

Wissenschaftspreis 2024

Super-Resolution Thermografie

Defektauflösung jenseits klassischer Limits

Dr. Julien Lecompanion*

Kurzfassung. Die laserbasierte aktive thermografische Prüfung als berührungslose Methode der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung basiert auf der aktiven Erwärmung des Testobjekts (OuT) und Messung des resultierenden Temperaturanstiegs mit einer Infrarotkamera. Dadurch bedingt können systematische Abweichungen vom vorhergesagten Erwärmungsverhalten Aufschluss über dessen innere Struktur geben. Jedoch ist das Auflösungsvermögen für innenliegende Defekte durch die diffusive Natur der Wärmeleitung in Festkörpern begrenzt. Thermografische Super-Resolution (SR)-Methoden zielen darauf ab, diese Limitation durch die Kombination mehrerer Messungen mit jeweils unterschiedlicher strukturierter Erwärmung und mathematischer Optimierungsmethoden zu überwinden. Nachdem die Methode bisher experimentell fast ausschließlich auf eindimensionale Messbereiche (ROIs) beschränkt war, zielt diese Arbeit auf eine Erweiterung zur Prüfung zweidimensionaler ROIs mit arbiträren Defektverteilungen bei erträglicher experimenteller Komplexität ab. Ziel ist es, durch die Weiterentwicklung des Technologie-Reifegrades (TRL) den Technologietransfer zur industriellen Anwendung zu ermöglichen.

Thermografisches Auflösungslimit innenliegender Defekte

Auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung besteht der erste wichtige Schritt darin, festzustellen, ob Defekte vorhanden sind. Je nach verwendeter Methode liefert dies nicht notwendigerweise direkt auch ausreichende Informationen über die Größe und Form vorhandener Fehler, die notwendig sind, um deren Auswirkungen auf die Spezifikationen, die das Bauteil erfüllen muss, zu beurteilen.

Die verschiedenen existierenden konventionellen TT-Methoden zielen zwar alle darauf ab, das Detektions- und Auflösungsvermögen aktiver thermografischer Messungen zu maximieren, aber sie reichen meist nicht aus, um die nachteiligen Auswirkungen der thermischen Diffusion auf das Defektsignal zu überwinden. Eine allgemein anerkannte Faustregel für TT besagt, dass eine Detektion eines Defekts bis zu einer Tiefe möglich ist, die der räumlichen Ausdehnung des Defekts entspricht. Eine ähnliche Aussage lässt sich analog auch über das thermografische Auflösungsvermögen vornehmen, dass die Strukturauflösung in etwa so groß ist wie die Tiefenlage des Defekts. Dies ist zwar eine sehr vereinfachende Annahme und es gibt tiefer gehende Grenzwerte für die Erkennbarkeit von Defekten anhand dieses Größen-zu-Tiefenverhältnisses, aber sie gibt bereits eine gute Annäherung an die Möglichkeiten der



Der Autor

Julien Lecompanion

Geboren 1992, studierte er Maschinenbau (Bachelor und Master) an der Technischen Universität Berlin. Nach einer Tätigkeit als Entwicklungsingenieur für weltraumgestützte optische Systeme für Fernerkundungs- und Inter-Satelliten-Laserkommunikationsanwendungen bei der Berliner Glas KGaA wechselte er 2020 zum Fachbereich 8.3: Thermografische Verfahren der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin. 2023 promovierte er mit einer Arbeit über die Verbesserung der Defektauflösung durch hochauflösende Laserthermografie mit räumlich strukturierter Erwärmung am Fachgebiet für Beschichtungstechnik der TU Berlin. Aktuell leitet er die Arbeitsgruppe „Automatisierte Laserthermografie“ am Fachbereich Thermografische Verfahren der BAM. Seine Forschungsschwerpunkte liegen dabei in der Entwicklung thermografischer Tomografieverfahren mit Lasererwärmung und der Übertragung bestehender thermografischer Prüfverfahren in den industriellen Kontext.

*Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 12200 Berlin
Kontakt: julien.lecompagnon@bam.de

herkömmlichen TT [1]. Der Vollständigkeit halber sei gesagt, dass die Erkennbarkeit von Defekten natürlich auch vom Signal-zu-Rauschverhältnis der Temperaturmessung, sowie des thermischen Kontrasts des zu detektierenden Defektes abhängt, was zusätzliche Betrachtungen nach sich zieht.

Wenn ein bildgebendes Verfahren (wie bei TT üblich) verwendet wird, ist die Auflösung eines Defektsignals maßgeblich durch die Punktspreizfunktion (PSF) des Messaufbaus begrenzt. Die PSF ist ein Konzept aus der Optik und beschreibt die Reaktion des Messaufbaus auf ein punktförmiges Objekt (Punktquelle). Da sie ein Maß für die Übertragungseigenschaften des Systems ist, wirkt sie sich auf jedes ursprüngliche, ungestörte Defektsignal $I_{original}$ wie folgt aus:

$$I_{transmitted}(r) = I_{original}(r) *_{r} \Phi_{PSF}(r) . \quad (1)$$

Hier ist das übertragene Signal $I_{transmitted}$ aufgrund der Faltungsoption im Wesentlichen eine räumlich gefilterte Version von $I_{original}$. Um Φ_{PSF} zu ermitteln, ist zwar grundsätzlich die gesamte Messkette (IR-Kamera, Anregung, Thermische Diffusion) zu verrechnen, jedoch sticht die thermische Diffusion durch ihren ausgesprochen starken negativen Effekt hervor und bedarf gesonderter Betrachtung, weshalb im Weiteren ausschließlich die PSF der thermischen Diffusion betrachtet wird [10]. Transformiert man Φ_{PSF} mit Hilfe der Fourier-Transformation in den Raumfrequenzbereich, so erhält man die so genannte Modulations-transferfunktion (MTF), aus welcher sich das Übertragungsverhalten genau ablesen lässt (vergleiche Abb. 1).

Hier zeigt sich auch, dass die Informationsüber-

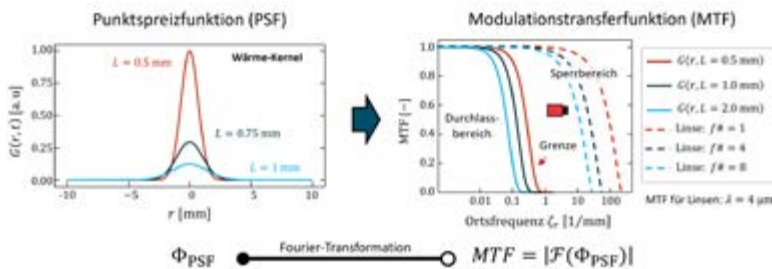


Abb. 1: Thermische Punktspreizfunktion (links) und daraus abgeleitete thermische Modulationstransferfunktion (rechts). Als Referenzpunkt dient die MTF einer typischen Infraroptik (gestrichelt Linie).

tragung durch thermische Diffusion ein starkes Tiefpassverhalten aufweist und hochfrequente Anteile weit vor der Auflösungsgrenze moderner Infrarotkameras liegt.

Zwar gilt die dargestellte PSF-Betrachtung erst einmal nur für ein sich von der Oberfläche ins Innere ausbreitendes Wärmesignal, jedoch hilft es hier, dass sich innenliegende Defekte meist in der thermografischen Prüfung als Hot-Spots im Temperatursignal bemerkbar machen. Dies sieht qualitativ einer äußeren Erwärmung sehr ähnlich und folgt im Grunde auch der gleichen Physik, jedoch ist eine genaue Beschrei-

bung aufgrund der Vielzahl und Inhomogenität der möglichen Defektausprägungen schwierig. Die Beschreibung der thermischen Signatur innerer Defekte als scheinbare Wärmequellen ist hierbei eine Schlüsselannahme für die weiteren Betrachtungen.

