

Untersuchung von Hochleistungs-LEDs für den Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung mittels Thermografie

Mathias RÖLLIG, Henrik STEINFURTH und Mathias ZIEGLER
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, 12200 Berlin
mathias.roellig@bam.de

Kurzfassung. Für die optische Erwärmung von Prüfteiloberflächen sind Blitz- und Halogenlampen Stand der Technik. Der Vorteil dieser Wärmequellen liegt in ihren relativ geringen Anschaffungskosten bei gleichzeitig hohen Leistungsdichten am Prüfobjekt. Nachteilig ist bei den Halogenlampen die Limitierung der möglichen Modulationsfrequenz auf ca. 1 Hz für die Anwendung dieser Quelle in der Lockin-Thermografie. Blitzlampen bieten für gewöhnlich nur eine feste Blitzdauer bei einer geringen Taktrate. Beide Anregungsquellen müssen in Reflexionsanordnung mit Filtern betrieben werden um die entstehende thermische Eigenstrahlung als Störquelle zu eliminieren. Wir stellen Untersuchungen an Hochleistungs-LEDs für den Einsatz in der aktiven Thermografie vor. Diese Lichtquellen werden durch die rasante Entwicklung der möglichen Leistungsdichten nun auch für die thermografische ZiP interessant. Sie zeigen ähnlich dem Laser eine schmale und auf den Werkstoff abstimmbare spektrale Verteilung der Strahlungsleistung bei moderaten Kosten. Die zugrunde liegende Elektrolumineszenz generiert kaum Wärmestrahlung und ermöglicht dadurch die Prüfung während des Erwärmungsvorganges ohne größeren Aufwand. Modulationsfrequenzen über 100 Hz mit thermischen Eindringtiefen < 1 mm sind möglich. Dadurch qualifizieren sich die LEDs zur Anwendung in der Lockin-Thermografie von Metallen und zur oberflächennahen Prüfung von Schichtsystemen. Durch die fast verzögerungsfreie Reaktion der LED auf das steuernde Signal sind nahezu beliebige zeitliche Anregungsformen möglich. Mit solch flexiblen Anregungsformen ließen sich bereits bei den photothermischen Verfahren erfolgreich höhere Tiefenreichweiten und -auflösungen gegenüber den klassischen Methoden der monofrequenten Lockin - und energiereichen Kurzimpuls-Anregung erzielen. Untersuchungen dieser Möglichkeiten im praktischen Einsatz der Hochleistungs-LEDs werden vorgestellt und mit herkömmlichen Lichtquellen verglichen.

1. Einführung

Die Verwendung von Hochleistungs-Leuchtdioden (LED) ermöglicht die Anwendung neuer Messregimes. Die Entwicklung der LEDs geht zu immer höheren Leistungsdichten [1] und Lebensdauern was sie als mögliche Energiequelle zur Anwendung in der Thermografie interessant macht. Bei den üblichen optischen Wärmequellen, welche die notwendige Energie zum Ort des Geschehens durch Strahlungstransport gewährleisten, sind einige Randbedingungen zu beachten. Während der Erwärmung eines Prüfobjektes ist es sehr abhängig vom zu untersuchenden Material, genauer vom Emissionsgrad der Prüfoberfläche, wie stark



die Wärmequelle im Empfindlichkeitsbereich der eingesetzten IR-Kamera in die Kamera reflektiert, [2] und [3]. Bei Halogenlampen, Infrarotstrahlern und Blitzlampen ist das immer gegeben und führt bei ungünstiger Auswahl der beteiligten Elemente zu keinem auswertbaren Ergebnis. LEDs können eine Lösung zu diesem spektralen Problem sein. Hier ist eine saubere spektrale Separation von Anregungs- und Beobachtungswellenlänge durch den Mechanismus der LED-Lichterzeugung gegeben. Prinzipiell können LEDs auf einen bestimmten Emissionswellenlängenbereich zugeschnitten werden und dadurch eine hohe Absorption der Anregungsstrahlung auch für selektive Absorber ermöglichen. So weist beispielsweise Aluminium ein lokales Maximum im Absorptionsgrad zwischen 800 und 900 nm auf. Als optoelektronische Halbleiter-Bauelemente, welche auf dem physikalischen Prinzip der Elektrolumineszenz basieren, sind für solche Lichtquellen sehr schnelle Modulationsfrequenzen > 1 MHz möglich, im Hochleistungsbereich praktisch nur durch die verfügbaren Stromquellen auf etwa 1 kHz begrenzt. Hiermit lassen sich theoretisch sehr hohe Prüfraten erzielen und innovative Formen der zeitlichen Anregung einsetzen [4], [5]. Lebensdauern von LEDs betragen bis mehrere 10.000 h [6] und sind damit den üblichen Halogen- und Blitzlampen deutlich überlegen. Über die längere Lebensdauer rechnet sich letztlich auch der im Moment noch höhere, aber aufgrund der großen Dynamik in der LED-Entwicklung stetig sinkende Anschaffungspreis (~ 10 €/W Ausgangsleistung) [7].

