

Prüfung von verdeckten Fehlern mit lateralen Wärmeflüssen

Sergey LUGIN *

* LZPQ, Universität des Saarlandes

* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

Campus E3 1, 66123 Saarbrücken

sergey.lugin@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung. In dieser Arbeit wird ein neuer Ansatz zum Nachweis von verdeckten Fehlern unter Verwendung von erzeugten lateralen Wärmeflüssen im Probenvolumen präsentiert. Er basiert auf der Ausbreitung der Wärmewelle in lateraler Richtung im Probenvolumen und der gleichzeitigen Beobachtung der Oberflächentemperaturverteilung. Dieser Ansatz ermöglicht es, schmale verdeckte Fehler/Risse zu erkennen, die mit den herkömmlichen Untersuchungsmethoden (Impuls, Lock-in und Flying-Spot Thermographie) nicht oder schwer zugänglich sind. Die bereits vorliegenden experimentellen Untersuchungen weisen darauf hin, dass dieser Ansatz in industriellen Prüfprozessen angewandt werden kann.

1. Einführung

Die ständige Entwicklung von neuen Materialien und neuen Konstruktionslösungen stellt immer neue Herausforderungen für die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) dar. Dies führt zu einer Weiterentwicklung der ZfP Technik, insbesondere der thermischen Prüfverfahren.

Ein breiter Überblick über die thermischen Prüftechniken wird in [1] gegeben. Die Verfahren bieten verschiedene Variationen in einseitiger oder doppelseitiger Prüfung, bei den Anregungsmethoden (Blitzthermographie (PT), Lock-in Thermografie (LT), Stufenheizung (SH) und Ultraschall-Thermographie (VT)) und bei den Anregungsquellen (Blitz, Laser und Induktion).

1.1 Prüfung von verdeckten Fehlern

Der klassische Fall ist die Prüfung einer Flachbodenbohrung durch Blitz- und Lock-in Thermographie. Während einer kurzen Zeit wird die vordere Seite der Probe angeregt. Die erzeugte thermische Welle breitet sich im Probenvolumen aus und wird von dem verdeckten Fehler / Flachbodenbohrung reflektiert. Diese Reflektion führt zu einem thermischen Kontrast auf der Vorderseite der Probe.



Eine empirische Regel [2] für die einseitige Prüfung (in thermischer Reflexion) besagt, dass *der Radius des kleinsten nachweisbaren Fehlers mindestens ein- oder zweimal größer sein sollte als seine Tiefe unter der Oberfläche*. Die praktische Erfahrung zeigt, dass der Nachweis von Fehlern mit einem Verhältnis von Durchmesser zu Tiefe von kleiner als 0,8 nahezu unmöglich ist.

1.2 Prüfung von Oberflächenfehlern

Die thermische Prüftechnik wird oft für die Prüfung von Oberflächenfehlern eingesetzt. Dabei werden zwei Prüfverfahren (Induktions- und Flying-Spot Thermographie) verwendet.

In beiden Fällen werden die Wärmeflüsse an der Oberfläche einer untersuchten Probe angeregt. Ein Oberflächenfehler (ein Riss oder ein Einschluss) beeinflusst die Ausbreitung des Wärmeflusses und kann in der thermischen Verteilung auf der Oberfläche der Probe eindeutig identifiziert werden.

Die Prüfung von Oberflächenfehlern durch Induktionsthermographie und Flying-spot Thermographie wurde in mehreren Arbeiten [3-9] untersucht.

2. Grenzen der konventionellen Prüfmethoden

Die konventionellen Prüfmethoden (Impuls / Lock-in Thermografie und Stufenheizung) für die Prüfung von verdeckten Fehlern basieren auf der Ausbreitung der thermischen Welle in Richtung senkrecht zur Probenoberfläche. In Abb. 1 sind die Wärmeflüsse schematisch dargestellt.