Thermografische Super-Resolution-Rekonstruktion

Die Überwindung des hier beschriebenen klassischen Auflösungslimits wird als Super-Resolution bezeichnet. Die photothermische Super-Resolution Rekonstruktionsmethodik basiert darauf, dass man für eine Gesamtheit von sich in der Erwärmungsstruktur unterscheidenden Messungen $m \in [1, \dots, n_{\text{Muster}}]$ eine gemeinsame (dünnbesetzte) Defektstruktur \mathbf{a} sucht, welche bestmöglich die Temperaturmessergebnisse T_{meas}^m der Einzelmessungen erklärt. Hieraus ergibt sich ein stark schlecht gestelltes inverses mathematisches Problem, was dessen Lösung signifikant erschwert. Als Lösungsstrategie lässt sich eine Inversion mittels iterativer numerischer Minimierungsverfahren nutzen, welche dabei von einzelnen Annahmen wie der vergleichsweise Seltenheit von Materialdefekten (ausgedrückt durch die $\|\cdot\|_{2,1}$ Norm), sowie der Bevorzugung kleinzahliger Lösungen ($\|\cdot\|_2$ -Norm) profitiert:

$$\min \|T_{meas}^m - \Phi_{PSF} *_{r} \mathbf{a}^m\|_2^2 + \lambda_{2,1} \|\mathbf{a}^m\|_{2,1} + \lambda_2 \|\mathbf{a}^m\|_2 , \quad (2)$$

mit der $\|\cdot\|_{2,1}$ -Norm definiert wie folgt:

$$\|\mathbf{a}^m\|_{2,1} = \sum_r \sqrt{|\sum_m |a^m|^2} .$$

Bei den beiden Faktoren $\lambda_{2,1}, \lambda_2 \in \mathbb{R}$ handelt es sich um die jeweiligen Regularisierungsparameter, die geeignet für die jeweilige Rekonstruktion zu wählen sind, sodass das Ergebnis optimal wird. Bisher ist noch kein Algorithmus bekannt, der sicher zu optimalen Parametern führt, weshalb vorerst mit empirisch ermittelten Werten gearbeitet werden muss.

Parameterstudien

In Verbindung mit einem neuartigen Algorithmus zur automatisierten Bestimmung der (optimalen) Regularisierungsparameter wird in der hier vorgestellten Arbeit auch erstmals die Möglichkeit geschaffen, analytische Simulationen zum Einfluss einzelner Parameter auf die erreichbare Rekonstruktionsqualität durchzuführen. Darüber hinaus lassen sich mit diesem Ansatz auch sämtliche experimentelle Parameter, wie beispielsweise die Gestaltung und Anzahl

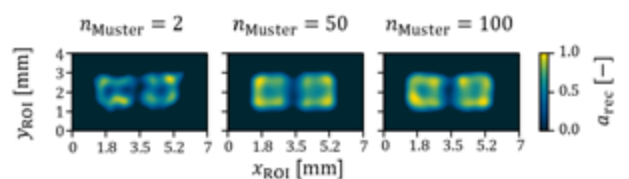


Abb. 2: Simulierte Defektrekonstruktionen für eine unterschiedliche Anzahl an projizierten Anregungsmustern.

