

Röntgen-Mikrotomografie, Ultraschall und Thermographie für die Charakterisierung von Defekten in GFK- und CFK-Verbundwerkstoffen und -Elementen

Andreas J. BRUNNER, Iwan JERJEN^{*}, Mathieu PLAMONDON, Roman FURRER,
Jürg NEUENSCHWANDER

Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt,
Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf, Schweiz

^{*} jetzt bei: Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen, Schweiz

Kurzfassung. Glas- und Kohlenstoff- Faserverstärkte Kunststoffe (GFK- bzw. CFK-Verbundwerkstoffe) können unterschiedliche Defekte ausweisen, die einerseits im Herstellungsprozess entstehen und sich andererseits bei der Nutzung unter quasistatischer oder schwingender mechanischer Belastung ausbilden oder sich ausbreiten. Die Charakterisierung der Art, der Lage und der Grösse der Defekte ist u.a. für Optimierung der Herstellungsprozesse, Modellierung des Werkstoff- oder Bauteilverhaltens sowie der Abschätzung der Nutzungsdauer von Komponenten oder Strukturen aus GFK- oder CFK-Verbundwerkstoffen wichtig. Der Beitrag zeigt ausgewählte Beispiele der Anwendung von Röntgen-Mikrotomografie, Ultraschall und Thermographie zur Charakterisierung von Defekten in GFK- oder CFK-Verbundwerkstoff-Bauteilen. Bei „dicken“ Laminaten und komplexen Geometrien ist das Röntgenverfahren besonders geeignet.

Einführung

Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) von Glasfaser- und Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffen (GFK bzw. CFK) muss die speziellen Eigenschaften dieser Werkstoffklasse berücksichtigen und dies hat Konsequenzen für die Entwicklung entsprechender Prüfverfahren (siehe z.B. [1]). Wesentlich für die in diesem Beitrag diskutierten Methoden sind dabei einerseits die anisotropen mechanischen Eigenschaften, die durch die Orientierung und Anordnung der Fasern entstehen [2], aber auch die mehrskalige, inhomogene Struktur [3] und die im Vergleich zu Werkstoffen wie Metallen daraus resultierende relativ hohe mechanische Dämpfung. Dies bedeutet auch, dass in GFK und CFK eine Vielzahl unterschiedlicher Defekttypen auftreten kann und diese können alle Dimensionen von der Mikroskala (kleiner als Mikrometer) bis zur Makroskala (bis Meter, z.B. in Strukturen oder Elementen) aufweisen. Viele Anwendungen zerstörungsfreier Prüfungen für den Defektnachweis bzw. die Bestimmung der Strukturintegrität werden an Prüfkörpern im Labormassstab entwickelt. Diese werden oft mit simulierten Defekten an definierten Lagen im Werkstoff versehen, damit deren Nachweis durch das ZfP-Verfahren verifiziert werden kann (z.B. [4]). Ein typisches Beispiel ist eine CFK-Laminatplatte mit einlaminieren Polymerfolien



