

Entwicklung von Referenzprobekörpern für die Standardisierung der Blitzthermografie

Christiane MAIERHOFER*, Mathias ZIEGLER*, Matthias KUNERT**,
Matthias GOLDAMMER***

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

** DGZfP Ausbildung und Training GmbH, Schillerplatz 3, 19322 Wittenberge,
ku@dgzfp.de

*** Siemens AG CT T DE HW2, Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München,
matthias.goldammer@siemens.com

Kurzfassung. Die aktive Thermografie wird in der Industrie zunehmend in verschiedenen Bereichen zur Qualitätssicherung, Zustandsdiagnose und Zustandsüberwachung eingesetzt. Bestehende Normen zur Thermografie beschreiben die Grundlagen, Geräte und Begriffe. In diesem Beitrag wird über ein Projekt berichtet, dessen Ziel die Erarbeitung einer Prüfnorm zur Blitzthermografie ist. Diese sollte neben der Auswahl geeigneter Gerätekomponenten, der Auswertungsverfahren und der Vorgehensweise bei der Prüfung auch die Beschreibung geeigneter Referenzprobekörper enthalten, die eine Bewertung der Messapparatur und eine Qualitätssicherung der Prüfung ermöglichen.

1 Einführung

Die Festlegung einer einheitlichen Vorgehensweise für die Durchführung von Prüfungen mit der aktiven Thermografie mit Blitzlichtanregung ist für deren sicheren und zuverlässigen Einsatz in der Industrie dringend erforderlich. Hier wird die Blitzthermografie bereits in vielen Bereichen der Forschung, aber nur in Einzelfällen in der Fertigung eingesetzt. Jede neue Anwendung der Blitzthermografie muss zurzeit in aufwändigen individuellen Versuchen und Kalibrierungen an das Prüfproblem angepasst werden, und eine umfangreiche Beschreibung in Prüfanweisungen ist erforderlich.

Eine nationale Norm zur Blitzthermografie, die zukünftig auch als europäischer Standard verbreitet werden soll, würde zum einen den Industriefirmen und KMUs, die regelkonforme Prüfungen durchführen und in der Qualitätssicherung einsetzen, deutliche Marktvorteile verschaffen. Zum anderen wird dadurch den Anwendungen des Verfahrens mehr Akzeptanz in der Fachwelt und Industrie entgegengebracht, so dass die Marktchancen für Gerätehersteller und Dienstleister der aktiven Thermografie verbessert werden. Um diesen Prozess zu unterstützen, führt die BAM zusammen mit der DGZfP und der Siemens AG sowie mit Unterstützung durch den DIN ein entsprechendes Entwicklungsprojekt mit dem Titel „Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung“ durch. Dieses Projekt wird vom BMWi im Programm „Transfer von FuE-Ergebnissen durch Normung und Standardisierung“ gefördert, Projektträger ist die DLR.

Für die Erarbeitung von Standards zur Blitzthermografie fehlen noch systematische Untersuchungen zu Anwendungsgrenzen, Nachweisempfindlichkeiten und Messungenauigkeiten, damit eine umfassende wissenschaftliche und technische Beschreibung des Prüfverfahrens möglich wird. Daher wurden zunächst typische Prüfprobleme mit den entsprechenden Werkstoffeigenschaften und Bauteilgeometrien mit Hilfe der Anwender zusammengestellt und spezifiziert. Daraus abzuleitende Referenzprobekörper (RPK) werden gemeinsam mit der Industrie entwickelt und der aktuelle Entwicklungsstand in diesem Beitrag vorgestellt.

