

Rotorblattüberwachungssystem für Windkraftanlagen basierend auf Schallemissionstechniken

Bernd FRANKENSTEIN*, Eberhard SCHULZE*, Daniel FISCHER,
Bianca WEIHNACHT*

* Fraunhofer IZFP Dresden, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden,
bernd.frankenstein@izfp-d.fraunhofer.de

Kurzfassung. Das im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelte Überwachungssystem für Rotorblätter von Windkraftanlagen soll Schwachstellen in der Struktur ermitteln und den Verlauf einer belastungsbedingten Schädigung dokumentieren. Damit können nötige Reparaturen mit ausreichender Vorlaufzeit für die Lieferung benötigter Komponenten planbar gestaltet und der Übergang von einer bisher praktizierten periodischen Inspektion zur zustandsabhängigen Wartung ermöglicht werden. Letztlich wird die Verfügbarkeit und die Lebensdauer der Windenergieanlage erhöht und vor allem das Risiko von plötzlich auftretenden schweren Blattschädigungen vermieden.

Es werden Hard- und Softwarekomponenten für ein Rotorblatt Condition Monitoring Systems vorgestellt, welches die strengen Blitzschutzanforderungen an die Messtechniken durch Einsatz optischer Technologien erfüllt. Das System wurde im Labor erprobt, anhand von Prüfstandtests an die Praxisanforderungen angepasst und auf einer Windkraftanlage installiert.

Die Überwachungstechnologie basiert auf Schallemissionsmesstechnik zur Ermittlung relevanter Schädigungszonen, welche durch eine Modalanalyse im niederfrequenten Messbereich ergänzt wird. Die Lokalisierung der Schallereignisse gibt Hinweise auf Schädigungsorte und damit besonders belastete Zonen. Auf der Basis von Burstparametern der Schallemissionssignale erfolgt eine Bewertung der Signalquellen. Im Rahmen des Dauerversuches gelang es, Störsignale, die umfangreich in Form elektromagnetischer Einstrahlungen und Umweltrauschen auftraten, in mehrstufigen Auswahlprozessen auszufiltern.

Eine besondere Herausforderung stellt die Realisierung einer blitzschlagfesten Messtechnik dar. Das entwickelte Konzept einer optischen Energie- und Datenübertragung wird vorgestellt und die wesentlichen Parameter erläutert.

1 Einführung

Die Schallemissionsanalyse oder Acoustic Emission Testing (AET oder AE) wird seit Jahren erfolgreich in der Materialprüfung eingesetzt, um schnell und sicher Bereiche zu orten, die infolge einer äußeren Belastung eines Bauteils Schallemission 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 Rotorblättern 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 Kaiser, J.; Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch; Dissertation, Technische Hochschule München; München 1950) 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.

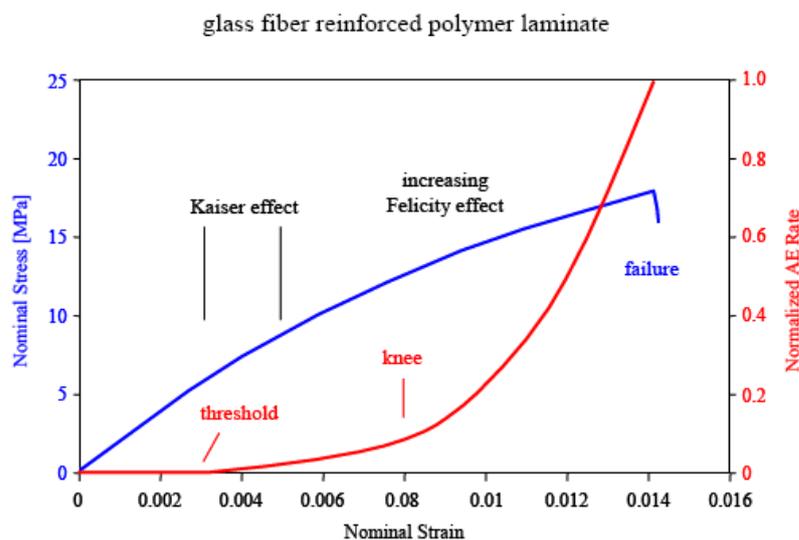


Abbildung 1: prinzipieller Verlauf der Schallemissionsrate (rot) von GFK-Werkstoffen in Abhängigkeit von der Belastung, Verlauf der Nennspannung (blau), nach: Peter B. NAGY, University of Cincinnati, AEEM-727 lecture 4th part