zur Simulation von Delaminationen, d.h. flächige Ablösungen zwischen den einzelnen Faserlagen des Verbundwerkstoffs. Diese Art von Defekten tritt in Faserverbundwerkstoffen häufig auf und beruht auf den tendenziell eher niedrigen interlaminaren Festigkeiten [5]. Typisch werden solche Delaminationen durch Schlageinwirkung oder Ermüdung unter Betriebslasten ausgelöst und breiten sich mit der Zeit durch Ermüdung weiter aus. Der Nachweis mittels ZfP erfolgt dann z.B. mit Röntgenprüfung (Radiografie), Thermografie oder Ultraschall (C-Scan), diese Verfahren werden z.B. in [6] diskutiert. Trotzdem sind bisher nur wenige Untersuchungen publiziert worden, die an einer solchen Testplatte unterschiedliche ZfP-Methoden quantitativ bezüglich Nachweisempfindlichkeit vergleichen (z.B. [4,7,8]). Die hier zitierten Beispiele untersuchen und vergleichen teilweise auch die Anwendbarkeit der zerstörungsfreien Prüfmethoden in einem realen Umfeld bzw. auf reale Strukturen. Dabei ist die Integration der Messtechnik in die Anwendung ein wichtiger Faktor. Eine Lösung dafür ist kontaktlose Messung, z.B. mittels Kameras wie bei aktiver oder Impuls-Thermografie [9,10], digitaler Bildkorrelation [11] und Scherografie [4], oder mittels Laser wie z.B. bei Vibrometrie [12], oder Interferometrie [13-15], aber auch luftgekoppelter Ultraschall ist möglich [16,17]. Röntgenmethoden sind zwar auch kontaktlos einsetzbar [18], aber die Strahlenschutzmaßnahmen stellen für Messungen außerhalb speziell eingerichteter Labors oft eine große Einschränkung dar, oder die Strahlungsquelle ist, wie im Fall von Synchrotron-Röntgenstrahlung, nicht mobil [19]. Ein anderer Ansatz ist die volle Integration der Sensoren und der Messtechnik in die zu prüfende Komponente, mit der im Prinzip eine periodische oder permanente Strukturüberwachung ermöglicht wird. Neben technischer Machbarkeit [20-22] spielen auch ökonomische Aspekte eine wichtige Rolle bei Strukturüberwachung, siehe z.B. [21,23]. In den letzten Jahren wird auch THz-Technologie auf die Anwendbarkeit als zerstörungsfreies Prüfverfahren für Faserverbundwerkstoffe untersucht. Defektnachweis in GFK scheint möglich [24], während die Anwendbarkeit von bildgebenden THz-Messungen auf CFK wegen der intrinsischen elektrischen Leitfähigkeit des Materials wahrscheinlich auf oberflächennahe, reflektometrische Messungen beschränkt ist [25]. Im vorliegenden Beitrag geht es um einen qualitativen Vergleich ausgewählter zerstörungsfreier Prüfverfahren, die an GFK- der CFK-Prüfmustern im Labormaßstab und unter Laborbedingungen angewendet werden. Der Defektnachweis fokussiert auf Herstellungsdefekte (z.B. Porosität) und Schlageinwirkung, d.h. Initiierung von Delaminationen. Ein Vergleich von ZfP-Verfahren zum Schädigungsnachweis an einer CFK-Struktur wurde kürzlich in [26] publiziert.

1. Material und Methoden

1.1 Glasfaser- und Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffe

Die GFK- und CFK-Bauteile, aus denen die Prüfkörper für die vergleichende Untersuchung der ZfP-Verfahren entnommen wurden, sind in Abb. 1 dargestellt. Neben ebenen Platten wurden auch Prüfkörper aus den Ecken bzw. Kanten der Bauteile entnommen, um den Einfluss der Geometrie und der möglichen Einflüsse aus der Herstellung der Bauteile (z.B. Variation der Wandstärke bzw. der Faserorientierung, Porosität in der Matrix) zu erfassen.

1.2 Zerstörungsfreie Prüfverfahren und Geräte

Die Schlageinwirkung auf ausgewählte GFK- und CFK-Prüfkörper wurde mit einem Gerät zur Simulation von Hagelschlag (Empa-Eigenbau) durchgeführt. Als Projektil wurden Kunststoffkugeln aus Polyamid mit einem Durchmesser von 40 mm verwendet. Die Geschwindigkeit der Projektile wurde in Vorversuchen jeweils auf einen bestimmten Wert geregelt. Die Schlagenergie wurde aus Masse und Geschwindigkeit des Projektils bestimmt



Abb. 1. Fotos der Prüfmuster: (links) Herstellung aus den Laminelementen am Beispiel CFK, (rechts) ebene Platten und komplex geformte Eckstücke aus GFK und CFK.

und dann die Schlagwirkung auf die Prüfkörper visuell beurteilt. Grundsätzlich spielt die Auflage der Prüfkörper bei der Schlageinwirkung eine wichtige Rolle. Für die vergleichenden Versuche wurden die Prüfkörper auf einem Metallrahmen mittels Schraubzwinge fixiert, eine zusätzliche Unterlage wurde nicht verwendet.

Tabelle 1. Übersicht über ZfP-Methoden und Prüfkörper

Probentyp (Abb. 1)	ZfP-Verfahren	Prüfparameter und Bemerkungen
<ul style="list-style-type: none"> – GFK-Platte (eben) – GFK-Eckteil – CFK-Platte (eben) – CFK-Eckteil 	<ul style="list-style-type: none"> – Ultraschall C-Scan – Lock-in Thermografie – Röntgen-CT – Röntgen-Dunkelfeld-Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> – Tauchtechnik: Oberflächen- und Echo eines hinter der Probe liegenden Spiegels (Doppeldurchschallung) – in Reflexion/Transmission, Modulation 0.07 Hz – mit Mikrofokus-Quelle (80 kV, 125 μA) – Empa Eigenentwicklung

Die GFK- und CFK-Prüfkörper und die verwendeten ZfP-Methoden sind in Tab. 1 zusammengefasst. Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse vergleichend dargestellt und kurz diskutiert.

