

Detektion von Fehlern in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mittels Sichtprüfung, Ultraschallprüfung, Radioskopie, aktiver Thermografie und Röntgen Computertomografie.

Bernhard PLANK*, Florian ELLERT**, Jürgen GRUBER*, Christian GUSENBAUER*,
Johann KASTNER*

*FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH, Stelzhamerstraße 23, 4600 Wels, AUSTRIA.

**Universität Bayreuth, Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth, GERMANY.

Kurzfassung. Im Rahmen der hier vorgestellten Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt ReCarbofit wurden kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) zu typischen herstellungsbedingten Fehlern an CFK-Komponenten befragt. Anhand eines ermittelten Fehlerkatalogs wurden 15 CFK-Testplatten mit entsprechenden Fehlertypen gefertigt. Dazu wurden unterschiedliche künstlich erzeugte Fehler, wie beispielsweise kleine Mengen von Wachs, Trennmittel oder Prepreg-Folie in das Materialsystem eingebracht. Zusätzlich wurden CFK-Komponenten aus dem Hochleistungssportsegment ausgewählt, die während der Produktion oder im Praxiseinsatz durch Überbeanspruchung beschädigt wurden. Diese Messobjekte wurden mittels Sichtprüfung (VT), Ultraschallprüfung (UT), Radioskopie (RT), aktiver Thermografie (IR) und Röntgen Computertomografie (CT) zerstörungsfrei geprüft. Bei den CFK-Testplatten zeigt UT, IR und CT mit 14 detektierten Fehlern die beste Fehlerdetektion. Für zukünftige zerstörungsfreie Prüfmethoden entspricht IR den Anforderungen von KMUs, vor allem in den Punkten Zeiteffizienz, Mobilität und den damit verbundenen Kosten, am besten. Durch die 3D-Bildgebung und hohe maximale Auflösung hat CT deutliche Vorteile bei der Schadensbeurteilung und Interpretation von komplexen CFK-Komponenten. Zusätzlich kann CT sehr gut als ergänzende Methode für IR und UT zur zerstörungsfreien Interpretation von unklaren Fehlerbildern eingesetzt werden.

1. Motivation und Einleitung

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) verfügen über hervorragende mechanische Eigenschaften und zeichnen sich vor allem durch hohe Steifigkeit, Stabilität, Dauerfestigkeit und geringes spezifisches Gewicht aus [1]. Dadurch wird diesem Materialsystem ein immer breiter werdendes Anwendungsspektrum zugeschrieben und es ist vor allem aus den Bereichen der Luftfahrt- und Automobilbranche sowie in der Sportindustrie nicht mehr weg zu denken. [2,3] Nachteil dieses komplexen Materialsystems ist der relativ hohe Prüfaufwand zur Qualitätssicherung und Schadensdetektion bzw. Schadensbewertung, sowie die eingeschränkte Eignung für eine Instandsetzung und Reparatur im Falle einer Schädigung.



Im Rahmen dieser Arbeit werden Zwischenergebnisse aus dem zweijährigen Forschungsprojekt ReCarbofit präsentiert, in dem vorwiegend die Entwicklung von einer Inspektions-, Reparatur- und Testmethodik für beschädigte CFK-Komponenten im Vordergrund steht. Die Wahl der geeigneten Methode für die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) richtet sich vor allem an die Anforderungen und Bedürfnisse von kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) mit begrenzten finanziellen und personellen Ressourcen. Diese sind in *Abbildung 1 (a)* dargestellt. *Abbildung 1 (b)* zeigt die Ergebnisse einer Fallstudie durchgeführt bei KMUs hinsichtlich der Anzahl an aufgetretenen Fehlern pro Jahr in den einzelnen Prozessschritten. 29,5 % dieser Fehler sind derzeit reparabel. Eine weitere Befragung zeigte, dass 92,7 % der Fehler durch den Faktor Mensch hervorgerufen wurden, gefolgt von der Fertigungsmethodik (4 %) und dem Materialsystem selbst (2,4 %).

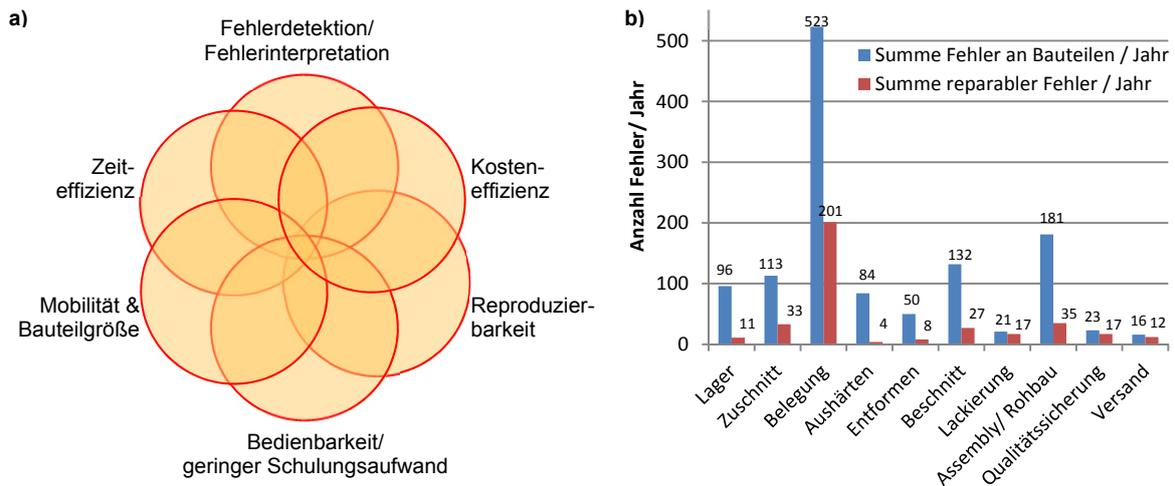


Abbildung 1. (a) Anforderungen von KMUs an das ZfP-Verfahren. (b) Anzahl der Fehler pro Jahr während der Produktion. Datenbasis: 5 Unternehmen.

