

Schallemissionsmessungen während der Durchführung von Zugversuchen an GFK-Proben

Bianca WEIHNACHT¹, Eberhard SCHULZE¹, Alexander PIETZSCH¹,
Lars SCHUBERT¹, Adriaan VANDENBRANDE², Burkhard CERBE²,
Karl-Walter BORCHERS³

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

² cp.max Rotortechnik GmbH & Co. KG, Dresden

³ IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, Dresden

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

Kurzfassung. Im Rahmen der wachsenden Bedeutung alternativer Energieerzeugung stellen Rotorblätter Bauteile von besonderer Relevanz an Windenergieanlagen dar. Hier ist im bundesdeutschen Durchschnitt alle 4 Jahre mit einem Strukturversagen zu rechnen. Am IKTS wurde ein Messsystem entwickelt, das mit Hilfe von speziellen piezoelektrischen Sensoren die durch Belastungen bzw. Schäden in der Struktur hervorgerufenen Schallemissionssignale aufzeichnen kann. Diese Ultraschallereignisse werden über die Zeit gesammelt, eine Häufigkeitsverteilung ermittelt und hieraus ein Schadensfortschritt abgeleitet. Aufgrund der Blitzschutzproblematik in den Rotorblättern geschieht die Energie- und Datenübertragung zwischen Sensoren und Basisstation an der Blattwurzel über eine optische Verkabelung.

Die Interpretation der so gewonnenen Daten stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar, da die Schallemissionsereignisse den Schadensmechanismen zugeordnet werden sollen. Dafür sind grundlegende Untersuchungen zu Schallemissionsparametern wie Frequenzgehalt, Signalenergie und Signallänge notwendig, die im Rahmen eines von der SAB geförderten Forschungsprojektes QuantSHM an GFK-Proben durchgeführt wurden. Die relevanten Strukturkomponenten repräsentierenden Proben, welche mit definierten Fehlern versehen waren, wurden in einer Zugmaschine bis zum Versagen belastet und während Zug- und 4-Punkt-Biegebelastung die Schallemissionsereignisse detektiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Verfahren sowohl eine Ortung des Strukturversagens als auch die Zuordnung von Schadensmechanismen möglich ist

Einführung

Glasfaserverbundwerkstoffe, wie sie für die Konstruktion von Rotorblättern Verwendung finden, werden nach Prinzipien der Materialwissenschaft konstruiert. Ihre Kenngrößen basieren daher auf den Prinzipien der Kontinuumsmechanik und der gut bekannten Materialeigenschaften der Einzelkomponenten. Ein durch Vorschädigung oder aktiven Eintrag entstandener Schaden kann die Lebensdauer der Struktur signifikant verringern und die ursprüngliche Materialauslegung in Frage stellen.



Die zerstörungsfreie Prüfung dieser komplexen Materialien stellt somit nach wie vor eine große Herausforderung dar. Im Vergleich zur gängigen visuellen Prüfung können mit der in diesem Artikel vorgestellten Schallemissionsanalyse auch Schädigungen im Material detektiert werden, die von außen nicht sichtbar sind. Spezifische Schallemissionsparameter können frühzeitig als Warnindikatoren dienen, da insbesondere Faserbrüche und Delaminationsprozesse sehr starke Schallemissionen erzeugen.

Die Technik der Schallemissionsprüfung oder Acoustic emission testing (AET oder AT) basiert darauf, dass dynamische Verschiebungen im Nanometer-Bereich an der Oberfläche von belasteten Prüfobjekten mittels hochempfindlicher piezoelektrischer Sensoren im Frequenzbereich von ca. 10 kHz bis 1 MHz detektiert und in elektrische Signale umgewandelt werden. Diese Oberflächenverschiebungen werden durch akustische Wellen (elastische Spannungswellen) verursacht, welche durch kurzzeitige, sehr kleine Materialverschiebungen, zum Beispiel infolge Rückfederung des Materials bei schnell ablaufenden Prozessen, wie Mikrorissbildung, Rissfortschritt, Rissuferreibung etc. entstehen.

Man verwendet Schallemissionssensoren, die Schallemissionen im für das Material spezifischen Frequenzbereich aufzeichnen. Delaminationen 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. Für die Ausgliederung von Störgeräuschen und elektromagnetischen Störungen müssen mehrere Schallemissionssensoren pro Bauteil instrumentiert sein.

Um Schäden zuverlässig klassifizieren zu können, um beispielsweise zwischen einer Delamination und einem Faserriss zu unterscheiden, muss der Schädigungsfortschritt direkt mit den Schallemissionsparametern korreliert werden. Dafür haben sich Messungen im Rahmen von Zug- und Biegeversuchen etabliert [1].

1. Zugversuche

Die Geometrie der Proben, wie sie in Abbildung 1 zu sehen ist, ergab sich aus den Anforderungen der verwendeten Zugmaschine (servohydraulische Standardprüfmaschine mit Parallel-Spannbacken) und der Lagenaufbau entspricht dem realer Rotorblattkomponenten.

Es wurde eine Vielzahl von Proben gefertigt, wie sie in Tabelle 1 aufgelistet sind. Es handelte sich um 13 Zugproben aus GFK-Sandwichmaterial aus Schaum und biaxialen GFK-Lagen. Es ist zu beachten, dass die ersten Proben nur mit Zug-, Probe 7 bis 13 aber mit Zug-Druck-Belastung gefahren wurden.

