

3D-Röntgenbildgebung an Rotorblättern von Windkraftanlagen

Wolfgang HOLUB, Ulf HAßLER
Fraunhofer-Entwicklungszentrum Röntgentechnik EZRT
Dr.-Mack-Straße 81, 90762 Fürth

wolfgang.holub@iis.fraunhofer.de, ulf.hassler@iis.fraunhofer.de

Kurzfassung. Windkraftanlagen bilden ein wesentliches Standbein für die Energiewende in Deutschland. Bisher stehen zur Prüfung der Rotorblätter solcher Windkraftanlagen erst wenige aussagekräftige Methoden zur Verfügung. Fehler welche genaue Kenntnis der inneren Struktur des Prüflings erfordern motivieren die Anwendung von 3D-bildgebenden Verfahren mittels Röntgentechnik. Gängige computertomographische Systeme sind auf Objektgrößen von wenigen Zentimetern im Durchmesser beschränkt. Selbst die am Entwicklungszentrum Röntgentechnik im Aufbau befindliche XXL-CT wird lediglich Objekte bis zu einem Durchmesser von etwa 3 Metern vollständig erfassen können. Rotorblätter von Windkraftanlagen jedoch haben bei Längen von bald 90 Metern im Profil Querschnitte von derzeit bis zu 2 Metern Höhe und 7 Metern Tiefe. Das Entwicklungszentrum Röntgentechnik erforscht und entwickelt die Computertomographie um deren Anwendung an solchen Rotorblättern und anderen besonders großen Bauteilen zu ermöglichen. Diese Arbeit stellt Simulationen realisierbarer laminographischer Abtast-Trajektorien zur Gewinnung dreidimensionaler Bilddaten vor und präsentiert das Ergebnis des Vergleichs mit ersten realen Messungen solcher Abtastverfahren.

1 Aufgabenstellung: ZfP der Rotorblätter von Windkraftanlagen

Während die Windkraft einen wichtigen Pfeiler der Energiewende in Deutschland darstellt ist die Produktion der Rotorblätter von Windkraftanlagen jedoch noch vergleichsweise wenig fortgeschritten. Automatische Fertigungsanlagen zeichnen sich erst langsam für einzelne Komponenten der Blätter ab. Im Wesentlichen werden diese nach wie vor von Hand gefertigt. Die Fertigungsbedingungen, ähnlich einer Manufaktur, führen zwangsläufig zu starken Qualitätsschwankungen.

Ebenso wie die Fertigungsweise der Rotorblätter noch in ihren Anfängen steckt verhält es sich mit den anwendbaren Prüfverfahren und den Zulassungs- und Zertifizierungsverfahren. In der Fertigung wird größtenteils noch rein visuell auf Auffälligkeiten geprüft. Teils wird begonnen, objektivere technische Methoden wie Ultraschall oder die aktive Thermographie [1] einzusetzen, die jedoch jeweils nur eine begrenzte Auswahl der auftretenden Defekte an wiederum begrenzten Regionen des Bauteils feststellen können. Zur Zulassung der Blätter wird noch gänzlich auf Methoden der zerstörungsfreien Prüfung verzichtet. Hierzu werden größtenteils statische Belastungstests an einzelnen Exemplaren und zunehmend auch die Prüfung unter dynamischer Last eingesetzt — ohne jedoch klare Erkenntnisse zu den Ursachen etwaigen Versagens und der inneren Struktur der

Rotorblätter liefern zu können. An den installierten Anlagen prüfen in der Regel Industriekletterer durch Perkussionstests, indem sie sich frei am Blatt abseilen und akustisch Klopfgeräusche am Blatt bewerten. Die rasch steigende Größe der Objekte, verbunden mit wachsenden Anforderungen an eine effiziente Produktion und deren Zuverlässigkeit – insbesondere für den Offshore-Einsatz – bedürfen weiter reichender Möglichkeiten zur Qualitätssicherung, zur Prüfung und zur Inspektion als sie derzeit verfügbar sind. Kritische Defekte an den verwendeten Leichtbauwerkstoffen liegen dabei oft in der inneren Struktur der Blätter und sind visuell gar nicht und mittels Ultraschall oder Thermographie nur in begrenzten Tiefen und mit eingeschränkter Aussagekraft darstellbar.

Das Fraunhofer Entwicklungszentrum Röntgentechnik betreibt derzeit mit deren XXL-CT Testhalle die weltweit größte Einrichtung zur Computertomographie. In dieser Einrichtung können mittels der Röntgenstrahlung eines Linearbeschleunigers massive Bauteile stark absorbierender Materialien durchdrungen werden. Die Anlage erlaubt 3D-CTs von Objekten bis etwa 3 m Durchmesser und dabei etwa 5 m Länge zu erfassen. Damit können ganze PKW oder Seefracht-Container vollständig dreidimensional abgebildet und untersucht werden. Trotzdem können selbst in dieser Einrichtung nicht mehr als einzelne Segmente von Rotorblättern aufgenommen werden. Wir erforschen deshalb Systeme und Methoden, welche die präzise, dreidimensionale Darstellung der inneren Strukturen, Auffälligkeiten und Defekte an Rotorblättern in Forschung, Entwicklung und Fertigung sowie an der installierten Anlage erlauben.