Derzeitige Methoden zur Werkstoff- und Bauteilprüfung von CFK-Materialien sind vor allem die *materialografische Schliﬀpräparation*, die *Sichtprüfung (VT)* und der *Klopftest (Tap Test)*. Für die Bestimmung der Porosität und des Fasergehaltes wird auch die *nasschemische Analyse* verwendet, bei der die Probe zerstört wird.

In den verschiedensten CFK verarbeitenden Branchen haben sich neben der *VT* mittlerweile die *Ultraschallprüfung (UT)*, *Aktive Thermografie (IR)*, *Digitale Radioskopie (RT)* und *Röntgen Computertomografie (CT)* sehr stark als ZfP-Methoden etabliert. [4-7] Weitere ZfP-Methoden, die sich zum Teil noch im Forschungsstatus befinden, sind unter anderem: *Wirbelstromprüfung*, *Lamb Wellen (Guided Waves)*, *Akustische Emission*, *Shearografie*, uvm. [8-14]

In dieser Arbeit werden vor allem *VT*, *UT*, *IR*, *RT* und *CT* auf ihre Eignung für KMUs näher betrachtet und diskutiert.

2. Experimentelles

2.1 Probenbeschreibung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für den ersten ZfP-Methodenvergleich CFK-Testplatten aus 6 und 9 unidirektionalen (UD) Lagen Prepreg gefertigt. In weiterer Folge wurden unterschiedliche, zum Teil beschädigte, CFK-Komponenten herangezogen und diese mit ausgewählten ZfP-Methoden näher charakterisiert.

2.1.1 CFK-Testplatten

Es wurden verschiedene CFK-Testplatten bestehend aus einer unterschiedlichen Anzahl an UD-Lagen (MTM49-3 T1000 200 35%) für den ZfP-Methodenvergleich angefertigt. An 15 Platten wurden unterschiedliche Fehler zwischen der 3. und 4. Lage eingebracht (Lagenaufbau: $+40^\circ/-40^\circ/+35^\circ/-35^\circ/+30^\circ/-30^\circ$). Die eingebrachten Fehler sollen vor allem Fremdstoffeinschlüsse (z.B. Cutter Klinge, Metallspan, Stück eines Gummihandschuhs), Delaminationen (z.B. Backpapier, Wachs) oder Lufteinschlüsse (EPS-Perlen) darstellen und sind in *Abbildung 2 (a)* dargestellt. Die Plattengröße betrug $100 \times 100 \text{ mm}^2$, die Plattendicke lag bei ca. 0,8 mm. Drei weitere Platten wurden durch Impact-Tests mit 5, 8 und 15 J beansprucht und beschädigt.

Abbildung 2 (b, c, d) zeigt die Vorbereitung der reparierten CFK-Testplatten aufgebaut aus 9 UD Lagen: UD-Lagen $+30^\circ/-30^\circ/+40^\circ/-40^\circ/0^\circ/-40^\circ/+40^\circ/-30^\circ/+30^\circ$ mit je $190 \times 250 \text{ mm}^2$ Größe und einer Dicke von ca. 1,5 mm. Die Platten wurden durch Schäften mit konstantem Winkel (*b*) bzw. durch stufenförmiges Abtragen (*c*) für die Reparatur vorbereitet. Durch Wiederauffüllen der abgetragenen Lagen (*d*) und anschließendem Aushärten wurden diese repariert. Im Anschluss wurden die fertig wiederaufgefüllten und ausgehärteten Platten mittels CT und IR untersucht.

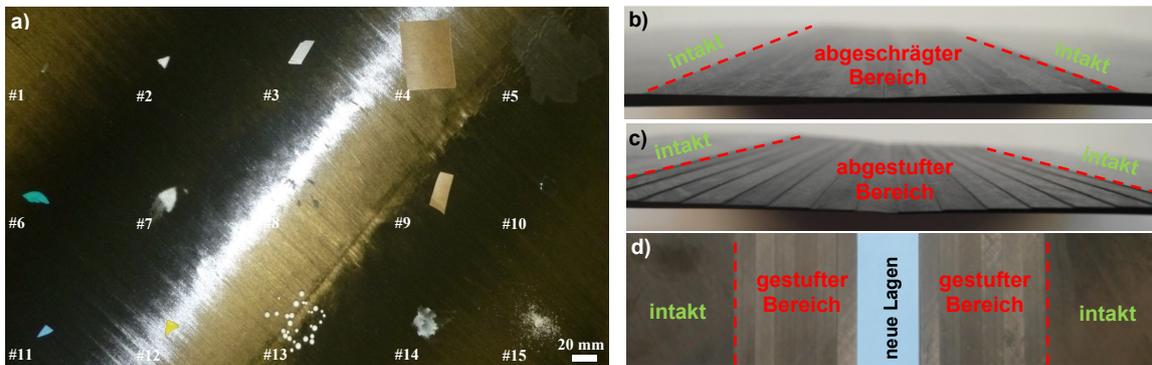


Abbildung 2. (a) Überblick eingebrachten Fehler aus *Tabelle 2* sowie zur Reparatur vorbereitete CFK-Platten (b, c, d) durch winkeliges Schäften (b) und stufenweises Abtragen (c) und Wiederauffüllen mit neuen Lagen (d).

