

Schallemissionsanalyse im Rahmen dynamischer Ermüdungstests von Faserverbundbauteilen

Eberhard SCHULZE *

* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP Institutsteil Dresden

Kurzfassung. Hauptziel dynamischer Ermüdungstests ist es, langsam wachsende Schäden in den Komposit-Strukturen zu initiieren. Hierfür muss das Lastkollektiv beim Eintreten erster Schadensindikationen entsprechend angepasst werden. Zur Schadensdetektion wurde die Schallemissionsanalyse erfolgreich eingesetzt, sowohl im kleinen Maßstab zur Analyse von Klebeverbindungen an speziell gefertigten Balkenstrukturen als auch bei dynamischen Tests ganzer Rotorblätter.

Die Schallemissionsprüfung ist international vor allem bei statischen Tests von Faserverbundbauteilen erfolgreich, da in Faserverbundwerkstoffen durch Faserbrüche und Delaminationsprozesse sehr starke Schallemissionen initiiert werden. Die Herausforderung, die bei der Anwendung des Verfahrens im Rahmen dynamischer Ermüdungstests besteht, resultiert aus dem starken Umgebungsruschen einerseits und den ungünstigen akustischen Eigenschaften der Kompositwerkstoffe andererseits. Diesen Anforderungen wurden mit einem akustischen Messsystem mit hoher Messwertdynamik, der Speicherung und Bewertung der vollständigen Wellenformen und speziellen Auswerte- und Ortungsalgorithmen begegnet.

Die Reichweite der initiierten akustischen Wellen wird durch die Dämpfungseigenschaften der Kompositwerkstoffe bestimmt. Deshalb wurde ein Sensornetzwerk entwickelt, welches insbesondere die stark beanspruchten Teile wie z.B. die Steganbindungen der Rotorblätter überwacht. Dafür wurde ein Array mit einer Kantenlänge von 3 bis 5 m ausgewählt, das aus 52 bis 60 Sensorknoten, je nach Blattform, besteht.

Im Verlauf der dynamischen Ermüdungstests von Rotorblättern auf Versuchsständen manifestierte sich im Ergebnis der Schallemissionsprüfung die zunehmende Schädigung spezifischer Blattelemente. Bereichen erhöhter Schallemissionsereignisdichte konnten mit weiteren zerstörungsfreien Prüfverfahren Schädigungen der Gurt-Steg-Verklebung und Undulationen in den GFK-Gurten zugeordnet werden. Dem Versagen von Bauteilkomponenten ging eine spezifische zeitliche Entwicklung der Schallemissionen voraus.

Einführung

Ein Ziel des in den Jahren 2009 bis 2012 durchgeführten Forschungs-Verbundprojektes „Modellgestütztes Structural Health Monitoring für Rotorblätter von Windenergieanlagen - SHM Wind“ war die Ertüchtigung akustischer Verfahren für den Einsatz als Monitoring-Techniken auf drehenden Windkraftanlagen.

In diesem Rahmen wurde das Bruchverhalten von Faserverbundsstrukturen bei dynamischen Belastungstests untersucht, die das Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie



Prüfverfahren, Institutsteil Dresden - IZFP-D mit akustischen Messungen begleitete. Zur Schadensdetektion nutzt das IZFP-D eine Methodenkombination akustischer Verfahren, die das aktive Verfahren Acousto Ultrasonics (AU) und das passive Verfahren Schallemissionsanalyse oder Acoustic Emission Testing (AT) beinhaltet.

Die Schallemissionsanalyse wird seit Jahren erfolgreich in der Materialprüfung eingesetzt, um schnell und sicher Bereiche zu orten, die infolge einer äußeren Belastung eines Bauteils Schall emittieren, z. B. durch Risswachstum. Die Bewertung der detektierten Schallemissionen erlaubt im Nachhinein die zielgerichtete Untersuchung mit konventionellen ZfP-Verfahren. Als passives Verfahren genügen der Schallemissionsanalyse relativ wenige Sensoren, um ein großes Bauteilvolumen integral zu erfassen. Wesentlich ist das Vorhandensein einer äußeren Belastung, damit Schadensbereiche Schallemissionen emittieren. Durch Überschreiten von lokalen Festigkeitseigenschaften kommt es z. B. bei Rissbildung oder -wachstum zur Freisetzung von elastisch gespeicherter Energie (auch bei Reibung und Strukturveränderung), die u.a. in Wärme und Schall gewandelt wird. Jedes Material leitet diese Wellen mit einer materialspezifischen Geschwindigkeit weiter. Die Dämpfung dieser akustischen Wellen ist ebenfalls materialspezifisch und zudem beeinflusst von Umweltfaktoren wie Feuchtigkeit oder, bei heterogenen Materialien wie CFK-Laminaten, auch von den einzelnen Komponenten wie Epoxidharz und Kohlefaserlamelle. Der sich ausbreitende Schall wird von akustischen Sensoren aufgezeichnet. Aus der Laufzeit der Signale von den einzelnen schallemittierenden Quellen (aktive Risse, Verbundstörungen, Reibung) zu einer Vielzahl von Sensoren (mindestens drei bei ebener Ortung) kann auf die Position der aktiven Schädigung zurückgerechnet werden.

Im Verlauf von dynamischen Ermüdungstests von Kompositstrukturen sowie auf einer drehenden Anlage erfolgte die Bewertung von Schallemissionsmessungen auf der Basis der Schallemissionsrate, der räumlichen Verteilung der akustischen Ereignisse und von Burstparametern wie beispielsweise von Energie und Frequenzinhalt der Burstsignale. In Abbildung 1 ist der prinzipiell zu erwartende Verlauf der Schallemissionsrate im Schädigungsverlauf von GFK-Materialien dargestellt. Im Unterschied zu metallischen Werkstoffen, bei deren Belastung Schallemissionen bis zum Überschreiten der vorangegangenen maximalen Belastung ausbleiben (Kaiser-Effekt nach [4]) treten bei Verbundwerkstoffen signifikante Schallemissionsereignisse bereits bei einer Belastung unter der vorangegangenen Maximallast auf. Dieser als Felicity-Effekt eingeführte Wirkmechanismus ist in der Hauptsache auf Reibungsvorgänge im vorgeschädigten Kompositmaterial zurückzuführen. Ein weiterer Vorteil von Faserverbundwerkstoffen ist es, dass Faserbrüche und Delaminationsprozesse sehr starke Schallemissionen erzeugen, weshalb die Schallemissionsprüfung bei Faserverbundbauteilen international auch besonders erfolgreich angewendet wird.

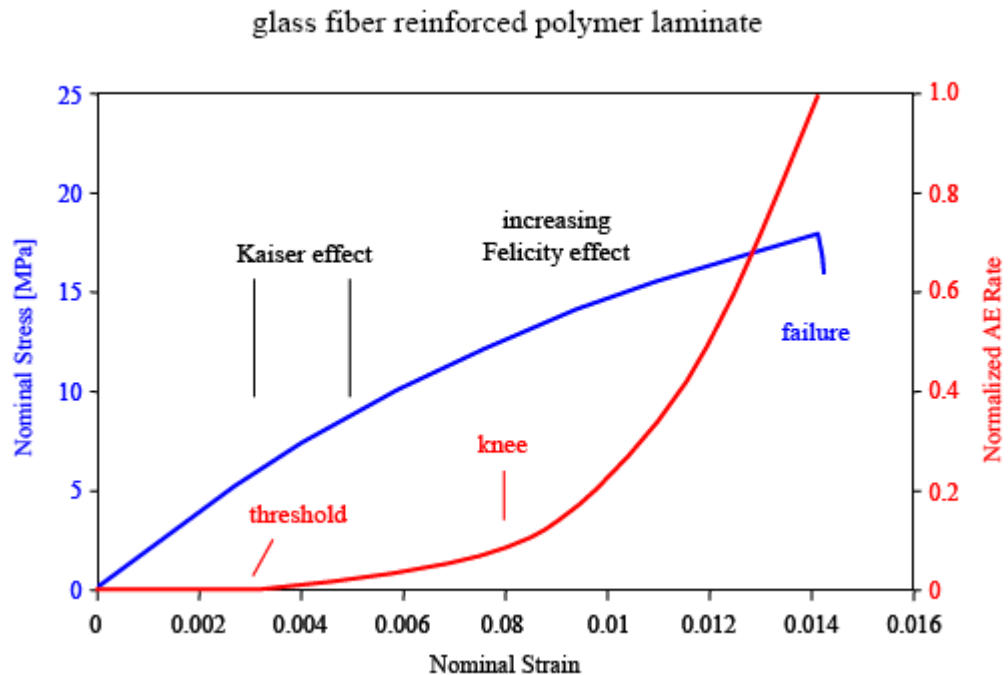


Abb. 1. prinzipieller Verlauf der Schallemissionsrate (rot) von GFK-Werkstoffen in Abhängigkeit von der Belastung, Verlauf der Nennspannung (blau), nach: Peter B. NAGY, University of Cincinnati, AEEM-727 lecture 4th part