2. Ergebnisse und Diskussion

2.1 Visuelle Beurteilung der Prüfkörper nach Schlageinwirkung

Ausgewählte Bilder der Prüfkörper vor bzw. nach der Schlageinwirkung sind in Abb. 2 dargestellt. Je nach Schlagenergie ist die Wirkung auf den Faserverbundwerkstoff bereits von Auge deutlich feststellbar. Für die langfristige Nutzung von GFK- oder CFK-Strukturen sind jedoch die kaum sichtbaren Schlagdefekte (Englisch: barely visible impact damage), die an der Oberfläche visuell nicht erkennbar sind, im Innern des Faserverbundwerkstoffs aber zu größeren Delaminationen oder ausgedehnter Rissbildung führen, entscheidend [27,28]. Die Entwicklung entsprechender ZfP-Methoden für den Nachweis solcher Schlagschäden ist immer noch ein aktuelles Forschungsgebiet.

Die visuelle Inspektion der GFK-Platten zeigt, dass diese in unterschiedlichem Maß Einschlüsse oder Inhomogenitäten enthalten. Bei CFK-Platten kann nur die Oberfläche visuell geprüft werden. Einschlüsse oder Porosität können in diesem Fall mit Röntgenverfahren nachgewiesen werden, sofern diese genügend Auflösung aufweisen.

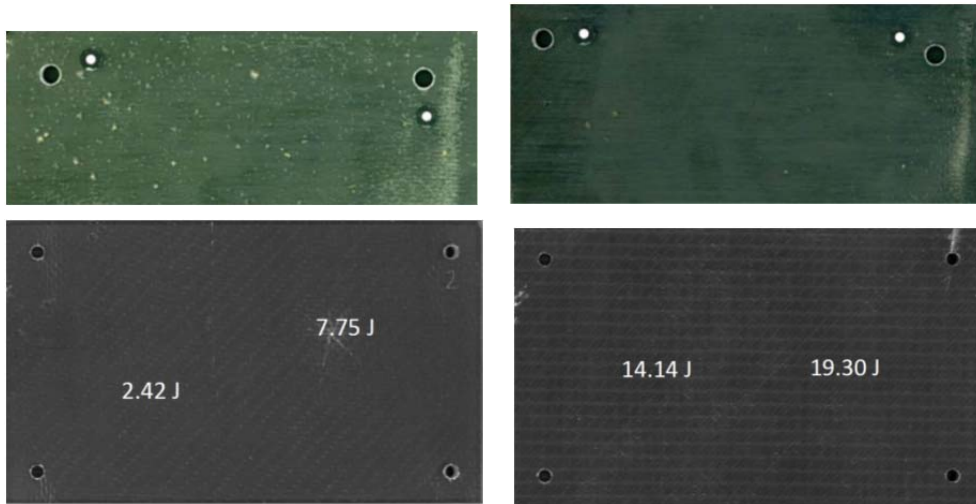


Abb. 2. Visuelle Inspektion der GFK-Platten (oben) vor der Schädigung zeigt erkennbare Einschlüsse bzw. Inhomogenitäten aus der Herstellung (es wird nur ein Teil der Platten gezeigt), die Schädigung nach Schlageinwirkung wird an je einem Beispiel gezeigt: (unten links) GFK und (unten rechts) CFK, Position und Schlag-Energien sind angegeben. Zudem wurden 4 Löcher eingebracht, für die Orientierung der Bilder.

2.2 Ultraschall C-Scan

Ausgewählte Bilder der Ultraschallprüfung (C-Scan) der GFK- und CFK-Platten vor der Schädigung sind in Abb. 3 dargestellt. Bei der GFK Platte sind vorbestehende Strukturen erkennbar: linienförmige Anzeige in Oberflächenbild und rundliche Anzeigen bei Spiegelecho (gegen Rückseite offene Lunker). Bei den Spiegelbildechos sind außen die drei Unterlagscheiben sichtbar. Der Vergleich mit denselben Platten nach Schädigung basiert auf den Spiegelechos-Bildern (Abb. 4). Bei der GFK Platte ist nur am Ort der 7.75 J

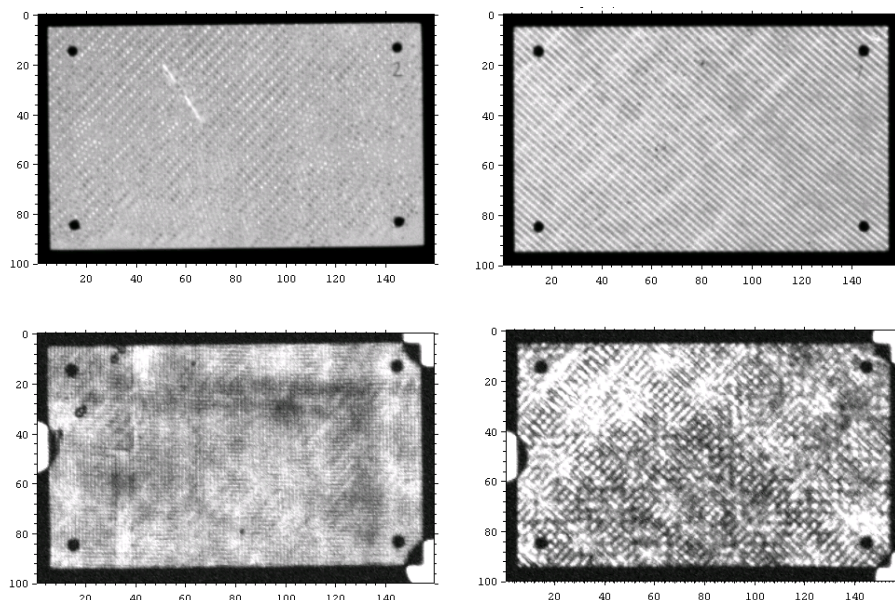


Abb. 3. UT C-Scan Platten: links GFK, rechts CFK; oben: Oberflächenecho; unten Spiegelecho (vor Schlageinwirkung)

Impakts eine leichte Reduktion der Amplitude sichtbar. Bei der CFK Platte sind beide Impaktstellen (knapp) sichtbar; dafür sind aber am Rand, wo die Platte beim Impakt-Experiment aufgelegt hat, markante Amplitudenreduktionen sichtbar, welche auf Delaminationen hinweisen.

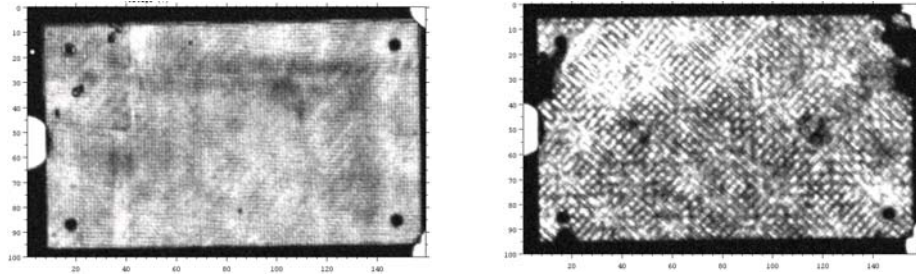


Abb. 4. UT C-Scan Platten (Spiegelecho): links: GFK; rechts: CFK (nach Schlageinwirkung)

2.3 Lock-in Thermografie

Abb. 5 zeigt Bilder einer GFK-Platte bzw. einer CFK-Platte nach Schädigung, jeweils im Vergleich mit dem entsprechenden Ultraschall C-Scan. Der Nachweis der Schlagschäden in der GFK-Platte ist mit Thermografie deutlich besser als mit Ultraschall. Bei der CFK-Platte ist dies umgekehrt, dort liefert TT keinen klaren Hinweis auf die Schädigung.

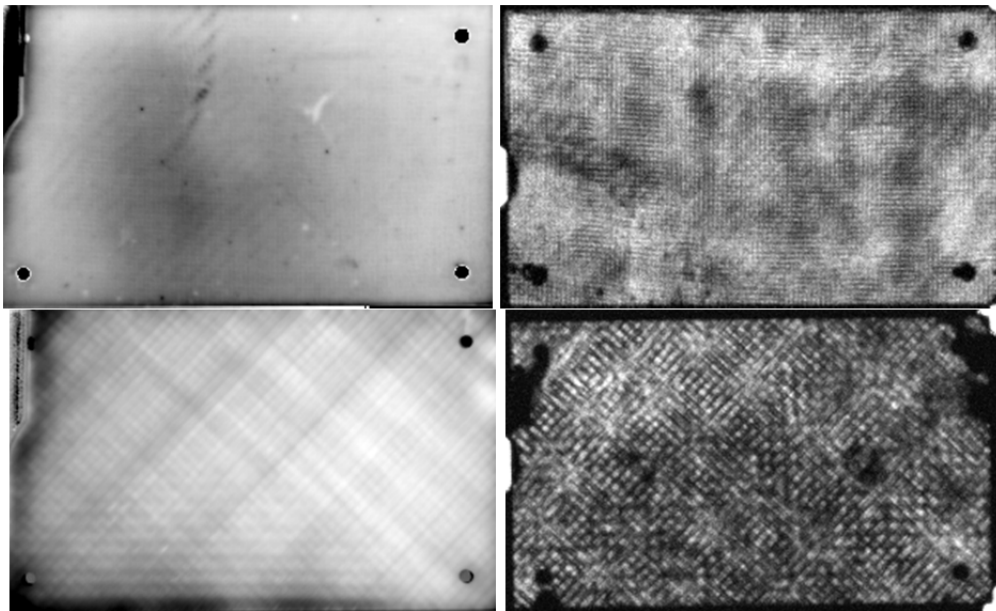


Abb. 5. Vergleich von Lock-in Thermografie (links) und Ultraschall C-Scan (rechts) einer GFK-Platte (oben) und einer CFK-Platte (unten) jeweils nach Schlageinwirkung.

2.4 Röntgen-Computertomografie

Abb. 6 zeigt nun Beispiele der Röntgen-Computertomografie an Eckteilen, die aus den GFK- bzw. CFK-Bauteilen geschnitten wurden (vgl. Abb. 1). Die im Vergleich zu den Platten komplexere Geometrie hatte z.B. im Ultraschall eine Untersuchung verunmöglicht. Im Schnittbild der Röntgentomografie sind beim CFK-Eckteil mögliche Defekte zu sehen, einerseits Porosität (schwarze Punkte/Flecken) und andererseits Matrixrisse (dunkle Linien zwischen den Fasern). Ob diese eindeutig und im hier festgestellten Ausmaß nur auf die Schlageinwirkung zurückzuführen sind, ist nicht klar. Durch die Formgebung der Eckteile können während der Herstellung innere Spannungen und Deformationen auftreten, die auch ohne äußere Einwirkung zu Rissbildung oder Entstehung von Delaminationen führen. Bei der CFK-Probe lassen sich im Phasenbild der Lock-in Thermografie die Matrixrisse nachweisen (Abb. 7). Beim GFK-Eckteil ergibt die Röntgentomografie keinen Hinweis auf Delaminationen oder Matrixrisse, obwohl diese visuell klar erkennbar sind (Abb. 8).

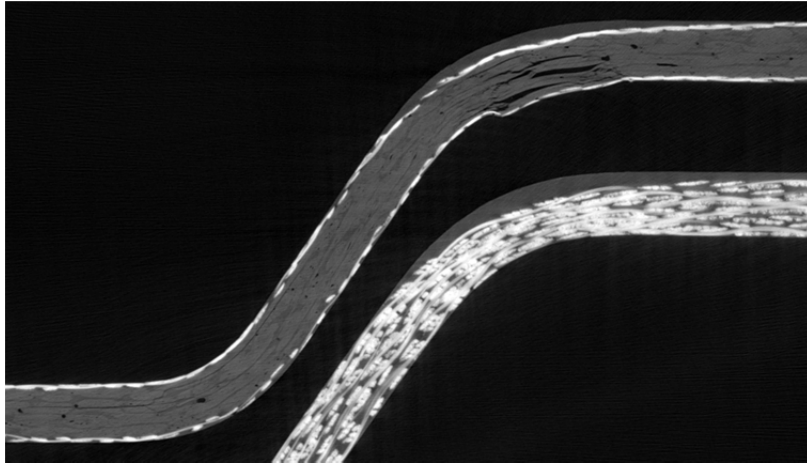


Abb. 6. Röntgen CT-Bilder CFK-Eckteil (oben) und GFK-Eckteil (unten) nach Schlägeinwirkung im direkten Vergleich, im CFK sind Deformation und Delaminationen erkennbar, die Delaminationen verlaufen im linken Bildteil bis in die Ebene des Bauteils, beim GFK sind keine entsprechenden Schäden erkennbar.