2.1.2 Reale CFK-Komponenten

Neben den Testplatten wurden die in *Abbildung 3* dargestellten CFK-Komponenten mittels IR und CT untersucht. Bei den Fehlern handelt es sich entweder um Produktionsfehler, Schäden durch unsachgemäße Bauteilhandhabung oder Schäden verursacht durch Überbelastung. (*a*) zeigt drei Fahrradkurbeln vom Typ 1, wobei #3 bereits von außen ersichtliche Produktionsfehler aufweist. Eine weitere Fahrradkurbel vom Typ 1 wurde nach Überbelastung mittels CT untersucht. (*b*) zeigt eine Kurbel vom Typ 2, die ebenfalls nach Überbelastung mittels CT untersucht wurde. (*c*) zeigt den IR-Messaufbau eines kompletten Fahrradrahmens, der nach einem Sturz und dem daraus resultierenden Lenkereinschlag im Oberrohr des Rahmens beschädigt wurde.

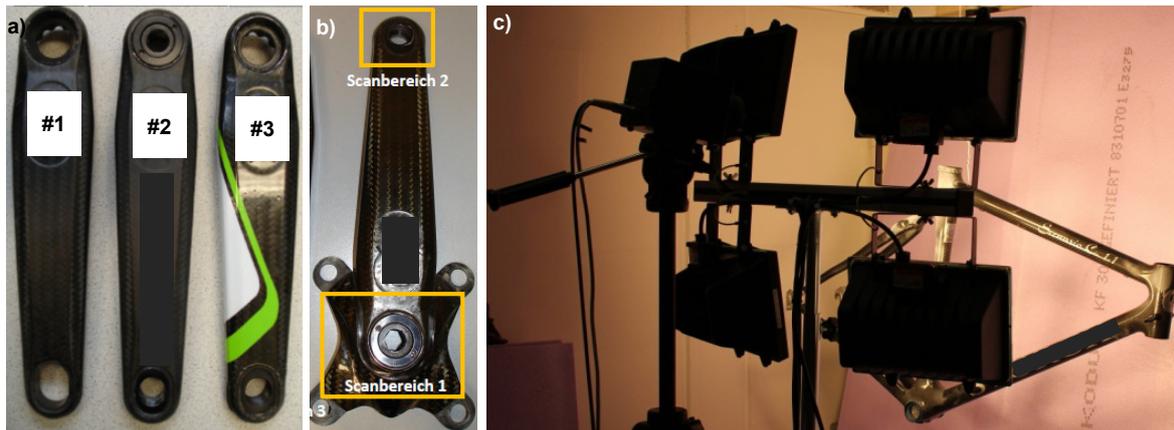


Abbildung 3. Untersuchte CFK-Komponenten: (a) Fahrradkurbeln (Typ 1), (b) Fahrradkurbel (Typ 2) nach Überbelastung und (c) Nach Sturz beschädigter CFK-Fahrradrahmen während der IR Messung.

2.2 Verwendete ZfP-Methoden

Die Sichtprüfung (VT) und visuelle Beurteilung der Bauteile erfolgte mit freiem Auge unter guten Lichtbedingungen. Die weiteren angewendeten ZfP-Methoden sowie die wichtigsten Anlagenspezifikationen sind in *Tabelle 1* aufgelistet.

Tabelle 1. Verwendete ZfP-Methoden für die Prüfung von CFK-Testplatten und CFK-Komponenten

ZfP-Methode	Anlagenspezifikationen
Ultraschallprüfung (UT)	<i>C-Scan Anlage:</i> AirTech HFUS 2400, Rasterschritte 0,5 mm Software von Hillgus, Schallgeschwindigkeit 3200 m/s
Aktive Thermografie 1 (IR-1)	<i>Kamera:</i> IRCAM Equus 81k M (320 x 256 px, 20 mK, 3,0 – 5,0 μm , $\sim 380 \text{ Hz}_{\text{Vollbild}}$) <i>Blitz-Anregung:</i> Bläsing (elektr. Energie: 6000 kJ, Pulszeit: 1,1 ms)
Aktive Thermografie 2 (IR-2)	<i>Kamera:</i> IR-TCM 640 (640 x 480 px, 70 mK, 7,5 -14 μm , 60 Hz) <i>Anregung:</i> 4x Heizstrahler (Lock-in/ Puls-Phasen Thermografie)
Computer Tomografie 1 (CT-1) und Digitale Radioskopie (RT)	<i>RayScan 250 E</i> - 225 kV Microfokus & 450 kV Minifokus Röntgenröhre - 2048 x 2048 px Flachbettdetektor - Min. Voxelgröße (VS): $\sim 5 \mu\text{m}$
Computer Tomografie 2 (CT-2)	<i>GE phoenix x-ray Nanotom 180 NF</i> - 180 kV nanofokus Röntgenröhre - 2304 x 2304 px Flachbettdetektor - Min Voxelgröße (VS): $\sim 0,5 \mu\text{m}$

