

# Anwendung einer neuartigen Lockin-Thermografie Kompensationsmethode zur Eliminierung der lateralen Wärmeflüsse

Johannes RITTMANN<sup>1</sup>, Jonas HUFERT<sup>1</sup>, Marc KREUTZBRUCK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart

Kontakt E-Mail: [jonas.hufert@ikt.uni-stuttgart.de](mailto:jonas.hufert@ikt.uni-stuttgart.de)

**Kurzfassung.** In der aktiven Thermografie wird normalerweise das Antwortsignal einer thermischen Anregung mittels Thermografiekamera betrachtet und ausgewertet. Die diffusiven Eigenschaften der thermischen Welle begrenzen dabei die räumliche Auflösung und führen häufig zu einem diffusen Antwortbild. Je tiefer Defekte im Bauteil liegen, desto verschwommener erscheinen diese im Antwortsignal. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Weiterentwicklung der optisch angeregten Lockin-Thermografie durch den Einsatz einer neuartigen flexiblen Wärmequelle beschrieben. Die neuartige Wärmequelle besteht aus einer Nahinfrarot-Lichtquelle und einem Hochleistungs-DMD-Chip. Ähnlich, wie ein Videoprojektor, können durch die neuartige optische Wärmequelle mehr als 1 Million unabhängige Anregungspunkte mit einer Frequenz von bis zu 12.500 Hz gleichzeitig moduliert werden.

Die gewonnene Freiheit der Anregungsquelle wird in der hier dargestellten Lockin-Thermografie Kompensationsmethode ausgenutzt, um den induzierten lateralen Wärmefluss in einem iterativen Prozess im Prüfobjekt gezielt zu reduzieren und auf die Anregungsquelle zu übertragen. So wird zum Beispiel die lokale Anregung eines oberflächennahen Defekts mit einem Phasenversatz zur Umgebung versehen und die lokale Amplitude an der Stelle des Defekts reduziert. Ein vollständig kompensierter Prozess weist im Antwortsignal der Lockin-Thermografie-Messung ein homogenes Phasen- und Amplitudenbild auf. Bei der Kompensationsmethode steckt die gesuchte Signalinformation dann in der lokalen Phasenverschiebung und Amplitude der Anregungsquelle. Da innerhalb der Anregungsquelle kein diffusiver Prozess auftritt, ermöglicht es die Kompensationsmethode, Phasen- und Amplitudenbilder der optischen Lockin-Thermografie ohne den störenden lateralen Wärmefluss darzustellen. In den Messergebnissen stellt sich dies in einer deutlich verbesserten Kantenschärfe, Defektseparierung sowie Steigerung des Signal-Rausch-Verhältnisses dar. Die quantitativen Verbesserungen und Grenzen des Verfahrens werden an charakteristischen Prüfsituationen und 3D-Geometrien aufgezeigt.



## 1. Grundlagen zur 1D-Thermografie

Temperaturunterschiede sind die Ursache für Wärmeleitungsprozesse in Bauteilen. Liegt ein Temperaturgradient  $\nabla T$  vor, so fließt die Wärme von wärmeren Stellen zu kälteren Stellen gemäß dem Fourier'schen Gesetz Gleichung (1).

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  gibt den Zusammenhang zwischen dem Temperaturgradienten  $\nabla T$  und der von ihm erzeugten Wärmestromdichte  $\vec{q}$  an. Die Wärmeleitfähigkeit kann als Tensor zweiter Stufe richtungsabhängig sein, wie dies z. B. bei anisotropen Verbundwerkstoffen wie kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) gegeben ist. Nach [1] wurde für ein unidirektionales CFK-Laminat mit 25 Vol.% Fasergehalt eine etwa um Faktor 13 größere Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung als quer zur Faserrichtung gemessen. Für die nachfolgende Untersuchung wird die Wärmeleitfähigkeit jedoch als konstant und richtungsunabhängig angenommen.

Für den eindimensionalen Fall (Stab oder näherungsweise eine homogene große Platte ohne Defekte) können analytische Gleichungen zur Beschreibung der Ausbreitung thermischer Wellen in Festkörpern herangezogen werden. Unter diesen Annahmen konnten [2–4] aufzeigen, wie Schichtdicken oder auch Materialinhomogenitäten sich auf die Amplituden- und Phasenlage einer Lockin-Thermografie-Messung auswirken. Die mathematische Beschreibung photothermischer Effekte geht auf die grundlegenden Arbeiten von Mandelis [5, 6] sowie Almond und Patel [7] zurück. Aufbauend darauf entstand die heutige Lockin-Thermografie. Die optische Lockin-Thermografie [8, 9] ist ein Prüfverfahren in der aktiven Thermografie, bei dem eine (harmonisch) modulierte Strahlquelle genutzt wird, um die Oberflächentemperatur eines Bauteils zu erwärmen. Als Antwortsignal wird für jeden Bildpunkt der Thermografiekamera eine Lockin-Auswertung – heutzutage in der Regel durch eine pixelweise Fouriertransformation – durchgeführt. Diese verhält sich wie ein schmalbandiger Bandpassfilter, der nur Signale der Frequenz der (harmonischen) Anregung betrachtet. Die Lockin-Auswertung liefert mit der Phase und Amplitude zwei wesentliche Informationen. Im Phasenbild wird die Verzögerung zwischen Anregungs- und Messsignal dargestellt, das Amplitudenbild hingegen beschreibt die pixelweise Temperaturoszillation der thermischen Welle im Messsignal.