2 Aktueller Stand der Normung

Allgemein gibt es zur Thermografie seit mehreren Jahren eine Grundlagnorm [1], eine Gerätenorm [2] und eine Begriffsnorm [3]. 2009 wurde die erste Prüfnorm zur thermografischen Prüfung elektrischer Anlagen [4] entwickelt. Weiterhin wurde eine Norm zur aktiven Thermografie [5] im DIN NMP Arbeitsausschuss NA 062-08-27 AA „Visuelle und thermografische Prüfung“ erarbeitet. Vom ersten Normentwurf bis zur Verabschiedung verging nur etwas mehr als ein Jahr, was das aktuelle Interesse und den Bedarf der Anwender veranschaulicht. In dieser Norm werden zusätzliche Begriffe, generelle Techniken, grundlegende Auswertetechniken und allgemeine Anforderungen an das Prüfsystem der aktiven Thermografie in knapper Form beschrieben. Es fehlen jedoch die für die Anwender erforderlichen konkreten Angaben zur Vorgehensweise bei der Prüfung verschiedener Materialien und Strukturen mit unterschiedlichen Anregungsquellen. Die englischen Übersetzungen der vier Normen DIN 54190-1 bis -3 und DIN 54192 wurden von der NMP-Geschäftsstelle an das Sekretariat von CEN/TC 138 Non-destructive Testing weitergereicht, um als Grundlage für die Erarbeitung von Europäischen Normen in der WG 11 Infrared Thermographic Testing zu dienen.

Ein ASTM Standard zur Vorgehensweise bei der Prüfung von dünnen Platten aus Verbundwerkstoffen und von Reparatur-Patches für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt wurde im Juli 2007 erstmals veröffentlicht [6]. In diesem Standard wird die Blitzthermografie als Prüfverfahren zur Ortung und Charakterisierung von zur Oberfläche parallel verlaufenden Fehlstellen beschrieben. Schwerpunktartig wird hier auf die Anwendung zur Prüfung von Polymeren eingegangen, andere Verbundwerkstoffe werden aber nicht ausgeschlossen. Es fehlen jedoch nach wie vor konkrete Standards, die die folgenden Fragen hinlänglich beantworten:

- Welche Materialien, Fehler und Inhomogenitäten können prinzipiell mit Blitzthermografie untersucht werden?
- Wie wird die Prüfung bzgl. der einzelnen Fragestellungen durchgeführt?
- Welche Messgeometrien (z. B. Reflexion, Transmission) sind möglich und sinnvoll?
- Welches Messsystem (z. B. Thermografie-Kamera und Blitzlicht) eignet sich für welche Materialien und welche Fehlertypen?
- Welche Fehlergrößen können nachgewiesen werden und welche Bedingungen sind dazu einzuhalten (thermischer Kontrast, Tiefenlage der Fehler)?
- Wie und mit welcher Genauigkeit kann aus der Anzeige auf die reale Fehlergröße geschlossen werden?
- Welche Materialeigenschaften oder Bauteilgeometrien führen zu Scheinanzeigen und wie kann man diese bestmöglich unterdrücken?
- Welche Möglichkeiten bezüglich weiterer quantitativen Auswertungen, z. B. Fehler-tiefe, bestehen? Sind die Ergebnisse eindeutig?
- Welche Auswertungsverfahren sind für welches Material und für welchen Fehlertyp am Sinnvollsten?

- Wie müssen RPK aussehen? Wie nahe muss ein Referenzfehler in solch einem RPK dem tatsächlichen Fehler kommen? Sind solche RPK bezüglich des Probenmaterials übertragbar? Sind solche RPK bezüglich der räumlichen Dimension übertragbar, d. h. skalierbar? Welche Modifikationen ergeben sich für dicke RPK, d. h. keine dünnen Platten wie sie im ASTM Standard ASTM E 2582-07 vorgeschrieben sind?

3 Beschreibung des Projektes Blitzthermografie

Zunächst wurden im Rahmen eines Workshops zusammen mit Anwendern aus Industrie und Mittelstand RPK für verschiedene Werkstoffsysteme unter Berücksichtigung aktueller Fragestellungen entwickelt. Der Workshop wurde auch genutzt, um mit den Anwendern Spezifikationen der zurzeit genutzten Messsysteme zu erstellen. Im Projekt werden diese ergänzt, um die Anforderungen an die Prüfprobleme zu erfüllen. Basierend auf diesen Spezifikationen wird die Messtechnik weiterentwickelt und charakterisiert. Anschließend wird dann die Messstrategie am Beispiel der Probekörper erstellt. Anhand der Messungen an den RPK werden Auswertungs- und Bewertungsverfahren erarbeitet und verschiedene geeignete Ergebnisdarstellungen miteinander verglichen. Die Messdaten werden ausgewertet und die Ergebnisse bewertet. Der Ergebnisbericht und eine Ergebnispräsentation werden vorbereitet, um im Anschluss an das Vorhaben für ein neues Normungsprojekt in den DIN Normenausschuss eingebracht zu werden.

Der Workshop „Industrielle Anwendung und Standardisierung der Blitzthermografie“ fand am 27. Juni 2011 bei der DGZfP in Berlin statt und wurde von der DGZfP, dem DIN, der BAM und dem BMWi organisiert. Vertreter aus Industrie, Mittelstand und Forschung diskutierten über aktuelle Technologien und Anwendungen sowie über den erforderlichen Standardisierungsbedarf für die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung. Mit der Anmeldung zum Workshop konnten die Teilnehmer einen Fragebogen zu ihren typischen Prüfproblemen, der verwendeten Messtechnik und Anforderungen an RPK ausfüllen. Die Auswertung dieser Fragebögen ergab Schwerpunkte bei Anwendungen zur Prüfung von CFK und GFK Strukturen. Bei vielen Anwendern wird die aktive Thermografie zwar noch nicht eingesetzt, die Beschaffung eines aktiven Thermografiesystems ist jedoch geplant. Es wurde die Auswertung der Fragebögen vorgestellt und die Teilnehmer trugen in drei verschiedenen Arbeitsgruppen aktiv zur Planung von RPK bei. Dazu wurden in jeder Arbeitsgruppe materialspezifisch typische Prüfprobleme zu Faserverbundwerkstoffen (Moderation: Dr. Rainer Krankenhagen, BAM), beschichteten Materialien (Moderation: Dr. Matthias Goldammer) und Baustoffen (Moderation: Dr. Mathias Ziegler) erfasst und Spezifikationen für RPK definiert.

4 Prüfprobleme und Referenzprobekörper

Die unten aufgeführten Prüfprobleme der verschiedenen Materialien ergaben sich aus Diskussionen während des Workshops, in nachfolgenden Diskussionen mit Anwendern aus der Industrie sowie aus laufenden Forschungsprojekten in der BAM. Bei der Planung der RPK sollte berücksichtigt werden, dass diese möglichst von unterschiedlichen Herstellern reproduzierbar hergestellt werden können. Dies erfordert daher unter anderem eine genaue Spezifikation der verwendeten Materialien, Herstellungstechniken und Geometrien.

3.1 Referenzprobekörper für Faserverbundwerkstoffe

Das Anwendungsfeld von Faserverbundwerkstoffen und insbesondere von CFK und GFK reicht von einfachen technischen Anwendungen bis zu Höchstleistungsstrukturen im

Energiebereich und in der Luft- und Raumfahrt. Prüfprobleme, die bereits während bzw. kurz nach der Fertigung auftreten, sind:

- die Ortung von Ondulationen und Dichteschwankungen
- die Ortung von Porenansammlungen und größeren Lufteinschlüssen
- die Ortung von Fremdeinschlüssen
- die Bestimmung der Faserverteilung und -ausrichtung

Während der Nutzung können die folgenden Schäden durch Impacts und aufgrund von Materialermüdung auftreten:

- Matrixablösungen und Delaminationen
- Faserrisse

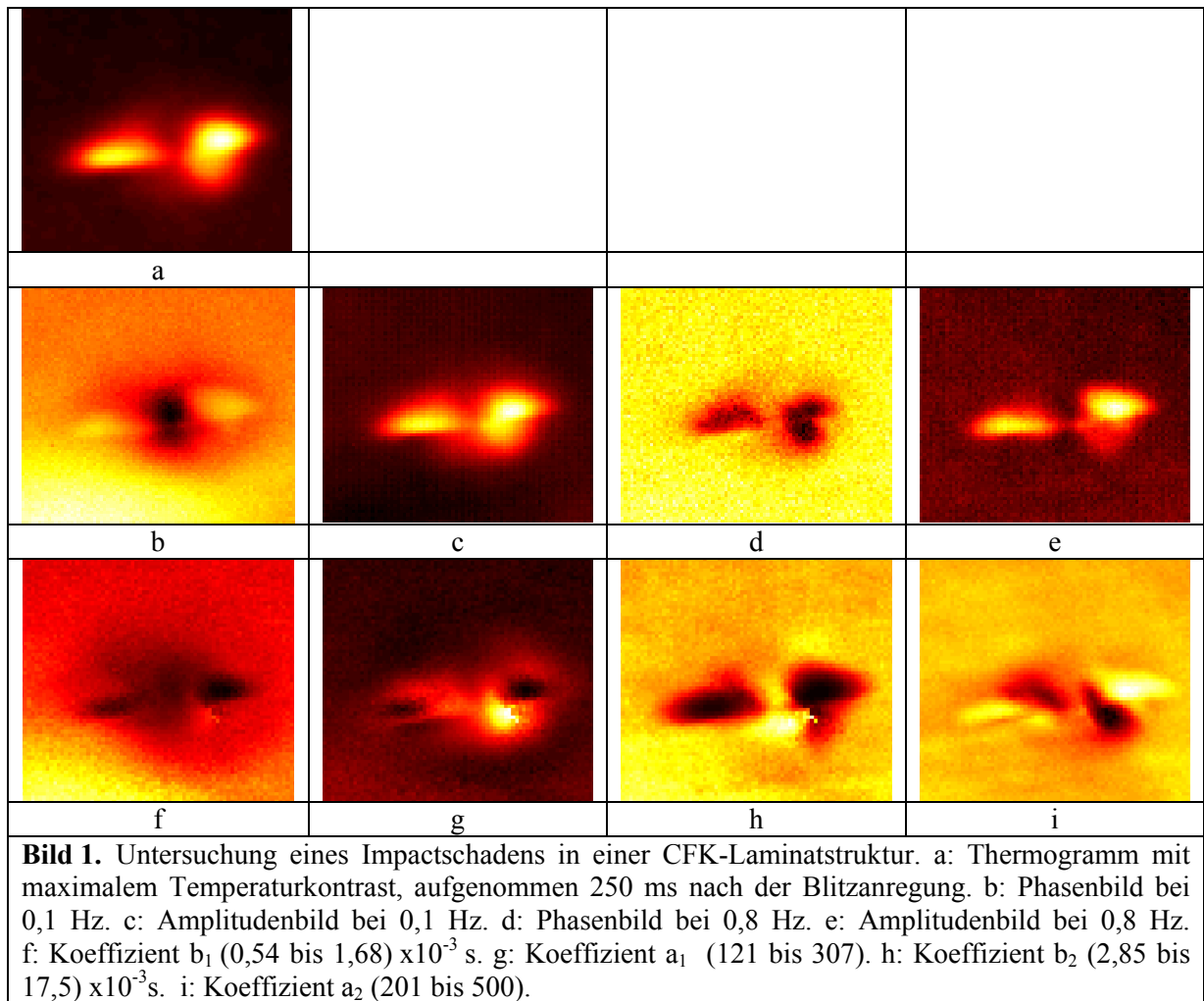
Die thermischen Materialeigenschaften werden wesentlich durch die Fasern bestimmt und sind daher stark anisotrop. Bisherige Probekörper für Untersuchungen mit aktiver Thermografie mit optischer Impulsanregung und periodischer Anregung sowie mit Ultraschallanregung beziehen sich auf die Bestimmung der Eindringtiefe, der Tiefenauflösung und der Ortsauflösung, die Untersuchung des Einflusses von Oberflächenkrümmungen und von Beschichtungen (Cu-Netz bei CFK für den Blitzschutz, Wetterschutzbeschichtung bei GFK). Dabei wurden im wesentlichen Probekörper mit Flachbodenbohrungen, mit Delaminationen (Teflonbeschichtung) und definierten Impactschäden untersucht [7, 8, 9]. Dabei eignen sich CFK-Strukturen, auch mit Cu-Netz, sehr gut für die Anregung mit Blitzlicht.