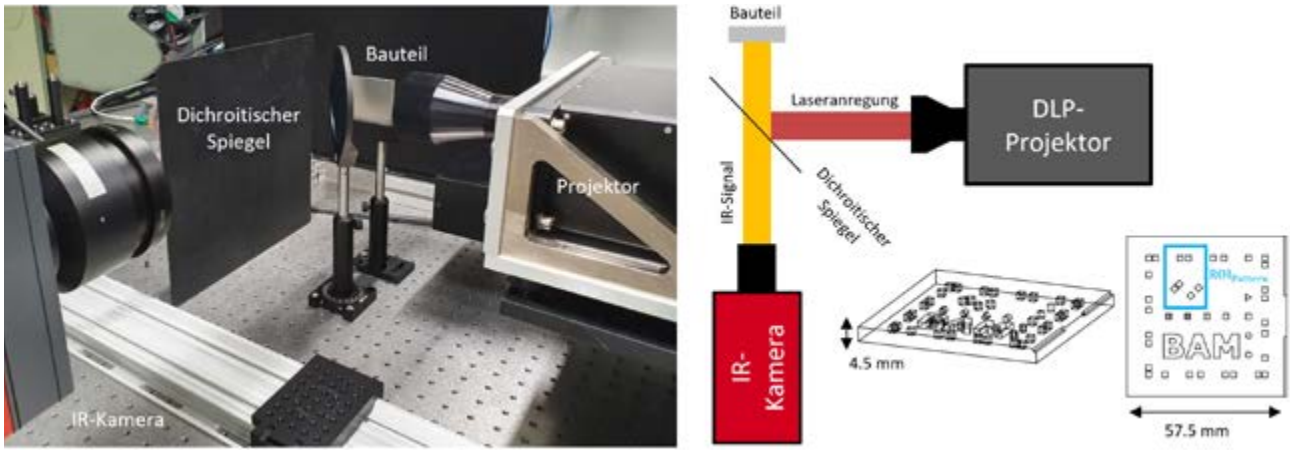


Abb. 3: Foto des Messaufbaus (links), der der schematischen Darstellung (rechts) entspricht. Zusätzlich ist eine Innenansicht des für die experimentelle Verfahrenvalidierung genutzten Testobjektes gezeigt inklusive des blau umrahmten Messbereichs (rechts unten).

der Anregungsmuster und die Temporauflösung der Infrarotkamera. Ein beispielhaftes Ergebnis einer Studie zur Ermittlung der optimalen Anzahl der verwendeten Einzelmuster ist in Abb. 2 dargestellt. Als Ergebnis lässt sich hier gewinnen, dass die erreichbare Rekonstruktionsqualität intuitionsgemäß mit der Anzahl der projizierten Anregungsmuster ansteigt, jedoch eine Projektion von mehr als $n_{Muster} = 50$ verschiedenen Mustern zu keiner signifikanten Verbesserung mehr führen. Weitere Simulationsbetrachtungen, sowie eine detaillierte Beschreibung des im Zuge dieser Arbeit geschaffenen Simulationsansatzes finden sich in [8].

Experimentelle Umsetzung

Während ursprünglich Blitzlampen mit austauschbarer Intensitätsmaske als Wärmequelle für die Methode verwendet wurden [3], haben Ahmadi et al. [4][5] die Methode weiterentwickelt, indem sie eine eindimensionale Lasererwärmung (Laserlinie und Linienmuster) verwendeten, wodurch die Methode besser für die Erkennung von Defekten tief im OuT geeignet ist. Nachteil dieser eindimensionalen Anregung ist es jedoch, dass eine Auflösungsverbesserung nur in einer Raumrichtung erreicht wird, was für die Auflösung komplexer Defektstrukturen nicht ausreicht.

Für die experimentelle Umsetzung wird daher erstmals die Verwendung lasergekoppelter DLP-Technologie für die makroskopische thermografische Prüfung nutzbar gemacht, welche die Projektion großflächiger binärer Pixelmuster ermöglicht. Dadurch kann die Anzahl der erforderlichen Messungen pro ROI ohne Qualitätseinbußen gegenüber einer äquivalenten Anregung mit Hilfe einzelner Laserpunkte erheblich reduziert werden (bis zu 20x).

Der genutzte DLP-Projektor basiert auf dem DLP650LNIR DMD-Chipsatz von Texas Instruments, welcher 1280x800 einzeln ansteuerbare Pixel besitzt, die jeweils entweder zur Erwärmung voll beitragen (angeschaltet sind) oder gänzlich dunkel verbleiben (ausgeschaltet). Die damit realisierten binären Anregungsmuster werden mit Hilfe eines dichroitischen Spiegels auf die Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils mit einer optischen Maximalleistung von

86 W (alle Pixel angeschaltet) projiziert. Diese vergleichsweise geringe Ausgangsleistung verglichen mit anderen Laserquellen, die zur Thermografischen Prüfung genutzt werden, stellt die aktuell wesentliche Limitierung dieser Technologie dar. Der eingesetzte dichroitische Spiegel ist transparent für die vom OuT abgegebene Infrarotstrahlung, was die Messung der Oberflächentemperatur mit Hilfe einer gekühlten Mittelwellen-Infrarotkamera erlaubt.