Neben der Lockin-Thermografie existieren eine Vielzahl an Mess- und Auswertelgorithmen für die aktive Thermografie. Hierzu zählen das Thermal Wave Imaging [10], Thermal Wave Radar [11, 12], Anregungen mittels Barker Codes [13, 14], mittels Golay Paaren [15] sowie die dreidimensionale Tomografie tiefliegender Defekte [16, 17]. Alle genannten Verfahren, inklusive der oben beschriebenen optischen Lockin-Thermografie, basieren auf der pixelweisen Auswertung der gemessenen thermischen Welle und berücksichtigen den lateralen Wärmefluss nicht in der Auswertung. Inhomogenitäten werden unweigerlich verschwommen dargestellt. Je tiefer ein Defekt liegt, desto verschwommener wird er angezeigt. Diesen Umstand versucht zum Beispiel das virtuelle Wellen Konzept (VMC) zu berücksichtigen. Das VMC stellt dabei das Bindeglied zwischen punktförmiger Wärmequelle im diffusionsfreien Raum und der mit Diffusion beaufschlagten Realität dar. Auf die ermittelten virtuellen Wellen können die für akustische Wellen geltenden Algorithmen angewandt und so dreidimensionale Rekonstruktionen erzielt werden [18]. Inzwischen wurde auch die einseitige Anwendbarkeit des Verfahrens nachgewiesen [19]. Der durch die Reflexionsanordnung auftretende Informationsverlust muss dabei durch zusätzliche Abschätzungen der Randbedingungen für den mathematisch komplexen Regularisierungsprozess kompensiert werden. Die Lösung des schlecht gestellten

inversen Problems im virtuellen Wellenkonzept ist eine mathematisch anspruchsvolle Fragestellung, die bisher nur für einfache Geometrien mit gut definierten Randbedingungen gelöst werden konnte.

## **2. Strukturierte Beleuchtung**

Eine andere Möglichkeit den lateralen Wärmefluss zu berücksichtigen stellt die strukturierte Beleuchtung dar. Schon 1983 wurden erste Ideen zur räumlich strukturierten Beleuchtung und Interferenz thermischer Wellen umgesetzt. Ein Laserstrahl wurde in zwei kohärente Laserstrahlen aufgeteilt und die Interferenz beider Laserstrahlen in einem Bauteil ausgenutzt, um Tiefeninformationen eines Defekts in metallischen Strukturen zu erlangen [20]. In [21] wurde die asymmetrische Erwärmung der Bauteiloberfläche an einem bewegten Laserpunkt (flying laser spot) analysiert. Oberflächennahe Defekte und Risse konnten dadurch mit hoher örtlicher Auflösung erfasst werden.

In [22, 23] wurde ein LCD-Präsentationsprojektor als optische Wärmequelle eingesetzt, um eine pixelweise strukturierte Erwärmung für die aktive Thermografie umzusetzen. Durch den geringen Anteil an Wärmestrahlung, konnte die Prüffläche nur um wenige Millikelvin erwärmt werden. In einem iterativen Prozess wurde für eine Lockin-Messung die sich pixelweise eingestellte Phasendifferenz, Amplitudendifferenz und mittlere Temperaturabweichung kompensiert, um bei einer definierten Anregungsfrequenz der Lockin-Messung ein homogenes Messergebnis hinsichtlich der ausgeprägten Phase und Amplitude zu erhalten. Trotz vielversprechender Ergebnisse divergierte die Phase nach wenigen Iterationen. Es wurde vermutet, dass dies mit der geringen Anregungsleistung zusammenhängt.

In [24, 25] wurde ein Digital Micromirror Device (DMD)-Chip mit Nahinfrarot-Laser kombiniert, um eine strukturierte Lichtquelle höherer Leistung (20 W Eingangsleistung, 4,4 W optische Ausgangsleistung) zu erzielen. In der Mittellinie zweier paralleler und zeitlich um  $180^\circ$  phasenverschobener Linien gleicher Frequenz konnte durch destruktive Interferenz das thermische Wechselfeld vollständig ausgelöscht werden. Bei Betrachtung der Mittellinie konnten Störungen eines homogenen Werkstoffs (auch verdeckte vertikale Risse) eindrucksvoll aufgefunden werden. In [26] wurde ein DMD-Chip und ein 30 W Nahinfrarot-Laser eingesetzt, um vertikale Defekte mittels strukturierter Anregung gezielt sichtbar zu machen. Die gleichzeitige Projektion zweier thermischer Muster unterschiedlicher Modulationsfrequenz (Lockin-Anregung mit 2 Hz bzw. 2,2 Hz) konnte aus dem Thermogramm spektral gefiltert werden.

Die hier nachfolgend dargestellte Idee der Kompensationsmethode erweitert die Untersuchungen von Holtmann [23] mit dem Fokus einer realen Anwendung für die optische Lockin-Thermografie durch eine Wärmequelle ausreichender Leistung.