Unsere Untersuchungen zeigen, dass hocheffiziente und langlebige LEDs zukünftig ein Ersatz für herkömmliche Lichtquellen sein könnten, sowohl als Impulslichtquelle als auch als schnell modulierbare Lichtquelle für Lockin-verstärkte thermografische Prüfungen.

2. LED vs. Klassische Lichtquellen

2.1 Spektrale Problemstellung und Lösung

Messtechnische Nachteile von thermischen Lichtquellen (z. B. von häufig eingesetzten Halogenstrahlern) und Gasentladungslampen (Blitzlampen) ergeben sich aus deren breitbandiger Abstrahlung und den hohen Temperaturen der Lichtquellen. Ein erheblicher spektraler Anteil dieser Lichtquellen befindet sich im mittleren Infrarot, d.h. in dem Wellenlängenbereich, in dem auch die Thermografiekameras empfindlich sind (Abb. 1 links).

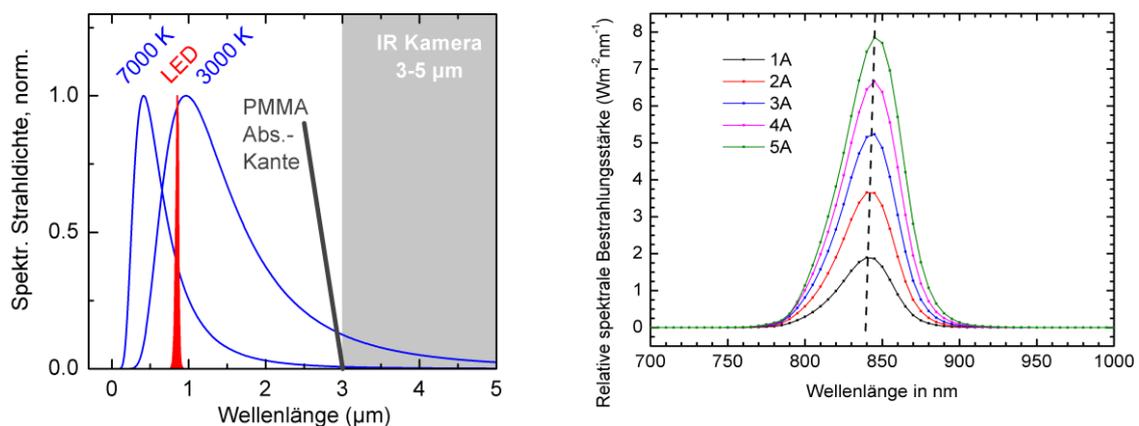


Abbildung 1: Links: Normierte spektrale Strahlendichte für Schwarzkörperstrahler mit Temperaturen von 3000 K (Näherung für Halogenlampe) und 7000 K (Näherung für Blitzlampe) und für die verwendete LED. Der spektrale Empfindlichkeitsbereich der IR-Kamera überlappt mit diesen Schwarzkörperspektren. Die Absorptionskante von PMMA ist schematisch eingezeichnet. **Rechts:** Relative spektrale Bestrahlungsstärke bei verschiedenen Stromstärken des LED-Arrays. Ein Anstieg der Bestrahlungsstärke und eine leichte Rotverschiebung mit steigender Stromstärke sind zu beobachten.

Das bedeutet, dass nur mit aufwändigen Filtern eine Störung der thermografischen Messung während der Erwärmung zu verringern oder zu vermeiden ist. Solche Filter sind z.B. vor die Lichtquellen montierte PMMA-Scheiben deren Transmissionsgrad zwischen 2 μm und 3 μm stark von nahezu 1 auf nahezu 0 abfällt (Kurzwellenpassfilter, siehe Abb. 1). Dabei geht jedoch ein erheblicher Anteil der aufgewendeten Anregungsenergie für die Prüfaufgabe verloren. Bei der üblichen nicht vollständigen Unterdrückung dieser Störanteile ist daher eine vollständig störungsfreie Messung während der Anregung nicht möglich. Die gut absorbierende PMMA-Scheibe wirkt ebenfalls als (phasenverschobene) Wärmequelle. Bei den häufig verwendeten Blitzlampen mit Blitzdauern um 3 ms lässt sich ein thermisches Nachglühen (*afterglow*) des Glaskolbens von bis zu mehreren 10 ms [8], [9] beobachten, welches ebenfalls zu Störungen im relevanten Spektralbereich führt. Hierdurch gehen wertvolle Messinformationen aus dem exponentiell abklingenden Teil der Abkühlungstransiente verloren. Für den Fall der LockIn-verstärkten thermografischen Prüfung muss zwingend während der Anregung gemessen werden.

