BAM
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Sicherheit in Technik und Chemie

16.03.2017

BETRIEBSFESTIGKEIT VON IMPERFEKTEN UND REPARIERTEN ROTORBLÄTTERN

OFFSHORETAGE 15.03 - 16.03.2017, Heiligendamm

Volker Trappe, Dustin Nielow

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)

Gliederung

- BAM-5.3 – Tätigkeitsspektrum
- Vom Bauteil zum Schalenprüfkörper
- Betriebsfestigkeit fertigungsbedingter Imperfektionen
- Reparaturkonzepte und Betriebsfestigkeit
- Zusammenfassung / Danksagung

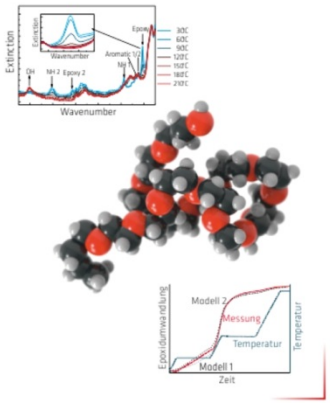
Abteilung 5 - Werkstofftechnik

Fachbereich 5.3 - Mechanik der Polymerwerkstoffe

skalenübergreifende Forschung

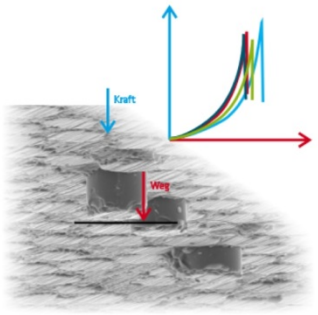
Polymeranalytik Thermische Analyse

Aushärtungskinetik



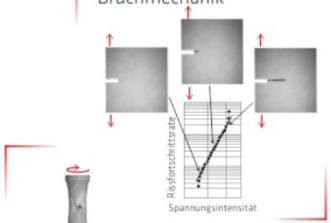
Mikromechanik

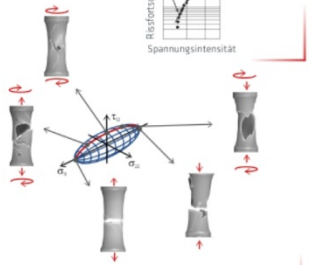
Einzelfaserexperimente



Werkstoffkennwerte

Bruchmechanik

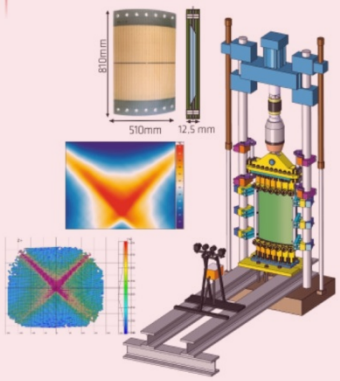




multiaxiale Charakterisierung

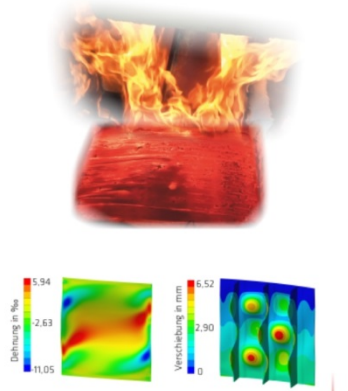
Betriebsfestigkeit

Komponentenversuche



Strukturintegrität unter Extrembeanspruchung

