

Laser-Thermografie – Von der flächigen zur strukturierten Anregung

Mathias ZIEGLER, Erik THIEL, Taarna STUEMUND
Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung (BAM),
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Kontakt E-Mail: mathias.ziegler@bam.de

Kurzfassung. Im Bereich der optisch angeregten Thermografie haben sich Blitzlampen (impulsförmig-flächige Erwärmung) und Halogenlampen (moduliert-flächige Erwärmung) für die spezifischen Regime Impuls- und Lockin-Thermografie etabliert. Mittels eines rasternden fokussierten Lasers wird die Flying-spot Laserthermografie z.B. zur Risserkennung (Dauerstrichbetrieb) und die photothermische Materialcharakterisierung (hochfrequent moduliert) implementiert. Durch die Verfügbarkeit neuer Technologien (schnelle und hochauflösende IR-Kameras, brillante innovativer Lichtquellen und performante Datenakquisitions- und Verarbeitungstechnik) wird ein Paradigmenwechsel von den getrennt voneinander stehenden photothermischen und thermografischen Techniken hin zu einer einheitlichen quantitativen Mess- und Prüftechnik ermöglicht, die schneller und präziser ist. Ähnlich wie ein LED-Array, jedoch mit einer um zwei Größenordnungen höheren Bestrahlungsstärke, steht jetzt eine neuartige brillante Laserquelle, das VCSEL-Array (vertical-cavity surface-emitting laser) zur Verfügung, welches die starke Beschränkung der zeitlichen Dynamik der etablierten Lichtquellen aufhebt und gleichzeitig spektral sauber von der Detektionswellenlänge getrennt ist. Es vereint somit das schnelle zeitliche Verhalten eines Diodenlasers mit der hohen optischen Bestrahlungsstärke und dem großen Beleuchtungsbereich von Blitzlampen. Darüber hinaus kann die Erwärmung auch strukturiert vorgenommen werden, da einzelne Bereiche des VCSEL-Arrays unabhängig voneinander angesteuert werden können. Dieser neue Freiheitsgrad ermöglicht die Entwicklung ganz neuer thermografischer ZfP-Verfahren.

1. Einleitung

Im Bereich der optisch angeregten Thermografie haben sich Blitzlampen, welche eine impulsförmige flächige Erwärmung erlauben, und Halogenlampen, mit welchen eine zeitlich modulierte flächige Erwärmung realisiert werden kann, für die Regime Impuls- und Lockin-Thermografie etabliert. Beide Regime bieten hinsichtlich der Nachweisempfindlichkeit und Prüfdauer entsprechend spezifische Vor- und Nachteile [1]. So lässt sich beispielsweise mittels der Lockin-Thermografie eine höhere Nachweisempfindlichkeit, d.h. ein höherer Signal-zu-Rausch Abstand erzielen, wenn über eine lange Messdauer korreliert wird und wenn eine genügend phasenstabile Messkette aus Funktionsgenerator, Lichtquelle und Thermografie-kamera vorliegt. Andererseits ist mittels der Impulsthermografie oft eine vergleichbare Nachweisempfindlichkeit innerhalb weniger Sekunden Messdauer möglich, wenn eine Lichtquelle mit ausreichend hoher Bestrahlungsstärke vorliegt, z.B. Blitzlampen in der Größen-



ordnung 100 Wcm^{-2} , und wenn es sich um oberflächennahe Defekte handelt [2]. Die gemeinsame Stärke der genannten Regime ist der Nachweis von parallel zur Prüfoberfläche und damit auch zur beleuchteten Oberfläche liegender Defekte und Inhomogenitäten. Der Kontrast beruht auf einem ausreichend großen Unterschied der thermischen Effusivitäten $e = \sqrt{\rho c_p k}$ (Dichte ρ , spezifische Wärmekapazität c_p , Wärmeleitfähigkeit k) zwischen Volumenmaterial und Defekt [3]. Die Bestimmung der Dicke von dünnen Schichten wird klassisch durch die photothermische Materialcharakterisierung implementiert bei der ein fokussierter Laserspot über die Probe rastert und gleichzeitig zeitlich moduliert wird. Durch eine hohe Modulationsbandbreite (cw bis kHz) lässt sich die thermische Diffusionslänge $\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} = \sqrt{\frac{k}{\rho c_p \pi f}}$ (thermische Diffusivität α , Modulationsfrequenz f) und damit die ermittelbare Schichtdicke über einen weiten Bereich (wenige μm bis einige mm) einstellen [3, 4]. Erfolgt die Detektion der modulierten Oberflächentemperatur radiometrisch, z.B. mittels einer IR-Photodiode, ergibt sich ein mit der Thermografie eng verwandtes Messverfahren. Da die Halogenlampen eine sehr viel geringere Modulationsbandbreite (cw bis wenige Hz) aufweisen, sind Dickenbestimmungen, je nach Material, nur auf vergleichsweise dicke Schichten eingeschränkt.

Wird die Oberfläche mit einem kontinuierlichen Laserspot mit runder oder linearer Spotform abgerastert, kann die lokale Temperaturerhöhung, welche aufgrund von senkrecht zur Oberfläche ausgerichteten Defekten entsteht, zum Nachweis dieser Defekte dienen. Als sogenannte Flying-spot Laserthermografie wird dieses Verfahren erfolgreich zur Risserkennung eingesetzt [5]. Der fundamentale Unterschied der lokal begrenzten Erwärmung mit einem fokussierten Laser zur (groß-) flächigen Erwärmung ist in der Symmetrie des Wärmestroms zu finden. Bei flächiger Erwärmung wird mit einem eindimensionalen Wärmestrom senkrecht von der Oberfläche ins Volumen gerechnet und bei der lokalen Erwärmung mit einem sphärischen dreidimensionalen Wärmestrom. Da Defekte bzw. Effusivitätsunterschiede nur senkrecht zum Wärmestrom wirken, ist der Nachweis z.B. von senkrecht zur Oberfläche ausgerichteten Rissen nur über die laterale Wärmestromkomponente bei lokaler Erwärmung möglich. In der Praxis ist bei hinreichend großer Höhe und Inhomogenität der Bestrahlungsstärkeverteilung jedoch immer noch ein schwacher Nachweis möglich, insbesondere dann, wenn die Risse schräg zu Oberfläche ausgerichtet sind und eine nicht vernachlässigbare Klaffung aufweisen.

Durch die Verfügbarkeit neuer Technologien, d.h. schnelle und hochauflösende Thermografiekameras, brillante Lichtquellen und performante Datenakquisitions- und Verarbeitungstechnik, erscheint ein Paradigmenwechsel von den getrennt voneinander stehenden photothermischen und thermografischen Techniken hin zu einer einheitlichen quantitativen Mess- und Prüftechnik möglich, welche schneller und präziser ist. Die neueste Generation der Thermografiekameras ermöglicht eine großflächige Detektion mit Bildwiederholraten bis in den kHz-Bereich. Ähnlich wie ein LED-Array [6], jedoch mit einer um zwei Größenordnungen höheren Bestrahlungsstärke, steht als Quelle jetzt ein neuartiger brillanter Laser, das VCSEL-Array (*vertical-cavity surface-emitting laser*) zur Verfügung, welcher die starke Beschränkung der zeitlichen Dynamik der etablierten Lichtquellen aufhebt und gleichzeitig spektral sauber von der Detektionswellenlänge getrennt ist. Es vereint somit das schnelle zeitliche Verhalten eines Diodenlasers mit der hohen Bestrahlungsstärke und dem großen Beleuchtungsbereich von Blitzlampen. Darüber hinaus kann die Erwärmung auch strukturiert vorgenommen werden, da einzelne Bereiche des VCSEL-Arrays unabhängig voneinander angesteuert werden können. Dieser neue Freiheitsgrad ermöglicht die Entwicklung ganz neuer thermografischer ZfP-Verfahren [7].

Im Folgenden wird die Charakterisierung des VCSEL-Arrays hinsichtlich der Bestrahlungsstärkeverteilung und der Modulationsbandbreite dargestellt. Zwei Anwendungsfälle sollen das Potential der neuen Technologie veranschaulichen: Die Detektion paralleler

Defekte mittels Lockin-Thermografie mit großer Modulationsbandbreite und die Detektion senkrechter Defekte mittels strukturierter Erwärmung und Formung der thermischen Wellenfelder.

