

Validierung der aktiven Thermografie mittels CT zur Charakterisierung von Inhomogenitäten und Fehlstellen in CFK

Christiane MAIERHOFER, Mathias RÖLLIG, Karsten EHRIG, Dietmar MEINEL
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Unter den Eichen 87,
12205 Berlin, Kontakt: christiane.maierhofer@bam.de

Kurzfassung. Aktive Thermografieverfahren werden immer häufiger zur zerstörungsfreien Prüfung von Faserverbundwerkstoffen eingesetzt, da diese völlig berührungslos arbeiten und sowohl zur Prüfung großflächiger Strukturen als auch von großen Stückzahlen kleinerer Komponenten in der Fertigung eingesetzt werden können. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit Untersuchungen an typischen Defekten und Inhomogenitäten, die bereits während der Fertigung von CFK Bauteilen entstehen oder unbeabsichtigt mit eingebaut werden. Systematische Untersuchungen wurden mit Blitzthermografie in Reflexions- und Transmissionskonfiguration und mit Computertomographie (CT) durchgeführt. Die CT wurde dabei als Referenzverfahren genutzt, da dieses Verfahren auch kleinere Defekte mit relativ hoher Ortsauflösung und unabhängig von der Tiefe darstellen kann.

1. Einführung

Die aktive Thermografie mit Blitzanregung zur zerstörungsfreien Prüfung von Faserverbundwerkstoffen kann sowohl während der Produktion als auch bei der Inspektion von Bauteilen vor Ort eingesetzt werden [1,2]. Systematische Untersuchungen wurden bisher zum Nachweis von Poren und zur Charakterisierung von Impact-Schäden durchgeführt [3,4]. Es fehlen jedoch noch Untersuchungen zu typischen Fehlern, die während der Produktion auftreten können. Ziel des EU-Projektes Thermobot war daher die Validierung der aktiven Thermografie an Referenzprobekörpern mit der Computertomographie (CT). Die untersuchten CFK-Platten enthielten als Defekte und Inhomogenitäten metallische und nichtmetallische Fremdkörper, Verunreinigungen mit Klebstoffen oder Wachsresten, inhomogene Nachinjektionen harzarter Bereiche, Faserfehlausrichtungen und Faserbrüche. Zusätzlich wurden zwei Platten mit insgesamt vier Kleberaupen verklebt, die unterschiedliche künstliche Inhomogenitäten aufwiesen.

Auch die CT wurde in den letzten Jahren sehr erfolgreich zur Charakterisierung der Porosität, von internen Rissen und zur Untersuchungen der Faserorientierung in CFK sowie zur Bestimmung von Faserlänge, Faserlängenverteilung und Partikeldurchmesser in kurzfaserver- und partikelfaserverstärkten Polymeren eingesetzt [5,6,7,8]. Vorteile des Verfahrens sind eine von der Position der Fehlstelle unabhängige Ortsauflösung, die unter anderem von der Brennfleckgröße der Mikrofokus Röntgenröhre mitbestimmt wird. Typischerweise liegt die Voxelgröße zwischen 1 und 10 μm . Die Ergebnisse der eingesetzten Prüfverfahren werden im Folgenden jeweils bezogen auf die Inhomogenitäten miteinander verglichen und die Vor- und Nachteile jeder Messkonfiguration diskutiert.



2. Experimentelles

2.1 Herstellung der Probekörper

Von der Fa. Benteler-SGL wurden für das Thermobot-Projekt vier CFK Platten R1 bis R4 mit Abmessungen von jeweils 120 x 120 mm², Dicken zwischen 1,8 und 2,2 mm und mit unterschiedlichen Inhomogenitäten hergestellt. Jede Platte besteht aus fünf Lagen mit biaxialem Gewebe mit 6k Kohlefaserbündeln und wurde mit der RTM (resin transfer moulding) Technologie mit Epoxydharz gefertigt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Position der Inhomogenitäten in den einzelnen Probekörpern und in den verschiedenen Lagen. Nach der Herstellung waren in den Platten R1 und R2 immer noch Bereiche ohne Harz vorhanden, die manuell nachinjiziert wurden. R3 und R4 wurden mit vier Kleberaupan unter verschiedenen Bedingungen miteinander verklebt.

