

Versuchsbeschreibung

Für die Ultraschallmessungen wurde das mobile Ultraschall Phased Array Prüfgerät OmniScan MX 2 der Firma Olympus eingesetzt. Der verwendete Phased-Array-Prüfkopf 5L64 weist eine Frequenz von 5 MHz auf und besteht aus 64 Schwingelementen mit einer Rasterbreite von 0,3 mm (gemittelt), wodurch die Auflösung in Richtung des Lineararrays bestimmt wird. Das Schallbündel wurde innerhalb der Proben elektronisch auf die Rückwand fokussiert, die Länge des Fokusschlauchs betrug 3mm. Dafür wurden je 16 Elemente gruppenweise mit geeigneter Phasenverschiebung angesteuert. Zum Abscannen der Proben wurde der Prüfkopf mittels Gel angekoppelt und von Hand über die Probe geführt. Die Auflösung in Richtung des mechanischen Scans beträgt 0.1 mm. Um die Delaminationschädigung am Bohrungsaustritt zu untersuchen, wurde der Ultraschall im Impuls-Echo-Verfahren von der gegenüberliegenden Laminatseite (Bohrungseintritt) eingeleitet. In den Ultraschall C-Scans wurde die Intensität des Rückwandechos im abgescannten Bereich ausgewertet (Abb 1a). Beim Ultraschall-B-Bild werden die US-Signale in einer Schnittebene der Probe sichtbar gemacht (Abb 1 b)

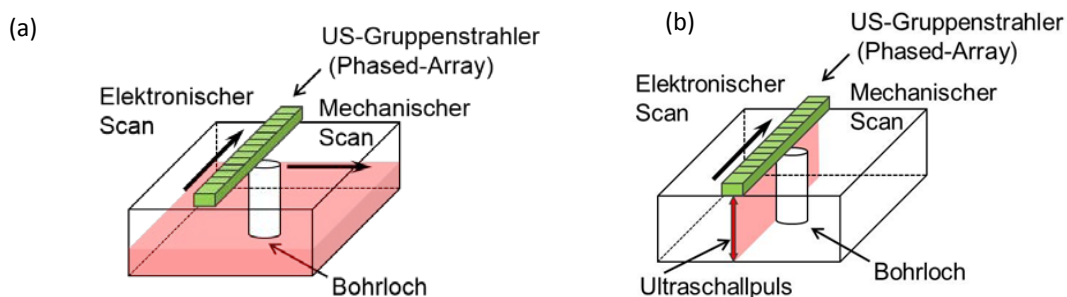


Abbildung 1: Schematische Zeichnung zur Durchführung der Ultraschallmessungen: (a) US-C-Bild (b) US-B-Bild.

Versuchsbedingungen**Material:**

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

Voruntersuchungen:

Test-Bohrungen wurden mittels eines Holzbohrers mit einem Durchmesser von 14 mm eingebracht.

Bohrserien:

Anhand von Bohrserien wurde der Einfluss des Verschleißgrades des Bohres auf das Delaminationsverhalten untersucht. Dafür wurden Stufenbohrer (max. $\varnothing = 5.9$ mm) mit unterschiedlichen Spitzenwinkeln σ (von 70°, 85°, 100° und 130°) eingesetzt, die Probenabmessungen betragen 200 mm x 15 mm.

Vor dem Bohrprozess wurden die Proben zuerst auf Porosität untersucht. Abbildung 2 zeigt C-Scans von zwei CFK-Proben unterschiedlicher Qualität. Die Amplitude des Rückwandsignals wird dabei in Farbcodierung (0 % blau bis 100 %rot) flächig dargestellt. Die Probe in Abbildung 2a ist gleichmäßig gut durchschallbar. Die Probe in Abbildung 2b hingegen, zeigt Bereichen sehr unterschiedlicher Durchschallbarkeit. Eine schlechte Durchschallbarkeit (blau) deutet auf eine lokal hohe Konzentration innenliegender streuende Defekte, z. B. Poren, hin. Für den Bohrprozess wurden ausschließlich gut durchschallbaren Proben verwendet.

