

Laserangeregte Thermografie von CFK-Bauteilen

Guido MAHLER¹, Thomas WESTPHALEN²

¹ InfraTec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik, Dresden

² Fraunhofer Institut für Lasertechnik (ILT), Aachen

Kontakt E-Mail: g.mahler@infratec.de

Kurzfassung. Mit der stetig zunehmenden Anwendung von Leichtbaumaterialien und -verfahren in Luftfahrzeug- und Automobilbau verbinden sich neue Anforderungen an die Technik zur Prüfung entsprechender Materialien, Komponenten sowie deren Verbindungen. Das Fügen von Bauteilen aus faserverstärkter Kunststoffen wie CFK untereinander sowie mit solchen aus klassischen Materialien des Karosseriebaus wie Stahl oder Aluminium erfolgt typischerweise durch Kleben, deren Prüfung im Ultraschallverfahren erfolgen kann.

Die Laseranregung als mögliche Alternative zu konventionellen Anregungsarten wie Blitzlampen- oder Halogenstrahleranregung erscheint als ein erfolgversprechender Ansatz zur Überwindung von Limitierungen, die einer Etablierung der thermografischen Prüfung als Alternative zur Ultraschallprüfung noch entgegen stehen. Zu erwarten sind eine deutlich homogenere und aus signifikant größeren Arbeitsabständen einzubringende großflächige Anregung. In Verbindung mit Thermografiekameras hoher Bildpunktzahl kann damit die Voraussetzung zur Prüfung großer Flächen innerhalb kürzerer Zeiten geschaffen werden. Weiterhin eröffnet Laseranregung die Möglichkeit zur Realisierung unterschiedlicher Modulationstypen, wie beispielsweise linienförmige zusätzlich zu flächiger Anregung und damit eine große Universalität mit Blick auf die zu prüfenden Bauteilgeometrien.

Am Fraunhofer ILT wurde ein System zur laserangeregten Thermografie von Bauteilverbindungen auf Basis eines fasergekoppelten Festkörperlasers mit Scannereinheit aufgebaut, das mit einer Thermografiekamera besonders hoher geometrischer Auflösung kombiniert wurde. Es wurden Untersuchungen an CFK-Bauteilen mit Klebeverbindungen zum Einfluss geometrischer und zeitlicher Anregungsparameter auf das Prüfergebnis vorgenommen sowie flächenhafte und linienbasierte Modulationsvarianten gegenübergestellt.

Die Ergebnisse werden vorgestellt, diskutiert und mit Versuchsreihen verglichen, bei denen statt der Laser- eine konventionelle optische Anregung zum Einsatz gekommen ist.

1. Einführung

Für die Prüfung von Fügeverbindungen zwischen Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen stellt die Wärmefluss-Thermografie mit optischer Anregung eine effiziente und in einer Vielzahl praktischer Anwendungsfälle erprobte Prüfmethode dar. Die für eine thermografische Untersuchung besonders vorteilhaften Oberflächeneigenschaften eines hohen Emissionsgrades im MWIR und LWIR (z.B. gegenüber diesbezüglich deutlich ungünstigeren metallischen Bauteilen aus Stahl, Aluminium usw.) erlauben zumeist die



aufgrund ihrer geringeren Zugänglichkeits-Anforderungen bevorzugte reflexive Prüfanordnung. Der gegenüber metallischen Prüfobjekten deutlich geringere Reflexionsgrad führt zu entsprechend reduzierten Anforderungen an die Maßnahmen zur Abschirmung der Strahlung der Anregungsquelle im Spektralbereich der Thermografiekamera. Neben der Blitzanregung, bei welcher bereits prinzipbedingt eine bessere zeitliche Trennung zwischen Anregungs- und Akquisitionsphase vorliegt, stehen somit auch die Stufen- sowie die periodische Anregung mit Halogenstrahlern als praktische Alternativen zur Verfügung.

