

Schlussbericht zum MNPQ-Projekt

Laufzeit: 1.7.2012-31.12.2013, BMWi-Akz. 21/11

Hochleistungs-LED-Anregungsquelle für die thermografische Prüfung in der Automobilindustrie (AutoLED)

1. Aufgabenstellung

In der Automobilindustrie werden sowohl zur Optimierung in der Fertigungsentwicklung als auch zur Qualitätsüberwachung in der Produktion zunehmend zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt. Insbesondere für die Untersuchung sicherheitsrelevanter Bauteile steht mit der aktiven Thermografie ein schnelles, berührungsloses und automatisierbares Prüfverfahren zur Verfügung. Das Verfahren basiert auf der zeitlich und räumlich aufgelösten Messung der Oberflächentemperatur nach thermischer Anregung. Daraus können Rückschlüsse auf den Wärmefluss im Volumen des untersuchten Bauteils gezogen werden, wodurch parallel zur Oberfläche orientierte Fehlstellen besonders gut erkannt werden können. Daher ist das Verfahren sehr gut zur Untersuchung von Verbundwerkstoffen und von Fügeverbindungen geeignet. Standardmäßig erfolgt heute die thermische Anregung mit Blitzlampen. Diese können jedoch nur eingeschränkt an unterschiedliche Prüfaufgaben angepasst werden, erfordern umfangreiche Arbeitsschutzmaßnahmen und haben nur eine begrenzte Lebensdauer. Die in der Automobilindustrie zurzeit stark forcierte Entwicklung hin zum Mischbau stellt erweiterte Anforderungen an flexible optische Anregungsquellen, die neben einer universellen technischen Anwendbarkeit auch eine hohe Wirtschaftlichkeit aufweisen. Letzteres wird erst durch hohe Prüfraten und effiziente, langlebige und wartungsfreie Prüfapparaturen erreicht. Im Rahmen des Projektes sollte daher eine Hochleistungs-LED-Anregungsquelle entwickelt werden, die diese Bedingungen erfüllt.

2. Voraussetzungen

Die Arbeitsgruppe „Thermografie Verfahren“ der Abteilung „Zerstörungsfreie Prüfung“ der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung passiver und aktiver Thermografieverfahren. Im Jahre 2010 wurde in der Arbeitsgruppe eine LED-Anregungsquelle (Einzelarray mit 20 W) für die aktive Thermografie entwickelt und zu diesem Zeitpunkt bereits erfolgreich für die Prüfung von Lötverbindungen eingesetzt¹. Diese Einzelquelle wurde weiterentwickelt, so dass eine mehrfach gesteigerte Ausgangsleistung erreicht werden konnte die sich für die oben beschriebene thermografische Prüfung anbot und schließlich patentiert wurde². Diesen innovativen Ansatz nahm die Firma INPRO Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH zum Anlass ein gemeinsames Projekt zu initiieren, welches die Entwicklung einer Hochleistungs-LED-Anregungsquelle für die thermografische Prüfung in der Automobilindustrie zum Ziel haben sollte. Diese Quelle sollte die inhärenten Nachteile der heute üblichen thermischen Lichtquellen umgehen und sich für die thermografische Prüfung von Bauteilen und Fügeverbindungen aus metallischen Werkstoffen und Verbundmaterialien eignen. Insbesondere sollte diese Quelle für die Prüfung von Laser- und Punktschweißverbindungen von dünnen Blechen oder für die Prüfung von dünnwandigen Bauteilen aus Faserverbundmaterialien eingesetzt werden können. Der Kompetenzbereich „Fertigungs- und Automatisierungstechnik“ der INPRO entwickelt Verfahren und Anlagen für die Null-Fehler-Produktion. Konkret sind das zerstörungsfreie automatisierte Prüfverfahren für Bauteile und Fügeverbindungen in der Großserienproduktion im Automobilbau. Seit ca. 10 Jahren wird bei INPRO dabei auch mit der Wärmefluss thermografie gearbeitet. Besondere Kompetenz liegt im Bereich Anregungsverfahren, Ablaufsteuerung einschließlich Triggerung und automatisierte Auswertung (gut/schlecht-Entscheidung). Aus der Kenntnis der speziellen Bedürfnisse und Anforderungen in der Fahrzeugfertigung ist INPRO in der Lage, neue Verfahren auf deren Eignung für den Produktionseinsatz zu beurteilen. INPRO hat die sehr robuste Kaltluftanregung für Lasernahte auf Stahl zur Serienreife gebracht und auch mit der Induktionsanregung bei Widerstandsschweißpunkten Erfahrungen. Im INPRO Versuchsfeld bestehen gute Voraussetzung für die praktische Erprobung bis hin zum Robotereinsatz.

¹ C. Maierhofer et al., „Aktive Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung von Lötverbindungen“, DGZfP-Jahrestagung, Bremen, Germany, May 31, 2011.

² M. Ziegler, M. Lucht, and C. Maierhofer, "Vorrichtung zur thermografischen Prüfung mittels Hochleistungs-LED-Quelle," DE Patent DE 10 2012 103 975, May 07, 2012.

3. Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

Der wissenschaftliche und technische Stand an den angeknüpft wurde, entspricht im Wesentlichen dem gegenwärtigen. Die thermografische Prüfung in der Automobilindustrie wird heutzutage im Allgemeinen mit optisch angeregter Thermografie unter Verwendung von Blitzlampen durchgeführt, wie z. B. bei der Prüfung von Laserschweißnähten^{3,4,5} oder Schweißpunkten^{6,7} von Stahlblechen. Die Entwicklung hin zur Elektromobilität verlangt zur Kompensation der schweren Akkumulatoren Gewichtseinsparungen. Daher wird auch in der Automobilindustrie der Leichtbau, z.B. basierend auf Kohlefaser-Verbundwerkstoffen (CFK), verstärkt Einzug halten⁸. In der Luftfahrtindustrie sind solche Materialien schon länger in Verwendung und auch deren Prüfung mittels thermografischer Methoden hat sich in den letzten Jahren durchgesetzt, z.B. mit Blitzlampen⁹ oder Halogenlampen für die LockIn-Anregung im Bereich bis wenige Hz^{10,11,12}. Daher wird zukünftig die optisch angeregte Thermografie auch im Automobilbereich zur Prüfung von Verbundwerkstoffen eingesetzt werden. Im Produktionsumfeld der Automobilindustrie ist die Verwendung von Blitzlampen jedoch in mehrfacher Hinsicht problematisch. So muss aus Gründen des Arbeitsschutzes die Prüfstation eingehaust werden, und wegen der Brandgefahr muss eine Sprinkleranlage installiert werden. Blitzlampen vertragen aus thermischen Gründen nur eine begrenzte Taktrate von deutlich unter 1 Hz und sind damit das Nadelöhr in der Prüfkette. Aufgrund ihrer sehr begrenzten Lebensdauer sind diese zudem teures Verbrauchsmaterial. Messtechnische Nachteile von thermischen Lichtquellen (z.B. Halogenstrahlern) und Gasentladungslampen ergeben sich aus deren breitbandiger Abstrahlung und den hohen Temperaturen der Lichtquellen. Ein erheblicher spektraler Anteil dieser Lichtquellen befindet sich im mittleren Infrarot (IR), d.h. in dem Wellenlängenbereich, in dem auch die Thermografiekameras empfindlich sind. Das bedeutet, dass nur mit aufwändigen Filtern eine Störung der thermografischen Messung während der Erwärmung zu verringern oder zu vermeiden ist. Dabei geht jedoch ein erheblicher Anteil der aufgewendeten Anregungsenergie für die Prüfaufgabe verloren. Bei der üblichen nicht vollständigen Unterdrückung dieser Störanteile ist daher eine Messung während der Anregung nicht möglich, wodurch sich die erforderliche Messzeit erheblich verlängert. Bei den häufig verwendeten Blitzlampen mit Blitzdauern um 3 ms lässt sich ein thermisches Nachglühen (afterglow) des Glaskolbens von bis zu mehreren 10 ms^{13,14} beobachten, welches ebenfalls zu Störungen im relevanten Spektralbereich führt. Hierdurch gehen wertvolle Messinformationen aus dem exponentiell abklingenden Teil der Abkühlungstransiente verloren und die Messzeit verlängert sich abermals. Für den Fall der LockIn-verstärkten thermografischen Prüfung muss zwingend während der Anregung gemessen werden. Hier treten die aufgeführten Störeffekte besonders stark in Erscheinung. Weiterhin lassen sich mit den verfügbaren modulierbaren Halogenlampen praktisch keine Modulationsfrequenzen oberhalb von 1 Hz erzielen.

4. Planung und Ablauf des Projekts

Die praktische Umsetzung der Entwicklung der Hochleistungs-LED-Quelle sollte in fünf Arbeitspaketen erfolgen (Tabelle 1), wobei mit dem eigentlichen Aufbau erst nach Festlegung der Spezifikation in Zusammenarbeit mit INPRO begonnen werden sollte. Als ein wichtiges Arbeitspaket war die Charakterisierung der LED-Quelle geplant, anhand derer eine Optimierung der Quelle erfolgen sollte. Anschließend sollten thermografische Untersuchungen an Probekörpern erfolgen. Diese sollten die Eignung des entwickelten Gerätes für die thermografische Prüfung im Automobilbau nachweisen.

³ Thermosensorik, http://www.thermosensorik.de/html/05_referenzen/referenzen.htm

⁴ Infratec, <http://www.infratec.de/index.php?id=554&L=1>

⁵ U. Siemer, „Thermografische Prüfung von Fügeverbindungen im Karosseriebau“, DGZfP-Jahrestagung, Bremen, Germany, May 31, 2011.

⁶ R. Beyer, „Gut verschweißt: Der Einsatz thermographischer Prüfmethode im Automobilbau“, *Inspect* 2/2011, 54 (2011).

⁷ J. Schlichting, et al., „Thermographic Testing of Spot Welds“, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE) 2011*, Burlington, VT, USA, July 19, 2011.

⁸ Süddeutsche Zeitung Nr. 167, 21 (2011).

⁹ ASTM E2582 – 07, „Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications“, 2007.

¹⁰ C.Meola et al., „Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography“, *Engineering Failure Analysis* 13, 380 (2006).

¹¹ D. Bates et al., „Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components“, *Composites: Part B* 31, 175 (2000).

¹² A. Dillenz et al., „Progress in phase angle thermography“, *Rev. Sci. Instrum.* 74, 417 (2003).

¹³ S. Shepard, „Method and apparatus for thermographic imaging using flash pulse truncation“ US Patent, US 7186981, 2007.

¹⁴ H. Heissenstein, „Fehlerdetektion im μ s-Takt, Schnell schaltbare Anregungsquellen eröffnen der Wärmefluss-Thermografie neue Anwendungsfelder“, DGZfP-Jahrestagung, Bremen, Germany, May 30, 2011.

Arbeitspaket 1: Spezifikation der LED-Anregungsquelle			
Arbeitspunkt	Kurzbeschreibung	Zeitaufwand BAM	Zeitaufwand INPRO
1.1	Auslegung thermografischer Parameter	0,25	0,5
1.2	Auslegung Geometrie, Konstruktion	0,25	
1.3	Auslegung Ansteuerung	0,25	
1.4	Auslegung Arbeitsschutz	0,25	
Arbeitspaket 2: Bau der LED-Anregungsquelle			
2.1	Beschaffung kommerzieller Komponenten	1	0
2.2	Planung und Fertigung von Sonderteilen	2	
2.3	Anpassung und Zusammenbau	2	
2.4	Entwicklung der Ansteuerung	2	
2.5	Bericht zum Zwischenstand und notwendige Anpassungen	1	
Arbeitspaket 3: Charakterisierung der LED-Anregungsquelle			
3.1	Aufbau und Einarbeitung in spezialisierte Charakterisierungs-Messungen	1	0
3.2	Durchführung der Charakterisierungs-Messungen	2	
3.3	Auswertung der experimentellen Ergebnisse	2	
3.4	Darstellung der Ergebnisse	1	
Arbeitspaket 4: Übergabephase			
4.1	Demonstration und Inbetriebnahme	0,5	0,5
4.2	Anpassungen an Hard- und Software	1,0	
Arbeitspaket 5: Erprobungsphase			
5.1	Experimentelle Erprobung mit Impuls-Anregung	0,5	1
5.2	Experimentelle Erprobung mit LockIn-Anregung	0,5	1
5.3	Auswertung und Darstellung der Ergebnisse	0,5	

Tabelle 1: Geplantes Arbeitsprogramm.