## **3. Grundlagen der Kompensationsmethode**

Laterale Wärmeflüsse treten unweigerlich nach einer lokalen Temperaturänderung auf. Die lokale Temperaturänderung kann zum Beispiel durch inhomogene Erwärmung oder durch inhomogene Wärmeleitungseffekte verursacht werden. Die optisch angeregte Lockin-Thermografie misst die lokale Phasenverschiebung sowie die lokale Amplitude eines Messpunkts bezogen auf das Anregungssignal. Bei Inhomogenitäten verändert sich das Messsignal, wobei die lokale Amplitude oberhalb der Inhomogenitäten geringerer Wärmekapazität (zum Beispiel ein Lufteinschluss) größer wird. Über das Verhalten der

Phasenverschiebung kann keine triviale Aussage getroffen werden. Diese verhält sich je nach Defektgeometrie, Wärmeübergangskoeffizient, Tiefenlage und Prüffrequenz unterschiedlich und kann auch innerhalb einer konstanten Tiefenlage variieren. Beeinflusst wird die Phasenlage stark vom lateralen Wärmefluss. Die Kompensationsmethode zielt darauf ab, den lateralen Wärmefluss im Prüfkörper durch die Anpassung der lokalen Anregung gezielt zu reduzieren. Die (lokale) sinusförmige Anregung  $I(x,y,t)$ , Gleichung (2), wird dazu in drei voneinander abhängige Anregungs- und Messparameter unterteilt.

$$I(x, y, t) = \frac{I_{max}}{2} * Off(x, y) + \frac{I_{max}}{2} * Amp(x, y) * \sin(\omega t + \frac{2\pi}{360} Phi(x, y)) \quad (2)$$

$I_{max}$  beschreibt die maximale Anregungsintensität der Beleuchtungsquelle/Prüfsituation,  $Phi(x,y)$  steht für die lokale Phasenverschiebung des Anregungs- (An) und Messsignals (Erg),  $Amp(x,y)$  gibt die lokale Amplitude des Anregungs- und Messsignals wieder und  $Off(x,y)$  bildet den lokalen Gleicherwärmungsanteil der Anregung beziehungsweise die lokale mittlere Temperaturerhöhung im Prüfkörper durch die Anregung ab.

In der Kompensationsmethode soll durch eine gezielte lokale Anpassung der drei Parameter der laterale Wärmefluss im Prüfkörper nach einer Anregung minimiert werden. Um dies zu erreichen, sollen die Einflüsse der Inhomogenität des Prüfkörpers auf die virtuelle Ebene der Anregung projiziert werden. Die gezielte lokale Anpassung der Anregungsparameter beinhaltet dann bei einem homogenen Antwortsignal ( $Phi_{Erg}$ ,  $Amp_{Erg}$  und  $Off_{Erg}$ ) die gesuchten Defektinformationen. Zu beachten gilt es, dass eine perfekte Kompensation an inhomogenen Strukturen nur durch die triviale Lösung  $Amp_{An} = Off_{An} = 0$  möglich ist. Im inhomogenen Fall tritt unweigerlich durch eine inhomogene Anregung ein lokaler Temperaturgradient auf, der wiederum einen lateralen Wärmefluss induziert.

In einem iterativen Prozess soll innerhalb der Kompensationsmethode dieser lokale Temperaturgradient durch Anpassung der lokalen Anregungsparameter  $Phi_{An}$ ,  $Amp_{An}$  und  $Off_{An}$  reduziert werden. Da unweigerlich durch eine inhomogene Anregung laterale Wärmeflüsse induziert werden, werden nicht die zeitlich auftretenden lokalen Temperaturgradienten minimiert, sondern die Messparameter  $Phi_{Erg}$ ,  $Amp_{Erg}$  und  $Off_{Erg}$  homogenisiert. Je homogener diese drei Messparameter der Lockin-Messung sind, desto geringer sind die über die Messperioden gemittelten lokalen Temperaturgradienten und damit auch die lateralen Wärmeflüsse. Der durch  $Off_{An}$  verursachte Gleicherwärmungsanteil wird linear kompensiert. Das sich einstellende Temperaturfeld  $T(x,y,t)$  an der Oberfläche des Prüfkörpers wird mittels diskreter Fouriertransformation ausgewertet. Daraus werden die lokalen Messparameter  $Phi_{Erg}$  und  $Amp_{Erg}$  gebildet.  $Off_{Erg}$  wird aus dem zeitlichen Mittelwert der letzten linear kompensierten Messperiode ermittelt.

#### 4. Ablauf der Kompensationsmethode

Für die erste Iteration der Kompensationsmethode wird eine klassische optische Lockin-Thermografie-Prüfung durchgeführt.  $Phi_{An}$  wird zu 0 angenommen,  $Amp_{An}$  und  $Off_{An}$  werden zu einem für die Prüfsituation passenden Betrag ausgewählt. Dieser sollte ausreichend groß sein, um einen thermischen Kontrast zum Bauteil zu erzielen (vgl. perfekte Kompensation bei  $Amp_{An} = Off_{An} = 0$ ) und nicht zu groß sein, sodass sich das Bauteil zu sehr erwärmt und der konvektive sowie strahlungsbedingte Anteil der Wärmeübertragung dominiert. Als Ergebnis der Lockin-Thermografie-Prüfung resultieren nun die Werte  $Phi_{Erg}$ ,  $Amp_{Erg}$  sowie  $Off_{Erg}$  für Iteration 0. Basierend auf den Ergebnissen werden die lokalen Anregungsparameter für die nachfolgende Iteration bestimmt. Die Anregungsphase  $Phi_{An, i+1}$