Die erreichbare Prüfqualität hängt in erster Linie von den Eigenschaften der verwendeten Thermografiekamera ab, von denen wiederum die NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) als dem das Signal-Rausch-Verhältnis charakterisierenden Parameter in Kombination mit dem insbesondere für Mikrobolometer-Detektoren vorkommenden Fixed Pattern Noise (FPN) die größte Bedeutung zukommt. Da sie unter den normalen Betriebsbedingungen der Kamera bewertet wird, zu welchen auch die IR-Bildaufnahmefrequenz gehört, ist hier zu berücksichtigen, dass bezogen auf ein und dieselbe Dauer einer aufgenommenen Bildsequenz eine schnellere Kamera auch eine deutlich höhere Anzahl von Einzelbildern liefert, bei deren algorithmischer Verarbeitung eine stärkere Verbesserung dieses ursprünglichen Signal-Rausch-Verhältnisses eintritt.

Auf der Anregungsseite kann ebenfalls Einfluss genommen werden, wobei die stärksten Auswirkungen über die Intensität des Energieeintrags zu erzielen sind. In erster Näherung kann von einem direkten Zusammenhang zum erzielbaren SBC (Signal to Background Contrast) ausgegangen werden [1]. Zu berücksichtigen ist allerdings die thermische Belastbarkeit des Prüflings, die einer Skalierung der Anregungsenergie in beliebigem Maßstab entgegensteht.

2. Untersuchungsobjekte

Gegenstand der hier vorgestellten Arbeiten sind vergleichende experimentelle Untersuchungen zur thermografischen Prüfung von geklebten Bauteilen mit mindestens einem aus Faserverbundwerkstoff bestehenden Fügepartner.

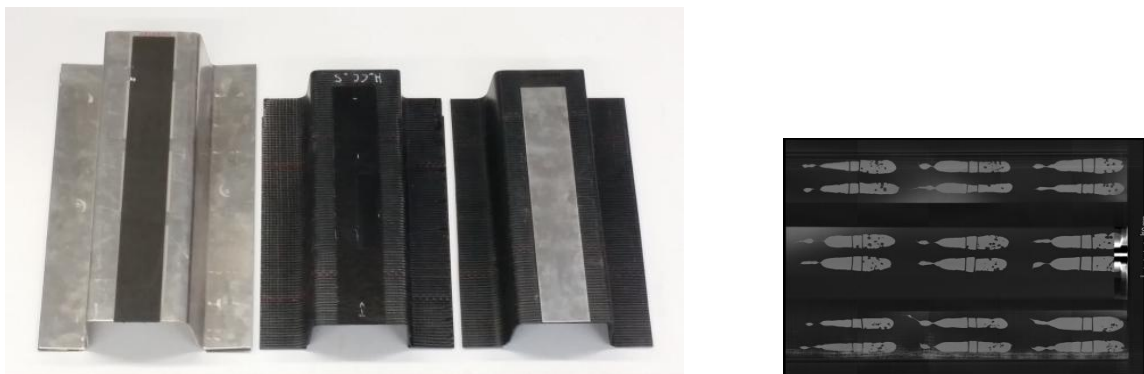


Abb. 1: Defektproben mit Klebungen, Foto (links) und CT-Aufnahmen der Kleberauproben innerhalb der CFK/CFK-Probe (rechts)

Dazu sind vom ifs der TU Braunschweig (Projektpartner im Verbundprojekt GEWOL [1]) Defektproben in Form von Hutprofilen mit den Abmessungen 380 mm x 245 mm bzw. 435 mm x 270 mm hergestellt worden.

Auf drei ebene Flächen des Basisprofils (CFK 2,4 mm bzw. Aluminium 1,5 mm) wurden mit einem fertigungsüblichen Epoxy-Kleber 50 mm breite Streifen aus CFK (1,6 mm Materialstärke) bzw. Aluminium (1,5 / 1,8 mm Materialstärke) aufgeklebt. Die jeweils 6 Klebefugen mit einer Stärke von (0,8 ... 1,2) mm sind zusätzlich zu einem fehlerfreien Abschnitt gezielt mit folgenden lokalen Fehlern ausgeführt worden:

- Kavitäten in der Klebefuge (Styropor- bzw. Glashohlkugeln)
- in der Klebfuge liegende Drähte (durchgehende Defekte)
- Trennmittel am Füge teil zur Erzeugung einer Zone ohne Anbindung
- eingeschnürte Klebraupe

Von der CFK/CFK-Probe, mit welcher auch die im weiteren Verlauf beschriebenen Versuchsreihen durchgeführt wurden, sind zunächst CT-Aufnahmen angefertigt worden, die ein genaues Abbild der Konturen der Klebraupen liefern.

3. Konventionelle Anregung

Die Ausgangsbasis für eine spätere Bewertung der Ergebnisse der laserangeregten Thermografie wurde in einer zunächst vorangestellten Versuchsreihe mit konventioneller Halogenstrahler-Anregung das thermische Verhalten des Prüflings und die das bestmögliche Prüfergebnis liefernde Auswertungsverfahren sowie die zugehörigen Parameter ermittelt.

Als Anregungsquelle kamen zwei Halogenstrahler mit je 2 kW zur Anwendung, ihr Abstand zum Objekt betrug 0,5 m. Für eine bestmögliche Unterdrückung parasitärer Reflexionen der breitbandigen Anregungsenergie im Spektralbereich der Thermografiekamera waren die Halogenstrahler mit hitzebeständigen Filterscheiben mit Kurzpass-Charakteristik ausgestattet.



Abb. 2: Laboraufbau mit Defektprobe, Thermografiekamera (Auflösung 1920 x 1536 Pixel) und Halogenstrahlern 2x 2 kW

Um sicherzustellen, dass die thermische Belastung der Probe den zulässigen Bereich nicht übersteigt, ist die Anregungsdauer, über welche die Strahlung der beiden Halogenstrahler ununterbrochen auf den Prüfling einwirkt, auf 6 s begrenzt worden. Die Zeitverläufe von Temperatur und Temperaturkontrast bei einer einmaligen Anregung sind in **Abb. 3** dargestellt.

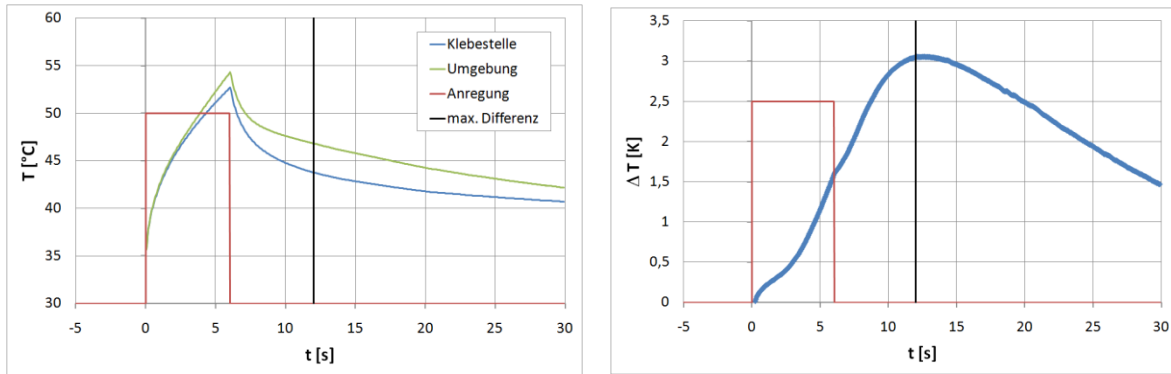


Abb. 3: Zeitverlauf der Oberflächentemperatur über bzw. neben einer Klebestelle (links) sowie von deren Differenz (rechts) bei Halogenstrahler-Anregung

Aus den für die Aufbereitung der anregungssynchron aufgenommenen Thermobildsequenzen üblicherweise verwendeten Ansätzen (z.B. Livebild, Differenzbild, Puls-Phasen-Auswertung, Lock-In-Auswertung) ist das Phasenbild der PPT (Puls Phase Thermography) als kontrastreichstes Ergebnisbild identifiziert und als Kriterium für die nachfolgenden vergleichenden Untersuchungen ausgewählt worden. Ausgehend vom oben dargestellten Zeitverlauf wurde die Sequenzlänge für optimalen Kontrast mit 20 s bestimmt, was einer Frequenz von 0,05 Hz entspricht.

Tab. 1: Kamera- bzw. Serienparameter bei Vergleichsuntersuchung mit Halogenstrahler-Anregung

Pixelzahl Kamera	Frequenz	NETD/FPN	IFOV	eff. Noise
320 x 256	50 Hz	20 mK	1,2 mm	0,6 mK
640 x 512	50 Hz	25 mK	0,6 mm	0,8 mK
1280 x 1024	50 Hz	30 mK	0,3 mm	1,0 mK
1920 x 1536	20 Hz	35 mK	0,2 mm	1,8 mK
1024 x 768 (ungekühlt)	30 Hz	80 mK	0,4 mm	3,3 mK

Nach diesem Verfahren und mit diesen Einstellungen wurde die CFK/CFK-Probe mit Kameras 5 verschiedener Geräteklassen (4x gekühlter Detektor unterschiedlicher Formate, 1x ungekühlter Detektor, siehe **Tab. 1**) geprüft. Die zugehörigen Ausschnitte der Phasenbilder für jeweils gleich große Teile der Probe (Fläche von ca. 90 mm x 45 mm mit einem Kleberauppen-Paar) sind in **Abb. 4** dargestellt.

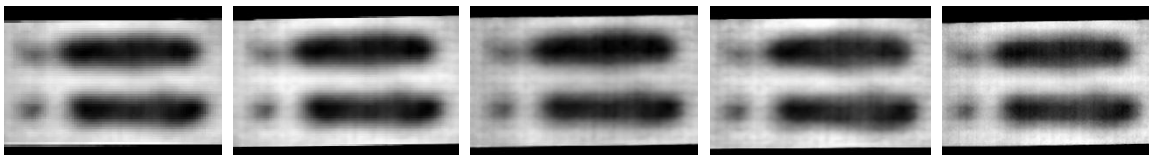


Abb. 4: Phasenbilder (PPT 0,05 Hz) eines Klebstellen-Paares aufgenommen mit Kameras verschiedener Detektorklassen (InSb 320x256, 640x512, 1280x1024, 1920x1536, Mikrobolometer 1024x768), Bildausschnitt ca. 90 mm x 45 mm aus Bild mit jeweils gleicher Gesamtbreite (ca. 375 mm)

Es bestätigt sich, dass der Zugewinn einer deutlich erhöhten geometrischen Auflösung der Kamera (z.B. 0,2 ... 1,2 mm IFOV) in Bezug auf die Deutlichkeit der Kleberauppen-Darstellung im Ergebnisbild gering ist, da die aufgrund der Materialstärke des oberen Fügepartners von 1,6 mm prüfbar Strukturweiten hiervon ohnehin in keinem Fall überschritten werden. Vielmehr werden die dem Bild überlagerten Gewebestrukturen zunehmend feiner aufgelöst, was zu zusätzlichem Auswertungsaufwand bei der Positions- bzw. Größenbestimmung der Klebestellen führt.

Im Ergebnisbild zwar zu erkennen, von diesem Effekt visuell jedoch nicht sehr gut zu unterscheiden ist der Einfluss der effektiven Gesamt-Ungleichförmigkeit im Bild – mit Ausnahme des Phasenbilds der Kamera mit Mikrobolometer-Detektor, in welchem das überlagerte Rauschen sowie das FPN deutlich erkennbar sind.

4. Laseranregung

Für die experimentelle Untersuchung der laserangeregten Thermografie wurde am Fraunhofer ILT ein Versuchsaufbau geplant und realisiert (siehe **Abb. 5**). Für die Versuche wurde ein industrieller, fasergekoppelter Nd:YAG-Laser verwendet, der Laserstrahlung mit einer Leistung von bis zu 500 W bei einer Wellenlänge von 1064 nm emittiert. Die Laserstrahlung wird zunächst in einem Strahlformungsmodul kollimiert und anschließend über eine Scannereinheit zweidimensional abgelenkt. Die Scannersteuerung erlaubt eine frei konfigurierbare Strahlführung und damit einen zeitlich und räumlich definierten Wärmeeintrag in die Probenoberfläche. So können beispielsweise eine linienförmige Anregung mit konstantem Vorschub oder eine flächige, homogene Anregung durch schnelle mäanderförmige Ablenkung erzielt werden. Ein integrierter Laserpointer ermöglicht eine einfache Justage und Anpassung der Anregungsgeometrie auf dem Bauteil. Durch das modulare optische Konzept können verschiedene Strahldurchmesser und Arbeitsabstände eingestellt werden. Zusätzlich wurde eine Linearachse integriert um kontinuierliche Roboter- oder Fließbandprozesse zu simulieren.

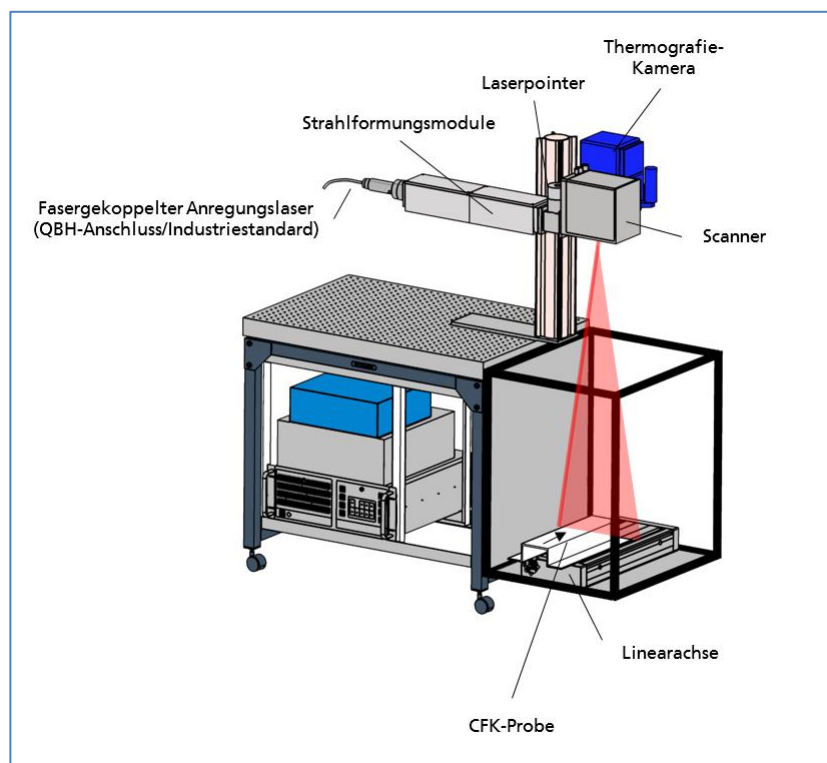


Abb. 5: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für laserangeregte Thermografie. Die Strahlung des fasergekoppelten Anregungslasers wird mittels einer Scannereinheit über die CFK-Probe geführt. Die CFK-Probe kann zusätzlich mittels Linearachse zugestellt werden. Die Temperaturverteilung wird mittels hochauflösender Thermografie-Kamera aufgezeichnet.

Bei den hier dargestellten Experimenten wurde die Thermografie-Kamera direkt neben der Ablenkeinheit angebracht. Zusammen mit einem vergleichsweise großen Arbeitsabstand von ca. 1000 mm wird so eine annähernd koaxiale Überdeckung von

Anregung und Detektion erreicht, wodurch perspektivische Fehler bei komplexen dreidimensionalen Bauteilen verringert werden.

Mit dieser flexiblen Anordnung war es möglich, verschiedene Varianten der Kombination aus Anregung und Thermografiedaten-Erfassung durch die Kamera jeweils in praktischen Versuchsreihen zu realisieren (siehe **Abb. 6**).

- 1) flächige Anregung (Mäander-Scan), Kamera erfasst Bilder
- 2) linienförmige Anregung bei ruhendem Objekt (schneller y -Scan, langsamerer x-Scan), Kamera erfasst Bilder
- 3a) linienförmige Anregung bei bewegtem Objekt (schneller y -Scan), Achsbewegung in x-Richtung, Kamera erfasst Linien (Zeilen / Spalten)
- 3b) linienförmige Anregung bei bewegtem Objekt (schneller y -Scan), Achsbewegung in x-Richtung, Kamera erfasst Bilder



Abb. 6: Defektprobe im Laserthermografie-Versuchsaufbau mit eingeschaltetem Laserpointer, Variante 1: Flächenanregung (links), Variante 2: Linienanregung bei ruhendem Objekt (mitte) und Variante 3: Linienanregung bei bewegtem Objekt (rechts)

Variante 1 stellt praktisch eine klassische flächenhafte Stufenanregung dar, bei welcher die Rolle des Halogenstrahlers vom Laser mit Scaneinheit übernommen wird. Deren Achsgeschwindigkeiten bzw. -frequenzen bestimmen die zeitliche Inhomogenität der Anregung während der Einschaltphase, darüber hinaus bestehen keine Unterschiede im resultierenden Zeitverhalten der Oberflächentemperatur.

Vorteilhaft gegenüber konventioneller Anregung sind die aufgrund ihrer Schmalbandigkeit praktisch vollständig fehlende Reflexion der Anregungsquelle während der Einschaltphase, eine nahezu ideale Homogenität der Ausleuchtung über der Fläche sowie die hohe Flankensteilheit zum Ein- und Ausschaltzeitpunkt.

Für diese Art der Anregung ist die Anhängigkeit der Probenerwärmung von der flächenbezogenen Energiedichte empirisch bestimmt worden. Diese folgt im betrachteten Bereich einer Potenzfunktion mit dem Exponenten 2,2.

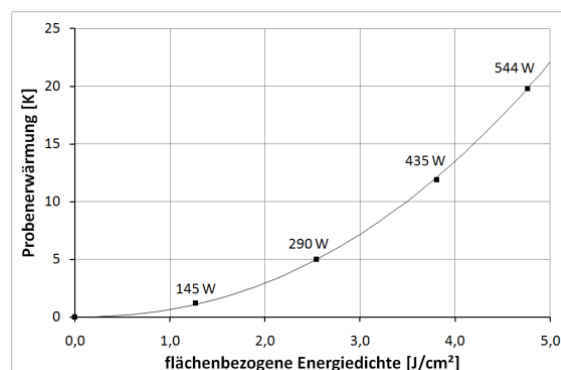


Abb. 7: Probenerwärmung in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Energiedichte

Wird für **Variante 2** die Ablenkung des Laserstrahls so verändert, dass dieser als schnell gescannte (z.B. senkrechte) Linie erscheint und orthogonal dazu über das Objekt

geführt wird, kann nicht mehr von einer Quasi-Gleichzeitigkeit der Anregung für alle Bildpunkte ausgegangen werden, so dass diese Zeitdifferenzen bei der Auswertung der Thermobilddaten berücksichtigt werden müssen. Im Gegenzug ergibt sich als Vorteil gegenüber Variante 1 das Fehlen des dortigen Impulsbetriebs während der Anregung.

Fokussiert man den Laserstrahl sehr stark, ergibt sich darüber hinaus die Möglichkeit, die Anregungsdauer soweit zu verkürzen, dass die Stufenanregung praktisch in eine Impulsanregung übergeht. Wegen der sich dadurch verringernden örtlichen Verweildauern stellt eine solche Betriebsart jedoch höhere Anforderungen an die verfügbare Laserleistung.

In **Variante 3a** wird die Thermografiekamera als Infrarot-Linescanner betrieben. Bei der Kombination mit einer zeitlich vorausgehenden linienförmigen Erwärmung handelt es sich um eine bekannte Anordnung zur kontinuierlichen thermografischen Prüfung langgestreckter bzw. quasi-endloser Objekte bis hin zu auf einem Transportband befindlichen Schüttgut [3], [4]. Der besondere Vorzug bei Ausstattung eines solchen Aufbaus mit einer Thermografiekamera besteht im softwareseitig einstellbaren Zeitpunkt des Nachlaufs der Datenakquisition gegenüber dem Anregungszeitpunkt durch entsprechende Wahl der ausgelesenen Bildzeile bzw. -spalte (siehe **Abb. 8**). Für die konkrete Anwendung einer solchen Anordnung zur Prüfung von Kunststoff-Klebung hat dies den Vorteil, dass sich damit im selben Aufbau problemlos Verbindungen mit unterschiedlichen Materialstärken des oberen Fügepartners prüfen ließen.

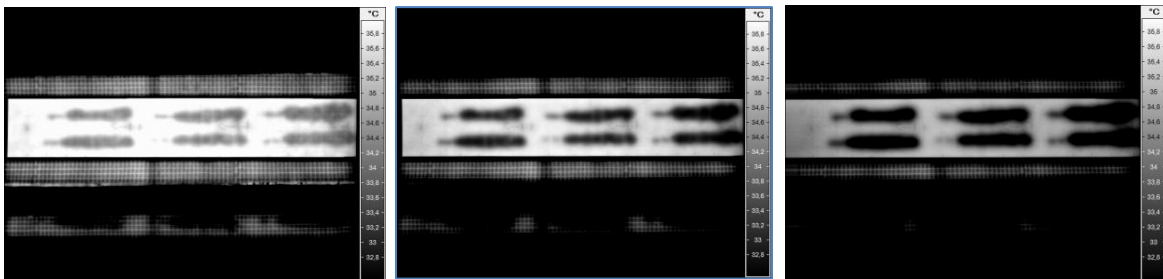


Abb. 8: Linescan-Thermobild, gebildet aus einer Bildsequenz durch Selektion von Spalten unterschiedlicher Zeitdifferenz zur Anregung (links 4 s, mitte 6 s, rechts 10 s)

Gegenüber dieser in Bezug auf die Behandlung der akquirierten Daten wenig aufwändigen, jedoch sehr effizienten Methode bietet **Variante 3b** ein noch deutlich umfangreicheres Potenzial an Möglichkeiten für das Processing der akquirierten Thermografiedaten. Ausgangspunkt ist eine fortlaufende ortsbezogene Korrelation der Thermobilder einer Sequenz mit sich anschließender Transformation in ortskorrigierte, zeitbezogene Datenreihen. Diese wiederum lassen sich mit den aus der stationären Wärmefluss-Thermografie bekannten Auswertungsverfahren weiterverarbeiten und bis zur automatischen Fehlerklassifikation, z.B. auf Basis der kontinuierlich berechneten PPT-Phasenbilder führen.

5. Zusammenfassung

In den durchgeführten Untersuchungen ist die prinzipielle Eignung laserangeregter Thermografie zur Prüfung von Klebverbindungen mit CFK-Bauteilen nachgewiesen worden. Die sowohl kamera- als auch laserseitig hierfür benötigten Parameter wurden ermittelt. Für die geometrische Auflösung der Thermografiekamera bedeutet dies, dass Pixelzahl, Objektiv-Brennweite und Objektabstand so zu wählen sind, dass das resultierende IFOV nicht größer ist als die halbe Materialstärke des oberen, der Kamera

zugewandten Fügepartners. Die maximal mögliche Prüffläche (bzw. deren Breite oder Höhe) ergibt sich somit ca. als das $n/2$ -fache der Materialstärke, wobei n die horizontale bzw. vertikale Pixelzahl der Kamera ist (z.B. 510 mm x 410 mm für Material von 1,6 mm Stärke und einer Kamera mit 640 x 512 Pixeln). Kameras mit höheren Pixelzahlen erlauben eine deutliche Vergrößerung der Prüffläche. Bei der derzeit kommerziell verfügbaren Obergrenze von 1920 x 1536 Pixeln beträgt diese (bei gleicher Materialstärke) bereits 1,54 m x 1,23 m.

Damit wird die Anregungsseite zum Engpass für eine Erhöhung des Prüfdurchsatzes, da eine homogene Ausleuchtung so großer Flächen mit konventioneller Anregungstechnik wie Halogenstrahlern bzw. Blitzlampen eine praktisch kaum bzw. nur mit besonders hohem gerätetechnischen Aufwand zu bewältigende Herausforderung darstellt. Einen Ausweg könnte die Laseranregung weisen, wobei diese ihre Vorteile besonders bei linienförmiger Anregung, kombiniert mit einem senkrecht dazu stattfindenden kontinuierlichen Vorschub des Prüflings ausspielen kann.

Für eine mit Blick auf ein ausreichendes Signal-Rausch-Verhältnis anzustrebende Temperaturerhöhung von mindestens 5 K würde eine kontinuierliche Prüfung über die Bildfeldhöhe bei streifenförmiger Anregung mit 1 kW Laserleistung in einer Vorschubgeschwindigkeit von 32 mm/s vonstatten gehen können. Für die oben berechnete Prüffläche von 1,9 m² würde damit eine Prüfzeit von 48 s benötigt, was wiederum einem Flächendurchsatz der Prüfung von 400 cm²/s bzw. 2,4 m²/min entspricht.

Mit der sich abzeichnenden breiteren Verfügbarkeit von Thermografiekameras mit hohen Pixelzahlen erscheint die thermografische Prüfung von CFK-Verklebungen mit Laseranregung in einer solchen Kombination aus Signalauflösung und Geschwindigkeit realisierbar, wie diese bei industrieller Serienfertigung benötigt wird. Insbesondere die Kombination von Linienanregung und Erfassung zweidimensionaler Thermografiedaten eröffnet erweiterte Auswertungsmöglichkeiten wie beispielsweise eine kontinuierliche Puls-Phasen-Auswertung auf Basis einer fortlaufenden Transformation der Bildsequenzen in ortskorrigierte, zeitbezogene Datenreihen.

6. Danksagung

Diese Arbeit wurde als Teil des Verbundprojekts „Gepulste, wellenlängenkonvertierte Faserlaser für die Oberflächenmodifikation und Prüfung von Leichtbauwerkstoffen (GEWOL)“, Förderkennzeichen 13N12898 im Rahmen des Förderprogramms „Photonik Forschung Deutschland“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

7. Referenzen

- [1] Gruber, J., Gresslehner, K., Sekelja, J., Mayr, G.: “Zuverlässigkeitsstudie der Aktiven Thermografie bei der Prüfung von Verbundwerkstoffen mittels Probability of Detection Analyse“, DGZfP Thermographie-Kolloquium, 2015
- [2] Projektsteckbrief BMBF-Projekt “GEWOL“, 2014
<http://www.photonikforschung.de/forschungsfelder/lasertechnik/photonik-fuer-den-leichtbau/>
- [3] Maldague, X.: “Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography“, 1993
- [4] Meinschmidt, P., Sembach, J.: “Vorrichtung zum berührungslosen Detektieren von Prüfkörpern“, Patentschrift DE19846995, 1998