Um die Auswertalgorithmen an die spezifischen Messbedingungen der Testphase des Schallemissionssystems anzupassen, wurden die vollständigen Signalformen auf CF-Karten gespeichert. Bereits im Rahmen der Signalvorverarbeitung erfolgt das Aussortieren elektromagnetischer Störimpulse über deren Einsatzzeiten und Auswahl der zu speichernden Kanäle in der Umgebung des Triggerkanals.

Die Off-Line-Verarbeitung umfasste in der Testphase die automatisierte Ersteinsatzbestimmung der Burst-Signale nach zwei Verfahren. Das ist zum einen das Akaike Informationskriterium (engl. Akaike's Information Criterion, AIC) – ein statischer Parameter, der die Grenze zweier Grundgesamtheiten aus der Signalstreuung bestimmt und zum anderen die Korrelation von Signalfenstern. Die Lage des Signalfensters, das für beide Berechnungen notwendig ist, wird mit einer Effektivwertschwelle bestimmt, die sich automatisch an das Signallevel des Messkanals anpasst. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes hat sich eine Filterung der Messsignale vor der Ersteinsatzbestimmung der Bursts bewährt. Da schmalbandige niederfrequente Bursts zu bewerten sind hat sich eine dynamische obere Bandbegrenzungsfrequenz, abhängig von der Mittenfrequenz des Nutzsignals bewährt. Die Tiefpassfilterung des AIC-Wertes beseitigt Nebenminima und erhöht so die Genauigkeit der Ersteinsatzbestimmung, insbesondere bei niederfrequenten Bursts. Die Einsatzzeiten beider Methoden der Ersteinsatzbestimmung werden nacheinander dem Ortungsalgorithmus übergeben.

Vom Triggerkanal wurden nach einer Bandfilterung mit festen Grenzen von 1 bis 50 kHz folgende AE-Parameter gebildet:

- Burstdauer in Mikrosekunden
- Amplitudenhöhe der einzelnen Hits in dBAE
- absolute Energie in pJ (pico=10⁻¹²)
- mittlere Leistung im Burstfenster (> 5 % des maximalen Effektivwertes) in pW
- mittlere Leistung in einem festen Fenster von 1024 Samples ab Burstbeginn in pW
- Mittenfrequenz in kHz
- höchster Frequenzanteil am Gesamtspektrum in dB

Insbesondere auf einer drehenden Anlage überlagern elektromagnetische Störungen ständig 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.

2 Messsystem

Es wird ein Systemkonzept verwendet, welches aus Gründen des Blitzschutzes auf einer rein faseroptischen Verbindungstechniken zwischen den einzelnen Sensorknoten und der zentralen Energieversorgungs- und Kommunikationseinheit basiert. Um eine preiswerte vielkanalige Lösung anbieten zu können, wurde im Projekt auf 12-Kanal Übertragungstechnik der Fa. emcore zurückgegriffen. Diese Komponenten bieten neben dem Vorteil der Vielkanaligkeit auch einen hohen Integrationsgrad der optoelektronischen Wandlung (Detektordiode, Verstärker, Komparator; Treiber sind im Stecker integriert).

Notwendig sind weiterhin begleitende Messtechniken zur lokalen Temperaturbestimmung, um Einflüsse lokaler Temperatur Unterschiede zu kompensieren. Um erste Eindrücke über notwendige Aufwendungen zur Rotorblattüberwachung mit akustischen Verfahren zu gewinnen wurden verschiedene Versuche an einem Experimentalblatt im Labor durchgeführt. Diese dienten insbesondere dazu, die frequenzabhängige Dämpfung in Rotorblatt-Laminaten bestimmen, um einen Anhaltspunkt für die maximal möglichen Sensorabstände zu erhalten und die Eignung verschiedener PZT basierter Wandler für die

gewünschte Applikation zu untersuchen. Dazu wurden die aktorischen und sensorischen Eigenschaften verschiedener Sensortypen an einem Rotorblattsegment im Technikum des IZFP Dresden getestet.

