

3D-Formbestimmung mit integrierter thermografischer Qualitätsprüfung

Florian JONIETZ¹, Rainer KRANKENHAGEN¹, Matthias NOACK², Kai GENSECKE², Ernst WIEDENMANN²

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

² Aimes Services GmbH, Burg

Kontakt E-Mail: florian.jonietz@bam.de

Kurzfassung. Sowohl die 3D-Formbestimmung als auch die Thermografie sind Verfahren der Qualitätssicherung. Im vorgestellten Projekt wird versucht, die beiden Methoden zusammenzuführen.

Das Prinzip des für die Formbestimmung verwendeten 3D-Scanners beruht auf dem bereits bekannten Verfahren der Streifenlichtprojektion. Die Neuartigkeit des hier verwendeten 3D-Scanners besteht darin, dass nicht im sichtbaren, sondern im infraroten Spektralbereich gearbeitet wird. Dadurch wird es möglich, nicht die Reflexion, sondern die Wärmestrahlung des Prüfobjektes nach Absorption der eingebrachten Strahlung auszuwerten. Dies ermöglicht, auch optisch „nicht-kooperative“ Oberflächen zu erfassen. Die Anregung mit Wärmestrahlung stellt das Bindeglied zum Verfahren der aktiven Thermografie für die Detektion verdeckter Schäden dar. Bei letzterem Verfahren wird der Wärmestau über Defekten beim Eindringen der Wärme in die Tiefe des Materials gemessen. Dabei stellen Defekte eine Störung des 3D-Scan-Verfahrens dar, während umgekehrt unregelmäßig geformte Oberflächen das thermografische Verfahren erschweren, d.h. der Messeffekt eines der Verfahren ist ein Störeffekt für das jeweils andere Verfahren.

Es wird zum einen der Frage nachgegangen, inwieweit das 3D-Scan-Verfahren durch verdeckte thermische Defekte beeinträchtigt wird, und zum anderen die Möglichkeit untersucht, den vorhandenen 3D-Scanner auch für die aktive Thermografie einzusetzen. Es werden CFK-Proben mit künstlich eingebrachten thermischen Defekten untersucht und die Möglichkeiten und Grenzen der vorhandenen Messapparatur für die Defekterkennung aufgezeigt.

1. Einführung

Die räumliche Erfassung von Objekten mittels 3D-Scanner hat inzwischen eine große Verbreitung gefunden. Der in diesem Verfahren beschriebene 3D-Scanner arbeitet auf Grundlage der Streifenlichtprojektion [1], die bereits seit den 1980er Jahren eingesetzt wird. Dabei wird das Objekt mittels eines Streifenmusters ausgeleuchtet und mit einer Kamera gefilmt. Bei Kenntnis der genauen Positionen von Projektor und Kamera zueinander kann die Entfernung zwischen Kamera und Probenoberfläche mittels Triangulation bestimmt werden.

Bei der gängigen Vorgehensweise stellen so genannte „nicht kooperative“ Oberflächen ein großes Problem dar. Dies ist dann der Fall, wenn die Oberfläche des Objektes stark glänzt, also stark reflektiert, transparent ist oder stark absorbiert, da dabei das Erzeugen erkennbarer und auswertbarer Kontraste behindert wird. Dieses Problem kann



durch die Beschichtung der Oberfläche mit einer optischen Schicht gelöst werden, hinsichtlich einer industriellen Praktikabilität ist ein solches Vorgehen allerdings nicht ideal.

Der neuartige 3D-Scanner [2], der von der Firma Aimess entwickelt wurde, kann diese Problematik weitgehend umgehen. Auch er basiert auf der Streifenlichtprojektion, arbeitet allerdings nicht mit der Reflexion, sondern mit der Absorption des Streifenmusters. Dabei erzeugt dieses ein sinusförmiges Wärmemuster auf der Oberfläche des untersuchten Objektes, welches mit einer Wärmekamera erfasst wird. Dadurch kann die Oberfläche des Objektes rekonstruiert werden. Der dafür notwendige Temperaturhub auf der Oberfläche ist dabei relativ klein. Für den in Abb. 1 gezeigten Fall, mit dem das Funktionsprinzip des 3D-Scanners gezeigt ist, beträgt der Temperaturanstieg höchstens 1,3 K. In a) ist die Außenansicht des Gerätes gezeigt. Dabei sind die beiden Öffnungen für die Lichtquelle und die Kamera sichtbar. Als Lichtquelle für das Streifenmuster dient ein CO₂-Infrarotlaser (Wellenlänge 9,3 µm, Leistung 80 W). In b) ist das Funktionsprinzip der Messung und Rekonstruktion schematisch dargestellt. In c) ist das erzeugte sinusförmige Wärmebild auf einem Objekt gezeigt (ein PKW-Modell). Dieses Wärmebild ist nicht statisch, sondern zerfließt nach der Aufheizung. Daher wird in dem Verfahren nicht die Amplitude ausgewertet, sondern die Phasenlage des Streifenmusters, die in erster Näherung konstant bleibt. In c) wird deutlich, dass auch dieses Verfahren das Problem nicht-kooperativer Oberflächen haben kann. Dies wird an den unterschiedlichen Intensitäten innerhalb eines Streifens deutlich. Diese Nicht-Kooperativität der Oberfläche rührt von unterschiedlichen thermischen Eigenschaften innerhalb des Prüfobjektes her. Da das Verfahren allerdings mit der Phaseninformation und nicht mit der absoluten Intensität arbeitet, ist der negative Einfluss der nicht-kooperativen Oberfläche sehr gering.