Bauteilversuche

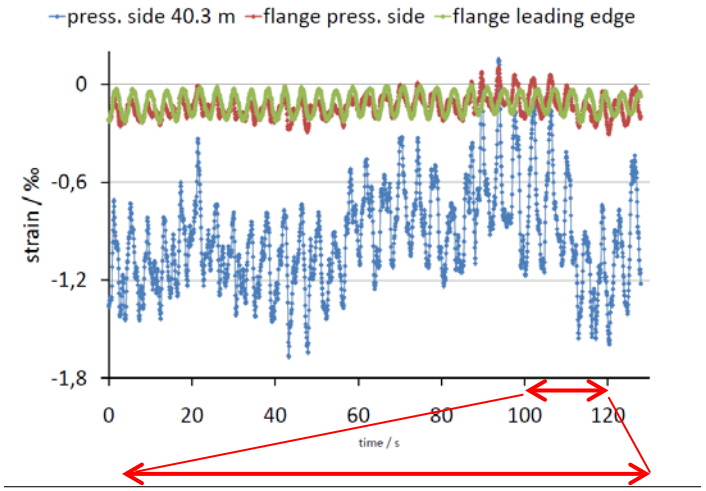


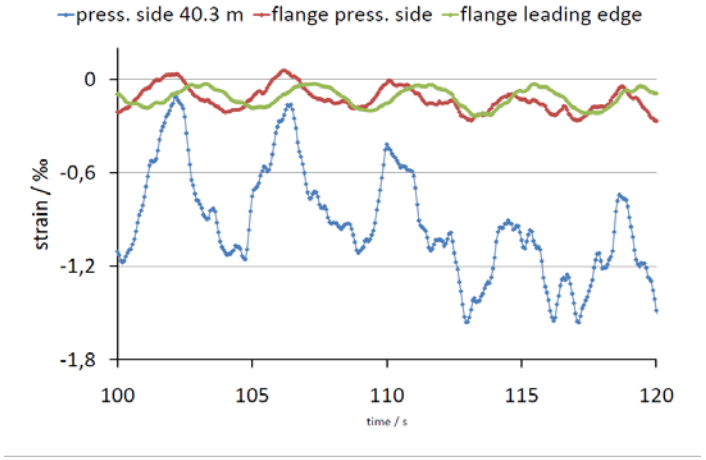
10^{-9} 10^{-6} 10^{-3} 10^{1}

Vom Bauteil zum Schalenprüfkörper

SHM M5000 – FBG-Dehnungsmessung

IMO-Wind-Projekt 2005-2010

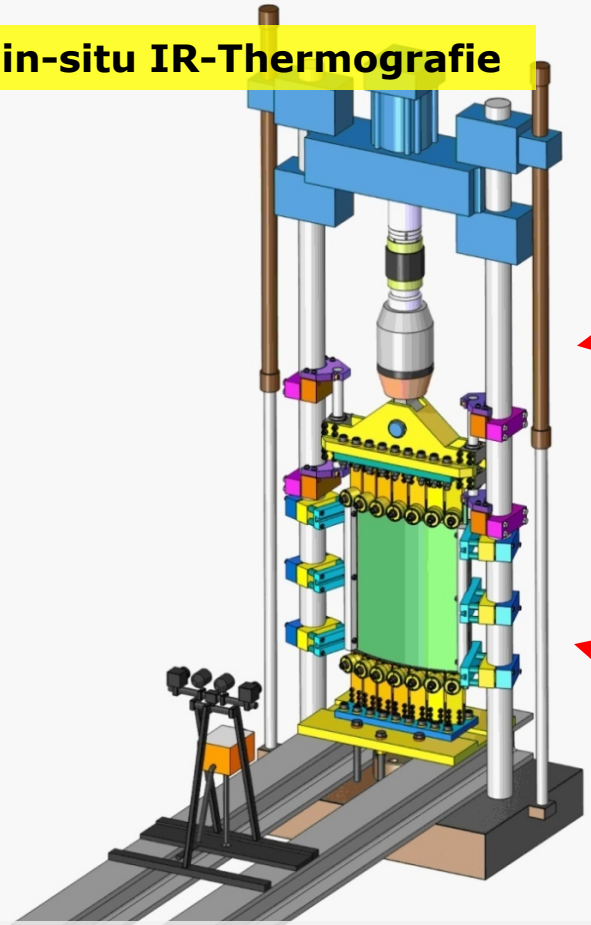




- Dehnungsmessung mit Struktur-integrierten (Glas)-Faser-Bragg-Gitter-Sensoren
- Schlaglast – statistische Windlasten
- Schwenklast – quasi Einstufenbelastung
- Dehnungen am Blattfuß ca. ¼ des 40m-Radius
- CFK: ε=0,1% (0,25%) ; GFK: ε=0,2% (0,5%)

Vom Bauteilversuch zur FKV-Schalenprüfung

in-situ IR-Thermografie

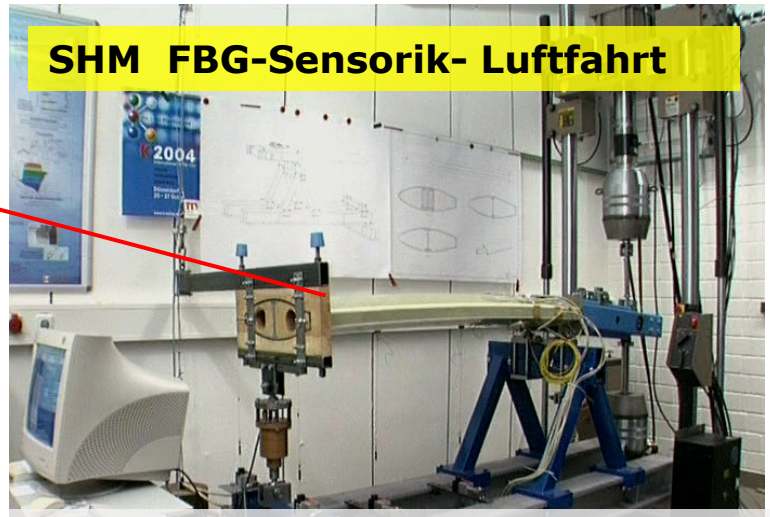


BMU-Forschungsvorhaben ZfP an FKV-Schalenstrukturen- „Bladetester" 2011-2015

SHM FBG-Sensorik - Windkraft

BMWi-Forschungsvorhaben „IMO-Wind" (2005 – 2010)

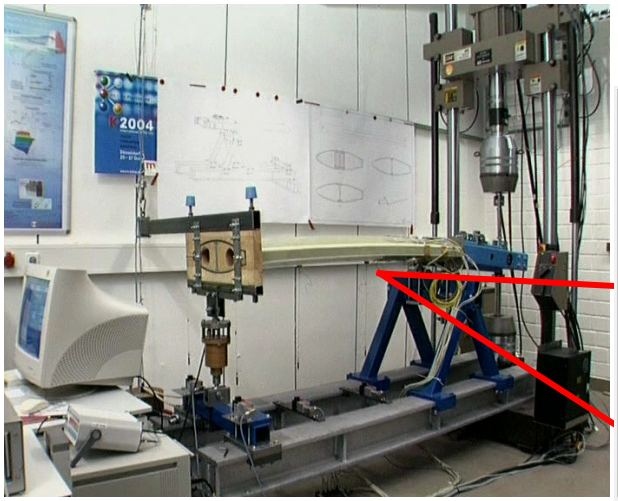
SHM FBG-Sensorik- Luftfahrt

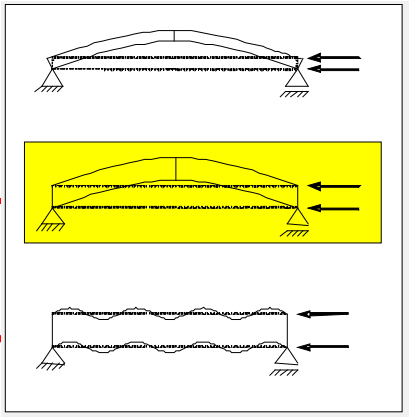


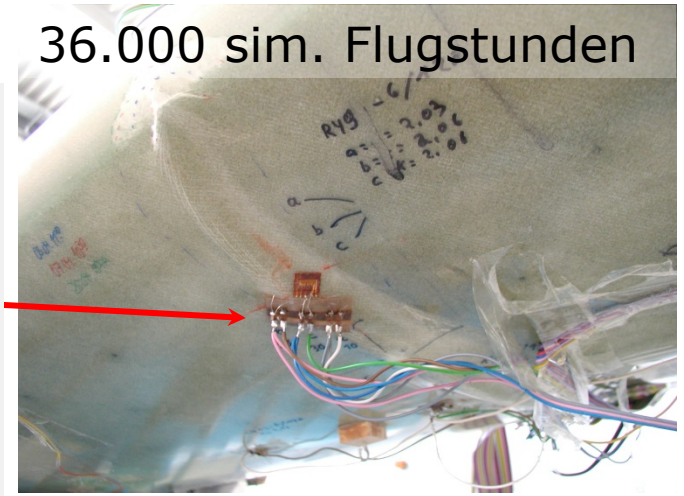
BMV-Forschungsvorhaben „CS22; CS23 – Lebensdauererhöhung" (2004 - 2007)

Simulierte Betriebsbeanspruchung an repräsentativem Bauteil (2006)