2. Charakterisierung des VCSEL-Arrays

Das an der BAM zur Verfügung stehende VCSEL-Array ist eine neuartige Hochleistungsvariante von Philips Photonics, welches im Hinblick auf die effiziente Wärmebehandlung entwickelt wurden. Die Technik wurde mit dem Innovation Award Laser Technology 2016 des European Laser Institute ELI und AK Lasertechnik e.V. ausgezeichnet [8, 9]. Das VCSEL-Array setzt sich aus insgesamt zwölf einzelnen linearen Emittierzellen mit nominaler optischer Ausgangsleistung von je 200 W und einer abstrahlenden Länge von 40 mm zusammen. Die abstrahlende Apertur beträgt $40 \times 52 \text{ mm}^2$ mit einer Bestrahlungsstärke an der Apertur von ca. 100 W/cm^2 . Die Wellenlänge liegt bei $(980 \pm 10) \text{ nm}$ und die Divergenz beträgt typisch 10° (95% Leistungseinschluss). Jede Emittierzelle lässt sich individuell über eine analoge Eingangsspannung ansteuern.

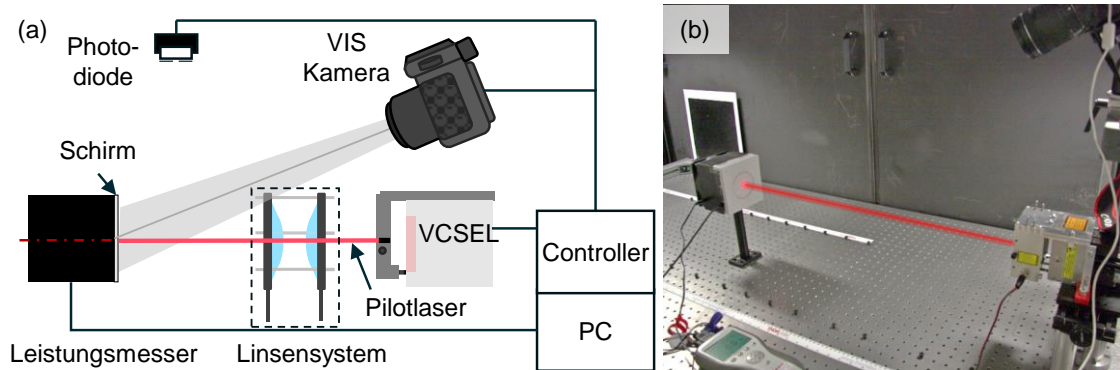


Abb. 1: (a) Schematischer Messaufbau für die Charakterisierung des VCSEL-Arrays. (b) Foto des Messaufbaus zur Bestimmung der Bestrahlungsstärkeverteilung. In dieser Konfiguration nicht enthalten sind Linsen und Photodiode. Zur Orientierung ist der rote Pilotlaser angedeutet.

2.1. Bestrahlungsstärkeverteilung

In Abb. 1 ist der prinzipielle Messaufbau für die Charakterisierung des VCSEL-Arrays dargestellt. Für die Bestimmung der Bestrahlungsstärkeverteilung in einem bestimmten Abstand wurde an Stelle der Probe ein Schirm und zur Detektion eine Fotokamera für den sichtbaren Spektralbereich verwendet. In Abb. 2 sind die Fotos der Verteilung und Mittenprofile als Grauwerte der Kamera für drei Konfigurationen dargestellt. Konfiguration 1 (siehe Abb. 2 (a, d)) entspricht der Situation, dass sich eine Probe im Fernfeld des VCSEL-Arrays befindet. Hier kommt es zu einer Überlagerung aller Einzelemitter (ca. 672.000 Stück) und die Bestrahlungsstärkeverteilung ist durch die Divergenz des Einzelemitters dominiert. Da es sich um kreisrunde Emittier handelt, entspricht die Verteilung einer rotationssymmetrischen Gaußverteilung. In einem Abstand von 0,7 m ergibt sich ein Halbwertsbreite (FWHM) von ca. 13,6 cm. Diese Konfiguration wurde für die Detektion paralleler Defekte verwendet. In Konfiguration 2 (siehe Abb. 2 (b, e)) wurde das in Abb.1 abgebildete Linsensystem ($2 \times f = 250 \text{ mm}$) für die Abbildung des VCSEL-Arrays verwendet. Hierdurch ergibt nahezu eine Tophat-Verteilung bei der die die Unterstruktur des Arrays aufgelöst werden kann. Der Abbildungsmaßstab kann über die Wahl der Abstände zwischen Array, Linse und Schirm gewählt werden und betrug in Abb. 2 (b, e) 1:1,1. In Konfiguration 3 wurde ein Maßstab 1:4 gewählt und nur die beiden äußersten Emittierzellen aktiviert, so dass ein Abstand von ca. 11

mm erzielt werden konnte, siehe Abb. 2 (c, f). Außerdem wurde die Abbildung leicht defokussiert, so dass zwei voneinander unabhängige Linienquellen auf die Probe projiziert werden konnten. Diese Konfiguration wurde für die Detektion vertikaler Defekte verwendet.

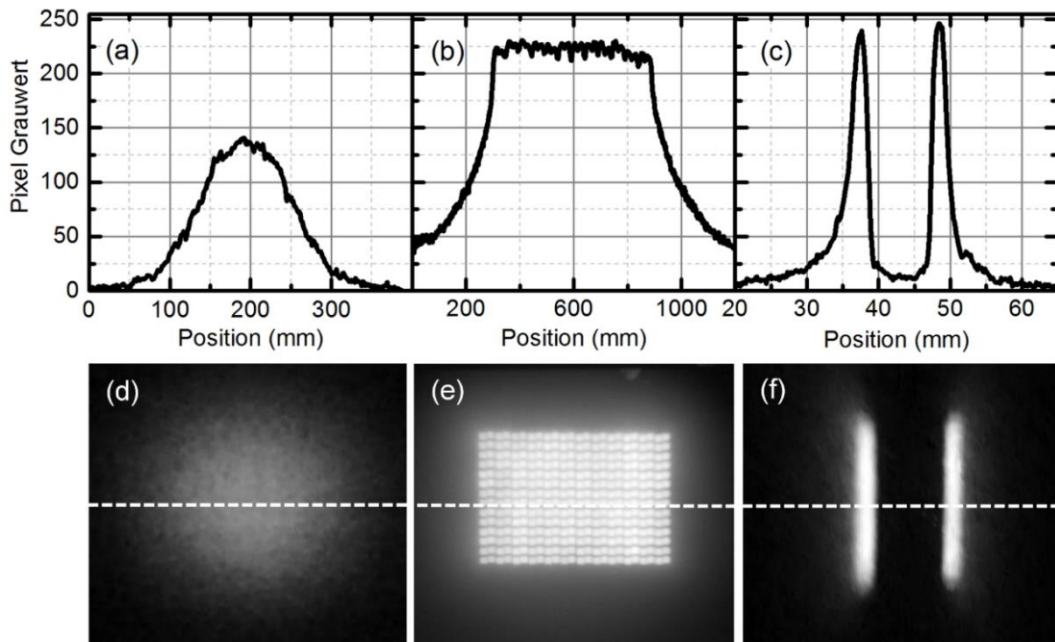


Abb. 2: (a, d) Gaußförmiges Bestrahlungsstärkeverteilung und -Profil in 0,7 m Abstand vom VCSEL Array ohne abbildende Linse. Die weiße gestrichelte Linie zeigt die Position des Profils an. (b, e) Verteilung und Profil der 1:1,1 Abbildung des VCSEL Arrays, alle Emittierer aktiviert. (c, f) wie (b, e) jedoch nur Zelle 1 & 12 aktiviert, in einem Abstand von 11 mm, und leicht defokussiert, Abbildungsmaßstab 1:4.

2.2. Strahlungsleistung und Verzögerungszeit

Für die Ermittlung der optischen Ausgangsleistung P wurde ein Leistungsmesskopf mit 65 mm Apertur direkt vor das VCSEL-Array gestellt und jede Emittierzelle einzeln vermessen. In Abb. 3 (a) ist die P-U-Kennlinie aller zwölf Emittierzellen in Abhängigkeit von der analogen Ansteuerspannung U abgebildet. Für die maximale Ansteuerspannung von 5 V konnte eine mittlere Leistung von (194 ± 1) W ermittelt werden. Die Schwellenspannung liegt zwischen 0,5 V und 0,6 V. In Konfiguration 3, hinter dem Linsensystem, Abb. 3 (b), wird aufgrund von Reflexions- und Absorptionsverlusten der Linsen, sowie der nur teilweisen Verwendung des Gesamtabstrahlkegels nur eine mittlere Leistung von (89 ± 2) W je Emittierzelle gemessen.

Für die Qualifizierung des VCSEL-Arrays als Impulslichtquelle (z.B. [10]) muss die Gesamtverzögerungszeit zwischen elektronischem Triggerimpuls und optischer Leistung auf der Probe, zusammengesetzt aus Verzögerungszeit auf den elektronischem Triggerimpuls und der Anstiegszeit, ermittelt werden. Der verwendete Messaufbau unter Verwendung der Photodiode ist in Abb. 1 dargestellt. Für einen 10 ms Trigger-Impuls konnte eine Gesamtverzögerungszeit (50%-Kriterium) von ca. 1,5 ms gemessen werden, vgl. Abb. 3(c). Diese beschränkt die minimale Trigger-Impulsbreite auf ca. 2 ms mit 85 % Maximalleistung und einer effektiven optischen Impulsbreite von ca. 0,9 ms (FWHM), siehe Abb. 3(d). Für noch kürzer Impulse werden nur noch Bruchteile der zur Verfügung stehenden optischen Ausgangsleistung erzielt. Die Energiedichten, welche vom VCSEL-Array ausgesandt werden, betragen damit ca. 1 J/cm^2 für den 10 ms Trigger-Impuls, bzw. ca. $0,09 \text{ J/cm}^2$ für den 2 ms Trigger-Impuls. Der größere der beiden Werte ist vergleichbar mit typischen Werten für 6 kJ-Blitzlampen der Blitz-Thermografie (ca. $0,6\text{-}0,7 \text{ J/cm}^2$), jedoch ist die nutzbare Fläche und damit die Gesamtenergie solch einer Blitzlampen momentan noch um einen Faktor ~ 60 höher [2].

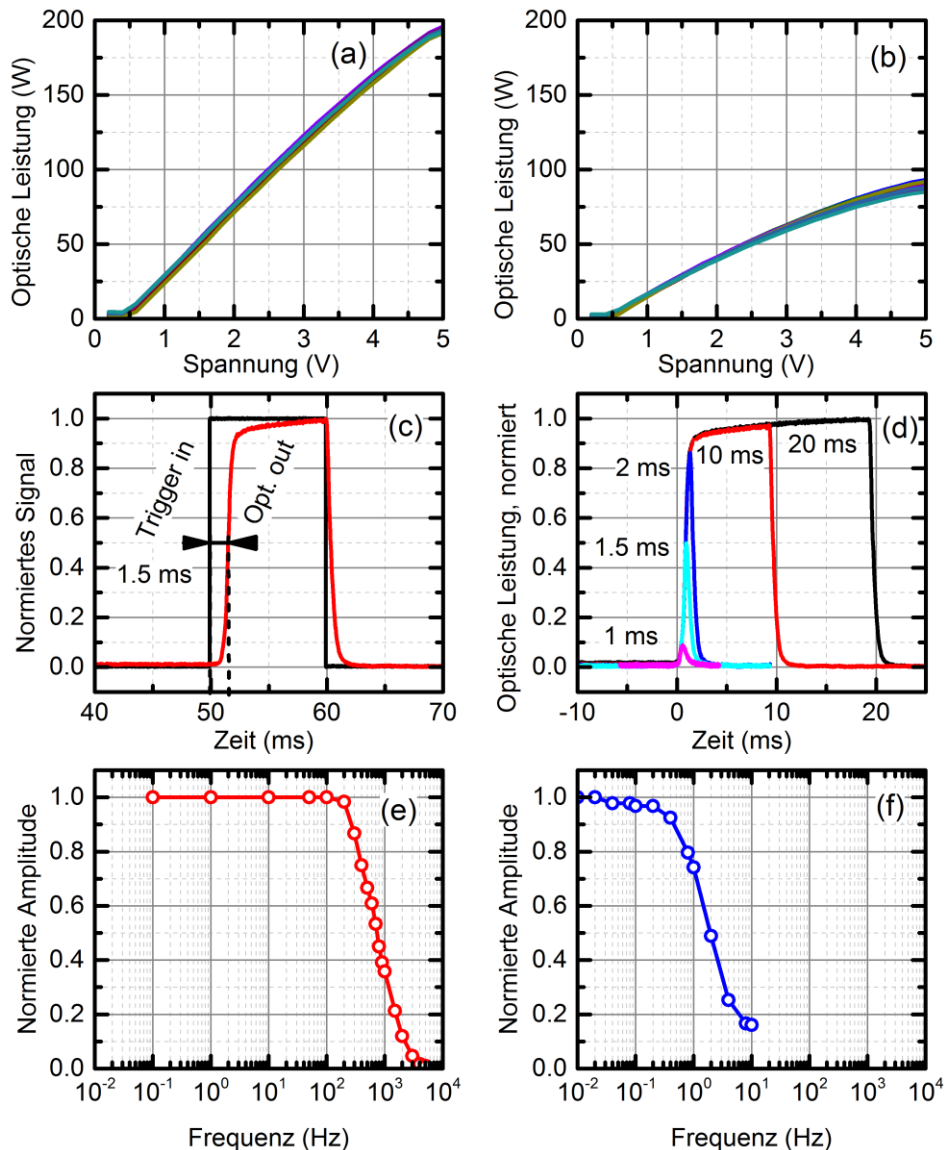


Abb. 3: (a) P-U-Kennlinien aller Emittierzellen vor der Linse (die zwölf Einzelkurven liegen fast übereinander). (b) P-U-Kennlinie aller Emittierzellen nach dem Linsensystem. (c) Gesamtverzögerungszeit zwischen einem 10 ms elektronischen Rechteck-Trigger-Impuls und optischer Leistung. (d) Gemessene optische Leistung für elektronische Rechteck-Trigger-Impulse von (1 / 1,5 / 2 / 10 / 20) ms Länge. (e) Normierte Amplitude der optischen Leistung für eine sinusförmige Ansteuerspannung in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz für das VCSEL-Array mit allen Emittierzellen und Maximalleistung. (f) wie (e) jedoch für einen 1 kW Halogenstrahler, angesteuert über einen elektronischen Dimmer.

2.3. Modulationsbandbreite

Für den Einsatz des VCSEL-Arrays als modulierte Lichtquelle in der Lockin-Thermografie muss die Modulationsbandbreite, d.h. die verfügbare Strahlungsleistung in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz, ermittelt werden. Das Ergebnis bei sinusförmiger Ansteuerung ist in Abb. 3 (e) im Vergleich zu einem 1 kW Halogenstrahler (Abb. 3 (f)), wie er typischerweise für die Lockin-Thermografie zum Einsatz kommt, abgebildet. Ermittelt wurde dieser Zusammenhang mit dem in Abb. 5 abgebildeten Messaufbau, bei dem eine Photodiode im Strahlengang die Ermittlung des Verhältnisses von Maximal-Elongation und effektiver Sinus-Amplitude der Strahlungsleistung erlaubt. Dieser Wert ist als normierte Amplitude aufgetragen. 50 % (bzw. 90 %) der Maximalleistung stehen somit für das VCSEL-Array bei einer

Frequenz von ca. 750 Hz (bzw. 270 Hz) und für den Halogenstrahler bei einer Frequenz von ca. 2 Hz (bzw. 0,5 Hz) für die Lockin-Thermografie zur Verfügung. Das heißt, die Modulationsbandbreite konnte durch den Einsatz des VCSEL-Arrays um den Faktor 300-500 gegenüber dem Halogenstrahler gesteigert werden. Darüber hinaus ist die P-U-Kennlinie in Abb. 3 (a) nahezu linear, weshalb die Ansteuerung mittels einer sinusförmigen Spannungsquelle zu einer nahezu harmonischen Bestrahlungsstärke auf der Probe führt.

3. Detektion paralleler Defekte mit flächiger Lockin-Thermografie

3.1. Probekörper und Messaufbau

Das erste prototypische Anwendungsbeispiel ist die Detektion und Charakterisierung paralleler Defekte, die in Form von Sacklochbohrungen, eingebracht von der Rückseite, in einer Stahlplatte vorliegen (siehe Abb. 4). Die Wandstärke der V2A-Stahlplatte beträgt 4,5 mm, die Restwandstärke der Bohrungen liegt im Bereich $0,2 \text{ mm} \leq d \leq 3,6 \text{ mm}$ und die Durchmesser D betragen 4 mm / 2 mm / 1 mm für die Defekte Nr. 1-8 / 9-14 / 15-22.

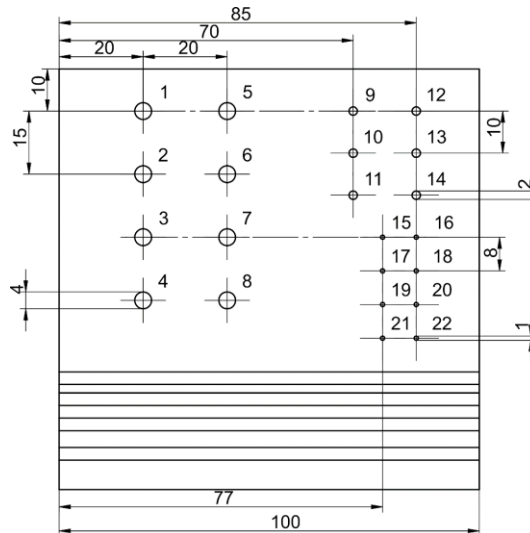


Abb. 4: Skizze des Probekörpers (Maße in mm). Die Dicke der V2A-Stahlplatte beträgt 4,50 mm. Die Sacklochbohrungen (im Text als Defekt 1 bis 22 bezeichnet) weisen folgende Restwandstärken in mm auf: 0,23 / 0,50 / 1,04 / 1,59 / 2,00 / 2,53 / 3,06 / 3,61 / 0,45 / 0,83 / 1,23 / 1,71 / 2,24 / 2,70 / 0,2 / 0,2 / 0,5 / 0,5 / 1,0 / 1,0 / 1,5 / 1,5. Die Durchmesser betragen 4 mm / 2 mm / 1 mm für die Bohrungen Nr. 1-8 / 9-14 / 15-22. Im unteren Bereich sind Kerben eingearbeitet, die jedoch durch den Probenhalter teilweise verdeckt sind und nicht untersucht wurden.

Für die Experimente wurde Lockin-Thermografie in Reflexionskonfiguration verwendet, d.h. sowohl das VCSEL-Array als auch die Thermografiekamera waren auf die unbeschichtete Probenvorderseite gerichtet, siehe Abb. 5. Es wurden insgesamt 13 Lockin-Frequenzen f (0,1 / 0,2 / 0,4 / 0,8 / 1,0 / 2,0 / 4,0 / 8,0 / 10 / 20 / 25 / 40 / 50) Hz mit einer Messdauer von jeweils 50 s - 60 s und Bildwiederholraten von (50 / 50 / 50 / 50 / 50 / 50 / 100 / 200 / 200 / 200 / 200 / 200 / 200) Hz verwendet. Als Thermografiekamera kam eine gekühlte InSb-Photonen-Kamera mit 640×512 Pixel (spektraler Empfindlichkeitsbereich 3-5 μm , Brennweite 50 mm, Temperaturmessbereich 0-60°C, Integrationszeit 640 μs) zum Einsatz. Das VCSEL-Array wurde von einem Funktionsgenerator angesteuert. Aufgrund der Laserschwelle erfolgte die Sinusmodulation zwischen 0,6 V und 5,0 V. Funktionsgenerator und Thermografiekamera wurden über einen weiteren gemeinsamen Funktionsgenerator phasenstabil korreliert. Der Abstand zwischen Probe und VCSEL-Array betrug 63 cm, der zwischen

Kamera und Probe 50 cm. Dort wurde eine Bestrahlungsstärke von ca. 19 W/cm² gemessen. Zum Schutz der Kamera vor reflektierter Laserstrahlung wurde ein dichroitischer Strahlenteiler unter einem Winkel von 20° verwendet.

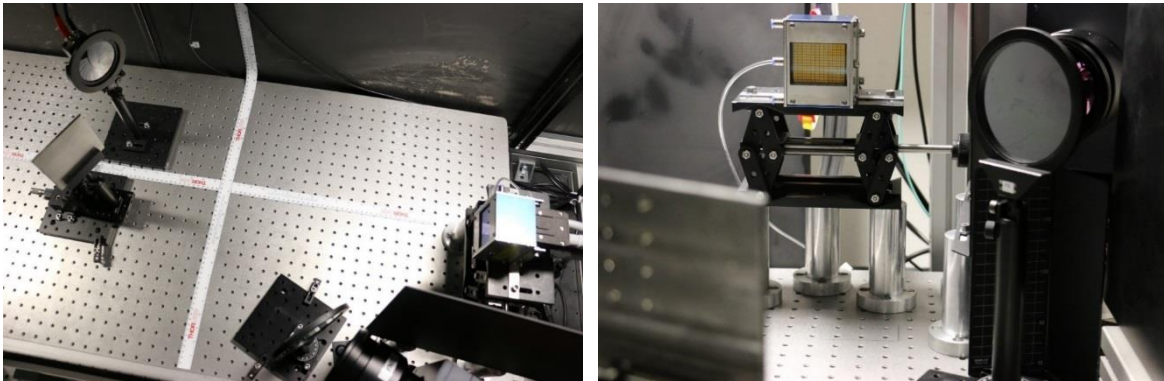


Abb. 5: (links) Foto des Messaufbaus für die Ermittlung der Modulationsbandbreite und die Detektion paralleler Defekte. Links sind die Blech-Probe und die Photodiode hinter einer Aperturblende und im rechten Teil die Thermografiekamera hinter einem verkippten dichroitischen Strahlenteiler, sowie das VCSEL-Array zu erkennen. (rechts) Foto desselben Messaufbaus, jedoch aus der Perspektive der Probe (ein Teil der Probe ist im Vordergrund zu erkennen).

3.2. Lock-in Signalverarbeitung

Mithilfe der Lockin-Thermografie können Defekte in einem Festkörper sowohl detektiert als auch charakterisiert werden. Für beide Zielstellungen ist eine Reihe von Signalverarbeitungsschritten notwendig um von der Roh-Thermogrammsequenz zu einem Parameter(satz) zu gelangen, welcher in eindeutiger Beziehung zu den Defekteigenschaften (z.B. dessen Abmessungen) steht. Folgende Signalverarbeitungsschritte wurden verwendet:

- Kompensation von statischen Einflüssen, z.B. Reflexionen an der reflektierenden Probenoberfläche: Subtraktion des ersten Bildes der Thermogrammsequenz.
- Festlegung des Zeitbereichs für die Fast-Fourier-Transformation (FFT): Hierzu wurden, je nach Lockin-Frequenz f , einige Perioden am Sequenzbeginn ausgelassen. Das Ende des Zeitbereichs ist definiert durch die Forderung nach einem ganzzahligen Vielfachen der Lockin-Periode, wodurch einige Bilder am Ende der Sequenz nicht berücksichtigt wurden.
- Extraktion des AC-Anteils: Der DC-Anteil der thermischen Welle bei modulierter Erwärmung gemäß $q(t) = \frac{a}{2} I_0 [1 + \cos(2\pi t)]$ (q Wärmestromdichte, a Absorptionsgrad der Probenoberfläche für VCSEL-Wellenlänge, I_0 Bestrahlungsstärke des VCSEL-Arrays, t Zeit) wird durch einen pixel-weisen Polynomfit (5. bis 9. Ordnung, je nach Lockin-Frequenz) ermittelt. Durch Subtraktion dieses transienten, nichtmodulierten Anteils ergibt sich der AC-Anteil der thermischen Welle.
 - Berechnung der Amplituden- und Phasenbilder: Die pixelweise FFT des AC-Anteils und anschließende Berechnung von Amplitude und Phase aus Real- und Imaginärteil führt zu Amplituden- und Phasenspektren für jeden Pixel. Für jede Lockin-Frequenz wird das Maximum des Amplitudenspektrums ermittelt, welche in allen Fällen sehr gut und mit exzellentem Signal-zu-Rausch-Abstand mit der eingestellten Lockin-Frequenz übereinstimmen. Damit ergeben sich pro Lockin-Frequenz Amplituden- $A_{i,j}(f)$ und Phasenbilder $\phi_{i,j}(f)$ für alle Pixel (i,j) .
- Korrektur der Phasenwerte: Laut Theorie [3] ist für den Fall eines homogenen, semiinfiniten Festkörpers die Phasenlage an der Probenoberfläche gleich -45° . Da im Weiteren nur Phasendifferenzen betrachtet werden, kann, ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit, die mittlere Phase des ungestörten Referenzbereichs auf diesen Wert

korrigiert werden. Der mögliche Wertebereich der Phasendifferenz, beträgt $-45^\circ \leq \Delta\phi \leq 45^\circ$, [3], d.h. zwischen thermisch dünn und dick mit positiven oder negativen thermischen Reflexionsgraden. D.h., jeder Pixel des Phasenbildes muss in den Bereich $-90^\circ \leq \phi \leq 0^\circ$ fallen, andernfalls handelt es sich um unkorrelierte Bereiche oder um Rauschen. Da die Phase bis auf 2π unbestimmt ist, werden alle Pixel mit Phasenwerten, die stärker als $\pm 90^\circ$ (dadurch wird eine finite Breite in der Verteilung der Referenzphase kompensiert) vom -45° Referenzwert abweichen, um $\pm 360^\circ$ korrigiert.

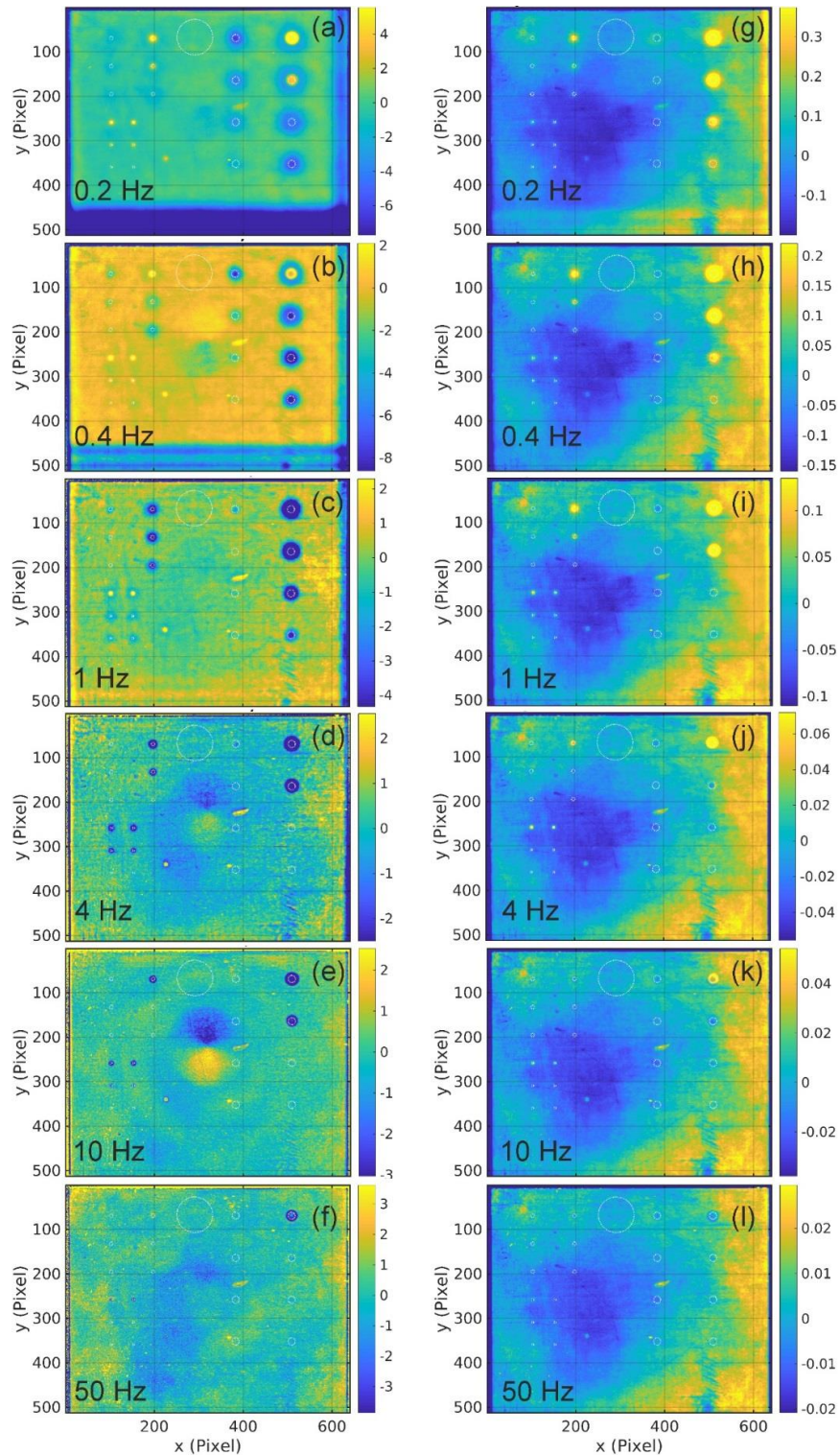


Abb. 6: (a-f) Phasendifferenzbilder für Lockin-Frequenzen zwischen 0,2 und 50 Hz. Die weißen gestrichelten Kreise markieren die Gebiete über die die Defekt- und Referenzgebietswerte gemittelt wurden. (g-l) Amplitudendifferenzbilder.

- Extraktion der Defekt-Amplituden und Phasen: Für jeden Defekt wird ein kreisrunder Bildbereich $D_{i,j}$ definiert (Durchmesser 4 / 8 / 16 Pixel für 2 mm / 4 mm / 8 mm Defektdurchmesser, siehe weiße Kreise in Abb. 6) über den Mittelwert $\bar{A}_{def}(d, f)$, $\bar{\phi}_{def}(d, f)$ und Standardabweichung $\sigma A_{def}(d, f)$, $\sigma \phi_{def}(d, f)$ berechnet werden.
- Berechnung von Amplituden- und Phasendifferenzen: Die größte Aussagekraft kann den Amplituden- und Phasenwerten relativ zum ungestörten Bereich mit voller Materialstärke beigemessen werden. Dieser Referenzbereich wird als kreisrunder Bereich (Durchmesser 80 Pixel) etwas außermittig definiert (siehe Abb. 6). Durch die Subtraktion dessen Mittelwertes $\bar{A}_{ref}(f)$, $\bar{\phi}_{ref}(f)$ ergeben sich Amplituden- bzw. Phasendifferenzen $\Delta \bar{A}_{def}(d, f)$, $\Delta \bar{\phi}_{def}(d, f)$ (siehe Abb. 7) und Differenzbilder (siehe Abb. 6).

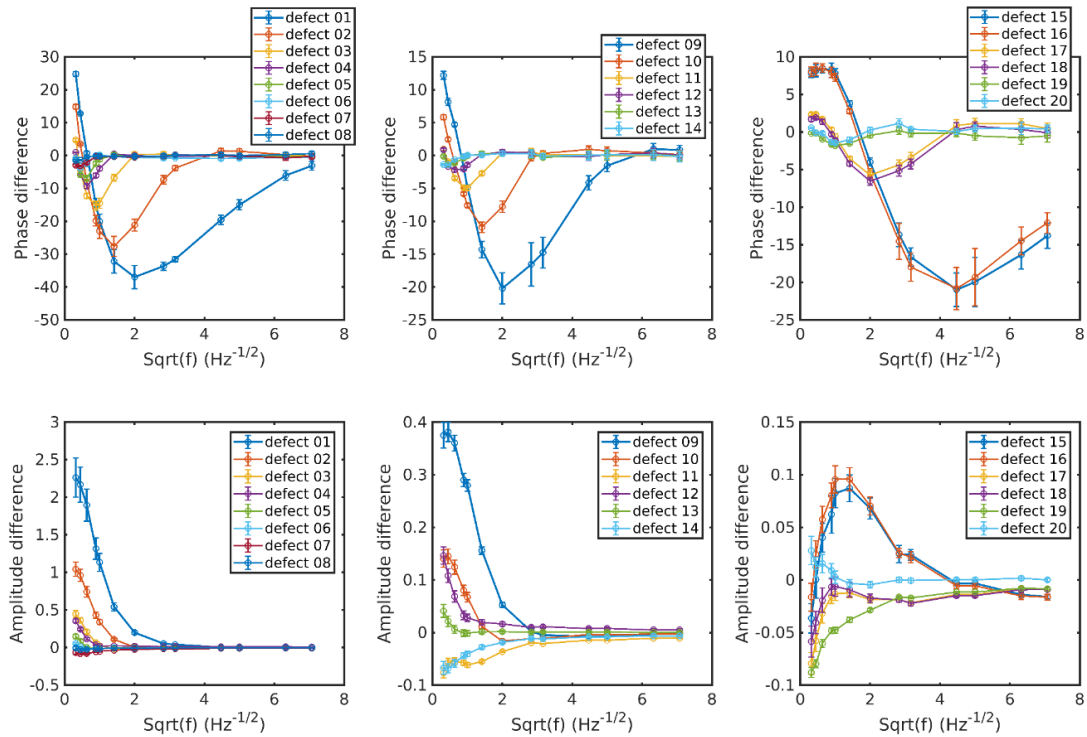


Abb. 7: (obere Reihe) Phasendifferenzen $\Delta \bar{\phi}_{def}(d, f)$ der Defekte gegen \sqrt{f} aufgetragen und unterteilt nach Defektdurchmesser D von 4 mm / 2 mm / 1 mm (von links nach rechts) dargestellt. (untere Reihe) Zugehörige Amplitudendifferenzen $\Delta \bar{A}_{def}(d, f)$.

3.3. Ergebnisse der Lockin-Thermografie

In Abb. 6 sind Phasen- und Amplitudendifferenzbilder für sechs Lockin-Frequenzen abgebildet und in Abb. 7 sind die über die Defekte gemittelten Werte $\Delta \bar{\phi}_{def}(d, f)$, $\Delta \bar{A}_{def}(d, f)$ gegen \sqrt{f} dargestellt. Am interessantesten ist die Phasendifferenz. Hier ergibt sich qualitativ exakt der theoretisch [3] vorhergesagte Verlauf. Für geringe Frequenzen ergibt sich eine positive Phasendifferenz (*phase advance*), danach erfolgt ein Nulldurchgang bei der sogenannten Blindfrequenz (d.h. kein Phasenkontrast mehr, der Defekt ist nicht detektierbar), anschließend ein größerer Frequenzbereich mit negativer Phasendifferenz (*phase lag*) und schließlich verschwindet der Phasenkontrast für hohe Frequenzen. Bezüglich der Amplitudendifferenz ist theoretisch [3] ein Anstieg ausgehend von Null bei $f = 0$ Hz bis zu einem

Maximalkontrast vorausgesagt, der zu hohen Frequenzen hin wieder abfällt, und zwar so, dass auch nach dem Abklingen des Amplitudenkontrastes ein Phasenkontrast sichtbar bleibt. Die beschriebenen Verläufe sind für die großen Defektdurchmesser (Defekte 1-14) in den Differenzbildern (Abb. 6) sehr gut zu erkennen und deutlich besser ausgeprägt als für die mit 1 mm Durchmesser (Defekte 15 - 20), da der Signal-zu-Rausch-Abstand für die kleinsten Defekte deutlich abnimmt. Die nachgewiesenen maximalen Amplitudendifferenzen für diese Defekte sind kleiner als 100 mK (siehe Abb. 7).

Aus den Verläufen der Phasendifferenz in Abb. 7 lassen sich zwei eindeutige Merkmale für die Quantisierung der Defekte ableiten, der Wert und die Position der maximalen negativen Phasendifferenz (d.h. maximaler Phasenkontrast). Diese sind in Abb.8 gegen die Defekttiefe d aufgetragen. Bezüglich des Wertes des maximalen Phasenkontrastes lässt sich feststellen, dass neben der Tiefenlage des Defektes sein Durchmesser eine entscheidende Rolle spielt. Große Durchmesser führen nahezu zum theoretischen Wert von -45° , wohingegen kleine Defekte aufgrund von Streuung zu einem geringeren Phasenkontrast führen [3]. Entscheidend ist hierbei das Verhältnis von Defektdurchmesser D zu thermischer Diffusionslänge μ , welches für die kleinen Defekte und für Frequenzen < 10 Hz, kleiner als eins ist. Eine Bestimmung der Defekttiefenlage aus dem maximalen Phasenkontrast ist somit nur zusammen mit der Größe des Defektes aus dem Differenzbild möglich. Eine gegenüber der Defektgröße robustere Größe ist die Frequenz des maximalen Phasenkontrastes (Abb. 8) [10]. Diese erlaubt nach Kalibrierung eine Bestimmung der Defekttiefe auch ohne eine Durchmesserinformation.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Einsatz des VCSEL-Arrays als Wärmequelle sowohl eine empfindliche als auch tiefenselektive Detektion von parallelen Defekten, hier in Form von Sacklochbohrungen in einem unbeschichteten Stahlblech, bis zu einem Verhältnis $\frac{D}{d} \approx 2$ erlaubt. Die Nachweisgrenze anhand des Phasenkontrastes für den Probekörper lag bei etwa -4° .

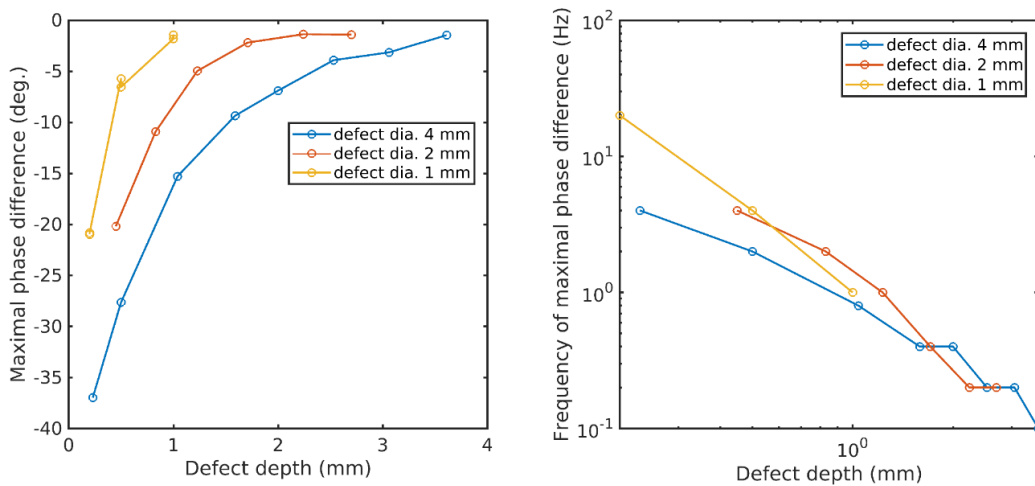


Abb. 8: (a) Wert des maximalen Phasenkontrastes aufgetragen gegen die Defekttiefe für die drei Defektdurchmesser D von 4 mm / 2 mm / 1 mm (blaue / rote / gelbe Kurve). (b) Zugehöriger Frequenz des maximalen Phasenkontrastes aufgetragen gegen die Defekttiefe.

4. Detektion vertikaler Defekte mittels strukturierter Beleuchtung

Eine weitere, völlig neue Anwendung des VCSEL-Arrays ergibt sich aus der Möglichkeit einzelne lineare Bereiche des Arrays (Emitterzellen) individuell anzusteuern, d.h. mit individueller Amplitude, Frequenz und Phase. Als zweiter Anwendungsfall wird diese Möglichkeit

zur Detektion verdeckter vertikaler Defekte ausgenutzt. Die prinzipielle Vorgehensweise ist detailliert in Ref. [7, 12] beschrieben. Im Wesentlichen beruht das Messprinzip auf der gezielten und kohärenten Superposition von thermischen Wellenfeldern und der Störung der Superposition durch den zu detektierenden Defekt. Die Form der Superposition ist in Abb. 9 dargestellt. Es handelt sich um zwei gegenphasig oszillierende, harmonische Linienwärmequellen gleicher Amplitude. Da beide Quellen phasenstarr miteinander gekoppelt - und damit kohärent - sind, interferieren beide Wellenfelder destruktiv und es bildet sich eine Ebene mit Null Amplitude mittig zwischen beiden Quellen heraus, deren Schnittlinie mit der Oberfläche wir als Null-Linie bezeichnen.

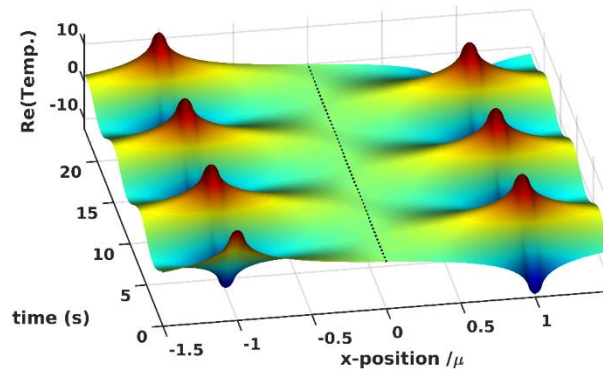


Abb. 9: Analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung für zwei gegenphasig oszillierende, harmonische Linienwärmequellen gleicher Amplitude im Abstand 2μ . Dargestellt ist der Realteil des AC-Anteils. Für diesen Fall der destruktiven Interferenz der beiden thermischen Wellenfelder ergibt sich zwischen beiden Wärmequellen eine Ebene mit Null Amplitude, dessen Schnittlinie mit der Oberfläche als gestrichelte schwarze Linie eingezeichnet ist. Die analytische Lösung ist analog zu Ref. [7, 13] erfolgt.

Wenn man einen Defekt in das Gebiet zwischen beiden Quellen einbringt - auch unterhalb der Probenoberfläche - wird diese perfekte destruktive Interferenz zerstört und die Null-Linie zeigt eine von Null verschiedene Amplitude. In Abhängigkeit von der relativen Lage des Defektes zu den beiden Quellen wird an der Stelle der Null-Linie ein charakteristischer Amplitudenverlauf gemessen. Erst wenn sich der Defekt genau unter der Null-Linie befindet, d.h. in der Symmetriesituation, wird die Amplitude wieder zu Null. Gleichzeitig kann an dieser Stelle ein Phasensprung im oszillierenden Temperaturverlauf um π detektiert werden. In Ref. [7, 12] wurde ein lasergekoppelter Mikrospiegel-Projektor erfolgreich als Lichtquelle verwendet. In diesem Artikel zeigen wir, wie sich dieses Ergebnis auf das VCSEL-Array übertragen lässt.