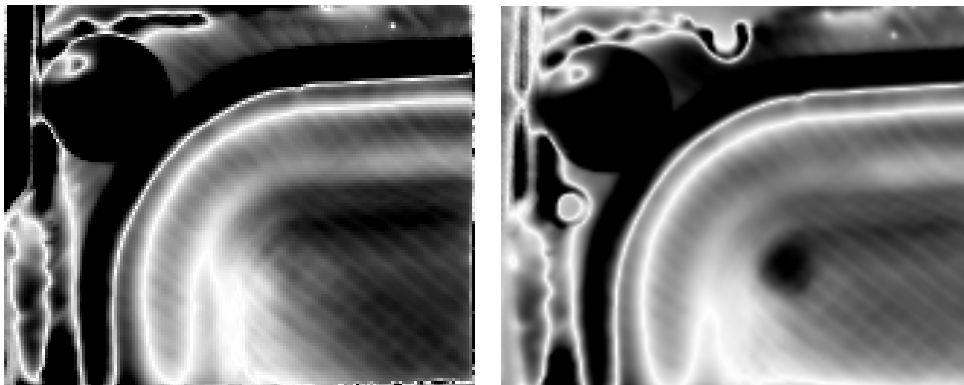


Abb. 7. Lock-In Thermografie Phasenbild, links vor und rechts nach der Schädigung

Wie bereits erwähnt ist Porosität und daraus folgende Schädigung in Polymeren und Faserverbundwerkstoffen ein wichtiger Defekttyp. Im Prinzip ist Ultraschall für den Porositätsnachweis in Polymeren und Faserverbundwerkstoffen denkbar (siehe z.B. [29]), aber ein Übersichtsartikel [30] kam vor 10 Jahren noch zum Schluss, dass es noch kein wirklich dafür geeignetes ZfP-Verfahren auf Basis von Ultraschall gibt. Ein wesentliches Problem dabei ist die Quantifizierung der Porosität. Ein anderer Ansatz zum Nachweis von Porosität, der kürzlich untersucht wurde, ist das Röntgen-Dunkelfeld Verfahren [31], das

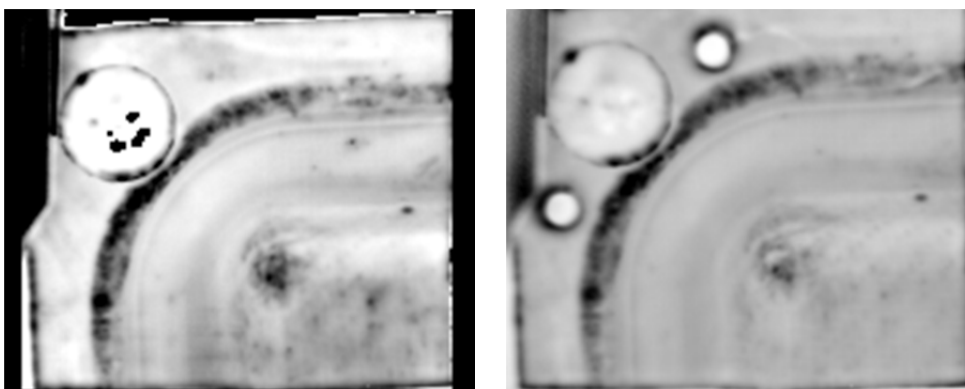


Abb. 8. Visuell erkennbare Schlagschäden an GFK-Eckteilen, die aber im Röntgen-CT (vgl. Abb. 6) nicht nachweisbar sind.

die Erkennung von Poren in Thermoplast-Kunststoff im Mikrobereich ($<1\text{mm}$) ermöglicht. Für GFK- oder CFK-Prüfkörper ist diese Methode ebenfalls verwendet worden, allerdings nicht zum Nachweis von Porosität in der Polymermatrix, sondern für eine Bestimmung der Faserorientierung [32]. Die Tomografien in Abb. 7 zeigen Porosität in der Matrix der GFK- und CFK-Prüfmuster, der Nachweis herstellungsbedingter Porosität in GFK und CFK war aber nicht explizit Teil der hier präsentierten Untersuchungen zu Schlagschäden.

3. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Auch wenn die Ergebnisse der unterschiedlichen ZfP-Methoden bezüglich Defektnachweis in durch Schlageinwirkung geschädigten GFK- und CFK-Prüfmustern nicht quantitativ verglichen werden, sind doch Schlussfolgerungen auf die Anwendbarkeit bezüglich bestimmter Defekttypen bzw. bestimmter Defektlagen möglich. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass komplexe Formen bzw. Geometrie (hier die Eckteile) den Defektnachweis mit Methoden, die bei ebenen Platten ohne weiteres möglich sind, schwierig gestalten (zum Beispiel Thermografie und Ultraschall). Bei GFK ist visuelle Inspektion dank dem semi-transparenten Material eine sehr effektive Methode.