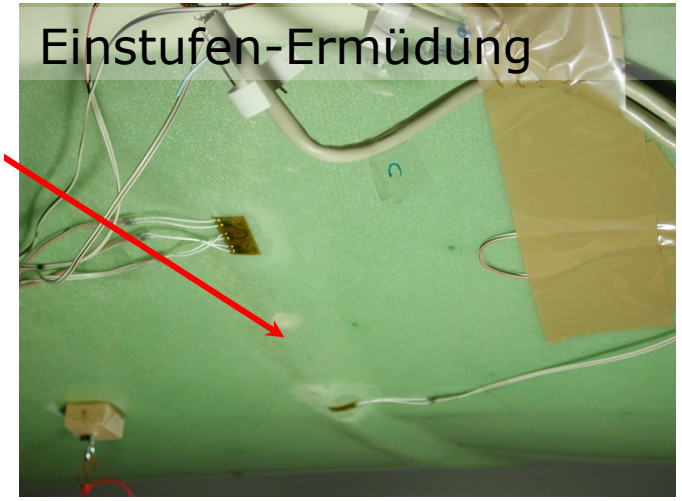
Kernschubbeulen am FKV-Sandwich



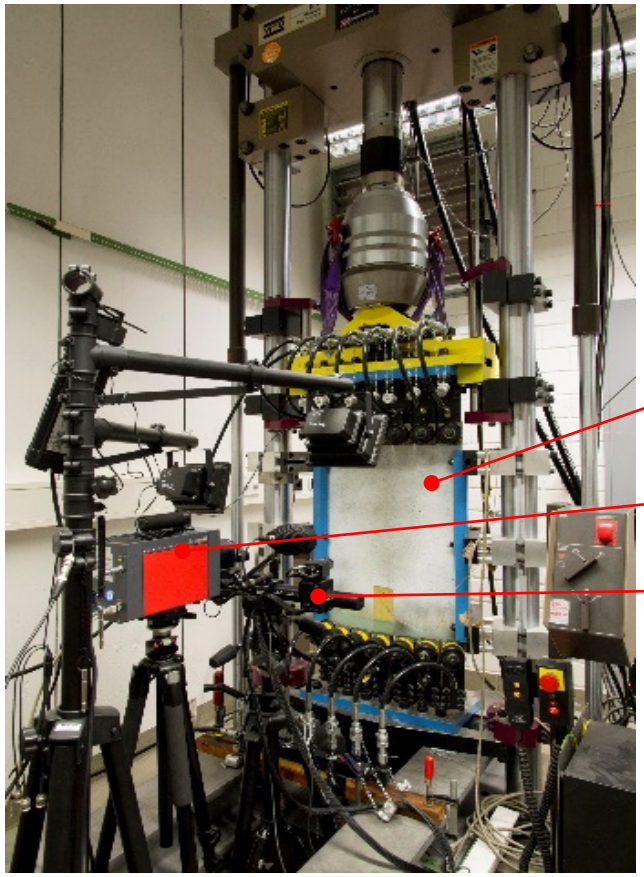




- Kernschubbeulen ist der kritischste Lastfall für Versagen der Sandwich-Schalen-strukturen von Rotorblättern und Leichtflugzeug-Flügeln.
- Diese Versagensform kann experimentell für statische (s.u.) und schwingende Beanspruchung nachgewiesen werden.



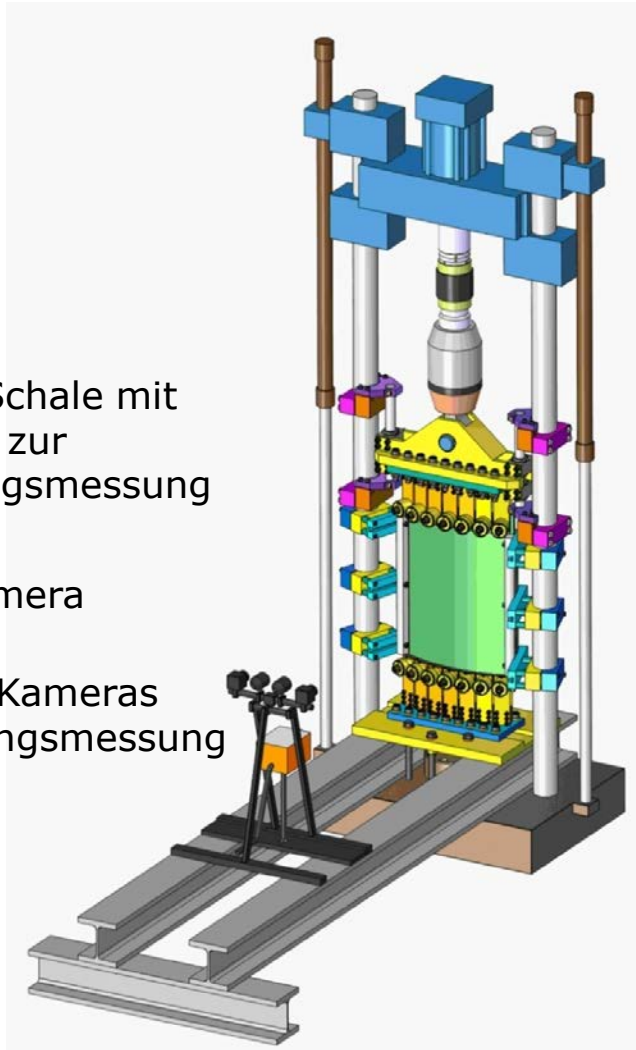
BAM-5.3 Schalenprüfstand mit ZfP



Sandwich-Schale mit Markierung zur Felddehnungsmessung

Thermo-Kamera

GOM-ARAMIS Kameras zur Felddehnungsmessung

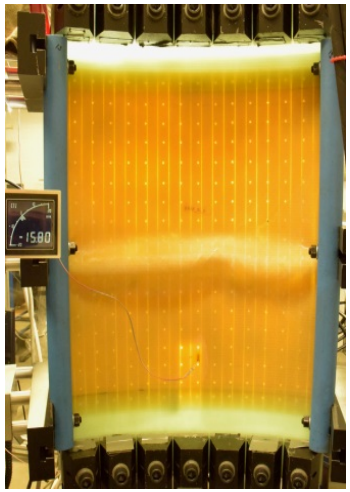


- Prüfstand +/-500kN; ZfP mit Thermographie; Felddehnungsmessung in-situ

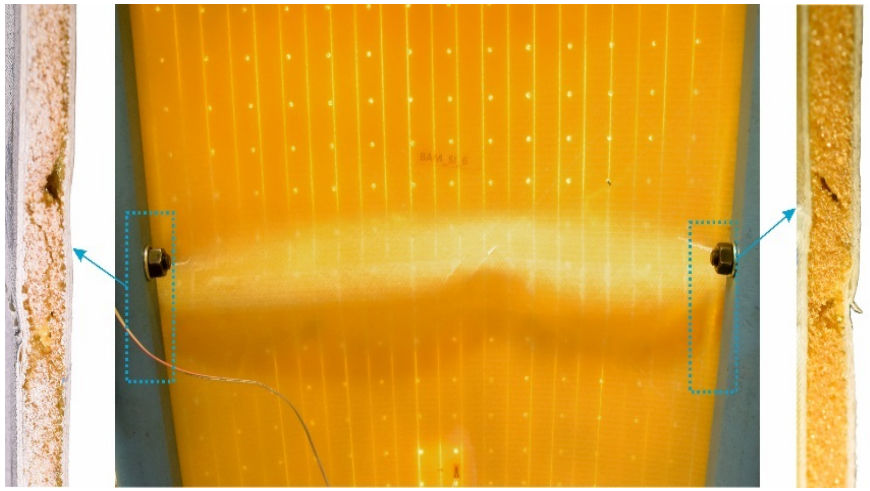
Statischer Test – Kernschubbeulen bei 149 kN

