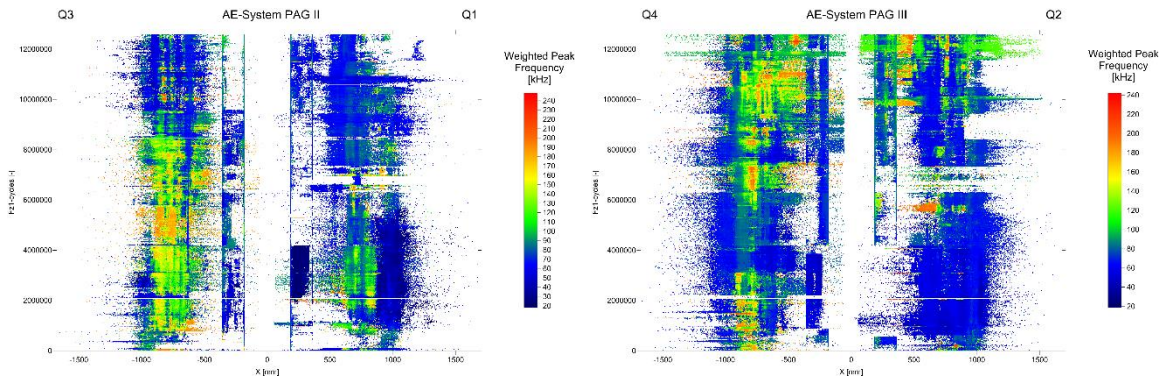


Abb. 9. Dynamischer Belastungstest des Drehgestellrahmens, Parametermittel für den gesamten dynamischen Belastungstest von ca. 12 Millionen Lastzyklen im Parameterraum (X-Koordinate des Längsträgers, Z1-Lastzyklus), farbcodiert: Gewichtete Vorzugsfrequenz der Bursts in kHz, links: Längsträger PAGII/Fz1, rechts: Längsträger PAGIII/Fz2 und jeweils der benachbarte Abschnitt der Querträger.

Referenzen

- [1] Schulze, E.: Schallemissionsanalyse im Rahmen dynamischer Ermüdungstests von Faserverbundbauteilen, DGZfP, 19. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. – 13. September 2013, Augsburg
- [2] Höning, U., Holder, U., Pietzsch, A., Schulze, E., Frankenstein, B., Schubert, L.: Definition of requirements for reference experiments to determine and evaluate various damage mechanisms in fibre composites by acoustic emission, 19th World Conference on Non Destructive Testing, München, Paper, 2016
- [3] Cuntze, R. et al.: Neue Bruchkriterien und Festigkeitsnachweise für unidirektionalen Faserkunststoffverbund unter mehrachsiger Beanspruchung – Modellbildung und Experimente. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 5, Nr. 506, Düsseldorf: VDI Verlag, 1997
- [4] Puck, A.: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten – Modelle für die Praxis. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1996
- [5] Ulbricht, A.: Zur Gestaltung und Dimensionierung von zylindrischen Leichtbaustrukturen in Faserkunststoffverbund-Metall-Mischbauweise. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2011
- [6] Schulze, E.; Schubert, L.; Frankenstein, B.: Monitoring of a wind turbine rotor blade with acousto ultrasonics and acoustic emission techniques during a full scale fatigue test, 5th European Workshop of Structural Health Monitoring, Sorrento, Italy, 29.06.2010-02.07.2010
- [7] Schubert, L. / Schulze, E. / Frankenstein, B.: „Source Mechanisms of acoustic emissions as an indicator of injury during a full scale fatigue test of a wind turbine rotor blade“, 8th International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN2011, Leuven, Belgium, 4-6 July 2011
- [8] K. Tschöke, T. Gaul, F. von Dungen und L. Schubert, „Integrierte Strukturüberwachung sicherheitsrelevanter Fahrzeugkomponenten aus kohlefaserverstärkten Kunststoffverbundwerkstoffen,“ in Smarte Strukturen und Systeme, M. Wiedemann und T. Melz, Hrsg., Shaker Verlag, 2017, pp. 63-72.