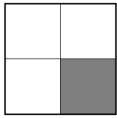
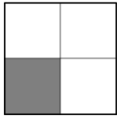
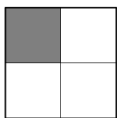
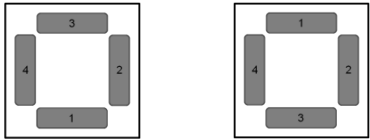
Probekörper Lage	R1	R2	R3	R4
5	-	-	-	-
4 	Schalungsöl	Wachsreste, zwei Flecken mit einem Durchmesser von jeweils 6 mm	Dreckpartikel	-
3 	Holzspan mit einer Länge von ca. 11,5 mm	Sprühkleber, runder Fleck mit einem Durchmesser von ca. 14,4 mm	Risse zweier sich kreuzender Faserbündel	Papierstück mit einem Durchmesser von ca. 7 mm
2 	-	Dreckpartikel	Harzrest ohne Härter	Sprühkleber, runder Fleck mit einem Durchmesser von ca. 14,4 mm
1 	Zusätzliche Faser mit einer Länge von ca. 54 mm	-	Aluminiumpartikel, verteilt über eine Fläche von ca. 30 x 30 mm ²	Wachsreste, drei Flecken mit einem Durchmesser von jeweils 5 mm
Zusätzliche Nachinjektionen und Verklebungen	Nachinjektion im unteren Bereich, ca. 12 % der Gesamtfläche	Nachinjektion im oberen Bereich, ca. 40 % der Gesamtfläche	 1: Schalungsöl auf der Plattenoberfläche 2: ohne Sandstrahlen 3: i.O. 4: falsche Klebermischung	

Tabelle 1. Inhomogenitäten und Einschlüsse in den verschiedenen Lagen der Probekörper R1 bis R4. Die Ansichten beziehen sich auf die Vorderseite, die der 5. Lage entspricht (die 1. Lage ist die Rückseite). Die ungefähre Position der Fehlstellen ist durch die grauen Quadranten markiert.

2.2 Aktive Thermografie

Für die Messungen mit aktiver Thermografie mit Blitzanregung wurden vier synchronisierte Blitzlampen verwendet, deren Blitzlänge im optischen ca. 2,6 ms beträgt und die eine Aufnahmeenergie von insgesamt 24 kJ aufweisen. Zur Reduzierung störender Infrarotstrahlung wurden die Blitzlampen mit Polymethylmethacrylate (PMMA) Platten abgeschirmt. Zur Erfassung der von den Probekörpern abgestrahlten Infrarotstrahlung wurde eine gekühlte Infrarotkamera mit einem 640 x 512 Pixel großen InSb-Detektor eingesetzt (2 bis 5 μm). Bei einer Bildwiederholrate von 100 Hz wurde für einen Temperaturmessbereich von 0 bis 80 °C eine Integrationszeit von 0,72 ms gewählt. Es wurde ein 25 mm Objektiv mit einem Öffnungswinkel von 21° x 17° eingesetzt.

Messungen erfolgten sowohl in Reflexions- als auch in Transmissionskonfiguration. Für die Reflexionsmessungen befanden sich IR-Kamera und Blitzlampen auf derselben Seite des Probekörpers, für die Transmissionsmessungen auf gegenüberliegenden Seiten.

Für die Datenauswertung wurden innerhalb der jeweiligen Sequenzen die Thermogramme vor der Erwärmung von der Gesamtsequenz subtrahiert. In einem zweiten Schritt wurden die Thermogramme mit optimalem Fehlstellenkontrast ausgewählt. Als drittes wurde die Puls-Phasen-Thermografie (d. h. Berechnung von Amplituden- und Phasenbilder mit Hilfe der Fast Fourier Transformation [9]) auf die gesamten Abkühlsequenzen angewendet und im Anschluss die entsprechenden Phasenbilder selektiert.

2.3 CT

Für die CT wurde in der BAM eine 225 kV Mikrofokus Röntgenröhre eingesetzt, wobei für die Messungen die Energie auf 180 kV eingestellt wurde und ein Vorfilter mit 0,5 mm Cu und 0,25 mm Ag zur Reduzierung der Aufhärtung der Röntgenstrahlung verwendet wurde. Mit einem Flachdetektor mit einer Größe von 2048 x 2048 Pixeln wurde bei der gegebenen Probengeometrie eine Voxelgröße von 81 μm erreicht. Die vier Proben wurden hintereinander und parallel zueinander angeordnet. Digitale Radiografieaufnahmen wurden während der 360° Rotation in 2400 Winkelschritten aufgenommen, wobei jede Projektion 20 s belichtet wurde. Die Bildrekonstruktion erfolgte mit der in der BAM entwickelten Standardsoftware für die gefilterte Rückprojektion.

