

Charakterisierung einer durch Überlast geschädigten GFK-Platte mit Thermografie und Ultraschall

Rainer KRANKENHAGEN*, Manoucher DOROSHTNASIR*, Christiane MAIERHOFER*, Daniel BRACKROCK*, Gerhard BREKOW*

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Fachbereich 8.4 Akustische und elektromagnetische Verfahren
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
rainer.krankenhagen@bam.de

Kurzfassung. Eine GFK-Platte mit eingefräster Nut wurde in einem Zugversuch mit ca. 90 kN belastet, was zu einer sichtbaren Veränderung an den Seitenflächen führte. Anschließend wurde die Platte mit Ultraschall und Thermografie auf innere Schädigungen untersucht. Beide Verfahren konnten räumlich ausgedehnte Bereiche mit zahlreichen Anzeigen nachweisen, jedoch keine geschlossene Fläche. Mit UT wurden außerdem porenreiche oberflächennahe Schichten in dem Material detektiert. Diese Poren verringerten die Nachweisempfindlichkeit beider Messverfahren.

1. Einleitung

GFK (Glasfaserverstärkter Kunststoff) ist eines der am häufigsten eingesetzten Materialien in Rotorblättern von Windkraftanlagen. Auf Grund des Schichtaufbaus von GFK führt eine mechanische Überlastung zu einem teilweisen oder kompletten Haftungsverlust zwischen einzelnen Lagen (Delamination). Im Gegensatz zu homogenen Werkstoffen, die mit Rissbildung reagieren, entstehen in der Regel keine sichtbaren Veränderungen an der Oberfläche. Der zerstörungsfreie Nachweis solcher Delaminationen im Bauteilinneren ist daher eine wichtige Voraussetzung zur Beurteilung der Betriebssicherheit und der Lebensdauer von GFK-Komponenten.

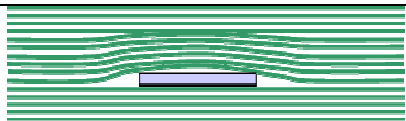

Zur Qualifizierung geeigneter Messverfahren werden Probekörper benötigt, welche solche Delaminationen in praxisrelevanter Ausprägung enthalten. Andererseits muss natürlich die Geometrie des innen liegenden Fehlers möglichst genau bekannt sein. Zur Bestimmung der exakten Fehlergröße und –ausprägung können nur zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt werden, da sonst der Probekörper nicht mehr verwendbar wäre.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Arbeiten beschäftigten sich mit der Herstellung eines solchen Probekörpers und seiner Vermessung bzw. Charakterisierung durch die zerstörungsfreien Prüfverfahren UT (Ultrasonic Testing) und TT (Thermographic Testing).

2. Probenherstellung

Ziel der Probekörperfertigung war es, eine innen liegende Delamination zu erzeugen, welche einem durch Überlastung entstandenen Defekt möglichst nahe kommt. Der einfachste Weg, Delaminationen definierter Größe in einen Verbundwerkstoff einzubringen, ist es, Folien oder Plättchen während der Fertigung zwischen die Gewebelagen einzusetzen [1]. Dieser Fremdkörper verbleibt dann innerhalb der GFK-Struktur. Es liegt auf der Hand, dass so ein künstlicher Defekt nur wenig gemeinsam hat mit einer realen Delamination. Die folgende Tabelle zeigt die wesentlichen Unterschiede.

Tabelle 1: Unterschiede zwischen künstlichen und echten Delaminationen

	Einschluss Probekörper	Delamination durch Überlastung
Aufbau Seitenansicht		
Matrix	Fehlendes Matrixvolumen	Riss im Matrixvolumen
Innere Grenzfläche	Glatt bzw. angeraut bei nicht benetztem Gewebe	Raue Bruchkante
Defektvolumen	Gefüllt mit Fremdmaterial	Sehr geringes Volumen, bei Verbindung zur Außenkante mit Luft gefüllt
Gewebelagen	Verdichtung oberhalb des Einschlusses	Unveränderte Lage

Ausgangspunkt der Probekörperfertigung war eine GFK-Platte, bestehend aus 11 Lagen Laminat Triax 1200g und einem Ampreg 26 Harz. Die Struktur wurde unter Vakuum 2 h bei 50°C getempert. Die Plattendicke betrug 9 mm. Danach wurde die Platte in mehrere Teile zertrennt.

Um eine reale Delamination zu erzeugen, wurde zunächst eine 3,5 mm tiefe und 1,5 mm breite Nut als Sollbruchstelle in die Oberfläche gefräst. Danach erfolgte das beidseitige Einbringen einer statischen Zuglast in Längsrichtung. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau und Abbildung 2 den Nut-Probekörper nach der Zugbelastung.

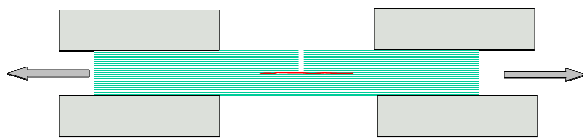


Abbildung 1. Prinzipieller Aufbau zur Zugbelastung des Nut-Probekörpers, die Pfeile zeigen die Zugrichtung an, die rote Linie markiert eine seitlich erkennbare Veränderung nach Beendigung des Versuchs

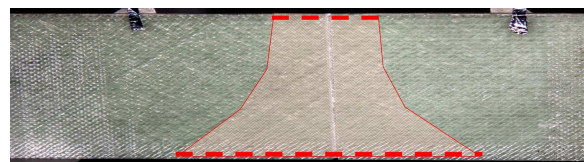


Abbildung 2. Foto des Nutprobekörpers mit senkrechter Nut in der Mitte, die roten Strichlinien zeigen die Länge der erkennbaren Veränderung an den Seitenflächen an, die rot schraffierte Fläche ist eine Hypothese über eine mögliche Ausdehnung der Delamination

Die Zugkraft wurde bis etwa 90 kN erhöht. Bei diesem Lasteintrag war ein deutliches Knacken hörbar, außerdem war an den Seitenflächen eine Veränderung im Lagengefüge mit bloßem Auge erkennbar, jedoch kein offener Bruch oder Riss. Die Länge dieser Veränderung unterschied sich stark an den beiden Seiten, was in der folgenden Abbildung 3 erkennbar ist. Die seitlich Länge dieser mutmaßlichen Delamination betrug an der oberen Seite etwa 3,2 cm, unten hingegen 9,5 cm. Basierend auf diesen Beobachtungen und dem hörbaren Befund des deutlichen Knackens ließ sich vermuten, dass sich um die Nut herum eine trapezförmige Delamination herausgebildet hatte. In Abbildung 2 ist die Lage der mutmaßlichen Delamination durch die rot schraffierte Fläche eingezeichnet worden.

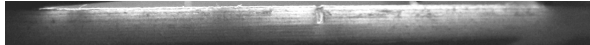


Abbildung 3a. obere Seitenansicht vom Nutprobekörper nach Zugbelastung mit seitlicher Beleuchtung, erkennbar ist die eigentliche Nut sowie eine seitlich begrenzte Front in der Ebene des Nutbodens



Abbildung 3b. untere Seitenansicht vom Nutprobekörper nach Zugbelastung mit seitlicher Beleuchtung, erkennbar ist die eigentliche Nut sowie eine seitlich begrenzte Front in der Ebene des Nutbodens

In einen anderen Teil der GFK-Platte wurden Flachlochboden-Bohrungen (FBB) mit 5 und 8 mm Durchmesser eingebracht. Die Tiefen der Bohrungen waren so bemessen, dass Restwanddicken von 2 – 7 mm entstanden. Dieser FBB-Probekörper sollte vor allem dazu dienen, die Eignung der Messverfahren für das entsprechende GFK-Material zu zeigen.

3. Thermografische Untersuchungen (TT)

Das Prinzip der aktiven Thermografie beruht darauf, die zeitliche Entwicklung der räumlichen Temperaturverteilung an der Oberfläche des Untersuchungsobjektes zu betrachten. Verdeckte Fehler unterhalb der Oberfläche können den Wärmeabfluss von der Oberfläche beeinflussen, was zu Temperaturunterschieden an einer ursprünglich homogen erwärmten Oberfläche führt. Diese sind als thermische Kontraste in einem Thermogramm erkennbar [2]. Bei den hier durchgeführten thermografischen Untersuchungen kamen ausschließlich Blitzlampen als Wärmequelle zum Einsatz. Die folgende Abbildung 4 zeigt den Versuchsaufbau. 4 Blitzlampen befanden sich in etwa 0,5 m Abstand zum Probekörper. Als IR-Kamera wurde eine ungekühlte Bolometerkamera vom Typ VarioCAM hr eingesetzt (640 x 480 Pixel, Framerate auf 10 Hz eingestellt).

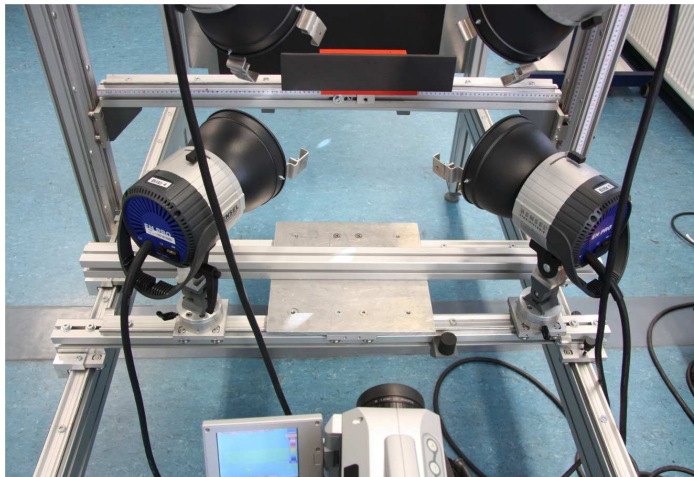


Abbildung 4. Versuchsaufbau für thermografische Untersuchungen mit 4 Blitzlampen, die IR-Kamera ist am unteren Bildrand positioniert, ein geschwärzter streifenförmiger Probekörper ist oben zwischen den 4 Blitzlampen erkennbar

Zunächst werden die Ergebnisse gezeigt, die am FBB-Probekörper im Bereich mit den 8 mm-Bohrungen gewonnen wurden. Abbildung 5 zeigt 2 Thermogramme zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem Blitz, dargestellt als Differenzthermogramm, d.h. es wird nur die Änderung gegenüber dem Ausgangszustand vor dem Blitz betrachtet.

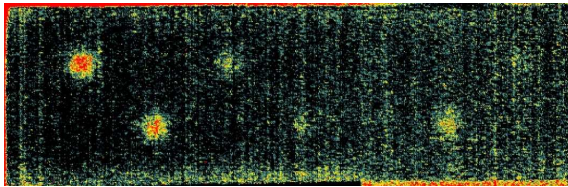


Abbildung 5a. Differenzthermogramm des FBB-Probekörpers, 45 s nach dem Blitz, (Temperaturskala 0,4 ... 0,7 K)

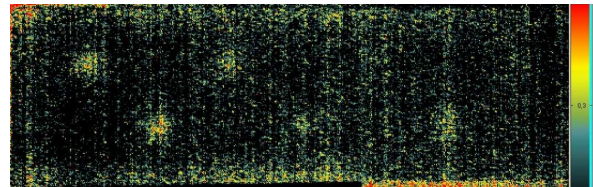


Abbildung 5b. Differenzthermogramm des FBB-Probekörpers, 70 s nach dem Blitz, (Temperaturskala 0,2 ... 0,4 K)

Nach 45 s sind bei 4 linken FBB recht deutliche Kontraste erkennbar, die dann mit zunehmender Zeitdauer schwächer werden. Nach Anwendung des PPT-Algorithmus (Puls-Phasen-Thermografie), bei dem der Zeitverlauf der Temperatur einer Fourierzerlegung unterworfen wird, kann man so genannte Phasenbilder erzeugen, welche eine kontrastreichere Darstellung und damit eine größere Tiefenreichweite ermöglichen [3]. Abbildung 6 enthält das Phasenbild zu der in Abbildung 5 gezeigten Messung, zusammen mit der Bezeichnung der jeweiligen Restwanddicken der einzelnen FBB.

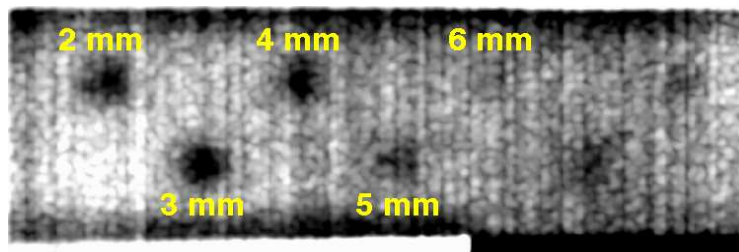


Abbildung 6. Phasenbild der Grundfrequenz, errechnet aus der Abkühlsequenz des FBB-Probekörpers nach Blitzanregung, die gelbe Beschriftung informiert über die Restwanddicke bei den jeweiligen FBB, die Nachweisgrenze für die Bohrungen mit 8mm Durchmesser lag bei dieser Messung zwischen 5 – 6 mm Tiefe

Bereits das einfache Differenzthermogramm aus Abbildung 5a weist nach, dass eine 5 mm tiefe Fehlstelle schon 45 s nach der Blitzanregung zu einer messbaren thermischen Signatur in dem verwendeten GFK-Material führte.

Basierend auf dieser Erkenntnis wurde nunmehr der Nutprobekörper untersucht. In den entsprechenden Thermogrammen, gemessen an der Rückseite ohne Nut, konnten jedoch keinerlei verwertbare Details identifiziert werden. Erst die Phasenauswertung offenbarte erkennbare Strukturen. In Abbildung 7 werden 2 Phasenbilder gezeigt, die zu verschiedenen Frequenzen bzw. Responsezeiten gehören. Die vermutete trapezförmige Delamination, wie in Abbildung 3 dargestellt, konnte nicht verifiziert werden. Es gibt keine geschlossene Fläche und keine scharf abgrenzbare Kontur, lediglich eine Häufung von Kontrasten an der unteren Kante des Probekörpers. Form und Kontur waren jedoch absolut reproduzierbar bei Wiederholungsmessungen. Auffällig ist außerdem eine um 45° gedrehte gitterartige Überstruktur in den Thermogrammen, die auch bei noch kürzeren Responsezeiten deutlich erkennbar bleibt.

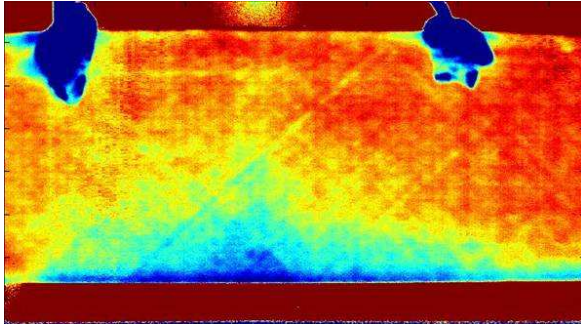


Abbildung 7a. Phasenbild der Grundfrequenz (entsprechend einer Responsezeit von 100 s), gemessen an der Rückseite des Nutprobekörpers

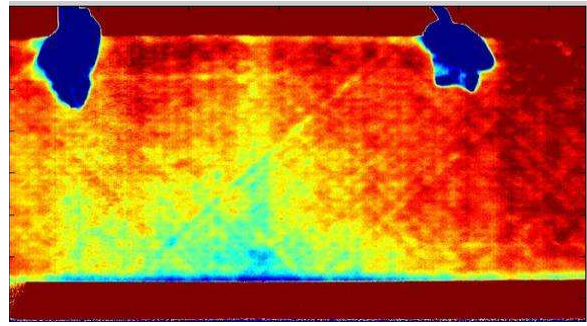


Abbildung 7b. Phasenbild der 1. Oberfrequenz (entsprechend einer Responsezeit von 50 s), gemessen an der Rückseite des Nutprobekörpers

Die thermografische Vermessung an der Vorderseite wurde zusätzlich durch die offene Nut gestört und ergab keine neuen Erkenntnisse.

4. Ultraschall-Untersuchungen (UT)

Für die Ultraschallmessungen an den GFK-Platten ist ein Messaufbau verwendet worden, wie er schematisch in Abbildung 8 dargestellt ist. Das Matrixarray wurde während der Messung auf mäanderförmigen Fahrspuren entlang der Probenoberfläche geführt. Die Ansteuerung des gesamten Matrixprüfkopfes erfolgte über das in der BAM entwickelte Phased Array Ultraschallgerät COMPAS-XL.

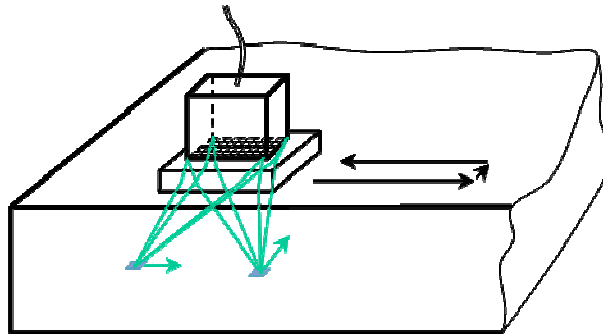


Abbildung 8. schematische Darstellung des verwendeten Messaufbaus bei den Ultraschalluntersuchungen, Matrixarray mit 6x10 Einzelköpfen wurde automatisiert mäanderförmig über die Platte geführt, Prüffrequenz 2,25 MHz, Fokussierung auf Rückwand bzw. Zieltiefe

Genau wie bei der Thermografie wurde zunächst der FBB-Probekörper untersucht, um Aussagen über die Leistungsfähigkeit der Messmethode am speziellen Material zu gewinnen. Die Ergebnisse der Messungen mit dem 2,25 MHz Matrixarray in Impuls-Echo-Technik sind in B- und C-Bildern wiedergegeben (siehe folgende Abbildungen). Hinter dem Eintrittsecho waren zunächst viele Streuanzeigen aus dem oberflächennahen Bereich zu erkennen. Während die Bohrung mit 8 mm Durchmesser in 6 mm Tiefe auch im C-Bild mit großem Signal-Rausch-Abstand detektiert werden konnte, war die entsprechende FLB in 3 mm Tiefe im C-Bild nicht mehr zu identifizieren. Nur im B-Bild konnte die FBB von den anderen Streuanzeigen unterschieden werden (siehe Abb. 9b).

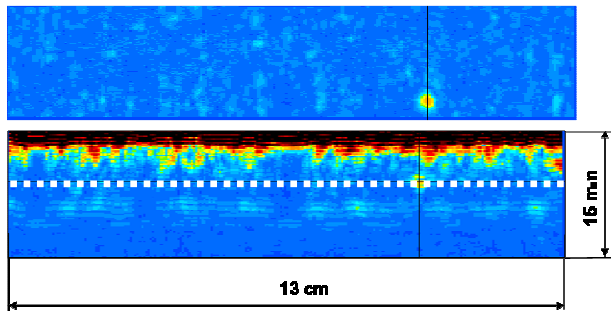


Abbildung 9a. C-Bild (oben) und B-Bild (unten) des FBB-Probekörpers mit Anzeige einer Flachbodenbohrung (8 mm Durchmesser in 6 mm Tiefe)

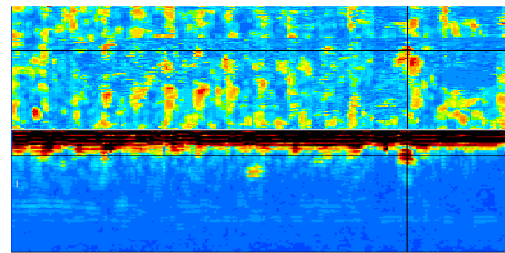


Abbildung 9b. C-Bild (oben) und B-Bild (unten) des FBB-Probekörpers mit Anzeige einer Flachbodenbohrung (8 mm Durchmesser in 3 mm Tiefe)

Nachdem die Messmethodik am FBB-Probekörper getestet worden war, erfolgte die beidseitige Vermessung des Nutprobekörpers. Die Resultate dieser Experimente sind in Abbildung 10 zusammengefasst worden. Bei der Messung von der Rückseite der GFK-Platte konnte, neben den bereits bekannten Streuanzeigen aus dem oberflächennahen Bereich, eine Lage von Anzeigen in 6 mm Tiefe detektiert werden (vergleiche Abbildung 10a B-Bild). Im C-Bild zu dieser Tiefe lässt sich das Ausmaß der Schädigungen beidseitig der Nut erkennen. Bei der Messung von der Vorderseite konnte ebenfalls eine separierte Schicht von Anzeigen erkannt werden, diesmal in einer Tiefe von 3,5 mm. Das zu dieser Tiefe passende C-Bild zeigt teilweise zusammenhängende flächige Reflektoren.

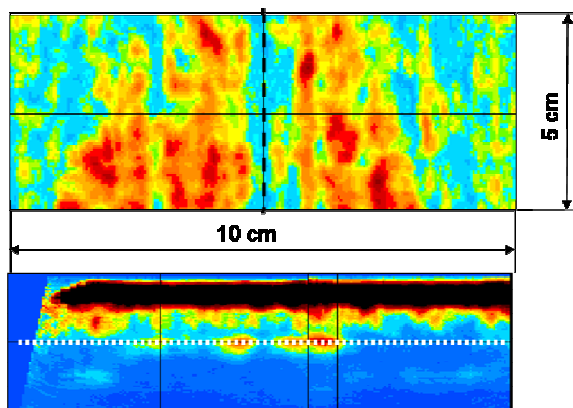


Abbildung 10a. C-Bild (oben) und B-Bild (unten) des Nut-Probekörpers, die weiße Punktlinie im B-Bild entspricht einer Tiefe von 6 mm

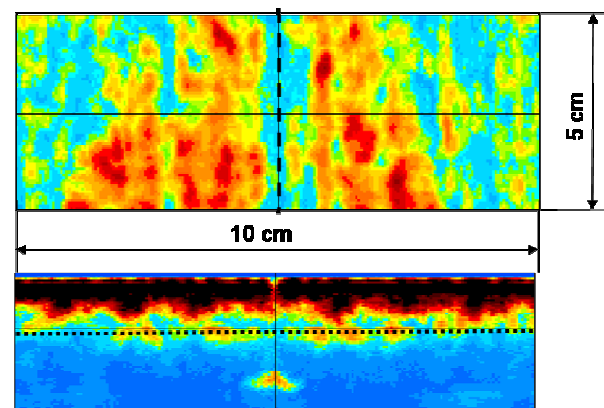


Abbildung 10b. C-Bild (oben) und B-Bild (unten) des Nut-Probekörpers, die schwarze Punktlinie im B-Bild entspricht einer Tiefe von 3,5 mm

Es sei angemerkt, dass der scheinbar reflektorfreie Bereich in der Mitte des C-Bildes daher resultiert, dass direkt oberhalb der Nut nicht gemessen werden konnte. Ebenso ist der deutliche lokalisierte Reflektor unterhalb der Nut im B-Bild ein Artefakt der Nut selbst.

5. Diskussion

Die durchgeführten Untersuchungen an dem FBB-Probekörper erbrachten den Nachweis, dass beide Messverfahren (UT und TT) in der Lage sind, FBB und damit auch Hohlräume innerhalb des GFKs in bestimmten Tiefen nachzuweisen. Mit der Blitzthermografie konnte die Bohrung mit 8 mm Durchmesser bis zu einer Tiefe von 5 mm sicher detektiert werden. Das entspricht einer Daumenregel für die Thermografie, wonach der thermografische Nachweis einer 8 mm großen Fehlstelle bis in 4 mm Tiefe problemlos möglich sein sollte

[4]. Die UT-Messung hingegen gestattete den sicheren Nachweis der Bohrung in 6 mm Tiefe. Befand sich der Boden der Bohrung in nur 3 mm Tiefe, war es jedoch schwierig, den zugehörigen Reflex in dem porenreichen Umfeld zu identifizieren. Diese experimentellen Befunde lassen sich durch porenreiche oberflächennahe Lagen innerhalb der untersuchten GFK-Platte erklären. Die folgende Abbildung 11 zeigt schematisch den Aufbau im Querschnitt.

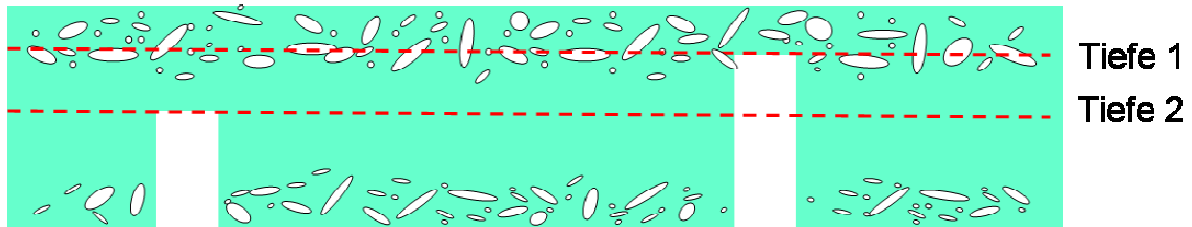


Abbildung 11. schematische Darstellung des verwendeten GFK-Materials sowie 2 FBB mit verschiedenen Tiefen

Bei Vermessung des gezeigten GFK-Blocks von oben befindet sich der Boden der rechten FBB inmitten der porenreichen oberflächennahen Schicht. Für UT bilden die größeren Poren genau den gleichen Kontrast wie ein Kreisscheibenreflektor in dieser Tiefe. Bei TT hingegen sind Poren dieser Größe offenbar nicht nachweisbar. Ursachen für die vergleichsweise geringe Empfindlichkeit der Thermografie könnten folgende Effekte sein:

1. Wärmefront umfließt die Poren (schließt sich wieder hinter der Pore)
2. Wärmeleitung durch die Pore hindurch (insbesondere, wenn es keine richtige Pore ist, sondern eher ein Miniriss im Material mit einem Rest an Flankenkontakt)

In Tiefe 2 befinden sich keine Poren mehr, hier kann der Ultraschallreflex vom Boden der FBB eindeutig identifiziert und nachgewiesen werden. TT erreicht hier seine physikalisch bedingte Nachweisgrenze.

Bei den Messungen am Nut-Probekörper musste festgestellt werden, dass keine der beiden Methoden eine geschlossene Fläche mit einer scharfen Außenkontur nachweisen konnte. Der direkte Vergleich der Thermogramme mit den C-Bildern aus den angegebenen Tiefen lässt jedoch gewisse gemeinsam Merkmale erkennen:

- Reflektierender Bereich ist an der unteren Kante deutlich breiter als oben
- Gerade Kante parallel zur Nut
- Stark gefurchte linke Außenkontur mit großen Einbuchtungen

Die mittels UT tiefenlokalisierte reflektorreiche Schicht befindet sich tatsächlich auf Höhe des Nutbodens, wie es in Abbildung 1 bereits skizziert worden war. Abbildung 12 illustriert noch einmal die geometrischen Verhältnisse:

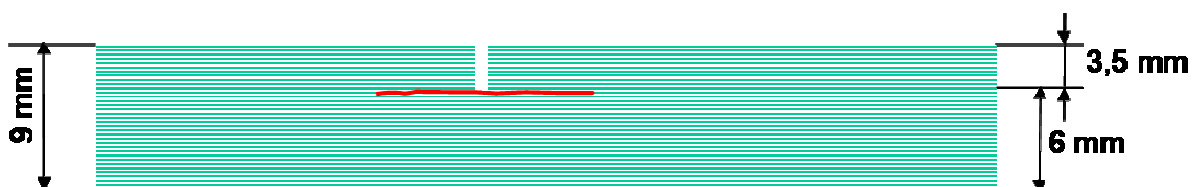


Abbildung 12. schematische Darstellung des Nut-Probekörpers, die rote Linie steht für die reflektorreiche Schicht innerhalb der GFK-Platte, die beiden Längenangaben rechts wurden aus entsprechenden B-Scans von Rückseite (6 mm) bzw. Vorderseite (3,5 mm) ermittelt

Thermografisch war eine genaue Tiefenbestimmung nicht möglich. Eine Schätzung, basierend auf der am FBB-Probekörper bestimmten thermischen Diffusivität von 0,004 cm²/s, führt zu Werten vom 5 mm bzw. 4 mm Tiefe, was zumindest in der richtigen Größenordnung liegt und auch die asymmetrische Tiefenlage wiedergibt.

6. Zusammenfassung

Es wurde der Versuch beschrieben, eine innen liegende Delamination in einer GFK-Platte durch Zugbelastung zu erzeugen. Zuvor war eine Nut als Sollbruchstelle in die Oberfläche der Platte gefräst worden. Als Ergebnis der Zugbelastung entstanden unsymmetrische sichtbare Veränderungen an den Seitenflächen der GFK-Platte. Ein aus der gleichen Platte abgeschnittenes Teilstück wurde mit Flachlochboden-Bohrungen versehen und diente als Referenz für die beiden ZiP-Methoden UT und TT.

Die UT-Untersuchungen an der Referenzprobe zeigten, dass sich im verwendeten GFK porenreiche Schichten nahe der Plattenoberfläche befinden. Die Schichten beeinflussten beide Messverfahren erheblich. Mittels UT konnte in der Ebene des Nutbodens eine auffällige Häufung an Reflektoren detektiert werden. Thermografisch waren ebenfalls zahlreiche Kontraste im entsprechenden Tiefenbereich nachweisbar. Eine geschlossene Fläche mit einer klar definierten Außenkontur konnte mit keinem der beiden Verfahren nachgewiesen werden. Ob dies ein Nebeneffekt der Poren unterhalb der Oberfläche ist oder sich die Delamination noch nicht vollständig herausgebildet hatte, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht endgültig entschieden werden. Zumindest passt das Bild einer flächigen Verteilung von zahlreichen Mikrorissen als Vorstufe einer Delamination zu den gängigen Modellvorstellungen der Versagensmechanismen in GFK [5]. Demnach wäre eine weitere Erhöhung der Zugkraft erforderlich, um die gewünschte Delamination im Nutprobekörper zu erreichen.

Danksagung

Unser Dank gilt Dr. Volker Trappe von der BAM für die Durchführung des Zugversuchs. Ein Teil der Arbeiten wurde vom BMBF im Rahmen des Förderprogramms „Validierung des Innovationspotentials“ unter dem Förderkennzeichen VIP0104/16V0135 finanziert.

Referenzen

- [1] Giorleo G., Meola C.: Comparison between pulsed and modulated thermography in glass-epoxy laminates. *NDT&E International* 35 (2002), S. 287-292
- [2] Maldague X.: *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*. Springer-Verlag London Limited 1992, S. 83-93
- [3] Maldague X., Marinetti S.: Pulse phase infrared thermography. *Journal of Applied Physics*. 1996;113: 2694-2698
- [4] Maldague X.: *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, John Wiley & Sons Inc. 2001, S. 348
- [5] Schürmann H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, S. 385 ff.