wird trivial korrigiert. Die jeweilige Differenz zwischen vorheriger Anregung und vorherigem Ergebnis wird für die darauffolgende Iteration berücksichtigt. Für die Amplitude und den Offset wird die nachfolgende Anregungsamplitude sowie der Anregungsoffset um den Faktor verringert, den die lokale Amplitude / Offset größer ist, als die kleinste Amplitude / Offset im Ergebnis. Durch diesen Vorgang werden mit jeder fortlaufenden Iteration die Amplitude sowie der Offset kleiner. Der Grenzwert der Optimierungsschleife konvergiert somit gegen die triviale Lösung  $Amp_{An, \infty} = Off_{An, \infty} = 0$ .  $Phi_{An, \infty}$  wird dabei unbestimmt.  $Phi_{An, i+1}$  und  $Amp_{An, i+1}$  werden somit wie von Holtmann in [23] beschrieben iteriert und sind in Gleichung (3) und (4) angegeben. Für den Anregungsoffset  $Off_{An, i+1}$  wird eine abweichende Iteration verwendet. Da der Offset immer größer als die Amplitude sein muss, wird der lokale Anregungsoffset als Maximalwert des ermittelten Anregungsoffsets und der Anregungsamplitude gebildet, siehe Gleichung (5) und (6). Durch diese Beschreibung traten keine Konvergenzprobleme in den Untersuchungen auf.

$$Phi_{An, i+1} = Phi_{An, i} - Phi_{Erg, i} \quad (3)$$

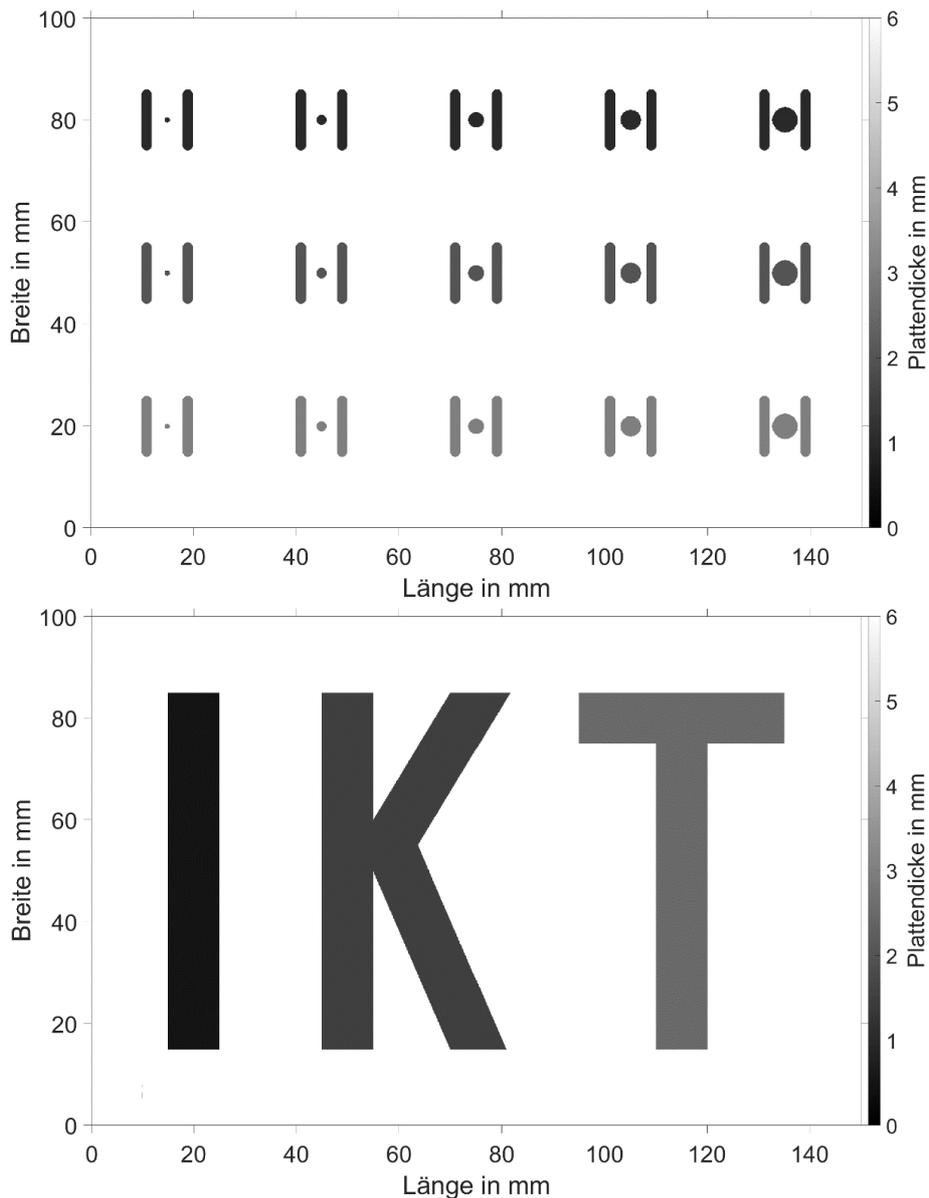
$$Amp_{An, i+1} = Amp_{An, i} * \frac{\min(Amp_{Erg, i})}{Amp_{Erg, i}} \quad (4)$$