In Bild 1 sind beispielhafte Ergebnisse von Untersuchungen mit Blitzlichtanregung an einer 3 bis 4 mm dicken CFK-Laminatstruktur mit Impactschaden dargestellt. Bild 1 a zeigt das Thermogramm 250 ms nach dem Blitz. Die typische schmetterlingsartige Struktur des Impactschadens, bedingt durch transversale Risse im Material und Ablösungen zwischen den einzelnen Schichten des Materials [10], ist gut zu erkennen. Der mit einer Bildwiederholfrequenz von 100 Hz und über eine Gesamtdauer von 10 s aufgenommene Messfilm wird nach der Puls-Phasen-Thermografie (d. h. mittels Fast Fourier Transformation) ausgewertet. Die zugehörigen Phasen- und Amplitudenbilder des transformierten Messfilmes sind in Bild 1 b bis e für Frequenzen von 0,1 Hz und 0,8 Hz dargestellt. Insbesondere in den Phasenbildern ist die damit erzielbare Tiefenselektivität zu erkennen; so unterscheidet sich die Defektform in größerer Tiefe (0,1 Hz) von der oberflächennahen (0,8 Hz). Ein alternatives Auswertungsverfahren stellt die Anpassung der Abkühlungskurven jedes einzelnen Pixels des Messfilmes über der Zeit dar. Hierbei können entweder physikalische Modelle oder empirische Befunde den mathematischen Zusammenhang bilden. In Anlehnung an den einfachen Fall der eindimensionalen Wärmeleitung kann hierzu beispielsweise ein exponentielles Abklingen der Temperatur an der Oberfläche der CFK-Laminatstruktur angenommen werden. Durch Ansetzung von zwei sich überlagernden Exponentialfunktionen

$$T(t) = a_0 + a_1 \cdot \exp(-t / b_1) + a_2 \cdot \exp(-t / b_2) \quad \text{Gl. 1}$$

kann aus der bildlichen Darstellung der Amplituden ($a_i, i=0-2$) und Zeitkonstanten ($b_i, i=1-2$) des Fits (Bild 1 f bis i) auf ein differenziertes zeitliches Verhalten geschlossen werden, ähnlich wie bei der Darstellung der Phasenbilder.

Bei GFK Strukturen muss berücksichtigt werden, dass das Material im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich teiltransparent ist, daher führt eine optische Anregung in diesen Wellenlängenbereichen kaum zur Erwärmung. Weiterhin sind vorhandene Beschichtungen zu berücksichtigen; so sind die Wetterschutzbeschichtungen von GFK-Strukturen, die z. B. bei Rotorblättern von Windkraftanlagen verwendet werden, im sichtbaren Spektralbereich sehr stark reflektieren, so dass für die Untersuchung von GFK-Strukturen thermische Quellen (Infrarotstrahler, Heißluft) besser geeignet sind.



Im Projekt wird zunächst der Aufbau von Stufenprobekörpern geplant, in die Ablösungen in verschiedenen Tiefen mit Teflonbeschichtungen unterschiedlicher Größe künstlich eingebracht werden. Weitere Probekörper könnten eine definierte unregelmäßige Faserverteilung und Faserondulationen beinhalten. Darüber hinaus könnten auch definierte Impactschäden erzeugt werden.

3.2 Referenzprobekörper für beschichtete Materialien

Bei der Untersuchung von metallischen und nichtmetallischen Beschichtungen auf Metallen oder Nichtmetallen sollen Ablösungen und Minderdicken geortet und möglichst quantifiziert werden. Typische Anwendungsfälle für die aktive Thermografie sind die Prüfungen von keramischen Beschichtungen auf Turbinenschaufeln [11, 12], von Beschichtungen wie Lack, Furnier, Melaminfilmen usw. auf Holzwerkstoffen [13, 14] oder von Farbbeschichtung auf Stahl [15]. Beeinflusst werden die Untersuchungsergebnisse von den Diffusivitäts- und Effusivitätsunterschieden der Materialsysteme, der Grenzflächenrauigkeit, den Oberflächeneigenschaften (Emissivität) und der Geometrie, d. h. der Dicke der Beschichtung und der Krümmung der Oberfläche. Einer der häufigsten Anwendungsfälle ist zurzeit die Prüfung von beschichteten Turbinenschaufeln, die sowohl zur Fertigungskontrolle als auch bei der Instandsetzung durchgeführt wird. Im Rahmen des Projektes werden daher metallische Probekörper mit Keramikbeschichtungen mit künstlichen Ablösungen und unterschiedlichen Schichtdicken aufgebaut und untersucht. Ziel ist es, einen Standardprüfkörper zu entwickeln, der bei der thermografischen Prüfung ähnlich wie

bei der radiografischen Prüfung die Bestimmung der Gütezahl des Prüfsystems ermöglicht [16]. Dies könnte ein Stufenprobekörper sein oder ebenfalls ein an die Aufgabenstellung angepasster Drahtsteg.