3. Ergebnisse

3.1 CFK-Testplatten

Abbildung 4 zeigt einen Teil der Ergebnisse aus dem ZfP-Methodenvergleich sowie ein Detailbild der Fehlerpräparation an den CFK-Testplatten. Bei Fehlern aus Metall (z.B. Cutter Klinge) konnten alle Methoden den Fehler (Fremdkörper) eindeutig in der CFK-Testplatte identifizieren. Je geringer der Absorptionskontrast zwischen CFK-Matrix und gesuchtem Fehler ausgeprägt ist, desto schwieriger wird es die Fehler mittels RT oder CT noch gut erkennen zu können (z.B. Gummihandschuh oder Prepregfolie). Bei zusätzlich sehr dünner Fehlerdicke, wie es bei Delaminationen der Fall sein kann (Backpapier), weisen IR und US deutliche Vorteile gegenüber den röntgenbasierten Methoden auf. Bei

geringen Fehlergrößen, wie beispielsweise bei den Platten mit Wachseinschluss, wird es bei allen Methoden zunehmend schwieriger, den Fehler noch klar zu detektieren. Das Wachs löst sich durch den Aushärtevorgang auf und verteilt sich vorwiegend zwischen den einzelnen Kohlefasern. Bei IR und UT ist ein geringfügig abgedunkelter Bereiche zu erkennen, mittels CT sind vor allem in Faserorientierung kleinere Delaminationen bzw. Mikroporositäten zwischen den Fasern sichtbar und mittels RT konnte an dieser Probe kein Fehler detektiert werden. Luftporen (EPS-Perlen) die durch Porositäten im Werkstoff hervorgerufen werden, können mit allen Methoden eindeutig identifiziert werden. Generell haben RT und UT bei den gewählten Testplatten Nachteile, da die unebene Plattenoberfläche, verursacht durch Falten, sehr stark in die Auswertung miteinfließt und die Fehlerinterpretation erschwert. Ersichtlich ist dies beispielsweise an der Platte mit der Prepregfolie bei RT oder der Platte mit dem Stück Gummihandschuh und Wachs bei UT.

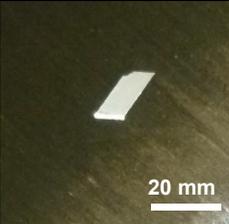
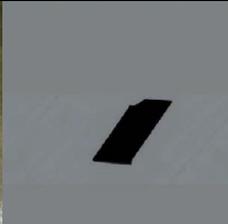
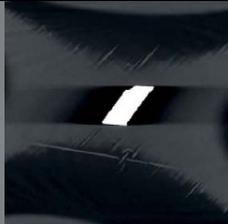
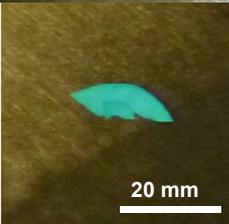
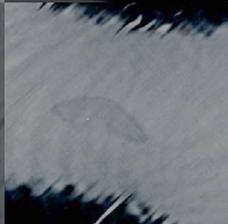
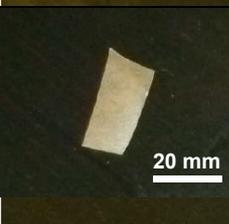
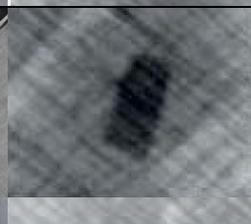
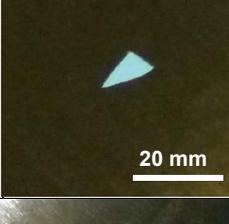
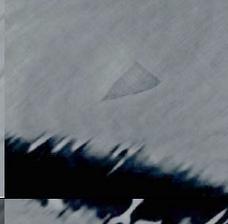
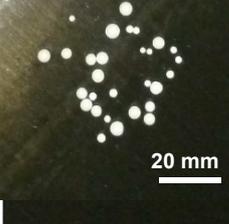
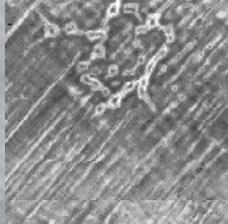
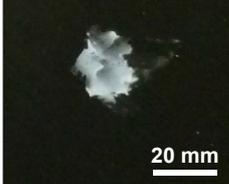
	Fehlerpräparation	RT	CT-1	IR-1 (Phasenbild)	UT
#3 Cutter Klinge					
#6 Gummihandschuh					
#9 Backpapier					
#11 Prepregfolie					
#13 EPS-Perlen					
#14 Wachs					

Abbildung 4. Methodenvergleich an verschiedenen definierten Fehlern untersucht mittels RT, CT, IR und US. Die Fehler wurden zwischen 3. und 4. Lage eingebracht.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die 15 verschiedenen Fehlerarten und die Eignung der ZfP-Methode, diese zu erkennen. Bei der VT wurden die Fehlerplatten von beiden Seiten begutachtet. Würden die Platten nur von einer Seite zugänglich sein, wären deutlich weniger Fehler von außen sichtbar. Alle Fehlertypen die nur „schlecht“ detektiert werden konnten, erfordern zur richtigen Einschätzung der Anzeige und zur Defektinterpretation, relativ viel Erfahrung mit der jeweiligen ZfP-Methode.