Vergleich der durchgeführten und geplanten Arbeiten

Die Gegenüberstellung des geplanten und des tatsächlichen Zeitplanes ist in Tabelle 2 zusammen mit den geplanten Meilensteinen und den durchgeführten Projekttreffen der Projektpartner abgebildet. Die durchgeführten Arbeiten entsprechen im Wesentlichen denen der ursprünglichen Planung. Aufgrund umfangreicherer Vorversuche mit der zum Projektstart bereits vorhandenen BAM-LED-Quelle welche zur Spezifikation der neuen LED-Quelle durchgeführt wurden und der im Verlaufe des Projektes neu hinzugenommenen Untersuchung zur LED-Fokussierung, durch welche eine Steigerung der Ausgangsleistungsdichte erreicht werden sollte, waren zusätzliche Arbeiten in den AP 1 bis AP 3 notwendig, welche im Zeitplan widergegeben sind. Die Meilensteine M1-M3 sind daher um 2-3 Monate gegenüber der ursprünglichen Planung verschoben.

AP/Monat	2012						2013											
	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
AP 1	grün	grün	orange	orange														
AP 2		grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün	orange						
AP 3		grün	grün	grün	orange	orange	orange	orange	orange	grün	grün	grün	grün	grün	grün			
AP 4										orange	orange	grün	grün	grün	grün			
AP 5										orange	orange	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün
MS		m1			M1				m2		M2	m3		M3				
Treffen		1		2						3	4		5		6			

Tabelle 2: Gegenüberstellung des geplanten und des tatsächlichen Zeitplans. grün: urspr. Planung, orange: zusätzliche Arbeiten. Zusätzlich sind die durchgeführten Treffen der Projektpartner aufgeführt. Die geplanten Meilensteine m1-m3 und die tatsächlichen Meilensteine M1-M3 sind zeitlich eingeordnet.

M1: Spezifikation der LED-Anregungsquelle abgeschlossen, Beschaffung der Komponenten für LED und Charakterisierung hat begonnen

M2: Bau der LED-Anregungsquelle ist bis auf notwendige verbleibende Anpassungen und Entwicklung der Ansteuerungs-Software abgeschlossen. Charakterisierung hat begonnen.

M3: Experimenteller Teil der Charakterisierung der LED-Anregungsquelle ist abgeschlossen. Übergabephase mit Anpassungen und Erprobungsphase bei INPRO hat begonnen.

5. Zusammenarbeit mit Stellen außerhalb des Projektes

Außerhalb des Projektes gab es eine Zusammenarbeit mit der Beuth Hochschule für Technik Berlin. Im Rahmen einer gemeinsam betreuten Masterarbeit wurden eingehende Untersuchungen an den vorhandenen BAM-eigenen LED-Quellen durchgeführt. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der optischen und elektrischen Charakterisierung dieser LED-Quellen. Da für die im Projekt erarbeitete LED-Quelle die gleichen LED-Typen verwendet wurden, ließen sich die wesentlichen Charakteristika übertragen. Desweiteren konnten die BAM-Quellen auch in anderen BAM-Vorhaben erfolgreich als schnelle und störungsfreie Anregungsquellen für die aktive Thermografie eingesetzt werden.

6. Erzieltes Ergebnis

AP 1: Spezifikation der Hochleistungs-LED-Anregungsquelle

Die Spezifikation wurde von BAM und INPRO gemeinsam erarbeitet. Hierzu wurden im Vorfeld von der BAM experimentelle Untersuchungen an für den Automobilbau relevanten Proben von INPRO durchgeführt: Stahlbleche und Aluminiumbleche mit Schweißnähten unterschiedlicher Güte sowie CFK-Proben mit Impact-Schäden wurden mit der an der BAM bereits in Betrieb befindlichen LED-Quelle *OctoLED* untersucht. Die Stahl- und CFK-Proben konnten sowohl im Impuls- als auch im Lock-In-Betrieb, jeweils sowohl mit als auch ohne zusätzliche Schwärzung geprüft werden. Bei der Al-Probe war der erzielte Signal-zu-Rausch-Abstand deutlich geringer, was noch eine Schwärzung notwendig machte. Die Prüfung von Al-Schweißnähten mit nur einseitiger Zugänglichkeit wurde als eine der momentan größten Herausforderungen bei der ZfP im Automobilbau identifiziert, so dass die Spezifikation der neu zu entwickelnden *AutoLED*-Quelle entsprechend erfolgte. Für Al existiert ein ausgeprägtes lokales Maximum im spektralen Absorptionsgrad ($\sim 0,14-0,16$) für Wellenlängen zwischen 800 und 900 nm, gegenüber z.B. $\sim 0,07-0,09$ bei 400-500 nm. Daher wurde als Zielwellenlänge 850 ± 50 nm festgelegt. Da diese mit der des BAM *OctoLEDs* übereinstimmt, wurden identische Einzel-LED-Arrays beschafft. Die grundsätzliche geometrische Anordnung der LED-Quellen wurde festgelegt und die Randbedingungen für die Montage auf dem Ziel-Roboterkopf wurden definiert. Aus Gewichtsgründen wurde eine aktive Kühlung mit Kühlwasser festgelegt. Als Ziel wurde eine möglichst linienhafte Probenausleuchtung von 5-10 cm Länge und 1-2 cm Breite definiert. Zur Verringerung der Verluste wurde die Untersuchung einer Fokussierung der divergenten LEDs in den Arbeitsplan aufgenommen. Um sowohl den Impuls- als auch den modulierten Lock-In-Betrieb zu ermöglichen, wurden entsprechende Netzgeräte für die LEDs angeschafft.

AP 2: Bau der LED-Anregungsquelle

Auf Grundlage der erarbeiteten Spezifikation sind Einzel-LED-Arrays und Komponenten für den elektrischen und mechanischen Aufbau beschafft worden. Die Fertigung von Sonderteilen für den mechanischen Aufbau und insbesondere für die Kühlung wurde in den Werkstätten der BAM vorgenommen. Für die Charakterisierung der Quelle in AP 3 wurde eine Version erarbeitet die der für die Roboterintegration geplanten möglichst nahe kommt:

- *AutoLED* -Quelle besteht aus 2 jeweils neben der IR-Kamera angeordneten LED-Modulen.
- Gewichtoptimierter Kühlkörper mit AluFix-Aufnahme wurde konstruiert und angefertigt.
- Elektrische Ansteuerung und Kühlwasseranschluss wurden geplant und realisiert.
- Zwei Manipulatorarme wurden aus Minitec-Komponenten angefertigt.
- Fokussierung mittels verstellbarer Matrix-Linsenoptiken wurde erprobt.

Mit den realisierten Manipulatorarmen wurde die ideale LED-Probe-Kamera-Geometrie erprobt um dann die AluFix-Roboteraufnahme (AP 4) zu konstruieren.

AP 3: Charakterisierung der LED-Anregungsquelle

Die Charakterisierung der für die thermografische Prüfung relevanten Parameter wurde parallel zum Bau der *AutoLED*-Quelle an den in der BAM bereits in Betrieb befindlichen LED-Quellen (*OctoLED* mit 8 Einzel-LED-Arrays und *SingleLED* mit einem LED-Array) durchgeführt und nach Abschluss

von AP 2 auch mit der *AutoLED*-Quelle. Hierzu wurden Verfahren neu erarbeitet, welche speziell für die Charakterisierung von ausgedehnten LED-Quellen geeignet sind. Die durchgeführten Messungen umfassen, jeweils mit Angabe der LED-Quelle:

- Strom-Spannungs-Kennlinie (*OctoLED, AutoLED*),
- Strom-Bestrahlungsstärke-Kennlinie (*OctoLED*),
- Emissionsspektrum (*SingleLED*),
- Anstiegs- und Abfallzeiten (*OctoLED, AutoLED*),
- Maximale Modulationsfrequenz (*OctoLED, AutoLED*),
- Länge und Stabilität der Ansprechzeiten, Verzögerung des optischen Impulses und des Strommonitors auf analoges Steuersignal (*AutoLED*),
- Temperatur der LEDs (statisch und zeitaufgelöst) (*SingleLED*),
- Intensitätsverteilung mit und ohne Fokussierung (*OctoLED, AutoLED*),
- Winkelabhängigkeit von Emission/ integr. Ausgangsleistung mit/ohne Fokuss. (*AutoLED*),
- Thermografische Probemessungen an Probekörpern von INPRO/BAM (*OctoLED, AutoLED*),
- Bestrahlungsstärke zur Beurteilung der Gefährdung des Bedienpersonals (*AutoLED*).

Mit den durchgeführten Arbeiten konnte ein methodischer Wissenszuwachs in der BAM-Arbeitsgruppe erzielt werden. Für die Arbeiten wurde ergänzende Gerätetechnik beschafft, z.B. zum Aufbau eines Goniometer-Messplatzes und es wurden Charakterisierungs-Verfahren erarbeitet.

AP 4: Übergabephase

Arbeitsschutz

Die erstellte Hochleistungs-LED-Quelle emittiert intensive optische Strahlung im infraroten Spektralbereich welche zur energetischen Anregung (Erwärmung) von Prüfkörpern genutzt wird. Für den Bediener ergibt sich hieraus potentiell eine Gesundheitsgefährdung. Aus diesem Grunde wurde von der BAM ein Bericht erstellt, welcher die entsprechenden Richtlinien und Normen analysiert, Messungen und Berechnungen der Exposition durchführt und Schutzmaßnahmen empfiehlt. Die Richtlinien und Normen die zur Anwendung kommen müssen:

- RICHTLINIE 2006/25/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 5.4.2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physik. Einwirkungen (künstliche optische Strahlung)
- Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG
- DIN EN 62471:2009 Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen

Die im Bericht zusammengestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Expositionsgrenzwerte für die relevanten IR-A Gefahren in den üblich verwendeten Abständen (0.5-2 m) schon nach kurzer Bestrahlungsdauer (> 0.4 s) überschritten werden. Lediglich für eine thermische Gefährdung der Haut sind die Werte ab etwa 2 m unkritisch. Das bedeutet, dass im Betrieb der *AutoLED*-Quelle Schutzmaßnahmen zu ergreifen sind.

Roboterintegration des Infrarot-LED-Arrays (*AutoLED*)

Der Laboraufbau des *AutoLED*-Arrays wurde zunächst mit einer industrietauglichen Verkabelung sowie robotertauglichen Wasserschläuchen ausgestattet, um einen störungsfreien Dauereinsatz am Thermografie-Prüfroboter *KUKA KR 16-2* zu gewährleisten (Abb. 1). Die mechanische Anbindung wurde mit Hilfe des modularen Baukastensystems *Alufix* realisiert (Abbildung 2a). Die Fixierung der beiden LED-Arrays wurde dabei winkerverstellbar umgesetzt, um bei einer Variation des Messabstands zum Prüfobjekt eine Korrektur der Fokussierung zu ermöglichen. Der gesamte Prüfkopf wurde als Schnellwechselsystem aufgebaut und ist somit auf einfache Weise für verschiedene thermografische Anregungsverfahren für Messungen in Reflexionsanordnung umrüstbar. Eine wichtige Voraussetzung für die Roboterintegration war die Vorauslegung hinsichtlich der Gesamtmasse, des Massenschwerpunkts sowie der Hauptabmessungen des LED-Arrays, um die Kupplung des Prüfroboters entsprechend der auftretenden Verfahrbeschleunigungen auslegen zu können. Als Infrarotkamera wurde die Quantendetektorkamera *SC5500* von *FLIR* genutzt. Die Triggerung von Kamera und LED-Array wurde mit Hilfe eines Funktionsgenerators realisiert, welcher Anregung und Messung zueinander synchronisiert.

Der Messabstand zum Prüfobjekt beträgt nominell 180 mm, kann jedoch bei Abnahme der seitlichen Sichtblenden am Array auch verändert werden. Die seitlichen Sichtblenden dienen der optischen Abschirmung des Streulichts des LED-Arrays. Darüber hinaus muss die gesamte Prüfzelle während der Messungen durch entsprechende Schutzvorhänge (Abb. 1) optisch abgeschirmt und durch Warnschilder markiert sein. Wird die Prüfzelle unbefugt betreten, wird dies von einem Sicherheitslichtvorhang detektiert und die Messung automatisch gestoppt.

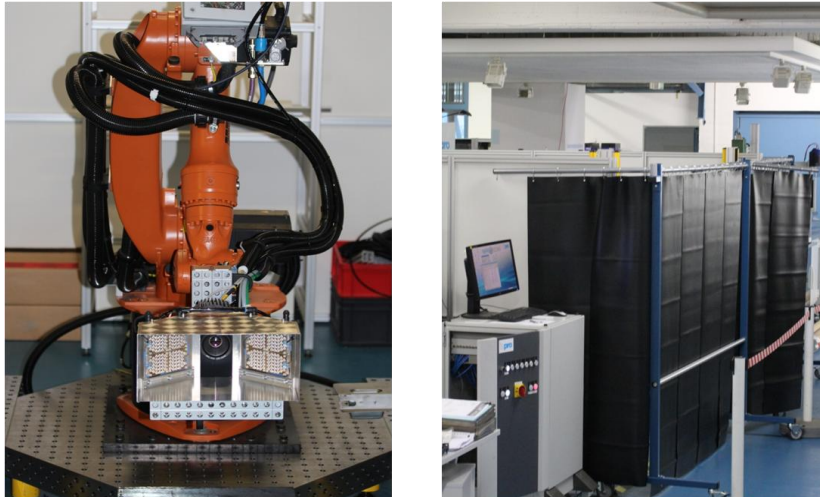


Abbildung 1: Gesamtansicht des Prüfroboters mit LED-Array (links); Prüfzelle mit optischer Abschirmung (rechts)

AP 5: Erprobungsphase

Erprobungsmessungen an Referenzprüfproben im Impuls-Betrieb

Die Referenzmessungen wurden an Zweiblech-Schweißproben mit künstlichen, an der Oberfläche nicht sichtbaren Nahtunterbrechungen (Unterbrechungslänge: 2, 5, 10, 20 [mm]) in einer 40 cm langen Laserschweißnaht durchgeführt, welche auch schon für induktiv angeregte Prüfversuche benutzt wurden. Hierbei konnten Fehlstellen mit Anbindungsfehlern bis zu einer Ausdehnung von 2 mm sicher detektiert werden. Die einstellbaren Parameter am *AutoLED*-System sind Prüfabstand [mm], Anregeleistung [% bzw. V und A] und Anregedauer. Um eine gute Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit den Resultaten des Referenzmessverfahrens zu gewährleisten, wurden ausschließlich Mes-

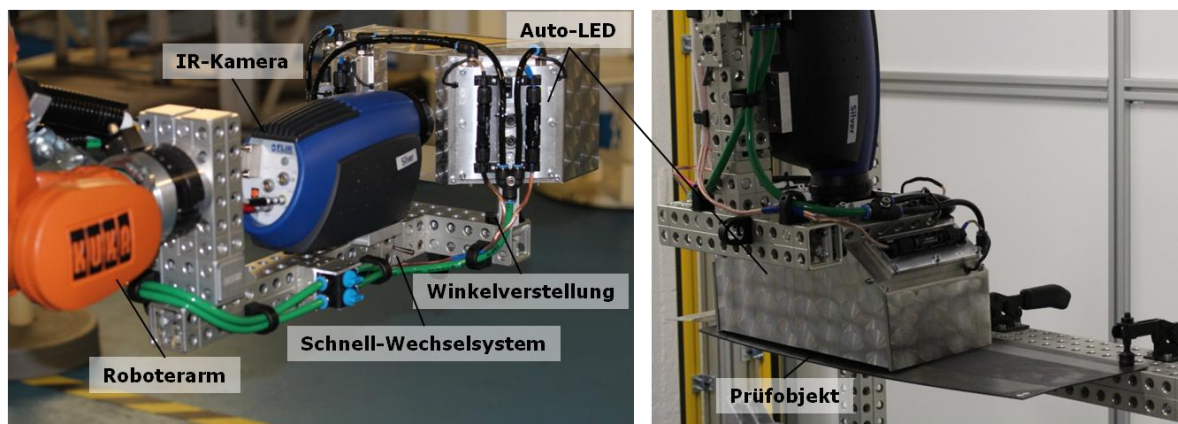


Abbildung 2: Details zur Roboterintegration des *AutoLED* (a); *AutoLED* im Prüfeinsatz (b)

sungen mit Pulsanregung durchgeführt.

Bestimmung der Einflussfaktoren an geschwärzten Proben

Bei der Variation der Anregeleistung wurden die Parameter Anregungsdauer ($t_A=1$ s) und Messabstand ($A=180$ mm) festgehalten. Die Einstellung der Leistung wurde durch eine Änderung des Versorgungsstroms in den Grenzen 3 A (50%) bis 9 A (150%) erreicht. In den Thermogrammen (Differenzbilder zu jeweils erstem Bild) sind die beiden Anbindungsfehlstellen links und rechts am jeweiligen Bildrand gut zu erkennen (helle Bereiche). Die Fehlstelle am linken Bildrand hat eine Länge von 5 mm, rechts im Bild sind 10 mm der Lasernaht nicht angebunden. Dazwischen und an den Rändern

links und rechts geht die angebundene Schweißnaht weiter (dunkle Bereiche). Im angebundenen Nahtbereich kann die oberflächlich aufgetragene Wärme über die Schweißnaht zum rückseitigen Blech abfließen, während an den Fehlstellen ein Wärmestau zu beobachten ist.

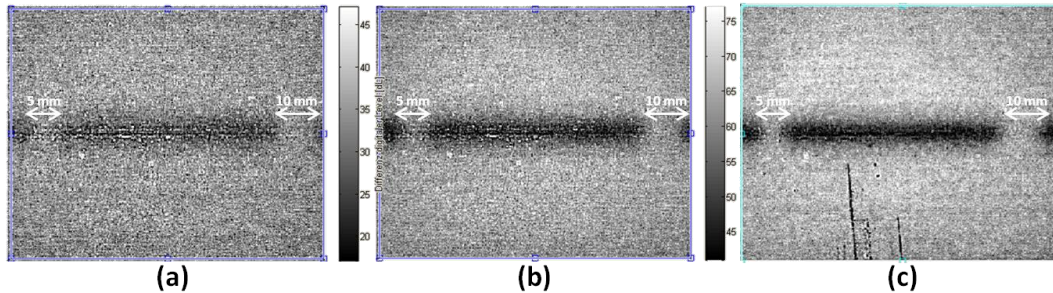


Abbildung 3: Vergleich der Thermogramme, betrachtet jeweils 0.15 s nach Anregungsende: Antriebsleistung (a) 50% (I=3 A), (b) 100% (I=6 A), (c) 150% (I=9 A).

Dieser Effekt ist bei der Messung mit 150% eingestellter Versorgungsleistung (c) sehr deutlich zu erkennen, die Fehlstellen separieren sich hier klar von den verschweißten Bereichen. Dies resultiert aus dem insgesamt höheren erzielten Signalhub von etwa 100 digitalen Einheiten (DL), (ca. 0.6 K).

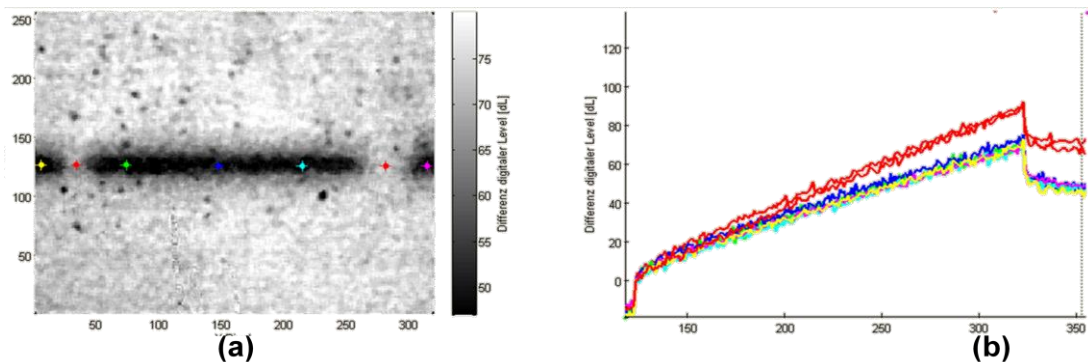


Abbildung 4: Separierung der Fehlstellen im Thermogramm (a) und im Zeitbereich (b)

Die Separierung zwischen angebundenem und nicht angebundenem Nahtbereich resultiert aus einer Erwärmungsdifferenz von ca. 20 DL (ca. 0.1 K) (Abbildung 4b). Die Temperatursprünge zu Beginn und Ende der Anregung resultieren aus der Schichtdicke der Oberflächenschwärzung. Gegenüber dem Thermogramm aus c werden die beiden Fehlstellen in Abbildung 4a nochmals klarer herausgearbeitet. Dies wird erreicht, indem als Referenzbild für das Differenzbild nicht Bild Nr. 1 sondern das letzte Bild vor Anregungsbeginn benutzt wurde. Auf diese Weise fallen die Kratzer in der geschwärzten Oberfläche weniger stark im Ergebnisbild auf. Jedoch fallen nun kleine Rostflecken, die sich während der Lagerung der Bleche auf der Probenoberfläche gebildet haben, wesentlich stärker auf. Die gezeigten Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass eine Erhöhung des Temperaturhubs zu einer besseren Unterscheidung der Fehlstellen von den angebundenen Nahtbereichen führt. Deshalb wurde im nächsten Schritt die Messdauer in den Grenzen von 1-3 s bei einer nominellen Leistung von 100% und den Standardabstand von 180 mm variiert.

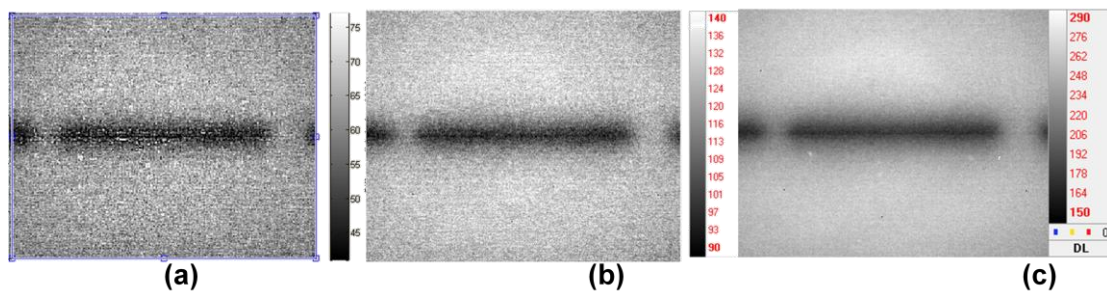


Abbildung 5: Vergleich der Thermogramme, betrachtet jeweils 0.15 s nach Anregungsende mit Antriebsdauer (a) 1 s, (b) 2 s, (c) 3 s.

Die Messergebnisse in Abbildung 5 zeigen den erwarteten Effekt. Aufgrund des mit längerer Anregungsdauer erzielten höheren Temperaturhubs hebt sich die Fehlerzeichnung immer klarer im Bild ab. Gleichzeitig muss jedoch konstatiert werden, dass die längere Anregungsdauer auch einen Wärmeleitungseffekt in lateraler Richtung zur Folge hat. Während der nicht angebundene Bereich im linken Bildteil von c ($t_A=1$ s, $P=150\%$) noch sehr klar erkennbar ist, fällt die Unterscheidung in Abbildung 5c ($t_A=3$ s, $P=100\%$) schon etwas schwerer. Den besten Kompromiss bei 100% eingestellter Anregeleistung zeigt Abbildung 5b ($t_A=2$ s).

Messungen an ungeschwärzten Proben

In der Praxis der zerstörungsfreien Prüfung ist es selten möglich, Einfluss auf die Emissivität der Prüfkörperoberfläche zu nehmen. Deshalb muss das Prüfverfahren in der Lage sein, Defekte auch an ungeschwärzten Proben sicher zu erkennen. Bei den hier betrachteten Referenzproben hat dies zur Folge, dass Emissivitätsunterschiede zwischen Schweißnahtbereich und Blechoberfläche während der Messung zu einer scheinbar unterschiedlichen Erwärmung im Thermogramm führen. Auch Verschmutzungen durch Ölrückstände oder Flugrost beeinflussen das Prüfergebn nun stärker.

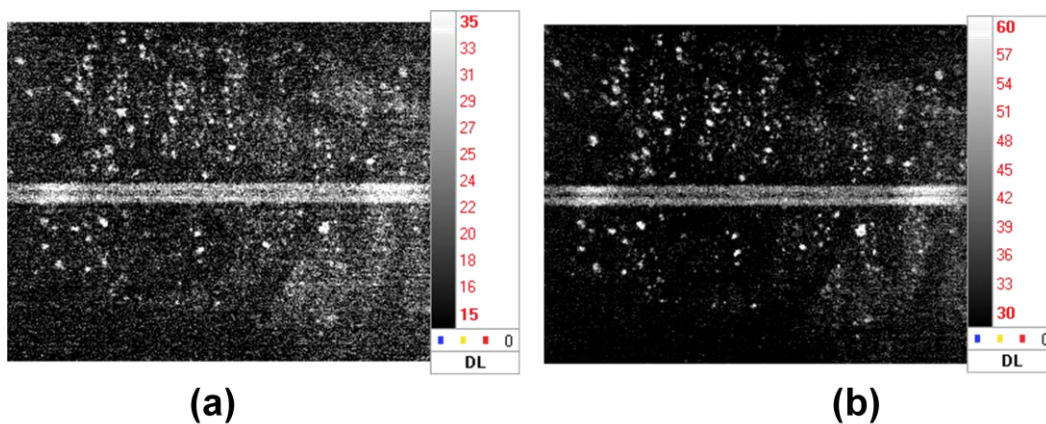


Abbildung 6: Vergleich der Thermogramme (ungeschwärzt), jeweils 0.15 s nach Anregungsende, mit (a) Anregeleistung 50% ($I=3$ A), (b) Anregeleistung 100% ($I=6$ A).