2. Auswertemethodik der Schallemissionsanalyse bei dynamischer Strukturbelastung

Wesentliche Herausforderungen bei der Anwendung der Schallemissionsanalyse bei dynamischer Strukturbelastung sind das starke Umgebungsrauschen und die ungünstigen akustischen Eigenschaften der Kompositwerkstoffe. Diesen Anforderungen begegnet das akustische Messsystem durch eine hohe Messwertdynamik, Speicherung und Bewertung der vollständigen Wellenformen sowie durch spezielle Auswertelgorithmen. Das prinzipielle Vorgehen bei der Auswertung und Angaben zum Messsystem wurden bereits im Rahmen des 17. Kolloquiums Schallemission [1] vorgestellt.

Schon im Rahmen der Signalvorverarbeitung erfolgt das Aussortieren elektromagnetischer Störimpulse über deren Einsatzzeiten und Auswahl der zu speichernden Kanäle in der Umgebung des Triggerkanals. Die Triggerung selbst erfolgt über eine hardwarebasierte Energieschwelle der Burstsignale. Die Off-Line-Verarbeitung umfasst die automatisierte Ersteinsatzbestimmung der Burst-Signale in zwei Stufen. Zuerst wird in einem Zeitfenster das Akaike Informationskriterium (engl. Akaike Information Criterion, AIC) berechnet, ein statischer Parameter, der die Grenze zweier Grundgesamtheiten aus der Signalstreuung bestimmt. Die Lage des Signalfensters, das für die AIC-Berechnung notwendig ist, wird mit einer Effektivschwelle bestimmt, die sich automatisch an das Signalleve des Messkanals anpasst. Danach wird die Ersteinsatzbestimmung durch die die Korrelation von Signalfenstern oder der Hilbert-Einhüllenden in diesen Fenstern verbessert. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes hat sich eine Filterung der Messsignale vor der Ersteinsatzbestimmung der Bursts bewährt. Um in dem Strukturverbund wechselnder Kompositmaterialien möglichst lagegenau orten zu können, wurden die hochfrequenten symmetrischen Wellenmoden durch einen dynamischen Bandfilter, abhängig von der Mittenfrequenz des Nutzsignals, unterdrückt und mit dem niederfrequenten aber amplitudenstarken asymmetrischen Wellenmode A0 geortet. Die Tiefpassfilterung des AIC-Wertes beseitigt Nebenminima und

erhöht so die Genauigkeit der Ersteinsatzbestimmung, insbesondere bei niederfrequenten Bursts. Die Einsatzzeiten beider Methoden der Ersteinsatzbestimmung können nacheinander dem Ortungsalgorithmus übergeben werden. Vom Triggerkanal werden nach einer Bandfilterung mit festen Grenzen und der Beseitigung von Frequenzspitzen folgende AT-Parameter der Burstsignale gebildet:

- Dauer in Mikrosekunden;
- Maximalamplitude in dB_{AE} ;
- absolute Energie in pJ ($\text{pico}=10^{-12}$);
- mittlere Leistung im Burstfenster in pW;
- mittlere Leistung in einem festen Fenster ab Burstbeginn in pW;
- Vorzugsfrequenz in kHz;
- höchster Frequenzanteil am Gesamtspektrum in dB.

Besonders auf einer drehenden Anlage überlagern ständig elektromagnetische Störungen die akustischen Nutzsignale. Ihr Einfluss kann erst mit Hilfe von Plausibilitätsbetrachtungen bei der planaren Ortung der Schallemissionsereignisse minimiert werden. Hits mit zu großen oder zu kleinen Laufzeitdifferenzen sowie einer zu kleinen Variationsbreite des AIC, die auf zu geringe Burstenergie hinweist, werden in diesem Prozess aussortiert. Im Rahmen der hyperbolischen Ortung selbst erfolgt eine Prüfung auf Singularität der Koeffizientenmatrix (und damit Lösbarkeit des Gleichungssystems) durch Prüfung der Pivot-Elemente. Abschließend werden Ortungen mit mehr als drei Sensoren aussortiert, deren Zeit-Residuen über einem vorgegebenen Schwellwert liegen.

3. Fallbeispiel: Schallemissionsanalyse beim dynamischen Ermüdungsversuch von Testbalken

Im Betrieb unterliegen Rotorblätter von Windenergieanlagen komplexen Spannungsverhältnissen. Für besonders lasttragende Bereiche ist eine Überwachung außerordentlich wichtig. Am Fraunhofer IWES sind dazu Balken entwickelt worden, an denen diese Spannungsverhältnisse abgebildet werden. Eine Balkenvariante ist entwickelt worden, um die Festigkeit der Klebverbindung zwischen den Gurten und dem Steg zu untersuchen. Dynamische Ermüdungsversuche dieser Balkenvariante wurden mit Schallemissionsanalyse und Thermographie begleitet. In Abbildung 2 ist ein typischer Versuchsaufbau abgebildet. Der Balken ist auf einer Seite mit zwei eingeklebten Bolzen befestigt (die Reibflächen befinden sich in Lagern außerhalb des Balkens) und auf der anderen Seite durch eine Bolzenverbindung mit der Lastschere und dem Zylinder verbunden. Die maximale Schubspannung entlang der Klebnaht tritt nach theoretischen Berechnungen im Bereich von 650 mm bis 840 mm Balkenlänge auf. Häufig auftretende Schadensfälle bei dieser Balkenvariante sind axiale Klebnahttrisse, die erst vereinzelt in Erscheinung treten, sich dann ausbreiten und schließlich häufen. Eine andere häufige Schadensart, oft in der Folge der Querrissbildung in der Klebeschicht ist die Ablösung des Klebstoffs von den Laminatschichten des Holmgurts oder/und Schubstegs bis hin zum großflächigen Grenzflächenversagen. Abbildung 2 zeigt den mit Schallemissionssensoren instrumentierten Schubsteg des Testbalkens. In dem vorangegangenen Versuch waren größere Standard-DuraAct-Sensoren vom Typ P-876.A15 auf der Oberfläche des oberen Holmgurtes appliziert worden, die dort zwischen 680 mm und 880 mm Balkenlänge gemessenen großen Dehnungen bis zu 0,34 % führten aber bei diesen Flächenwandlern zu Kontaktbrüchen. Abbildung 3 zeigt die Materialpaarungen der Teststruktur.