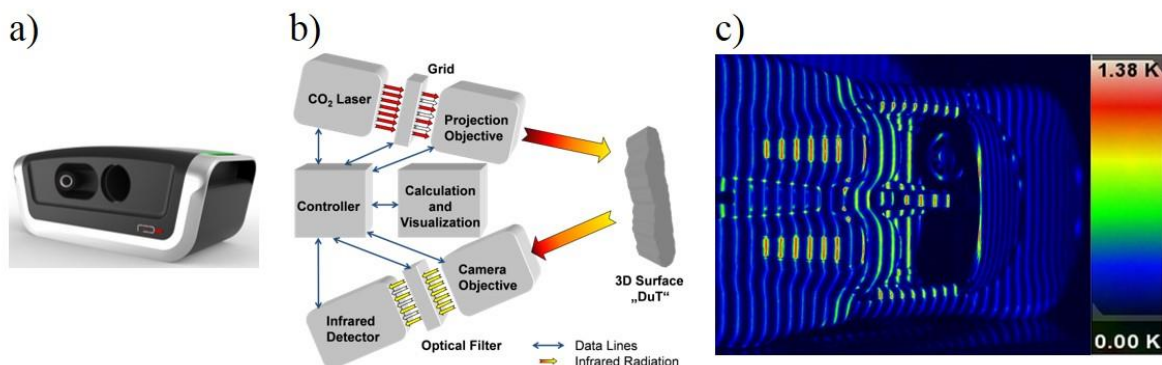


Abb. 1: a) 3D-Scanner von Aimess, b) Funktionsprinzip des 3D-Scanners, c) Wärmebild des Streifenmusters auf nicht kooperativer Oberfläche eines PKW-Modells

Dennoch ist eine Beeinträchtigung des Verfahrens dadurch denkbar, dass das gleichmäßige Auseinanderfließen des thermischen Wellenmusters auf der Probenoberfläche beeinträchtigt wird, dass es z.B. asymmetrisch zerfließt. Hierdurch würde es zur einer Veränderung der Phaseninformation kommen, die die Rekonstruktion der Probenoberfläche verfälschen würde. Dies könnte durch oberflächennahe inhomogene thermische Materialeigenschaften der Fall sein. Dazu gehören etwa verdeckte Einschlüsse oder Delaminationen unter der Oberfläche, offene und verdeckte Risse, ungleichmäßige Beschichtung, rückseitige Klebefehler oder inhomogene Klebstoffverteilungen sowie Materialinhomogenitäten mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften. Ziel des Projektes war es daher auch, den Einfluss solcher thermisch aktiven Materialfehler auf das 3D-Rekonstruktionsverfahren zu untersuchen.

Andererseits ist der Nachweis genau dieser thermisch aktivierbaren Defekte das Aufgabengebiet der aktiven Thermografie, während unregelmäßig geformte Oberflächen, die mit dem 3D-Verfahren erfasst werden, für die aktive Thermografie eine Erschwerung des Verfahrens bedeuten. Daher war das Ziel des gemeinsamen Projektes der BAM mit der Firma

Aimess, die beiden Verfahren 3D-Scannen und aktive Thermografie vorteilhaft zusammenzuführen, da offensichtlich der Messeffekt des einen Verfahrens für das jeweils andere Verfahren einen Störeffekt darstellt. Dabei dient die Bestrahlung mit der Lichtquelle für das Streifenmuster, also dem Infrarotlaser des 3D-Scanners, als Wärmequelle für die aktive Thermografie. Konkret wurden also zwei Fragestellungen untersucht: Zum einen die Frage, ob verdeckte Defekte die 3D-Rekonstruktion beeinträchtigen, und zum anderen die Frage, ob das 3D-Scan-Verfahren auch für die aktive Thermografie zum Nachweis genau dieser Fehlstellen verwendet werden kann.

2. Probekörper

Es wurden insgesamt drei verschiedene Defektklassen in CFK untersucht:

- grobe Defekte, hier Stufen verschiedener Dicke in einem Stufenprobekörper
- mittelgroße Defekte, hier Flachlochbohrungen
- schwache Defekte, hier Delaminationen.

Diese drei genannten Defektklassen sind in verschiedenen CFK-Probekörpern präpariert worden. Diese Probekörper sind in Tabelle 1 aufgelistet und in Abb. 2 schematisch gezeigt.

Tabelle 1. CFK-Proben

| Probenbezeichnung | Defekte | Größe | Bemerkung |
|----------------------------|--|--|---|
| Stufenprobekörper | Stufen+Delaminationen | 200 x 200 x 1,5 bis 3,5 (je nach Stufe) mm ³ | Quadratische Delaminationen (PTFE-Einschlüsse) in jeder Stufe in 7 Größen von D=2-16 mm |
| Flachlöcher-isotrop | Flachlochbohrungen verschiedener Größe und Tiefe | 200 x 200 x 6 mm ³ | Bohrungen kreisrund D=4-24 mm, Tiefe=2-5,5 mm |
| Flachlöcher-unidirektional | Flachlochbohrungen verschiedener Größe und Tiefe | 200 x 200 x 6 mm ³ | Bohrungen kreisrund D=4-24 mm, Tiefe=2-5,5 mm |