3.3 Referenzprobekörper für Baustoffe und Keramiken

Fragestellungen bei der zerstörungsfreien Prüfung der Struktur von Baustoffen und Keramiken beziehen sich in den meisten Fällen auf die Ortung und Charakterisierung von Rissen, Hohlstellen, Ablösungen und Einbauteilen [17]. Das Verfahren der aktiven Thermografie eignet sich sehr gut für die Ortung von Hohlstellen in Beton, die häufig im Bereich der äußeren Bewehrungslagen, und hier insbesondere bei höherer Bewehrungsdichte, auftreten [18]. Aufgrund von Betondeckungen bis zu 5 cm eignet sich hierfür jedoch nur eine längere impulsartige Erwärmung mit Infrarotstrahlern. Mit der Blitzthermografie können aber Ablösungen unter dünneren Putzschichten, Delaminationen von nachträglichen Verstärkungen mit CFK-Laminaten und Hohlstellen unterhalb von Fliesen detektiert werden.

Für das Projekt würden sich daher Probekörper mit Hohlstellen und Ablösungen unterhalb von verlegten Fliesen eignen. Hier sind sowohl die Materialien (Fliese, Kleber) als auch die Arbeitsabläufe (Grundierung etc.) genormt. Fehler wären dann Abweichungen von der Norm. Fehlende Grundierung oder isolierende Folie zwischen Wand und Kleber oder zwischen Kleber und Fliese würden dann eine Ablösung, fehlender Kleber einen Lufteinschluss simulieren.

3.4 Referenzprobekörper für Metalle

Bei der Untersuchung von metallischen Strukturen eignet sich die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung insbesondere für die Überprüfung von Fügeverbindungen bei dünnwandigen Blechen, wie z. B. bei der Überprüfung von Laserschweißnähten [19, 20], Punktschweißverbindungen [21, 22, 23], Lötverbindungen [24] und Klebungen.

Problematisch ist bei der Interpretation der Messergebnisse, dass ein guter thermischer Kontakt nicht zwangsläufig auf einen guten mechanischen Kontakt zurückzuführen ist. Bei der Herstellung der RPK sollen zum einem Fehlstellen bei Schichtsystemen nachgewiesen werden, die wie in [24] beschrieben relativ reproduzierbar anhand von Lötverbindungen hergestellt werden können. Hierbei sind Proben aus Kupfer und Edelstahl geplant. Interessant wären auch reproduzierbare Probekörper, die Laser- und Punktschweißverbindungen nachbilden.

4 Zusammenfassung

Im Projekt „Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung“, gefördert durch das BMWi im Programm „Transfer von FuE-Ergebnissen durch Normung und Standardisierung“, werden u. a. RPK zu typischen Prüfproblemen entwickelt. Planungen zu diesen RPK aus Faserverbundwerkstoffen, Metallen, Baustoffen und beschichteten Materialien wurden in diesem Beitrag vorgestellt. Im weiteren Projektverlauf werden diese Probekörper hergestellt und entsprechende Messungen mit Blitzthermografie durchgeführt.