Es wurden 12 verschiedene Wandler im Sende Empfangs-Betrieb untersucht, von denen der Piezo Composite Patch Transducer vom Typ DuraAct 876.A15 die höchste Übertragungseffizienz erreichte. Von dem untersuchten Wandler können diese die elektrische Energie am effektivsten in mechanische Energie umwandeln und diese auch in die Struktur einbringen. Bei den AE-Messungen wurde mit Hsu-Nielsen Quelle gearbeitet und auch hier zeigte sich, dass die DuraAct-Wandler eine hohe Empfindlichkeit besitzen und elektromagnetische Störungen gut unterdrücken.

Statistische Erhebungen zeigen, dass an einer Windkraftanlage im Mittel in Deutschland zwei bis vier Blitzeinschläge pro Rotorblatt und Jahr auftreten. Daraus resultiert die Notwendigkeit Konzepte für Sensornetzwerke in Rotorblättern zu entwickeln, die Blitzschlag Festigkeit garantieren. Für ein beschränktes Überwachungsvolumen ist das mit Kupfer basierten Lösungen möglich und wurde so für eine Pilotinstallation auf einer drehenden Anlage realisiert. Für die vollständigen Instrumentierungen wurde das Konzept einer optischen Energie- und Datenübertragung entwickelt. Aus konstruktiven Gründen ergibt sich ein auf einer 12-Kanal Struktur basiertes Systemkonzept, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die wesentlichen Systemkomponenten sind:

1. Sensorknoten, die von DuraAct Wandlern piezoelektrisch detektierte Ultraschallsignale elektrisch aufbereiten, digitalisieren und über ein PLD in ein spezielles Datenformat (Manchester Codierung) wandeln. Mittels spezieller Photoelemente erfolgt die Energieversorgung der sensornahen Elektronik und Kommunikationstechnik. Ein Low-Power-VCSEL dient zur Übertragung der Sensordaten,
2. 12-Kanal Lasermodul zur Energieversorgung der Sensorknoten über Power Laser,
3. 12 Kanal Empfängermodul, der die 12-Kanal Empfänger der Firma emcore nutzt um die optischen Signale in elektrische Daten zu konvertieren und die nachfolgende Signalverarbeitung basierend auf einer kombinierten FPGA-DSP-Technologie zu realisieren.
4. Optische Verteilerbox für die Signalverteilung zu den einzelnen Sensorknoten innerhalb des Rotorblattes.

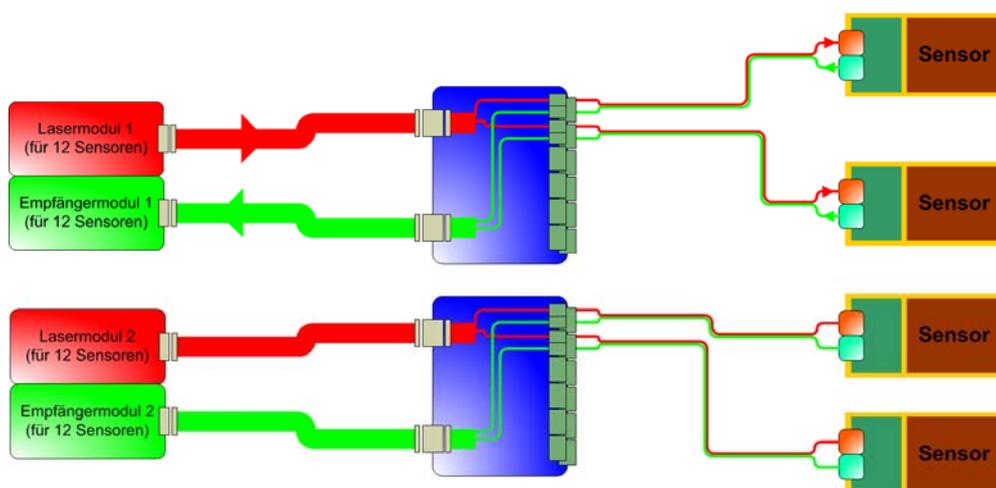


Abbildung 2: Systemkonzept zur optischen Energie- und Datenübertragung

3 Test auf einer drehenden Anlage

Die Häufigkeit der Schallemissionen an einem drehenden Rotorblatt zeigt deutliche Zusammenhänge zu den Betriebsparametern Windgeschwindigkeit, elektrische Leistung und Generatordrehzahl und liefert damit Hinweise auf erhöhte mechanische Belastungen des Rotorblattes unter bestimmten Betriebsbedingungen. Abbildung 3 demonstriert dies am Beispiel der Windgeschwindigkeit.

