

4. Delaminationsbewertung mittels Ultraschall

4.10 Quantitative Ergebnisse

- Vergleich Ultraschall, Röntgen-CT und Lichtmikroskopie
- US-Delaminationsfaktoren gegen Kerbbiegefestigkeit

Versuchsbeschreibung

Für die Ultraschallmessungen wurde das mobile Ultraschall(US)-Prüfgerät OmniScan MX 2 der Firma Olympus eingesetzt. Zum Abscannen gebohrter Proben wurde der Phased Array Prüfkopf einerseits manuell über die Probe geführt und mittels Gel angekoppelt. Andererseits wurde ein Teil der Messungen in einer automatischen 2-Achs-Scananlage (Sonderanfertigung Fa. Olympus) im Wasserbad durchgeführt. Die Auflösung in Scanrichtung beträgt in beiden Fällen 0.1 mm. Als Scan-Richtung wurde die Richtung der Faserorientierung der Decklage, die zugleich die Vorzugsorientierung der Delamination darstellt, ausgewählt, um in dieser Richtung die höchste Auflösung bereitzustellen. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Messparameter:

Prüffrequenz: 5 MHz, Phased-Array-Prüfkopf 5L64, Pitchbreite: 0.6 mm

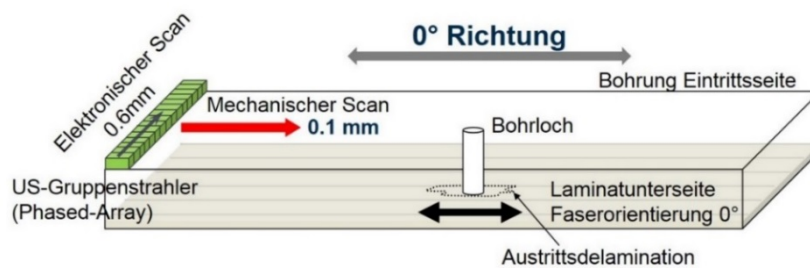


Abbildung 1: Schematische Versuchsanordnung zur Ultraschallprüfung

Versuchsbedingungen

Material:

Quasiisotropes CFK-Gelege aus HexPly® M21/T800/194 gsm [0°, 45°, 90°, -45°]3s mit Peel-Ply-Oberfläche in 4,3 mm Dicke hergestellt im Autoklavverfahren (AC-CFK).

Probenabmessung: 200 mm x 15 mm

Quantitative Beschreibung der Delaminationsschädigungen

Der durchmessergewichtete (eindimensionale) Delaminationsfaktor wurde in Anlehnung an die ursprüngliche Definition nach Chen [1] als $DF_D = \frac{D_{max} - D_0}{D_0}$ [%], berechnet. D_0 ist der nominale Durchmesser der Bohrung (5,9 mm). D_{max} ist der Durchmesser eines Kreises konzentrisch zum Bohrloch, der die maximale Ausdehnung des delaminierten Bereichs schneidet (siehe Abbildung 2). Im Ultraschall-C-Scan wurde zur Eingrenzung der Delamination der Abfall des Rückwandsignals herangezogen. Der Schwellenwert von 50 % wurde anfangs in den US-C-Scans per Hand markiert (schwarze Punkte, siehe Abbildung 2a). Für die Segmentierung der computertomographischen (CT) Messungen wurde die Software Carl Zeiss AxioVision 4.9 eingesetzt [2,3]. Für die Messungen mittels Lichtmikroskopie (LM) wurde das Zoommikroskop vom Typ Carl Zeiss AxioZoom.V16 verwendet, das mit einer Digitalkamera AxioCam 506 color ausgestattet ist [3,4].

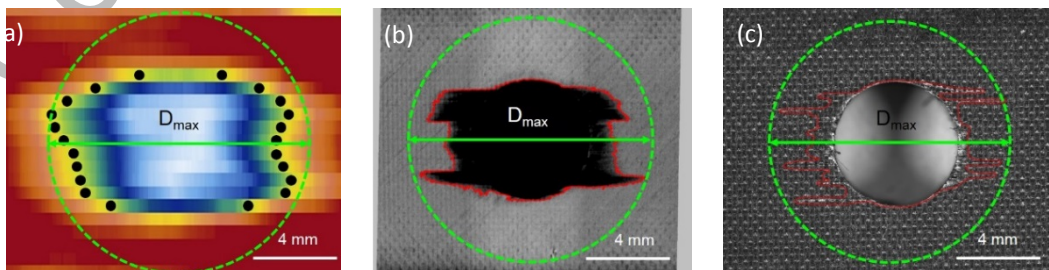


Abbildung 2: Ermittlung des durchmessergewichteten Delaminationsfaktors DF_D aus einem a) Ultraschall-C-Bild; b) CT-Overlay-Bild [2,3] und c) Lichtoptik-Bild

Zusammenfassung der Ergebnisse

In Rahmen des Projektes wurde ein Auswerteverfahren entwickelt zur automatisierten Ermittlung von Delaminationsfaktoren aus den Ultraschall(US)-C-Scans. Die Delaminationsfaktoren (DF_D und DF_x) werden demzufolge anhand eines binarisierten Bildes, wie in Abbildung 3 für eine kleine Delamination beispielhaft gezeigt ist, berechnet. DF_x wird nach folgender Formel ermittelt: $DF_x = \frac{D_x - D_0}{D_0} [\%]$ (siehe Abbildung 3b). Der Ultraschall-C-Scan, der segmentierte Ultraschall-C-Scan und das CT-Overlay-Bild [2,3] sind zum Vergleich in Abbildung 3a bis c dargestellt.

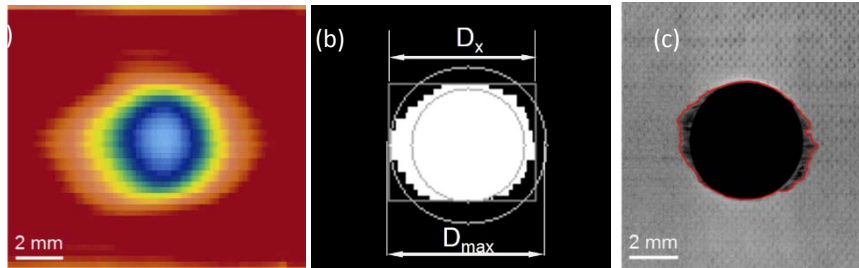


Abbildung 3: Automatisierte Auswertung von US-C-Scans:
 a) US-C-Scan; b) segmentierter US-C-Scan; c) segmentiertes CT-Overlay Image [2,3]

Anhand solcher Aufnahmen (Abbildungen 2 und 3) wurden die Delaminationsfaktoren DF_D und DF_x für eine Vielzahl von gebohrten CFK-Proben ermittelt. Die aus den US-C-Scans und LM-Bildern ermittelten Delaminationsfaktoren wurden über den Referenzwerten CT- DF_D aus den CT-Messungen aufgetragen (Abb 4). Die gestrichelte Ursprungsgerade markiert eine optimale Übereinstimmung. Eine durchaus gute Übereinstimmung zwischen US und CT ist aus der Abbildung 4 zu entnehmen. Ähnlich gut sieht, allerdings nur für DF_D größer als 40%, der Vergleich zwischen LM und CT aus. Für kleinere Delaminationen ($DF_D < 40\%$) liefert die LM für den verwendeten AC-CFK mit strukturierter Oberfläche (Peel-Ply) unzuverlässige Werte. Die Ursache dafür liegt in der durch die strukturierte Oberfläche bedingten kontrastarmen Bildaufnahme, die keine automatisierte Auswertung für derartigen Oberflächen erlaubt [3,4]. Es handelt sich hier um ein üblicherweise eingesetztes surface finish von Autoclaved Epoxy CFRP. Abbildung 5 zeigt den Unterschied im Kontrast zwischen dem CT-Bild einer Bohrung (a) und dem dazugehörigen LM-Bild (b).

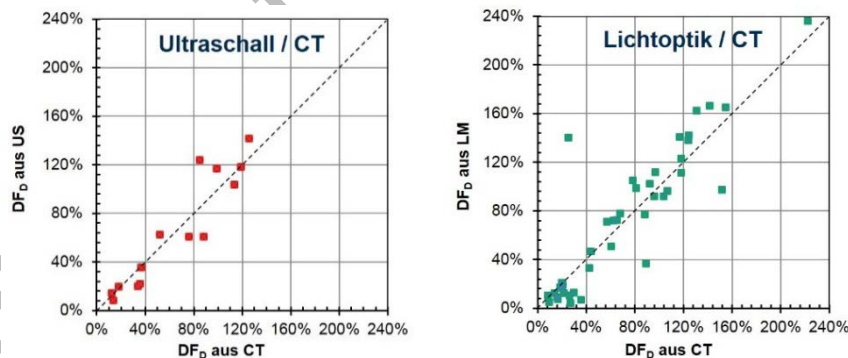


Abbildung 4: Quantitativer Vergleich von Delaminationsfaktoren aus US mit CT und aus LM mit CT

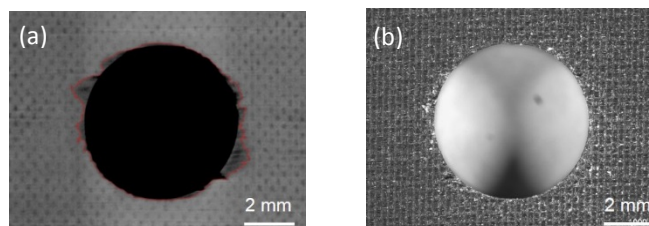


Abbildung 5: Bilder einer Bohrung mit Delamination in CFK: a) CT-Bild; b) das dazugehörige Lichtoptik-Bild
 Aufgrund des unzureichenden Kontrastes ist die Delamination im LM-Bild (b) kaum zu erkennen

4. Delaminationsbewertung mittels Ultraschall

4.10 Quantitative Ergebnisse

- Vergleich Ultraschall, Röntgen-CT und Lichtmikroskopie
- US-Delaminationsfaktoren gegen Kerbbiegefestigkeit

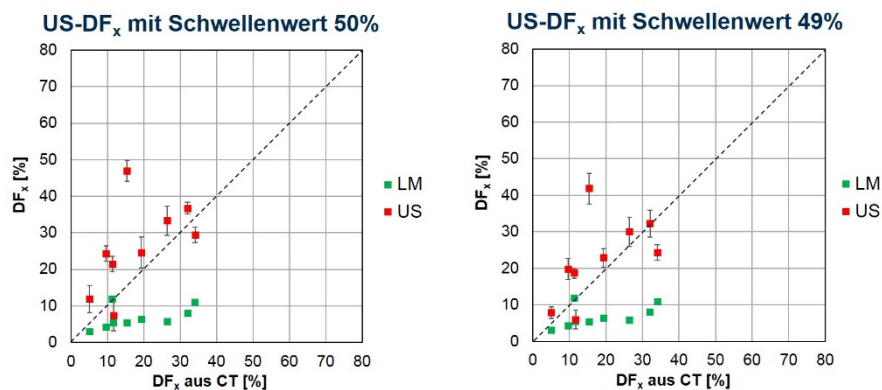


Abbildung 6: Quantitativer Vergleich von Delaminationsfaktoren aus US mit CT und LM mit CT für kleine Delaminationen links US-Schwellenwert 50%, rechts US-Schwellenwert 49%

Das Auswerteverfahren der US-C-Scans wurde im Rahmen des Projektes für kleine Delaminationen optimiert. Ein Vergleich anhand DF_x zwischen US und CT für kleine Delaminationen zeigt, dass ein Schwellenwert von 49 % (Abbildung 6 rechts) bessere Werte liefert im Vergleich zum Standard-Schwellenwert von 50 % (Abbildung 6 links). Die Ursache dafür ist, dass der 50 % -Schwellenwert nur bei geraden, sehr ausgedehnten Kanten exakte Messergebnisse liefert. Die Ultraschallprüfung mit dem problemangepassten Schwellenwert eignet sich somit gut zur Quantifizierung von kleinen Delaminationen.

Um den Einfluss bearbeitungsinduzierter Schädigung auf die statische Festigkeit zu bestimmen, wurden die gebohrten CFK-Proben anschließend Vierpunktbiegeversuchen unterzogen [3]. In Abbildung 5 ist die Kerbbiegefestigkeit über den Delaminationsfaktoren aus US und CT aufgetragen. Mit zunehmender Delaminationsschädigung zeigt sich ein Abfall der gemessenen Kerbbiegefestigkeit. Eine Korrelation zwischen den mittels Ultraschall zerstörungsfrei ermittelten Delaminationsfaktoren und der statische Festigkeit konnte dadurch festgestellt werden.

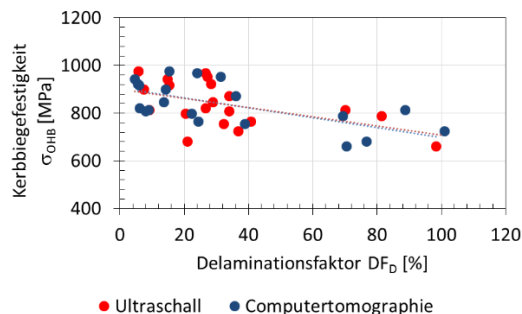


Abbildung 5: Kerbbiegefestigkeit über den Delaminationsfaktoren aus Ultraschall und Computertomographie

Schlussfolgerung

Die Ultraschallprüfung mittels Phased Array eignet sich als schnelle und kostengünstige Methode zur Quantifizierung selbst sehr kleiner bohrungsbedingter Schädigungen in multiaxialen CFK-Gelege. Sehr dünne, lange Delaminationen können allerdings mittels Ultraschall unterbewertet werden [2].

[1] W.-C. Chen, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 37, 8, S. 1097 (1997).

[2] S. Schuhmacher, G. Schoen, K. Daubert, A. Haeger, F. Lissek, G. Schneider, in Proceedings of the 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016), Seiten 1-11 (2016).

[3] A. Haeger, G. Schoen, F. Lissek, D. Meinhard, M. Kaufeld, G. Schneider, S. Schuhmacher, V. Knoblauch, Procedia Engineering, Vol. 149, 130–142 (2016).

[4] A. Haeger, Einfluss herstellungs- und bearbeitungsinduzierter Fehlstellen auf das Festigkeitsverhalten kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (in Begutachtung)