

Anwendungsbereiche und Grenzen der Blitzthermografie – Entwicklung eines anwendungsnahen Standards

Christiane MAIERHOFER*, Mercedes REISCHEL*, Rainer KRANKENHAGEN*,
Philipp MYRACH*, Mathias RÖLLIG*, Henrik STEINFURTH*

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, FB 8.4, Unter den Eichen 87,
12205 Berlin, christiane.maierhofer@bam.de

Kurzfassung. Ein anwendungsnaher Standard zur aktiven Thermografie mit Blitzanregung soll die Auswahl und Bewertung der geeigneten Messtechnik, die Durchführung der Messungen sowie die Auswertung und Darstellung der Messdaten in Abhängigkeit vom Prüfproblem festlegen.

In diesem Beitrag werden zum einen Möglichkeiten zur Charakterisierung der Blitzlichtanregung sowie alternative Anregungstechniken vorgestellt. Zum anderen wurden für verschiedene Prüfprobleme Referenzprobekörper entwickelt, die systematische Untersuchungen zur Optimierung der Messparameter ermöglichen.

Einführung

Die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung wird bereits seit vielen Jahren erfolgreich in der Industrie und Forschung zur schnellen Prüfung von metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen eingesetzt. Die Vorteile des Verfahrens sind zum einen eine schnelle und zerstörungs- und berührungsfreie Messung, zum anderen werden die Messdaten direkt bildgebend erfasst und können in vielen Fällen für die qualitative Bewertung von Inhomogenitäten und Fehlern ohne eine weitere Daten- und Bildverarbeitung verwendet werden.

Die Blitzthermografie eignet sich insbesondere zur Ortung von Defekten, die sich in der Nähe der Oberfläche befinden und möglichst parallel dazu ausgerichtet sind. Erfolgreich wird das Verfahren daher zur Prüfung von Gasturbinenschaufeln [1], in der Automobilindustrie [2] und hier insbesondere zur Prüfung von Punkt- und Laserschweißverbindungen [3] sowie zur Prüfung von Faserverbundwerkstoffen in der Luftfahrt [4] eingesetzt. Für die Prüfung eignen sich sowohl metallische als auch nichtmetallische Werkstoffe.

Bisher müssen jedoch für jede Anwendung dieses Verfahrens in der Industrie aufwändige Verfahrensvalidierungen durchgeführt und individuelle Prüfstandards entwickelt werden. Um diesen Prozess zukünftig deutlich zu vereinfachen, werden von den Autoren im Rahmen eines vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Forschungsprojektes anwendungsnahe Regelungen zur Blitzthermografie erstellt.

Seit 2004 gibt es zur ZfP mit Thermografie eine Grundlagnorm (DIN 54190-1, 2004 [5]). Später folgten eine Gerätenorm (DIN 54190-2, 2011 [6]) und eine Begriffsnorm (DIN 54190-3, 2006 [7]). 2009 wurde die erste Prüfnorm zur thermografischen Prüfung elektrischer Anlagen (DIN 54191 [8]) entwickelt. Im Dezember 2010 wurde eine



Grundlagennorm zur Aktiven Thermografie (DIN 54192 [9]) veröffentlicht. Die DIN 54190 Teil 1 bis 3 und DIN 54192 wurden in die neu gegründete Arbeitsgruppe CEN/TC138/WG11 *Infrared Thermographic Testing* eingereicht. Mit der Überarbeitung der Grundlagennorm wurde begonnen. Auf internationaler Ebene wurde in 2011 der Norm-Entwurf ISO/FDIS 10878:2011 zur Terminologie der Infrarotthermografie in der zerstörungsfreien Prüfung veröffentlicht [10]. Zur Blitzthermografie wurde 2007 der ASTM Standard ASTM E 2582-07 *Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications* veröffentlicht [11]. In diesem Standard wird die Blitzthermografie als Prüfverfahren zur Ortung und Charakterisierung von zur Oberfläche parallel verlaufenden Fehlstellen in Verbundwerkstoffen beschrieben. Zur photothermischen Schichtdickenmessung mittels thermischer Wellen, die auf der Oberfläche eines Bauteiles mit einer modulierten Anregungsquelle erzeugt werden, legt die DIN EN 15042-2 [12], die 2006 vom Technischen Komitee CEN/TC 262 *Metallische und andere anorganische Überzüge* basierend auf der DIN 50992-2 erarbeitet wurde, ein Messverfahren fest. Hier wird als Anwendungsgebiet jedoch nur auf die Schichtdickenmessung eingegangen. Bildgebende Systeme zur Erfassung der IR-Strahlung werden nicht berücksichtigt.