Referenzen

- [1] DIN 54190-1, Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 1, Allgemeine Grundlagen, 2004-08
- [2] DIN 54190-2, Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 2, Geräte, 2011-09
- [3] DIN 54190-3, Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 3, Begriffe, 2006-02
- [4] DIN 54191, Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung elektrischer Anlagen, 2009-03
- [5] DIN 54192, Zerstörungsfreie Prüfung – Aktive Thermografie, 2010-11
- [6] ASTM E 2582-07 „Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications“
- [7] C. Zöcke, A. Langmeier, R. Stössel, Quantitative Auswertung von Fehlstellen an Bauteilen aus Faserverbundwerkstoff mit Lock-In Thermographie. In: Thermografie-Kolloquium, Stuttgart, 2007, <http://www.ndt.net/article/dgzfp-irt-2007/Inhalt/v17.pdf>
- [8] C. Ibarra-Castaneda, X.P.V. Maldague, et al.: Recent progresses in the inspection of aerospace components by infrared thermography. In: 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China
- [9] N.P. Avdelidis, X.P.V. Maldague, et al.: NDT characterisation of carbon-fibre and glass-fibre composites using non-invasive imaging techniques. In: Proceedings of QIRT 2010
- [10] M. Nishikawa, T. Okabe, N. Takeda, Numerical simulation of interlaminar damage propagation in CFRP cross-ply laminates under transverse loading, International Journal of Solids and Structures, Volume 44, Issue 10, 15 May 2007, pp. 3101-3113
- [11] M. Goldammer, W. Heinrich, and J. Zettner, Thermografische Prüfung von Gasturbinenschaufeln. In: Thermografie-Kolloquium 2003, Stuttgart
- [12] F. Cernuschi, P. Bison, S. Marinetti, E. Campagnoli, Thermal diffusivity measurement by thermographic technique for the non-destructive integrity assessment of TBCs coupons, Surface and Coatings Technology, Volume 205, Issue 2, 15 October 2010, pp. 498-505
- [13] H. Berglind, A. Dillenz, Detecting glue deficiency in laminated wood--a thermography method comparison, NDT & E International, Volume 36, Issue 6, September 2003, pp. 395-399
- [14] P. Meinschmidt, Thermographic detection of defects in wood and wood-based materials, In: 14th international Symposium of nondestructive testing of wood, Hannover , Germany (May 2nd -4th 2005) <http://www.ndt.net/article/v11n01/meinschmidt/meinschmidt.pdf>
- [15] C. A. Decker, Th. J. Mackin, Measuring film thickness using infrared imaging, Thin Solid Films, Volume 473, Issue 2, 14 February 2005, pp. 196-200
- [16] DIN EN 462-5 Zerstörungsfreie Prüfung - Bildgüte von Durchstrahlungsaufnahmen - Teil 5: Bildgüteprüfkörper (Doppel-Drahtsteg), Ermittlung der Bildunschärfe; Deutsche Fassung EN 462-5:1996
- [17] Ch. Maierhofer, R. Arndt, M. Rollig, C. Rieck, A. Walther, H. Scheel, B. Hillemeier, Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures, Cement and Concrete Composites, Volume 28, Issue 4, Non-Destructive Testing, April 2006, Pages 393-401
- [18] C. Maierhofer, R. Röllig, A. Hasenstab, A. Schönitz, Praktische Anwendung der aktiven Thermografie zur Untersuchung von Stahlbetonbauteilen, In: Fachtagung Bauwerksdiagnose 2008, <http://www.ndt.net/article/bau-zfp2008/Inhalt/p13.pdf>
- [19] T. Hierl, Laser welding & heat flux thermography. Laser Technik Journal, 8, 2011, pp. 54–57
- [20] J. Baumann, Siemens, U. Netzelmann, R. Bilgram, T. Hierl, V. Carl, H. R. Schubach, G. Zenzinger, Untersuchungen zu aktiven thermographischen Prüfmethoden zur Absicherung von Hochleistungsfertigungsverfahren – Ergebnisse eines BMBF-Projekts, In: DGZfP–Berichtsband 94-CD DGZfP-Jahrestagung 2005, <http://www.ndt.net/article/dgzfp05/v57.pdf>
- [21] J. Schlichting, H. Steinfurth, Ch. Maierhofer, M. Kreutzbruck, Thermografische Prüfung von Punktschweißverbindungen. In: Berichtsband zur DGZfP Jahrestagung 2011, Deutsche Gesellschaft zur zerstörungsfreien Prüfung e. V., in Druck
- [22] S. M. Shepard, B. B. Chaudhry, R. L. Predmesky, und M. J. Zaluzec, Pulsed thermographic inspection of spot welds, In: Thermosense XX, Bd. 3361, S. 320-324, 1998
- [23] U. Siemer, Simulation and Evaluation of New Thermographic Techniques for the Deployment in the Automotive Industry. In: Proceedings of ECNDT 2006 <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Th.3.4.3.pdf>
- [24] Ch. Maierhofer, M. Röllig, H. Steinfurth, M. Ziegler, S. Heck, und Ch. Scheuerlein, Aktive Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung von Lötverbindungen. In: Berichtsband zur DGZfP Jahrestagung 2011, Deutsche Gesellschaft zur zerstörungsfreien Prüfung e. V., in Druck