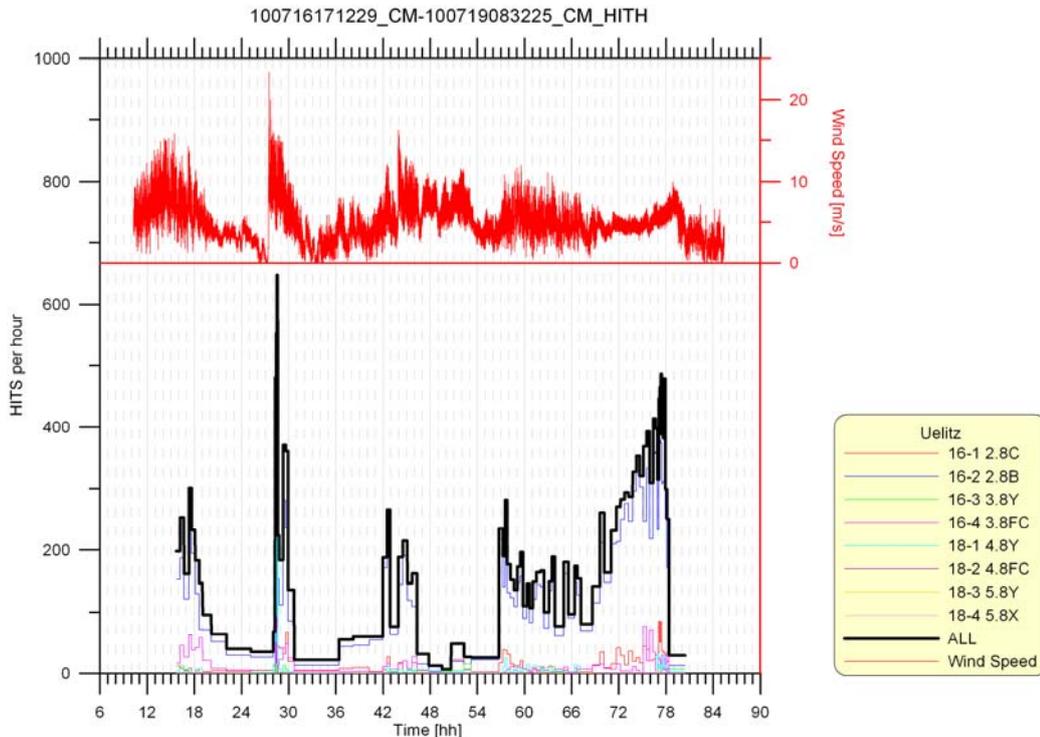


Abbildung 3: Windgeschwindigkeit und akustische Emissionen pro Stunde über der Zeit, drehende Anlage

Abbildung 4 visualisiert den zeitlichen Verlauf der in der Nähe der Blattwurzel auftretenden Schallemissionsereignisse für einen Beobachtungszeitraum von ca. einem Jahr. Bei diesem Ortungsplot der Schallemissionsprüfung wurde als Parameter das Mittel der Zeitdifferenzen aller im spezifischen Volumenelement aufgetretenen Schallemissionen farbkodiert. Es zeigt sich eine von der Schleppkante des Rotorblattes ausgehende Häufung von Schallemissionsquellen auf der Saugseite des Blattes. Langfristige Veränderungen der Lage von Schallemissionsquellen in dieser Zone deuten auf einen Schädigungsfortschritt von der Blattwurzel zur Blattspitze hin. Bei einer Inspektion des Blattes wurde beim Blattradius $R=9,5$ m ein Hinterkantenanriss festgestellt. Dieser Schaden liegt zwar außerhalb des instrumentierten Bereiches, die zeitliche Verschiebung der Lage von Schallemissionsquellen deutet aber auf Spannungsumlagerungen im Blatt durch die Rissentwicklung hin.