Wie in Abb. 6 deutlich zu sehen ist, kommen die Fehlstellen im ungeschwärzten Fall weniger deutlich zum Vorschein. Zwar erwärmen sich auch hier die Defektstellen stärker als der angebundene Nahtbereich, jedoch ist der Unterschied weniger deutlich, da sich die Schweißnaht ebenfalls scheinbar leicht erwärmt. Zur Erhöhung des Fehlerkontrasts kann zum einen die Anregeleistung erhöht, zum anderen aber auch die Anregezeit verlängert werden. Wie in Abb. 7 gut zu erkennen ist, können die beiden Fehlstellen links und rechts im Bild mit steigender Anregezeit bei jeweils gleicher Leistung (100%) und Messabstand (180 mm) besser detektiert werden. Die Fehlanzeigen, welche durch die punktuellen Flugrostsprenkler verursacht werden, lassen sich aufgrund ihres charakteristischen Zeitverlaufs von den eigentlichen Fehlanbindungsstellen unterscheiden.

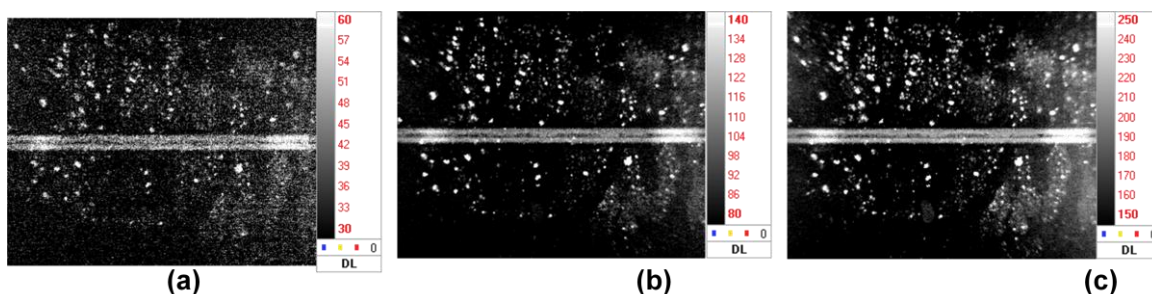


Abbildung 7: Vergleich der Thermogramme (ungeschwärzt), jeweils 0.15 s nach Anregungsende, für eine Anregungsdauer von (a) 1 s, (b) 2 s, (c) 3 s.

Erprobungsmessungen an Referenzprüfproben im Lockin-Betrieb

Um die Verwendbarkeit einer LED-Quelle für die Durchführung von thermografischen Lockin-Untersuchungen zu validieren, wurde ein CFK Probekörper mit Flachbodenbohrungen vermessen.

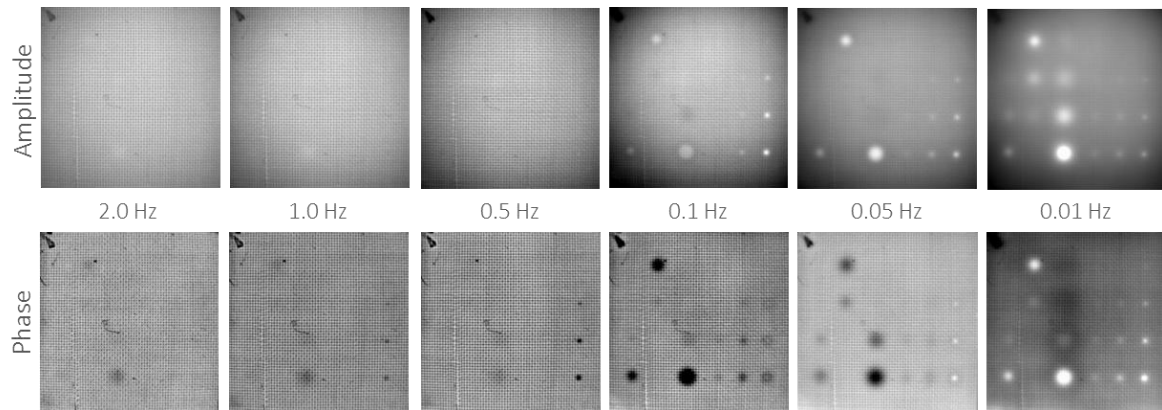


Abb. 9. Amplituden- (oben) bzw. Phasenbilder für Lockin-Frequenzen von 2 Hz bis 0,01 Hz. Deutlich zu erkennen ist der Zusammenhang zwischen der Lockin-Frequenz und der Tiefe der nachweisbaren Flachbodenbohrungen. Während bei geringen Frequenzen auch Bohrungen mit ~2 mm Restwandstärke erkennbar sind, lassen sich bei höheren Frequenzen nur oberflächennahe Bohrungen nachweisen.

Dieser CFK Probekörper (Abb. 10) besteht aus einem Kohlefaserlege, welches durch den gewählten Lagenaufbau quasiisotrope Wärmeleitungseigenschaften zeigt. Der Probekörper hat eine Gesamtdicke von 6 mm und wurde mit Flachlochbohrungen unterschiedlicher Durchmesser (1 mm – 12 mm) und Restwandstärken (0,5 mm – 4,0 mm) versehen. Die Untersuchungen wurden mit einer Infrarotkamera im LWIR (8,0-9,4µm) durchgeführt, wobei sowohl die Aufnahme­frequenz, als auch die Anregungsamplitude jeweils an die verwendete Lockinfrequenz angepasst wurde um einerseits die erzeugte Datenmenge zu begrenzen und andererseits eine Beschädigung des Probekörpers durch zu starke Erwärmung zu verhindern. In Abb. 9 sind die Amplituden bzw. Phasenbilder für unterschiedliche

Lockin-Frequenzen dargestellt. Hierbei zeigt sich deutlich der Zusammenhang zwischen der gewählten Lockin-Frequenz und der erreichten Informationstiefe. So sind bei Lockin-Frequenzen von 2 Hz bis 0,5 Hz nur oberflächennahe Fehlstellen, also Bohrungen mit geringen Restwandstärken, nachweisbar. Mit sich reduzierender Lockin-Frequenz lassen sich aber zunehmend auch Bohrungen mit größeren Restwandstärken beobachten. Grundsätzlich zeigt sich, dass die Phaseninformation zum einen weniger von etwaigen Inhomogenitäten der Anregung beeinflusst ist und zum anderen sensibler auf Fehlstellen reagiert, sich also Bohrungen einer bestimmten Restwandstärke schon bei höheren Lockin-Frequenzen und damit prinzipiell kürzeren Messzeiten beobachten lassen.