Durch Vorversuche wurden die Maschinenparameter folgendermaßen festgelegt:

1. Anfahren Kraft 0 kN
2. Anfahren der nächsten Kraftstufe (500 N Zugkraft) in Wegregelung mit einer Änderungsrate von 0,06 mm/s
3. Halten der Kraftstufe für 10 Sekunden
4. Anfahren einer Kraft 0 kN in Wegregelung mit einer Änderungsrate von 0,3 mm/s
5. Halten der Kraft 0 kN für 10 Sekunden
6. Wiederholung Schritte 2 bis 5 mit einer um 500 N zur letzten angefahrenen Kraft erhöhten Kraftstufe bis Probenversagen

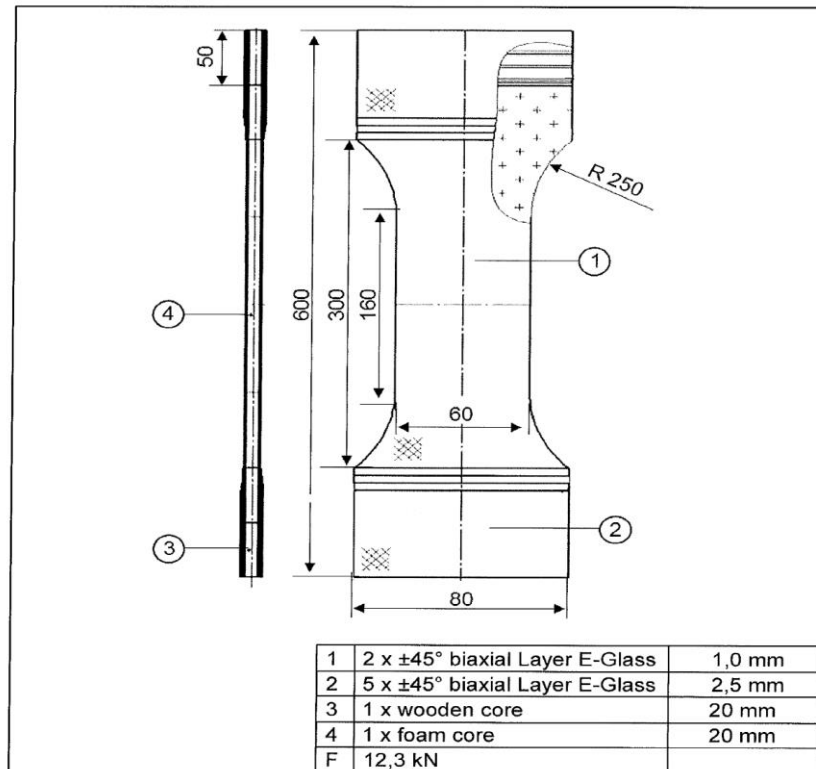


Abbildung 1: Probengeometrie für die Zugversuche

Tabelle 1: Liste der untersuchten Zugproben

Lfd. Nr.	Prüfnummer	Typ	Lieferdatum	Prüfdatum	Prüfprogramm
1	M008/16-CP01	Zugprobe	01.03.2017	07.03.2017	0 bis Versagen
2	M008/16-CP02	Zugprobe	01.03.2017	07.03.2017	0 bis Versagen
3	M008/16-CP03	Zugprobe	01.03.2017	07.03.2017	0 bis Versagen
4	M008/16-CP04	Zugprobe	01.03.2017	07.03.2017	0 bis Versagen
5	M008/16-CP05	Zugprobe	01.03.2017	08.03.2017	0 bis Versagen
6	M008/16-CP06	Zugprobe	01.03.2017	08.03.2017	0 bis Versagen
7	M008/16-CP07	Zugprobe	01.03.2017	08.03.2017	-2kN bis Versagen
8	M008/16-CP08	Zugprobe	01.03.2017	08.03.2017	-2kN bis Versagen
9	M008/16-CP09	Zugprobe	01.03.2017	08.03.2017	-2kN bis Versagen
10	M008/16-CP10	Zugprobe	01.03.2017	14.03.2017	-2kN bis Versagen
11	M008/16-CP11	Zugprobe	01.03.2017	14.03.2017	-2kN bis Versagen
12	M008/16-CP12	Zugprobe	01.03.2017	14.03.2017	-2kN bis Versagen
13	M008/16-CP13	Zugprobe	01.03.2017	15.03.2017	-2kN bis Versagen

Während des Versuchsablaufes wurden analoge Spannungssignale von Zylinderweg und Kraft kontinuierlich mit einer Abtastrate von 100 Hz erfasst und abgespeichert. Die Instrumentierung erfolgte mit jeweils zwei am IKTS entwickelten Schallemissionssensoren KAR601S am oberen und unteren Ende der Probe. Für die lineare Ortung der Schallemissionen auf der Probe hätte je ein Sensor ausgereicht, um aber Ankopplungsprobleme zu umgehen verwendet die Auswertesoftware zur Parametrisierung diejenige Sensorpaarung, mit der die größte Schallemissionsanzahl innerhalb der Probe geortet wurde. Als Messsystem wurde das am IKTS entwickelte MAS (Multi-Channel-Acoustic-System) verwendet.