3. Ergebnisse

3.1 Nachinjizierte Bereiche

Bei den nachinjizierten Bereichen wird davon ausgegangen, dass diese die Volumeneigenschaften des Materials deutlich beeinflussen. Daher wurden hier die Transmissionsmessungen bei der Thermografie ausgewertet, während die Kontraste der CT jeweils über die gesamte Probendicke gemittelt wurden. Bild 1 zeigt für jede der beiden Proben R1 und R2 ein Thermogramm der Transmissionsmessung nach der Blitzanregung, ein entsprechendes Phasenbild der Sequenz bei 0,2 Hz und ein über die Dicke der Proben gemitteltes CT-Bild.

Im Thermogramm der Probe R1 erscheint der nachinjizierte Bereich (linke untere Ecke) wärmer, im Thermogramm der Probe R2 kühler (s. oberer Bereich). Beide nachinjizierten Bereiche sind etwas dünner als das ungestörte Material, wodurch die stärkere Erwärmung bei R1 erklärt werden kann. Im Probekörper R2 enthält der nachinjizierte Bereich einen deutlich höheren Porenanteil als der ungestörte Bereich, was zu einer Reduzierung der Diffusivität und damit zu einer Verzögerung der Erwärmung

führt. Diese Kontraste werden in den Phasenbildern noch etwas deutlicher. In den CT Bildern erscheinen die nachinjizierten Bereiche in beiden Probekörpern dunkler, was auf eine geringere Absorption hinweist, die sowohl durch die geringere Materialstärke als auch durch den höheren Porenanteil (geringere Dichte) hervorgerufen wird.