Für die aktive Thermografie fehlen daher noch Standards, die die Einsatzgebiete, mögliche Anwendungen, Gerätekombinationen, Messungenauigkeiten, Einflussgrößen und Einsatzgrenzen für thermische Anregungsverfahren wie die Blitzthermografie und die Lockin-Thermografie beschreiben. Auch gibt es zurzeit noch keine Festlegungen für Referenzprobekörper und Prüfkörper, mit denen Geräte- und Verfahrensspezifikationen kontrolliert werden können. Im Folgenden werden Ergebnisse zur Erarbeitung einer Norm zur Blitzthermografie vorgestellt.

1 Auswahl und Charakterisierung der Messtechnik

Je nach Prüfproblem können für die Blitzthermografie unterschiedliche Anregungsquellen und Infrarotkameras eingesetzt werden. Sollen neben der Defektortung auch quantitative Informationen zur Fehlerposition, -größe und/oder -tiefe ermittelt werden, so bieten sich neben der Darstellung der erfassten Thermogramme weitere Bildbearbeitungs- und Rekonstruktionsalgorithmen an. Eine Übersicht zu den zu prüfenden Materialien, Anregungsquellen, Detektionssystemen und Auswertungsalgorithmen zeigt Bild 1.

Prüfobjekt	Anregungsquelle	Detektorsystem (IR-Kamera)	Datenauswertung
<ul style="list-style-type: none"> • Metalle mit hoher Temperaturleitfähigkeit • Metalle mit niedriger Temperaturleitfähigkeit • Polymere • Keramik • Organische Materialien • Faserverbundwerkstoffe • Glänzende Oberfläche • Matte oder geschwärzte Oberfläche • Teilweise transparente Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> • Blitzlampe • Laser mit <u>Strahlaufweitung</u> • LED-Array • Halogenlampe • IR-Strahler • ... • Filter (PMMA, ...) 	<ul style="list-style-type: none"> • FPA-Array • Mikrobolometer (ungekühlt) • Quantendetektor (gekühlt) • <u>InSb</u> (SMWIR, MWIR) • <u>HgCdTe</u> (MWIR, LWIR) • Detektorgröße (320x256 bis 1280x1024) • Objektiv (Öffnungswinkel, Lichtstärke) • Filter 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturkontrast • Averaging • Kantenfilter • PPT (Puls-Phasen-Thermografie) • TSR (Thermal Signal Reconstruction) • PCA (Hauptkomponentenanalyse) • Vergleich mit Referenzkurven • Numerische Rekonstruktion

Bild 1. Prüfobjekte und Varianten der Mess- und Auswertetechnik für die Blitzthermografie.

1.1 Charakterisierung der Anregungsquellen

Als Anregungsquelle werden zurzeit am häufigsten Xenonblitzlampen eingesetzt. Nur diese ermöglichen innerhalb kürzester Zeit (1 bis 5 ms) einen maximalen Energieeintrag bei einer Energieaufnahme von bis zu 10 kJ. Das abgestrahlte Infrarotspektrum entspricht dem eines ca. 5000 K warmen Schwarzkörperstrahlers. Um eine zusätzliche Erwärmung des Prüfobjektes nach der Blitzanregung durch die Restwärme der Blitzlampe zu vermeiden, werden häufig PMMA-Platten (Polymethylmethacrylat) eingesetzt. Während der Blitzanregung wird eine sehr dünne Oberflächenschicht erwärmt, von der aus der Wärmetransport durch Wärmeleitung in das Innere des Bauteils erfolgt. In Abhängigkeit vom zu prüfenden Material kann die Eindringtiefe bis zu mehrere Millimeter betragen. Nachteilig sind bei der Blitzanregung der erforderliche Arbeitsschutz sowie die begrenzte Lebensdauer der Lampen. Alternativ dazu wurde daher im Rahmen des Projektes ein LED-Array entwickelt [13]. Die wesentlichen Vorteile dieser Strahlungsquelle sind eine eng begrenzte Bandbreite der Strahlung, die sich nicht mit dem Wellenlängenbereich der IR-Kamera überlagert. Weiterhin ist die Restwärme nach dem Ausschalten der Quelle deutlich geringer. Es muss jedoch mit längeren Erwärmungszeiten von bis zu einer Sekunde angeregt werden.