Bei dem zu untersuchenden Bauteil handelt es sich um ein zur Qualifikation der Auflösungsverbesserung speziell angefertigtes, aus 316L additive gefertigtes, plattenförmiges Objekt ($\alpha = 3.76 \text{ mm}^2/\text{s}$), welches eine Vielzahl strategisch platzierter würfelförmiger Fehlstellen (unverschmolzenes Metallpulver) in wechselnden Abständen beginnend 1 mm unter der Bauteiloberfläche aufweist. Die kleinsten Defektabstände sind mit 0.5 mm in dieser Tiefe auf klassische Weise bereits nur unzulänglich auflösbar.

Aus der gewählten Defektverteilung lassen sich schlussendlich Rückschlüsse auf die tatsächlich erreichte Auflösung ziehen, indem man betrachtet, welche Defektabstände noch zu einer sicheren Unterscheidung benachbarter Defekte führen und sich so die Defektdetektion von der Defektauflösung getrennt betrachten lassen. Der genutzte Versuchsaufbau ist in Abb. 3 gezeigt.

Bei den projizierten Anregungsmustern handelt es sich um pixellierte Zufallsmuster, bei denen jeweils 50% der verfügbaren Pixel angeschaltet sind. Grund-

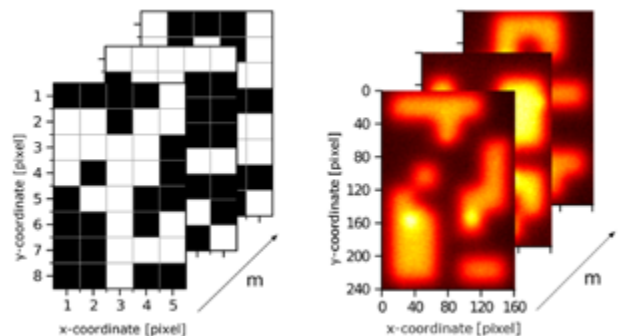


Abb. 4: Verschiedene pixellierte Anregungsmuster (links) und zugehörige Temperaturmessungen (rechts).

sätzlich sind auch andere Strategien zur Mustererzeugung möglich, jedoch dürfen die verwendeten Anregungsmuster selbst nicht zu stark korreliert sein, da dies zu Rekonstruktionsartefakten führen kann. Weiterhin muss sich die Gesamtheit aller für eine Rekonstruktion genutzten Anregungsmuster zu einem konstanten Wert summieren, da die Rekonstruktion am Ende nicht unterscheiden kann, ob eine Region im Mittel wärmer erscheint, da hier ein Defekt verortet ist, oder die Erwärmung inhomogen gewesen ist.

Zur Verbesserung der Leistungsübertragung einzelner Pixel werden mehrere nebeneinanderliegende Pixel zu einem größeren zusammengefügt und die Muster so vergrößert. Untersuchungen haben gezeigt, dass dieses Vorgehen solange möglich ist, wie die Anregungspixelgröße die Defektgröße nicht überschreitet und die Pixelgröße nicht so groß wird, dass sich keine dreidimensionale Wärmeleitung mehr ausbildet (lokal flächige Erwärmung). Typische hier verwendete Anregungsmuster und die daraus resultierenden Temperaturmessdaten sind in Abb. 4 gezeigt.

Rekonstruktionsergebnis und Vergleich mit klassischen Thermografieverfahren

Führt man eine Rekonstruktion mit der beschriebenen photothermischen Super-Resolution Rekonstruktionsmethodik des in Abb. 3 gezeigten Messbereichs durch, erhält man das in Abb. 5 dargestellte Ergebnis. Hierfür wurden insgesamt $n_{\text{Muster}} = 20$ Einzelmuster projiziert und jeweils die resultierende Temperaturantwort des Bauteils aufgenommen. In Summe kommt man damit auf eine Gesamtmesszeit von ≈ 8 min für diesen Messbereich. Anschließend wurde das in Gleichung (2) beschriebene Minimierungsproblem gelöst ($\lambda_{21} = 490, \lambda_2 = 34,4$).