$$Off_{An, i+1} = Off_{An, i} * \frac{\min(Off_{Erg, i})}{Off_{Erg, i}} \quad (5)$$

$$Off_{An, i+1} = \max(Amp_{An, i+1}, Off_{An, i+1}) \quad (6)$$

## 5. Durchführung der Kompensationsmethode

Die Kompensationsmethode wird mittels der Finite Element Software COMSOL Multiphysics, COMSOL AB, Stockholm, Schweden, umgesetzt. Hierzu wird ein Prüfkörper der Größe 150 mm × 100 mm × 6 mm, einer Dichte von 1.620 kg/m<sup>3</sup>, einer konstanten Wärmekapazität von 892 J/(kg K) und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,6 W/(m K) erstellt und mit unterschiedlichen inneren Geometrien versehen. Die Tiefeninformationen der inneren Geometrien sind in Bild 1 dargestellt. In den Prüfkörper (Bild 1 oben) sind 12 mm lange und 2 mm breite Nuten mit einem Abstand von 6 mm eingebracht. Die Restwanddicke der Nuten von oben nach unten beträgt 1 mm, 2 mm und 3 mm. Symmetrisch dazwischen wurden Flachbodenbohrungen von 1 mm bis 5 mm Durchmesser eingebracht. In den Prüfkörper, abgebildet in Bild 1 unten, wurden die Buchstaben I, K und T mit den Restwanddicken 0,5 mm, 1,5 mm und 2,5 mm eingebracht. Die Stege der Buchstaben haben eine Breite von 10 mm.

