

# Scanning Pulse Phase Thermografie mit induktiver linearer Heizung

Beata OSWALD-TRANTA, Mario SORGER  
Montanuniversität, Lehrstuhl für Automation, Leoben, Österreich  
Email: beate.oswald@unileoben.ac.at

**Kurzfassung.** Bei aktiver thermografischer Inspektion wird das Prüfobjekt zuerst kurzfristig erwärmt und eine Infrarotkamera nimmt die Oberflächentemperatur auf. Nachdem ein Fehler die Ausbreitung der Wärme beeinflusst, wird er im Infrarotbild sichtbar. Eine Technik wird präsentiert, womit Langprodukte kontinuierlich, während einer linearen Bewegung auf kleine Fehler unter der Oberfläche inspiziert werden können. Als Erwärmung wird eine lineare induktive Heizung verwendet. Von den gescannten Infrarotaufnahmen wird nicht nur ein einzelnes Bild in einem spezifizierten Abstand hinter der Heizung berücksichtigt, sondern die gesamte zeitliche Änderung der Temperatur nach der Heizung geht in die Auswertung ein. Eine neue Sequenz von Bildern wird mit Hilfe einer, der Durchlaufgeschwindigkeit entsprechenden, Verschiebung hergestellt. Aus dieser Sequenz von Infrarotbildern wird mittels Fourier-Transformation ein Phasenbild berechnet. Nachdem das Phasenbild durch Scannen der Oberfläche während einer linearen Bewegung bestimmt wird, nennt sich diese Technik ‚*scanning pulse phase thermography*‘ (SPPT). Mit dieser Methode wurden einerseits Fehler unter der Oberfläche von ferro-magnetischen und nicht-magnetischen Stahlplatten mit verschiedenen Größen und Tiefen untersucht, sowie andererseits die Qualität von Verklebungen zwischen metallischen Platten geprüft. Die Messung kann sowohl in Transmission als auch in Reflexion durchgeführt werden. Die Ergebnisse wurden zusätzlich mit den Resultaten der Blitzlichtthermografie verglichen, wobei das zu prüfende Objekt optisch durch einen kurzen Blitzlichtpuls erwärmt wurde.

## 1. Einführung

Im Falle von aktiver thermografischer Inspektion wird dem zu prüfenden Objekt zuerst auf eine bestimmte Art und Weise Wärme zugeführt und mit einer Infrarotkamera wird die Temperaturverteilung an der Oberfläche bzw. deren zeitliche und örtliche Veränderung beobachtet. Nachdem Fehler, wie z.B. Inhomogenitäten, Risse oder Lunken die Erwärmung und die Ausbreitung der zugeführten Wärme beeinflussen, können in den Infrarotbildern diese Fehler lokalisiert werden. Bei der Prüfung von Langprodukten ist es zielführend, das Objekt kontinuierlich und linear zu bewegen und während dieser Bewegung die Prüfung durchzuführen. Die Erwärmung erfolgt durch eine lineare Heizung. Für metallische Teile, besonders wenn diese ferro-magnetisch sind, ist die induktive Erwärmung die effizienteste Technik: die Wärme wird durch ohm'sche Verluste der induzierten Wirbelströme direkt im Material erzeugt und wird von Oberflächeneigenschaften, wie Absorptionsvermögen nicht beeinflusst.

Um Oberflächenrisse zu detektieren, wird bei Scan-Techniken vielfach eine punktförmige Heizung, wie Laserstrahl verwendet [1,2,3,4,5]. Für Delaminationen und Fehler unter der Oberfläche kommen meist optische lineare Heizungen zum Einsatz [6,7,8]. In diesem Fall



wird aus der Infrarotbild-Sequenz eine bestimmte Pixelspalte extrahiert und auf diese Weise ein einziges IR-Bild hergestellt. Damit wird die Wärmeverteilung nach einer bestimmten Zeit nach der Heizung untersucht. Da der Wärmefluss von Fehlern in unterschiedlichen Tiefen unter der Oberfläche unterschiedlich lang braucht, bis er die Oberfläche wieder erreicht, wird mit der Auswertung eines einzigen IR-Bildes die Tiefe der detektierbaren Fehler begrenzt.

In dieser Publikation wird eine neue Technik präsentiert, wobei nicht nur eine einzige Pixelspalte, sondern alle Pixelspalten ausgewertet werden. Damit wird eine neue Infrarotbild-Sequenz hergestellt, die die zeitliche Änderung des Wärmeflusses beschreibt. Mit Hilfe der Fourier-Transformation wird ein Phasenbild berechnet, welches eine deutlich bessere Auflösung hat, als die reinen Temperaturbilder und gleichzeitig auch Fehler in unterschiedlichen Tiefen anzeigt.