Um einen Vergleich verschiedener Strahlungsquellen zu ermöglichen, wurde zunächst die im Projekt verwendeten Blitzlampen (EH Pro 6000 Blitzlampe von Hensel mit einem Aperturdurchmesser von 17 cm und einer Energieaufnahme von 6 kJ pro Blitz) charakterisiert. Dies umfasste zum einen die Bestimmung der Pulslänge in verschiedenen Wellenlängenbereichen sowie die Erfassung der Impulsantwort einer dünnen schwarzen Pappe ohne und mit PMMA-Platte. Teilergebnisse dieser Messungen zeigen eine deutlich größere Impulslänge im infraroten Spektralbereich als im sichtbaren, s. Bild 2 links. Die Verwendung einer PMMA-Scheibe führt zu einer zusätzlichen zeitlichen Verbreiterung der thermischen Antwort. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die in Bild 2 links dargestellten Kurven auf das Intensitätsmaximum normiert wurden [14]. Zum anderen wurde zur Bestimmung der tatsächlich von der Blitzlampe abgestrahlten Energiedichte sowie deren räumlicher Verteilung ein kalorimetrischer Sensor entwickelt und kalibriert [15]. Dieser Sensor besteht aus einem $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ großen Edelstahl-Plättchen mit bekannter Wärmekapazität. Bild 2 rechts zeigt die Energiedichteverteilung der Blitzlampe vom Zentrum nach außen in einem Abstand von 35 cm.

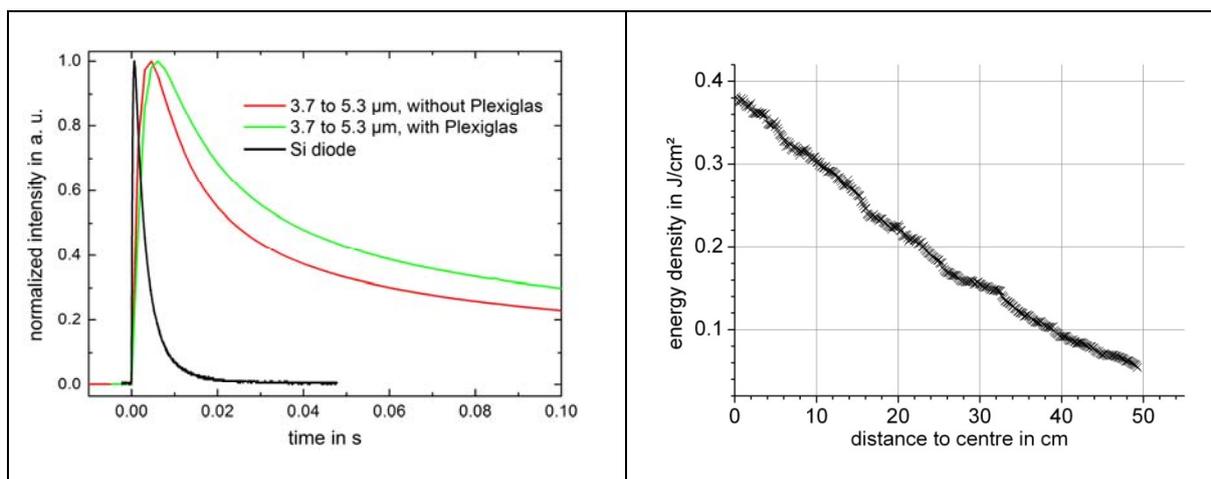


Bild 2. Links: Zeitliches Verhalten des Impulses einer Blitzlampe im sichtbaren und NIR Wellenlängenbereich (schwarz), und die gemessene thermische Antwort einer dünnen schwarzen Pappe im Wellenlängenbereich von 3,7 bis 5,3 µm ohne (rot) und mit (grün) PMMA-Platte vor der Blitzlampe. Rechts: Energiedichteverteilung einer Blitzlampe vom Zentrum nach außen in einem Abstand von 35 cm.