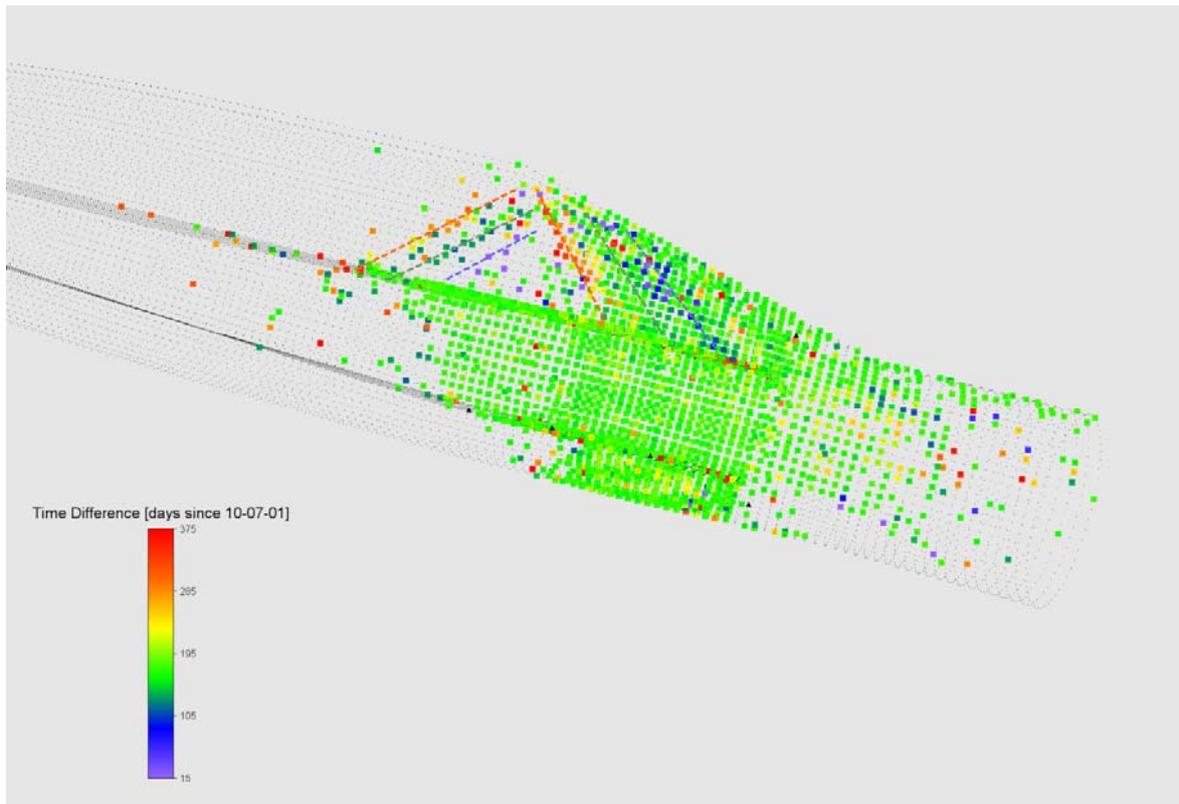


Abbildung 4: Ortungsplot der Schallemissionsquellen, drehende Anlage, Blick auf die Saugseite, farbkodiert: Zeit seit Versuchsstart (Mittelwert der Zeitdifferenzen aller im Volumenelement von 1 dm³ aufgetretenen Schallemissionen)

4 SHM-gestützte Ermüdungstests

Im Rahmen von dynamischen Blatttests wurde die Schadensentwicklung von Rotorblättern mit akustischen Messungen begleitet. Bei der Anregung in Schlagrichtung treten vordringlich Schwachstellen in der Qualität der GFK-Gurte und Gurtverklebungen zutage. In Abbildung 5 sind markante Undulationen im Glasfaser-Komposit des Nasenkantengurtes bei Blattradius $R=20,5$ auf der Druckseite farblich hervorgehoben. Diese Undulationen führen dazu, dass der Gurt bei einer Belastung in Schlagrichtung nicht mehr die entsprechenden Spannungen aufnehmen kann. Wie in dem, in Abbildung 6 dargestellten, Schallemissions-Ortungsplot zu erkennen ist, traten in dieser Schwächezone bei Anregung in Schlagrichtung frühzeitig vermehrt akustische Ereignisse auf, die auf Einzelfaserrisse und in deren Folge verstärkte Reibungsvorgänge in diesem Bereich hindeuten.