Die untersuchten LED-Arrays weisen hingegen eine klare Separation vom Kamera-Spektralbereich auf (siehe Abb. 1). Gemessen wurde die spektrale Bestrahlungsstärke mit einem Spektrophotometer. Die ausgesandte Strahlung des LED-Array wurde in einer Ulbrichtkugel in einem Abstand von 20 cm gesammelt und in einem Doppelmonochromator spektral zerlegt. Abbildung 1, rechts zeigt die gemessenen Spektren in Abhängigkeit der eingespeisten Stromstärke des LED-Arrays. Es zeigt sich ein gemessenes Maximum von ca. 845 nm und eine durchschnittliche Halbwertsbreite von 40 nm. Neben der Erhöhung der spektralen Bestrahlungsstärke mit steigender Stromstärke zeigt sich eine leichte temperaturinduzierte Verbreiterung und Verschiebung zu höheren Wellenlängen (Rot-Verschiebung) die jedoch für die thermografische Prüfung keine Einschränkung darstellt.

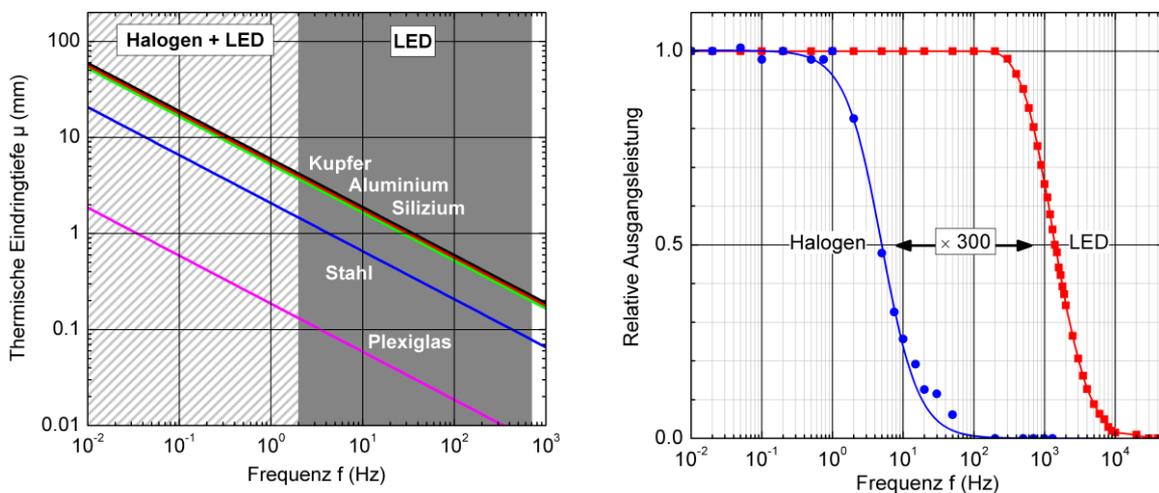


Abbildung 2: Links: Thermische Eindringtiefe über Anregungsfrequenz für Werkstoffe unterschiedlicher Diffusivität. Die Bereiche welche sich mittels LED- und Halogenquellen prüfen lassen sind farblich markiert. **Rechts:** Relative Ausgangsleistung (gemessen mit Si-Photodiode) über der Frequenz bei sinusförmiger Modulation für LED- und Halogenquelle. Der Wert bezeichnet den der Modulation folgenden und mit steigender Frequenz fallenden Anteil an der Gesamtleistung.

2.2 Geschwindigkeitsproblem und Lösung

Für die Bestimmung der Tiefe flacher Defekte sind eine schnelle IR-Kamera und eine schnell schaltbare Erwärmungsquelle erforderlich. Neben der Impulsthermografie (mit Blitzlichtanregung) kommt hierfür die Lockin-Thermografie in Frage bei welcher eine sinusförmige Beleuchtung hoher Frequenz (f) in einem Werkstoff mit Dichte (ρ), spezifischer Wärmekapazität (c) und Wärmeleitfähigkeit (λ) eine Informationstiefe aufweist die in etwa dem ein- bis zweifachen der thermischen Eindringtiefe

$$\mu = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi \rho c f}} \quad (1)$$

entspricht (siehe Abb. 2). Sollen in metallischen Werkstoffen Defekte mit Tiefenlagen um 1 mm ermittelt werden, benötigt man Modulationsfrequenzen zwischen etwa 1 und 100 Hz. Leistungsstarke Halogenlampen lassen für gewöhnlich nur Frequenzen um 1 Hz zu und eignen sich damit eher für Werkstoffe mit geringer thermischer Diffusivität $\alpha = \lambda / \rho c$. Ein großes Potential für die oberflächennahe Prüfung von Metallen kann daher schnell modulierbaren LED-Quellen beigemessen werden welche sich um mehrere Größenordnung schneller schalten lassen. Abbildung 2 zeigt den für die Lockin-Thermografie nutzbaren Anteil der optischen Ausgangsleistung der untersuchten Halogen- und LED-Quellen bei sinusförmiger Modulation. Bei einer relativen Ausgangsleistung von 0,5 folgt nur noch die Hälfte der abgestrahlten Leistung der Modulation, der Rest trägt als Gleichanteil zu einer (nicht erwünschten) kontinuierlichen Erwärmung der Probe bei.