Die Rekonstruktion erreicht hierbei eine gute Übereinstimmung mit der weiß umrahmten Defektstruktur des untersuchten Bauteils. Alle Defekte sind gut voneinander getrennt einzeln erkennbar. Die Fehlergeometrien sind weitgehend gut rekonstruiert, wobei der Defekt am rechten Messbereichsrand am schlechtesten rekonstruiert wird. Dies lässt sich je-

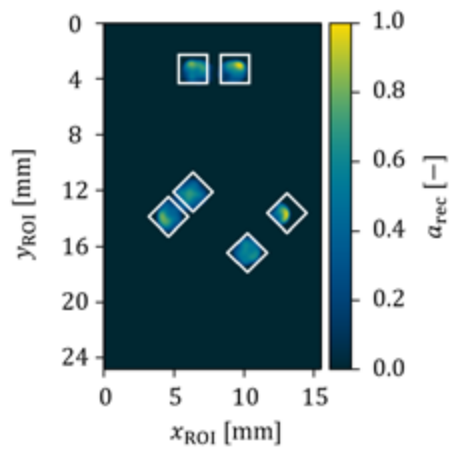


Abb. 5: Rekonstruktionsergebnis des in Abb. 3 gezeigten Messbereichs mit Hilfe von $n_{\text{Muster}} = 20$ durchgeführten Einzelanregungen. Referenz [7].

doch einfach mit der starken räumlichen Nähe zum Messbereichsrand erklären, wobei hier für eine ausreichende Rekonstruktion nicht mehr genug Informationen zur Verfügung standen.

Besser anschaulich wird die Qualität der erreichten Rekonstruktion, wenn man die Daten durch das obere Defektpaar schneidet. Der in Abb. 6 gezeigte Schnitt lässt dabei direkt nicht nur die Defektrekonstruktionsgüte erkennen, sondern zeigt auch die erreichte Dünnbesetztheit (sparsity) des Rekonstruktionsergebnisdatensatzes. Dies erlaubt auch weniger geschultem Prüfpersonal das sichere Erkennen aller Fehler, sowie eine Maschineninterpretierbarkeit der Ergebnisse, da jede Defektanzeige ein von Null verschiedenes Signal darstellt, während Nullwerte einen fehlerfreien Bereich kennzeichnen.

Um die Rekonstruktionsqualität im Kontext klassischer Thermografieverfahren bewerten zu können, wurden im selben Aufbau ebenfalls Versuche mit homogener Erwärmung durchgeführt. Dabei wurden alle Pixel angeschaltet und der Messbereich mit den vollen 86 W optischer Ausgangsleistung des Projektors für eine Pulsdauer von 500 ms beaufschlagt und die Temperaturantwort gemessen. Eine Gegenüberstellung der klassischen Prüfergebnisse mit der hier vorgestellten photothermischen Super-Resolution Rekonstruktion findet sich in Abb. 7.