Tabelle 2. ZfP-Methodenvergleich an 15 verschiedenen Fehlertypen in CFK-Testplatten aus 6 UD-Lagen gefertigt. Fehler befanden sich zwischen 3. und 4. Lage.

Probe #: Fehler	VT	UT	RT	CT	IR
1: Metallspan	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
2: Rohacell	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
3: Cutter-Klinge	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
4: Backpapier-groß	Ja (schlecht)	Ja	Ja (schlecht)	Ja (schlecht)	Ja
5: Trennmittel	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
6: Gummihandschuh	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
7: Vlies	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
8: Staub	Nein	Ja (schlecht)	Ja (schlecht)	Ja (schlecht)	Ja
9: Backpapier-klein	Nein	Ja	Ja (schlecht)	Ja (schlecht)	Ja
10: Folien-Trennmittel	Nein	Ja (schlecht)	Nein	Ja	Ja (schlecht)
11: UD-Prepreg-Folie	Nein	Ja	Ja (schlecht)	Ja	Ja
12: Dichtband	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
13: EPS-Perlen	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
14: Wachs	Nein	Ja (schlecht)	Nein	Ja	Ja (schlecht)
15: Rohacell-Staub	Ja (schlecht)	Ja	Ja	Ja	Ja
Detektierte Fehler:	9/15	14/15	12/15	14/15	14/15

Abbildung 5 zeigt CFK-Testplatten die mittels Impact beschädigt wurden. Bei 15 und 8 J wurde die Probe schon fast vollständig zerstört, wohingegen bei einer Belastung von 5 J mittels VT keine eindeutige Schädigung festgestellt werden konnte. Mittels IR und CT konnten bei 5 J noch eindeutige Delaminationen in der CFK-Testplatte detektiert werden.

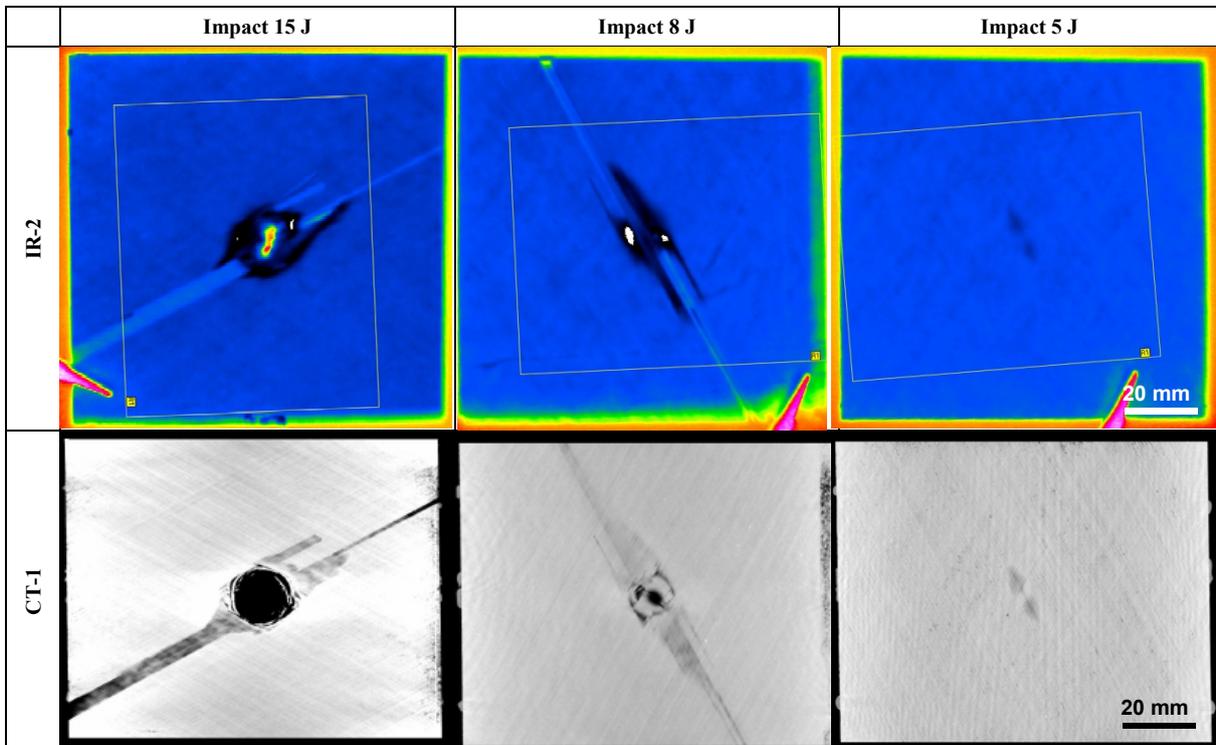


Abbildung 5. Mittels Impact (15, 8 und 5 J) beschädigte CFK-Platten geprüft mittels CT und IR.