3. Erprobung der LED in der aktiven Thermografie

3.1 Probenbeschreibung

Der Probekörper in Abb. 3 ist ein gebogenes Teilstück aus einer Rohrleitung (Höhe: 18 cm, Breite: 12 cm). Drei Bereiche sind bei dem Probekörper von Interesse. Der rotumrandete Bereich beinhaltet drei Korrosionsstellen (Restwandstärken von minimal 0,12 - 1,2 mm und laterale Ausdehnung bis 10 mm), die zu einer hohen Ausfallwahrscheinlichkeit des Werkstücks führen könnten. Im grünumrandeten Bereich sind Fehlstellen mit Restwandstärken von 0,5- 1,5 mm mit geringerer lateraler Ausdehnung (ca. 2-3 mm). Im hellblauen Bereich befinden sich Fehlstellen mit großen Überdeckungen und geringen lateralen Ausdehnungen. Die Oberfläche ist dünn mit Graphit beschichtet. An einigen Stellen wurde durch mechanische Beanspruchung die Beschichtung abgetragen, so dass die ursprüngliche Oberfläche zum Vorschein kam welche über die gesamte Oberfläche verteilte Flugrostflächen aufweist.

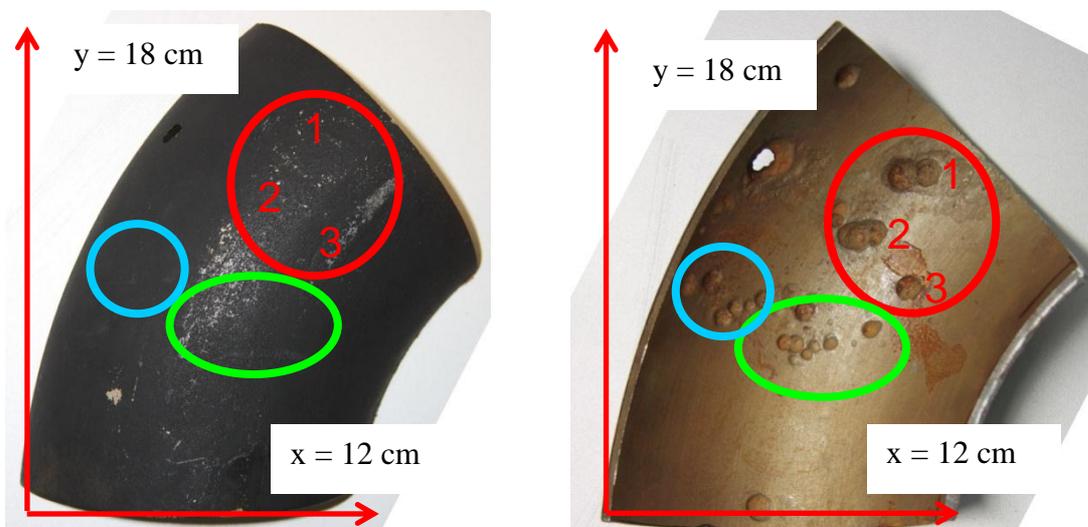


Abbildung 3: Links: Foto der Außenseite des verwendeten Probekörpers: Ausschnitt aus einem Leitungsrohr, zur Emissivitätssteigerung mit Graphit beschichtet. Rechts: Foto der Innenseite des verwendeten Probekörpers, vertikal gespiegeltes Bild.

3.2 Experimenteller Aufbau

Der Messaufbau in Reflexionsanordnung besteht aus einer Wärmequelle, einem Probekörper und einer IR-Kamera (InSb-Detektor, spektraler Empfindlichkeitsbereich: 3,7- 5,3 μm , Detektorgröße 640×512 Pixel, Bildwiederholrate: 100 Hz). Als Wärmequelle kamen drei verschiedenen Systeme zum Einsatz:

1. BAM-OctoLED [10]: bestehend aus 8 kreisförmig um die IR-Kamera angeordneten wassergekühlten Hochleistungs-LED-Arrays (siehe Abb. 4). Die optische Ausgangsleistung pro LED beträgt ca. 16 W bei 6 A mit einem Strahlwinkel von 30° FWHM.
2. Halogenstrahler: zwei Scheinwerfer mit insgesamt 1000 Watt elektrischer Anschlussleistung werden über ein Dimmerpack gesteuert. Vor den Strahlern sind 10 mm starke Scheiben aus PMMA angebracht.
3. Blitz: zwei Blitzlichtköpfe werden über externe Generatoren mit einer Gesamtenergie von 12 kJ pro Blitz versorgt. Vor den Blitzköpfen sind 10 mm starke Scheiben aus PMMA angebracht.