Abb. 2. Testbalken 2 beim asymmetrischen Drei-Punkt-Biegeversuch, Schallemissionssensoren (DuraAct Flächenwandler 11 x 41 mm) auf dem Schubsteg, Vorverstärker auf der Unterseite des Balkens, rechts: Thermographiekamera

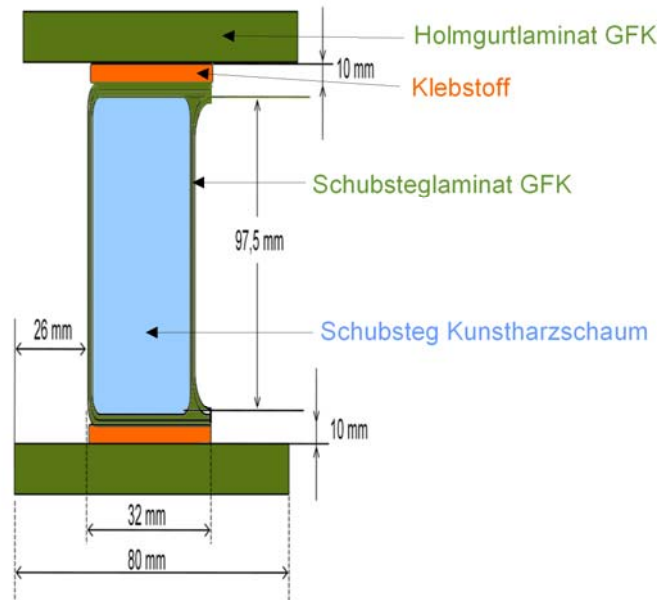


Abb. 3. Materialaufbau des Testbalkens, Balkenlänge: 1500 mm, Prüflänge: 1380 mm

In der Folge werden ausgewählte Ergebnisse des Versuchs Testbalken 3 dargestellt. Die Belastung des Testbalkens sollte ursprünglich sinusförmig im 1 Hz-Rhythmus mit Kräften von -1,3 kN bis -13,4 kN erfolgen, um nur in der oberen Klebfläche entsprechende Zugspannungen aufzubauen. Aufgrund eines Vorzeichenfehlers wurde die Belastung jedoch im 12-Stunden-Rhythmus alternierend im geplanten Kraftregime und dazwischen mit Kräften von +1,3 kN bis -13,4 kN durchgeführt. Wie Abbildung 4 zeigt, wurden in den Versuchsabschnitten mit dem Eintrag positiver Kräfte bzw. Balkenauslenkungen nach oben deutlich mehr Schallemissionen beobachtet als beim Belastungsregime mit Auslenkungen ausschließlich nach unten.

In Abbildung 4 ist der Verlauf der kumulativen Anzahl von Schallemissionen (Events) bzw. georteter Schallereignisse (Hits, rot) sowie der momentanen Balkenauslenkung zum Zeitpunkt der Events (grün) bzw. Hits (blau) über der Schwingzyklenzahl für den gesamten Versuchszeitraum bis zum Strukturversagen nach 609497 Zyklen dargestellt. Etwa ab 320000 Schwingzyklen steigt die Anzahl der Events pro Zeiteinheit sprunghaft an. Die Änderung im Gradienten der Kurve der kumulativen Hits erfolgt später bei ca. 370000 Zyklen. Ab diesem Zeitraum treten viele Hits auch bei geringen Balkenauslenkungen auf, was auf einen zunehmend hohen Anteil an reibungsinduzierter Schallemission hindeutet.

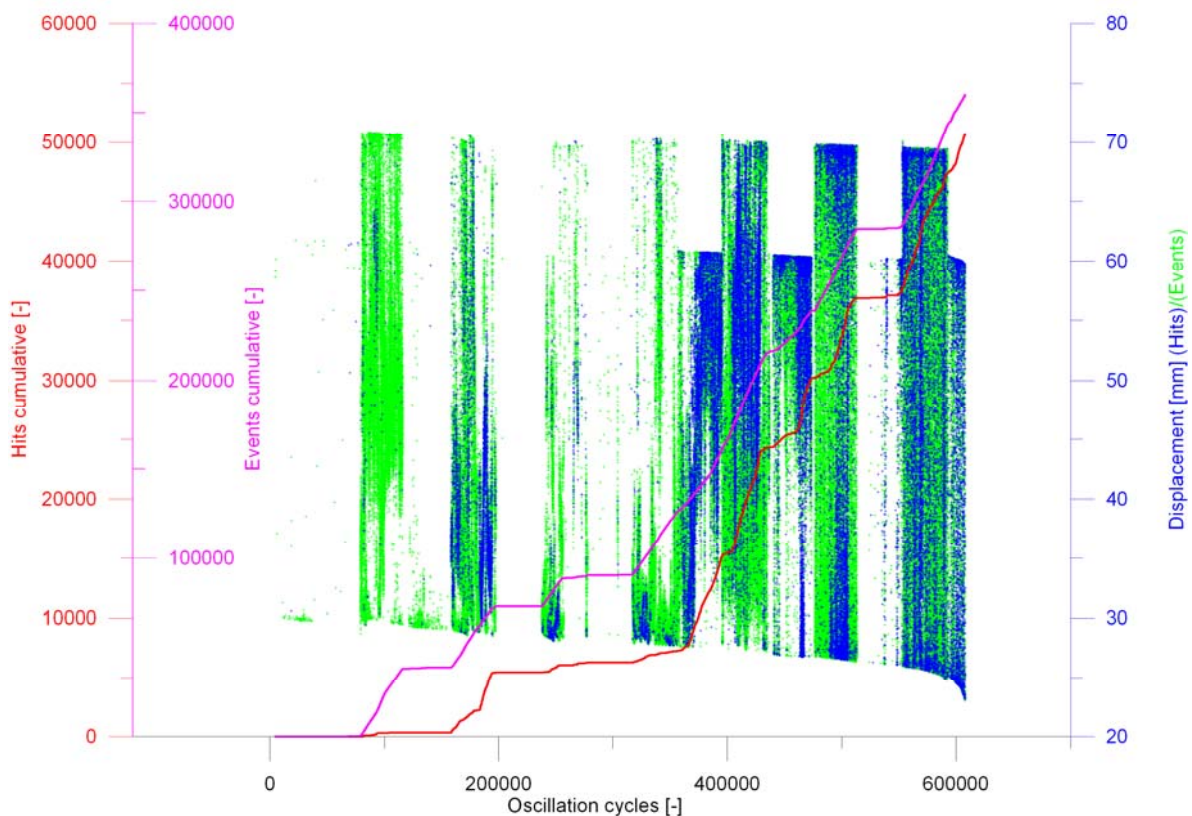


Abb. 4. Testbalken 3, kumulative Anzahl von Schallemissionen (Events, magenta) und georteter Schallereignisse (Hits, rot) sowie der momentanen Balkenauslenkung (Null-Position Displacement 67,3 mm) bei den Events (grün) und Hits (blau) über der Schwingzyklenzahl für den gesamten Versuchszeitraum bis zum Strukturversagen nach 609497 Zyklen

Abbildung 5 zeigt eine Draufsicht auf den Testbalken nach dem Strukturversagen. Die Entwicklung der Delaminationen des oberen Holmgurts vom Klebstoff ist jeweils am Ende einer Messkampagne farblich gekennzeichnet. Die Delaminationen beginnen in dem

am stärksten beanspruchten Bereich um den Dehnmessstreifen bei 790 mm Balkenlänge und dehnen sich nach beiden Seiten aus.

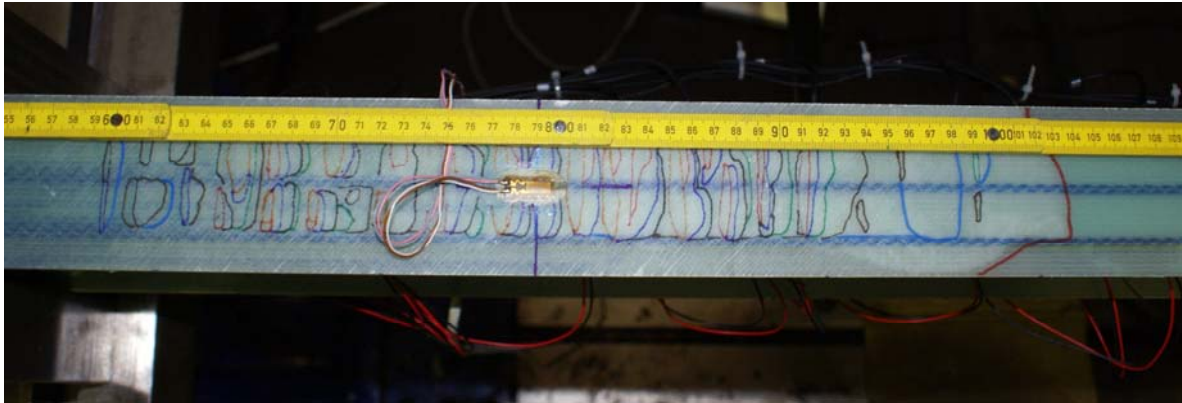


Abb. 5. Testbalken 3, Draufsicht auf den Testbalken nach dem Strukturversagen, farblich gekennzeichnete Entwicklung der Delaminationen des oberen Holmgurts vom Klebstoff während des Versuchszeitraums, rot: Grenze des flächenhaften Strukturversagens bei 1030 mm

Abbildung 6 enthält als Ergebnis der Schallemissionsprüfung während des Ermüdungsversuches des Balkens 3 einen planaren Ortungsplot. Als Parameter wurde die logarithmierte Häufigkeit von Hits in den 1,2 x 1,2 cm² großen Flächenelementen farbkodiert. In der am stärksten mechanisch belasteten Zone, in der ein Dehnmessstreifen auf der Oberseite des Balkens implementiert wurde, treten die meisten Schallemissionsquellen in Erscheinung. Dies war bei dem Versuch auch der Ort, an dem zuerst Delaminationen des oberen Holmgurts vom Klebstoff beobachtet wurden. Über dem Ortungsplot sind die in Abbildung 5 gekennzeichneten Delaminationsgrenzen am oberen Holmgurt schematisch dargestellt.