Abbildung 6 zeigt reparierte CFK-Platten, die durch stufenweises Abtragen und neu Auflegen der einzelnen Lagen wieder instand gesetzt wurden. IR und CT ermöglichen die Darstellung der einzelnen Reparaturstufen und möglicher Anbindungsfehler. Zusätzlich ist bei beiden Methoden die Faserorientierung erkennbar. Bei IR (a) wird die Orientierung als Resultat der höheren Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung erkannt, verschwimmt aber etwas auf Grund der thermischen Diffusion. Mittels CT kann jede einzelne Lage gesondert betrachtet werden, wodurch zum Beispiel in Lage 5 (b) unterschiedliche Faserorientierungen zwischen dem intakten und dem reparierten Bereich ersichtlich sind.

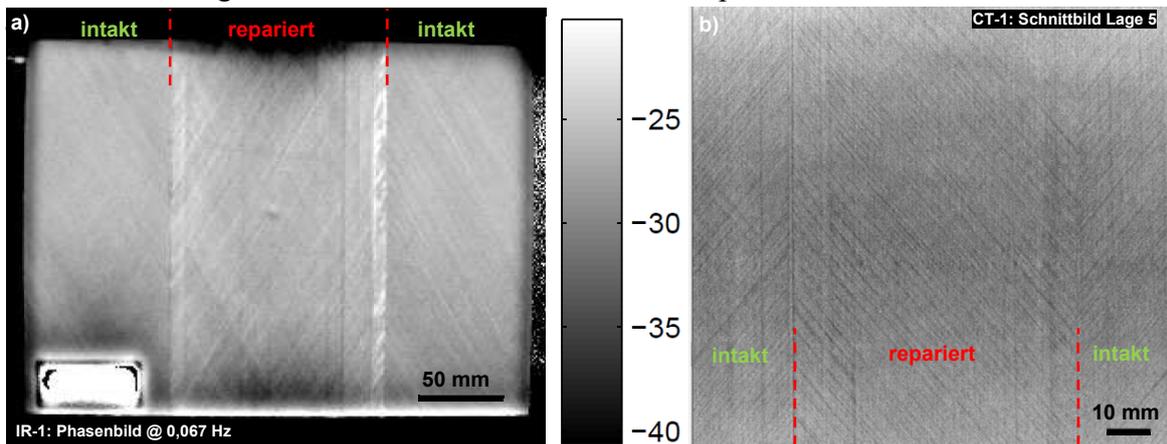


Abbildung 6. Die, durch stufenweises Abtragen und neu auflegen der Lagen reparierte CFK-Platte geprüft mittels IR (a) und CT (b). Die einzelnen Reparaturstufen können mit beiden ZfP-Methoden detektiert werden.

3.2 Reale CFK-Komponenten

In *Abbildung 7* sind CFK-Komponenten mit einem Aluminiumgewinde vom Typ 1 zu sehen, die mittels IR und CT geprüft wurden. Das IR-Bild (a) zeigt unterschiedlich schnelle Wärmeausbreitung im Bauteil (orange hervorgehoben). Die Interpretation mithilfe des CT-Schnittbildes (b) entlang der Bauteiloberfläche (c) zeigt, dass in diesen Bereichen dünnere Wandstärken als Ursache für den schnelleren Wärmefluss verantwortlich sind.

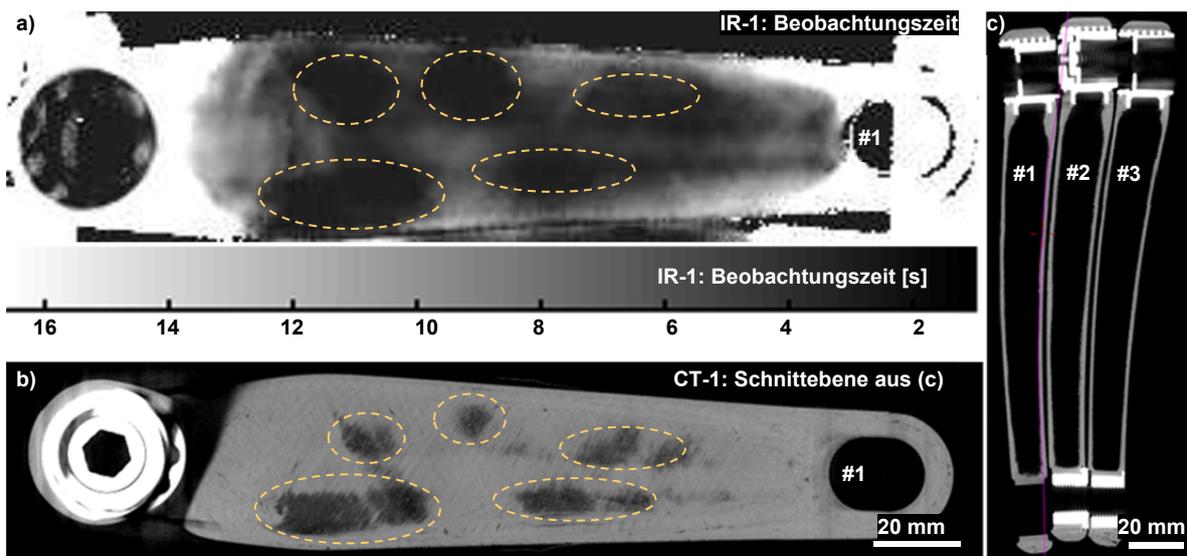


Abbildung 7. CFK-Fahrradkurbel Typ 1, wobei das IR (a) und das CT (b) Bild ungleiche Wandstärken zeigen. In (c) ist die CT-Schnittebene (violett) entlang der Bauteiloberfläche von Bauteil #1 eingezeichnet