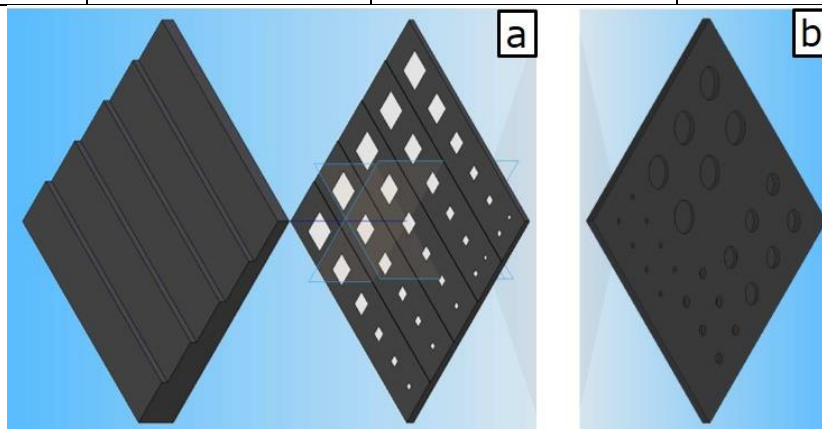


Abb. 2: a) Stufenprobekörper mit Positionen der Delaminationen, b) Probekörper mit Flachlochbohrungen

3. Versuchsaufbau

Die Messungen wurden bei der Firma Aimess mit dem dort aufgebauten 3D-Messverfahren durchgeführt. Es ist in Abb. 3 gezeigt. Anders als in Abb. 1 a) sind hier die IR-Kamera und der Laser nicht in einem Gehäuse zusammengefasst, da es sich um einen variablen Versuchsaufbau handelt. Der Laser ist auf die Probe gerichtet, bei welcher es sich hier um

eine CFK-Probe mit Flachbodenbohrungen handelt. Die Probenoberfläche auf der glatten Seite der Probe wird mit einer Infrarotkamera unter einem bestimmten Winkel gemessen und der Temperaturverlauf während der Erwärmung und der Abkühlung beobachtet. Mit dieser Versuchsanordnung wurde sowohl 3D-Oberflächenrekonstruktion durchgeführt als auch aktive Thermografie-Messung mit Streifenmusteranregung durch den Laser und zum Vergleich auch Flächenanregung ohne Streifenmuster. Die Aufnahmefrequenzen betragen je nach Probekörper 50 Hz, 100 Hz oder 200 Hz. Der Abstand zwischen den Streifen des Streifenmusters betrug zwischen 7,75 mm und 8,37 mm. Die leichte Variation dieses Abstands kam durch den leicht veränderlichen exakten Abstand zwischen der Probe und Austrittsöffnung des Laserstrahls zustande. Die Beleuchtungsdauern betragen 1 s, 5 s und bei einigen Messungen 8 s. Die Strahlzeit beim eigentlichen 3D-Scan-Verfahren beträgt normalerweise nur höchstens 1 s. Allerdings erfolgen bei einem 3D-Scan mehrere Messungen mit Aufheizungen und anschließenden Abkühlphasen, wobei bei den einzelnen Messungen das Streifenmuster verschoben wird oder der Abstand zwischen den Streifen variiert wird, was für eine komplette 3D-Rekonstruktion notwendig ist. Daher stellt eine Strahlzeit von mehreren Sekunden eigentlich eine Überreizung des Verfahrens dar, die allerdings bei dem hier verwendeten Laser problemlos möglich ist. Die mittlere Leistungsdichte der Bestrahlung auf der Probenoberfläche war 522 W/m^2 auf einer Fläche von etwa $20 \times 20 \text{ cm}^2$. Die eingebrachte Energiedichte bei der Bestrahlungszeit von 1 s war damit 522 J/m^2 und bei der Bestrahlungszeit von 5 Sekunden 2610 J/m^2 . Dabei wurde fast die ganze Probe ausgeleuchtet. Zum Vergleich: bei typischen Blitzthermografie-Messungen beträgt der Energieeintrag etwa 1400 J/m^2 [3], allerdings bei deutlich kürzeren Bestrahlungsdauern im Millisekundenbereich.

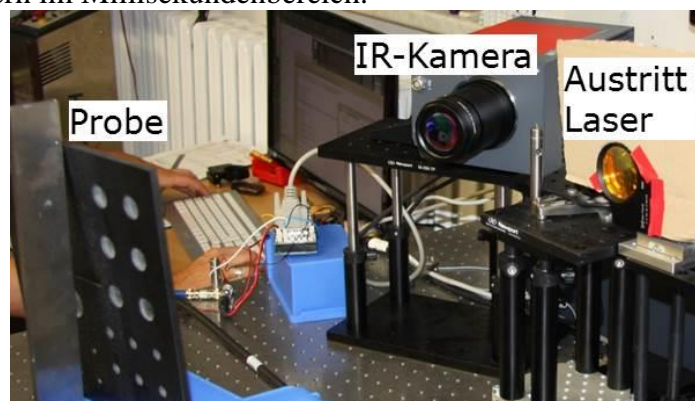


Abb. 3: Versuchsaufbau bei Aimes: 3D-Messung und aktive Thermografie in Reflexionsanordnung zusammengefasst