Im Folgenden sind exemplarisch die Ergebnisse für die Probe CP 1 dargestellt. In den Fotos des Versuchs (Abbildung 2) sind deutlich die Risse im Schaumkern der Probe nach dem Strukturversagen zu erkennen.



Abbildung 2: Zug-Druck-Versuch zum Zeitpunkt des Strukturversagens - Probe CP01

Die Auswertung der Schallemissionsdaten ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Abbildung 3 zeigt in Rot den Verlauf des Weges, dessen statischer Anteil durch Schwächung des Materials während des Versuches zunimmt. Die Größe der Kreise linear georteter Emissionen in Magenta ist zu der an den Quellort rückgerechneten Energie der Burstsignale proportional. Die Darstellung wird durch die Kurven der kumulierten Eventanzahl in Schwarz und die kumulierte Burstenergie am Quellort in Blau ergänzt. Das grüne Balkendiagramm erlaubt die Betrachtung der Burstenergie zu den einzelnen Versuchszeiten. Der Versuch wurde unterbrochen, was sich in allen Kurven erkennen lässt. Bei Bruch nehmen der Weg und auch die Burstenergie stark zu.

Akustische Emissionen in Zug- und Entlastungsphasen sowie in den verschiedenen Stadien des Probenversagens können unterschiedlichen Wirkmechanismen zugeordnet werden, die sich in unterschiedlichem Frequenzinhalt der Events abzeichnen. In Abbildung 4 sind die Schallemissionsparameter in Abhängigkeit von der Kraft (im Gegensatz zu Abbildung 3 mit Zeitverlauf) zu sehen.

In Abbildung 5 eine Zusammenfassung der Versuchsergebnisse zu sehen, die eine Clusterung und damit eine Bewertung der Schadensmechanismen erlaubt. Die Cluster im Parameterraum aus Gewichteter Vorzugsfrequenz (WPF) und partieller Leistung 2 (150-300 kHz) der Bursts bilden unterschiedliche Quellmechanismen des Probenversagens ab. Niedrige WPF-Werte <150 kHz weisen auf Matrixversagen/ Delaminationen/ Reibvorgänge hin, wohingegen hohe WPF-Werte >150 kHz Faser-Matrix-Versagen und Faserbrüchen zuzuordnen sind. Die Zuordnung eines mittleren Clusters zwischen 70 kHz und 150 kHz zu spezifischen Quellmechanismen fällt schwer.

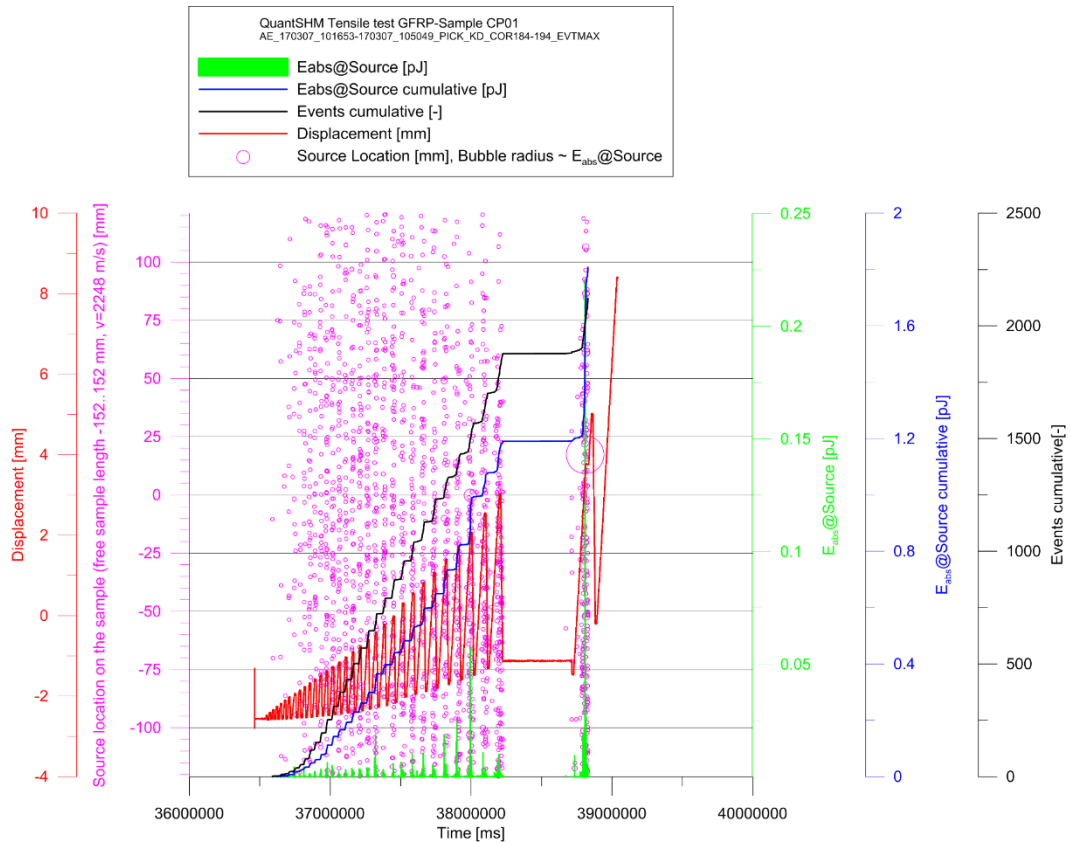
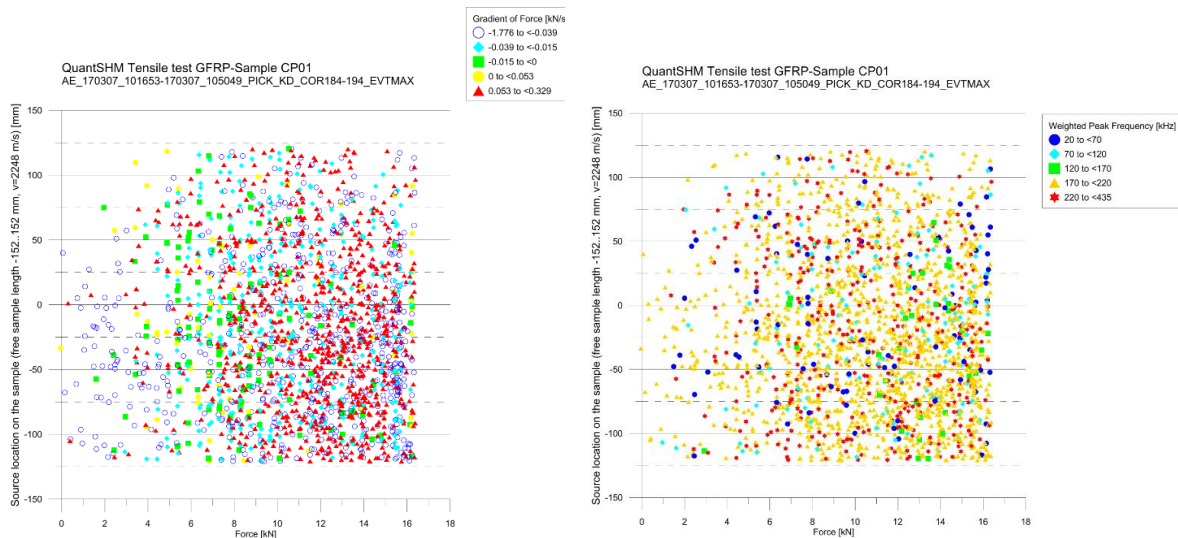