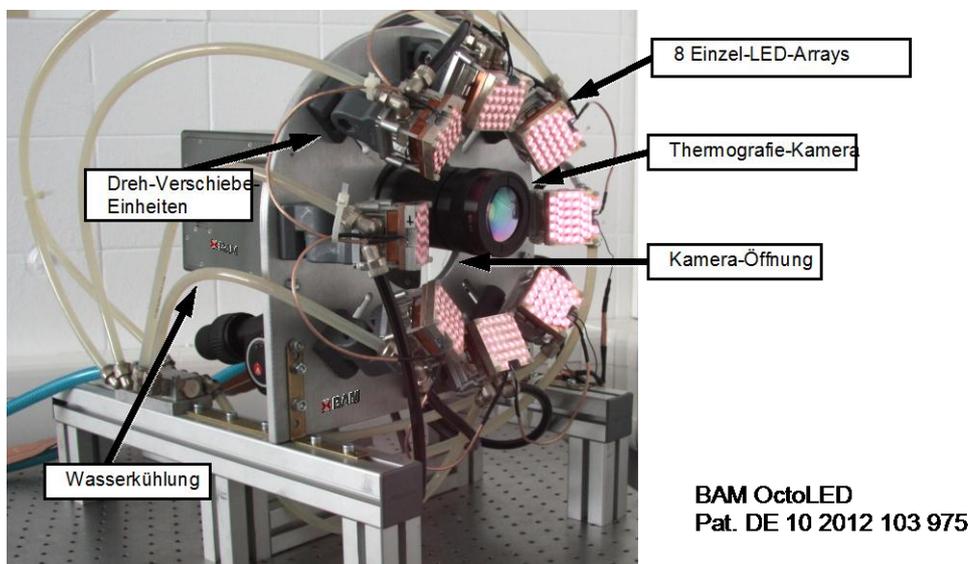


Abbildung 4: BAM-OctoLED, bestehend aus acht LED-Arrays, die ringförmig auf einem Träger angeordnet sind. Die LED-Arrays sind zusätzlich noch in ihrer Ausrichtung einstellbar durch Dreh-Verschiebe-Einheiten.

3.3 Ergebnisse und Diskussion

Zur Erprobung der LED-Quelle und zum Vergleich mit konventionellen Erwärmungsquellen wurden unterschiedliche zeitliche Anregungsformen sowie verschiedene Datenverarbeitungstechniken angewendet:

- (I) Impulsanregung mit unterschiedlich langer Erwärmungsdauer 3 ms - 10 s
- (II) Sinus- und rechteckförmige Modulation mit fester Frequenz 0,5- 25 Hz
- (III) Frequenzmodulierte Anregung mit Frequenz zwischen 0,2 und 25 Hz
- (IV) Darstellung von Thermogrammen maximalen Kontrastes
- (V) Darstellung von Amplituden- und Phasenbildern nach FFT (d.h. Puls-Phasen-Thermografie oder Lockin-Thermografie)
- (VI) Darstellung von Amplituden- und max. Delaybildern nach Kreuzkorrelation

Für die folgende Darstellung beschränken wir uns auf einige experimentelle Ergebnisse der Kombinationen (I)+(IV), (I)+(V) (siehe in Abb. 5) und (III)+(VI) (siehe in Abb. 6).