1.2 Auswahl der Messparameter

Bei einer vorgegebenen Konfiguration aus Blitzlampe und Infrarot(IR)-Kamera mit einem gekühlten FPA Quantendetektor und Objektiv lassen sich in der Regel die folgenden Messparameter variieren:

- Positionierung von Strahlungsquelle und IR-Kamera relativ zum Prüfobjekt (Vermeidung von Reflexionen)
- Einsatz geeigneter Filter zwischen Strahlungsquelle und Prüfobjekt oder zwischen Prüfobjekt und Detektor zur Beseitigung von Störstrahlung
- Wahl der Integrationszeit (abhängig vom Temperaturmessbereich, beeinflusst die Temporauflösung)
- Bildwiederholrate (Zeitauflösung)
- Bildauslesemodus (ITR, IWR)
- Anzahl der erfassten Thermogramme in der Sequenz

2 Beschreibung der Referenzprobekörper

2.1 Metallische Referenzprobekörper

Die Blitzthermografie eignet sich sehr gut zur Prüfung metallischer Beschichtungen und von Fügeverbindungen zwischen dünnen metallischen Blechen wie z. B. Punktschweiß- oder Laserschweißverbindungen und Lötverbindungen. Um Einflussgrößen zu erkennen und Messparameter zu optimieren wurden verschiedene metallische Probekörper entwickelt und untersucht. Zum einen wurden Lötverbindungen zwischen Blechen mit künstlichen Fehlstellen angefertigt [16]. Zum anderen wurde aus Edelstahl ein Quader mit einer polierten Oberfläche hergestellt. In diese Oberfläche wurden quadratische Vertiefungen mit einer Tiefe von 0,3 mm und Größen von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ bis $2 \times 2 \text{ mm}^2$ mittels Funkenerosion eingebracht, s. Bild 3. Platten mit ebenfalls polierten Unterseiten mit Dicken von 0,5 bis 3 mm können als Deckschicht mit dem Quader verschraubt werden. Die sehr glatten Oberflächen ermöglichen einen guten thermischen Kontakt. Weitere Probekörper dieser Art wurden aus Kupfer und Aluminium hergestellt.

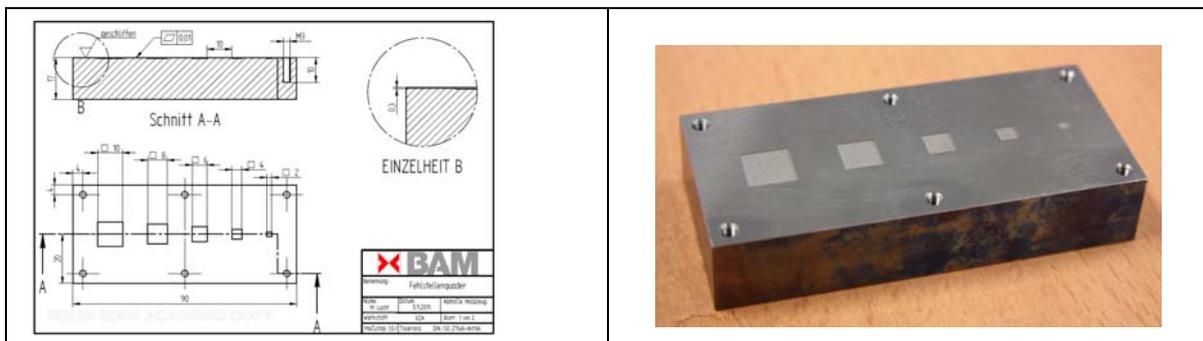


Bild 3. Skizze (links) und Foto (rechts) des Probekörpers ohne Abdeckplatte. Sichtbar sind die flachen Fehlstellen, die durch Funkenerosion eingebracht wurden und eine Tiefe von 0,3 mm haben.

2.2 Referenzprobekörper aus CFK

Zur Herstellung künstlicher Delaminationen zwischen einzelnen Laminatlagen wurden in zwei CFK Stufenprobekörpern doppelt gelegte PTFE-Plättchen (Polytetrafluorethylen) in Größen von 2 x 2 bis 20 x 20 mm² in unterschiedlichen Tiefen eingebaut. Jeder dieser Stufenprobekörper weist fünf Stufen mit Materialstärken von 6 bis 4 mm (Probekörper Nr. 1) und 3,5 bis 1,5 mm (Probekörper Nr. 2) auf, s. Bild 4. Alle Plättchen wurden von der Unterseite aus in einer Tiefe von 1 mm eingelegt, so dass Überdeckungen von 5 bis 0,5 mm realisiert wurden. Als Material wurden mit Epoxydharz vorimprägnierte sog. Bleeding Prepregs mit einer Dicke von jeweils 0,13 mm verwendet.