2 Rotorblätter

Die Rotorblätter von Windkraftanlagen sind die wesentlichen Bauteile, die die Kraft des Windes in eine technisch nutzbare Bewegung der Anlage umwandeln. Die größten seriengefertigten Exemplare erreichen derzeit Längen von bis zu 75 m und wiegen jeweils etwa 25 t. Im Verlauf des Blattes erreicht der Querschnitt Ausmaße von bis zu circa $2\text{ m} \cdot 7\text{ m}$ [Bild 1]. Derweil existieren bereits Prototypen mit bis zu 90 m Blattlänge und Exemplare über 100 m Länge werden angekündigt. Dabei dreht sich der Rotor einer Windenergieanlage je nach Bauart und Einsatzgebiet bis zu 20 mal pro Minute. Die Blattspitzen erreichen so Umfangsgeschwindigkeiten von einigen hundert Kilometern pro Stunde.

Die Blätter sind in Leichtbau, meist in Halbschalenbauweise gefertigt. Besonders kritisch sind dabei die Last tragenden Strukturen, die Gurte aus unidirektionalem

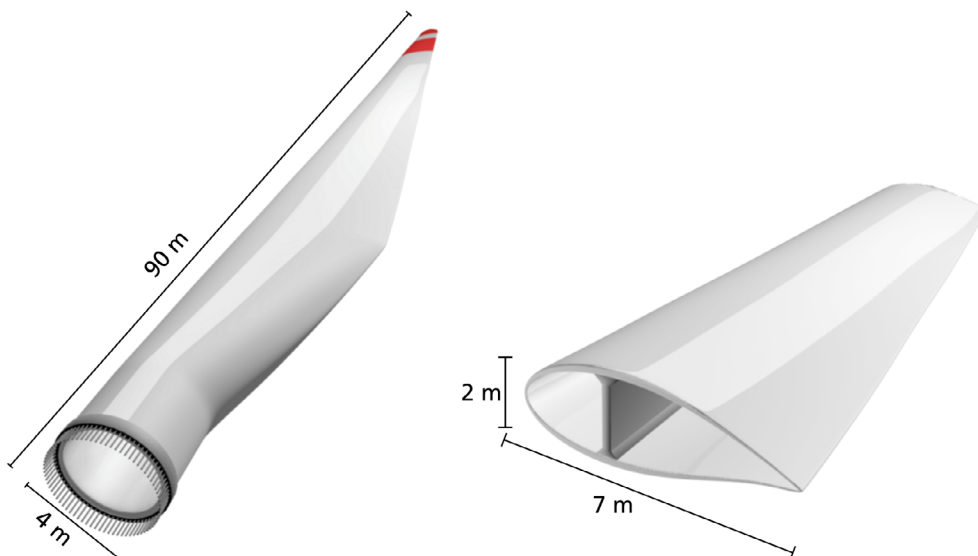


Bild 1. Form und Dimension von Rotorblättern

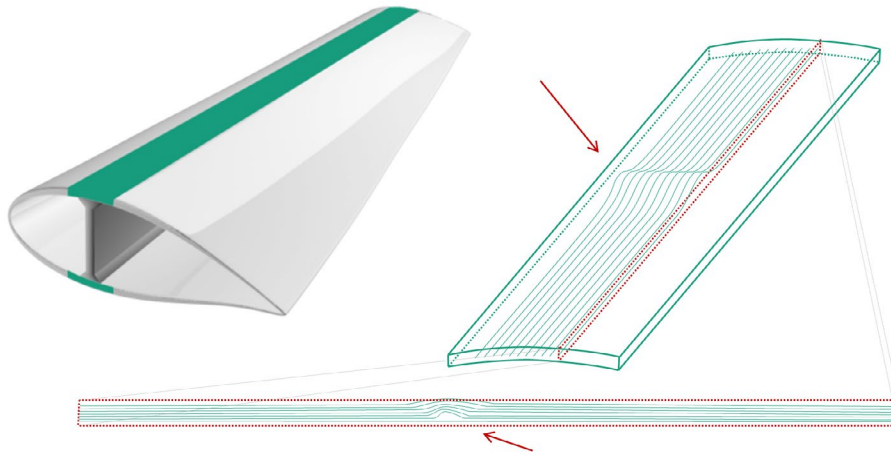


Bild 2. Schemata der GFRP-Gurte von Rotorblättern und Ondulation darin

Glasfasermaterial, die die enormen Fliehkräfte tragen sowie die Verklebungen an Vorder- und Hinterkante der Blätter und zwischen den Blathälften und einem oder mehreren Stegen im Inneren. Wir konzentrieren uns hier auf die Gurtbereiche [Bild 2] der Blätter. Die Gurte sind meist halbmeterbreite Bahnen unidirektionaler GFRP-Lagen, die der Länge nach von der Blattwurzel zur Spitze in die Halbschale eingelegt sind. Eine kritische, und zugleich bisher kaum detektierbare Klasse an Fehlern in diesen Gurten sind Ondulationen [Bild 2] im Verlauf der Rovings, der einzelnen Glasfaserbündel. Ondulationen sind Wellen oder Aufwerfungen der Fasern im Komposit, die bereits durch geringe Unachtsamkeit in der Herstellung entstehen. Diese führen jedoch zu enormen Einbußen in der Belastbarkeit des Materials. Insbesondere Zugbelastung führt anschaulich dazu, dass diese Kraft bei einer ausgeprägten Ondulation von der Matrix getragen werden muss – anstatt wie beabsichtigt von den Fasern.

3 Computertomographie im Labormaßstab

Das verwendete Material aus Glasfaserverstärktem Kunststoff und die Art der kritischen Fehler, die an der Oberfläche nicht sichtbar sind wirken prädestiniert für die zerstörungsfreie Prüfung mittels Röntgenbildgebung. Die beiden Phasen des Komposits ergeben für Röntgenlicht einen deutlichen Kontrast. Somit sind prinzipiell hochaufgelöste Computertomographien möglich. Im Labormaßstab wurden am Fraunhofer EZRT

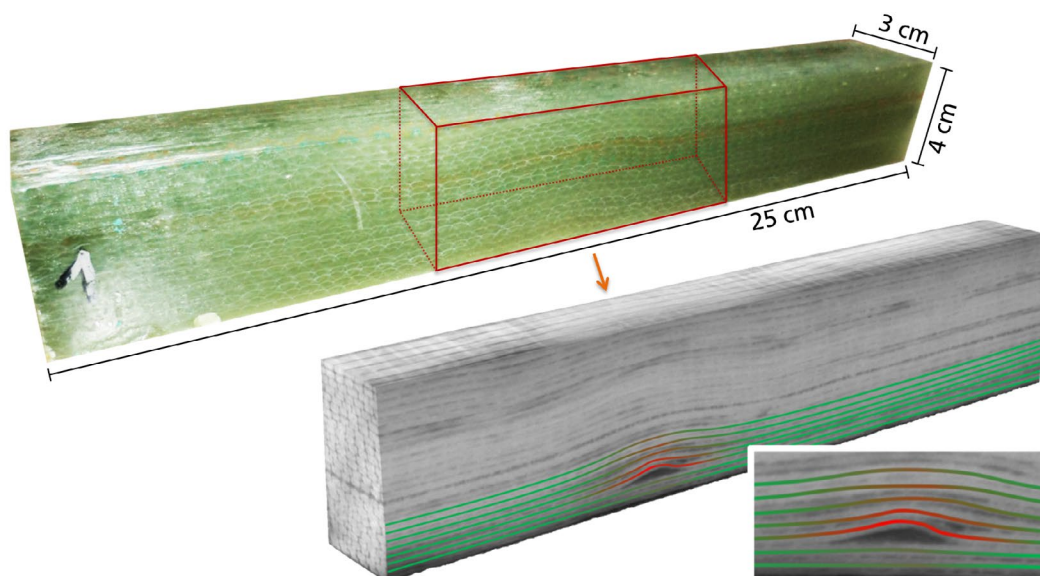


Bild 3. Probenausschnitt und Computertomographie mit ausgewerteter Ondulation

ausschnittsweise Proben von circa $25 \cdot 4 \cdot 3 \text{ cm}^3$ [Bild 3] untersucht. Der klare Bildkontrast erlaubt bereits bei vergleichsweise niedrigen Auflösungen (hier: circa $140 \mu\text{m}$ Voxelabstand) die Auswertung der gefundenen Ondulationen hinsichtlich derer steilster Winkel oder in Länge, Breite und Höhe.

Messungen und Auswertungen im Labor zeigen die prinzipielle Anwendbarkeit der Röntgenbildgebung auch zur Detektion und Auswertung dieser ansonsten nur schwer oder gar nicht handhabbaren Fehler. Für eine tatsächlich zerstörungsfreie Prüfung der Bauteile müssen jedoch die Verfahren an Objekten angewandt werden, deren Dimensionen um mindestens zwei Größenordnungen über denen dieser Proben liegen.

4 Skalierung vom Labor zum realen Objekt: Simulation

Eine vollständige Computertomographie ganzer Rotorblätter erscheint beim heutigen Stand der Technik noch nicht möglich. Glücklicherweise jedoch befinden sich die kritischen, zu untersuchenden Bereiche eines Rotorblattes – die Gurte sowie die Verklebungen darunter – hauptsächlich an den flachen Seiten nahe der äußeren Hülle. Durch die semi-planare, also flache und nahezu ebene Form dieser Regions-of-Interest (ROIs) drängt sich anstatt einer vollständigen 3D-Computertomographie die Anwendung von Methoden der laminographischen Bildgebung auf [2]. Die Projektionsbilder für Laminographien werden nicht auf klassischen CT-Trajektorien rund um das Objekt aufgenommen und bieten somit keinen mathematisch vollständigen Datensatz für die 3D-Rekonstruktion. Nichtsdestotrotz lassen sich aus solchen Laminographien verschiedene Schichten aus dem Objekt parallel zur Oberfläche rekonstruieren. Die fehlende Information spiegelt sich in Form von begrenzter Tiefeninformation und damit je nach Art der Trajektorie in unterschiedlichen Artefakten wieder [3].

Wir verwenden ein grobes Computermodell [Bild 4] eines Rotorblattes zur Simulation verschiedener Trajektorien und Aufnahmeszenarien, um die Prüfmöglichkeiten an diesen sehr großen Objekten vorab zu untersuchen. Zur Vereinfachung und Reduktion der Simulationszeit sind im Modell die meisten Blattregionen aus homogenem Mischmaterial konstruiert. In den ROIs, insbesondere im Gurtbereich sind darüber hinaus Pakete aus einzelnen Glasfaserrovings detailliert eingebettet.

Mittels Scorpius XLab® [4] lassen sich Projektionsbilder des Modells unter verschiedenen Aufnahmeszenarien simulieren. Nachfolgend stellen wir die Ergebnisse

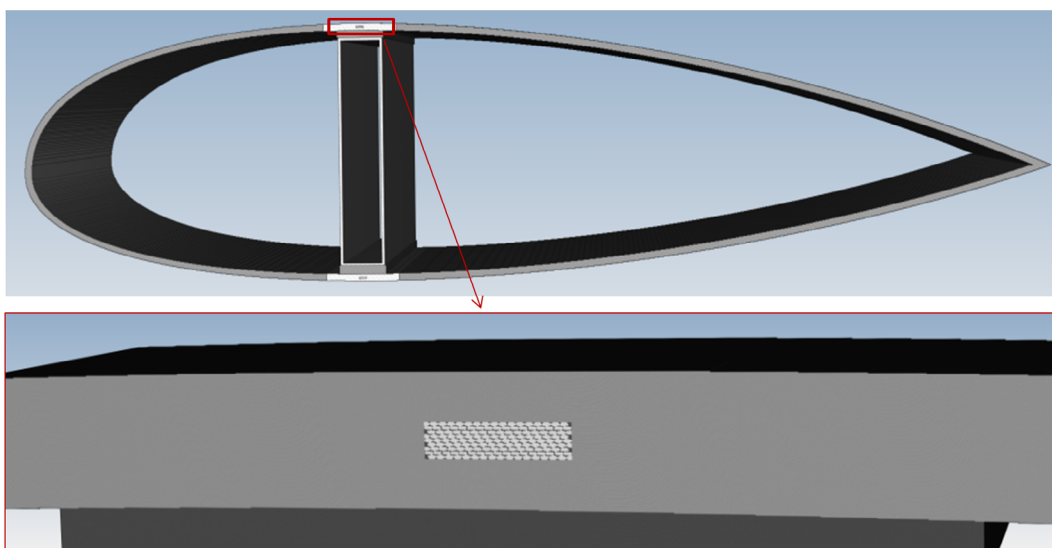


Bild 4. Computermodell eines Rotorblattabschnittes mit einzelnen GFK-Rovings im vergrößerten Ausschnitt der ROI. Modell-Dimensionen: 7 m Breite, 1,75 m Höhe

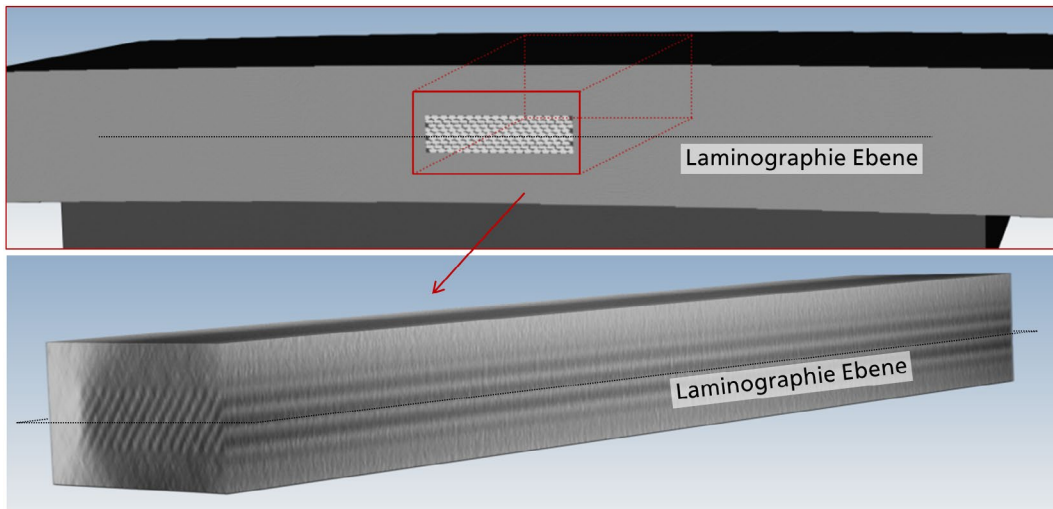


Bild 5. Rekonstruktion aus simulierten Projektionsdaten einer Tomosynthese

einer zirkulären Laminographie mit einer Trajektorie unter 40° Laminographiewinkel vor. Für die Simulation wurde versucht, das tatsächliche Anlagensetup bei Nutzung eines echten Detektors und einer echten Strahlungsquelle sowie Bildrauschen und Unschärfen möglichst realistisch nachzubilden. Die simulierten Projektionsdaten wurden mittels der Inline Tomosynthesis Library, ITL [3] zu einem 3D-Volumen rekonstruiert. Wie erwartet bietet das 3D-Bild [Bild 5] im Querschnitt der Rovings Tiefeninformation nur mit begrenzter Auflösung. Dadurch lassen sich die GFK-Rovings horizontal zwar sehr gut voneinander abgrenzen, vertikale Konturen sind dagegen kaum zu erkennen. Die horizontalen Konturen lassen den Verlauf der Rovings jedoch klar erkennen und auswerten. Damit bestätigt die Simulation die prinzipielle Machbarkeit eines Röntgen-Laminographiesystems zur zerstörungsfreien Prüfung von Rotorblättern.

5 Reale Messungen

Nachdem die simulierten Aufnahmen generell die Anwendbarkeit der Laminographie zur Darstellung von Ondulationen in den GFK-Gurten bestätigen sollen reale Messungen die simulierten Ergebnisse untermauern und weitere Erkenntnisse für relevante Aufnahmeszenarien liefern.

5.1 Anfertigung von Probekörpern

Um aussagekräftige Daten zu erzeugen wurden Platten aus unidirektionalem Glasfaserverstärktem Kunststoff mit definiert eingebrachten Ondulationen hergestellt [Bild 6]. Dazu wurden vor dem Vakuuminfusionsvorgang Dreiecksprismen mit verschiedenen

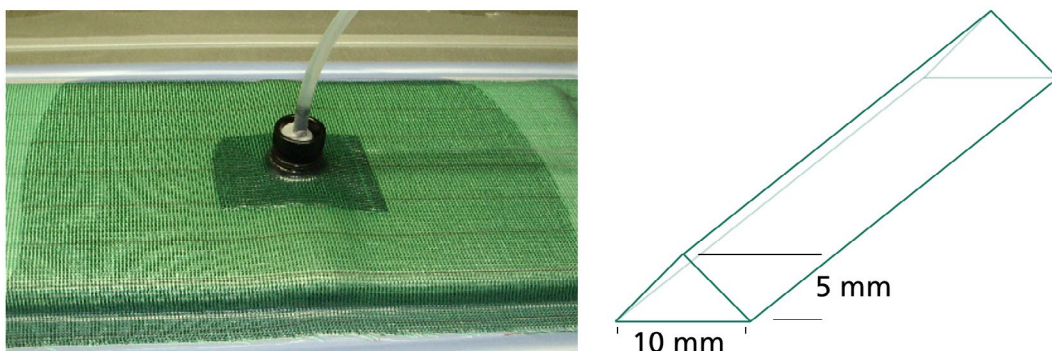


Bild 6. Vakuuminfusion einer GFK-Probekplatte und Form des eingebrachten Körpers

steilen Flanken zwischen das GFK-Material der Platten eingebracht. Diese Körper wurden zuvor aus demselben Harz gegossen, das auch zur Infusion der Platten verwendet wird.

5.2 Laminographie an den GFK-Platten

An diesen Probepplatten wurden Laminographien mit einer zirkulären Trajektorie unter 20° Laminographiewinkel vorgenommen. Die Aufnahmen entstanden aus 64 Projektionen bei einer Beschleunigungsspannung von 100 kV mit einem Voxelabstand von circa $80 \mu\text{m}$. In den rekonstruierten dreidimensionalen Bildern lassen sich in Schnitten parallel zur Laminographieebene – und damit parallel zur Oberfläche – deutlich die Rovingverläufe erkennen [Bild 7]. Außerdem sind in der Schicht durch den eingebrachten Harzkörper an diesem feine Lufteinschlüsse sichtbar. Im Bild erscheint der Bereich des Harzstabes wegen

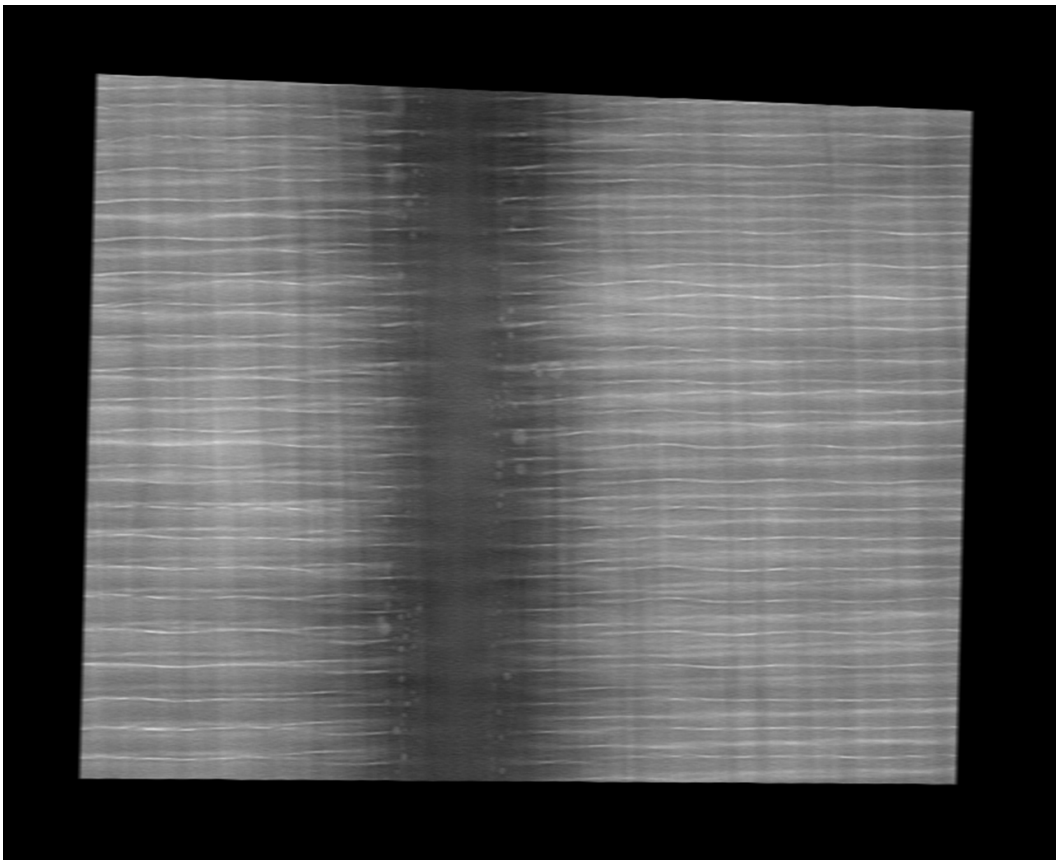


Bild 7. Laminographie-Schichtbild parallel zur Platten-Oberfläche durch die Ondulation

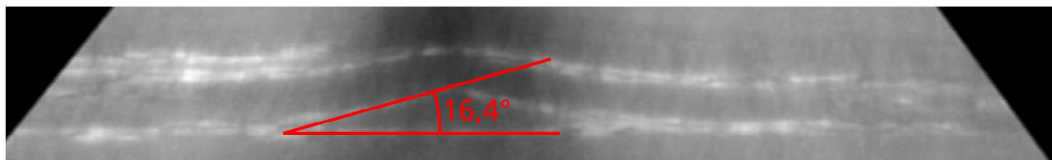


Bild 8. Laminographie-Schichtbild parallel zum Roving-Verlauf durch die Ondulation