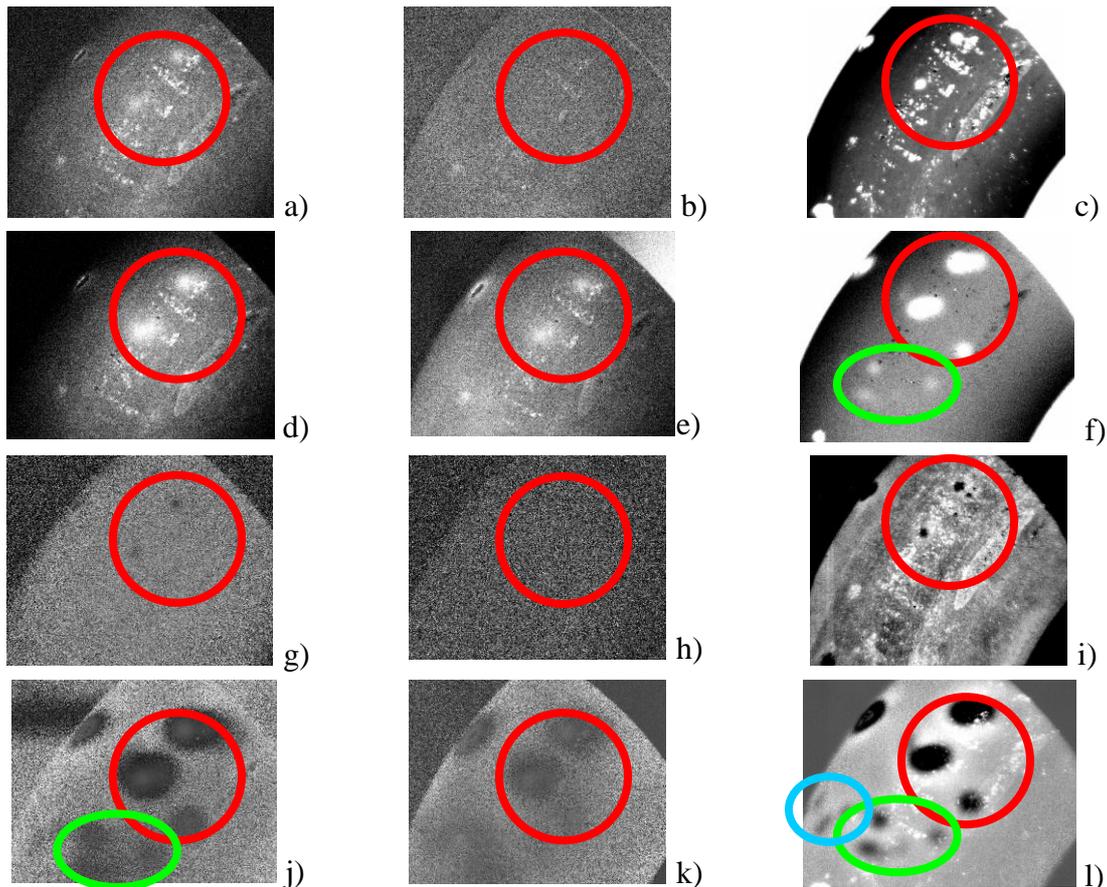


Abbildung 5: a) Thermogramm nach 80 ms innerhalb der Erwärmungsphase, Anregung durch das LED-Array. b) Thermogramm nach 80 ms innerhalb der Erwärmungsphase, Anregung durch die Halogenlampen. c) Thermogramm nach 30 ms innerhalb der Abkühlungsphase, Anregung durch das Blitzlicht. d) Thermogramm nach 1 s innerhalb der Erwärmungsphase, Anregung durch das LED-Array. e) Thermogramm nach 1 s innerhalb der Erwärmungsphase, Anregung durch die Halogenlampen. f) Thermogramm nach 170 ms innerhalb der Abkühlungsphase, Anregung durch das Blitzlicht. g) Phasenbild innerhalb der Erwärmungsphase nach der Umwandlung bei einer Auswertungsfrequenz von 7,14 Hz, Anregung durch das LED-Array. h) Phasenbild innerhalb der Erwärmungsphase nach der Umwandlung bei einer Auswertungsfrequenz von 7,14 Hz, Anregung durch die Halogenlampen. i) Phasenbild innerhalb der Abkühlungsphase nach der Umwandlung bei einer Auswertungsfrequenz von 12,5 Hz, Anregung durch die Blitzlampen. j) Phasenbild innerhalb der Abkühlungsphase nach der Umwandlung bei einer Auswertungsfrequenz von 0,78 Hz, Anregung durch das LED-Array. k) Phasenbild innerhalb der Abkühlungsphase nach der Umwandlung bei einer Auswertungsfrequenz von 0,78 Hz, Anregung durch die Halogenlampen. l) Phasenbild innerhalb der Abkühlungsphase nach der Umwandlung bei einer Auswertungsfrequenz von 0,78 Hz, Anregung durch die Blitzlampen.

Die Thermogramme in Abb.:5, a) und b), zeigen das Probenstück nach 80 ms innerhalb der Erwärmungsphase. Zwei der Minderdicken des roten Bereichs, des Bereichs mit hoher Ausfallwahrscheinlichkeit des Werkstücks, sind bei einer Anregung von 80 ms mit dem LED-Array, a), schwach zu erkennen. Bei einer Anregung mit der Halogenlampe, b), sind keine Minderdicken zu sehen. Die Halogenlampe hat zu diesem Zeitpunkt weniger als 50% ihrer möglichen Ausgangsleistung erreicht. Es zeigt sich der Vorteil einer hohen Modulationsfrequenz. Die Thermogramme in Abb.:5, d) und e), zeigen das Probenstück nach 1 s innerhalb der Erwärmungsphase. Nach einer Anregungsdauer von 1 s sind bei den beiden Erwärmungsquellen, d) LED und e) Halogenlampe, die beiden Minderdicken des roten Bereichs zu sehen. Die Thermogramme in Abb.:5, c) und f), zeigen das Probenstück zu unterschiedlichen Zeiten innerhalb der Abkühlungsphase nach Anregung mit den Blitzlampen. Zwei der Minderdicken des roten Bereichs, des Bereichs mit hoher Ausfallwahrscheinlichkeit des Werkstücks, sind nach 30 ms, c), zu erkennen. Nach einer Beobachtungszeit von 170 ms, f), sind die Minderdicken des roten Bereichs und einige des grünen Bereichs

zu sehen. Störend für die Auswertung der oberflächen nahen Minderdicken ist der spektrale Überlapp der Erwärmungsquelle in den Empfindlichkeitsbereich der Kamera.

Zur Kontrasterhöhung wurden die Thermogrammsequenzen umgewandelt in Amplitudenbilder und Phasenbilder im Frequenzraum durch die Methode der Puls-Phasen-Thermografie. Phasenbilder liefern ein kontrastreiches Bild ohne nennenswerte Beeinflussung durch unterschiedliche Emissivitäten der Oberfläche. Die Phasenbilder in Abb.:5, g) und h), zeigen das Probenstück innerhalb der Erwärmungsphase nach der Umwandlung bei einer Auswertungsfrequenz von 7,14 Hz. Je höher die Frequenz ist, desto oberflächennaher lassen sich Inhomogenitäten auflösen. In dem Phasenbild nach einer Anregung mit dem LED-Array, g), sind zwei der Minderdicken des roten Bereichs zu erkennen ohne den Einfluss der Emissivität der Oberfläche. In dem Phasenbild nach der Anregung mit den Halogenlampen, h), sind keine Minderdicken zu sehen. Das Phasenbild in Abb.:5, i) zeigt das Probenstück innerhalb der Abkühlungshase nach der Anregung mit dem Blitzlicht nach der Umwandlung durch die Puls-Phasen-Thermografie bei einer Auswertungsfrequenz von 12,5 Hz. Es sind zwei der Minderdicken des roten Bereichs zu sehen, aber auch Oberflächeneffekte durch den spektralen Überlapp der Quelle, die mit in die Auswertung gelangen. Die Anregungsart Kurzpuls wird durch eine Blitzlampe und die Anregungsart Langpuls wird durch einen Rechteckpuls des LED-Arrays erzeugt.

Die Phasenbilder in Abb.:5, j), k) und l) zeigen das Probenstück innerhalb der Abkühlungshase nach der Umwandlung durch die Puls-Phasen-Thermografie bei einer Auswertungsfrequenz von 0,78 Hz. Diese Frequenz zeigt einen oberflächenfernen Bereich. In dem Phasenbild nach einer Anregung mit dem LED-Array, j), sind drei der Minderdicken des roten Bereichs zu erkennen. Zusätzlich sind Minderdicken des grünen Bereichs unscharf zu erkennen. In dem Phasenbild nach einer Anregung mit den Halogenlampen, k), sind lediglich drei der Minderdicken des roten Bereichs schwach auszumachen. In dem Phasenbild nach der Anregung mit den Blitzlampen, l), sind drei der Minderdicken des roten Bereichs zu sehen und beinahe alle Minderdicken des grünen und blauen Bereichs.

Neben den klassischen Anregungs- und Datenverarbeitungsverfahren aus (I,II)+(IV,V), ist mit der nahezu verzögerungsfrei zu modulierenden LED-Quelle auch die Kombination (c)+(f) eine mögliche Option. In Abb. 6 sind die Ergebnisse einer frequenzmodulierten Anregung nach [4], [5] abgebildet.

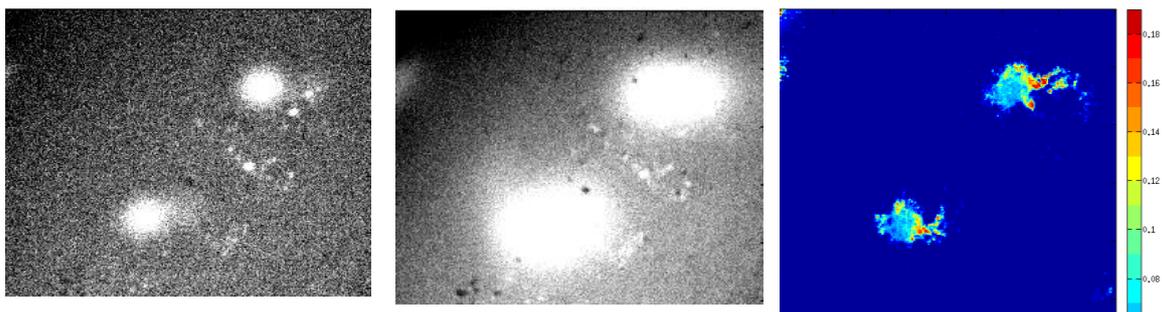


Abbildung 6: **Links:** Amplitude der Kreuzkorrelation nach 100 ms Verzögerung, **Mitte:** Amplitude der Kreuzkorrelation nach 470 ms Verzögerung, **Rechts:** Bildhafte Darstellung der Verzögerung für maximale Amplitude der Kreuzkorrelation in s.