- Druckversuch Referenzprüfkörper ohne Imperfektion

Vorderseite nach Versagen



Rückseite nach Versagen



Rückseite und die beiden Seitenflächen nach Versagen

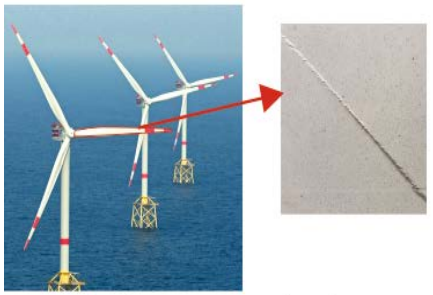
- Schlagartiges Versagen bei ca. -150 kN und 1,3 % Dehnung
- Beulen der Hautlagen an Vorder- und Rückseite

Betriebsfestigkeit fertigungsbedingter Imperfektionen

Motivation

- während des Betriebes von Windkraftanlagen bilden sich häufig Risse in der Blattschale nach 4-5 Jahren
- durch Witterungseinflüsse kommt es meist zum Schadenfortschritt
- Hypothese: 70% - 80% der Schäden sind die Folge von fertigungsbedingte Imperfektionen

Nicht erkannte Imperfektionen



frühzeitige Schäden

- Folgen: Stillstand der Anlage und kostenintensive Reparaturen an der Anlage

kostenintensive Reparaturen

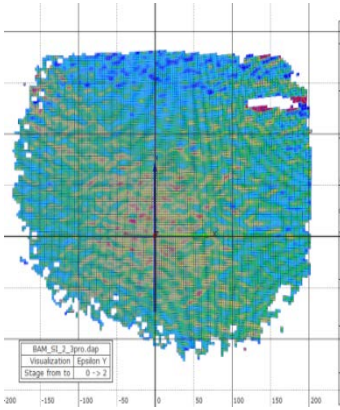
Schwingversuch

Referenzprüfkörper ohne Imperfektion

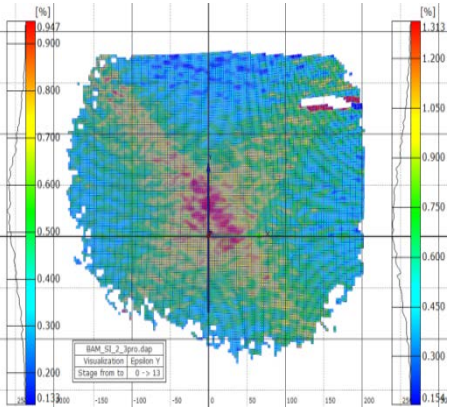
Mehrstufen-Schwingversuch, R=-1:

- 2 ‰ (35kN) $1*10^7$ LW deutliche Schädigung im Laminat, aber kein Versagen – Sandwichschale technisch dauerfest bei Nenn-Last-Niveau
- 3 ‰ (49kN) Versagen nach 11500 LW
- ZfP zeigt, dass der Schaden von der Plattenmitte nach außen wächst

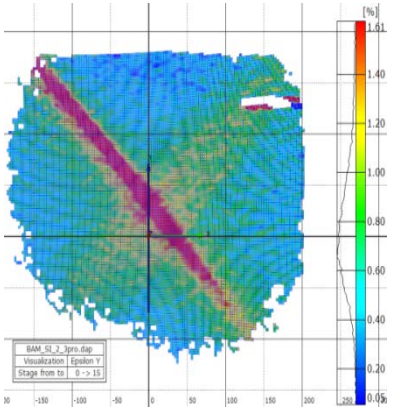
Nach $1*10^7$ CY



Dehnungsfeld, ARAMIS
Versuch 3 ‰, 1000 LW



Dehnungsfeld, ARAMIS
Nach 9000 Lastwechsel



Dehnungsfeld, ARAMIS
11000 Lastwechsel

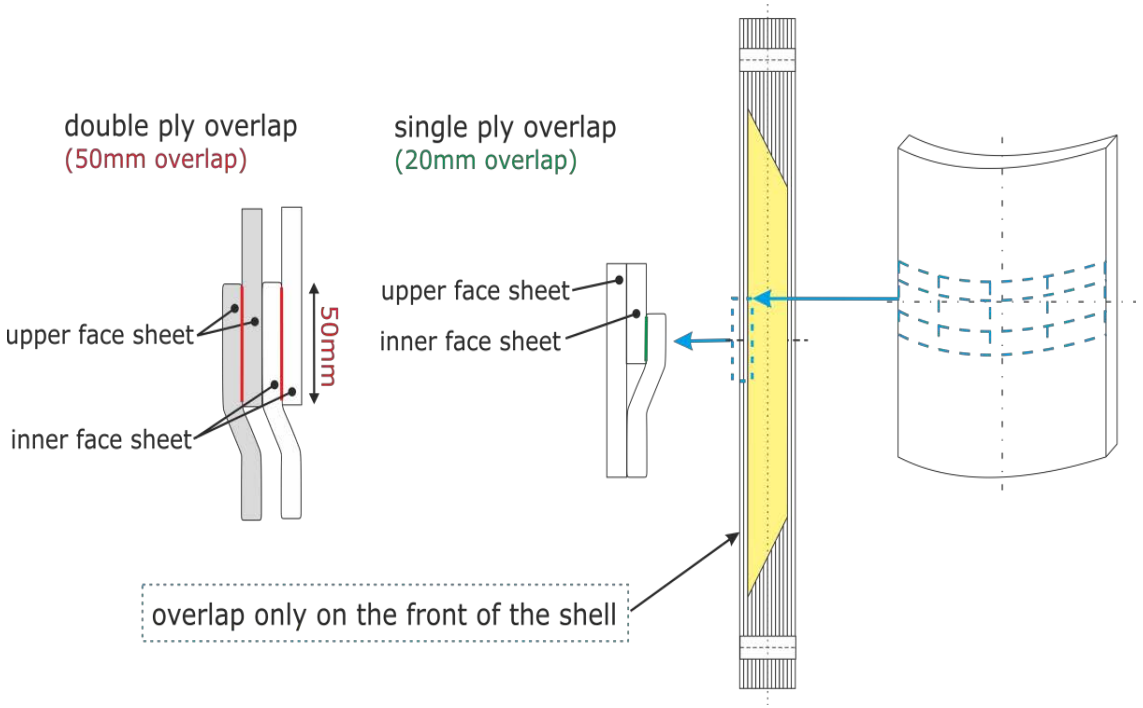
Nach Versagen

Der Schalenprüfkörper - Imperfektionen

Beispiel Lagenstöße/Überlappung der Decklagen:

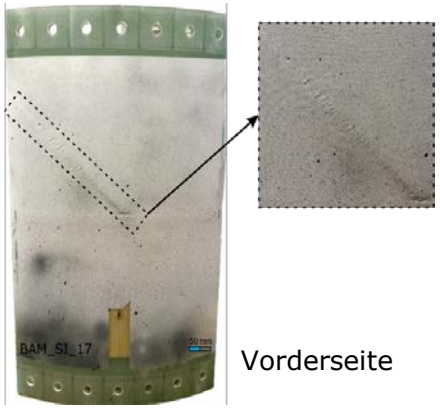
- Um die gesamte Rotorblattlänge belegen zu können müssen die textilen Halbzeuge häufig überlappt werden

Kurzer Lagenstoß, während der Belegung des Werkzeuges

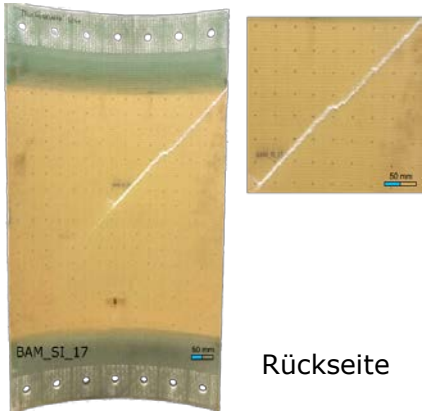


Schwingversuch mit Lagenstoß

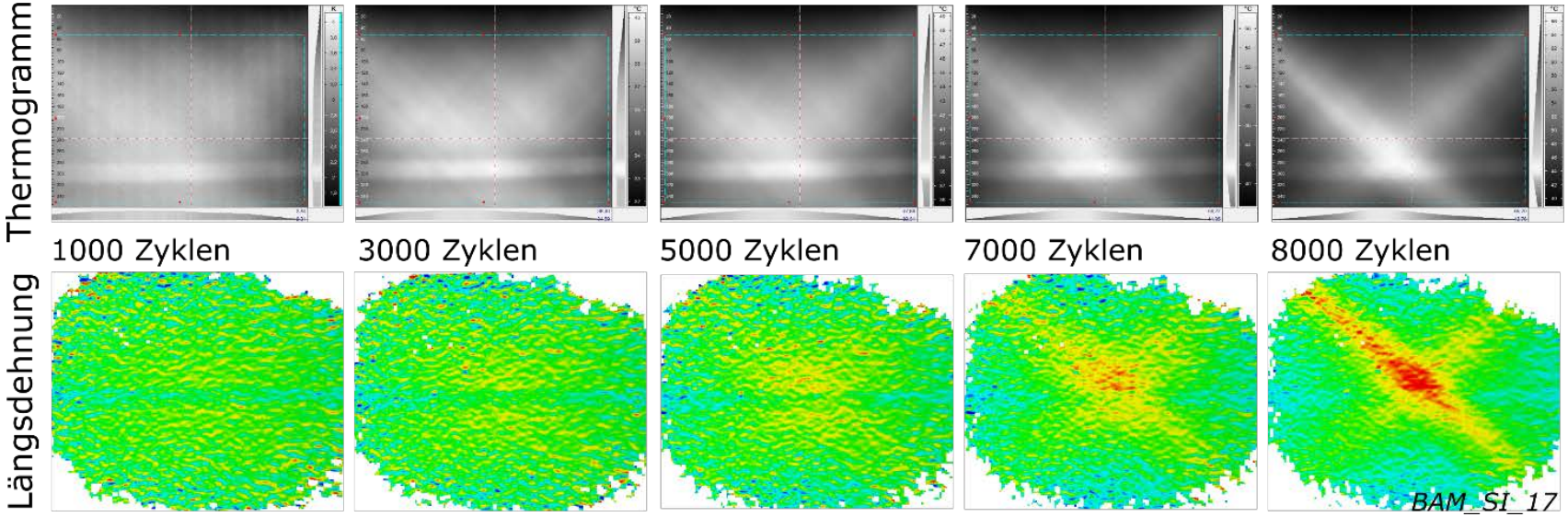
einfacher Lagenstoß
Einstufen-Schwingversuch bei 3 ‰
Versagen nach 8000 Lastwechseln



Vorderseite



Rückseite



Zusammenfassung – Imperfektionen

- Mit den Schwingversuchen mit der integrierten Zustandsüberwachung wurde der Einfluss der verschiedenen Imperfektionen nachgewiesen.
- Die Ergebnisse müssen auf die Rotorblattdimension skaliert werden!

Rang	Imperfektion	Bemerkung
1	Kurzer Lagenstoß	besonders kritisch, schwächt die Ermüdungsfestigkeit bzw. Lebensdauer im besonderen Maße
2	7mm Schaumstoß	deutlicher Einfluss auf die Lebensdauer
	5mm Schaumstoß	
3	3mm Schaumstoß	geringer Einfluss auf die Lebensdauer
4	Doppelter Lagenstoß	kein bzw. minimaler Einfluss wirkt Stabilisierend, reduziert Beulen

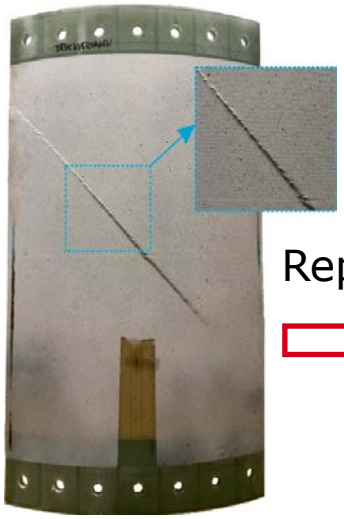
Reparaturkonzepte und Betriebsfestigkeit

BAM-Projekte LeBeWind (TF Energie), ManuFact (TF Material)