Abbildung 3: Ergebnisse Probe CP01 - Verlauf des Weges (rot), Quellort mit Energieabhängigkeit (magenta)



Farbkodierung: Kraftgradient

Farbkod.: Gewichtete Vorzugsfrequenz

Abbildung 4: Ergebnisse Probe CP01 – Lokalisations-Kraft-Plot mit der farbcodierten Abhängigkeit vom Kraftgradienten (links) und der Gewichteten Vorzugsfrequenz der Bursts (rechts)

Zusammenfassend sind die Versuche an den GFK-Sandwichstrukturen mit Zug- und Zug-Druck-Versuchen als erfolgreich einzustufen, da durch sie klare Aussagen zu den Schadenmechanismen der einzelnen Emissionen möglich sind.

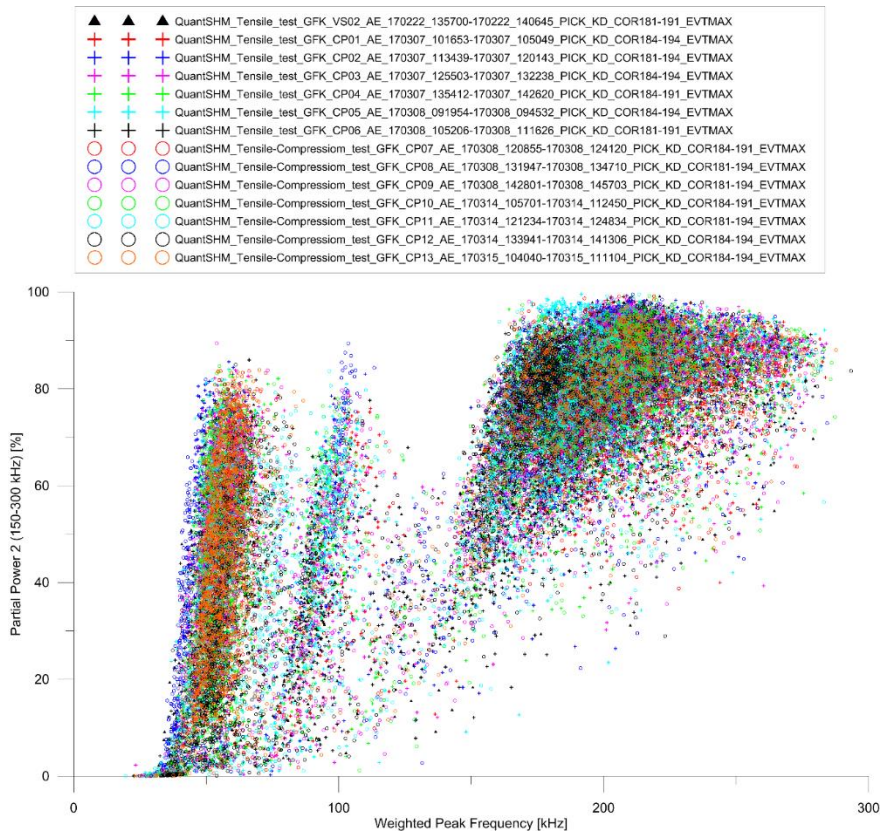


Abbildung 5: Partielle Leistung der Burstsignale in Abhängigkeit von ihrer Gewichteten Vorzugsfrequenz

2. Vier-Punkt-Biegeversuche

Die Geometrie der Proben, wie sie in Abbildung 6 zu sehen ist, ergab sich aus den Anforderungen der verwendeten 4-Punkt-Biegemaschine (servohydraulische Standardprüfmaschine mit Vierpunkt-Biegeeinrichtung), der Lageraufbau entspricht dem realer Rotorblattkomponenten (Gurt).

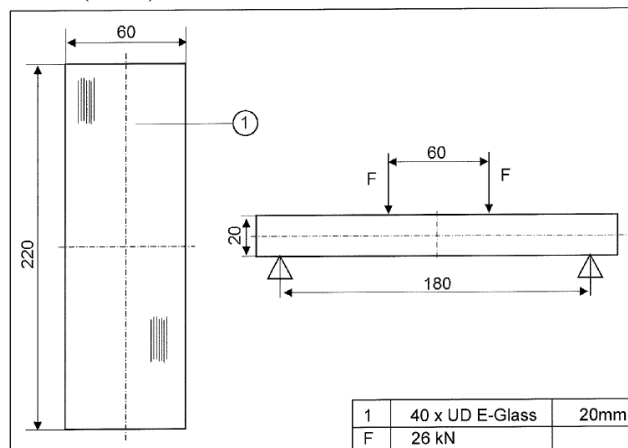


Abbildung 6: Probengeometrie für die 4-Punkt-Biegeversuche

In Tabelle 2 sind die untersuchten 24 Biegeproben dargestellt. In der letzten Spalte ist vermerkt, ob und welche Fehler eingebracht wurden. Es gab zwei Probenserien.

Tabelle 2: Liste der untersuchten Biegeproben

Lfd. Nr.	Typ	Probencharge	Probentyp
1	M008/16-VPB01	1	40 Lagen, keine Fehler
2	M008/16-VPB02	1	40 Lagen, keine Fehler
3	M008/16-VPB03	1	40 Lagen, keine Fehler
4	M008/16-VPB04	1	40 Lagen, keine Fehler
5	M008/16-VPB05	1	40 Lagen, eine Fehlstelle 10 cm breit, Stärke: eine Lage, mittig
6	M008/16-VPB06	1	40 Lagen, eine Fehlstelle 10 cm breit, Stärke: eine Lage, mittig
7	M008/16-VPB07	1	40 Lagen, eine Fehlstelle 10 cm breit, Stärke: eine Lage, mittig
8	M008/16-VPB08	1	40 Lagen, eine Fehlstelle 10 cm breit, Stärke: eine Lage, mittig
9	M008/16-VPB09	1	2x20 Lagen, verbunden mit Fasermaterial, keine Fehler
10	M008/16-VPB10	1	2x20 Lagen, verbunden mit Fasermaterial, keine Fehler
11	M008/16-VPB11	1	2x20 Lagen, verbunden mit Fasermaterial, keine Fehler
12	M008/16-VPB12	1	2x20 Lagen, verbunden mit Fasermaterial, keine Fehler
13	M008/16-VPB13	2	40 Lagen, keine Fehler
14	M008/16-VPB14	2	40 Lagen, keine Fehler
15	M008/16-VPB15	2	40 Lagen, keine Fehler
16	M008/16-VPB16	2	40 Lagen, keine Fehler
17	M008/16-VPB17	2	1x12 Lagen, 1x 16 Lagen, verbunden mit Klebeharz 0,6 cm, unsymmetrisch
18	M008/16-VPB18	2	1x12 Lagen, 1x 16 Lagen, verbunden mit Klebeharz 0,6 cm, unsymmetrisch
19	M008/16-VPB19	2	1x12 Lagen, 1x 16 Lagen, verbunden mit Klebeharz 0,6 cm, unsymmetrisch
20	M008/16-VPB20	2	1x12 Lagen, 1x 16 Lagen, verbunden mit Klebeharz 0,6 cm, unsymmetrisch
21	M008/16-VPB21	2	40 Lagen, Trockenstelle: 40cm Länge, Stärke 8 Lagen
22	M008/16-VPB22	2	40 Lagen, Trockenstelle: 40cm Länge, Stärke 8 Lagen
23	M008/16-VPB23	2	40 Lagen, Trockenstelle: 40cm Länge, Stärke 8 Lagen
24	M008/16-VPB24	2	40 Lagen, Trockenstelle: 40cm Länge, Stärke 8 Lagen

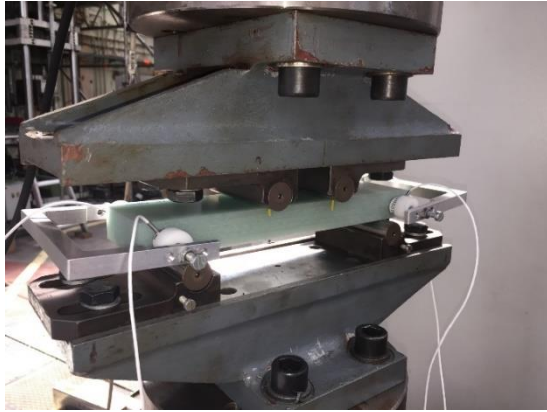
Durch Vorversuche wurden folgende Maschinenparameter für die Versuche festgelegt:

1. Anfahren Druckkraft 0,1 kN
2. Anfahren der nächsten Kraftstufe (2000 N Druckkraft) in Wegregelung mit einer Änderungsrate von 0,06 mm/s
3. Halten der Kraftstufe für 10 Sekunden
4. Anfahren einer Druckkraft 0,1 kN in Wegregelung mit einer Änderungsrate von 0,3 mm/s
5. Halten der Druckkraft 0,1 kN für 10 Sekunden
6. Wiederholung Schritte 2 bis 5 mit einer um jeweils 2000 N erhöhten Kraftstufe bis Probenversagen

Während des Versuchsablaufes wurden analoge Spannungssignale von Zylinderweg und Kraft kontinuierlich mit einer Abtastrate von 100 Hz erfasst und abgespeichert.

Im Weiteren wurde exemplarisch die Probe VPB 13 ausgewählt. Abbildung 7 zeigt links die Probe zu Beginn des Versuchs und rechts nach dem Versagen. Deutlich ist die weiße Trennfläche in der Mitte nach dem Versagen der Probe zu erkennen.

Abbildung 8 zeigt in Rot den Verlauf des Weges, dessen statischer Anteil durch die Schwächung des Materials während des Versuches zunimmt. Magenta Kreise kennzeichnen den Ort und den Energiegehalt der Burstsignale im Ergebnis linearer Ortung und Parameterextraktion. Die kumulierten Events sind als schwarze und die kumulierte Energie am Quellort als blaue Kurve dargestellt. Das grüne Balkendiagramm erlaubt die Betrachtung der Burstenergie zu den einzelnen Versuchszeiten. Akustische Emissionen in Zug- und Entlastungsphase sowie in den verschiedenen Stadien des Probenversagens können unterschiedlichen Wirkmechanismen zugeordnet werden, die sich in unterschiedlichem Frequenzinhalt der Ereignisse abzeichnen. In Abbildung 9 sind die Schallemissionsparameter in Abhängigkeit von der Position auf der Probe zu sehen.



Vor dem Versuch



Nach dem Strukturversagen (weiße Trennschicht in der Mitte)

Abbildung 7: Probe VPB 13

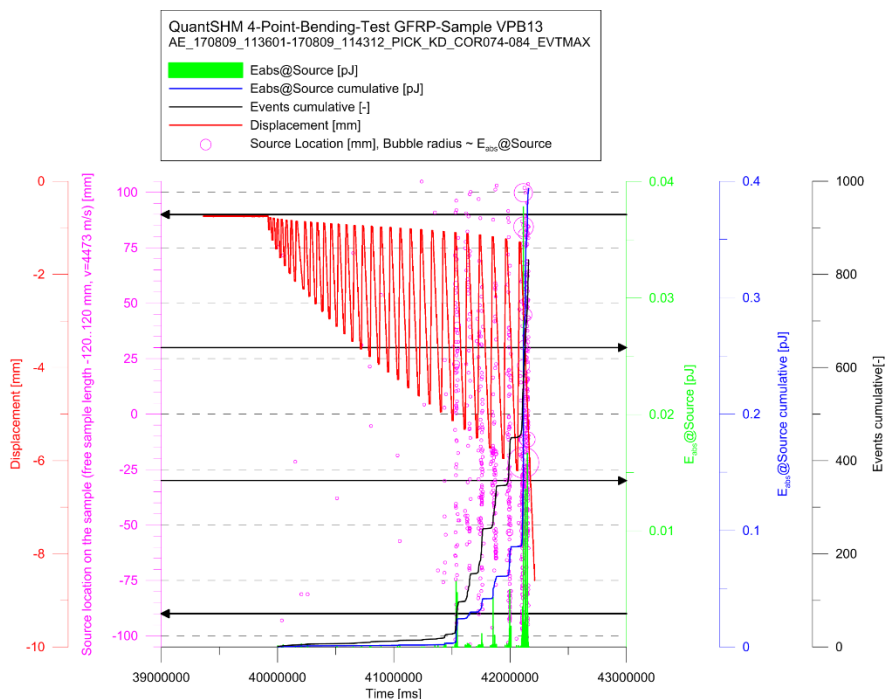


Abbildung 8: Ergebnisse Probe VPB13 - Verlauf des Weges (rot), Energieabhängigkeit (magenta)

Im Folgenden werden Ergebnisse der zweiten Probenserie mit zwölf 4-Punkt-Biegeversuchen an GFK-Proben (VPB13-VPB24) dargestellt. In Abbildung 10 zeigen die Proben VBP21-VBP24 mit Trockenstelle (gerissen) ein frühzeitiges Versagen im Schichtpaket, die Laminatproben ohne Inhomogenitäten (durchgezogene Linie) versagen deutlich später.

Abbildung 11 zeigt eine starke Variation des kumulativen Verlaufs der Burstenergie, übergreifend über die 3 Probenserien mit unterschiedlichem Lagenaufbau. Es ergeben sich insbesondere hohe Schallemissionsraten bei den Proben mit Trockenstelle (VPB21 – VBS 24).

Schlussendlich ist in Abbildung 12 eine Zusammenfassung der Ergebnisse der zweiten Probenserie zu sehen, die ein Clustering und damit eine Bewertung der Schadensmechanismen erlaubt. Die Cluster im Parameterraum aus gewichteter Vorzugsfrequenz (WPF) und partieller Leistung 2 der Bursts bilden die Quellmechanismen des Probenversagens ab. Niedrige WPF-Werte weisen auf Matrixversagen/ Delaminationen/ Reibvorgänge hin, hohe WPF-Werte >150 kHz sind Faser-Matrix- und Faserversagen zuzuordnen. Es zeigt sich eine sehr gute Clustering der dominanten Versagensarten.

Materialbedingt sind für alle Cluster deutlich höhere WPF-Werte erkennbar, als in den in Zugversuchsergebnissen der Sandwich-Strukturen.

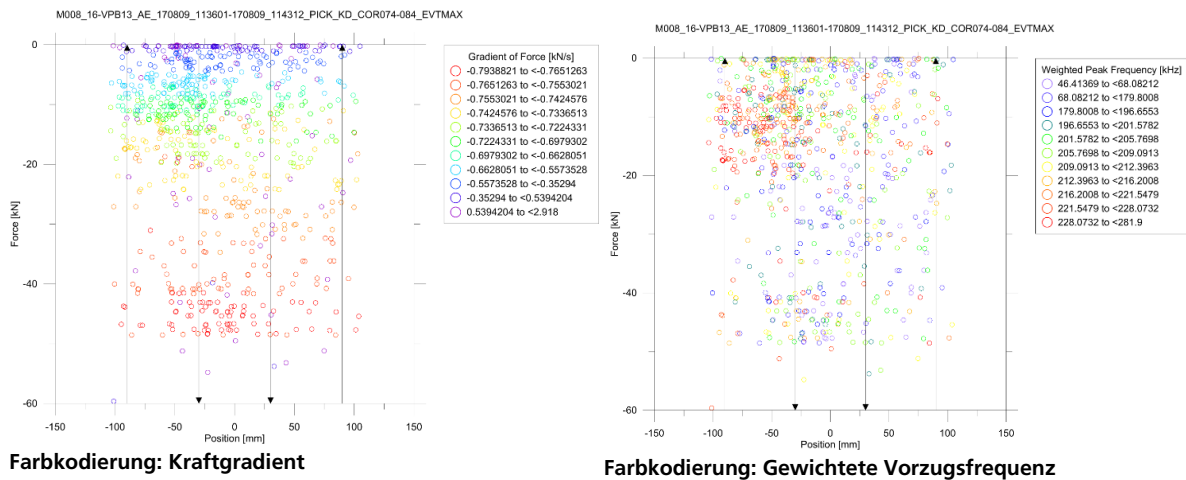


Abbildung 9: Ergebnisse Probe VPB13, Lokalisations-Kraft-Plot mit der farbcodierten Abhängigkeit vom Kraftgradienten (links) und der Gewichteten Vorzugsfrequenz der Bursts (rechts)

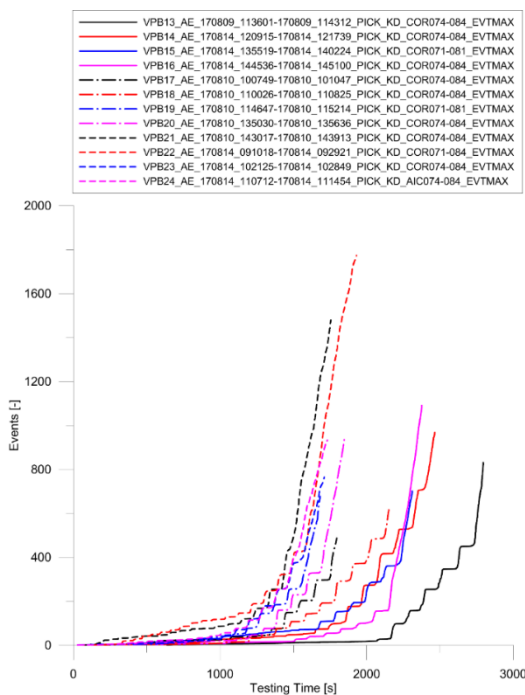


Abbildung 10: Abhängigkeit der Eventanzahl von der Testzeit

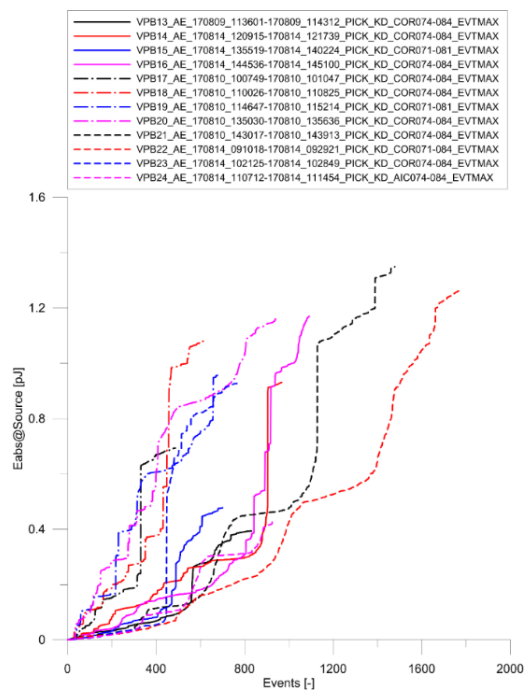


Abbildung 11: Abhängigkeit der Burstenergie von der kumulativen Eventanzahl

Zusammenfassung

Im Rahmen der wachsenden Bedeutung alternativer Energieerzeugung stellen Rotorblätter Bauteile von besonderer Relevanz an Windenergieanlagen dar. Hier ist im bundesdeutschen Durchschnitt alle 4 Jahre mit einem Strukturversagen zu rechnen. Am IKTS wurde ein Messsystem entwickelt, das mit Hilfe von speziellen piezoelektrischen Sensoren die durch Belastungen bzw. Schäden in der Struktur hervorgerufenen Schallemissionssignale aufzeichnen kann. Die Parameter dieser Ultraschallereignisse werden über die Zeit gesammelt, eine Häufigkeitsverteilung ermittelt und hieraus ein Schadensfortschritt

abgeleitet. Bei Messungen in Rotorblättern erfolgt die Energie- und Datenübertragung zwischen Sensoren und Basisstation aufgrund der Blitzschutzproblematik über eine optische Verkabelung. Die Interpretation der so gewonnenen Daten stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar, da die Schallemissionsereignisse den Schadensmechanismen zugeordnet werden sollen. Dafür waren grundlegende Untersuchungen zu Schallemissionsparametern wie Frequenzgehalt, Signalenergie und Signallänge notwendig, die im Rahmen des Forschungsprojektes QuantSHM an GFK-Proben durchgeführt wurden. Die relevante Strukturkomponenten repräsentierenden Proben, welche mit definierten Fehlern versehen waren, wurden in einer Zugmaschine bis zum Versagen belastet und während Zug- und 4-Punkt-Biegebelastung die Schallemissionsereignisse detektiert. Die Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Verfahren sowohl eine Ortung des Strukturversagens als auch die Zuordnung von Schadensmechanismen möglich ist.

Die vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des von der Sächsischen Aufbaubank geförderten Projektes QuantSHM (Nr. 100207022) durchgeführt.

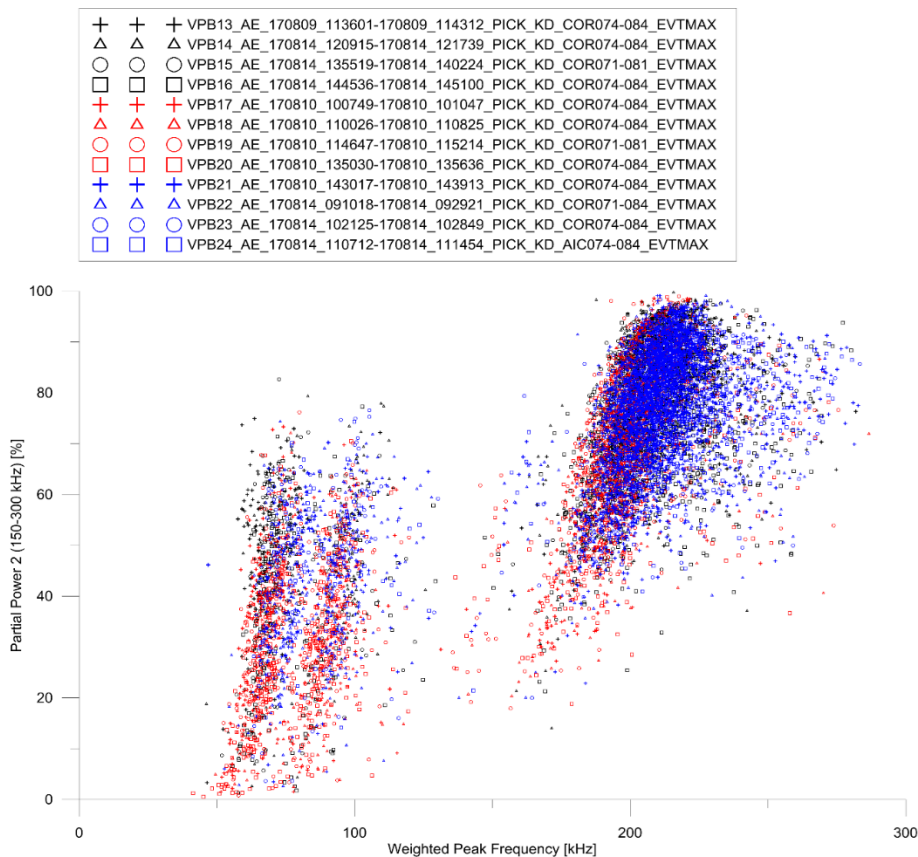


Abbildung 12: Partielle Leistung der Bursts in Abhängigkeit von der Gewichteten Vorzugsfrequenz

Literatur

- [1] Hönig, 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