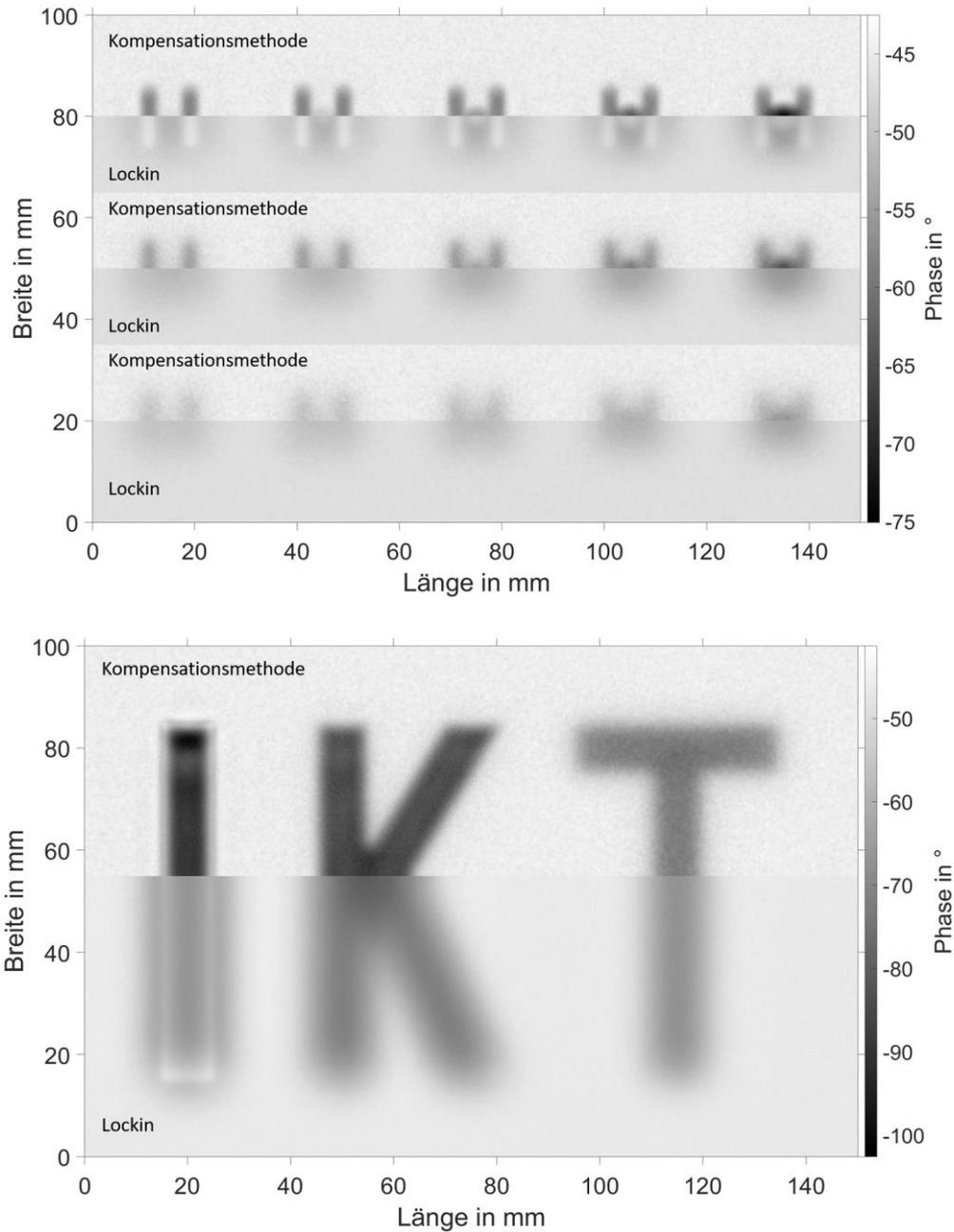


**Bild 1:** Darstellung der inneren Geometrien, oben: Nutgeometrie mit dazwischenliegenden Flachbodenbohrungen und Restwanddicken 1 mm, 2 mm und 3 mm, unten: IKT-Schriftzug mit Restwanddicken 0,5 mm, 1,5 mm und 2,5 mm

Die Erwärmung erfolgt vollflächig auf der homogenen Prüfkörperoberfläche und wird nach Gleichung (1) mit einer lokal veränderlichen sinusförmigen Wärmequelle angeregt. Die maximale Intensität  $I_0$  der Beleuchtungsquelle wird zu  $800 \text{ W/m}^2$  definiert. Bezogen auf die Bauteilfläche entspricht dies einer maximalen Leistung von  $12 \text{ W}$ . Die Einschlüsse sowie die Rückwand werden als thermischer Isolator angesehen und die seitlichen Flächen werden als symmetrische Randbedingung beschrieben. Auf der Oberseite des Prüfkörpers wird ein konvektiver Wärmefluss mit  $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  angenommen. Das Netz wird mit einem freien Tetraedernetz der Größe  $1 \text{ mm}$  (Netzverfeinerung an dünnen Strukturen bis zu  $0,33 \text{ mm}$ ) und quadratischen Serendipity Elementen gebildet. Simuliert wird bei einer Anregungsfrequenz von  $0,01 \text{ Hz}$  und einer relativen Genauigkeit von  $10^{-8}$  für zwei Perioden. Pro Periode werden dabei  $20$  Zeitschritte exportiert.

Die weiter oben beschriebene Auswertung erfolgt ausschließlich an der zweiten Periode. Das resultierende Temperaturfeld wird vor der Auswertung mit einem

gleichverteilten  $20 \text{ mK}_{pp}$  Temperaturnrauschen überlagert. Für den vorliegenden Fall wird die Kompensationsmethode in zehn Iterationen durchgeführt und die Ergebnisse der ersten Iteration (klassische Lockin-Thermografie) mit der Anregung der zehnten Iteration (Ergebnis der Kompensationsmethode) verglichen. Dies ist für die beiden Geometrien in Bild 2 dargestellt. Das Messergebnis wurde in Bereiche für die Lockin-Thermografie und Bereiche für die Kompensationsmethode unterteilt. Diese sind im nachfolgenden Bild gekennzeichnet.

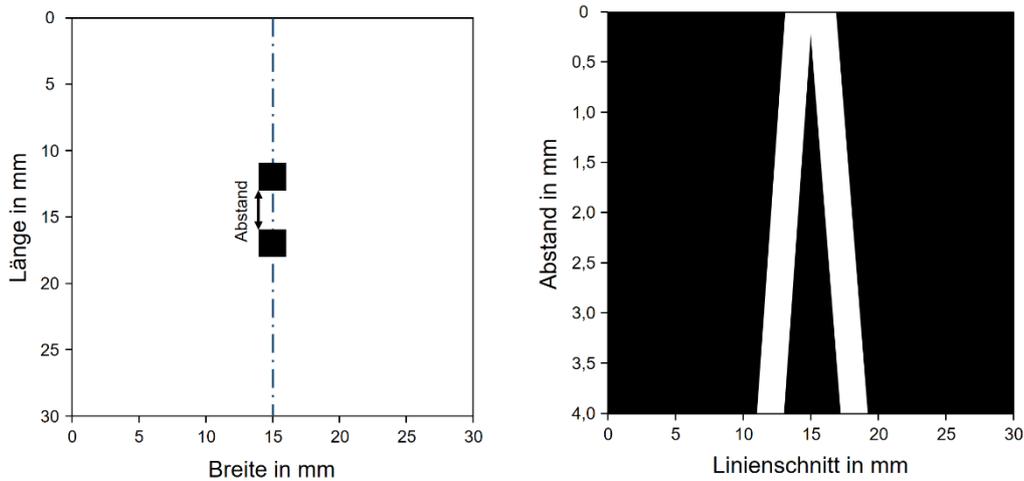


**Bild 2:** Ergebnisse der Lockin-Thermografie und der Kompensationsmethode (10. Iteration) für die in Bild 1 dargestellten Geometrien.  
 Oben: Nutzgeometrie mit Flachbodenbohrungen, unten: IKT-Schriftzug

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Abbildungsschärfe durch die Kompensationsmethode zunimmt. Defekte werden klarer voneinander abgetrennt und auch eine Separierung