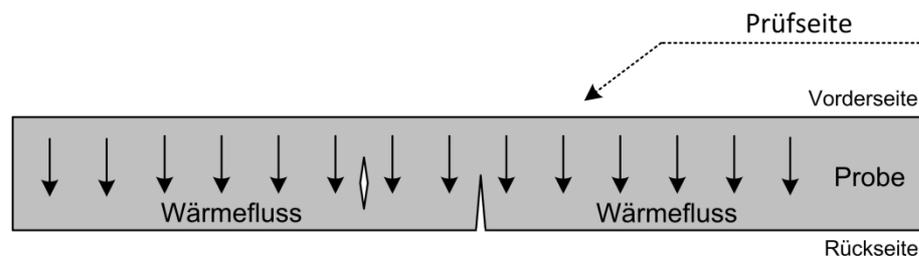


Abb. 1. Ausbreitung der thermischen Welle in der konventionellen Prüfung mit flächiger Anregung.

Die Ausbreitungsrichtung der thermischen Welle ist entscheidend für die Prüfung von verborgenen Strukturen. Fehler mit signifikanten lateralen Abmessungen reflektieren die erzeugte Welle und können gut geprüft werden. Die schmalen, verdeckten Fehler/Risse werden die Ausbreitung der thermischen Welle kaum beeinflussen. Auf Grund Ihrer Geometrie können die Fehler in der konventionellen Prüfung nicht eindeutig nachgewiesen werden.

3. Laterale Wärmeflüsse

In dieser Arbeit wurde ein neuer Ansatz [10] untersucht. Wir verwenden den Begriff neu, weil der Ansatz einige wesentliche Unterschiede zur Methode der Oberflächenrissprüfung (Flying-Spot Thermographie) aufweist.

Um einen verdeckten Riss zu detektieren, soll die thermische Welle in der lateralen Richtung im Probenvolumen erzeugt werden. In dem in Abb. 1 dargestellten Fall mit ausschließlichem Zugang von der Vorderseite her ist eine direkte Erzeugung von lateralen Wärmeflüssen kaum möglich. Deshalb wird eine zweistufige Erzeugung verwendet.

Im ersten Schritt wird ein Punkt auf der Oberfläche der Probe während einer längeren Zeit angeregt. Verschiedene Quellen (Laser, Heißluft oder Induktion) können eingesetzt werden. Bei dieser Anregung wird der thermische Impuls bzw. die thermische Welle mehrfach von Vorder- und Rückseite reflektiert. Dabei wird das Volumen über die Dicke der Probe erwärmt. Im zweiten Schritt erhält man die nachfolgende Erzeugung einer thermischen Welle in der lateralen / seitlichen Richtung. Dieser Prozess ist in Abb. 2 für drei Zeitpunkte ($t_1 < t_2 < t_3$) schematisch dargestellt.