4. Ergebnisse

4.1 CFK-Stufenprobekörper

Es wurde der Stufenprobekörper vermessen, wobei die Aufheizzeit 5 s betrug. Diese sehr lange Aufheizzeit wird im eigentlichen 3D-Scan-Verfahren nicht verwendet (dort sind es höchstens 1 s). Es hatte sich in ersten Messungen gezeigt, dass Aufheizzeiten von 1 s nicht ausreichten, um eine genügend hohe Wärmeakkumulation in der Probe zu bewirken, um die thermischen Defekte in genügend hoher Genauigkeit zu messen. Abb. 4 zeigt Thermogramme in der Abkühlphase. Um Wärmereflexionen aus der Umgebung zu kompensieren, wurde das Thermogramm, das vor Beginn der Aufheizung aufgenommen wurde, abgezogen. Dadurch ist nur der durch das Aufheizen entstandene Temperaturhub zu sehen. Außerdem wurden mittels eines Bildtransformationsalgorithmus die Bilder gedreht

und gestreckt, um die während der Messung leicht schräge Ausrichtung der Probe zur Kamera hin (siehe Abb. 3) zu kompensieren.

In a) bis c) sind die Thermogramme ohne Anwendung des Streifenmusters gezeigt (homogene Anregung). Thermogramm a) entstand bei Ausschalten der Bestrahlung, b) entstand 1,36 s und c) 3,36 s nach Ende der Bestrahlung. In a) sind die Temperaturen am höchsten, durch die während der Aufheizung akkumulierte Wärme im Material. Die in der Bildmitte höheren Temperaturen zeigen eine nicht ganz homogene flächige Ausleuchtung der Probe. In b) und c) ist die inhomogene Temperaturverteilung durch laterale Wärmeströme weitgehend ausgeglichen und die schon in a) sichtbaren fünf Material-Dickestufen sind daher in c) am besten zu erkennen.

In d) bis f) sind die entsprechenden Thermogramme für den Fall der Aufheizung mit Streifenmuster zu den gleichen Zeitpunkten gezeigt. Dabei ist ersichtlich, dass das Streifenmuster, das in d) sehr gut zu erkennen ist, in e) und noch mehr in f) durch laterale Wärmeströme zerfließt und dabei die durch die Material-Dickestufen entstandenen Kontraste zunehmend besser erkennbar werden. Der mittlere Temperaturhub in den Bildern mit Streifenmuster ist mit etwa 40 mK nur halb so hoch wie in den Bildern mit Flächenbestrahlung (ca. 100 mK). Dies liegt daran, dass das Streifenmuster durch eine Filterschablone durch Ausblendung erzeugt wird. Entsprechend dem Tastverhältnis der Streifenfolge gelangt nur etwa die Hälfte der gesamten Strahlung auf die Probenoberfläche. Durch räumliche Mittelung über den Großteil einer Stufe konnte das Rauschlevel auf einen Wert von etwa 0,007 K reduziert werden, was einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 14 im Fall der Flächenaufheizung und von 6 im Fall der Aufheizung mit Streifenmuster entspricht.

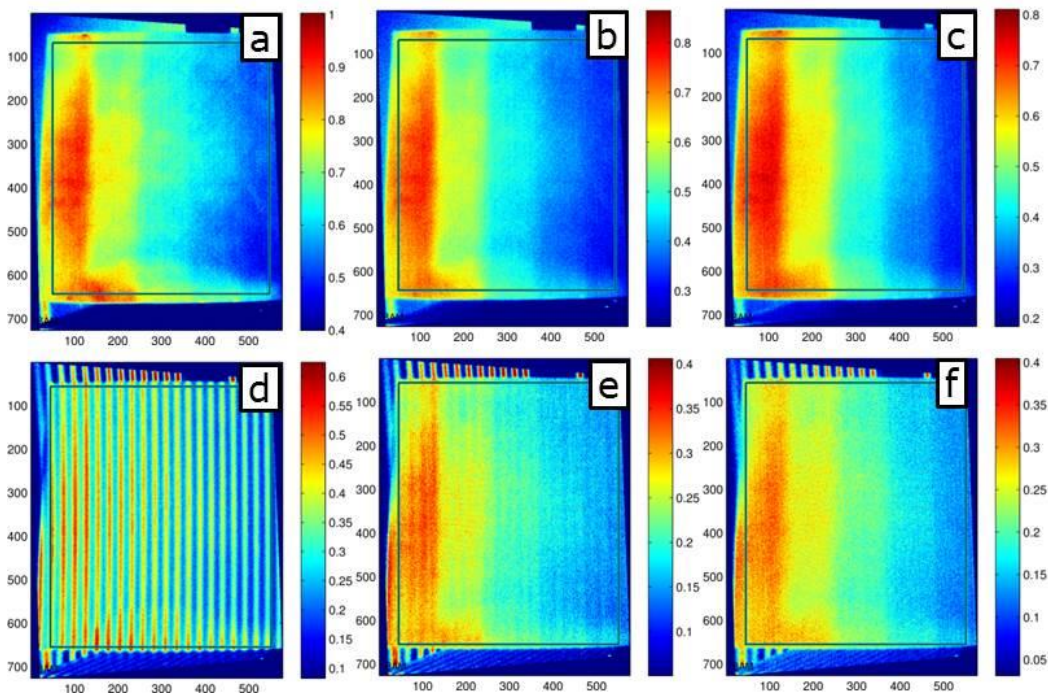


Abb. 4: Thermogramme des Stufenprobekörpers in der Abkühlphase. a) bis c) Aufheizung ohne Streifenmuster, d) bis f) Aufheizung mit Streifenmuster