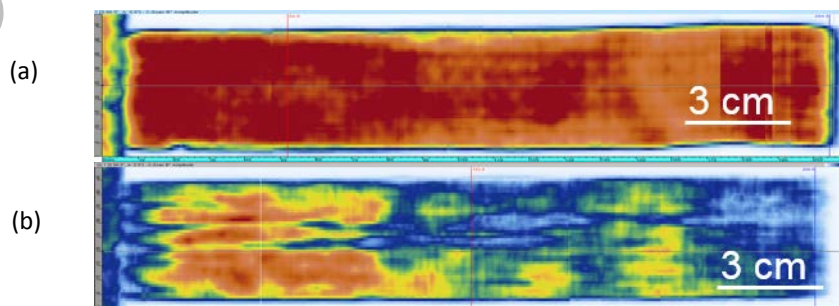


Abbildung 2: Ultraschall-C-Scans von zwei CFK-Proben unterschiedlicher Qualität
(a) homogene Probe (b) Probe mit Bereichen hohe Porosität

Zusammenfassung der Ergebnisse

Ergebnisse der Voruntersuchungen:

Die Voruntersuchungen an den Testbohrungen zeigten die Unterschiede zwischen einer fehlerfreien und einer fehlerbehafteten Bohrung (siehe Abbildung 3). Die fehlerhafte Bohrung macht sich im US-C-Bild durch einen scheinbar größeren Durchmesser sowie durch zusätzliche Reflexionen bemerkbar.

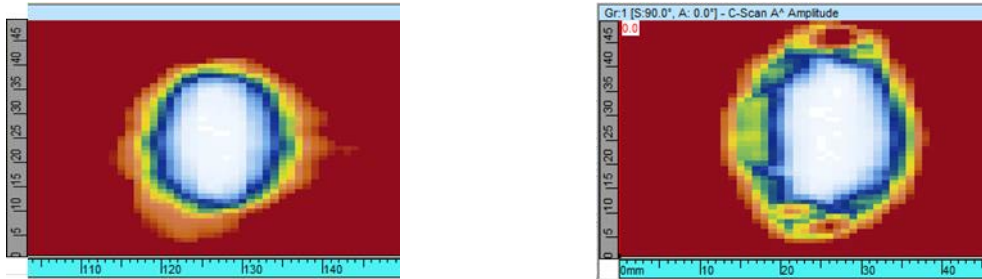


Abbildung 3: US-C-Bild einer fehlerfreien (links) und einer fehlerbehafteten (rechts) Bohrung.

Um dies zu analysieren, wurden zusätzlich computertomografische Messungen (CT) durchgeführt. In Abbildung 4 ist das gemessene Ultraschall B-Bild der fehlerhaften Bohrung (a) sowie ein CT-Slice dieser Bohrung (b) zu sehen. Die Ultraschallsignale der fehlerhaften Bohrung setzen sich zusammen aus den von den spiegelnden Reflektoren direkt und den von diffusen Streuelementen indirekt (Einbruch des Rückwandecks) erhaltenen Signalen. Daher redet man von direktem bzw. indirektem Fehler-Nachweis. Um die Ausdehnung der Delamination darstellen zu können, wurden eine Vielzahl an einzelnen B Bildern zu einem 3D Volumen zusammengefügt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt, wobei eine Segmentierung des US-3D-Volumens durchgeführt wurde. Die Segmentierung erfolgte getrennt für die spiegelnden US-Reflektoren (rot) und die diffusen US-Streuelemente (blau). Beide Bilder wurden anschließend überlagert und bilden so den gesamten fehlerhaften Bereich der Bohrung, d.h. die Delamination ab. Als Grenzwert (Schwellenwert der Segmentierung) wurde hier der standardmäßig übliche Wert von 6 dB gewählt.

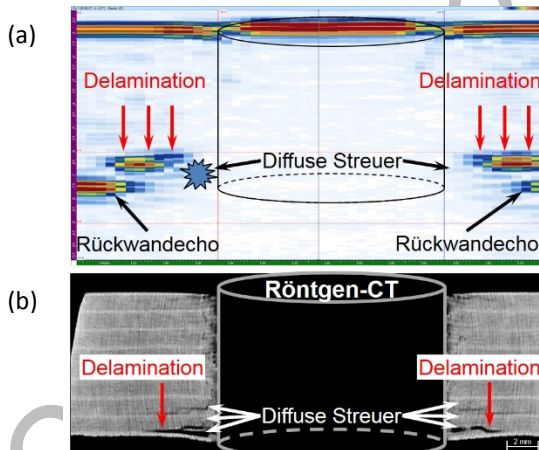


Abbildung 3: Vergleich Ultraschall B-Bild a) mit CT-Slice b); B-Bild aus der Mitte der Bohrung entnommen.

