

# Fehlerdetektion im $\mu$ s-Takt

## Schnell schaltbare Anregungsquellen eröffnen der Wärmefluss-thermografie neue Anwendungsfelder

Hans HEISSENSTEIN, Michael WEIDNER, Thomas HIERL  
Thermosensorik GmbH, Am Weichselgarten 7, 91058 Erlangen

**Kurzfassung.** Es werden aktuelle Ansätze dargestellt, wie mit veränderten Anregungsquellen im Bereich hoher zeitlicher Dynamik neue Anwendungsgebiete für die Thermografie erschlossen werden können. Im Bereich der Lasertechnik, der LED-Strahler sowie der Blitz- und Induktionstechnik findet man Anregungsquellen, deren spezifische Eigenschaften sich zur thermografischen Darstellung von Wärmeflussprozessen mit hoher zeitlicher Dynamik einsetzen lassen. Damit erschließt sich der zerstörungsfreien Prüfung mittels Wärmefluss-thermografie der bislang nicht zugängliche Bereich thermisch hochdynamischer Systeme, wie Halbleiterbauelemente, dünne Schichten oder auch Verbindungen dünner Bleche und ähnliche.

### 1. Einführung

Die Wärmefluss-thermografie hat sich in den letzten zehn Jahren zu einem gut beherrschten Prüfverfahren im Umfeld der industriellen Produktion [1,2,3] entwickelt. Hauptgrund für die positive Aufnahme der zerstörungsfreien Methode in vielen Bereichen ist, dass sie bildgebend arbeitet, so dass sie den Hauptsinn des Menschen anspricht und entsprechend intuitiv in der Ergebnisinterpretation ist. Dies gilt unabhängig für Laborsysteme, halbautomatische Systeme und auch für Fehlerprotokolle von Prüfautomaten. Dabei gehen die Entwicklungstendenzen in jedem der Bereiche Anregungstechnik, Kamera-technik und Auswertetechnik durchaus in verschiedene Richtungen, wodurch neue Einsatzbereiche erschlossen werden. Ein Bereich sind dünne Metalle mit Materialstärken von unter einem Millimeter, dünne Beschichtungen sowie die Detektion vergrabener, oberflächennaher Defekte, die mit Kameras im visuellen Bereich nicht mehr erfassbar sind. Hierfür muss man neue Wege in der Technik beschreiten. Die bisherigen gepulsten Anregungen erzielen Einzelpulse mit einer Länge von ca. 200 ms Pulsdauer (Blitz [1]) oder bis zu wenigen Millisekunden [1] und Lock-in-Frequenzen von ca. 100 Hz.

### 2. Grundsätzliche Betrachtung

Neben den gekühlten IR-Wärmebildkameras im kurz-, mittel- und langwelligen Infrarot sowie in einigen Kombinationsbereichen haben sich speziell im langwelligen Infrarotbereich die Bolometerkameras etabliert. Für sie sprechen hauptsächlich die niedrigeren Kosten und in speziellen Anwendungsbereichen die spektrale Empfindlichkeit im langwelligen Infrarot. Die Technik der am Markt befindlichen gekühlten Infrarotkameras entwickelt sich derzeit hauptsächlich zu größeren Detektoren hin. Dies bewirkt, dass die Auslesung der Detektorpixel einen immer größeren Anteil der Aufnahmedauer bean-

spricht. Damit wächst die Totzeit und sinkt die Bildrate. Für die Untersuchung von zeitlich hochdynamischen Prozessen hingegen benötigt man eine hohe Bildrate im kHz-Bereich [4]. Durch Auslesen von Teilbildformaten (Subframes) kommt man dem Ziel von mehreren tausend (Teil-)Bildern pro Sekunde näher. Allerdings verschiebt sich dadurch das Verhältnis von Bildformat zu Auflösung ungünstig: Man verliert gegenüber dem vollen Detektorformat an notwendiger örtlicher Auflösung und zusätzlich verliert man thermische Auflösung durch die Reduktion der Integrationszeit. Eine weitere Entwicklungsrichtung ist, dass neben dem Einsatz von standardisierten thermischen Anregungsquellen, die für andere Anwendungsgebiete konzipiert sind, zunehmend speziell für die Thermographie angepasste Quellen verfügbar werden. Dies bezieht sich hauptsächlich auf die Adaption von Schnittstellenparametern, Anpassung an Single Shot oder periodischen Betrieb und auf die Optimierung der in einen Prüfling einbringbaren Leistungsdichte an Wärmeenergie. In diesem Bereich bewegt sich der Hauptfokus dieser Arbeit. In der Industrie werden zunehmend dünnere Bleche verarbeitet, um Gewichts- und Ressourcen-sparender arbeiten zu können. Geht man von einer homogenen Erwärmung der Oberfläche durch die Anregung aus, so reduziert sich die Wärmeleitungsgleichung auf eine Raumrichtung senkrecht zur Oberfläche, und man erhält folgenden Zusammenhang zwischen Laufzeit  $\tau$  und Materialtiefe  $d$ :

$$\tau \sim d^2 \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\frac{\Delta d}{d} \sim \sqrt{(\Delta\tau/\tau)} \quad (\text{Gl. 2}) \quad [6]$$

Dementsprechend verkürzt sich für geringe Dicken die thermische Laufzeit. Daraus folgt für die Detektion von Defekten, dass neben höheren Bildaufnahmezeiten kürzere und schärfere Pulse bzw. für den Lock-in-Betrieb höhere Schaltfrequenzen der Anregungsquellen benötigt werden. Aus Gl. 1 ergibt sich hierfür ein quadratischer Zusammenhang. Bei hoher zeitlicher Dynamik verschärft sich das Optimierungsproblem von Energieübertrag pro Anregungsimpuls und möglicher Integrationszeit, welche annähernd linear mit der Aufnahmezeit für ein Einzelbild abnimmt. Zusätzlich hängt bei einer Auswertung mit Fast Fourier Transformation (FFT) und verwandten Methoden wie der Lock-in-Auswertung [5] das Auswertergebnis von der Qualität der Periodizität ab [6]. Mit Verkürzung der Periodendauer nimmt die relative Unschärfe (Gl. 2) zu und es kommt zu einer zusätzlichen Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Die erzielbare Tiefenaufklärung ist so proportional zu der Wurzel aus der minimalen erzielbaren Unsicherheit in der Laufzeit des Wärmesignals (Gl. 2).

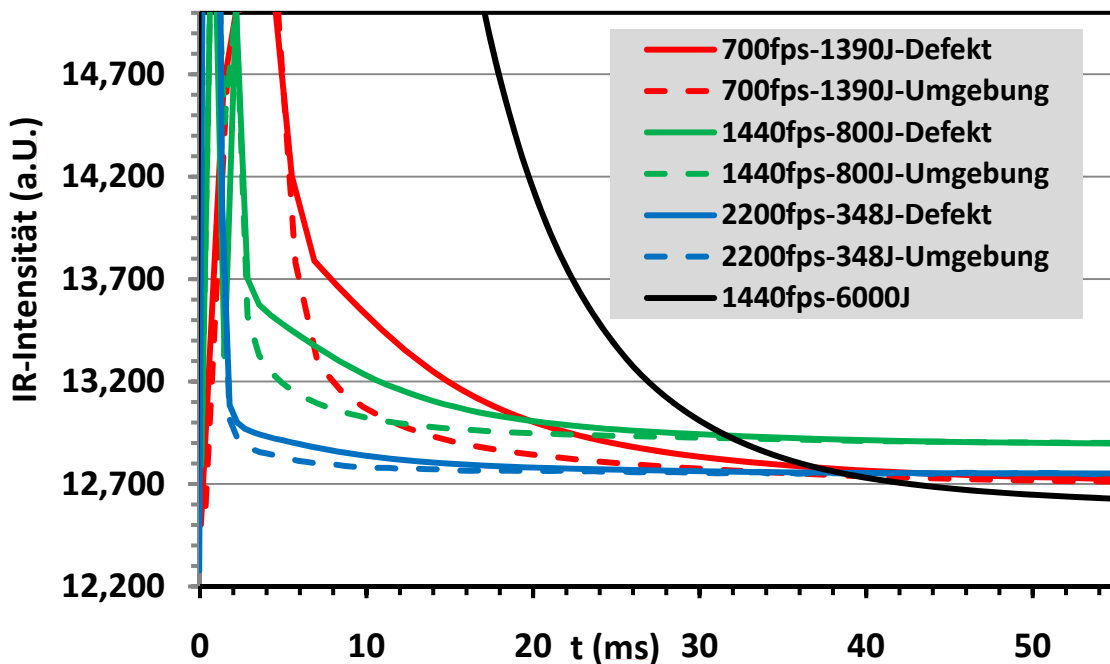
Im oben genannten Zusammenhang stehen die Anregung über Blitzentladung, die Laseranregung und die Anregung mittels Induktion im Mittelpunkt der weiteren Betrachtung. Für spezifische Spezialfälle schneller Prozesse [6] mögen auch andere Anregungsquellen in Betracht gezogen werden.

### 3. Messergebnisse

In diesem Kapitel werden thermografische Untersuchungen vorgestellt, bei denen die Prüflinge mit Blitzentladungen, mit Laseranregung, mit LEDs und mit Induktionsquellen angeregt wurden. Die Eignung dieser Anregungsquellen für zeitlich hoch dynamische Prozesse ist technisch grundsätzlich gegeben. Jedoch eignen sich diese Anregungstechniken nicht für alle Anwendungsfälle gleichermaßen gut.

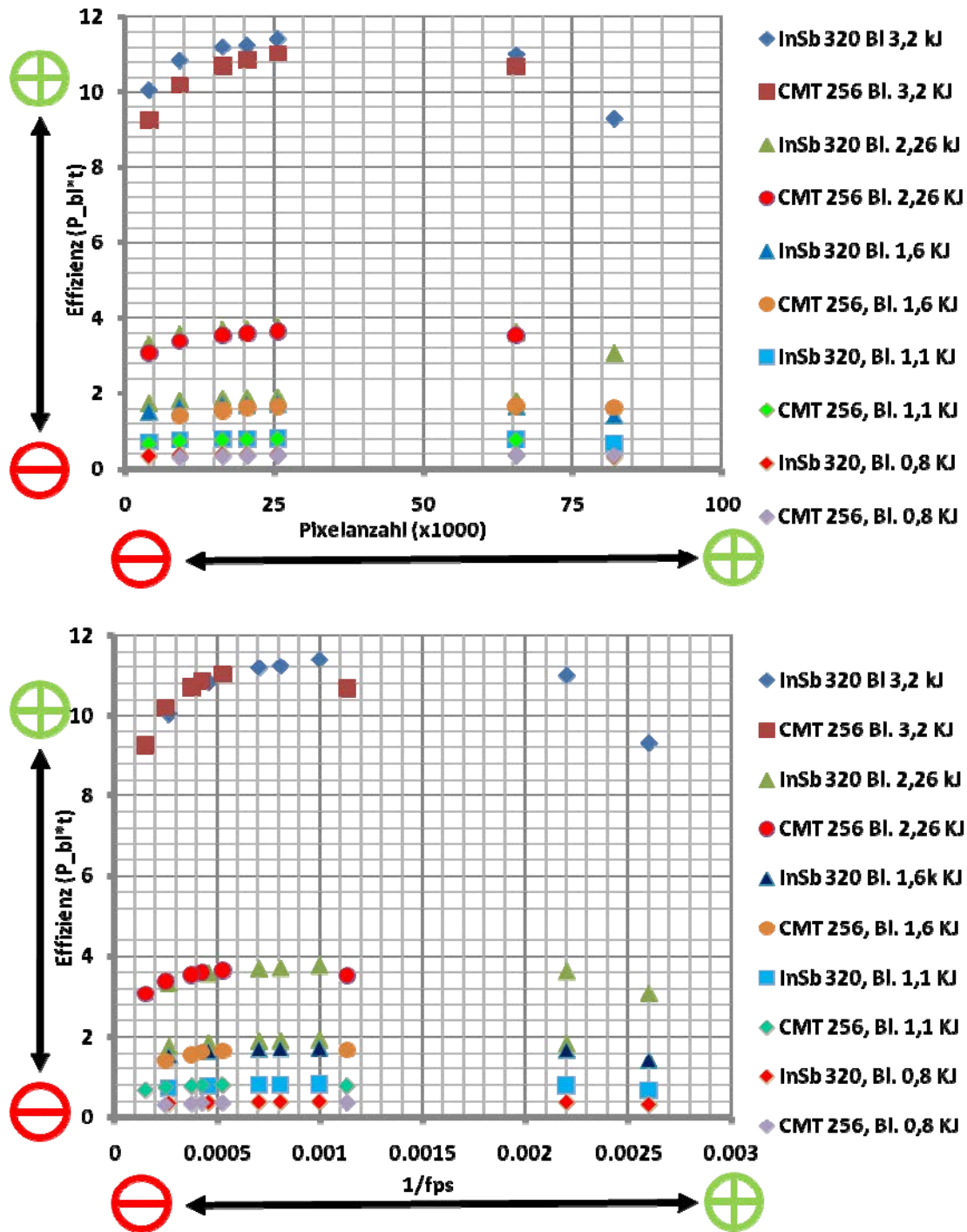
### 3.1 Blitzthermografie

Die mit Blitzlampen angeregte aktive Thermografie ist aufgrund des einfachen Aufbaus und der schnellen Auswertbarkeit weit verbreitet. Dabei birgt diese Form der Anregung den erheblichen Nachteil, dass aufgrund der Aufladezeiten der Kondensatoren nur mit großen Periodendauern ein Lock-in-Betrieb möglich ist. Weiter sind die Entladedauern von leistungsfähigen Blitzen mit ca. 20 ms so groß, dass sie für schnell reagierende Defekte nicht anwendbar sind. Wenn die Defektreaktion in die Blitzabbrenndauer fällt, so kann man diese Defekte nicht detektieren. Deshalb wurden Untersuchungen von verschiedenen kommerziell erhältlichen Blitzlampen in Abhängigkeit von der Anregungsenergie durchgeführt.



**Abb. 1.** Verschiedene Blitzenergien (Joule) mit unterschiedlichen Bildraten der Kamera (fps) aufgenommen. Defektobjekt ist eine Halbleiterprobe mit teilweise delaminierter Löttschicht. Für die Kurven wurde die Detektorintensität über einen kleinen Bereich über dem Defektobjekt bzw. über der fest haftenden Löttschicht (Umgebung) gemittelt.

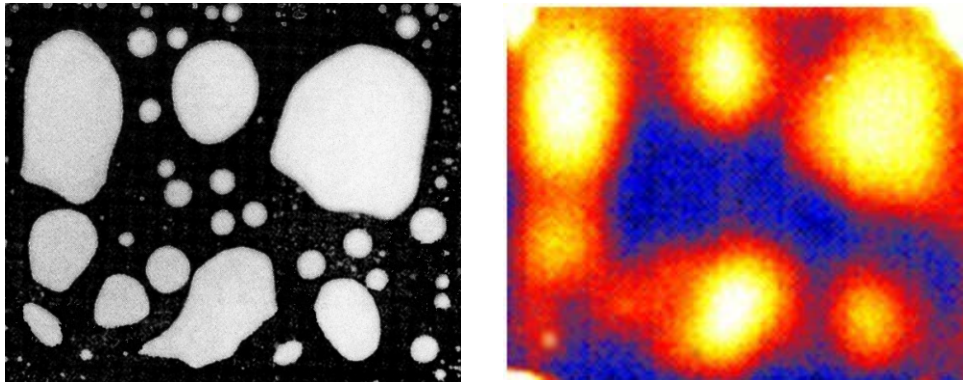
In Abb. 1 sieht man, dass die Blitzdauer sich umgekehrt proportional zur Energie des Blitzes verhält. Weiter ist am Vergleich der Defektzonen mit der Umgebung ersichtlich, dass der durch den Defekt verursachte Wärmestau, der zu einer größeren Erwärmung der Oberfläche führt, nur für ca. 30-35 ms anhält. Hierfür vergleicht man die gestrichelten Kurven mit den durchgezogenen Kurven gleicher Farbe (Abb. 1). Die Fläche zwischen diesen beiden Kurven zeigt jeweils ein Maß für die Sicherheit der Detektion eines Defektes. Das Integral zwischen den beiden Kurven ist abhängig von der eingebrachten Energie und der Schärfe des Anregungsimpulses. Er ist bei den roten Kurven am größten, bei den blauen am kleinsten. Man sieht auch in allen drei Fällen, dass die Defektreaktion schon im Blitzzeitraum selbst beginnt. Man könnte also mit weiterer Reduktion der Abbrenndauer die Detektion der Fehler noch optimieren. Die schwarze Kurve zeigt einen Blitz mit einer Energie von 6 kJ. Dessen Abbrenndauer ist so groß, dass die Antwort des Defekts in der Flanke des Blitzes überhaupt nicht mehr detektierbar ist. Insgesamt ist gut zu erkennen, dass die Abbrenndauer des Blitzes einen begrenzenden Faktor für die



**Abb. 2.** Oben: Darstellung der Blitzeffizienz (= mittlere Leistung( $P_{BI}$ ) \* Abbrenndauer  $t$ ) über der nutzbaren Pixelzahl für zwei Kamertypen im Blitzvergleich von 0,8 bis 3,2 kJ. Unten: Darstellung der Blitzeffizienz über der mittleren Bildaufnahmedauer für zwei Kamertypen im Blitzvergleich von 0,8 bis 3,2 kJ. Jeweils am Rand angegeben sind die für hohe zeitliche Dynamik relevanten (+) oder weniger guten (-) Bereiche.

Detektion darstellt. Mit der Verringerung der Abbrenndauer des Blitzes muss man die Blitzenergie reduzieren, was zu einer Verringerung der von der Kamera aufgenommenen Signalintensität führt. Ferner muss dabei die Kamera eine höhere Bildrate erzielen, um die Vorgänge noch in mehreren Bildern auflösen zu können. Mit der höheren Bildrate geht eine Reduzierung der für das jeweilige Bild zur Verfügung stehenden Aufnahmezeit und damit der Integrationszeit einher. Die verringerte Integrationszeit bewirkt aber auch einen verringerten Intensitätshub der Infrarotaufnahme (Abb. 2).

In den Diagrammen der Abb. 2 ist erkennbar, dass diese beide ein ähnliches Bild der einzelnen Messpunkte zeigen. Jedoch ergibt sich aus der Bewertung ein Optimierungsproblem zwischen hoher Bildrate und großem Bildfeld, was grafisch durch die gegenläufige Bewertung der beiden Abszissen verdeutlicht wird. In der Praxis bewirkt dies, dass zu geringen Blitzdauern schneller Blitze der reduzierte Intensitätshub der Infrarotaufnahme durch kurze Integrationszeiten hinzukommt.



**Abb. 3.** Thermografieaufnahme einer Lötsschicht unter einem 5 mm x 7 mm großem Halbleiter (Oberflächenemissivität ~ 90%) nach Blitzanregung mit 800 J nach Abb. 1: akustische Mikroskopie der Lötsschicht unter dem Halbleiter (links), Amplitudenbild einer FFT-Auswertung (rechts).

Damit kommt für die Blitzanregung die geringste auflösbare Signallaufzeit im Sinne der Gl. 2 sehr abrupt. Abb. 3 zeigt eine Thermografie-Aufnahme mit Blitzanregung entsprechend den grünen Kurven in Abb. 1. Man kann die großen Defekte mit einer Ausdehnung  $> 0,5 \text{ mm}^2$  erkennen. Die Durchmesser der Vielzahl kleinerer Defekte mit einer Ausdehnung um ca.  $0,16 \text{ mm}^2$  liegen etwa im Bereich der Materialdicke. Diese Defekte sind damit nicht auflösbar. Das Ergebnis entspricht damit der Theorie völlig [1,8].

### 3.2 Thermografie mit LED-Anregung

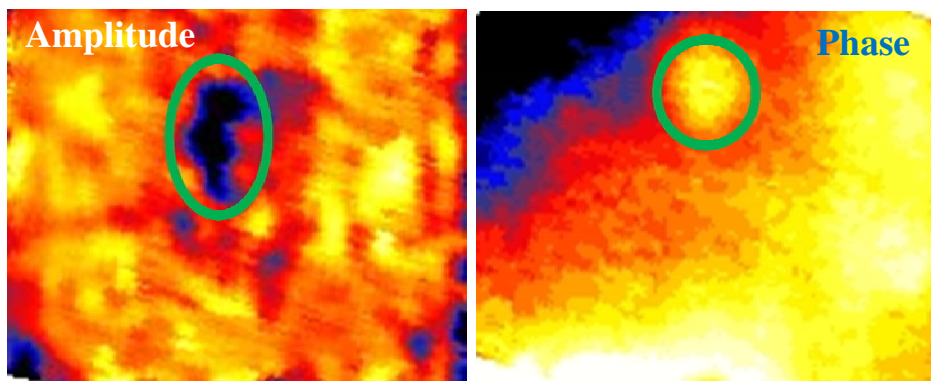
Handelsübliche LED-Systeme sind typischerweise auf die Arbeit im menschlichen Umfeld abgestimmt. So werden optische Leistungsdichten nur bis zur mittleren Leistung der Sonnenbestrahlung ( $600 \text{ W/m}^2$ ) dimensioniert. Bei den Schaltzeiten handelsüblicher LED-Module wird häufig eine Grenzfrequenz kleiner 30 Hz angewendet, weil sich die Auflösungsgrenze des menschlichen Auges für einzelne Bilder hier befindet.

Für die aktive Thermografie sind jedoch sowohl höhere Leistungsdichten zur Generation von Wärmequellen als auch schnellere Taktzeiten [7] für Lock-in-Messungen an Materialien mit geringer Dicke oder hoher Diffusivität erstrebenswert. Prinzipiell lassen sich LED-Anregungsquellen sehr schnell schalten, bis in den kHz-Bereich hinein. Damit werden beim Einsatz von Lock-in-Technologie auch Lock-in-Frequenzen bis in den kHz-Bereich realisierbar. Wenn man den Lichtkegel eines Flächenstrahlers auf einen Punkt fokussiert, wird eine Quelle mit hoher Leuchtdichte generiert (Abb. 4). Damit lässt sich für Proben mit einer lateralen Ausdehnung deutlich kleiner als die Ausdehnung eines kompletten Strahlers eine hohe Leistungsdichte für eine große Bandbreite an Emissionswellenlängen erzielen. Die Taktzeit der LED-Module der Firma Thermosensorik GmbH erreicht derzeit maximal 1 kHz. LED-basierte Anregungen können eine Alternative zu Blitzanregung und Laseranregung darstellen, außer für Oberflächen geringer Emissivität. Für letztere sind die Grenzen der optischen Leistungsdichte der begrenzende Faktor.



**Abb. 4.** LED-Array mit Einzellinsen zur Erzielung einer hohen Leistungsdichte auf einer nutzbaren Fläche von ca. 2 cm<sup>2</sup>.

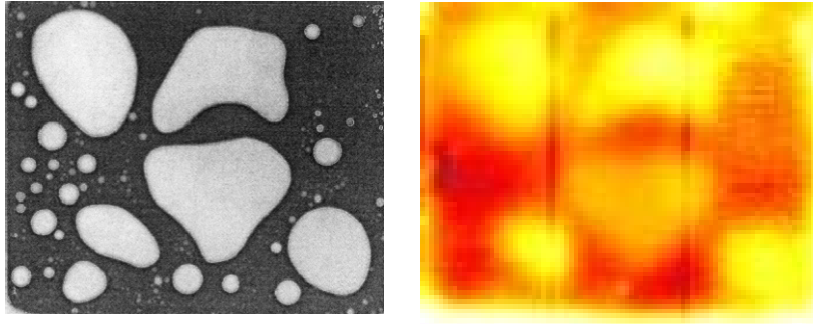
Besonders bei Prüfobjekten, die eine geringere Ausdehnung als die Bestrahlungsmodule aufweisen, kann man die geringere Leistungsdichte der emittierten Strahlung durch fokussierende Maßnahmen kompensieren. So stellt diese Methodik für die Detektion von Defekten in CFK-Bauteilen (Abb. 5) kombiniert mit Lock-in-Betrieb eine Alternative zu den etablierten Methoden dar.



**Abb. 5.** Links ein Amplitudenbild und rechts ein Phasenbild eines mit Fallkörper hergestellten Defektes in einer CFK-Struktur, der an der Oberfläche der Struktur nicht erkennbar ist.

### 3.3 Thermografie mit Laseranregung

Laseranregungsquellen sind in vielen Eigenschaften mit den LED-Quellen vergleichbar. Von den Taktzeiten wie auch den chromatischen Eigenschaften unterscheiden sich beide Systeme nur unwesentlich. Der Hauptunterschied liegt in der erzeugten Flächenleistungsdichte. Für viele Anwendungen ist das Licht von LED-Strahlern zu fokussieren, während Laserstrahlen kontrolliert homogen aufgeweitet werden müssen. Abb. 6 zeigt die Thermografieaufnahme einer Halbleiterprobe, die auf eine Wärmesenke aufgelötet ist. Während des Verbindungsprozesses wurden Stellen schlechter Haftung (Delaminationen) eingebracht. Im Gegensatz zu den beiden vorab genannten Anregungsmethoden kommt man bei ultrakurzen Pulszeiten mit Laseranregung nicht so schnell an Leistungsgrenzen, da der Wärmepuls über die eingebrachte optische Leistungsdichte prinzipiell fast beliebig hochskalierbar ist.



**Abb. 6.** Eine 5 mm x 7 mm große Halbleiterprobe wurde periodisch ( $f = 80$  Hz) mit einem Laser angeregt (500 Watt bei 920 nm) und mit einer Bildrate von 1,9 kHz aufgenommen. Links: akustische Mikroskopie der Löttschicht unter dem Halbleiter; Rechts: Phasenbild einer Lock-in-Auswertung (Oberflächenemissivität~ 10%)[4].

Oberflächen von Halbleiterbauelementen sind häufig mit Aluminium beschichtet. Diese haben einen niedrigen Absorptionskoeffizienten von knapp über 10%, was dazu führt, dass fast 90% der eingestrahnten Lichtenergie reflektiert werden. Darüber hinaus sind die Emissionskoeffizienten solcher Aluminiumoberflächen extrem niedrig (ca. 0,02 – 0,05), was extrem niedrige Infrarot-Emissionen des Bauteils bewirkt. Aufgrund der Überlagerung dieser beiden Effekte sind Defekte in solchen Bauelementen schwierig zu detektieren. In Abb. 6 wird gezeigt, dass dennoch innerhalb einer Gesamtmessdauer unter einer Sekunde für eine Inline-Prüfung ausreichende Ergebnisse erzielt werden können. Die im Thermografiebild zu erkennenden senkrechten Linien sind Artefakte der Bauelementstrukturierung. Für die Gewinnung dieser Aufnahme nach Abb. 6 war eine Lock-in-Frequenz von 80 Hz und eine Integrationszeit von 0,46 ms bei einer Bildwiederholrate von 1990 Hz verbunden mit einer optischen Leistungsdichte von ca.  $90 \text{ W/cm}^2$  für die Anregung erforderlich. Für die Anwendung der Bauelemente sind große Defekte besonders schädlich, da sich lokale Überhitzungen aufbauen, die das Bauteil zerstören. Aber auch eine Vielzahl kleiner Defekte kann summarisch zu einem Wärmestau führen, der zur Überhitzung des Bauteils führt. Systembedingt können mit der Thermografie nur die Defekte ab einem der Materialdicke entsprechenden Durchmesser visuell dargestellt und analysiert werden [1,8].

Weiterführend muss der absolute Phasenwert eines sehr gut verbundenen Referenzbauteiles (ideal) mit der Phase des vorliegenden Prüflings verglichen werden, damit man die Ankopplung des Bauteiles insgesamt bewerten kann. Damit können indirekt beide Ausfallgründe des Bauteiles ermittelt werden – einzelne große Defekte oder flächendeckend kleine Defekte. Insgesamt lassen sich Halbleiterbauelemente mit Laseranregung gut untersuchen, nur bei vielschichtigen Strukturen stößt man an Grenzen, da über den Defekten liegende Strukturen als Filter für das thermische Signal wirken und entsprechende Korrekturen bei der Auswertung vorgenommen werden müssen.

### 3.4 Thermografie mit Induktionsanregung

Die gängigen industriell gefertigten Induktionsgeräte haben Leistungen ab ca. 5 kW bis zu mehreren 100 kW. Diese Geräte verwenden typischerweise die Arbeitsfrequenz als Einstellparameter für die Anpassung des Leistungstransportes von der Signalerzeugung zur Lastspule. Die Arbeitsfrequenz als Parameter ist in der Thermografie für viele Anwendungen und für breite Frequenzbereiche nicht von primärer Bedeutung. Denn oft ist es weitgehend unbedeutend, ob man den Prüfling etwas weiter oder weniger weit in die Materialtiefe anregt – aber man kann natürlich über Mehrfrequenzverfahren zusätzliche Tiefeninformationen gewinnen. Will man mit verschiedenen Eindringtiefen experimentieren oder hat ein entsprechendes Spektrum an Prüflingen, das weitere Bemühungen

bezüglich der Leistungseinbringung erfordert, so ist eine Frequenzwahl nötig. Weit öfter ist allerdings die maximale Ein- und Ausschaltfrequenz der Quellen der begrenzende Faktor. Die meisten konventionellen Geräte optimieren die Leistungsanpassung bei jedem Einschaltvorgang, weil sie typischerweise meist im CW-Dauerbetrieb eingesetzt werden. Dies lässt sich mit Konzepten aus der HF-Technik umgehen. Nimmt man eine Signalquelle mit Verstärkung und koppelt die Lastspule über ein in der HF-Technik übliches Leistungsanpassungsgerät (Match) frequenzabhängig an die Quelle an, so kann man wenige Wellenzüge schalten. So sind steile Signalfanken zu realisieren, weil kein Stellglied erst die Anpassung prüft. Die Leistungsabgabe ist bei diesem Konzept eingeschränkt und verzichtet man auf eine Flüssigkeitskühlung, so wirkt sich nachteilig aus, dass nicht flüssigkeitsgekühlte Spulen einer nicht vernachlässigbaren Erwärmung durch ihren Innenwiderstand unterliegen. Die Abstrahlung der Induktoren kann die Eigenstrahlung des Prüflings überdecken und so die Qualität der Auswertebilder reduzieren.



**Abb. 7.** Spulenanordnung für ein Beobachtungsfeld von ca. 5 mm Durchmesser.

Für Spulengrößen bis zu ca. 10 cm Durchmesser und den Einsatz auf entsprechend leitfähigen z.B. metallischen Materialien kann man oberflächennahe Defekte so detektieren. Die geringe Detektionsschicht reduziert auch den erforderlichen Leistungsbedarf in der Anregung. Aufgrund der Erwärmung der Induktoren (Abb. 7), des Verstärkungsaufwandes und der notwendigen Leistungsbeständigkeit der Anpassung, sollte die gewünschte Leistungsausbeute auf ca. 1 kW beschränkt werden.

#### 4. Zusammenfassung

Es wurde die Notwendigkeit diskutiert, für die Wärmeflussthermografie kürzere Anregungspulse und –periodenlängen im Bereich von wenigen ms bzw. auch  $\mu$ s zu untersuchen. Für die vier Anregungstypen Blitz, LED, Laser und Induktion wurden derzeitige Entwicklungen der Thermosensorik GmbH dargestellt und die neueren Ergebnisse in diesem Bereich als Beispiele für die Erweiterung der Möglichkeiten der Wärmefluss-thermografie gezeigt. Grundsätzlich erscheinen die genannten vier Anregungstypen für die Anregung von schnellen thermischen Prozessen als geeignet. Für den Einzelfall ist jedoch immer zu prüfen, welche der Anregungsquellen man einsetzt, um auch unter industriellen Randbedingungen erfolgreich prüfen zu können.

#### Referenzen

- [1] „Infrared Thermal Imaging“, M. Vollmer, K.-P. Möllmann, Weinheim 2010
- [2] „Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie“, Hrsg. M. Sackewitz, Stuttgart 2011, S. 57-64
- [3] „Laser welding heat flux thermography“, T. Hierl, Laser Technik Journal, 3, 2011, S. 54-57
- [4] „Infrarotthermographie“ N. Schuster, V.G. Kolobrodov, Weinheim 2004, 2. Aufl.
- [5] „Lock-in Thermography“, O. Breitenstein, W. Warta, M. Langenkamp, Heidelberg 2010, 2. Aufl.
- [6] „Konstruktion, Werkstoffentwicklung und Schadensanalyse“, Hrsg. M. Pohl, Düsseldorf, 2010, S. 411-416
- [7] „Der Qualitäts-Inspektor“, D. Karg, MessTec & Automation 6/2009, S. 41-43
- [8] „Conduction of Heat in Solids“, H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, New York 1997, Reprint