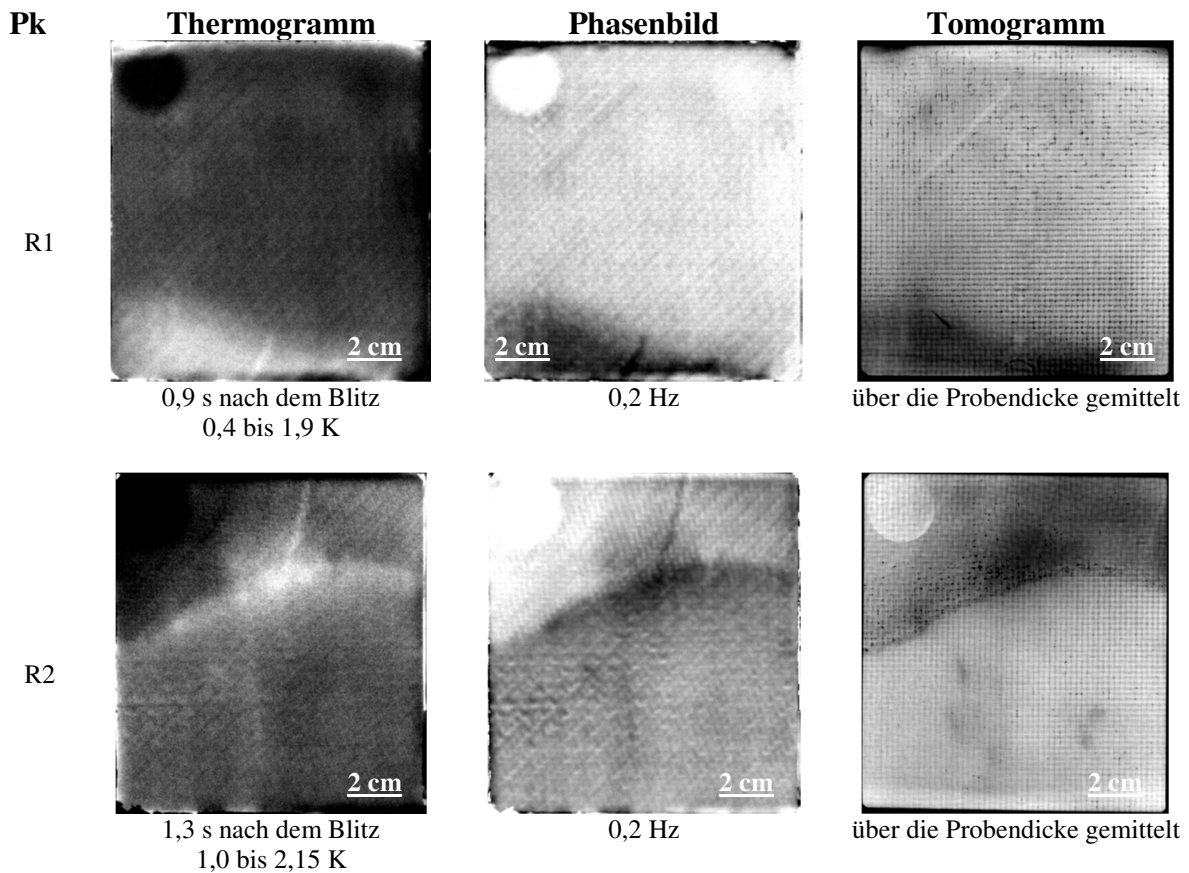


Bild 1. Vergleich der Ergebnisse der Thermografie in Transmissionskonfiguration und der CT an den nachinjizierten Bereichen der Probekörper R1 und R2. Temperaturdifferenzen in den Thermogrammen nehmen von schwarz zu weiß zu, während in den Tomogrammen die Dichte von schwarz zu weiß zunimmt. Die Kantenlänge der Proben beträgt 120 x 120 mm.

3.2 Verunreinigungen mit Fremdpartikeln

Zum Vergleich der Nachweisbarkeit der Verunreinigungen mit Fremdpartikeln sind die Ergebnisse der Reflexionsmessungen mit Thermografie und ausgewählte Schnitte der CT in Bild 2 dargestellt. In der ersten Reihe sind die Ergebnisse bezüglich des Holzsplitters in der 3. Lage des Probekörpers R1, in der zweiten Reihe des Sprühklebers (3. Lage des Probekörpers R2), in der dritten Reihe der Wachsreste (4. Lage des Probekörpers R2) und in der 4. Reihe der Aluminiumteilchen (1. Lage des Probekörpers R3) dargestellt.

Es können die folgenden Beobachtungen zusammengefasst werden:

- Der Holzsplitter kann mit beiden Verfahren eindeutig detektiert und auch seine Länge (11,5 mm) gemessen werden. Im Thermogramm erscheint der Holzsplitter kühler, d. h. er weist eine höhere Effusivität als das umgebende Material auf. Im Tomogramm erscheint der Holzsplitter aufgrund seiner geringeren Dichte dunkler.
- Der Sprühkleber kann nur sehr schwach im Tomogramm als runder Fleck mit einem Durchmesser von 14,4 mm detektiert werden, s. Pfeil. Im Thermogramm und im Phasenbild ist er nicht zu sehen.