ManuFact

- Einfluss von Fertigungsfehlern auf die Betriebsfestigkeit

Schadensbild im Feld



Schaumstoß - Schaden im Labor reproduzierbar

Reparieren

Reparieren am Blatt
[flight-pictures.de]

Reparierter Schaden
[freewind-energy.de]

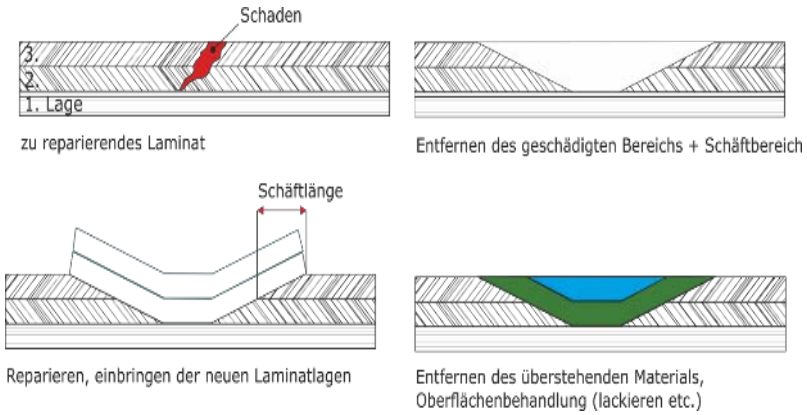
LeBeWind

- Betriebsfestigkeit von Reparaturstellen
- Bewertung von Reparaturkonzepten

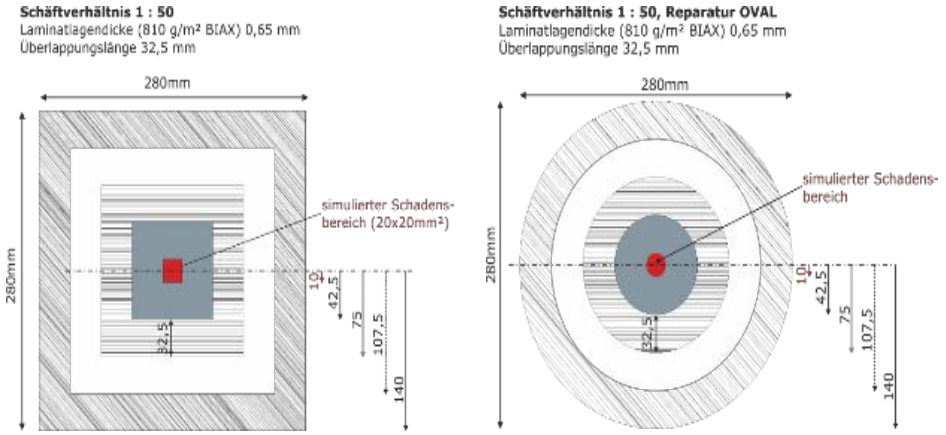
Reparatur von FKV-Sandwichschalen
Reparaturkonzepte - Allgemein

Reparaturkonzepte

- Zusammenarbeit mit externem Partner *Fa. Blade Care* (Reparaturservice Rotorblätter)
- Erarbeitung von Reparaturkonzepten und Einflussparameter auf die Qualität der Reparatur



vereinfachtes Reparaturkonzept (theoretisch-schematisch)



mögliche Ausführung der Reparaturstelle

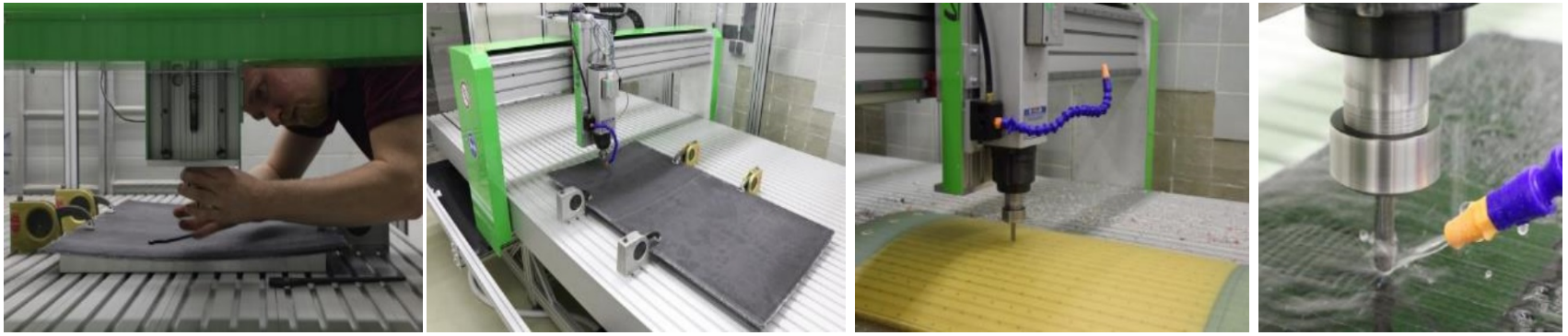
Reparatur im Labor vs. im Feld

Reparatur im Labor:

- Schäftverhältnisse können mit CNC-Fräse genau eingehalten werden
- Formgebung (rechteckiger/ovaler Grundriss) ist frei wählbar – optimale Geometrie?

Reparatur im Feld:

- Im Freien, am Rotorblatt sieht das anders aus…



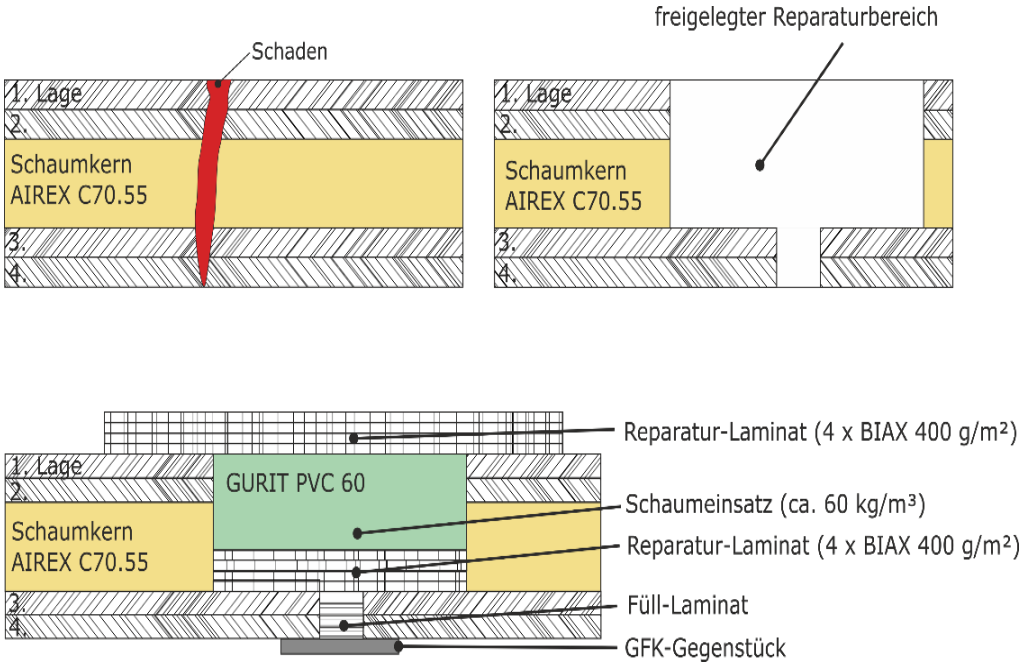
Reparatur im Labor – Reproduzierbarkeit über CNC-Technologie bei BAM-5.3