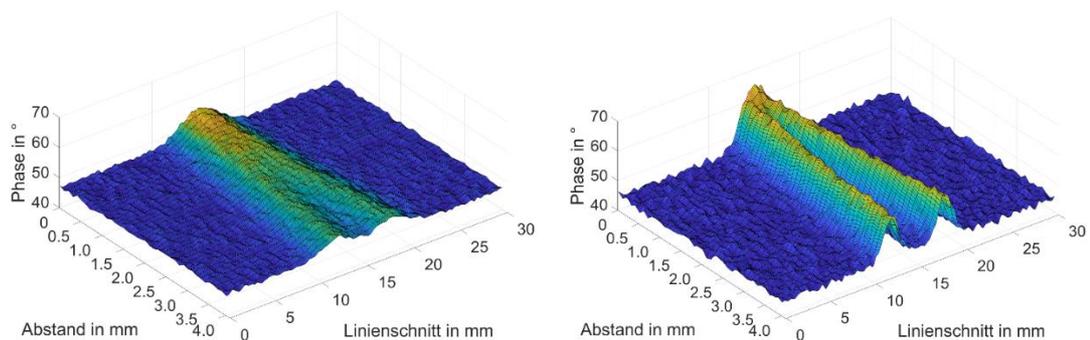
unterschiedlicher Tiefenstrukturen (IKT-Schriftzug, unterschiedliche Phasenwerte) kann gezielter vorgenommen werden.

Zur Untersuchung der Separierbarkeit eng aneinander liegender Defekte wurden zwei Quadrate der Kantenlänge 2 mm in 1 mm Tiefe bei unterschiedlichen Positionierungsabständen zueinander mittels der Kompensationsmethode betrachtet. Die Abstände zwischen den beiden Quadraten wurden in 0,1 mm Schritten von 0 mm bis zu einem Abstand von 4 mm erhöht, siehe Bild 3, rechts. Nachfolgend werden die Phasenverläufe an der aufgezeichneten Schnittlinie durch die beiden Quadrate über dem Abstand betrachtet, siehe Bild 3, links. Deutlich ist in Bild 4 zu erkennen, dass durch die Kompensationsmethode eng aneinander liegende Defekte sehr gut voneinander getrennt werden können. Bereits ab einem Kantenabstand von 0,4 mm wird in der Kompensationsmethode ein reduzierter Phasenwert zwischen den beiden Quadraten erkannt.



**Bild 3:** Geometrien der Abstandsuntersuchung, links: Geometrie der Quadrate bei 4 mm Abstand, rechts: Linienschnitte durch Symmetrieebene bei unterschiedlichen Abständen

Bei der klassischen Lockin-Thermografie tritt die Phasenabsenkung hingegen erst ab einem Kantenabstand von 1,9 mm ein. Als weiterer Nebeneffekt ist zu erkennen, dass die Nutzsignale am Defekt (Quadrat in Bild 4 bzw. Tiefenstruktur in Bild 2) einen höheren Kontrast zum Rauschsignal bilden. Nachteilig ist zu nennen, dass durch die Kompensationsmethode ein erhöhtes Rauschen in homogene Bereiche eingebracht wird.



**Bild 4:** Linienschnitt der Phasenwerte bei unterschiedlichen Kantenabständen der Quadrate. Links: Lockin-Thermografie, rechts: Kompensationsmethode

## 6. Fazit und Ausblick

Die vorgestellte Kompensationsmethode reduziert zuverlässig die lateralen Wärme-flüsse einer Lockin-Thermografie-Messung und überträgt sie auf die Anregungsquelle. Defektgeometrien erscheinen im neuen Antwortsignal (der Phasenanregung der Beleuchtungsquelle) schärfer und lassen sich gezielter von eng angrenzenden Defekten separieren. In einer Tiefe von 1 mm konnten durch die Kompensationsmethode der gerade noch trennbare Abstand von zwei Quadraten (Kantenlänge 2 mm) von 1,9 mm (klassische Lockin-Thermografie) auf 0,4 mm reduziert werden. Durch die optimierten Iterationsgleichungen konnte die Kompensationsmethode ohne Konvergenzprobleme oder sonstige Einschränkungen durchgeführt werden. Der Grund für das erhöhte Rauschen an homogenen Strukturen wird in der Simulation vermutet, soll aber durch Validierungsmessungen bestätigt werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts ist es zukünftig angedacht, die Anregungsquelle nachzubauen und die vielversprechenden Simulationsergebnisse durch Experimente zu validieren.