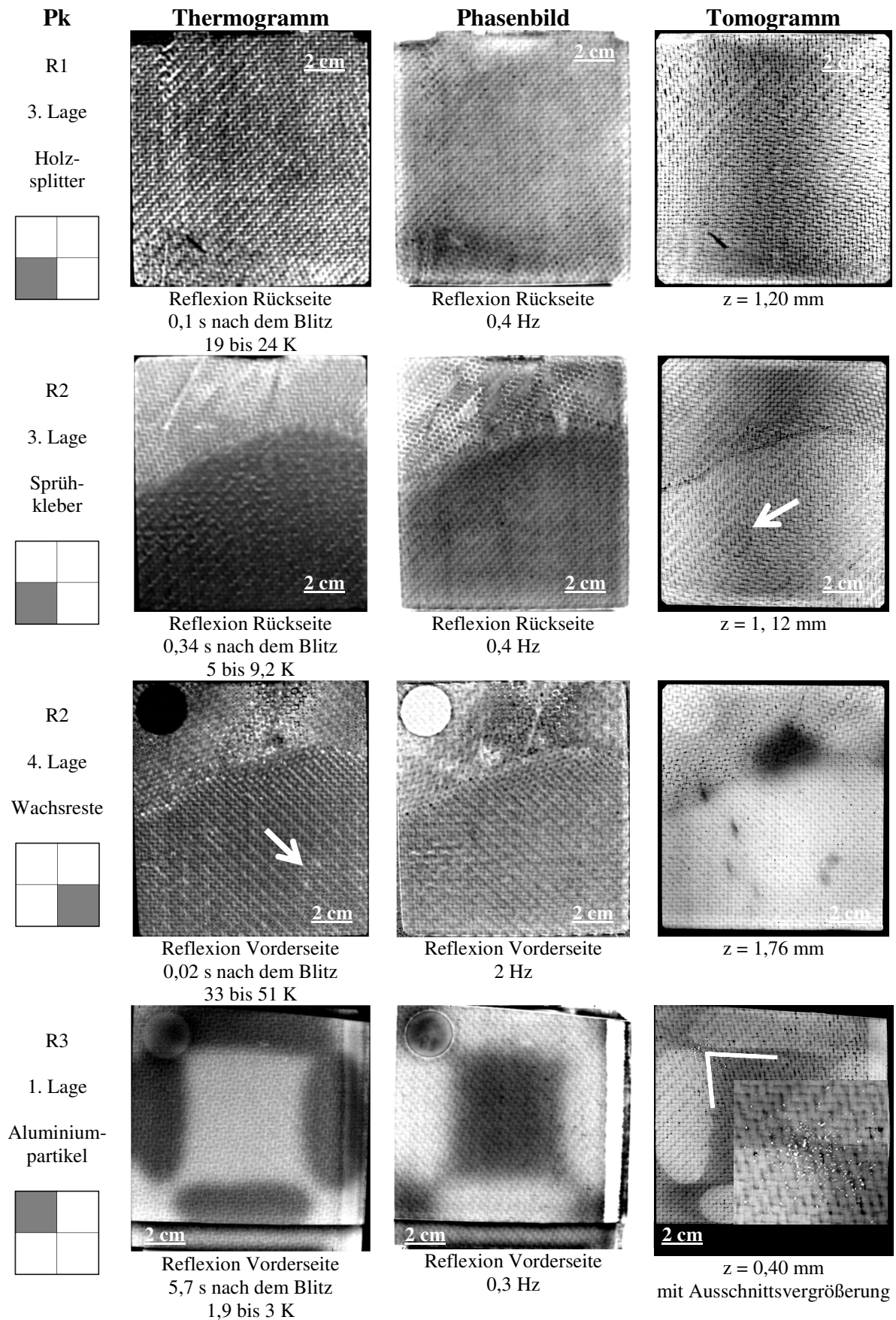


Bild 2. Vergleich der Ergebnisse der Thermografie in Reflexionskonfiguration und der Schnitte der CT in der angegebenen Tiefe z für die verschiedenen Verunreinigungen mit Fremdpartikeln. Temperaturdifferenzen in den Thermogrammen nehmen von schwarz zu weiß zu, während in den Tomogrammen die Dichte von schwarz zu weiß zunimmt. Die Kantenlänge der Proben beträgt 120 x 120 mm.

- Die Wachsreste sind im Tomogramm als zwei kleinere Flecken im unteren rechten Quadranten des Probekörpers klar zu erkennen. Die zusätzlichen dunkleren Flecken im linken Bereich können sichtbaren Oberflächendefekten (Eindellungen) zugeordnet werden. Die beiden Wachsreste können auch im Thermogramm erkannt werden (s. Pfeil), sie erscheinen dort aber nur sehr schwach und liegen an der Nachweisgrenze.
- Die Aluminiumpartikel sind sehr klein und können nur mit der CT im Tomogramm in der Vergrößerung als helle Punkte erkannt werden.

3.3 Unregelmäßigkeiten in den Kohlefasern

Bild 3 zeigt Thermogramme, Phasenbilder und Tomogramme des Probekörpers R1 mit dem zusätzlichen Faserbündel in der 1. Lage und des Probekörpers R3 mit den Brüchen von zwei sich kreuzenden Kohlefasern in der 3. Lage.