4. Dank

Die GFK- und CFK-Bauteile bzw. Prüfmuster wurden im Rahmen des Qualifiber-Projekts (FP7-SME-2012-315639) „Qualification and Diagnosis of Carbon and Glass Fibre-Reinforced Composites with Non-Destructive Measurement Technologies“ untersucht.

Referenzen

- [1] A.J. Brunner, E. Hack, J. Neuenschwander: “Nondestructive Testing”, Chapter 13 in “Characterization and Analysis of Polymers”, (Ed. Arza Seidel) J. Wiley & Sons (ISBN 978-0-470-23300-9), 357-377 (2008).
- [2] D.R. Moore, A. Cervenka: “Future requirements in the characterization of continuous fiber-reinforced polymeric composites”, IUPAC Technical Report, Pure and Applied Chemistry, 74, No. 4, 601–628 (2002).
- [3] R.F. Gibson: “A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures”, Composite Structures, 92, 2793–2810 (2010).
- [4] I. Amenabar, A. Mendikute, A. López-Arraiza, M. Lizaranzu, J. Aurrekoetxea “Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades”, Composites: Part B 42 (2011) 1298–1305 (doi: 10.1016/j.compositesb.2011.01.025).
- [5] A.J. Brunner, B.R.K. Blackman, P. Davies, „A status report on delamination resistance testing of polymer-matrix composites“, Engineering Fracture Mechanics, 75, No. 9, 2779-2794 (2008).
- [6] A.J. Brunner, J. Neuenschwander: "Examples of Non-Destructive Testing of Glass- and Carbon-Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composites", NATO Advanced Study Institute "Mechanics of Composite Materials and Structures", NATO Science Series: E Applied Science, Vol. 361 (Eds. C.A. Mota Soares, C.M. Mota Soares, M.J.M. Freitas), Kluwer Academic (ISBN 0-7923-5870-8), 261-278 (1999).
- [7] L. Cheng, G. Yun Tian “Comparison of Nondestructive Testing Methods on Detection of Delaminations in Composites”, Journal of Sensors, Volume 2012, Article ID 408437, 7 pp. (doi: 10.1155/2012/408437).
- [8] D.S. de Vasconcellos, F. Touchard, L. Chocinski-Arnault (2014) “Tension–tension fatigue behaviour of woven hemp fibre reinforced epoxy composite: A multi-instrumented damage analysis”, International Journal of Fatigue 59, 159–169 (doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.08.029).
- [9] W. Harizi, S. Chaki, G. Bourse, M. Ourak: “Mechanical damage assessment of Polymer–Matrix Composites using active infrared thermography”, Composites: Part B 66, 204–209 (2014).
- [10] H. Schmutzler, M. Alder, N. Kosmann, H. Wittich, K. Schulte: “Degradation monitoring of impact damaged carbon fibre reinforced polymers under fatigue loading with pulse phase thermography”, Composites: Part B 59, 221–229 (2014).