Bei dem einer Zielschwingweite von 90 % trat beim Test des Rotorblattes nach 680.000 Schwingzyklen mit flapwisser Anregung ein Bruch des Endkantengurtes auf der Saugseite bei Radius $R=17,5$ m auf. Wie der in Abbildung 7 dargestellte Schallemissions-Ortungsplot zeigt, bei dem die Flapwise-Schwingzyklen farbcodiert 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 Zeiten 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.



Abbildung 5: farblich hervorgehobene Undulationen im Glasfaser-Komposit des Nasenkantengurts bei R=20,5 auf der Druckseite

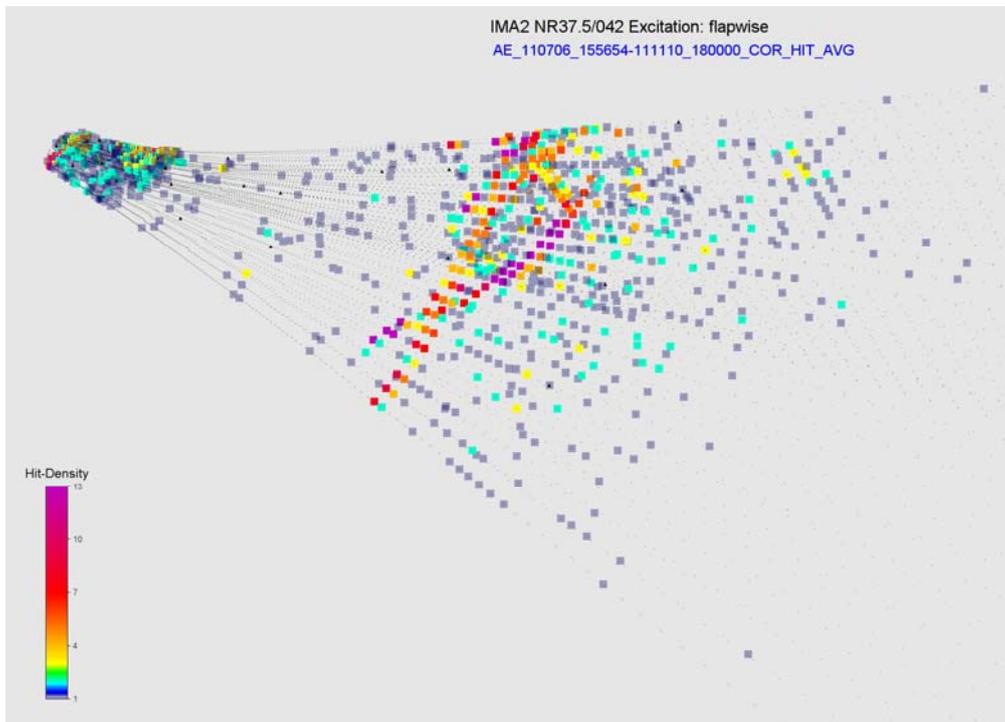


Abbildung 6: Schallemissions-Ortungsplot, Blick auf die Druckseite, farbcodiert geortete Schallemissionsereignisse bei R=20,5 während der Anregung in Schlagrichtung