Abbildung 8 (a) zeigt eine Fotografie der Fahrradkurbeln des Typ 1 wobei #3 als Ausschussbauteil gilt. Im dazugehörigen IR-Bild (b) sind deutliche Fehleranzeigen bei #3

ersichtlich, die mittels CT in (c) bestätigt werden konnten. Die Bauteile #1 und #2 weisen hingegen kaum Porositäten auf. Im CT-Schnittbild axial zum Aluminiumgewinde sind in (d) zusätzlich noch Anbindungsfehler zwischen dem Aluminium und dem CFK ersichtlich. Das CT-Schnittbild in (e) zeigt einen Bildausschnitt der CFK-Fahrradkurbel Typ 2 nach Überbelastung. Hier kann deutlich ein Riss im Aluminiumgewinde detektiert werden.

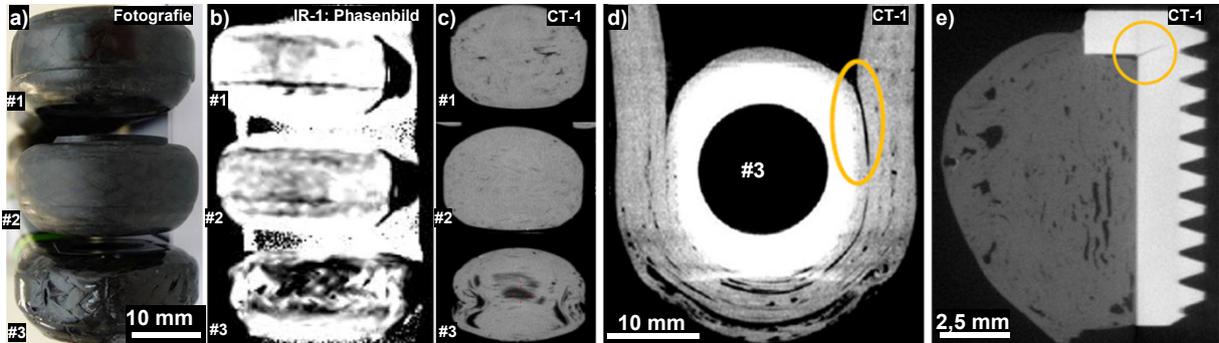


Abbildung 8. CFK-Fahrradkurbeln Typ 1 (a) bis (d) und Typ 2 (e): Die Bilder (b und c) zeigen im Bauteil #3 hohe Porositäten sowie Anbindungsfehler (d). (e) zeigt einen Riss im Aluminium nach Überbelastung.

Abbildung 9 zeigt einen CFK-Fahrradrahmen, der nach einem Sturz beschädigt worden ist. Von außen ist nur ein relativ geringer Schaden durch den Lenkereinschlag zu sehen, welcher auch mittels IR eindeutig bestätigt wurde. Zusätzlich konnte durch IR noch großflächige Delaminationen im Bereich des durch den Lenker verursachten Impacts festgestellt werden.

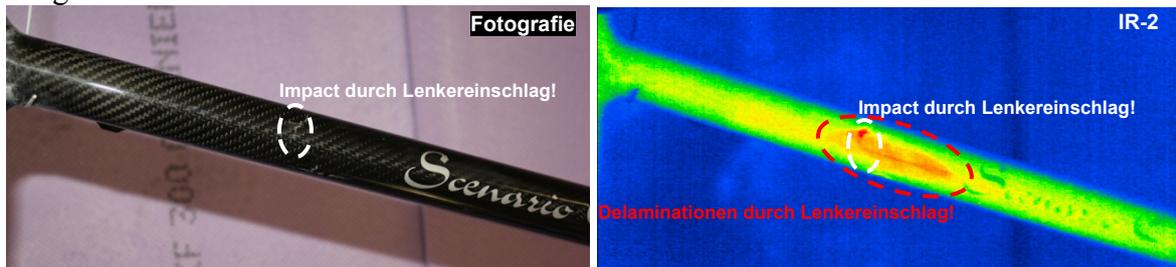


Abbildung 9. CFK-Fahrradrahmen der nach einem Sturz. Der Lenkereinschlag am Rahmen führte zu Delaminationen, die mittels IR eindeutig festgestellt werden konnten.