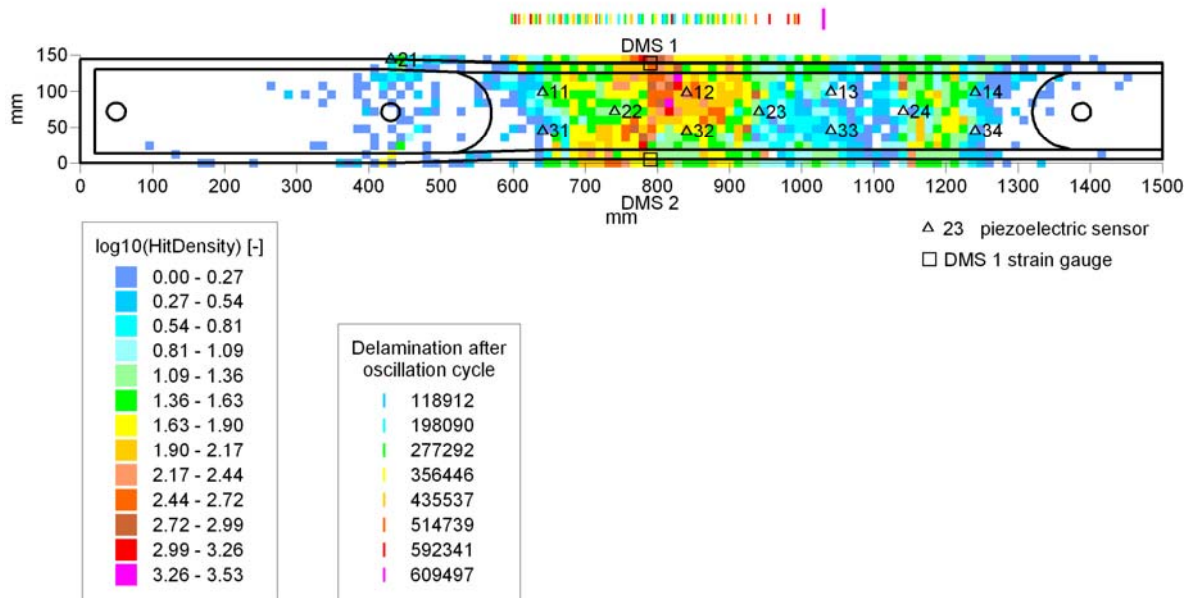


Abb. 6. Testbalken 3, logarithmierte Hitdichte im Gesamtversuchszeitraum bis zum Strukturversagen, oben: Entwicklung der Delaminationen am oberen Holmgurt

In dem in Abbildung 7 dargestellten Ortungsplot des Testbalkens 3 ist die mittlere momentane Kraft beim Auftreten von Hits in den 1,2 x 1,2 cm² großen Flächenelementen farbkodiert, Negativwerte entsprechen Kräften nach unten. oben: Die Entwicklung der Delaminationen am oberen Holmgurt ist über dem Ortungsplot dargestellt. Die größten Hit-Häufigkeiten in Abbildung 6 treten bei den stärksten Auslenkungen des Balkens nach unten auf. Beidseits des Bereiches mit der größten Hitdichte sind vermehrt Schallemissionen bei geringen Balkenauslenkungen zu beobachten. Entsprechend der obigen Bemerkungen zu Abbildung 4 deutet dies auf hohen Anteil an reibungsinduzierter Schallemission im vorgeschädigten Material in diesen Randzonen der Hauptbeanspruchung hin.

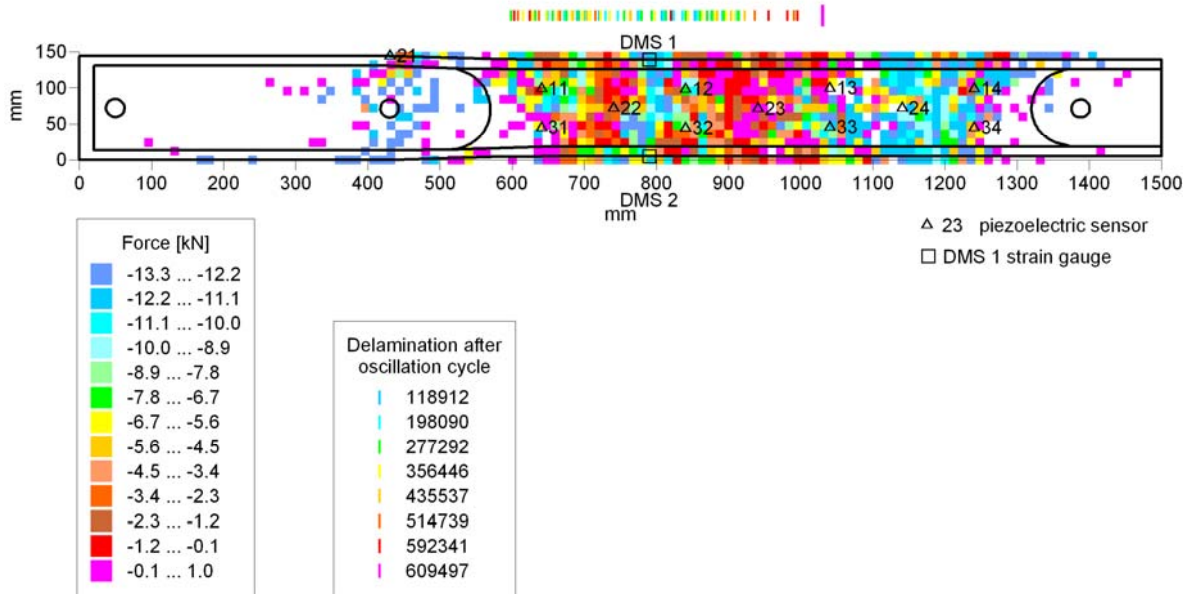


Abb. 7. Testbalken 3, mittlere momentane Kraft beim Auftreten von Hits in den 1,2 x 1,2 cm² großen Flächenelementen, Gesamtversuchszeitraum bis zum Strukturversagen (Kraft nach unten negativ), oben: Entwicklung der Delaminationen am oberen Holmgurt

In Abbildung 8 wird der Versuch unternommen sowohl die räumliche als auch die zeitliche Entwicklung eines AT-Parameters der Messungen am Testbalken 3 zu visualisieren. Farbkodiert ist die mittlere Burstenergie der Emissionen in Abhängigkeit von Balkenlänge und der Schwingzyklenanzahl sowie die Entwicklung der Ausdehnung von Delaminationen am oberen Holmgurt.