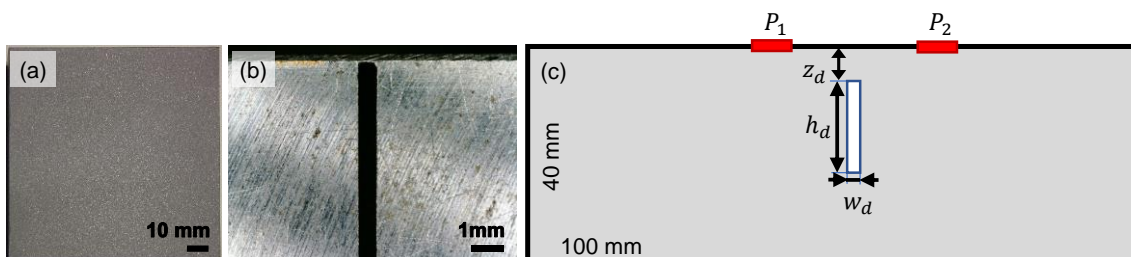


Abb. 10: (a) Foto der Probekörperoberfläche. (b) Detailfoto von der Seite mit 0,25 mm Überdeckung. (c) Schematische Skizze des Probekörpers. Die roten Rechtecke illustrieren das Bestrahlungsmuster.

4.1. Probekörper und Messaufbau

Als Probekörper wurden Stahlquader mit den Außenmaßen $100 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$ verwendet, siehe Abb. 10 [7, 12]. Als verdeckte Defekte dienen von den Seitenflächen eingebrachte, senkrecht zu Oberfläche ausgerichtete Nuten von ca. 0,5 mm Breite w_d mit unterschiedlicher Überdeckung (0,25 - 2,0 mm), d.h. Tiefe z_d . Diese Referenzfehler sollen Risse unterhalb der Oberfläche simulieren.

Tabelle 1: Thermophysikalische Materialeigenschaften des Probekörpers

Material	S235JR
Dichte ρ [g/cm ³]	7,85
Wärmeleitfähigkeit k [W/mK]	54
Wärmekapazität c_p [J/kgK]	461
Diffusivität α [m ² /s]	1,49e-5
Effusivität e [Ws ^{1/2} /(m ² K)]	1,40e4
Diffusionslänge μ [mm] @ 0,125 Hz	6,14

Die Oberfläche der Stahlquader wurde sandgestrahlt um einen homogenen Absorptions- und Emissionsgrad zu gewährleisten. Im Gegensatz zu den Proben in Ref. [7, 12] wurde keine zusätzliche schwarze Beschichtung aufgebracht, da die Bestrahlungsstärke des VCSEL-Arrays ausreichend hoch ist. Die thermophysikalischen Materialeigenschaften des Probekörpers sind in Tabelle 3 zusammengestellt

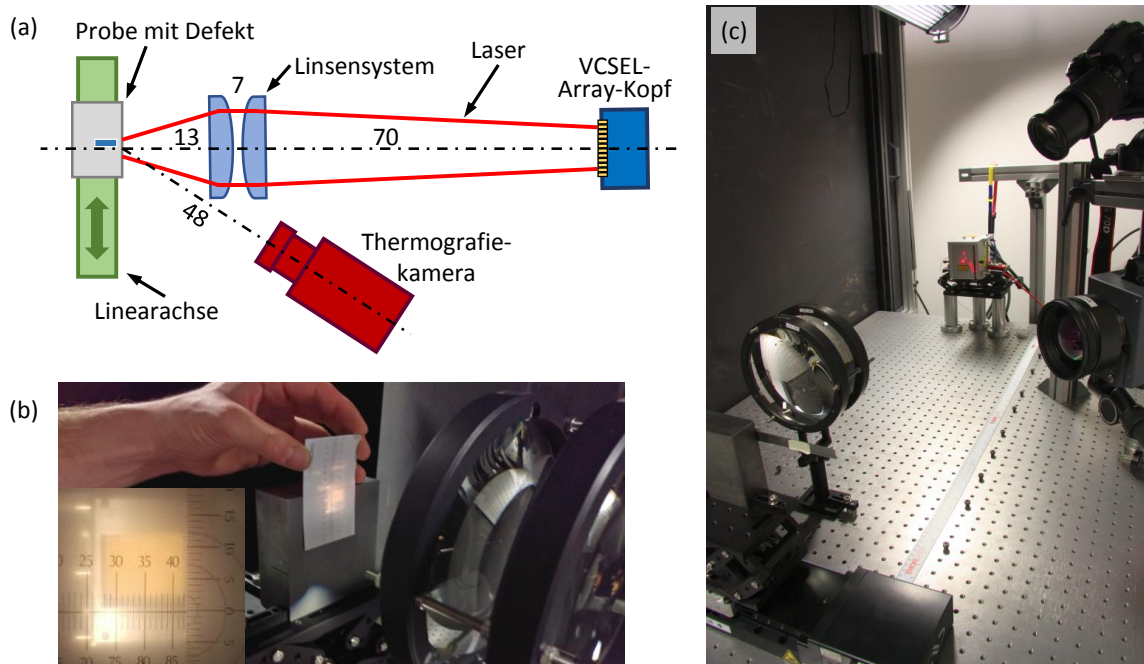


Abb. 11: (a) Schematische Darstellung des Messaufbaus. Die Abstände der Komponenten sind in cm angegeben. (b) Foto der Methode zum Einstellen des korrekten Projektionsverhältnisses. (c) Foto vom Messaufbau. Das VCSEL-Array im Hintergrund ist durch eine Positioniereinheit abgedeckt. Auf der rechten Bildseite befindet sich über der Thermografiekamera eine Fotokamera.

In Abb. 11 ist der verwendete Messaufbau dargestellt. Es wurde die in Abschnitt 2.1. beschriebene Konfiguration 3 benutzt, bei der zwei Emitterzellen des VCSEL-Arrays mittels eines Linsensystems in einem Abstand von ca. 90 cm auf die Probe projiziert wurden. Beide Emitterzellen wurden von einem Mehrkanal-Funktionsgenerator gegenphasig mit Maximalspannungen von 4 V bzw. 4,3 V und einer Modulationsfrequenz von 0,125 Hz angesteuert,

so dass die beiden Streifen in einem Abstand von ca. 11 mm eine nahezu identische maximale Leistung von jeweils 70 W aufwiesen, vgl. Abb. 2 (c,f). Der Abstand der beiden Wärmequellen von der Null-Linie entsprach damit ungefähr der Diffusionslänge μ . Als Thermografiekamera kam eine gekühlte InSb-Photonen-Kamera mit 320×240 Pixel (spektraler Empfindlichkeitsbereich 3-5 μm , Brennweite 100 mm, Temperaturmessbereich 10-100°C, Bildwiederholrate 30 Hz) zum Einsatz, die vom Funktionsgenerator getriggert wurde. Die Probe wurde so auf der Linearachse ausgerichtet, dass der untersuchte verdeckte Defekt jeweils mittig zwischen den beiden Beleuchtungsstreifen positioniert war und dann wurde diese Achsenstellung zu Null gesetzt, d.h. die - nach der Signalverarbeitung – ermittelte Defektposition sollte einen Wert von ca. 0 mm aufweisen. Danach wurde die Probe mithilfe der Linearachse schrittweise um diese Position herum ausgelenkt (*step scan*). Insgesamt wurden 41 Einzelmessungen (Messdauer 120 s) zwischen ± 8 mm durchgeführt, mit Schrittweite von 0,25 mm im Bereich ± 2 mm und von 0,5 mm außerhalb.

4.2. Signalverarbeitung und Ergebnis

Die wesentlichen Schritte der Signalverarbeitung sind zusammen mit den Ergebnissen für eine Nut mit 0,25 mm Überdeckung in Abb. 12 dargestellt:

- Ermittlung der Null-Linie: Zur Detektion der Defektposition wird mit der Thermografiekamera ein Gebiet aufgezeichnet, welches die beiden projizierten Streifenquellen und die Null-Linie umfasst, Abb. 12 (a,b). Aus der zeitlich gemittelten Thermogrammsequenz werden die Schwerpunkte der Bestrahlung und die Lage der Null-Linie ermittelt.
- Der Temperaturverlauf der Null-Linie wird räumlich gemittelt und es wird ein Polynomfit durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.2), Abb. 12 (c).
- Extraktion des AC-Anteils: Durch Subtraktion des Polynomfits ergibt sich der AC-Anteil der thermischen Welle (vgl. Abschnitt 3.2), Abb. 12 (d).
- Berechnung der Amplituden- und Phasenwerte: Für jede Scanposition der Linearachse wird eine FFT des AC-Anteils und anschließende Berechnung von Amplitude (Abb. 12 (e)) und Phase (Abb. 12 (f)) für die eingestellte Modulations-Frequenz von 0,125 Hz durchgeführt.