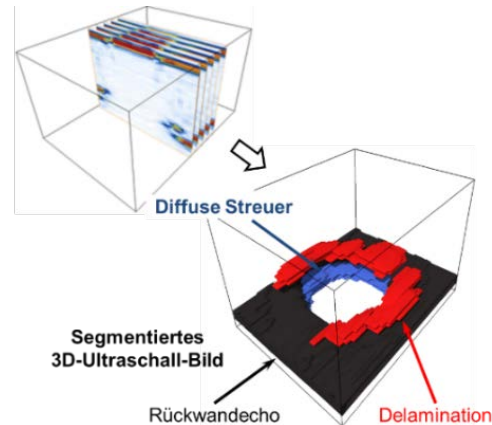


Abbildung 4: Erstellung des US-3D Volumens; Segmentierung aller Messsignale ≥ 6 dB.

Einfluss des Verschleißgrads des Bohres auf das Delaminationsverhalten:

Abbildung 5 zeigt Ultraschall-C-Bildern von drei mit unterschiedlichen Bohrer-Verschleißgraden hergestellten Bohrungen. Die Ultraschall-C-Bilder zeigen deutlich die mit steigendem Verschleißgrad des Bohrers starke Zunahme der Delaminationen an der Austrittsseite. Die dazugehörige CT-Overlay Bilder [1] sind aus dem Abbildung 6 zu entnehmen. Die oberflächlich erkennbare Delaminationsschädigung an der Austrittsseite weist in allen Fällen eine Vorzugsorientierung in Faserrichtung der Decklage auf. Die größten Schädigungen finden in Decklage (0° Richtung) statt. Nur bei einem höheren Verschleiß der Bohrer ist manchmal auch die zweite Lage (45°Richtung) betroffen. Weitere Details sind in Publikationen [1] und [2] zu finden.

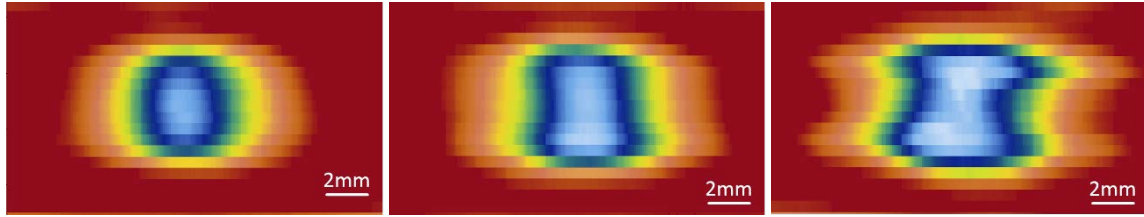


Abbildung 5: Ultraschall-C-Bilder von drei mit unterschiedlichen Bohrer-Verschleißgraden hergestellten Bohrungen. Die Bohrungen wurden mittels eines Stufenbohrers mit einem Spitzenwinkel von 100° eingebracht.



Abbildung 6: CT-Overlay-Bilder [1] von drei mit unterschiedlichen Bohrer-Verschleißgraden hergestellten Bohrungen. Die dazugehörige US-C-Bilder sind aus der Abbildung 5 zu entnehmen.

Schlussfolgerung der Ergebnisse

Die Ultraschallprüfung mittels Phased-Array-Technik eignet sich zur Detektion und Beschreibung bohrungsbedingter Schädigungen in CFK. Die Vorzugsorientierung der Delamination wird als Scan-Richtung ausgewählt, um in dieser Richtung die höchste Auflösung bereitzustellen. Auf diese Weise erhält man eine schnelle und kostengünstige Methode zur Detektion bohrungsbedingter Fehler in CFK-Gelege.

[1] S. S. Schuhmacher, G. Schoen, K. Daubert, A. Haeger, F. Lissek, G. Schneider: *Quantifying Drilling Induced Delamination in Carbon- Fibre-Reinforced Epoxy Laminates Using a Fast, Manual and Mobile Ultrasonic-Based Procedure as Compared to Low-Magnification Microscopy*, in Proceedings of the 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016), Seiten 1-11 (2016).

[2] A. Haeger, G. Schoen, F. Lissek, D. Meinhard, M. Kaufeld, G. Schneider, S. Schuhmacher, V. Knoblauch: *Non-Destructive Detection of Drilling-induced Delamination in CFRP and its Effect on Mechanical Properties*, Procedia Engineering, Vol. 149, 130-142 (2016).