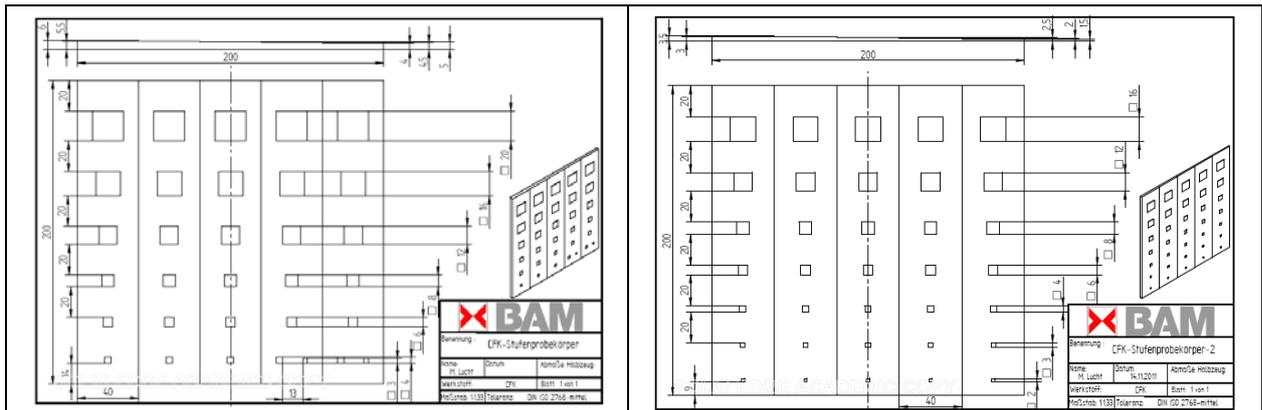


Bild 4. Skizzen der CFK Stufenprobekörper Nr. 1 mit Materialstärken von 6 bis 4 mm (links) und Nr. 2 (rechts) mit Materialstärken von 3,5 bis 1,5 mm.

3 Ergebnisse der Messungen an den Referenzprobekörpern

3.1 Metallische Probekörper

Der Edelstahl-Probekörper mit den funkenrodierten Fehlstellen wurde mit Blitzlichtanregung sowohl mit 2 als auch mit 4 Blitzlampen, jeweils mit und ohne Schwärzung der Oberfläche sowie mit allen Blechdicken untersucht. Es wurde eine gekühlte InSb IR-Kamera mit einer Detektorgröße von 640 x 512 Pixeln und einem 29 mm SMWIR Objektiv mit einem Öffnungswinkel von 15,1° x 18,8° verwendet. Vor dem Detektor wurde ein Bandpassfilter 3,7 bis 5,3 µm eingesetzt. Die Bildwiederholrate im ITR (integrate-then-read) Modus lag bei 93 Hz. Ausgewählte Ergebnisse von vier Messreihen sind in Bild 5 dargestellt. Ausgewertet wurden jeweils ein Thermogram, ein nach der Puls-Phasen-Thermografie ermitteltes Phasenbild und ein Bild aus der 1. Ableitung der doppeltlogarithmisch dargestellten Abkühlungskurven. Die Bilder wurden nach dem maximalen Kontrast für die Fehlstellen ausgewählt. Aus diesen Bildern lassen sich die folgenden Beobachtungen zusammenfassen:

- In allen Sequenzen können die Fehlstellen aufgrund einer höheren Temperatur nach der Anregung detektiert werden. Dies bedeutet, dass der thermische Kontakt an der Grenzfläche zum Blech gut genug ist. Trotzdem zeichnet sich an den Proberändern der Einfluss des mechanischen Andrucks durch die Schrauben ab.
- Vergleicht man die Spalten 1 und 2, dann ist zu erkennen, dass eine Schwärzung der Probenoberfläche zu einer deutlichen Verbesserung des SNR der Fehlstellen führt und erst damit die 2 x 2 mm² große Fehlstelle detektiert wird.

- Vergleicht man die Spalten 3 und 4, so ist hier zu erkennen, dass eine Erhöhung der eingebrachten Energie von 2 auf 4 Lampen nicht zu einer wesentlichen Verbesserung des SNR führt.
- Bei einer Blechdicke von 3 mm können nur Fehlstellen bis zu einer Größe von $4 \times 4 \text{ mm}^2$ detektiert werden.
- Sowohl in den Phasenbildern als auch in den Bildern der 1. Ableitung können die Fehlstellen mit einem höheren SNR und einer besseren Ortsauflösung abgebildet werden als in den Thermogrammen.