Simulierte Reparatur am Schalenprüfkörper - in Handarbeit

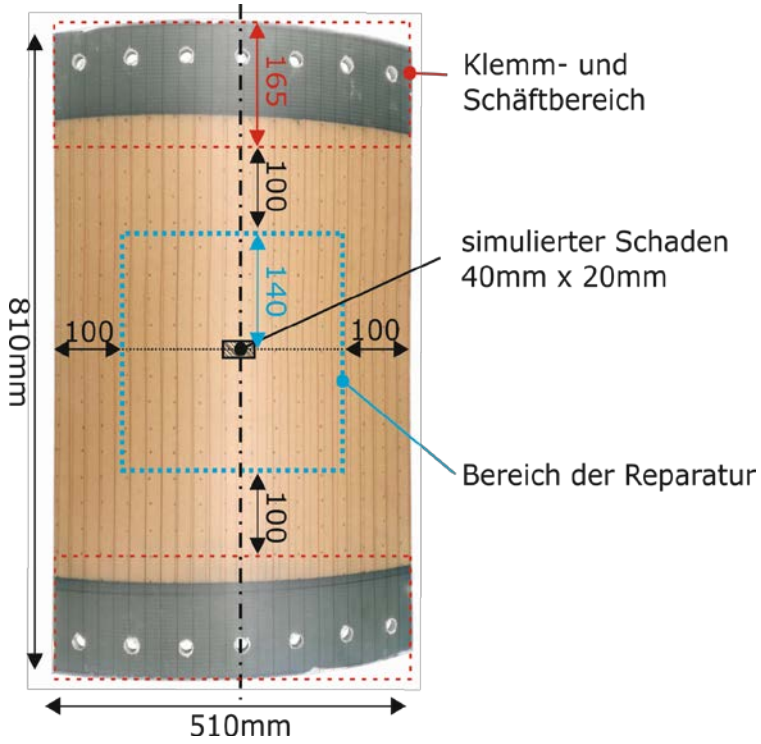
freilegen des „Schadens“ (20 mm x 50 mm) vorbereiten der Oberfläche (schleifen)

anpassen des Schaums und handlaminieren der Reparaturlagen (BIAX-Glasfasergelege)

Simulierte Reparatur am Schalenprüfkörper - schematischer Aufbau



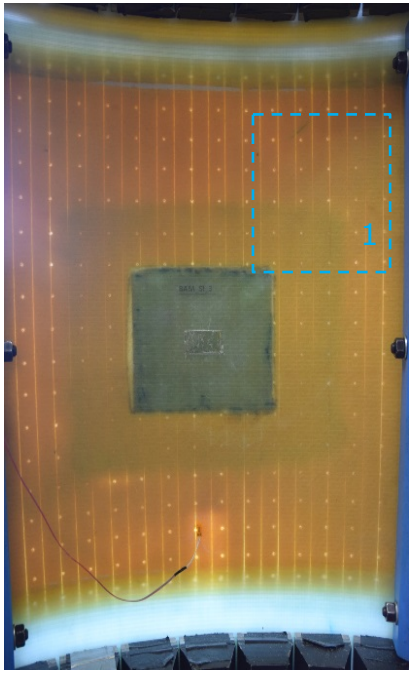
angewendetes Reparaturkonzept

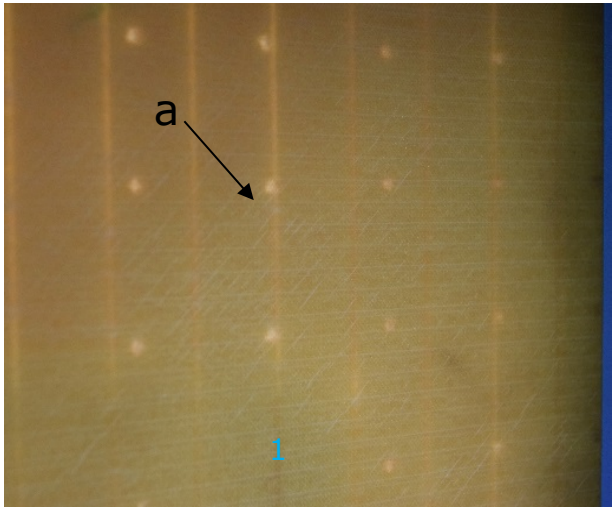


- An dünnen Deck-Laminaten ist es am Rotorblatt hängend sehr schwierig eine saubere Schäftung auszuführen. Folge – stufenweiser Ersatz der Schichten. Betriebsfestigkeit….?

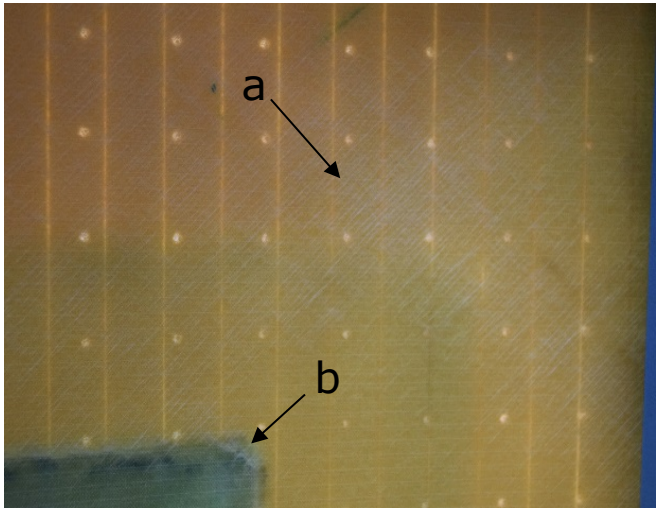
Simulierte Reparatur am Schalenprüfkörper - Befunde unter schwingender Last