Die Darstellung lässt erkennen, dass in der Hauptbelastungszone um 800 mm Balkenlänge etwa nach 320.000 Schwingzyklen energiereiche Bursts geortet werden konnten. Wie bereits oben zu Abbildung 4 bemerkt wurde wird sich ab diesem Zeitpunkt der Anstieg der Summenkurve akustischer Ereignisse steiler. In dem Zeitbereich zwischen 320.000 und 370.000 Schwingzyklen nimmt die Anzahl der ortbaren Schallereignisse erst allmählich zu, die wenigen energiereichen Bursts sind jedoch Rissbildungen in der Hauptbelastungszone zuzuordnen und damit den wesentlichen Strukturveränderungen im Versuchszeitraum. Eine Ausnahme bilden die starken, vornehmlich reibungsinduzierten Schallemissionen in der finalen Versuchsphase.

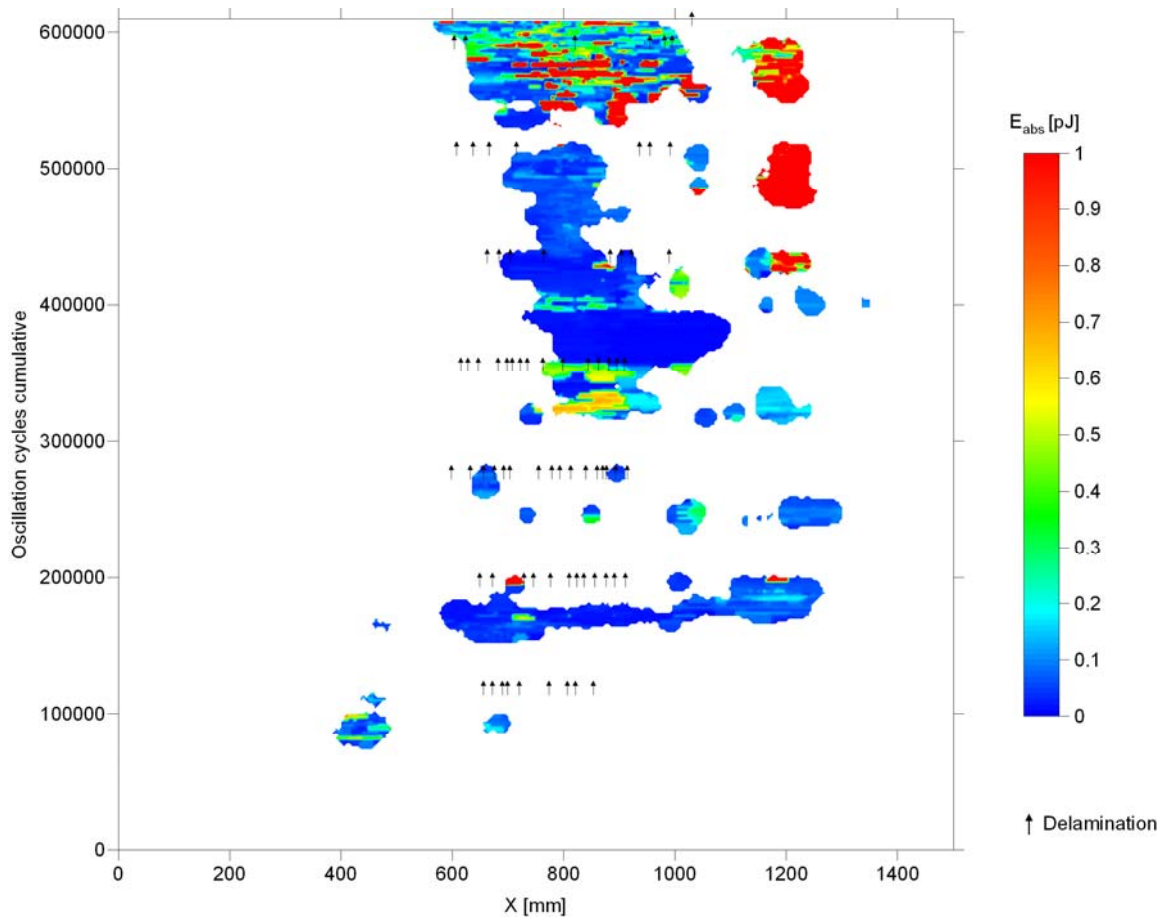


Abb. 8. Testbalken 3, mittlere Burstenergie der Emissionen in Abhängigkeit von Balkenlänge und der Schwingzyklenanzahl, Entwicklung der Delaminationen am oberen Holmgurt

Abbildung 9 blendet das Ergebnis der Schallemissionsanalyse am Testbalken 2 über die thermografische Aufnahme am Versuchsende nach dem Strukturversagen. Die Ablösung der oberen Klebschicht vom Steg ist rechts vom höchstbelasteten Bereich durch die Ausbeulung des oberen Gurtes deutlich zu erkennen. Das Thermogramm zeigt besonders beanspruchte Zonen der beiden Klebeflächen, die mit der lateralen Lage von Rissgeflechten, die mit den Schallemissionstests nachgewiesen wurden, korrespondieren. Zusätzlich zu den, mit dem Thermographie-Ergebnis übereinstimmenden Häufungen von Emissionen aus den Klebstoffschichten und angrenzenden Gurt-/Steg-Bereichen wurden auch Schallereignisse auf der Verbindungslinie der zwei Hauptbelastungszonen im Schubsteglaminat nachgewiesen. Bemerkenswert ist die hohe erreichte Ortungsgenauigkeit, die im Zentimeterbereich und damit deutlich unterhalb der Wellenlänge des genutzten Wellenmodes im Dezimeterbereich liegt.

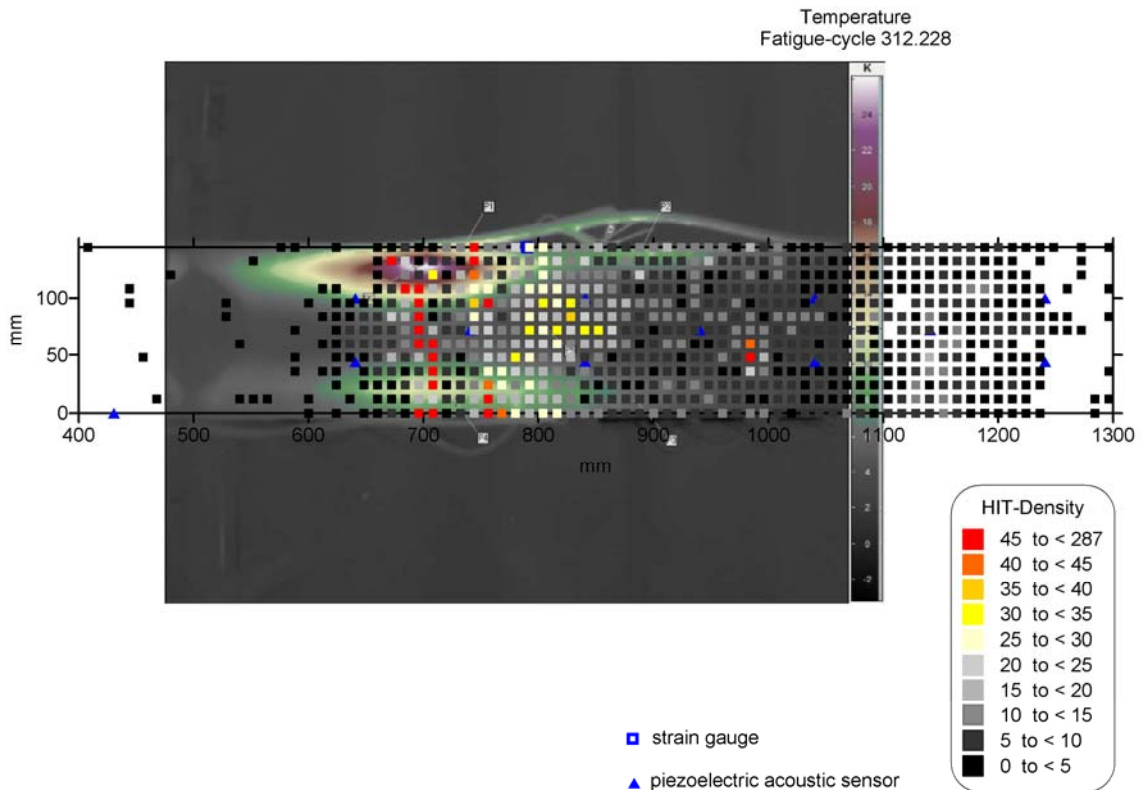


Abb. 9. Testbalken 2, Hitdichte pro Flächenelement von 1,2 cm x 1,2 cm beim Schwingzyklus 249384 und Temperaturverteilung nach dem Strukturversagen