Für Amplitude und Phase (Abb. 12 (e,f)) ergibt sich derselbe charakteristische Verlauf wie in Ref. [7, 12], jedoch konnte dort mit dem lasergekoppelten Projektor nur eine maximale Amplitude von ca. 60 mK erzielt werden. Im Vergleich dazu konnten wir mit dem VCSEL-Array einen rund 30-fach höherer Wert von ca. 1,8 K ermitteln, obwohl die Probenoberfläche jetzt nicht mehr schwarz beschichtet wurde. Auch für den Phasenverlauf ist der Signal-zu-Rausch-Abstand um ein Vielfaches höher. Die Defektposition kann somit mit einer geringeren Unsicherheit sowohl aus dem Amplitudenminimum als auch aus dem Phasensprung ermittelt werden. Darüber hinaus ist bekannt, dass der numerische Wert der Maximalamplitude von der Defektgeometrie abhängt [7, 12] und sich somit für die Rekonstruktion dieser Geometrie eignet. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es möglich ist, das in Ref. [7, 12] entwickelte Detektionsverfahren auf das VCSEL-Array zu übertragen. Dabei ist eine Ursache für die hohe Empfindlichkeit die Tatsache, dass für den Nachweis nicht nur die axiale Komponente der Wärmeleitung, sondern in einem hohen Maße auch deren laterale Komponente verwendet wird.

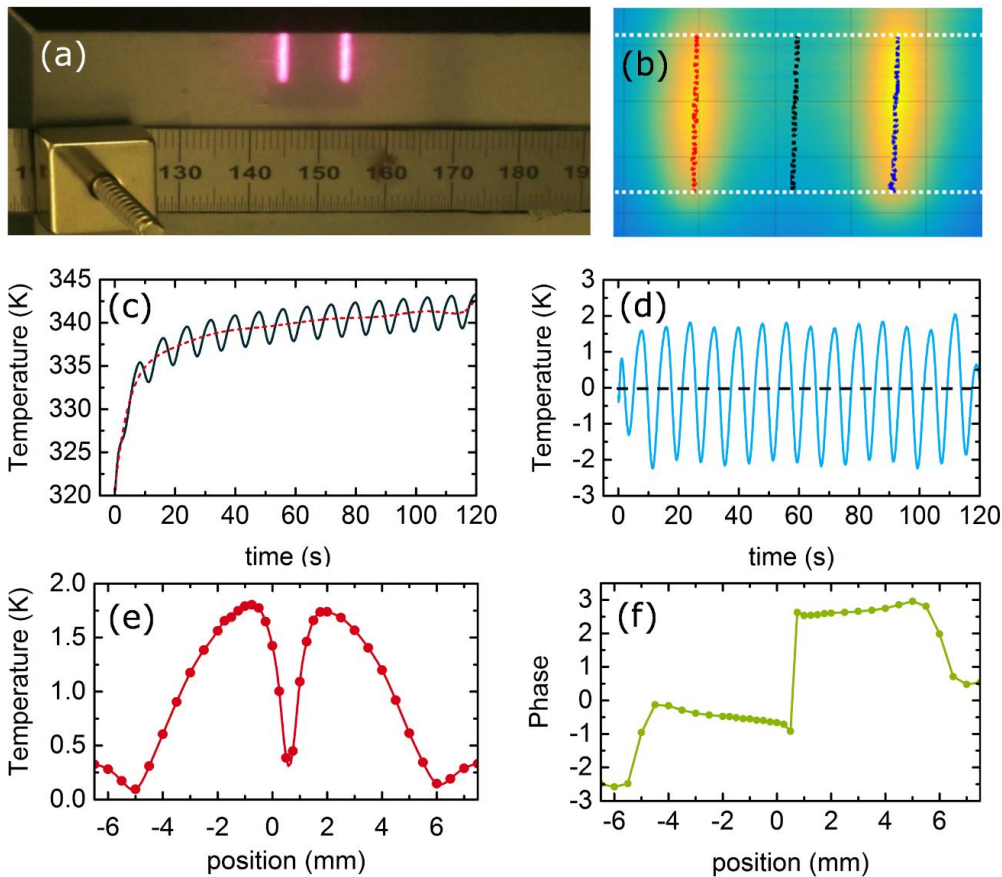


Abb. 12: (a) Foto des Probekörpers während der Beleuchtung mit zwei Emittierzellen des VCSEL-Arrays. (b) Zeitlich gemittelttes Thermogramm mit ermittelten Schwerpunkten der Bestrahlung (gestrichelte rote und blaue Linien). Die gestrichelte schwarze Linie ist der örtliche Mittelwert der beiden Bestrahlungslinien und entspricht damit der Null-Linie. (c) Örtlich gemittelter Temperaturverlauf der Null-Linie (schwarze durchgehende Linie) zusammen mit dem DC-Anteil der Erwärmung (Polynomfit 9. Ordnung, rote gestrichelte Linie) für eine Messposition ca. 1 mm vom verdeckten Defekt entfernt. (d) AC-Anteil der Null-Linie, gewonnen aus der Differenz von Temperaturverlauf und DC-Anteil in (c). (e f) Amplituden- und Phasenverlauf für alle Messpositionen, jeweils extrahiert aus dem AC-Anteil.

5. Zusammenfassung

Die optisch angeregte Thermografie ermöglicht die Detektion und Charakterisierung sowohl von vertikal als auch von parallel zur Oberfläche ausgerichteten Defekten. Die Nachweisempfindlichkeit ist maßgeblich von der Performance (u.a., NETD, Bildwiederholrate) der Thermografiekamera und der Lichtquelle (als Wärmequelle) bestimmt. Hinsichtlich der Lichtquelle sind Hochleistungslaser die bestmögliche Option, denn sie ermöglichen gleichzeitig eine hohe Bestrahlungsstärke, eine große Modulationsbandbreite, geringe Verzögerungszeiten und eine spektrale Separation vom spektralen Empfindlichkeitsbereich der Thermografiekamera. In diesem Artikel haben wir ein neuartiges Hochleistungs-VCSEL-Arrays charakterisiert und demonstriert, wie sich die beiden Defektausrichtungen hochempfindlich detektieren lassen. Wir haben dabei außerdem von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, dass sich die Erwärmung sowohl flächig als auch strukturiert realisieren lässt. Diese Untersuchungen veranschaulichen das Potential der neuen Technologie zur Standardlichtquelle in der optischen angeregten Thermografie zu werden und zeigen darüber hinaus neue thermografische Modalitäten mittels gezielter Formung kohärenter thermischer Wellenfelder auf.

Referenzen

- [1] C. Maierhofer, M. Röllig, R. Krankenhagen, P. Myrach, *Comparison of quantitative defect characterization using pulse-phase and lock-in thermography*, Applied Optics 55(34), D76, 2016.
- [2] R. Krankenhagen, C. Maierhofer, *Measurement of the radiative energy output of flash lamps by means of thermal thin probes*, Infrared Physics & Technology 67, 363, 2014.
- [3] D.P. Almond, P.M. Patel, *Photothermal Science and Techniques*, Springer-Verlag, 1996.
- [4] DIN EN 15042-2:2006, *Schichtdickenmessung und Charakterisierung von Oberflächen mittels Oberflächenwellen, Teil 2: Leitfaden zur photothermischen Schichtdickenmessung*, 2006.
- [5] M. Ziegler, P. Myrach, B. Neding, *Wärmebehandlung und zerstörungsfreie Prüfung: Oberflächenrisse mit der Laser-Thermografie finden*, HTM J. Heat Treatment Mat. 70(4), 190, 2015.
- [6] M. Ziegler, M. Lucht, C. Maierhofer, *Vorrichtung zur thermografischen Prüfung mittels Hochleistungs-LED-Quelle*, DE Patent DE 10 2012 103 975, May 07, 2012.
- [7] E. Thiel, M. Kreuzbruck, M. Ziegler, *Laser-projected photothermal thermography using thermal wave field interference for subsurface defect characterization*, Appl. Phys. Lett. 109, 123504, 2016.
- [8] Laser Technik Journal, *Philips Photonics Wins Innovation Award Laser Technology 2016*, Laser Technik Journal 13(4), 16, 2016.
- [9] A. Pruijboom et al., *Vertical-cavity surface emitting laser-diodes arrays expanding the range of high-power laser systems and applications*, Journal of Laser Applications 28, 032005, (2016).
- [10] P. Myrach, F. Jonietz, D. Meinel, H. Suwala, M. Ziegler, *Calibration of thermographic spot weld testing with X-ray computed tomography*, Quant. Infr. Therm. J. 14(1), 122, 2017.
- [11] A. Gleiter, C. Spiessberger, G. Busse, *Phase angle thermography for depth resolved defect characterization*, 35th Ann. Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval., AIP Conf. Proc. 1096, 526, 2008.
- [12] E. Thiel, M. Ziegler, *Subsurface defect localization by structured heating using laser projected photothermal thermography*, Journal of Visualized Experiments 2017(123), May 2017.
- [13] N. W. Pech-May, A. Oleaga, A. Mendioroz, A. J. Omella, R. Celorrio, A. Salazar, *Vertical cracks characterization using lock-in thermography: I infinite cracks*, Meas. Sci. Technol. 25, 115601, 2014.