## 2. Messaufbau

In den Messungen wurden magnetische und nicht-magnetische Stahlproben untersucht. Das Ziel der Experimente war zu zeigen, wie kleine Fehler in welcher Tiefe detektiert werden können. Dafür wurden Probenstücke mit künstlichen Fehlern erzeugt: in eine 9mm dicke Platte wurden an der Rückseite Flachbodenbohrungen mit einer Restwandstärke von 3-8mm gebohrt. Die Durchmesser der Fehler sind in einer der Proben (A) 8 und 10 mm, in der Probe B haben die Löcher einen Durchmesser von 4 und 6 mm.

Nachdem für elektrisch leitende Materialien die induktive Erwärmung die effizienteste ist, wurde diese in den Messungen verwendet, siehe Abbildung 1. Das zu prüfende Werkstück wird unter der Induktionsspule mit einem linearen Antrieb vorbeibewegt. Die Infrarotkamera nimmt die Wärmeverteilung im Bereich nach der Heizung auf. Abbildung 2 zeigt eine Infrarotaufnahme während dieses Scannprozesses.

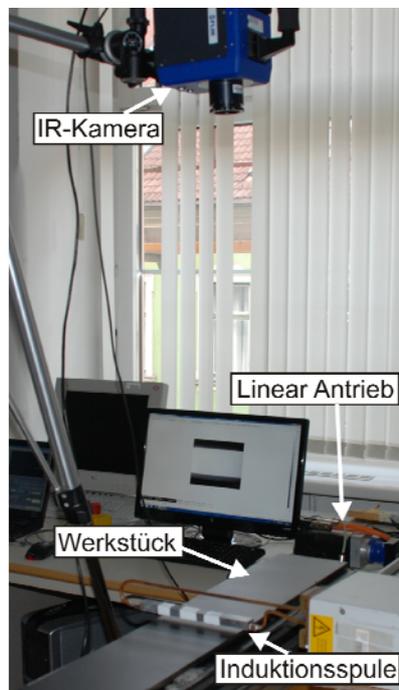
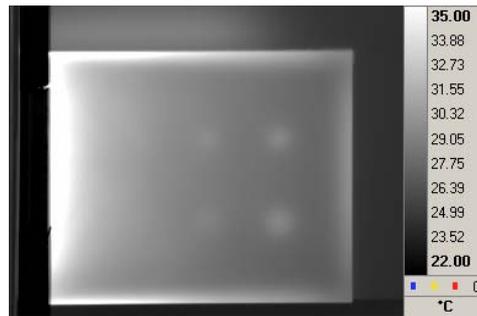


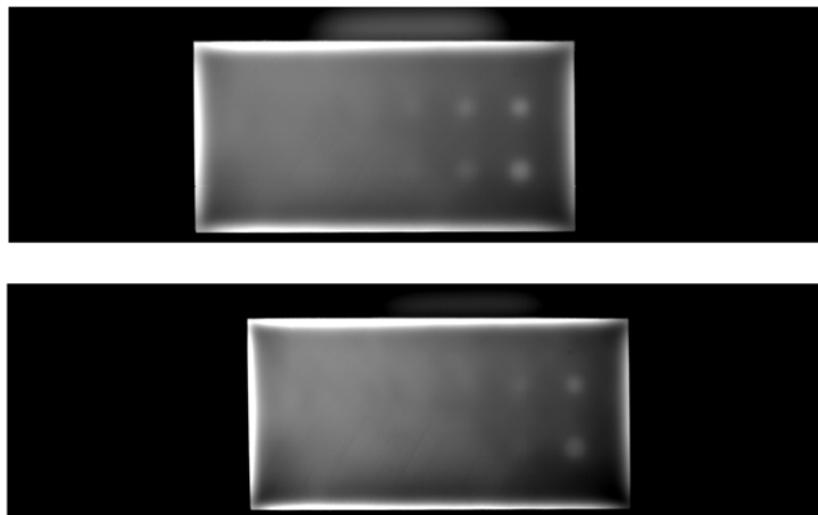
Abbildung 1: Aufbau für die Messung mit der Scan-Technik im Labor



**Abbildung 2:** Bild der IR-Kamera während des Scannens einer Stahlplatte mit künstlichen Fehlern mit 8 und 10 mm Durchmesser an der Rückseite. Das Werkstück wird von links nach rechts bewegt. An der linken Seite des Bildes ist die wassergekühlte Induktionsspule sichtbar.

### 3. Verarbeitung der Infrarotbild-Sequenz

Wenn aus jedem Bild des IR-Films, welcher während des Scannens aufgenommen wird, eine bestimmte Pixelspalte extrahiert wird, entsteht durch Hintereinanderreihen der einzelnen Pixelspalten ein Bild mit der Temperaturverteilung nach einer bestimmten Zeit nach der Heizung, siehe Abbildung 3. Wenn man Bilder aus unterschiedlichen Pixelspalten erzeugt, zeigen diese die Temperaturverteilung zu unterschiedlichen Zeitpunkten, sie sind jedoch zueinander verschoben. Diese Verschiebung wird zunächst entsprechend der Bewegungsgeschwindigkeit bzw. der Zeit zwischen zwei Kameraaufnahmen korrigiert. Auf diese Weise wird eine neue Bild-Sequenz erzeugt, welche die zeitliche Änderung der Oberflächentemperatur beschreibt. In einer anderen Publikation wurde gezeigt[9], dass diese Änderung mit sehr guter Näherung der Temperaturänderung nach einer kurzen Pulsheizung entspricht.

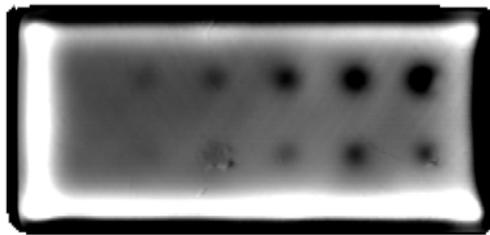


**Abbildung 3:** Zwei Infrarotbilder, die aus verschiedenen Pixelspalten der Infrarotkamera erzeugt wurden.

Aus dieser Bildsequenz wird mit Hilfe der Fourier-Transformation ein Phasenbild berechnet. Diese Auswertung wird auch Pulse Phase Thermography (PPT) [10] genannt. Da in der hier präsentierten Methode die Phasenberechnung nach dem linearen Scannen erfolgt, wird dies als Scanning Pulse Phase Thermography (SPPT) bezeichnet.

In [11] wurde gezeigt, dass in einem reinen Infrarotbild Fehler detektiert werden können, bei denen das Verhältnis des Durchmessers ( $D$ ) zur Fehlertiefe ( $d$ ) mindestens  $\sqrt{2}$  beträgt. Die Phasenbilder der neuen SPPT-Methode haben eine deutlich bessere Auflösung

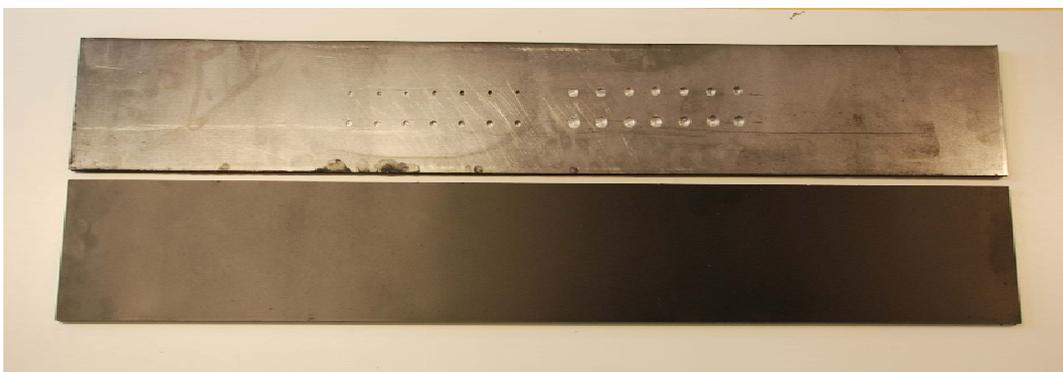
[12, 9], wie auch aus Abbildung 4 ersichtlich ist. Die Abbildung zeigt ein Phasenbild der Probe B mit 6 und 4 mm Fehlerdurchmesser und unterschiedlichen Fehlertiefen. Dabei ist in der oberen Reihe (Durchmesser = 6mm) das fünfte Loch von rechts mit einer Tiefe von 7 mm, bzw. in der zweiten Reihe (Durchmesser = 4mm) das vierte Loch von rechts mit einer Tiefe von 6mm noch erkennbar. Dies entspricht einem Verhältnis von  $D/d = 4 / 6 \sim 0.66$ , welches deutlich besser ist, als das theoretisch berechnete Limit für die Temperaturbilder mit  $\sqrt{2}$ . Es wurde aber auch gezeigt [9], dass schnellere Durchlaufgeschwindigkeiten bei einem bestimmten Kamerablickfeld die Inspektionsdauer verkürzen und damit die Wärmeflussperturbation von tieferen Fehlern nicht genug Zeit hat, die Oberfläche zu erreichen. Demzufolge, wenn höhere Durchlaufgeschwindigkeiten benötigt werden und das Fehlerdetektionslimit beibehalten werden soll, muss ein größeres Kamerablickfeld eingestellt werden.



**Abbildung 4:** Phasenbild der Probe B mit 6 und 4 mm Fehlern, berechnet aus der gescannten Bildsequenz mit der SPPT Technik, Durchlaufgeschwindigkeit = 0.05m/s, Inspektionsdauer = 6s.

#### 4. Auswertung im kontinuierlichen Betrieb

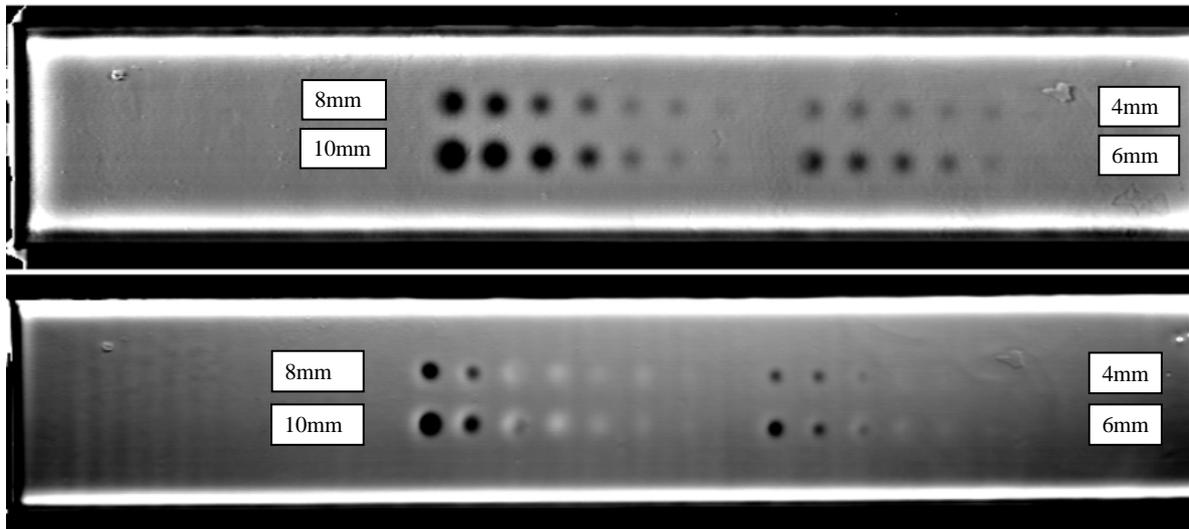
Ein weiterer Vorteil der SPPT ist, dass sie kontinuierlich, in einer Art „Endlos-Betrieb“ durchgeführt werden kann. Wenn eine bestimmte Position des zu prüfenden Werkstücks das Blickfeld der Kamera durchlaufen hat, werden alle Pixelspalten dieser Position zusammengefügt und zu einem Phasenwert ausgewertet. Um diesen endlosen Betrieb zu demonstrieren, wurden zwei weiteren Proben mit künstlichen Fehlern erzeugt. Abbildung 5 zeigt die zwei Proben, die geometrisch identisch sind, von denen eine aus ferromagnetischem und die andere aus nicht-magnetischem Stahl hergestellt wurde. In diesen 1m langen und 10 mm dicken Proben wurden 4 x 7 Löcher in die Rückwand gebohrt, mit einem Durchmesser von 4, 6, 8 und 10 mm und mit einer Restwandstärke von 3-9 mm jeweils in 1mm Schritten.



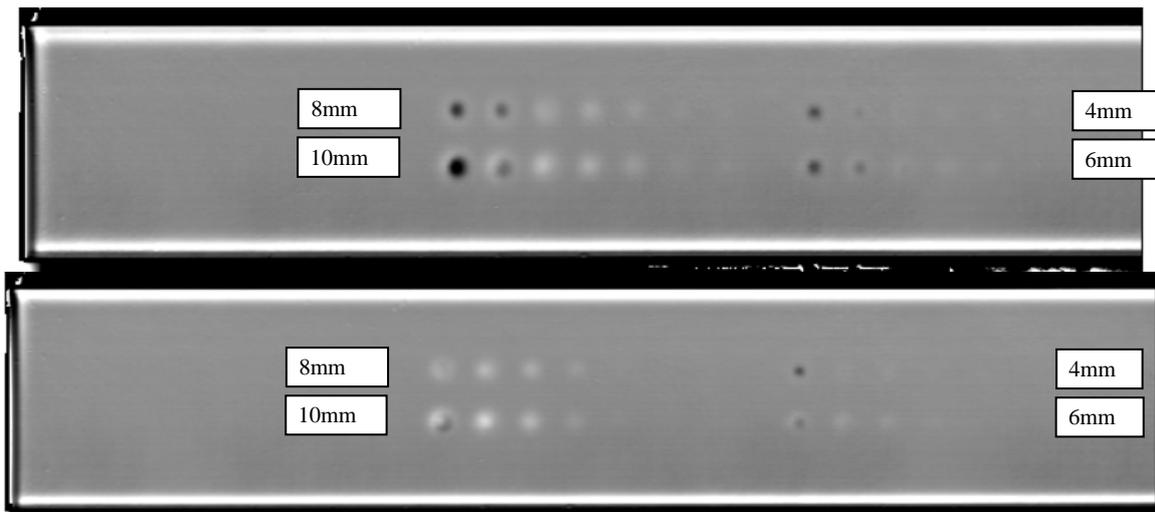
**Abbildung 5:** 1m lange und 10 mm dicke ferro-magnetische und nicht-magnetische Proben, mit 4, 6, 8 und 10 mm Fehlerdurchmesser in 3-9mm Tiefe unter der Oberfläche.

Die Messergebnisse sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 gezeigt. Bei langsamer Bewegungsgeschwindigkeit können in der ferro-magnetischen Platte fast alle Fehler

detektiert werden. Mit steigender Geschwindigkeit sind die tiefer liegenden Fehler nicht mehr sichtbar.



**Abbildung 6:** Messergebnisse an der ferro-magnetischen Platte mit 4, 6, 8 und 10 mm Fehlerdurchmesser; oben: mit einer Durchlaufgeschwindigkeit von 7.8 cm/s und unten mit einer Geschwindigkeit von 23.4 cm/s.

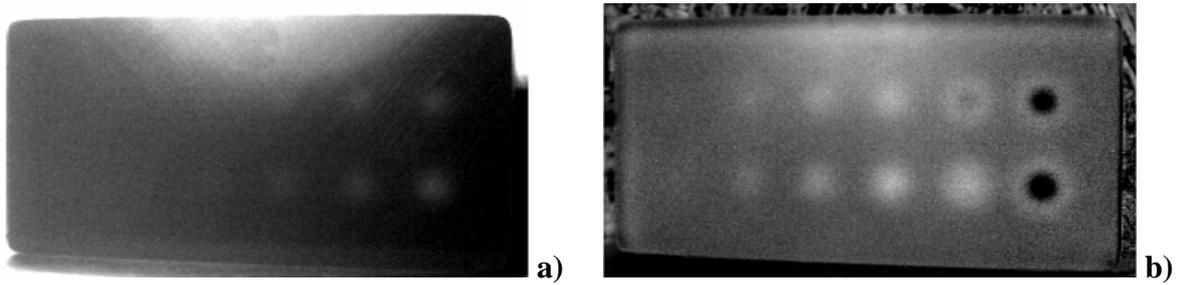


**Abbildung 7:** Messergebnisse an der nicht-magnetischen Stahlplatte mit 4, 6, 8 und 10 mm Fehlerdurchmesser; oben: mit einer Durchlaufgeschwindigkeit von 7.8 cm/s und unten mit der Geschwindigkeit von 13 cm/s.

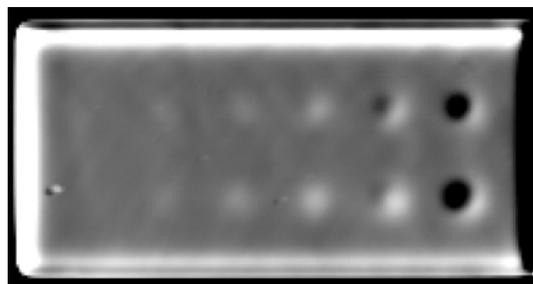
## 5. Vergleich von Blitzthermografie und SPPT

Blitzthermografie-Messungen sind durchgeführt worden, um ihre Ergebnisse mit der Scanning-Thermografie zu vergleichen. Die Oberfläche der Probe wurde mit einem kurzen Blitzpuls (1 ms Dauer mit 6 kJ Energie) erwärmt. Die Infrarotkamera (Titanium, FLIR Inc. [13]), nimmt die Temperaturverteilung der Oberfläche in Reflexion auf. Abbildung 8a zeigt das Infrarotbild der Probe A 1.7 s nach dem Blitzpuls. Die Fehler sind kaum sichtbar und die inhomogene Erwärmung stört ebenfalls das Bild. In Abbildung 8b ist das Phasenbild dargestellt, berechnet für eine Dauer von 2.5 s nach dem Heizungspuls. Der Einfluss der inhomogenen Beleuchtung wird vernachlässigbar, und die meisten Fehler sind gut sichtbar. Abbildung 9 zeigt das Phasenbild der gleichen Probe mit SPPT. Die Ergebnisse der zwei

Methoden sind sehr ähnlich, der tiefste erkennbare Fehler hat bei beiden eine Tiefe von 7 mm, dies entspricht einem Verhältnis von  $D/d = 8 / 7 \sim 1.14$ .

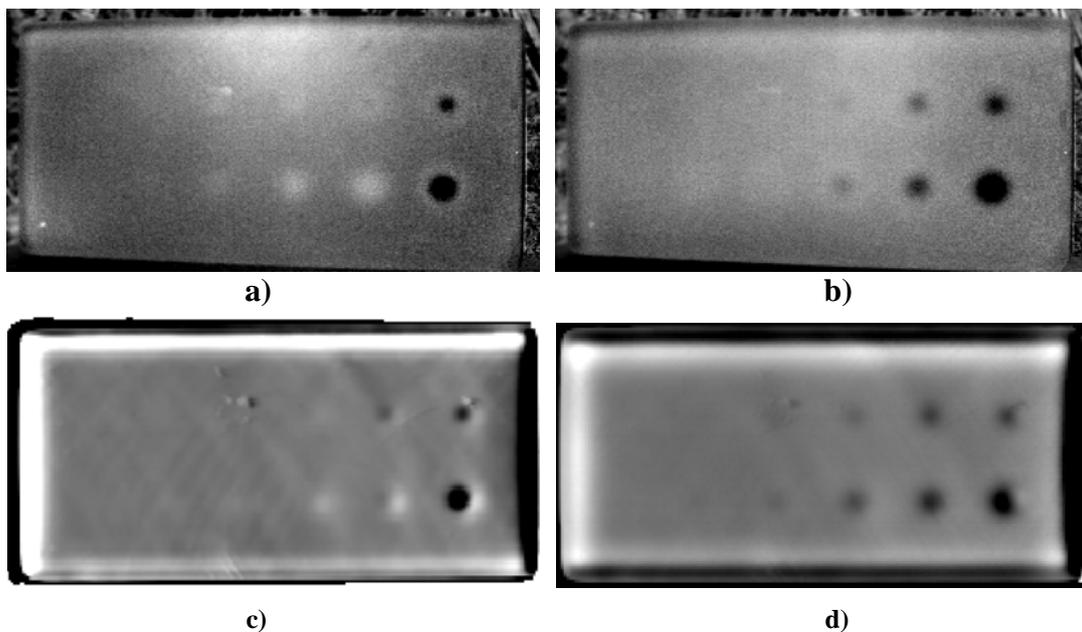


**Abbildung 8:** Ergebnisse der Blitzthermografie Messungen an der Probe A; (a) Infrarotbild 1.7 s nach dem Blitzpuls; (b) Phasenbild berechnet für eine Dauer von 2.5 s.



**Abbildung 9:** Phasenbild der Probe A, berechnet aus der gescannten Bildsequenz nach linearer induktiver Erwärmung mit SPPT Technik, Inspektionsdauer = 2.5 s.

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse für die Probe B mit Blitz- und mit Scanning-Thermografie. Die beiden Techniken zeigen sehr ähnliche Ergebnisse, außerdem ist gut sichtbar, wie die tieferen Fehler erst bei längerer Inspektionsdauer detektierbar werden.



**Abbildung 10:** Ergebnisse der Blitzthermografie (a und b) verglichen mit den SPPT Ergebnissen (c und d) für die Probe B; das Phasenbild wurde für eine Dauer von 1.7 s (a und c) bzw. für 4 s (b und d) berechnet.

Beim Vergleich der Ergebnisse von Blitz- und Scanning-Thermografie können folgende Punkte festgehalten werden:

- Beide Techniken zeigen eine deutlich bessere Auflösung in den Phasenbildern als in den reinen Temperaturbildern.
- SPPT hat ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis, weil die Heizung gleichmäßiger und effizienter ist. Damit weist diese Technik geringfügig auch eine bessere Fehlerauflösung auf.
- Bei Blitzthermografie können nur bestimmte Ausschnitte einer größeren Fläche auf einmal geprüft werden, die Teilbilder müssen nachträglich zusammengefügt werden. Demgegenüber kann SPPT kontinuierlich durchgeführt werden und damit bietet sie eine ausgezeichnete Inspektionsmethode für Langprodukte.

## 6. Messungen in Transmission

Alle bisherige Ergebnisse wurden in Reflexion gemessen, dabei befinden sich Heizung und Infrarotkamera auf der gleichen Seite der Probe. Wenn beide Seiten der Probe zugänglich sind, können auch Messungen in Transmission durchgeführt werden. Die Seite der Probe, wo geheizt wird, muss nicht sichtbar sein und kann auch mit einer nicht elektrisch leitenden Schicht bedeckt sein, bzw. z.B. auf einem Kunststofftisch liegen, da die Induktion der Wirbelströme dadurch nicht beeinträchtigt wird.

Analytische Rechnungen und Simulationen [9] haben gezeigt, dass in Transmission einerseits kleinere Fehler detektierbar sind und andererseits die Prüfgeschwindigkeit größer sein kann als in Reflexion. Die Unschärfe, die durch Wärmediffusion verursacht wird, ist in Transmission geringer als in Reflexion, da der Wärmefluss bei Reflexion bis zur Oberfläche doppelt so lang braucht. Daher tritt das Kontrastmaximum in Transmission früher auf und kürzere Inspektionszeiten mit höherer Auflösung sind erzielbar. Abbildung 11 zeigt Phasenbilder von der Probe A und B, wobei alle Fehler, sogar auch der kleinste und tiefste mit einem Verhältnis von  $D/d = 4\text{mm} / 8\text{mm} = 0.5$ , sichtbar sind.

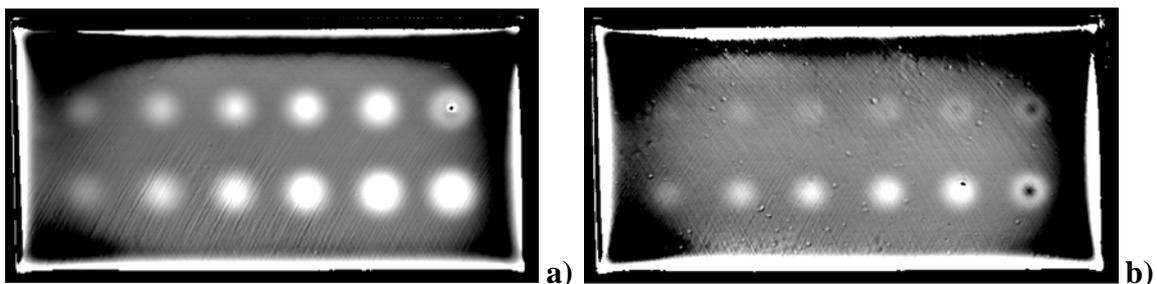
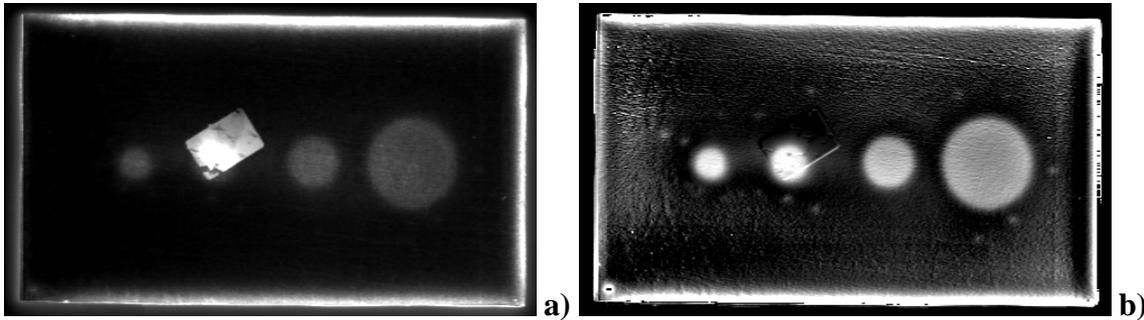


Abbildung 11: Phasenbilder der Probe A (a) und der Probe B (b) gemessen in Transmission; Durchlaufgeschwindigkeit = 0.13m/s, Inspektionsdauer = 1s.

## 7. Messungen an geklebten Metallplatten

Die präsentierte SPPT Technik kann sowohl in Reflexion als auch in Transmission für die Inspektion von geklebten Metallplatten verwendet werden. Bei nicht vollständiger Verklebung reflektiert der Lufteinschluss den Wärmefluss, und damit wird dieser in den Infrarotbildern sichtbar. Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse einer Probe, bei der zwei 0.75 mm dicken Stahlplatten in vier kreisförmigen Bereichen (Durchmesser: 5-30 mm) verklebt wurden. Abbildung 12a zeigt ein Infrarotbild, wo an der Oberfläche der oberen Platte eine kleine Markierung mit unterschiedlicher Emissivität sichtbar ist. In Abbildung 12b wird das

Phasenbild gezeigt, wobei die geklebten Stellen sehr gut sichtbar sind. Mit diesem Phasenbild wird auch ein weiterer Vorteil der Phasenauswertung demonstriert: Oberflächeneffekte, wie unterschiedliche Emissivität, werden vernachlässigbar. Ebenso ist der kleine Aufkleber im Phasenbild nicht mehr sichtbar.



**Abbildung 12:** a: Infrarotbild von zwei verklebten Metallplatten etwa 10 cm hinter der induktiven Heizung; b: Phasenbild, erhalten mit SPPT.

## 8. Zusammenfassung

Die neue Technik der Scanning pulse phase thermography (SPPT) wurde vorgestellt, wobei nach einem Scannen mit linearer Bewegung eine neue Bildsequenz hergestellt wird, welche dann mit Fourier Transformation als Phasenbild ausgewertet wird. Diese Technik kann mit beliebiger linearer Heizung durchgeführt werden. Hier wurde sie mit induktiver Erwärmung demonstriert, nachdem diese Heiztechnik die effizienteste für metallische Teile ist.

In Reflexion konnten bei langsamer Durchlaufgeschwindigkeit Fehler mit einem Durchmesser-zu-Tiefe Verhältnis von  $D/d = 4 / 6 \sim 0.66$  sichtbar gemacht werden. Die Durchlaufgeschwindigkeit könnte bei gleichbleibender Inspektionsdauer und Fehlerauflösung erhöht werden, wenn das Sichtfeld der Kamera vergrößert wird.

In Transmission kann eine höhere Auflösung ( $D/d = 0.5$ ) mit schnellerer Inspektionsgeschwindigkeiten erzielt werden.

SPPT mit induktiver Linien Erwärmung kann auch in kontinuierlichem Betrieb sehr gut verwendet werden, um kleinen Fehler unter der Oberfläche von metallischen Objekten oder z.B. Lufteinschlüsse in Klebeverbindungen zu finden

## 9. Referenzen

[1] Kubiak EJ. Infrared detection of fatigue cracks and other near-surface defects. *Applied Optics*. 1968;7:1743–8.

[2] Gruss C, Balageas D. Theoretical and experimental applications of the flying spot camera. *Proceedings of QIRT*; 1992; pp. 19–24. QIRT Open Archives available from: <http://qirt.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=55>; paper QIRT 1992-004

[3] Wang YQ, Kuo PK, Favro LD, Thomas RL. Flying laser spot thermal wave IR imaging of horizontal and vertical cracks. *Review of progress in QNDE 9A*. New York, Plenum Press; 1990. p. 511–6.

[4] Li T, Almond DP, Rees DAS. Crack imaging by scanning pulsed laser spot thermography. *NDT&E International*. 2011 Mar;44(2):216–25.

- [5] Schlichting J, Ziegler M, Dey A, Maierhofer Ch, Kreutzbruck M. Efficient data evaluation for thermographic crack detection. *QIRT Journal*. 2011;8(1):119–23.
- [6] Maldague X., *Theory and practice of infrared technology for non-destructive testing*. New York, NY: Wiley; 2001.
- [7] Li T, Almond DP, Rees DAS. Crack imaging by scanning laser-line thermography and laser-spot thermography. *Measurement Science & Technology*. 2011;22:14.
- [8] Cramer KE, Winfree WP. Thermal characterization of defects in aircraft structures via spatially controlled heat application. Proceedings of SPIE 2766, *Thermosense XVIII*; 1996;202–9.
- [9] B. Oswald-Tranta and M. Sorger, “Scanning pulse phase thermography with line heating,” *QIRT Journal*, vol. 9, no. 2, 2012, in print.
- [10] X. Maldague and S. Marinetti, “Pulse phase infrared thermography,” *J.Appl.Phys.*, vol. 79, no. 5, pp. 2694–2698, 1996.
- [11] Shepard S.M., Lhota J.R., Ahmed T. Flash thermography contrast model based on IR camera noise characteristics. *Journal of Nondestructive Testing & Evaluation*. 2007;22(2):113–26.
- [12] Busse G., Wu D., Karpen W. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography, *Journal of Applied Physics*. 1992;71(8):3962–5.
- [13] FLIR Systems, Inc. Available from: <http://www.flir.com>