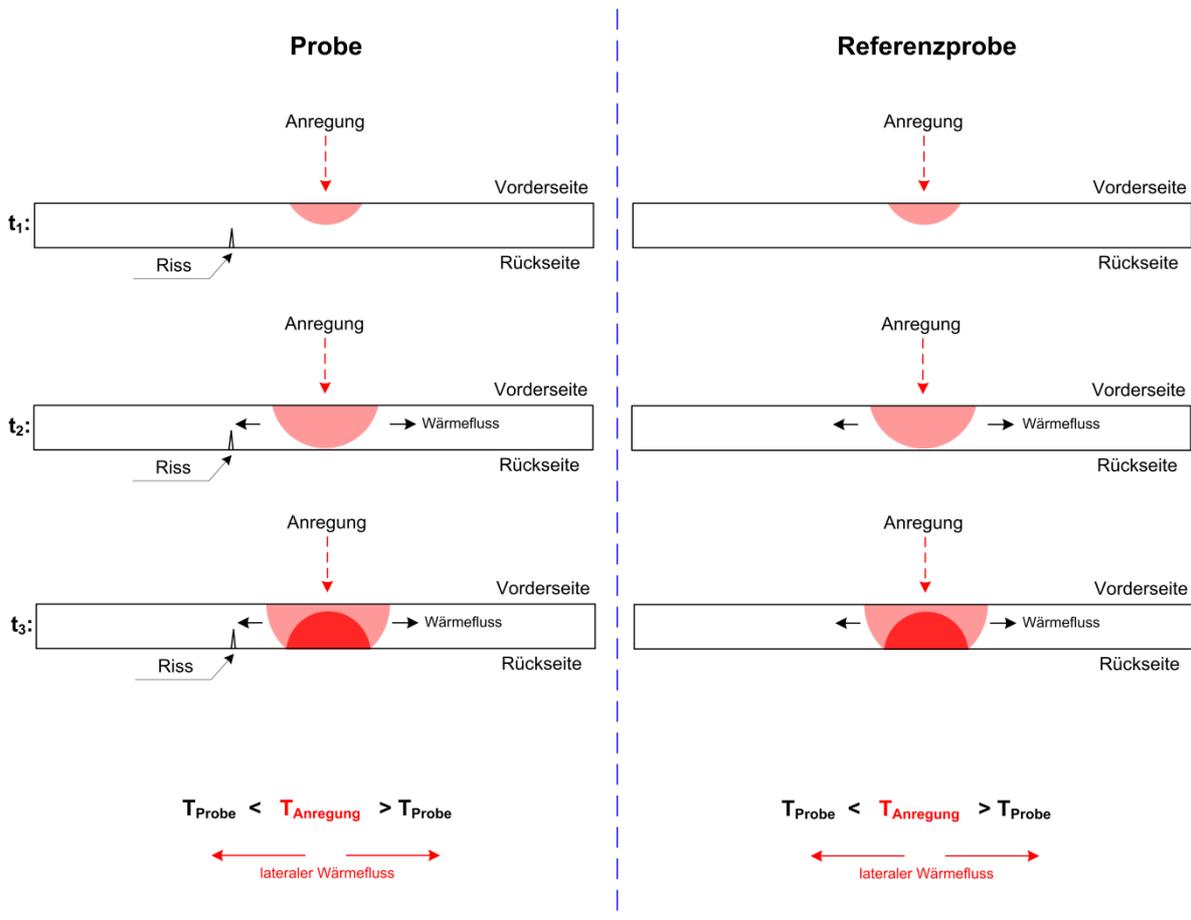


Abb. 2. Prüfung eines verborgenen Risses durch laterale Wärmeflüsse.

Um eine Schwächung der Welle zu vermeiden, wird die Anregung fortgesetzt. Dadurch wird die weitere Ausbreitung der Welle in der lateralen Richtung aufrechterhalten. Ein verborgener Riss / Fehler wirkt als eine thermische Barriere und reflektiert einen Teil der Energie zurück. Die Fläche zwischen dem angeregten Punkt und dem Fehler wird eine höhere Temperatur im Vergleich mit der fehlerfreien Referenzprobe aufweisen (siehe Abb. 3). Das wesentliche Problem ist, dass diese Temperaturdifferenz aufgrund der thermischen Diffusion und von Emissivitätsunterschieden nicht direkt gemessen werden kann. Um die Temperaturdifferenz abzubilden, muss die Temperaturverteilung der zu untersuchenden und der Referenzprobe unter Berücksichtigung der Emissivität normiert werden.

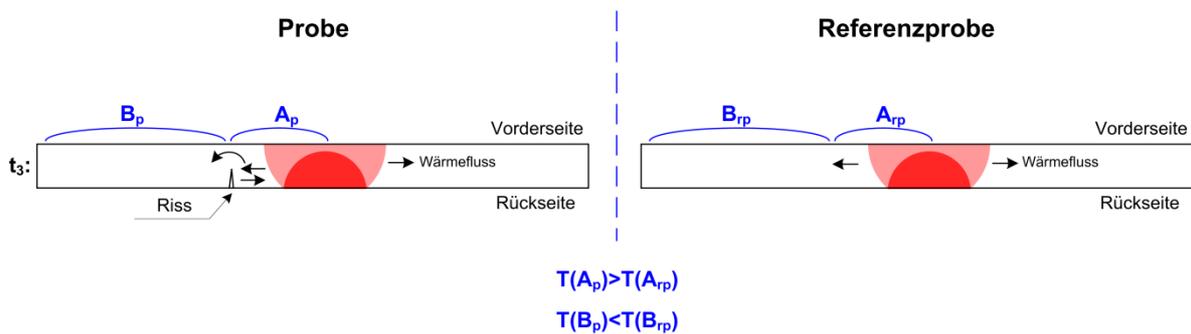


Abb. 3. Schema der erzeugten Temperaturdifferenz an der Vorderseite in zwei Probenbereichen.