## 7. Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG) geförderten Forschungsprojekts 470535306.



## Referenzen

- [1] INCROPERA, F.P., D.P. DEWITT, T.L. BERGMAN UND A.S. LAVINE. Fundamentals of heat and mass transfer. 2007. ISBN 9780471457282.
- [2] KARPEN, W. Berührungslose und zerstörungsfreie Prüfung von Kunststofflackierungen mit thermischen Wellen. Dissertation. Stuttgart, 1993.
- [3] SPIEBBERGER, C. Merkmalsanalyse mit thermischen Wellen in der zerstörungsfreien Werkstoff- und Bauteilprüfung. Dissertation, 2012. Doi:10.18419/opus-1992
- [4] BENNETT, C.A. UND R.R. PATTY. Thermal wave interferometry: a potential application of the photoacoustic effect. In: Applied optics, 1982, 21(1), 49–54. Doi:10.1364/AO.21.000049
- [5] MANDELIS, A. Photoacoustic and thermal wave phenomena in semiconductors. New York: North-Holland, 1987. ISBN 0444012265.
- [6] MANDELIS, A. Diffusion-Wave Fields. Mathematical Methods and Green Functions. New York, NY: Springer New York, 2001. ISBN 9781475735482.
- [7] ALMOND, D. und P. PATEL. Photothermal science and techniques. London: Chapman & Hall, 1996. Physics and its applications. 10. ISBN 0412578808.
- [8] BREITENSTEIN, O., W. WARTA und M.C. SCHUBERT. Lock-In Thermography. Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials. 3rd ed. Cham: Springer, 2019. Springer Series in Advanced Microelectronics Ser. v. 10. ISBN 978-3-319-99825-1.
- [9] WU, D. Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung. Dissertation. Stuttgart, 1996.
- [10] MULAVEESALA, R. und S. TULI. Theory of frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive subsurface defect detection. In: Applied Physics Letters, 2006, 89(19), 191913. Doi:10.1063/1.2382738
- [11] TABATABAEI, N. und A. MANDELIS. Thermal-wave radar: a novel subsurface imaging modality with extended depth-resolution dynamic range. In: The Review of scientific instruments, 2009, 80(3), 34902. Doi:10.1063/1.3095560
- [12] TABATABAEI, N. und A. MANDELIS. Thermal-wave radar. In: Journal of Physics: Conference Series, 2010, 214, 12088. Doi:10.1088/1742-6596/214/1/012088

- [13] GHALI, V.S., S.S.B. PANDA und R. MULAVEESALA. Barker coded thermal wave imaging for defect detection in carbon fibre-reinforced plastics. In: *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2011, 53(11), 621–624. Doi:10.1784/insi.2011.53.11.621
- [14] SHI, Q., J. LIU, W. LIU, F. WANG und Y. WANG. Barker-coded modulation laser thermography for CFRP laminates delamination detection. In: *Infrared Physics & Technology*, 2019, 98, 55–61. Doi:10.1016/j.infrared.2019.02.007
- [15] ARORA, V. und R. MULAVEESALA. Application of golay complementary coded excitation schemes for non-destructive testing of sandwich structures. In: *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 93, 36–39. Doi:10.1016/j.optlaseng.2017.01.009
- [16] KAIPILAVIL, S. und A. MANDELIS. Truncated-correlation photothermal coherence tomography for deep subsurface analysis. In: *Nature Photonics*, 2014, 8(8), 635–642. Doi:10.1038/nphoton.2014.111
- [17] TAVAKOLIAN, P., K. SIVAGURUNATHAN und A. MANDELIS. Enhanced truncated-correlation photothermal coherence tomography with application to deep subsurface defect imaging and 3-dimensional reconstructions. In: *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(2), 23103. Doi:10.1063/1.4992807
- [18] BURGHOLZER, P., M. THOR, J. GRUBER und G. MAYR. Three-dimensional thermographic imaging using a virtual wave concept. In: *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(10), 105102. Doi:10.1063/1.4978010
- [19] THUMMERER, G., G. MAYR, P.D. HIRSCH, M. ZIEGLER und P. BURGHOLZER. Photothermal image reconstruction in opaque media with virtual wave backpropagation. In: *NDT & E International*, 2020, 112, 102239. Doi:10.1016/j.ndteint.2020.102239
- [20] BUSSE, G. und K.F. RENK. Stereoscopic depth analysis by thermal wave transmission for nondestructive evaluation. In: *Applied Physics Letters*, 1983, Doi:10.1063/1.93942
- [21] SCHLICHTING, J., C. MAIERHOFER und M. KREUTZBRUCK. Crack sizing by laser excited thermography. In: *NDT&E International*, 2012, 133–140. Doi:10.1016/j.ndteint.2011.09.014
- [22] HOLTSMANN, N., K. ARTZT, A. GLEITER, H.P. STRUNK und G. BUSSE. Iterative improvement of Lockin-thermography results by temporal and spatial adaption of optical excitation. In: *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2012, 9(2), 167–176. Doi:10.1080/17686733.2012.741919
- [23] HOLTSMANN, N. Auswertung und Anregung eindimensionalen Wärmeflusses in der zerstörungsfreien Bauteilprüfung mittels optisch angeregter Lockin-Thermografie. Dissertation. München: Dr. Hut, 2015. Luftfahrt. ISBN 978-3-8439-2222-7.
- [24] THIEL, E. Thermische Wellenformung für interferenzbasierte thermografische Defektdetektion. Dissertation: Universität Stuttgart, 2020.
- [25] THIEL, E., M. KREUTZBRUCK und M. ZIEGLER. Spatial and temporal control of thermal waves by using DMDs for interference based crack detection. In: M.R. DOUGLASS, P.S. KING und B.L. LEE, Hg. *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VIII*: SPIE, 2016, 97610N, doi:10.1117/12.2210918.
- [26] PRIBE, J.D., S.C. THANDU, Z. YIN und E.C. KINZEL. Toward DMD illuminated spatial-temporal modulated thermography. In: J.N. ZALAMEDA und P. BISON, Hg. *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII*: SPIE, 2016, 98610, DOI:10.1117/12.2223859.