- Versuch 1: 1.5 * 10^6 Lastwechsel 2 ‰ (35kN), ohne erkennbare Schädigung
- Versuch 2: ca. 1 * 10^6 Lastwechsel bei 3 ‰ (49kN) bis kein Versagen





3 ‰, 114.000 LW
erste Matrixrisse, Reparatur-bereich nicht betroffen

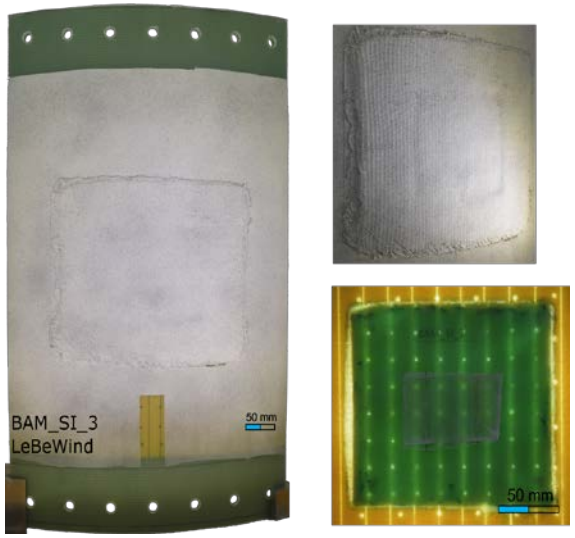


3 ‰, 334.000 LW
Zunahme der Rissdichte, Schädigung Reparaturbereich

- Bisheriger Befund: Reparaturstelle hält deutlich länger als grobe Fertigungs-Imperfektionen. Die Reparatur ist strukturmechanisch nicht perfekt!

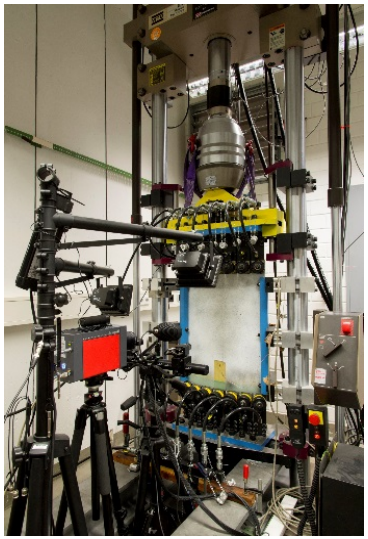
Ausblick – begleitende ZfP

ZfP - vorher

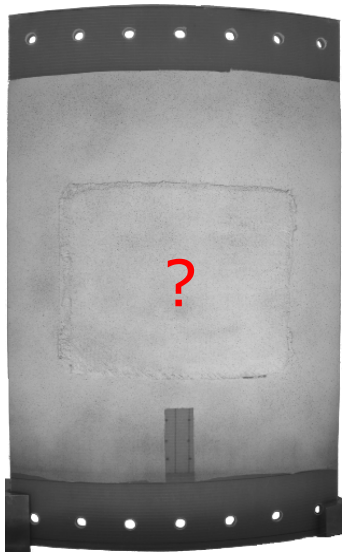


ungeschädigter Prüfkörper

Schwingversuch



ZfP - nachher



geschädigter Prüfkörper

- Versuchsbegleitend werden folgende ZfP-Untersuchungen durchgeführt: IR-Spektroskopie (aktiv, passiv), Luftultraschall, Röntgen-Laminographie
- Ergebnisse können im Rahmen dieser Präsentation nicht gezeigt werden…

Zusammenfassung / Danksagung

- ✓ Die Betriebsbeanspruchung für Rotorblätter ist aus Messungen bekannt.
- ✓ Schäden an Rotorblättern treten im Betrieb meistens an der Blattschale auf und führen zum Anlagenstillstand, wenn sie nicht repariert werden.
- ✓ Mittels FKV-Sandwich-Schalenprüfkörpern kann effizient die Betriebs-festigkeit von Imperfektionen und Reparaturstellen studiert werden.
- ✓ Fertigungsbedingte Imperfektionen (Lagenstöße, Schaumstöße) verkürzen die Lebensdauer ggf. erheblich und führen zu Reparaturen.
- ✓ Ein(e) aus-reparierte(r) Schaden/Imperfektion erträgt die Betriebs-beanspruchung deutlich besser.
- ✓ Die numerische Betriebsfestigkeitsvorhersage für FKV ist Gegenstand der Forschung. Gleiches gilt für die Abschätzung der Lebensdauerverkürzung infolge bekannter Fertigungsabweichungen.

Die Autoren danken den vielen Kollegen aus dem Hause BAM (7.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, 8.7) die an den Ergebnissen der Projekte mitgewirkt haben

und Herrn Zimmer von Fa. Blade Care für die Kooperation bei der Reparatur.

Veröffentlichungen

Trappe, V., Harbich, K.-W., Ernst, H.: „Intralaminar fatigue behaviour of carbon fibre reinforced plastics"; Int. Journal of Fatigue 28 (2006) 1187-1196

Trappe, V., Hickmann, S., Sturm, H.: „Bestimmung des Zwischenfaserbruchversagens in textilverstärktem Glasfaserkunststoff mittels der Röntgenrefrationstopografie", Materialprüfung / Materials Testing 50 (2008) 10, 615-622; Hanser;

Grasse, F., Trappe, V., Hickmann, S., Meister, O.: "Lifetime assessment for GFRP-gliders using a representative substructure", Int. Journal of Fatigue 32 (2010) 94-99

Grasse, F., Trappe, V., Thöns, S., Said, S.: "Structural health monitoring of wind turbine blades by strain measurement and vibration analysis", Beitrag zu einem Tagungsband: EURODYN 2011 - 8th International conference on structural dynamics (Proceedings) (2011) MS25 Tue, 3490-3497; Hrsg.: Katholieke Universiteit Leuven, ISBN 978-90-760-1931-4

Grasse, F.: „Beitrag zur Untersuchung des Betriebsfestigkeitsverhaltens von Rotorblättern für Windenergieanlagen im verkleinerten Maßstab", BAM-Dissertation 2014, ISBN 978-3-9815944-5-4

Trappe, V., Ortwein, H.-P. , Hickmann, S.: „INFINITE LIFE OF CFRP EVALUATED NONDESTRUCTIVELY WITH X-RAY-REFRACTION TOPOGRAPHY", Proceedings ICCM 19, Montreal, Canada 2013