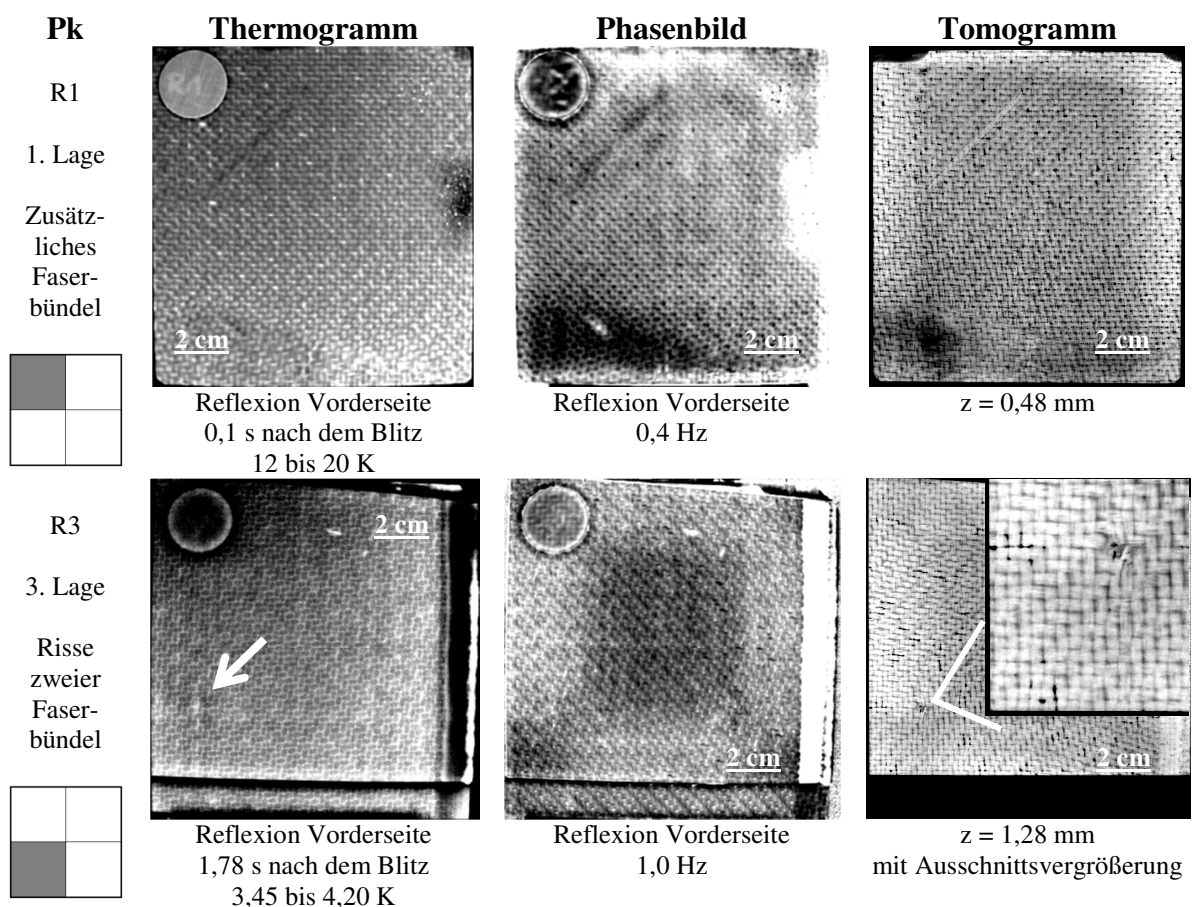


Bild 3. Vergleich der Ergebnisse der Thermografie in Reflexionskonfiguration und der Schnitte der CT in der angegebenen Tiefe z für die verschiedenen Unregelmäßigkeiten der Kohlefasern (oben: zusätzliche Faser, unten: Faserbruch). Temperaturdifferenzen in den Thermogrammen nehmen von schwarz zu weiß zu, während in den Tomogrammen die Dichte von schwarz zu weiß zunimmt. Die Kantenlänge der Proben beträgt 120 x 120 mm.

Beide Unregelmäßigkeiten lassen sich nachweisen:

- Das zusätzliche Faserbündel ist deutlich im Thermogramm, im Phasenbild und auch im Tomogramm zu erkennen und mit beiden Verfahren kann eine Länge von 54 mm ermittelt werden. Wie erwartet ist die Ortsauflösung im Tomogramm am höchsten. Im Tomogramm lässt sich die Faser wie erwartet unterhalb der ersten Lage in einer Tiefe von ca. 0,48 mm orten. Im

Thermogramm ergibt sich der höchste thermische Kontrast jedoch erst in der Reflexionsmessung von der gegenüberliegenden 5. Lage aus (von der Vorderseite, nicht wie erwartet von der 1. Lage aus, d. h. von der Rückseite). Die Faser erscheint etwas kühler als die Umgebung. Daher ist es wahrscheinlich, dass sich mit der Thermografie nicht das zusätzliche Faserbündel, sondern der sich darüber befindliche komprimierte Bereich besser nachweisen lässt.