4. Experimentelle Untersuchungen

Der Ansatz wurde experimentell untersucht. Dafür wurden zwei Stahlproben (eine Referenzprobe und eine Probe mit einem verborgenen Riss / Defekt) hergestellt. Der Aufbau der Proben ist in Abb. 4 (a-b) dargestellt.

Die Proben wurden mit der Laser-Anregung geprüft. Die Prüfanordnung ist in Abb. 4(c) schematisch illustriert. Die Anregungsleistung war 25 W und der Laserstrahldurchmesser 4 mm. Die gesamte Messzeit betrug 50 Sekunden und umfasste zwei Phasen: Die Anregungsphase (10 Sekunden) und die Abkühlungsphase (40 Sekunden). In der Anregungsphase geschehen die Erzeugung und die Ausbreitung der lateralen Wärmeflüsse im Probenvolumen. In der Abkühlungsphase wird das thermische Gleichgewicht der Probe erreicht, um die Emissivitätskorrektur durchzuführen.

Infrarotbilder der Probe aus der ersten Phase sind in Abb. 4(d-e) dargestellt.

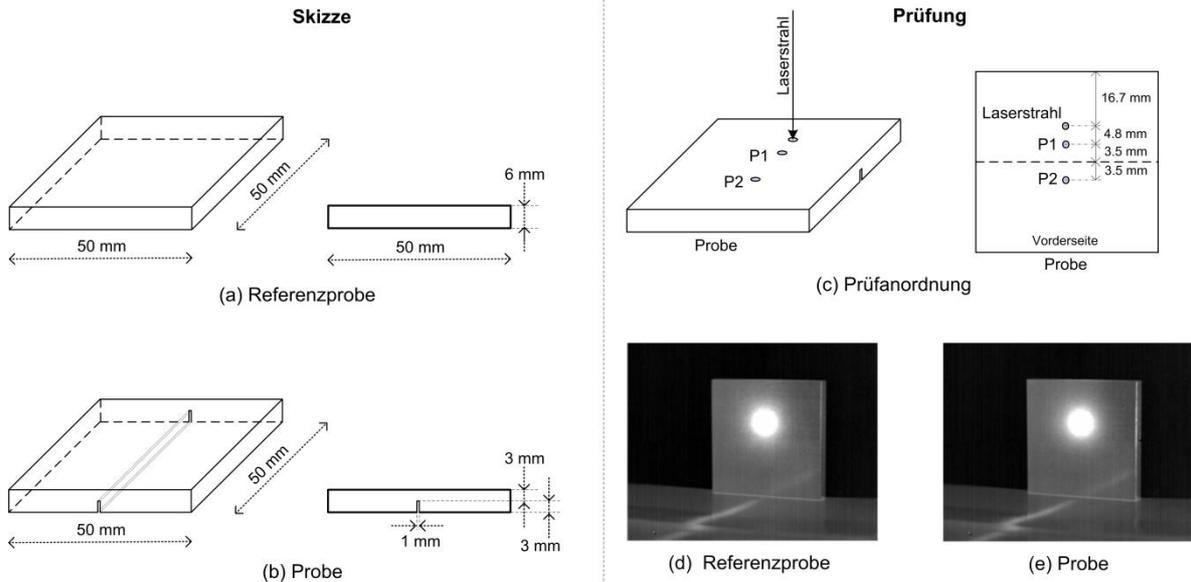


Abb. 4. (a) Skizze der Referenzprobe, (b) Skizze der zu untersuchenden Probe, (c) Prüfanordnung, (d) Infrarotbild der Referenzprobe, (e) Infrarotbild der zu untersuchenden Probe.