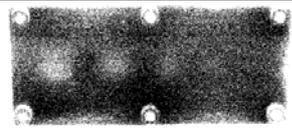
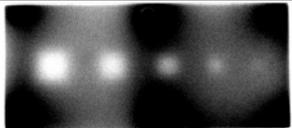
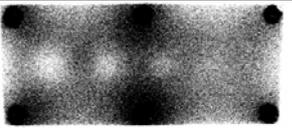
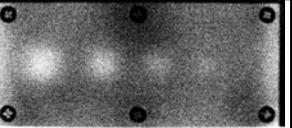
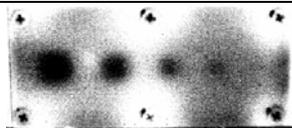
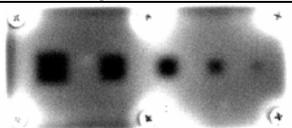
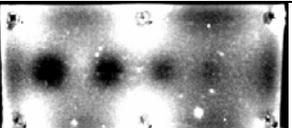
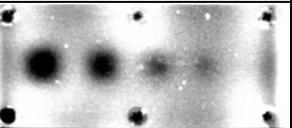
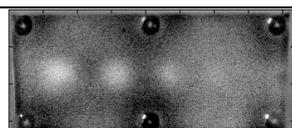
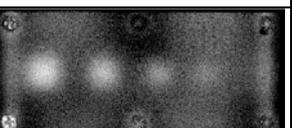
1 mm Blechdicke, keine Schwärzung, 4 Lampen	1 mm Blechdicke, Schwärzung, 4 Lampen	3 mm Blechdicke, Schwärzung, 4 Lampen	3 mm Blechdicke, Schwärzung, 2 Lampen
			
Thermogramm	Thermogramm	Thermogramm	Thermogramm
			
Phasenbild Nr. 3	Phasenbild Nr. 5	Phasenbild Nr. 1	Phasenbild Nr. 1
			
1. Ableitung TSR	1. Ableitung TSR	1. Ableitung TSR	1. Ableitung TSR

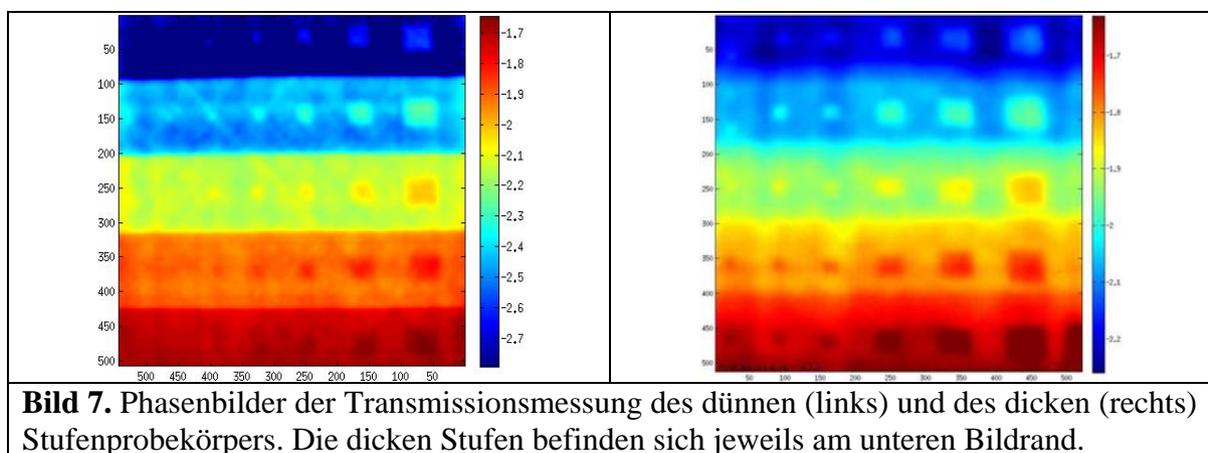
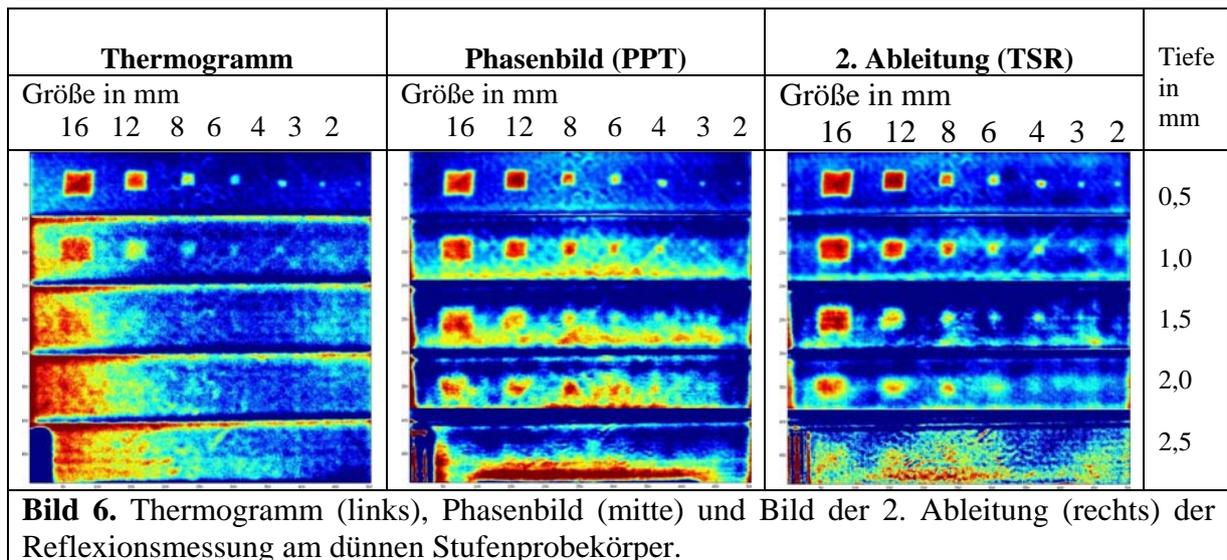
Bild 5. Ergebnisse der Blitzthermografie Messungen am Probekörper mit den erodierten Fehlstellen und mit unterschiedlichen Blechdicken von 1 mm (linke Spalten) und 3 mm (rechte Spalten). Für jede Sequenz sind ein Thermogramm, ein Phasenbild und ein Bild aus der 1. Ableitung dargestellt.