Hierzu wurde mit der LED-Quelle ein Frequenz-Chirp (0,25-25 Hz) aus Rechteckimpulsen erzeugt und die Thermogrammsequenz mit dem LED-Ansteuersignal kreuzkorreliert. Hierdurch lässt sich eine Pulskompression erzielen wie sie in der Radartechnik zur Erhöhung der Tiefenauflösung und –reichweite Anwendung findet. Die Amplitude der Kreuzkorrelation $CC(\tau)$ in Abhängigkeit von der Verzögerung τ ist in Abb. 6 dargestellt. Diese ähneln den Amplitudenwerten der PPT und Lockin-Thermografie für unterschiedliche Anregungs- bzw. Auswertefrequenzen. Weiterhin lässt sich über die pixelweise Auftragung der Verzö-

gerungswerte τ_{\max} für eine maximale Amplitude der Kreuzkorrelation eine bildhafte Darstellung der Defekttiefe d erzielen, denn hier kann ähnlich wie bei den Phasenwerten der PPT und Lockin-Thermografie ein (hier jedoch monotoner) Zusammenhang zwischen d und τ_{\max} hergestellt werden [4].

4. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt die Möglichkeiten der Verwendung von Hochleistungs-LEDs für den Einsatz in der Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung auf. Die beiden grundsätzlichen Problemstellungen des spektralen Überlapps von Anregungs- und Detektionswellenlänge sowie der geringen Modulationsfrequenz von Blitz- und Halogenlampen können durch den Einsatz von LEDs gelöst werden. Hierbei erzielt die vorgestellte BAM-OctoLED-Quelle derzeit eine Leistungsdichte die mindestens das Niveau von 1 kW Halogenlampen erreicht. Zusätzlich ist diese Wärmequelle um einen Faktor 300 schneller modulierbar, was zum einen scharfe Impulse und zum anderen eine hochfrequente Lockin-Thermografie ohne Phasenverzögerung erlaubt. Weiterhin lassen alternative zeitliche Anregungsformen neue Datenverarbeitungsstrategien zu. Es liegt nahe, dass durch eine weitere Steigerung der Leistungsdichte sich in Zukunft auch Blitzlampe durch langlebige und beliebig modulierbare LEDs für die Anwendung in der Thermografie ersetzen lassen.

Danksagung

Die Arbeiten wurden vom BMWi gefördert in Programm „MNPQ-Transfer“ im Projekt „Hochleistungs-LED-Anregungsquelle für die thermografische Prüfung in der Automobilindustrie (AutoLED)“ BMWi-Akz. 21/11 und in der Fördermaßnahme „Transfer von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen (FuE) durch Normung und Standardisierung“ im Projekt „Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung“. Wir danken Marco Lucht für die Konstruktion der LED-Quelle und dem Fachbereich 8.6 der BAM insbesondere Klaus-Peter Gründer, Pötschke und Sebastian Chruscicki für die Messungen und Diskussionen zur spektralen Charakterisierungen der LED.

Referenzen

- [1] Osram Opto Semiconductors: High Power Emitters for Illumination Applications, Application Note, 2011
- [2] Maldague, X.: Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. Wiley, 2001. - ISBN 9780471181903
- [3] Almond, D. P.; Patel, P.: Photothermal science and techniques. Springer, 1996. ISBN 9780412578809
- [4] N. Tabatabaei, A. Mandelis, B.T. Amaechi, Appl. Phys. Lett. 98 (2011), 163706.
- [5] V.S. Ghali, R. Mulaveesala, Sens. Imaging. 12 (2011), 15-33.
- [6] <http://www.osram-os.com>
- [7] <http://www.digikey.de>
- [8] S. Shepard, "Method and apparatus for thermographic imaging using flash pulse truncation" US Patent, US 7186981, 2007
- [9] H. Heissenstein, „Fehlerdetektion im μ s-Takt, Schnell schaltbare Anregungsquellen eröffnen der Wärmefluss-Thermografie neue Anwendungsfelder“, DGZfP-Jahrestagung, Bremen, Germany, May 30, 2011.
- [10] 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