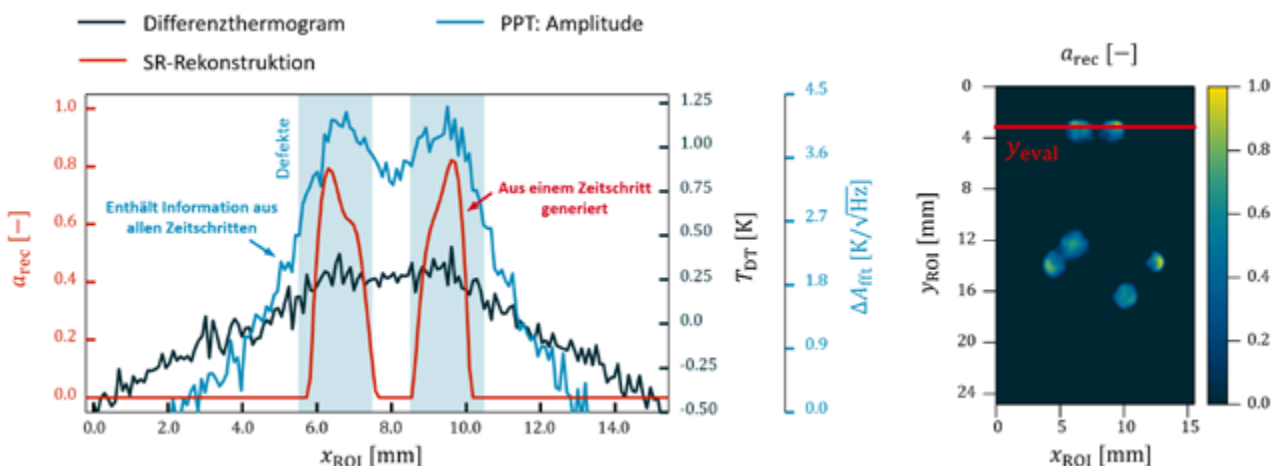


Abb. 6: Schnitt durch das Rekonstruktionsergebnis (links; rot) aus Abb. 5 durch die Rekonstruktion des oberen Defektpaares (rechts). Zur besseren Beurteilung der Rekonstruktionsqualität ist das Ergebnis klassischer Puls-Phasenauswertung mit dargestellt (links; blau).

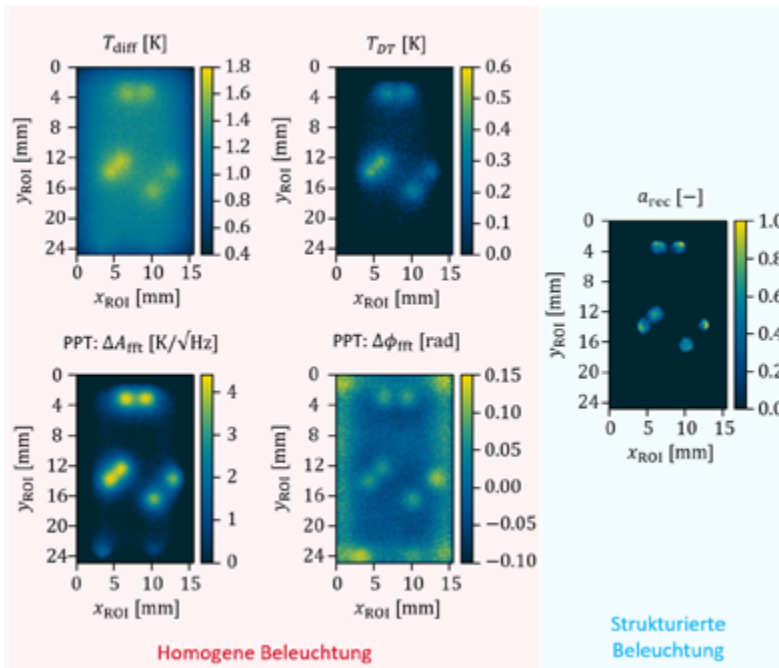


Abb. 7: Vergleich des erreichten Rekonstruktionsergebnisses (rechts) mit verschiedenen klassischen Thermografieverfahren (links). Gezeigt sind Rohbild T_{diff} , Differenzthermografie T_{DT} und Amplituden- und Phasenbild der Puls-Phasen-Thermografie.

Neben der Auswertung des Rohdatensatzes unter Abzug des Nullbildes (T_{diff}) findet sich dort auch ein Datensatz der Differenzthermografie (T_{DT}) abgebildet, bei dem eine Kontrastverstärkung durch den Abzug des Signals eines ungestörten fehlerfreien Bereichs erreicht wird. Darüber hinaus wurde der Datensatz auch mittels Puls-Phasen-Thermografie (PPT) [9] im Amplituden- (ΔA_{fit}) und Phasenraum ($\Delta \phi_{fit}$) ausgewertet. Während all diese Methoden eine Detektion der Defekte sicherstellt, ist jedoch klar der durch die thermische Diffusion begründete Auflösungsverlust sichtbar. Zudem enthalten die Ergebnisse der Anwendung dieser klassischen Methoden ein signifikantes überlagertes Hintergrundsignal, welches tiefergehende Interpretation der Ergebnisse notwendig macht.

Die Schnittdarstellung aus Abb. 6 zeigt neben dem Rekonstruktionsergebnis auch das Ergebnis des Amplitudenbildes der Puls-Phasen-Thermografie. Während dieses in der Lage ist beide Defekte zu detektieren und je nach angesetzten Maßstäben auch eine Trennung erlaubt, so ist die der Auflösungsge- winn durch die vorgestellte Rekonstruktionsmetho- dik dennoch unbestreitbar in diesem qualitativen Vergleich nachweisbar.

Weiterführende Informationen

Eine detaillierte Betrachtung aller angesprochenen Punkte findet sich frei zugänglich in [2].

Danksagung

Die hier präsentierten Arbeiten wurden im Rahmen des BAM Doktorandenprogrammes in Kooperation mit dem Fachgebiet für Beschichtungstechnik der Technischen Universität Berlin durchgeführt. Besonderer Dank gilt dabei Dr. rer. nat. Mathias Ziegler (BAM) und Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rupprecht (TU Berlin) für die exzellente Betreuung.

Referenzen

Alle Abbildungen weitgehend entnommen aus [2].

- [1] X. P. V. Maldague and P. O. Moore. “Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing, 3rd ed. Amer Society for Nondestructive Testing. (2001) ISBN: 9781571170811
- [2] J. Lecomagnon. “Nondestructive defect characterization using full-frame spatially structured super resolution laser thermography”. Dissertation. Technische Universität Berlin. (October, 2023) DOI: 10.14279/depositonce-19271
- [3] P. Burgholzer, T. Berer, J. Gruber and G. Mayr. “Super-resolution thermographic imaging using blind structured illumination”. In: Applied Physics Letters 111.3 (July 2017), p. 031908. DOI: 10.1063/1.4995410.
- [4] S. Ahmadi, P. Burgholzer, P. Jung, G. Caire and M. Ziegler. “Super resolution laser line scanning thermography”. In: Optics and Lasers in Engineering 134. (Nov. 2020), p. 106279. DOI: 10.1016/j.optl-seng.2020.106279.
- [5] S. Ahmadi. “Super resolution laser thermography using spatially and temporally structured heating”. Dissertation. Technische Universität Berlin, 2021. DOI: 10.14279/depositonce-12017.
- [6] J. Lecomagnon, S. Ahmadi, P. Hirsch, C. Rupprecht and M. Ziegler. “Thermographic detection of internal defects using 2D photothermal super resolution reconstruction with sequential laser heating”. In: Journal of Applied Physics 131.18, 185107 (May 2022). DOI: 10.1063/5.0088102.
- [7] J. Lecomagnon, P. D. Hirsch, C. Rupprecht and M. Ziegler. “Nondestructive thermographic detection of internal defects using pixel-pattern based laser excitation and photothermal super resolution reconstruction”. In: Scientific Reports 13.3416 (February, 2023), pp. 1 13. DOI: 10.1038/s41598-023-30494-2.
- [8] J. Lecomagnon, P. Hirsch, C. Rupprecht and M. Ziegler. “Influence of the number of measurements on detecting internal defects using photothermal super resolution reconstruction with random pixel patterns”. In: Quantitative InfraRed Thermography Journal (June, 2023), pp. 1 11. DOI: 10.1080/17686733.2023.2223392.
- [9] X. P. V. Maldague and S. Marinetti. “Pulse phase infrared thermography”. In: Journal of Applied Physics 79.5 (Mar. 1996), pp. 2694–2698. DOI: 10.1063/1.362662.
- [10] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger. Conduction of heat in solids. Second Edition. Oxford University Press, 1959
- [11] S. Boyd. “Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers”. In: Foundations and Trends in Machine Learning 3.1(2010), pp. 1–122. DOI: 10.1561/22000000016.