In Abb. 5 ist für die Flächenaufheizung das Ergebnis einer erweiterten Analyse durch Fourier-Transformation gezeigt, bei der der zeitabhängige Temperaturverlauf in jedem Pixel einer Fourier-Analyse unterzogen wurde. In a), b) und c) sind die Phasen der drei niedrigsten Frequenzkomponenten 0,1 Hz, 0,2 Hz bzw. 0,3 Hz dargestellt. In a) sind in den dickeren Stufen (rechts) Strukturen zu erkennen. Dabei handelt es sich um künstlich eingebrachte von außen nicht sichtbare Delaminationen (realisiert durch Teflon-Plättchen). In b) und c) erscheinen die Delaminationen in den dünnsten Stufen (links). Die Größe der Delaminationen nimmt von oben nach unten ab. Das bedeutet, dass die größeren

Delaminationen am besten erkennbar sind. Offensichtlich stellen die Delaminationen eine hohe Anforderung hinsichtlich der Detektierbarkeit dar, da sie in den Thermogrammen in Abb. 4 nicht sichtbar wurden und eine weitergehende Analyse notwendig war, um diese zumindest teilweise zu erkennen.

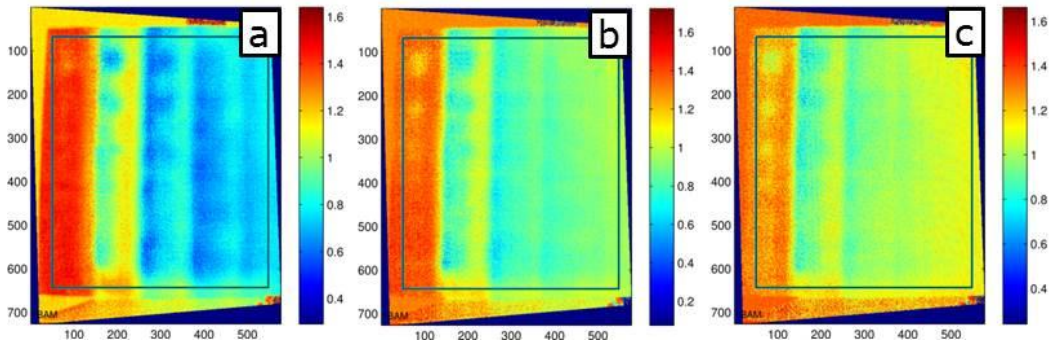


Abb. 5: Flächige Aufheizung: Phasenbilder der zeitlichen Fourier-Analyse der drei niedrigsten Frequenzkomponenten (in a) 0,1 Hz, in b) 0,2 Hz und in c) 0,3 Hz). Delaminationen sind teilweise erkennbar.

In Abb. 6 ist die entsprechende Auswertung mit Fourier-Analyse für den Fall der Anregung mit dem Streifenmuster gezeigt. Die Bilder werden deutlich vom Streifenmuster dominiert. Offensichtlich dominiert die zeitliche Dynamik des lateralen Auseinanderfließens des Streifenmusters alle anderen Effekte. So sind etwa die Dickenstufen nur schwach erkennbar. Durch die Streifenmusteranregung zeigt sich hier eine deutlich schlechtere Detektierbarkeit der Defekte verglichen mit der Flächenanregung in Abb. 5.

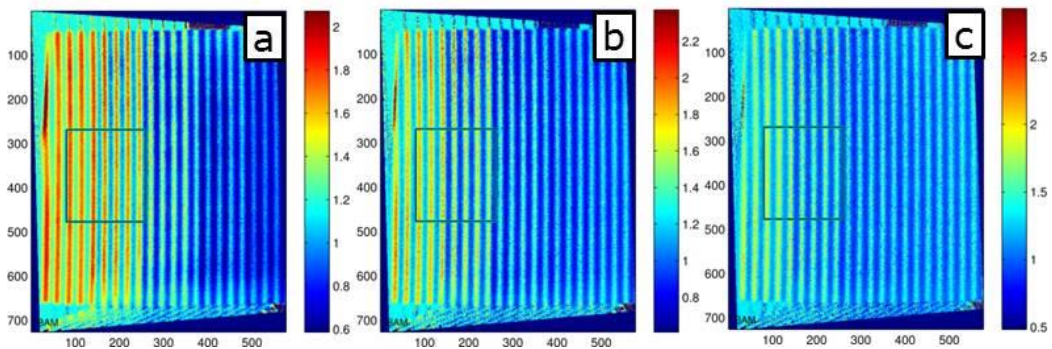


Abb. 6: Aufheizung mit Streifenmuster: Phasen der zeitlichen Fourier-Analyse. Drei niedrigste Frequenzkomponenten (in a) 0,1 Hz, in b) 0,2 Hz und in c) 0,3 Hz). Streifenmuster dominiert alle anderen Effekte.

Abb. 7 zeigt das Ergebnis einer Filterung der Phasenbilder in Abb. 6 mittels eines Fourierfilters im Ortsraum. Im Vergleich zu Abb. 6 sind die Dickenstufen einfacher zu erkennen, besonders in a). Dort sind auch im oberen Bereich der Probe in der zweiten und dritten Dickenstufe von links einige Delaminationen andeutungsweise auszumachen. Allerdings ist das Ergebnis hinsichtlich der Detektion der Delaminationen immer noch viel schlechter als bei der Flächenanregung in Abb. 5.