Abb. 5 zeigt ein wesentliches Merkmal. Der thermische Einfluss des Risses / Fehlers kann nicht im Temperaturverlauf (und im Infrarotbild) festgestellt werden. Die Gründe sind thermische Diffusion und Variationen in der Oberflächenemissivität.

- 1) Die starke Dämpfung durch Diffusion unterdrückt deutlich die Erkennbarkeit des verborgenen Fehlers.
- 2) Der Mittelwert des Emissionsgrads auf einer Stahloberfläche ist 0,4. Dieser Wert ist nicht in allen Punkten auf der Oberfläche konstant, sondern variiert im Bereich von 10%. Das bedeutet, dass selbst im Falle einer absoluten gleichmäßigen Temperatur (30° C) die Temperaturschwankungen auf Grund der Emissivitätsunterschiede höher sind als der Effekt durch den thermischen Einfluss des verborgenen Fehlers.

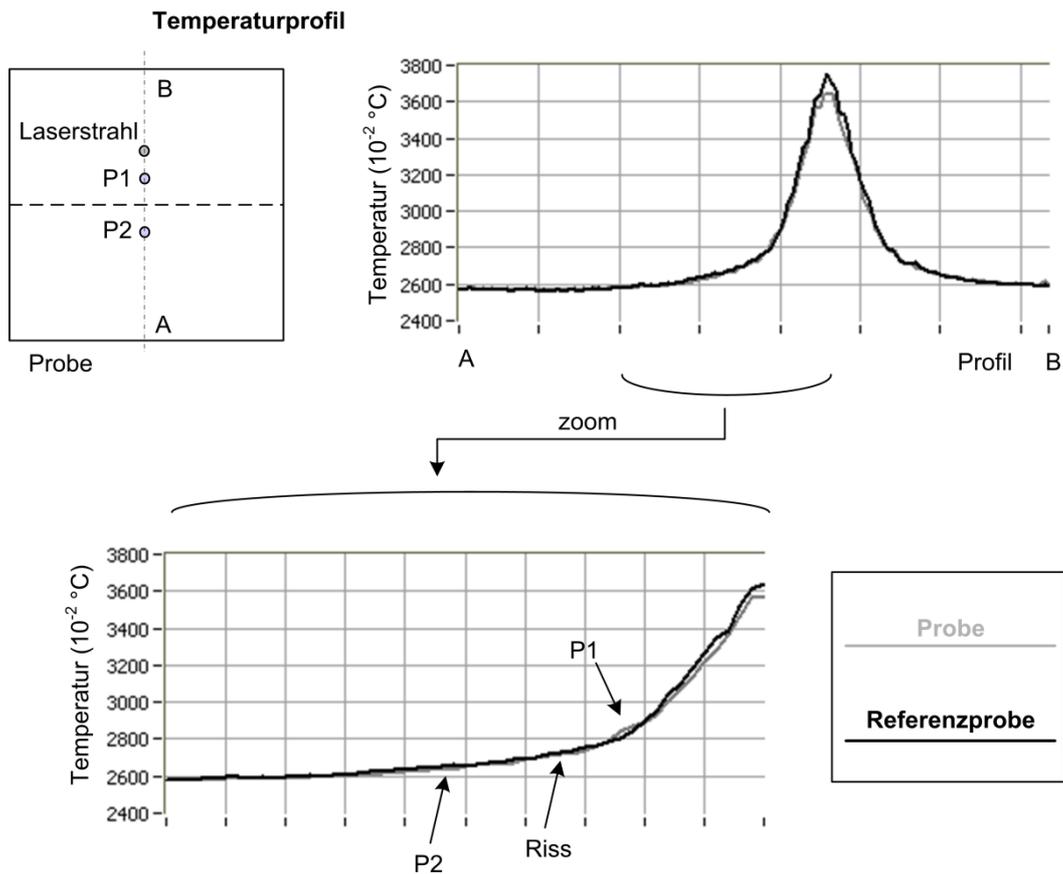


Abb. 5. Temperaturprofile am Ende der Anregungsphase (nach 9 Sekunden).