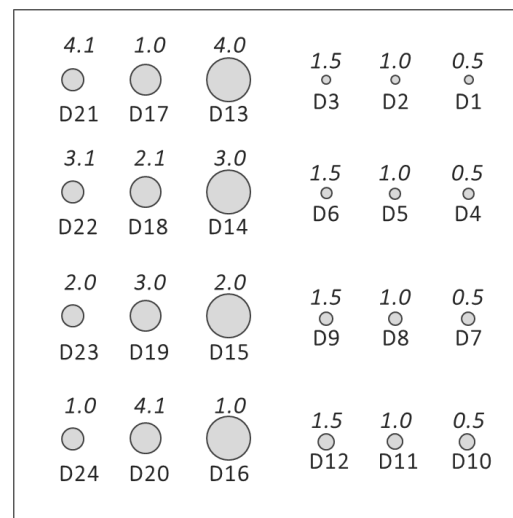


Abb. 10. Schematische Darstellung des Probekörpers CFK-FLB-K3 vor der Vorderseite (Bohrungen auf der Rückseite) aus betrachtet. Angegeben sind die Restwandstärken (kursiv über dem Defekt) und die Bezeichnung der Flachbodenbohrung (unten). Die Durchmesser betragen 1 mm (D1-D3), 1,8 mm (D4-D6), 3 mm (D7-D9), 3,9 mm (D10-D12), 11,9 mm (D13-D16), 7,9 mm (D17-D20) und 5,8 mm (D21-D24).

Fazit der Erprobungsmessungen

Mit den durchgeführten Messungen an künstlichen Ungängen in Laserschweißverbindungen konnte gezeigt werden, dass sich Infrarot-LEDs grundsätzlich für den Impuls-Betrieb in Reflexionsanordnung – auch an ungeschwärzten Blechen – eignen. Der gesamte Messbereich wird sehr gleichmäßig erwärmt und es kommt aufgrund der Separierung der Wellenlängenbereiche von Anregung und Detektion nicht zu dem für die herkömmliche Blitzanregung typischen, sehr starken Amplitudensprung. Für den Ein-

satz in der Praxis kann konstatiert werden, dass eine Anregung mit hoher Leistung und kurzer Dauer die besten Ergebnisse liefert. Für eine sichere, automatisierbare Fehlerdetektion wären LED-Arrays mit noch höherer Leistung daher von Vorteil. Darüber hinaus würde eine weitere Miniaturisierung der Arrays die Praxistauglichkeit zusätzlich erhöhen. Für den Einsatzfall Lockin-Betrieb für CFK-Prüfprobleme konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Abhängig vom Durchmesser der Flachbodenbohrungen (größere Durchmesser sind besser detektierbar) lassen sich Fehlstellen bis zu einer Tiefe von etwa 1,5 mm bis 2,5 mm nachweisen. Durch diesen Nachweis der Einsetzbarkeit im geplanten möglichst breiten Einsatzfeldes der AutoLED-Quelle wurde das Projektziel erreicht.

7. Voraussichtlicher Nutzen

Die erzielten Ergebnisse sollen bei der inpro zunächst in Form eines Demonstrators für Demonstrationen im Gesellschafterkreis der inpro verwendet werden und darüber hinaus für einen erweiterten Kundenkreis. Damit hat die inpro einen Vorteil hinsichtlich der zur Verfügung stehenden thermografischen Prüfoptionen gegenüber Wettbewerbern welche weder über eine vergleichbar leistungsfähige LED-Anregungsquelle noch über die in Zusammenarbeit mit der BAM gewonnene Erfahrung mit der LED-Thermografie verfügen. Zusammen mit den anderen bei inpro verfügbaren Anregungsquellen ist somit eine große Flexibilität bezüglich der untersuchbaren Werkstoffe (Metall und Kunststoffe) und der verwendbaren Prüftechniken (Impuls- und Lockin-Thermografie) gegeben, die sich ideal in das favorisierte modulare Prüfkonzept eingliedert. Neben diesen im Gesamtkontext der Thermografie-Aktivitäten bei inpro anzusehenden Nutzszenarien könnte sich durch die Verschiebung hin zu neuen und für die übliche Prüftechnik schwierig zu prüfenden Werkstoffen (z.B. Faserverbundwerkstoffe) eine neue Situation hinsichtlich einer Nischenlösung durch LED-Thermografie ergeben. Diese Entwicklung ist momentan noch nicht sicher abzusehen, die Voraussetzungen zum sofortigen Umsatz dieser Prüfoption sind jedoch durch die nun vorhandene LED-Quelle gegeben.

8. Fortschritte an anderen Stellen

Während der Durchführung des Projekts ist lediglich eine Veröffentlichung (Pickering, S.G., Chatterjee, K., Almond, D.P. and Tuli, S., 2013. LED optical excitation for the long pulse and lock-in thermographic techniques. NDT & E International, 58, pp. 72-77) bekannt geworden. Diese Arbeit stellt jedoch keinen Fortschritt gegenüber dem Projekt dar, sondern zeigt nur die Verwendung einer LED-Anregung für die thermografische Prüfung von CFK-Komponenten.

9. Veröffentlichungen des Ergebnisses

Teile der Untersuchungen zur Charakterisierung der LED-Anregungsquelle und zur Erprobung mit speziellen Testkörpern wurden im Rahmen des Thermographie-Kolloquiums 2013, Stuttgart als Vortrag und im Konferenzband veröffentlicht (Untersuchung von Hochleistungs-LEDs für den Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung mittels Thermografie, M. Röllig, H. Steinfurth, M. Ziegler, Thermographie-Kolloquium 2013, DGZfP-BB 143 (Vortrag 3), ISBN: 978-3-940283-52-8). Weitere Veröffentlichungen sind geplant.

**BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Fachbereich 8.4
Unter den Eichen 87
12205 Berlin**



i.A., Dr. Mathias Ziegler, 29.04.2014

Anlagen: Erfolgskontrollbericht
Nachweis über die erbrachten Eigenleistungen des am Projekt beteiligten Unternehmens
Nachweis über die bei der Bundesanstalt angefallenen Projektausgaben