4. Fallbeispiel: Gurtbruch beim dynamischen Ermüdungstest eines Rotorblattes in Schlagrichtung

Rotorblätter von Windkraftanlagen bestehen im Wesentlichen meist aus zwei Halbschalen in Sandwichbauweise und zwei Holmstegen oder einem Holmkasten. Dabei nehmen die in der Außenschale befindlichen Hauptgurte zusammen mit den Holmstegen bzw. dem Holmkasten den Großteil der Kräfte auf, während der restlichen Bereiche der äußeren Halbschalen die aerodynamische Form des Blattes bestimmen und nur einen geringen Teil der Lastaufnahme übernehmen. Die Halbschalen bestehen aus äußeren bidirektionalen GfK-Schichten und je nach Belastung aus den Fasergurtbereichen oder den Sandwichbereichen. Die Gurte sind meist unidirektionale Glasfasergelege, bei aktuell gefertigten Blättern auch Kohlefasergelege, die die Zugbelastung von der Blattwurzel in Richtung Blattspitze des Rotorblattes aufnehmen. In den weniger belasteten Bereichen kommen Sandwichkonstruktionen mit PVC-Schäumen oder Balsaholz als Stützmaterial zum Einsatz. Sie bieten einen Kompromiss zwischen Festigkeit und Gewicht. Die Holmstege bestehen ebenfalls aus PVC-Schaum oder Balsaholz in Sandwichbauweise. Sie stützen die beiden Halbschalen und dienen neben der Vorder- und Hinterkante als Verbindungselemente. Ein typischer Rotorblattquerschnitt ist in Abbildung 10 dargestellt. Er zeigt den prinzipiellen Aufbau und die aerodynamische Form des Rotorblattes. Je nach Hersteller, können Material und Lage der konstruktiven Elemente stark von diesem Beispiel abweichen.

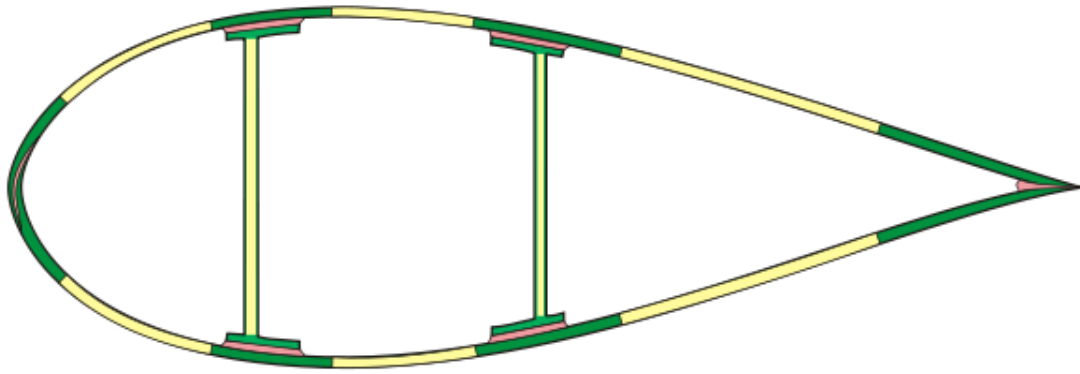


Abb. 10. Typischer Querschnitt eines Rotorblatts, GfK: grün, Balsa/Schaum: gelb, Klebefugen: rosa.

Im Rahmen von dynamischen Blatttests wurde die Schadensentwicklung von Rotorblättern mit Schallemissionsanalyse und AU-Messungen begleitet. Die Reichweite der akustischen Wellen und damit die Sensorabstände im Blatt werden durch die Dämpfungseigenschaften der oben genannten verschiedenen Rotorblatt-Materialien bestimmt. Es wurde ein Sensornetzwerk – ein Array aus bis zu 64 Sensoren mit räumlichen Abständen von 3 bis 5 m - entwickelt, welches insbesondere die stark beanspruchten Teile, wie z.B. die Steganbindungen, überwacht. Abbildung 11 zeigt beispielhaft die Sensoranordnung in einem 38 m-Rotorblatt. Zur Berechnung der Quellorte der akustischen Emissionen in ebenen Koordinaten wurden die in Abbildung 12 dargestellten Ortungsebenen aus Abwickelungen des 3D-Modells des Rotorblatts erzeugt. Diese sind für das AE-Verfahren sowohl zur Berechnung der Quellorte der akustischen Emissionen in ebenen Koordinaten als auch zur Umsetzung der ebenen Koordinaten der Quellorte in das Raummodell notwendig. Wie das in Abbildung 13 dargestellte Beispiel für die Ortungsebene 3 der Schallemissionsprüfung auf der Außenhülle des Rotorblattes zeigt, wurde mit der Sensoranordnung ansatzweise ein Dreiecksnetz realisiert, das eine relativ homogene Ortungssensitivität besitzt.

Durch Sende-Empfangs-Messungen (AU) wurden verschiedene oberflächen-applizierte piezoelektrische Wandler-Typen getestet, um einen Sensor zu finden, der bezüglich seiner aktorischen und sensorischen Leistungsmerkmale optimal an die Kompositmaterialien angepasst ist. Von allen Sensoren erreichte der DuraAct-Wandler vom Typ P-876.A15 des Forschungsprojektpartners PI-Ceramic GmbH die höchste Sendeleistung. Dieser Sensor besitzt im bevorzugt nutzbaren Frequenzbereich um 25 kHz auch eine gute Sensitivität, sodass er gleichzeitig für die aktiven AU-Messungen als Aktor und Sensor als auch für die Schallemissionsanalyse genutzt werden kann.

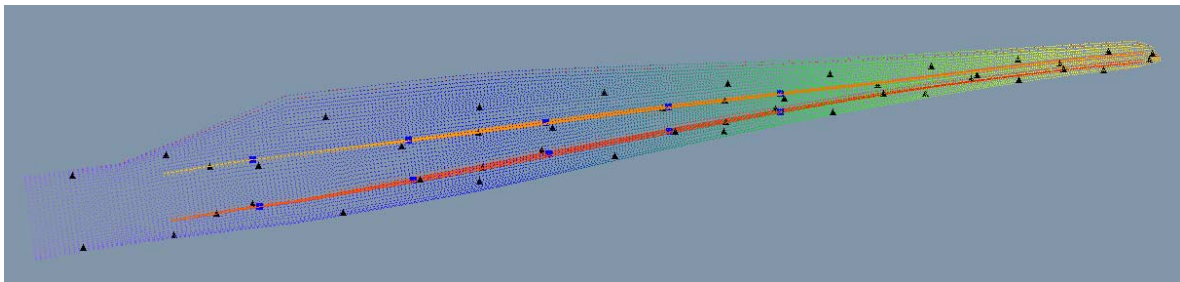


Abb. 11. Anordnung von 52 akustischen Sensoren (schwarze Dreiecke und blaue Quadrate) in einem 38 m-Rotorblatt