Um die Temperaturunterschiede zu detektieren, wird eine Rekonstruktionsmethode [10] angewendet. Die Methode normiert den Temperaturverlauf in Bezug auf die Temperatur des thermischen Gleichgewichts. So können die dynamischen Unterschiede quantitativ analysiert werden, die innerhalb der Emissivitätsschwankung liegen.

In Abb. 6 wird die Differenz der normierten Temperatur am Ende der Anregungsphase abgebildet.

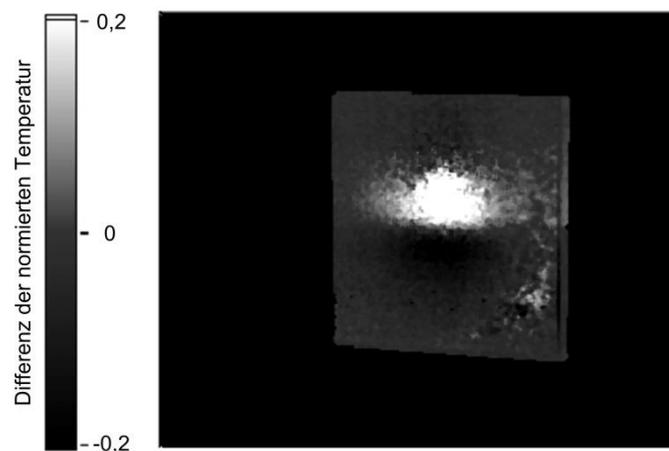


Abb. 6. Differenz der normierten Temperatur.

5. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein neuer Ansatz zur Detektion von verborgenen Fehlern, insbesondere Rissen, experimentell untersucht. Der Ansatz basiert auf der gezielten Erzeugung von Wärmeflüssen in lateraler Richtung im Probenvolumen und der Analyse der Oberflächentemperaturverteilung in der Umgebung der Risse. Für den Abgleich des komplexen Wärmeausbreitungsprozesses benötigt das Verfahren eine Messung an einer Referenzprobe.

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einer Stahlprobe mit einem verborgenen Fehler durchgeführt, dessen laterale Ausdehnung und Orientierung außerhalb der empirisch bestimmten Grenze für die konventionelle thermische Inspektion liegt. Der Fehler wurde erfolgreich nachgewiesen.

Referenzen

- [1] X. Maldague. Theory and Practice of Infrared Technology for Non-Destructive Testing. John Wiley & Sons, 2001.
- [2] V.P. Vavilov and R. Taylor. Theoretical and Practical Aspects of the Thermal Non-Destructive Testing of Bonded Structures. Research Techniques in Non-Destructive Testing, 5:238-279, 1982.
- [3] U. Netzelmann and G. Walle. Induction Thermography as a Tool for Reliable Detection of Surface Defects in Forged Components. Proceedings of 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008.
- [4] Y.Q. Wang, P.K. Kuo, L.D. Favro and R.L. Thomas. Flying Laser Spot Thermal Wave IR Imaging of Horizontal and Vertical Cracks. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 9:511-516, 1990.
- [5] C. Gruss and D. Balageas. Theoretical and experimental applications of the flying spot camera. Proceedings of Conference "Quantitative Infrared Thermography QIRT 92", Eurotherm Seminar 27:19-24, 1992.
- [6] J.L. Bodnar, C. Menu, M Egée, P. Pigeon and A. Le Blanc. Detection of wear cracks by photothermal radiometry. Wear, 162:590-592, 1993.
- [7] J. Varis and R. Lehtiniemi. A thermal nondestructive evaluation system for detecting vertical cracks in unidirectional carbon fiber composites. Review of Scientific Instruments, 68(7):2818-2821, 1997.
- [8] S. E. Burrows, A. Rashed, D. P. Almond and S. Dixon. Combined laser spot imaging thermography and ultrasonic measurements for crack detection. Nondestructive Testing and Evaluation, 22(2):217-227, 2007.
- [9] T. Li, D.P. Almond and D.S. Rees. Crack imaging by scanning pulsed laser spot thermography. NDT&E International, 44(2):216-225, 2011.
- [10] S. Lugin. Detection of Hidden Defects by Lateral Thermal Flows. NDT&E International, 56:48-55, 2013.