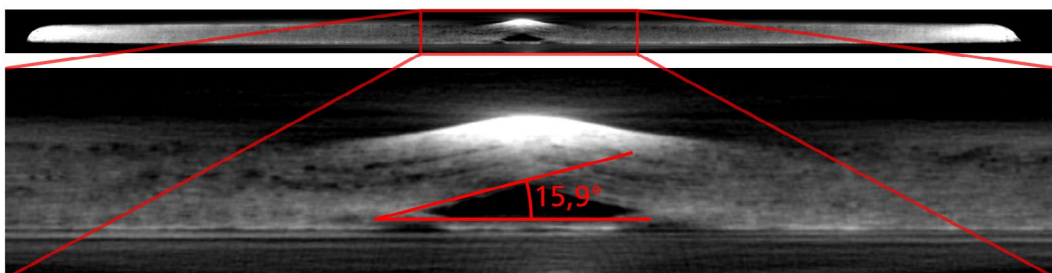


Bild 9. Computertomographie der Proben-Platte

der größeren Schwächungslängen dunkler. In der Schnittebene parallel zum Rovingverlauf und senkrecht zur Oberfläche sind die seitlichen Grenzflächen der Rovings deutlich zu erkennen und die Ondulation kann leicht vermessen werden [Bild 8]. Die auffallende Abweichung des gemessenen Winkels von circa $16,4^\circ$ gegenüber der 45° Steigung des eingebrachten Stabes lässt sich durch die glättende Wirkung der straff aufliegenden Glasfaserlage erklären.

5.3 Computertomographie zur Verifizierung

Zur Bestätigung dieser Hypothese wurde mittels Messfelderweiterung eine vollständige CT an derselben Platte aufgenommen [Bild 9]. Der in der Computertomographie gemessene Winkel der Ondulation von $15,9^\circ$ stimmt gut mit der Messung aus dem Laminographiebild überein. Die Messung bestätigt somit sowohl die Aussagekraft der Laminographie für diese Anwendung als auch die Hypothese für die Ursache des geringeren Winkels. Weiterhin fällt auf, dass die Laminographie bei lediglich 100 kV Beschleunigungsspannung ein wesentlich besseres Bild liefert als die CT trotz Einsatz einer 450 kV Röhre. Dies liegt daran, dass bei der CT trotz deutlich höheren Photonenenergien an den längsten Durchstrahlungswegen von circa 60 cm nur sehr schwache Signale zu messen sind während bei der Laminographie eine gleichmäßig kurze Durchstrahlungslänge von wenigen Zentimetern vorliegt.

5.4 XXL-CT an einem ganzen Blattsegment

Mit der Inbetriebnahme der XXL-CT Testeinrichtung am Fraunhofer EZRT sind nun erstmals vollständige CT-Scans an Objekten bis zu etwa drei Meter Durchmesser möglich. Zur Verifizierung dieser und weiterer Forschungsergebnisse am großen Bauteil folgen Messungen in dieser Einrichtung. Eine Vorschau gibt der Scan einer Schicht eines Rotorblattsegments von etwa $2 \cdot 0,75 \text{ m}^2$ Querschnitt [Bild 10]. In der Aufnahme sind sowohl die Querschnitte der GFK-Rovings als auch Lufteinschlüsse in der Verklebung zum Steg gut zu sehen. Ebenso lässt sich die Maserung des Balsaholzes erkennen, das die Hülle dieses Blattes formt.

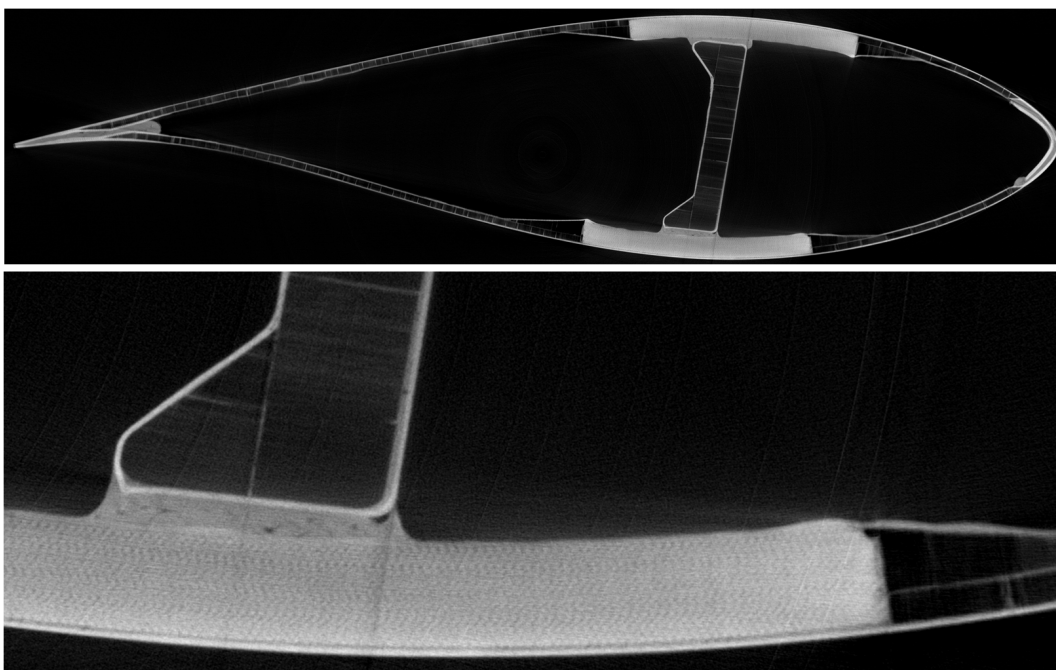


Bild 10. XXL-CT eines Blattsegments von etwa $2 \cdot 0,75 \text{ m}^2$ Querschnitt und Vergrößerung

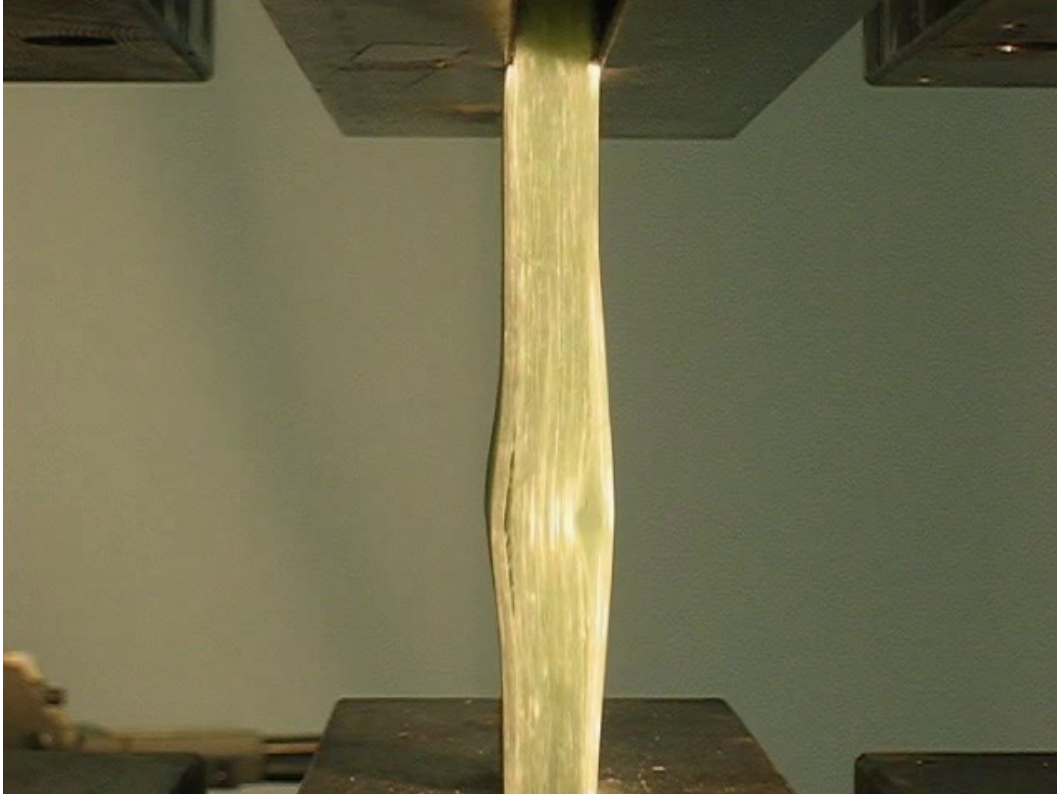


Bild 11. Zugversuch am Probestück aus einer der gefertigten Platten

6 Ausblick: Belastungstests - Effect of Defect

Im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojektes CThermoBlade des Fraunhofer EZRT mit dem Fraunhofer WKI werden die Messungen noch um Belastungstests an Ausschnitten der gefertigten Probenplatten ergänzt [Bild 11]. Aus diesen zerstörenden Tests sollen Erkenntnisse gewonnen werden um die Auswirkungen von Ondulationen verschiedener Ausprägung auf die Belastbarkeit des Bauteils bewerten zu können.

Referenzen

- [1] P. Meinschmidt, J. Aderhold: *Thermographic Inspection of Rotor Blades*, 9th European Conference on NDT 2006, Tu.1.5.3, 2006
- [2] M. Maisl, C. Schorr, F. Porsch, U. Haßler: *Computerlaminographie, Grundlagen und technische Umsetzung*, Industrielle Computertomografie Tagung 2010 - Proceedings: Zerstörungsfreie Bauteilprüfung, 3D-Materialcharakterisierung und Geometriebestimmung, Aachen: Shaker, 2010, 261-266
- [3] M. Rehak, U. Haßler: *Design von Prüfaufgaben-abhängigen Trajektorien in der Tomosynthese*, DGZfP Jahrestagung 2011 Bremen, Berlin: DGZfP, 2011
- [4] S. Reisinger, S. Kasperl, M. Franz, J. Hiller, U. Schmidt, *Simulation-Based Planning of Optimal Conditions for Industrial Computed Tomography*, International Symposium on Digital Industrial Radiology and CT 2011, DGZfP-Berichtsband BB 128-CD, Mo.3.1, 2011