- Die Risse in den sich kreuzenden Faserbündeln sind im Tomogramm insbesondere in der Vergrößerung klar zu erkennen. Nur wenn der Ort des Schadens bekannt ist, lässt sich auch im Thermogramm eine Inhomogenität an dieser Stelle als heller und damit wärmerer Punkt erkennen. Dieser ist jedoch nahe der Nachweisgrenze des Verfahrens.

3.4 Verklebungen

Zum Vergleich der Ergebnisse der Untersuchungen an der vier unterschiedlichen Kleberauppen, die die Probekörper R3 und R4 verbinden, sind in Bild 4 Thermogramm und Phasenbild einer Transmissionsmessung und ein Tomogramm als Schnitt im Bereich der Verklebung dargestellt.

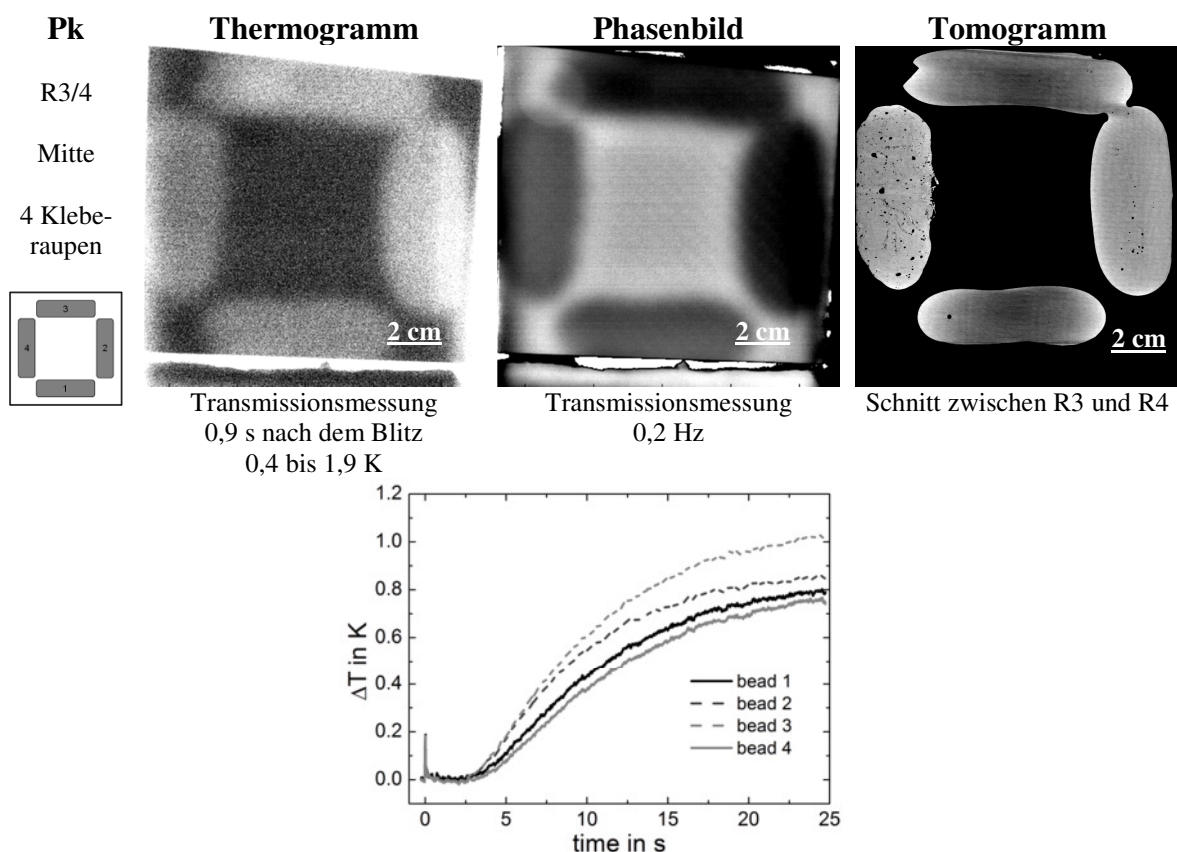


Bild 4. Vergleich der Ergebnisse der Thermografie in Transmissionskonfiguration und der CT für die Untersuchungen an den Kleberauppen. Das Diagramm zeigt den Temperaturanstieg auf der Vorderseite oberhalb der der Kleberauppen nach Blitzanregung auf der Rückseite.