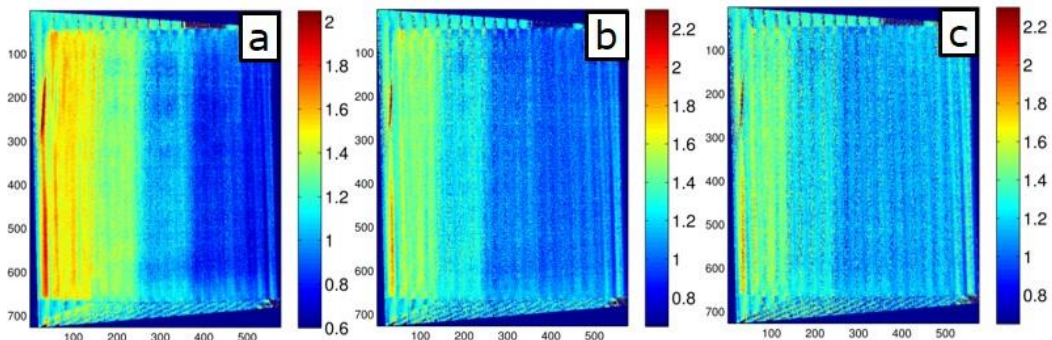


Abb. 7: Filterung der Periodizität des Streifenmusters in Abb. 6 durch Fourier-Analyse im Ortsraum. Einige Delaminationen in a) andeutungsweise erkennbar.

4.2 Isotroper CFK-Probekörper mit Flachlöchern

Es wurde die Probe „Flachlöcher-isotrop“ (siehe Tabelle 1) vermessen. In Abb. 8 sind Thermogramme in der Abkühlphase nach 5 s Flächenaufheizung, also ohne Streifenmuster, gezeigt. In a) ist der Zeitpunkt des Abschaltens der Aufheizung gezeigt, b) zeigt den Zeitpunkt nach 3,39 s und c) den Zeitpunkt nach 8,39 s. Im Verlaufe der Abkühlphase sind dabei immer mehr Löcher zu identifizieren. Am Anfang sind die flachen und großflächigen Löcher zu erkennen, danach werden immer tiefere und kleinere Löcher mit zunehmendem Eindringen der Wärme in den Probekörper detektierbar.

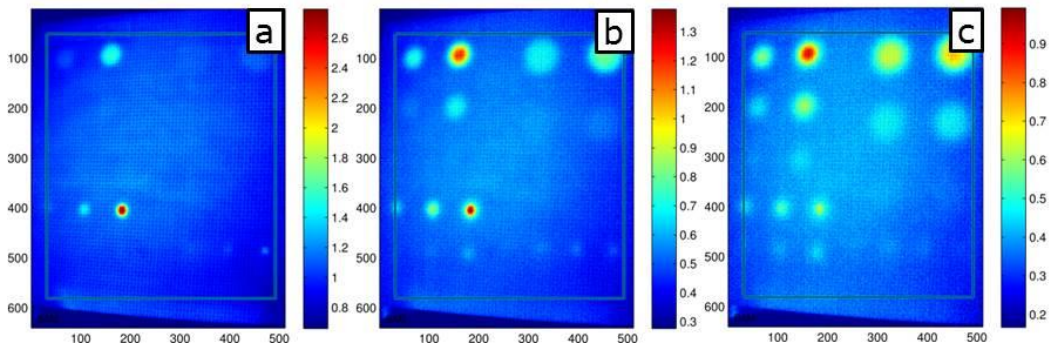


Abb. 8: Flächige Aufheizung: Thermogramme in der Abkühlphase: a) Zeitpunkt des Ausschaltens der Aufheizung, b) nach 3,39 s, c) nach 8,39 s

In Abb. 9 sind die entsprechenden Thermogramme nach Aufheizung mit dem Streifenmuster gezeigt. In a), das zum Zeitpunkt des Ausschaltens der Aufheizung entstand, und in b) ist das Streifenmuster noch eindeutig zu erkennen und einige flache Defekte, die direkt unter Streifen liegen. In den übrigen Thermogrammen ist das Streifenmuster schon zerflossen. Zeitgleich erscheinen immer tiefere und kleinere Defekte mit dem zunehmenden Eindringen der Wärme in den Körper. Damit ist die Nachweisbarkeit ähnlich gut wie mit der flächigen Anregung.