- [11] J. Ubaid, M. Kashfuddoja, M. Ramji: "Strength prediction and progressive failure analysis of carbon fiber reinforced polymer laminate with multiple interacting holes involving three dimensional finite element analysis and digital image correlation", *International Journal of Damage Mechanics*, 23, No. 5, 609–635 (2014).
- [12] S.G. Pierce, B. Cuishaw, G. Manso, K. Worden, W.J. Staszewski "The application of ultrasonic Lamb wave techniques to the evaluation of advanced composite structures", *Smart Structures and Materials 2000: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials*, (edited by R.O. Claus, W.B. Spillman, Jr.), *Proceedings of SPIE*, 3986, 93-103 (2000).
- [13] M. Birchmeier, D. Gsell, M. Juon, A.J. Brunner, R. Paradies, J. Dual: „Active Fiber Composites for the generation of Lamb Waves“, *Ultrasonics*, 49, No. 1, 73-82 (2009).
- [14] Ph. Menner, H. Gerhard, G. Busse: „Lockin-Interferometry: Principle and Applications in NDE“, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 57, No. 3, 183-191 (2011).
- [15] I. Pelivanov, T. Bumac, J.J. Xia, Ch.-W. Wei, M. O'Donnell: „NDT of fiber-reinforced composites with a new fiber-optic pump-probe laser-ultrasound system“, *Photoacoustics*, 2, 63–74 (2014).
- [16] W. Adebahr, M. Rahammer, R. Sachse, S. Gröninger, M. Käß, M. Kreutzbruck, G. Busse: „Crack growth monitoring at CFK adhesive bondings“, *Proceedings 24. Stuttgarter Kunststoffkolloquium*, 203–210 (2015).
- [17] S.J. Sanabria, Ch. Mueller, J. Neuenschwander, P. Niemz, U. Sennhauser: „Air-coupled ultrasound as an accurate and reproducible method for bonding assessment of glued timber“, *Wood Science and Technology*, 45, 645–659 (2011).
- [18] K. Vallons, S.V. Lomov, I. Verpoest: "Fatigue and post-fatigue behaviour of carbon/epoxy non-crimp fabric composites", *Composites: Part A* 40, 251–259 (2009).
- [19] B.R. Müller, A. Lange, M. Harwardt, M.P. Hentschel, B. Illerhaus, J. Goebbels, J. Bamberg, F. Heutling: „Synchrotron-Refraction-Computed-Tomography for NDT and characterization of lightweight composite materials“, in: *Emerging Technologies in Nondestructive Testing*, (Eds. G. Busse, D. VanHemelryk, I. Solodov, A. Anastasopoulos), Taylor & Francis, 217-221 (2008).
- [20] A.J. Brunner, M. Barbezat, C. Huber, P.H. Flüeler: "The potential of active fibre composites made from piezoelectric fibres for actuating and sensing applications in structural health monitoring", *Materials and Structures, Matériaux et Construction (Special Issue, Ed. P. Richner)*, 38, No. 279, 561- 567 (2005).
- [21] C. Boller, M. Buderath: "Fatigue in aerostructures--where structural health monitoring can contribute to a complex subject", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365, 561–587 (2007).
- [22] A.J. Brunner, M. Birchmeier, M. Melnykowycz, M. Barbezat: "Piezoelectric Fiber Composites as Sensor Elements for Structural Health Monitoring and Adaptive Material Systems", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20, No. 9, 1045-1055 (2009).
- [23] C. Boller, H. Kapoor, W.T. Goh: "Structural Health Monitoring Potential Determination based on Maintenance Process Analysis", *Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, Proceedings of SPIE*, 6527, (edited by L. Porter Davis, B.K. Henderson, M. Brett McMickell), 65270C, pp. 1-10 (2007).
- [24] K.H. Jin, Y.-G. Kim, S.H. Cho, J.C. Ye, D.-S. Yee: "High-speed terahertz reflection three dimensional imaging for nondestructive evaluation", *Optics Express*, 20, No. 23, 25432 -25440 (2012).
- [25] J.-W. Park, K.-H. Im, D.K. Hsu, J.-A. Jung, I.-Y. Yang "Terahertz spectroscopy approach of the fiber orientation influence on CFRP composite solid laminates", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26, No. 7, 2051–2054 (2012).
- [26] C.K. Liew, M. Veidt, N. Rajic, K. Tsoi, D. Rowlands, H. Morton: "Inspections of Helicopter Composite Airframe Structures using Conventional and Emerging Nondestructive Testing Methods", *Journal of Testing and Evaluation*, 39, No. 6, 1011- 1022 (2011).
- [27] W. Tan, B.G. Falzon, L.N.S. Chiu, M. Price: "Predicting low velocity impact damage and Compression-After-Impact (CAI) behaviour of composite laminates", *Composites: Part A*, 71, 212–226 (2015).
- [28] Ch. Hornfeck, Ch. Geiss, M. Rücker, C.U. Grosse: „Comparative Study of State of the Art Nondestructive Testing Methods with the Local Acoustic Resonance Spectroscopy to Detect Damages in GFRP“, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 34, 14 pp. (2015).
- [29] ASTM E1495/1495M-12 "Standard Guide for Acousto-Ultrasonic Assessment of Composites, Laminates, and Bonded Joints" American Society for Testing and Materials Intl.
- [30] E.A. Birt, R.A. Smith: "A review of NDE methods for porosity measurement in fibre-reinforced polymer composites", *Insight*, 46, No 11, 681-686 (2004).
- [31] J. Jerjen, V. Revol, A.J. Brunner, Ph. Schuetz, Ch. Kottler, R. Kaufmann, Th. Luethi, G. Nicoletti, C. Urban, U. Sennhauser "Detection of stress whitening in plastics with the help of dark field imaging", *Polymer Testing*, 32, No. 6, 1094-1098 (2013).
- [32] V. Revol, B. Plank, R. Kaufmann, J. Kastner, Ch. Kottler, A. Neels: "Laminate fibre structure characterisation of carbon fibre-reinforced polymers by X-ray scatter dark field imaging with a grating interferometer", *NDT&E International*, 58, 64–71 (2013).