Im Tomogramm unterscheidet sich nur die Raupe 4 mit einem deutlich höheren Anteil von Poren und Rissen wesentlich von den anderen Raupen. Im Thermogramm erscheinen die Raupen 2 und 3 wärmer und weisen damit auf einen besseren Verbund hin als die Raupen 1 und 4. Dieser Kontrast ist im Phasenbild noch deutlicher zu erkennen. Das

Diagramm in Bild 4 zeigt, dass der Temperaturanstieg im Bereich der Raupe 3 am schnellsten erfolgt und auch am höchsten ist, was darauf hindeutet, dass hier die Verklebung besonders gut ist. Die Güte der Verklebung nimmt über die Raupe 2 zur Raupe 1 und Raupe 4 hin ab.

4. Schlussfolgerung

Es hat sich gezeigt, dass die CT zwar die höchsten Fehlstellenkontraste und Ortsauflösungen bei der Darstellung der Inhomogenitäten und Einschlüsse hat, die Blitzthermografie jedoch ebenfalls fast alle Strukturen orten konnte. Insbesondere bei den Verklebungen konnte mit der Thermografie besser differenziert werden. Unter der Berücksichtigung, dass die Blitzthermografie an jedem Bauteil auch vor Ort eingesetzt werden kann und ein hohes Potenzial zur Automatisierung aufweist, kann es als Verfahren für die Qualitätssicherung während und nach der Produktion von CFK-Bauteilen sehr empfohlen werden.

Danksagung

Diese Untersuchungen erfolgten im Projekt ThermoBot, das im 7. Rahmenprogramm der EU unter der Nr. 284607 gefördert wurde. Die Proben wurden von Herrn Gilbert Céspedes-Gonzales von der Firma Benteler SGL Composite Technology GmbH im Projekt zur Verfügung gestellt.

Referenzen

- [1] Schmidt T., Dutta S., Ullmann T.: Production integrated NDT by means of automated Thermography. In: Proc. of QIRT 2012 in Naples, <http://www.ndt.net/search/link.php?id=13418&file=article/qirt2012/papers/QIRT-2012-331.pdf>
- [2] Maldague, X. (ed.): Infrared and thermal testing. Non-destructive testing Handbook Vol. 3, American Society for Nondestructive Testing, 3rd edition, 2001, 718 p., ISBN 1-57117-044-8
- [3] Mayr G., Hendorfer G., Plank B., Sekelja J.: Porosity determination in CFRP specimens by means of pulsed thermography combined with effective thermal diffusivity models. In: AIP conference proceedings 1211, vol. 1103; 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3362166>
- [4] Maierhofer C., Myrach P., Reischel M., Steinfurth H., Röllig M., Kunert M.: Characterizing damage in CFRP structures using flash thermography in reflection and transmission configurations. Composites: Part B 57 (2014) 35–46 <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.036>
- [5] Kastner J., Salaberger D., Plank B.: High resolution X-ray computed tomography of fiber and particle filled polymers. In: Proc. of 12th World Conference on Non-Destructive Testing, WCNDT 2012, 15.-12. April 2012, Durban/South Africa http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/137_wcndtfinal00137.pdf
- [6] Kastner J., Salaberger D., Plank B., Reh A., Heinzl C.: Advanced X-ray tomographic methods for quantitative characterization of carbon fiber reinforced polymers. In: Proc. of 4th International symposium on NDT in Aerospace, Augsburg, Deutschland, 2012 <http://www.ndt.net/article/aero2012/papers/we3a1.pdf>
- [7] Stoessel R., Kiefel D., Oster R., Diewel B., Llopart Prieto L.: μ -Computed Tomography for 3D Porosity Evaluation in Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP). In: Proc. of International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, 2011, Berlin, <http://www.dir2011.com/Portals/dir2011/BB/tu31.pdf>
- [8] Stoessel R., Wirjadi O., Godehardt M., Schlachter A.-L., Liebscher A.: Analysis of inner fracture surfaces in CFRP based on μ -CT image data. In: Proc. of Conference on Industrial Computed Tomography, ICT, Wels, Austria, 2012, pp. 33–40. <http://www.ndt.net/article/ict2012/papers/35.pdf>
- [9] Ibarra-Castaneda C., Maldague X.: Pulsed phase thermography reviewed. QIRT Journal Vol. 1, No. 1, 2004, pp. 47-70.