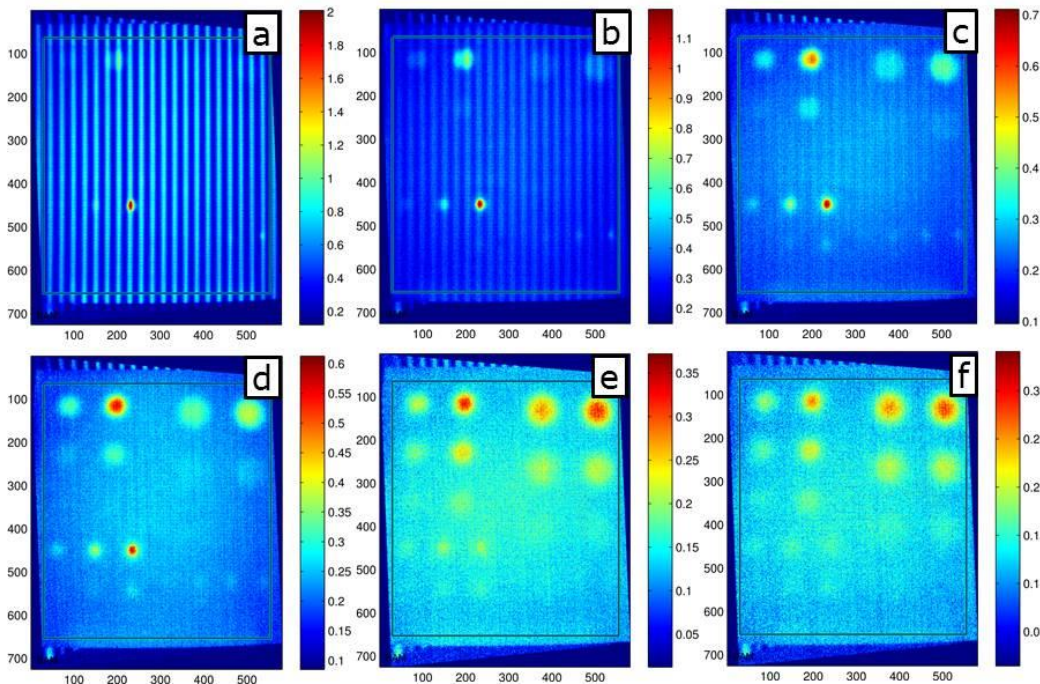


Abb. 9: Aufheizung mit Streifenmuster: a) Zeitpunkt des Ausschaltens der Heizung, b) nach 1,38 s, c) nach 3,38 s, d) nach 4,38 s, e) nach 12,38 s, f) nach 16,38 s

4.3 Anisotroper CFK-Probekörper

Im Folgenden (Abb. 10) ist das Ergebnis einer Messung gezeigt, bei der die anisotrope CFK-Probe „Flachlöcher-unidirektional“ (siehe Tabelle 1) mittels Streifenmuster 1 s lang aufgeheizt wurde. Dabei war in einer Messung das Streifenmuster parallel zur Hauptfaserrichtung (siehe a) und b)) und in einer anderen Messung senkrecht zur Hauptfaserrichtung (siehe c) und d)) orientiert. In a) bzw. c) ist der Zeitpunkt des Abschaltens der Aufheizung gezeigt, an dem das Streifenmuster am deutlichsten sichtbar ist. In b) und d) ist jeweils derselbe Zeitpunkt 2,37 s nach Abschalten der Aufheizung gezeigt. Die jeweilige Hauptfaserrichtung ist durch den Pfeil markiert. Es ist ein Probenabschnitt gezeigt, in dem keine Flachlöcher erscheinen. In b) ist das Streifenmuster zu diesem Zeitpunkt noch sichtbar, während es in d) schon fast vollständig zerflossen ist, da die thermische Diffusivität in der Hauptfaserrichtung am größten ist, also in der Richtung senkrecht zu den Beleuchtungsstreifen in d). Diese Feststellung der lateralen thermischen Anisotropie und die Bestimmung der Hauptfaserrichtung ist ein Vorteil der Anregung mit Streifenmuster gegenüber der Flächenanregung.

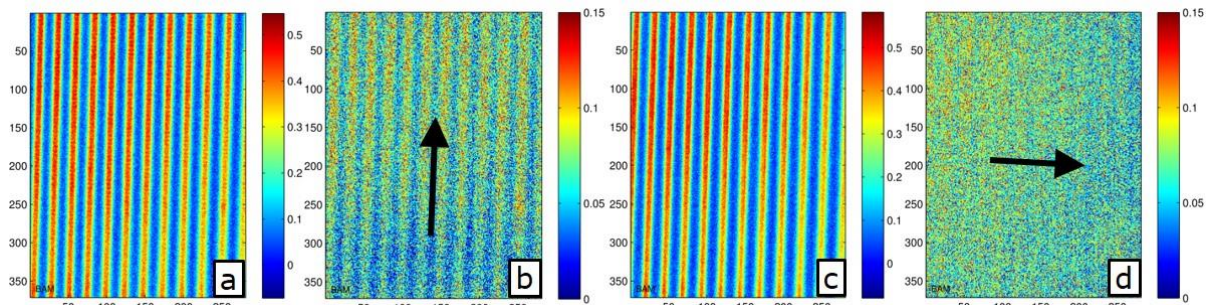


Abb. 10: a) und b) Streifenmuster parallel zur Hauptfaserrichtung, c) und d) Streifenmuster senkrecht zur Hauptfaserrichtung (Pfeil). a) bzw. c) Zeitpunkt beim Ende der Aufheizung. b) bzw. d) Zeitpunkt 2,37 s nach Ende der Aufheizung