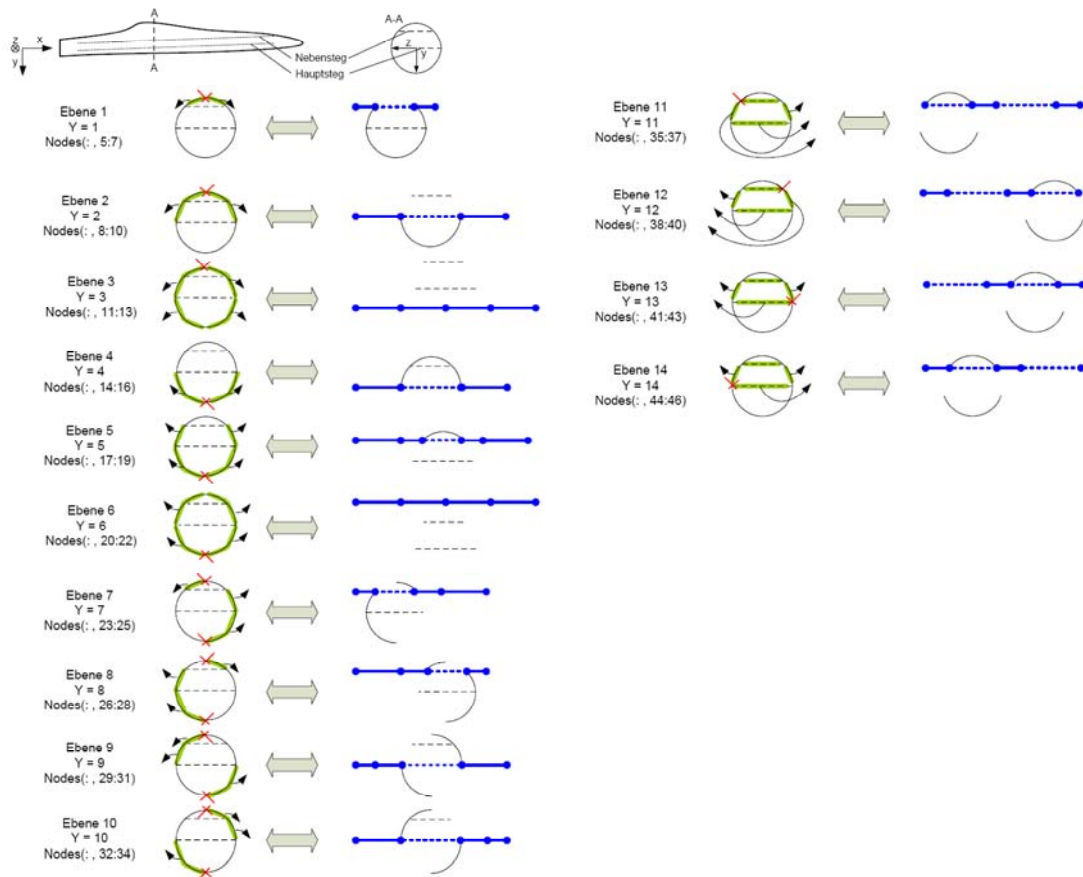


Abb. 12. Ortungsebenen aus Abwickelungen des 3D-Rotorblattmodells

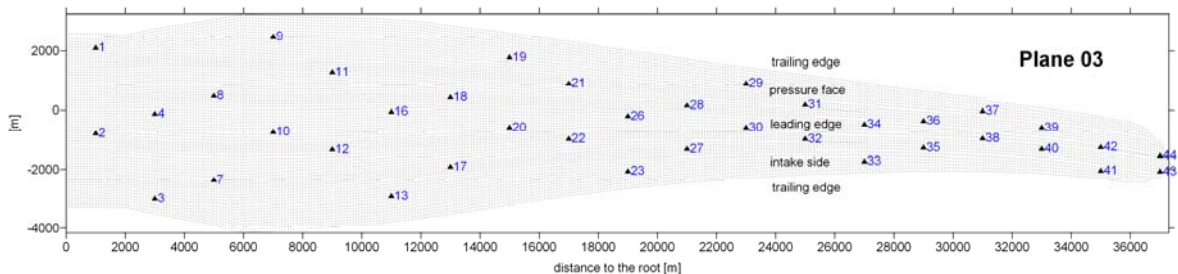


Abb. 13. Anordnung der akustischen Sensoren (schwarze Dreiecke) in der Ortungsebene 3 der Schallemissionsanalyse auf der Außenhülle eines 38 m-Rotorblattes

In dem im rechten Teil der Abbildung 14 dargestellten Foto sind markante Undulationen im Glasfaser-Komposit des Nasenkantengurts bei Blattradius $R=20,5$ m auf der Druckseite farblich hervorgehoben. Wie in dem Schallemissions-Ortungsplot in Abbildung 14 zu erkennen ist, traten in dieser Schwächezone des Gurts bereits bei Anregung in Schwenkrichtung (in der Blattebene) vermehrt akustische Ereignisse auf, die auf Einzelfaserrisse und in deren Folge verstärkte Reibungsvorgänge in diesem Bereich hindeuten.

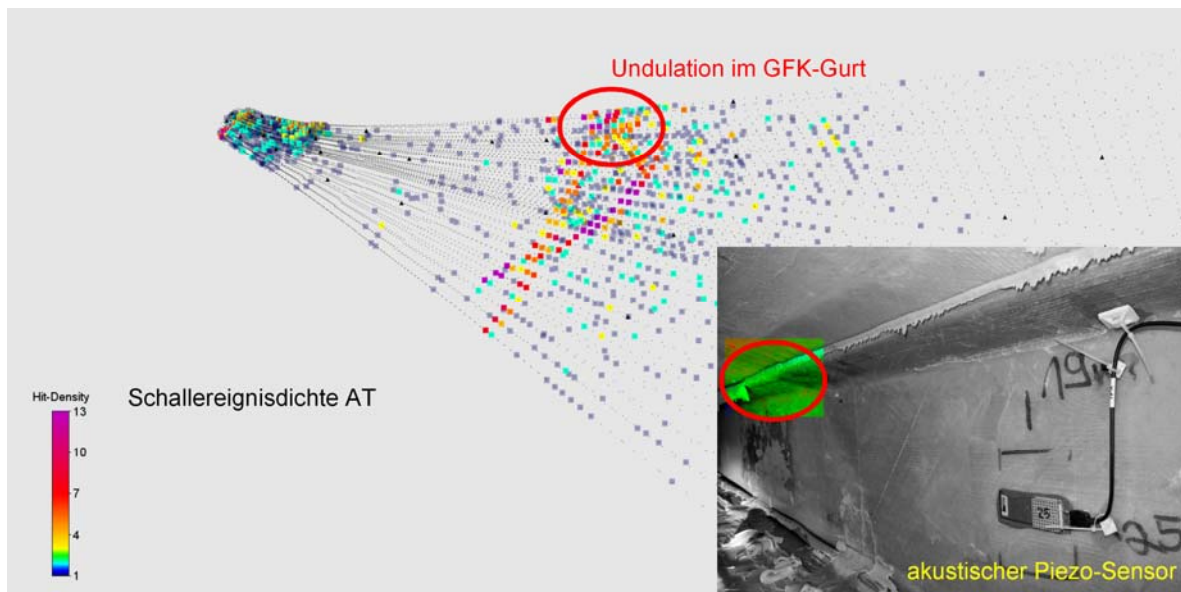


Abb. 14. Links: Schallemissions-Ortungsplot, Blick auf die Druckseite, farbkodiert Hitdichte während der Anregung in Schlagrichtung rechts unten: im Foto farblich hervorgehobene Undulationen im Glasfaser-Komposit des Nasenkantengurts bei $R=20,5$ auf der Druckseite

Bei der in zeitlicher Folge durchgeführten Anregung in Schlagrichtung (quer zur Blattebene) zeichneten sich im AT-Messbild besonders Schwachstellen in der Qualität der GFK-Gurte und Gurtverklebungen ab. Bei einer Zielschwingweite von 90 % erfolgte beim nach 680.000 Schwingzyklen mit Anregung in Schlagrichtung ein Bruch des Endkantengurtes auf der Saugseite bei Blattradius $R=17,5$ m. Wie der in Abbildung 15 dargestellte Schallemissions-Ortungsplot zeigt, bei dem die Schwingzyklen farbkodiert sind, trat das eigentliche Bruchgeschehen im Endkantengurt erst während der letzten 20.000 Schwingzyklen auf. Die Bruchzone wird von beiden Seiten von Bereichen flankiert, die sich seit längeren Versuchszeiten durch eine erhöhte Schallemissionsrate auszeichnen. Zur Blattspitze hin ist dies die oben beschriebene Zone bei $R=20,5$ m, in der starke Undulationen im GFK-Gurt sichtbar sind.