4. Zusammenfassung und Diskussion

Anhand der untersuchten CFK-Testplatten und CFK-Komponenten wurden die unterschiedliche ZfP Methoden miteinander verglichen und anhand der Anforderungen aus *Abbildung 1 (a)* in *Tabelle 3* bewertet. CT zeigt eine sehr gute Fehlererkennbarkeit und ist durch die 3D-Bildgebung und gute Messauflösung oft die einzige Möglichkeit, um Fehleranzeigen richtig interpretieren und quantifizieren zu können. Als Beispiel sind in den Bildern in *Tabelle 3* die EPS-Perlen (Fehler #13 aus den CFK-Testplatten) als axialer Schnitt und als 3D-Segmentierung dargestellt. Anhand der Segmentierung lässt sich für den gewählten Auswertebereich ($40 \times 40 \times 2 \text{ mm}^3$) beispielsweise eine Porosität von 1,75 % berechnen. Nachteile von CT sind vor allem die relativ hohen Kosten, begrenzte Mobilität und begrenzte Bauteilgröße. UT als ZfP-Standardverfahren liefert gute Ergebnisse, wobei IR in Zukunft für KMUs, als sehr zeiteffizientes Verfahren mit hoher Mobilität, überschaubaren Kosten und vergleichbarer Fehlerdetektion, einen hohen Stellenwert in der zerstörungsfreien Prüfung einnehmen wird. Einschränkungen von IR könnten vor allem der erforderliche höhere Schulungsaufwand und die limitierte Fehlererkennbarkeit bei dickeren Wandstärken ($> 5 \text{ mm}$) von CFK-Komponenten [15] sein.

Tabelle 3. ZfP-Methodenvergleich an 15 verschiedenen Fehlertypen in CFK-Testplatten aus 6 UD-Lagen gefertigt. Fehler befanden sich zwischen 3. und 4. Lage.

Anforderung von KMU	ZfP-Methode				
	VT	UT	IR	RT	CT
Fehlerdetektion/ Interpretation	-	+++	+++	+	+++ +
Kosteneffizienz	+++	+	+++	-	-
Zeiteffizienz	+++	++	+++	++	-
Mobilität/ Bauteilgröße	+++	++	+++	++	-
Reproduzierbarkeit	-	+++	+++	+++	+++
Bedienbarkeit/ Schulungsaufwand	++	++	-	-	-
Maximale Auflösung	+	+	++	++	+++

Legende: - nicht erfüllt, + ausreichend, ++ gut, +++ sehr gut bewertet, + 3D-Information

Danksagung

Die Arbeiten wurden durch das Land OÖ sowie der FFG im Rahmen des EraSME/COIN Projektes „ReCarbofit“ (#834782) finanziert. Weiterer Dank gilt den beteiligten Forschungs- und Firmenpartner für die Herstellung der Testplatten und Bereitstellung der CFK-Komponenten.

Referenzen

- [1] M.f. Ashby, D.R.H. Jones, Werkstoffe 2: Metalle, Keramiken und Gläser, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe, Elsevier GmbH, München, Germany, 2007.
- [2] P. Rehmet, CFK mit deutlichem Plus, K-Zeitung, Ausgabe 20, 43. Jahrgang, 2012. Page 4.
- [3] Jahn, B.: Composites-Marktbericht: Marktentwicklungen, Herausforderungen und Chancen, 2011.
- [4] R. Oster, Herausforderungen an die ZfP bei Ihrer Anwendung an Faserverbundbauteilen, DACH-Jahrestagung 2012, Graz, Austria, 2012.
- [5] J. Kastner - Editor - Proceedings Industrielle Computertomografiertagung 2012, Wels, Österreich, 2012.
- [6] B. Plank, J. Sekelja, G. Mayr, J. Kastner - Porositätsbestimmung in der Flugzeugindustrie mittels Röntgen-Computertomografie - Proceedings Industrielle Computertomografie Fachtagung 2010, Wels, Österreich, 2010, pp. 25-34.
- [7] G. Mayr, B. Plank, J. Sekelja, G. Hendorfer, Active thermography as a quantitative method for non-destructive evaluation of porous carbon fiber reinforced polymers, NDT & E International, Volume 44, Issue 7, November 2011, Pages 537–543.
- [8] G. Mook, R Lange, O. Koeser, Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents, Composites Science and Technology, Volume 61, Issue 6, May 2001, Pages 865–873.
- [9] M. Pan, Y. He, G. Tian, D. Chen, F. Luo, Defect characterisation using pulsed eddy current thermography under transmission mode and NDT applications, NDT & E International, Volume 52, November 2012, Pages 28–36.
- [10] T. Prasse, W. Bauhofer, K. Schulte, F. Michel, G. Mook, In situ Schädigungsüberwachung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mittels elektrischer Methoden, DGZfP-JAHRESTAGUNG 2001, Berichtsband 75-CD, Berlin, Germany, 2001.
- [11] W. Hillger, Lamb-Wellen zur Schadensanzeige in faserverstärkten Kunststoffen, DGZfP-Jahrestagung 2005, DGZfP-Berichtsband 94-CD, Rostock, Germany, 2005.
- [12] J. Bohse, Schallemissionsprüfung (AT) von CFK-Druckgasbehältern, DACH - Jahrestagung 2004, Salzburg, Austria, 2004.
- [13] P. Menner, P. Cianciafara, H. Gerhard, G. Busse, Lockin-Shearografie zur zerstörungsfreien Prüfung von Faserverbundwerkstoffen, 21. Stuttgarter KunststoffKolloquium (2009), 5/V6.
- [14] P. Menner, G. Busse, Dynamic shearography for inspection of aerospace structures, Proceedings ETNDT5, Greece, 2011.
- [15] K. Srinivas, A.O. Siddiqui, J. Lahiri, Thermographic Inspection of Composite Materials, Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec. 7 - 9, Hyderabad, India, 2006.