4.4 Einfluss thermischer Defekte auf 3D-Rekonstruktion

Im Folgenden wurde der 3D-Scanner für seine eigentliche Bestimmung, nämlich die 3D-Rekonstruktion der Probenoberfläche verwendet. Dabei wurde versucht festzustellen, ob thermische Defekte die 3D-Rekonstruktion aufgrund der Veränderung der thermischen Wärmeströme verfälschen. In Abb. 11 ist die Probe „Flachlöcher-isotrop“ nach der 3D-Rekonstruktion gezeigt. Teilbild a) zeigt das Ergebnis einer Messung der Seite mit den Flachlöchern, wobei b) einen Teilausschnitt darstellt, und c) zeigt die glatte Seite. Dabei wurde eine typische Strahlzeit von 1 s verwendet. In a) sind die Flachlöcher gut rekonstruiert worden bis auf eine Restwelligkeit, die auch in b) und c) zu erkennen ist. Diese Restwelligkeit ist durch das 3D-Scan-Verfahren verursacht und ist inzwischen von Aimess behoben worden. Lochdurchmesser und Lochtiefen sind korrekt erfasst worden (siehe b). Auch die glatte Probenseite ist in c) korrekt wiedergegeben, es zeigt sich nur eine sehr kleine Ausbeulung von etwa 0,3 mm (siehe Pfeil) über der Stelle des Flachloches mit der geringsten Überdeckung von 0,5 mm (entsprechend einer Bohrtiefe von 5,5 mm) und einem Durchmesser von 8 mm, über dem offensichtlich der Wärmestau durch die Aufheizung während des 3D-Scans die 3D-Rekonstruktion beeinträchtigt hat, da in Wirklichkeit diese Ausbeulung nicht existiert. Damit ist erwiesen, dass das 3D-Scan-Verfahren recht robust ist gegenüber thermischen Defekten.

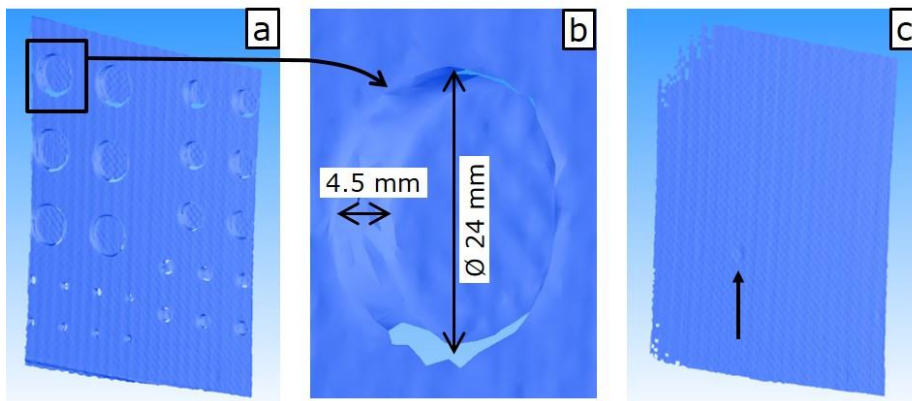


Abb. 11: 3D-Rekonstruktion: a) Seite mit Flächlöchern, b) glatte Probenseite mit kleiner Ausbeulung (Pfeil)

Zusammenfassung

Es wurde festgestellt, dass die Integration eines Qualitätsprüfungsmodus in den vorhandenen thermischen 3D-Scanner grundsätzlich möglich und mit geringem Aufwand auch realisierbar ist. Jedoch sind die typischen Aufheizzeiten beim 3D-Scan-Modus nicht ausreichend für die Qualitätsprüfung. Erst bei deutlicher Verlängerung der Aufheizzeit sowie der erfassten Abkühlphase ist ein thermografischer Nachweis von inneren Fehlstellen möglich. Die Messung der thermischen Defekte und die dabei erforderliche Datenanalyse unterscheiden sich hierin kaum von der üblichen Blitzthermografie bzw. Pulsthermografie [4]. Insbesondere beim Nachweis von Delaminationen (siehe Abb. 5, Abb. 6, Abb. 7), die nur mit zeitlicher Fourieranalyse nach Flächenaufheizung detektiert werden konnten, zeigte sich, dass die homogene Flächenaufheizung der Aufheizung mit Streifenlicht eindeutig vorzuziehen ist. Die technische Realisierung eines entsprechenden Qualitätsprüfungsmodus ist durch eine Leerstelle im Gitterwechsler des Geräts problemlos möglich.

Eine Anregung mit Streifenmuster bietet hingegen den Vorteil, dass anisotrope laterale Wärmeleitfähigkeiten identifiziert werden können durch die unterschiedliche Geschwindigkeit des Zerfließens des Streifenmusters für verschiedene Richtungen. Das eröffnet die Möglichkeit, die tatsächliche Faserausrichtung der oberflächennahen Lagen bei faserverstärkten Kunststoffen zu ermitteln.

Untersuchungen mit definierten Fehlstellen haben belegt, dass das thermische 3D-Scanverfahren erstaunlich robust gegenüber kleineren inneren Defekten ist, welche die Wärmeausbreitung im Untersuchungsobjekt und damit auch das thermische Streifenmuster an der Oberfläche beeinflussen.

Danksagung

Das ZIM-Vorhaben KF2201090NT4 wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Referenzen

- [1] Jason Geng, Structured-light 3D surface imaging: a tutorial, Adv. Opt. Photon. 3, 128-160 (2011)
- [2] Wiedenmann E., Scholz T., Schott R., Tusch J., Wolf A., First Utilization of Energy Transfer in Structured Light Projection – Infrared 3D Scanner, Key Engineering Materials (2014), Vol. 613, pp 141-150
- [3] Krankenhagen R., Maierhofer C., Measurement of the radiative energy output of flash lamps by means of thermal thin probes. Infrared Physics & Technology 67 (2014) 363-370
- [4] Maldague X., Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography, Springer, London, 1993