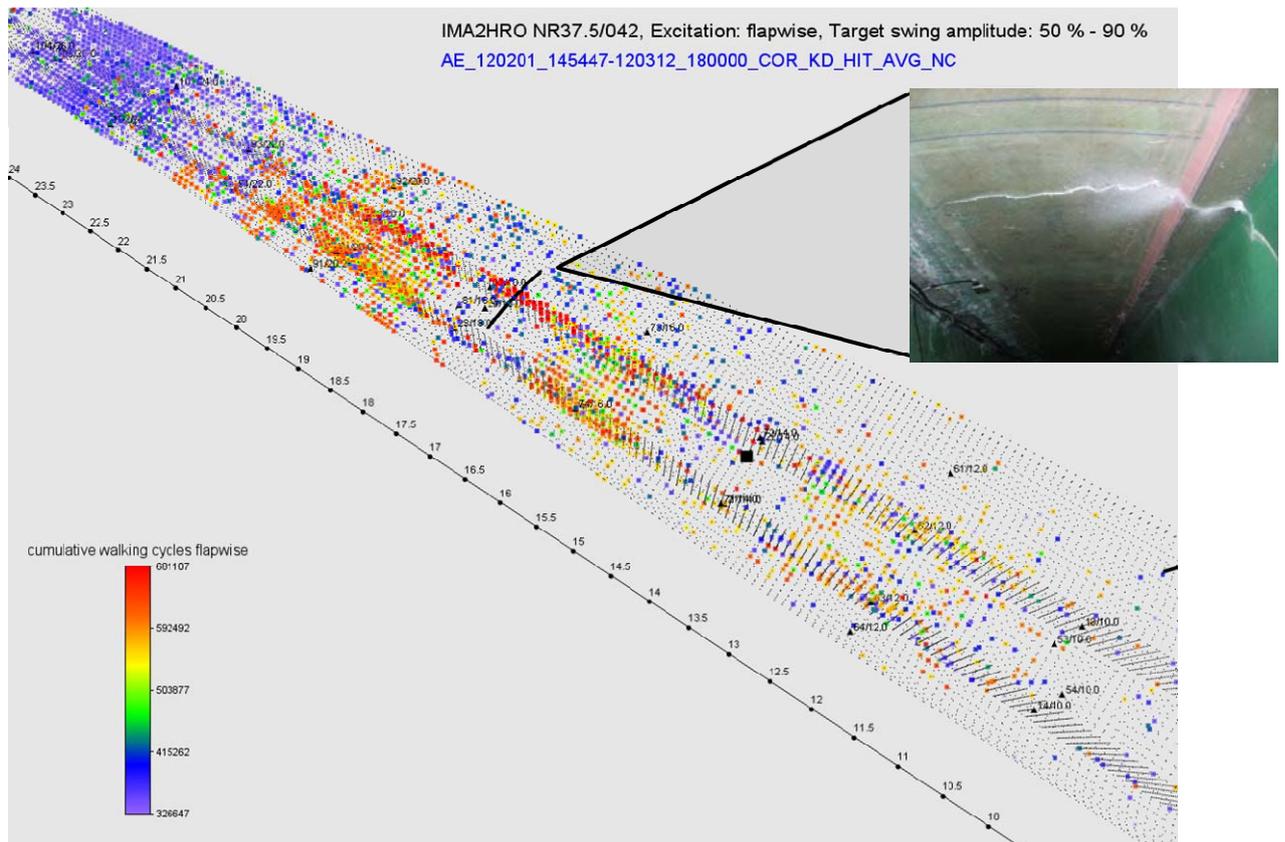


Abbildung 7: links: Schallemissions-Ortungsplot, Blattanregung flapwise, Blick auf die Saugseite, farbcodiert: Schwingzyklen, rechts: Bruch des Endkantengurtes auf der Saugseite bei $R=17,5$ m nach 680000 Schwingzyklen, Blick in die Mittelkammer

Um die Ursachen des Gurtbruches bei $R=17,5$ m zu finden, wurden Gurtproben beidseits der Bruchlinie mit ZfP-Verfahren untersucht. In den Ergebnissen von Röntgentomographie, Terrahertz-Elektromagnetik und Ultraschall Impakt-Echo-Messungen bilden sich bruchzonennah verdeckte Undulationen im Glasfaser-Komposit des Gurts ab. Wie bereits oben erwähnt, führen diese Undulationen dazu, dass der Gurt bei einer Belastung in Schlagrichtung nicht mehr die entsprechenden Spannungen aufnehmen kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Condition Monitoring System für Rotorblätter von Windenergieanlagen basiert auf Schallemissionsmesstechnik zur Ermittlung relevanter Schädigungszonen. Eine besondere Herausforderung war die blitzschlagfeste Messtechnik, die mit einer optischen Energie- und Datenübertragung realisiert wurde. Die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse während dynamischer Rotorblatttests und auf einer drehenden Anlage lieferten Hinweise auf Schädigungsorte und damit besonders belastete Zonen. Die Schadensanalyse wird durch Modalanalyseverfahren im niederfrequenten Messbereich unteretzt. Ziel ist die Entwicklung eines Decision Support Systems.

Danksagung

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