3.2 CFK Probekörper

An den beiden Stufenprobekörpern wurden mit dem oben beschriebenen experimentellen Aufbau mit 4 Blitzlampen sowohl Messungen in Reflexions- als auch in Transmissionskonfiguration durchgeführt.

Die Ergebnisse der Reflexionsmessung am dünnen Stufenprobekörper Nr. 2 sind in Bild 6 dargestellt. Am besten können die Delaminationen im Bild der 2. Ableitung der doppeltlogarithmisch aufgetragenen Abkühlkurve dargestellt werden. Die künstlichen Defekte können nur bis zu einer Tiefe von 2 mm mit einer Größe von $4 \times 4 \text{ mm}^2$ detektiert werden. Dies lässt sich mit der anisotropen Temperaturleitfähigkeit begründen, die aufgrund der Lage der Kohlefasern parallel zur Oberfläche in dieser Ebene deutlich größer ist als senkrecht dazu.

Jeweils ein Phasenbild der Transmissionsmessungen durch den dünnen und durch den dicken Stufenprobekörper ist in Bild 7 zu sehen. Hier sind fast alle Fehlstellen auch bei den dickeren Stufen zu erkennen. Daraus kann geschlossen werden, dass die hier künstlich erzeugten Delaminationen eher auf eine Änderung der Temperaturleitfähigkeit des Materials als auf die der Effusivität des Materials zurückzuführen ist. Dies deutet wiederum darauf hin, dass eher die PTFE-Plättchen direkt als ein durch diese erzeugter (und beabsichtigter) Lufteinschluss aufgrund des mangelnden Materialverbunds detektiert werden.



4 Zusammenfassung und Ausblick

In Tabelle 1 werden die im Projekt hergestellten und untersuchten Referenzprobekörper gegenübergestellt. Weitere Probekörper und Untersuchungen werden in einem neuen Projekt zur Standardisierung der Lockin-Thermografie fortgesetzt.