Um die Ursachen des Gurtbruches zu finden, wurden je sechs Proben der beiden saugseitigen GFK-Gurte mit US-Echo-Messungen untersucht. In den in Abbildung 16 dargestellten B-Bildern bilden sich verdeckte Undulationen im Glasfaser-Komposit der Gurte ab. Hohe Schallemissionshäufigkeiten korrespondieren mit starken Undulationen. Die tragenden GFK-Gurte des Rotorblattes werden beim Ermüdungstest in Schlagrichtung besonders stark belastet. In Bereichen, in denen Undulationen in den Glasfaser-Kompositen der Gurte auftreten, die mit Harznestern oder Hohlräumen verbunden sind, kann das Material nicht die berechneten Schub- und Druckspannungen aufnehmen. Im vorliegenden Fall konnte der stärker undulierte Nasenkantengurt weniger Lasten aufnehmen, als der weniger undulierte Endkantengurt. Der insgesamt steifere Endkantengurt brach im Bereich der größten Lastüberhöhung an einer lateral eng begrenzten Undulation des Glasfasergeleges.

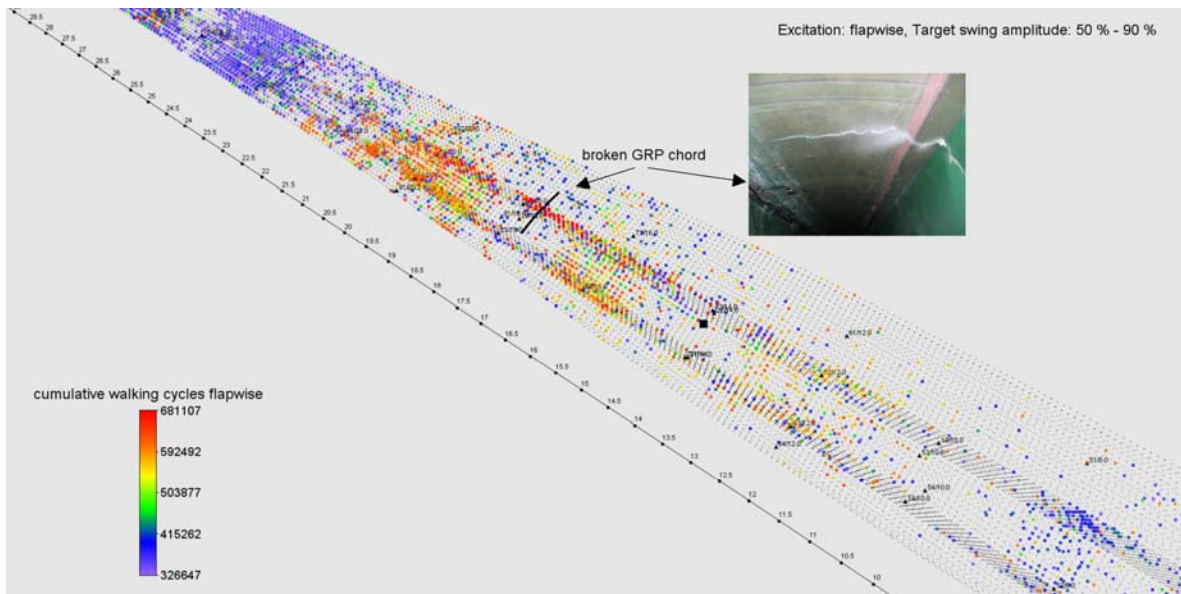


Abb. 15. Schallemissions-Ortungsplot, Blattanregung in Schlagrichtung, Blick auf die Saugseite, farbkodiert: Schwingzyklen, eingeblendetes Foto: Bruch des Endkantengurtes auf der Saugseite bei $R=17,5$ m nach 680.000 Schwingzyklen, Blick in die Mittelkammer

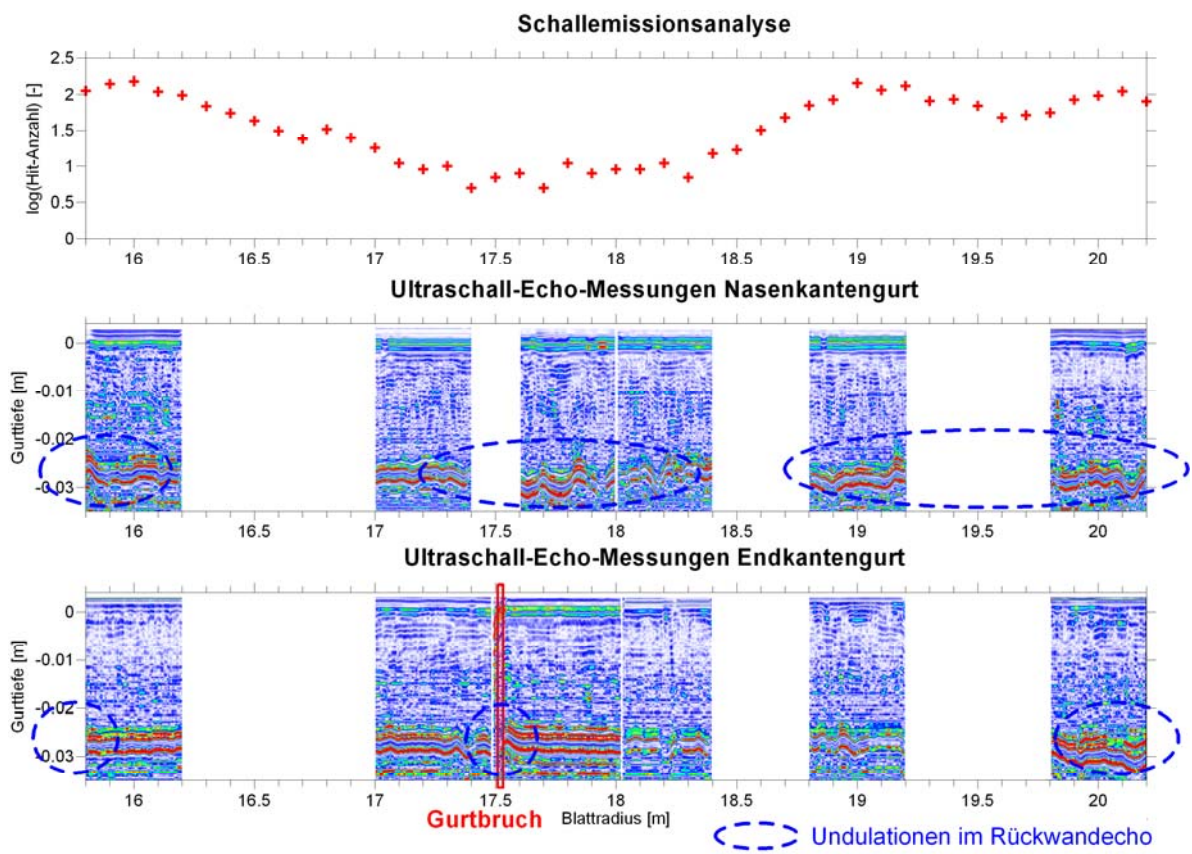


Abb. 16. logarithmierte mittlere Schallemissionshäufigkeit über B-Bildern von US-Echo-Messungen an Gurtproben

Danksagung

Das F+E-Projekt „Modellgestütztes Structural Health Monitoring für Rotorblätter von Windenergieanlagen (SHM Wind)“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 01RI0902B gefördert.

Referenzen

- [1] DGZfP, 17. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 24.09. - 25.09.2009, Bad Schandau, FhG IZFP-D, Vortrag: Schulze, E.; Frankenstein, B.; Schubert, L.: Schallemissionsanalyse beim Gesamtermüdungstest eines Windkraftrotorblattes
- [2] Frankenstein, B.; Schubert, L.; Klesse, T.; Schulze, E.; Friedmann, H.; Ebert, C.: Überwachung von Rotorblättern von Windkraftanlagen, in: MP Materials Testing, Ausgabe 10/2009, Volume 51
- [3] DGZfP DACH-Jahrestagung 2012, Graz, FhG IZFP-D, Vortrag: Mi.4.B.3: Frankenstein, B., Schulze, E., Fischer, D., Weihnacht B.: Rotorblattüberwachungssystem für Windkraftanlagen basierend auf Schallemissionstechniken
- [4] Kaiser, J.; Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch; Dissertation, Technische Hochschule München; München 1950