Tabelle 1. Vergleichende Bewertung der Referenzprobekörper

Art des Probekörpers	Reproduzierbarkeit der Defekte	Dokumentierbarkeit der Geometrie	Nachweisgrenzen
Lötverbindung, Edelstahl und Kupfer	- (Fehlstellengröße weicht von der Planung ab)	+	V2A: 4x4 mm ² in 3 mm Tiefe
Erodierte Fehlstellen unterhalb einer Abdeckplatte (Kupfer, Aluminium, Edelstahl)	+	± (Fehlstellen im Cu-Probekörper konnten nicht detektiert werden)	V2A: 4x4 mm ² in 3 mm Tiefe
CFK Stufenprobekörper mit Ablösungen (2 Lagen Teflon)	+	++	Max. Überdeckung über Fehlstellen: 2 mm Max. Tiefe: > 3 mm

Art des Probekörpers	Reproduzierbarkeit der Defekte	Dokumentierbarkeit der Geometrie	Nachweisgrenzen
CFK Probekörper mit Impactschaden	0	+	?
CFK Probekörper mit unterschiedlichem Lagenaufbau	+	++	Orientierung der äußeren beiden Lagen

Danksagung

Die hier vorgestellten Forschungsergebnisse entstanden im Projekt *Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung*, das vom BMWi über die DLR als Projektträger gefördert wird. Für die hilfreiche Unterstützung bei der Herstellung der Referenzprobekörper danken wir Herrn Ch. Scheuerlein vom CERN, Herrn J. Häberle und Frau J. Schulz vom ZFL Zentrum für Faserverbunde und Leichtbau Haldensleben, Herrn M. Kunert von der DGZfP e. V. und Herrn P. Wossidlo von BAM 9.1. Herrn M. Sengebusch vom DIN e. V. danken wir für die Zusammenarbeit mit dem DIN Ausschuss.

Referenzen

- [1] Goldammer, M. et al.: Automatisiertes System zur thermographischen Prüfung von Gasturbinenschaufeln. DGZfP-Jahrestagung 2003, Mainz
- [2] Siemer, U.: Einsatz der Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren in der Automobilindustrie. Dissertation, Saarbrücken, 2010, http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2010/3062/pdf/Dissertation_UlrikeSiemer_16.03.2010.pdf
- [3] Schlichting, J., Brauser, S., Pepke, L.-A., Maierhofer, Ch., Rethmeier, M., Kreuzbruck, M.: Thermographic testing of spot welds. NDT & E International, Vol. 48, pp. 23-29, 2012
- [4] Oster, R.: Non-destructive testing methodologies on helicopter fiber composite components - challenges today and in the future. Proceedings of 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa. http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/391_wcndtabstract00391.pdf
- [5] DIN 54190-1:2004-08, Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen
- [6] DIN 54190-2:2011-09, Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 2: Geräte
- [7] DIN 54190-3:2006-02, Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 3: Begriffe
- [8] DIN 54191-2009-03, Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung elektrischer Anlagen
- [9] DIN 54192-2010-11, Zerstörungsfreie Prüfung – Aktive Thermografie
- [10] ISO/FDIS 10878:2011, Non-destructive testing – Infrared thermography - Vocabulary
- [11] ASTM E 2582-07, Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications
- [12] EN 15042-2:2006-06, Thickness measurement of coatings and characterization of surfaces with surface waves - Part 2: Guide to the thickness measurement of coatings by photothermic method
- [13] Ziegler, M., Maierhofer, Ch., Hochleistungs-LED für die zerstörungsfreie thermografische Prüfung. Tagungsband zur DACH Jahrestagung 2012, Graz, Österreich, in Druck
- [14] Maierhofer, Ch., Reischel, M., Steinfurth, H., Röllig, M., Myrach, P., and Ziegler, M.: Development of reference test specimens for the standardisation of active thermography with flash excitation. Proc. of QIRT 2012, <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2012/papers/QIRT-2012-195.pdf>
- [15] Krankenhagen, R., Maierhofer, Ch.: Determination of the spatial energy distribution generated by means of a flash lamp. Proc. of QIRT 2012, <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2012/papers/QIRT-2012-198.pdf>
- [16] Maierhofer, Ch., Röllig, M., Steinfurth, H., Ziegler, M., Heck, S. J., und Scheuerlein, Ch.: Aktive Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung von Lötverbindungen. Tagungsband der DGZfP Jahrestagung 2011, Di.1.C.1, <http://www.ndt.net/article/dgzfp2011/papers/di1c1.pdf>
- [17] DIN 65561-1991, Luft- und Raumfahrt; Faserverstärkte Kunststoffe; Prüfung von multidirektionalen Laminaten; Bestimmung der Druckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung