

Einsatz der aktiven Thermografie zur Detektion von Schweißfehlern beim Rührreibschweißen

Malte MUND *, Fabian FISCHER *, Klaus DILGER *, Igor KRYUKOV**,
Michael HARTMANN**, Stefan BÖHM**

* Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs), TU Braunschweig

** Fachgebiet Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff), Universität Kassel

Kurzfassung. Das Rührreibschweißen ist ein Schweißverfahren, bei dem die Interaktion eines rotierenden Werkzeugs mit den Fügeteilen Reibungswärme erzeugt, die einen viskoplastischen Bereich in der Fügezone zur Folge hat. Die eingebrachte Wärme reicht aus um Fügeteile stoffschlüssig zu verbinden. Die linienförmigen Verbindungen können sowohl als Stumpf- als auch als Überlappstoß ausgeführt sein. Während des Schweißprozesses kann es jedoch zu Schweißimperfectionen kommen. So können z. B. unvollständige Durchschweißungen oder sogenannte Tunnelfehler entstehen.

Diese Imperfectionen verringern die Tragfähigkeit der Schweißungen, weshalb Maßnahmen zur Qualitätssicherung getroffen werden müssen. Im Fokus dieser Arbeit steht aus diesem Grund die aktive Thermographie als eine abschließende zerstörungsfreie Werkstoffprüfung. Dazu werden zwei Verfahrensansätze zur zerstörungsfreien Prüfung mittels aktiver Thermografie vorgestellt und hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit zur zerstörungsfreien Prüfung von Rührreibschweißungen bewertet.

Als Anregungsquelle wird sowohl die elektromagnetischen Induktion als auch Hochleistungsumschall betrachtet. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich auf die Detektion von unvollständigen Durchschweißungen in linienförmigen Stumpfstoßverbindungen. Die Verfahrensgrenzen der aktiven Thermographie in Abhängigkeit der Anregungsquelle werden ermittelt, dargestellt und anhand der Ergebnisse von zerstörenden und zerstörungsfreien Vergleichsprüfungen (z. B. Farbeindringprüfung) bewertet.

1. Einführung

In den vergangenen Jahren hat sich das Rührreibschweißen als Fügetechnik für Aluminiumwerkstoffe in industriellen Anwendungen (z. B. Schiffsbau und Luft- und Raumfahrt) etabliert. Bei diesem Verfahren wird durch die Interaktion eines rotierenden Werkzeugs mit den Fügepartnern im Fügebereich eine viskoplastische (nicht schmelzflüssige) Zone erzeugt. Durch das Verfahren des Werkzeugs relativ zu den Werkstücken wird die Fügezone „verrührt“ und es kommt zur Ausbildung einer asymmetrischen Schweißnaht, die sowohl an der Ober- als auch der Unterseite flach ist und keine Schweißspritzer aufweist. Dabei wird kein Zusatzwerkstoff zugeführt. Die Festigkeitseigenschaften der auf diese Weise erzeugten Schweißungen können, in



Abhängigkeit der verwendeten Aluminiumlegierungen und nachfolgender Wärmebehandlungen, zwischen 80-100 % der Festigkeit des Grundwerkstoffs erreichen. [1]

Durch die Wahl geeigneter Schweißparameter ist eine können gute Schweißergebnisse erzielt werden. Allerdings ist eine Prozesskontrolle auf Grundlage der Überwachung der Schweißparameter nicht ausreichend um fehlerfreie Schweißungen zu garantieren. So kann es vorkommen, dass der Schweißprozess parametermäßig fehlerfrei ausgeführt wird, jedoch aufgrund eines ungenügenden Verrührens des Grundwerkstoffs, ein mangelhaftes Eindringen des Schweißpins oder aufgrund zu geringer axialer Scherkräfte verfahrenstypische Schweißfehler entstehen, die durch die Überwachung der Prozessparameter nicht detektiert werden können. Eine weitere Fehlerquelle sind unzureichend vorbehandelte Oberflächen. Diese nicht zu überwachenden Einflüsse führen zu typischen Schweißfehlern, die in die nachfolgenden Kategorien eingeordnet werden können:

1. Unvollständige Nahtanbindung (ungenügende Durchschweißung)
2. Wurzelfehler (schwache Anbindung oder nur teilweise geschweißt)
3. Fehlstellen (normalerweise an der gleichläufigen Seite, „Tunnelfehler“)
4. Partikelansammlungen (Oxide oder Partikel einer 2. Phase) im Bereich der Prozesszone unter der Schulter, im Nugget oder auch in der Nahtwurzel

Werden die Fehler verglichen, stellen insbesondere die Fehler der Kategorien 1 und 2 Fehlstellen dar, die automatisiert nur schwer zerstörungsfrei zu detektieren sind. Bei unvollständigen Nahtanbindungen liegen die Fügepartner eng beieinander und scheinen verbunden zu sein, jedoch ist keine stoffschlüssige Verbindung vorhanden. Wurzelfehler hingegen sind zwar komplett durchgeschweißt, allerdings gibt es Partikel einer zweiten Phase oder Oxide aus der Wurzel der Naht, die in mehr oder weniger geschlossenen Ansammlungen vorliegen und in den Nugget (Kernzone der Schweißung) hineinreichen. Da beide Fehler die Festigkeiten der Schweißnähte, insbesondere unter Dauerbeanspruchung beeinträchtigen, müssen zerstörungsfreie Prüfverfahren geeignet sein, diese Fehlstellen zuverlässig zu detektieren. [2;3]

In der Vergangenheit wurden verschiedene Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur Prüfung von Rührreibschweißungen untersucht. So wurden in [4] sowohl Durchstrahlungsprüfungen als auch die Ultraschalltauchtechnik betrachtet. Zudem wurde in diesem Zusammenhang eine Prozessoptimierung mittels Hochleistungsultraschall vorgeschlagen. Weitere Ansätze beziehen sich auf die Anwendung der Radiographie, verschiedener Wirbelstromverfahren und magnetische Widerstandsmessungen [3]. Weitere Prüfverfahren, die zwar gute Ergebnisse liefern, allerdings für eine Serienproduktion nur eingeschränkt geeignet sind, sind Prüfungen mittels nicht-linearer sowie hochfrequenten (Laser-)ultraschall und Phased-Array-Prüfköpfen. Zudem wurde die Anwendung von gepulstem Wirbelstrom untersucht. [5;6;7;8;9;10]

Diese Studie beschäftigt sich mit der Eignung der aktiven Thermografie zur Detektion von unvollständigen Durchschweißungen, wobei als Anregungsquellen Hochleistungsultraschall und die elektromagnetische Induktion eingesetzt werden. Die Ergebnisse werden dargestellt und mit denen anderer Prüfverfahren verglichen, um die Eignung der Verfahren bewerten zu können

2. Schweißproben

Die Untersuchungen zur der Detektierbarkeit von unvollständigen Durchschweißungen wurden an flachen Schweißproben aus der Aluminiumlegierung EN AW 5454 mit einer Breite von 200 mm und einer (Schweißnaht)länge von 300 mm durchgeführt. Die Schweißungen wurden als Stumpfstoß ausgeführt, wobei die Blechdicken 2 mm betragen. Zur Durchführung der Messungen wurden alle Proben geschwärzt um Reflexionen zu vermeiden. Der Fehler wurde ausgehend vom Beginn der Schweißnaht aus eingebracht und nimmt zu deren Ende kontinuierlich ab. Abb. 1 zeigt exemplarisch eine der Schweißproben, die für die ultraschallangeregte Thermografie eingespannt ist. Die geschwärzte Probe ist dazu in einer Transmissionsanordnung mit der Sonotrode gegen einen Gegenhalter eingespannt.

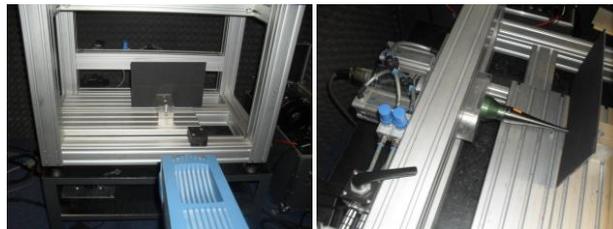


Abb. 1. Prüfkörper und Aufbau der Versuchsanordnung bei der ultraschallangeregten Lockin Thermografie

3. Ultraschallangeregte Thermografie

Der erste Teil der Arbeiten beschäftigt sich mit der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie. Diese Messmethode zeichnet sich durch eine defektselektive Erfassung von Fehlern aus. Um die Eignung der Messmethode zu untersuchen, wurde ein Messsystem der Fa. edevis GmbH eingesetzt. Dazu wurde eine Lockin-Anregung mittels Hochleistungsultraschall mit einem Ultraschallgenerator vom Typ Branson 2000B über eine Sonotrode mit einer Sonotroden-Frequenz von 20,03 kHz auf die Proben aufgeprägt. Alle Messungen erfolgten in Transmissionsanordnung, wobei zwei verschiedene Szenarien betrachtet wurden. Zum einen wurde die Detektierbarkeit der Fehler auf der Schweißnahtoberseite bewertet, zum anderen die an der Schweißnahtunterseite. Exemplarische Ergebnisse dieser Messungen zeigt Abb. 2.

Beide betrachteten Varianten ermöglichen die Detektion der eingebrachten Schweißfehler. Sowohl bei der Betrachtung der Vorderseite der Schweißnaht als auch bei der Betrachtung der Rückseite lassen sich nach der Auswertung im Frequenzbereich deutliche Phasenverschiebungen im Bereich der Schweißnaht erkennen, die durch die Reibung der Grenzflächen im Bereich der unvollständig durchgeschweißten Proben entstehen.

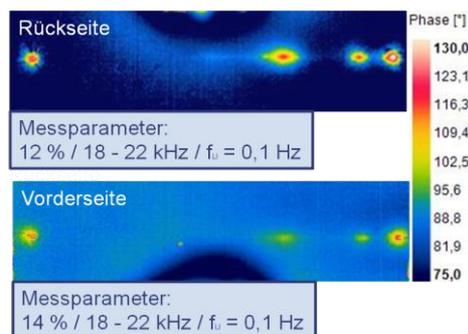


Abb. 2. Phasenbilder der Probe 1706_01 infolge der ultraschallangeregten Lockin-Thermografie unter Berücksichtigung der Probenseite

Mit Hilfe der Messungen konnte die prinzipielle Eignung der Messmethode zur Detektion von unvollständigen Durchschweißungen an allen Prüfkörpern nachgewiesen werden, wobei sich zwei Herausforderungen ergeben: Zum einen zeigte sich in den Messungen, dass für eine Fehlerdetektion an der Schweißnahtoberseite höhere Anregungsleistungen notwendig sind und die Fehlerdetektion trotzdem nicht die Qualität der rückseitigen Betrachtung erreicht. Dies schränkt die Eignung der Methode insbesondere unter Berücksichtigung einer möglichen automatisierten Prüfung von Bauteilen mit einseitiger Zugänglichkeit von der Nahtoberseite stark ein. Im Rahmen der Versuchsreihen konnte ein Abfall der detektierbaren Länge der unvollständigen Durchschweißung von ca. 30 % im Vergleich zur Betrachtung der Rückseite ermittelt werden. Zum anderen stellt die Einspannung der Proben ein Problem dar. Durch die direkte Einspannung über die Sonotrode kommt es in diesem Bereich zu einer Erwärmung der Probe und zu einer anregungsinduzierten Phasenverschiebung in der Auswertung. Diese ist der Phasenverschiebung überlagert, die durch die unvollständige Durchschweißung ausgelöst wird und beeinträchtigt somit das Messergebnis erheblich. Dadurch wird eine exakte Fehlerdetektion erschwert (Abb. 3). Eine Unterscheidung zwischen der anregungsbedingten und der durch den Fehler ausgelösten Phasenverschiebung ist nicht möglich.

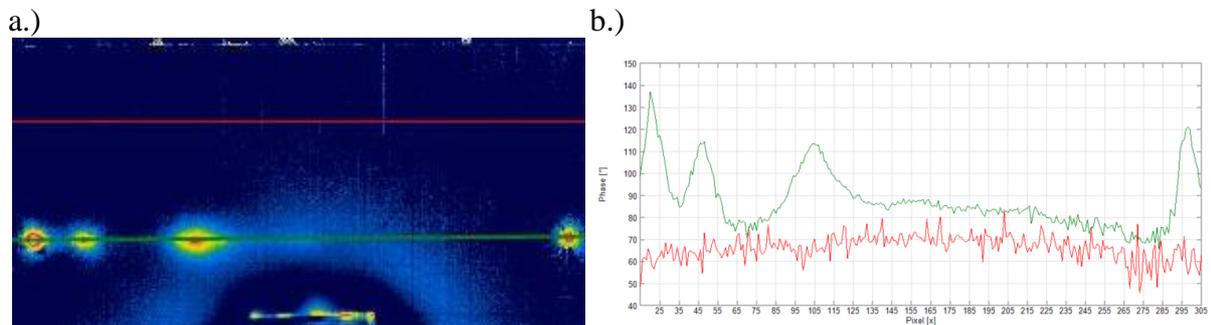


Abb. 3. a.) Phasenbild und b.) Phasenverlauf im Bereich der Schweißnaht (grün) und im Grundwerkstoff (rot)

4. Induktiv angeregte Thermografie

Als zweites thermografisches Verfahren wurde die induktiv angeregte Puls-Phasen-Thermografie betrachtet. Auch in diesem Fall wurde mit einer Transmissionsanordnung gearbeitet. Zur Durchführung der Messung an den Schweißproben wurde in einem ersten Schritt die Eignung verschiedener Induktoren zur Prüfung der Schweißungen untersucht. Dazu wurden die resultierenden Phasenbilder nach einer Diskreten Fourier-Transformation (DFT) bewertet und auf Grundlage der Ergebnisse eine wassergekühlte Spule vom Typ KT104 der Fa. IFF GmbH ausgewählt. Die Spule sowie das in der fehlerfreien Referenzprobe gemessene Phasenbild sind in Abb. 4 dargestellt.

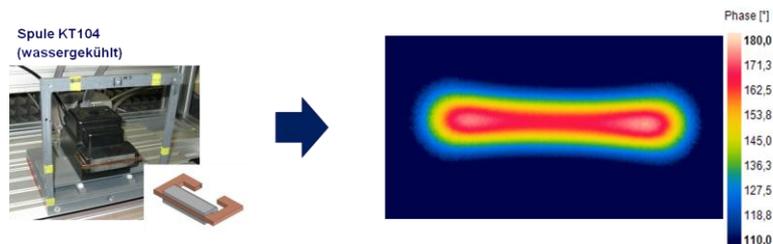


Abb. 4. Wassergekühlter Induktor KT104 der Fa. IFF GmbH (links) und resultierendes Phasenbild (rechts)

Mit der ausgewählten Spule wurden die Proben abschnittsweise induktiv angeregt, wobei zwei verschiedene Anordnungen des Induktors zur Schweißnaht betrachtet wurden. Zum einen wurde der Induktor direkt hinter der Schweißnaht positioniert, zum anderen wurde eine versetzte Anordnung (5 mm oberhalb der Schweißnaht) betrachtet. Für beide Anordnungen wurde sowohl eine von der Nahtober- als auch der Nahtunterseite ausgehende Anregung untersucht. Nachfolgend ist in Abb. 5 das Ergebnis der Prüfung an der Probe Nr. 1706_01 dargestellt, bei der die Anregung auf der Nahtoberseite erfolgte und die Messung an der Nahtunterseite durchgeführt wurde.

Es konnte an dieser Probe gezeigt werden, dass der Nachweis von unvollständigen Durchschweißungen prinzipiell möglich ist. Im Phasenbild spiegelt sich diese unvollständige Anbindung im Phasenverlauf orthogonal zur Schweißnaht wieder. Allerdings ist die leichte Abflachung an der Stelle der unvollständigen Durchschweißung sehr gering.

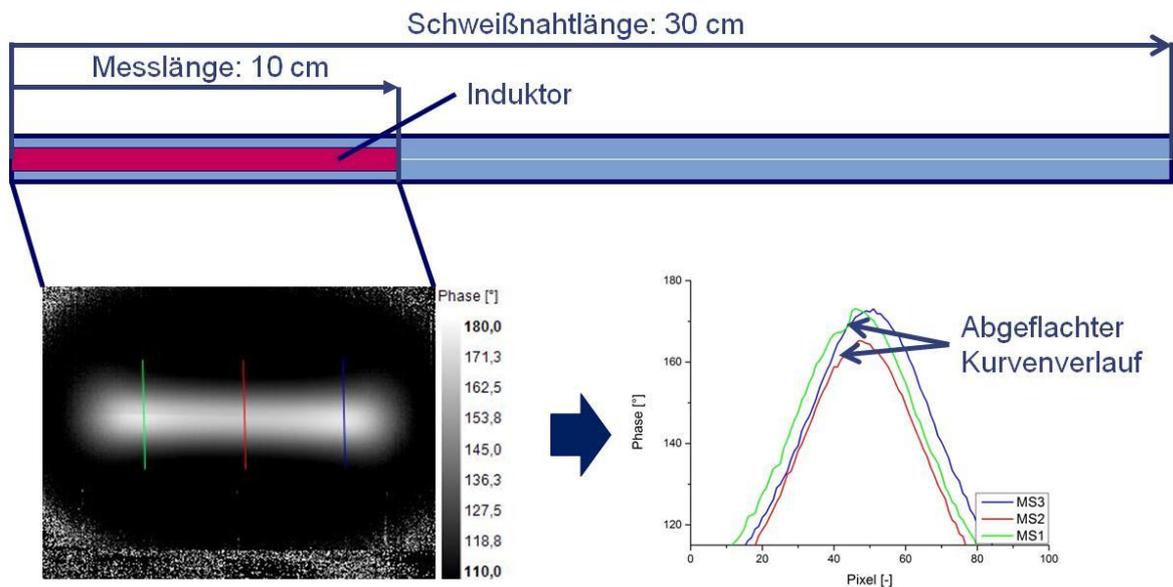


Abb. 5. Phasenbild und Phasenprofile der Schweißnaht 1706_1 - Induktor ist direkt hinter der Schweißnaht positioniert

Es zeigte sich, dass die mögliche Fehlerdetektion von der relativen Position des Induktors zur Schweißnaht abhängig ist. In Abb. 6 ist der Phasenverlauf der Probe dargestellt, wobei bei der Messung der Induktor um 5 mm versetzt wurde, sodass der Wirkungsbereich des Induktors oberhalb der Stoßkante lag. Durch den lateralen Wärmefluss, der an der unvollständigen Durchschweißung unterbrochen wird, ist die Phasenverschiebung in dieser Prüfanordnung wesentlich größer und es bildet sich ein deutlich asymmetrisches Phasenprofil (Abb. 6).

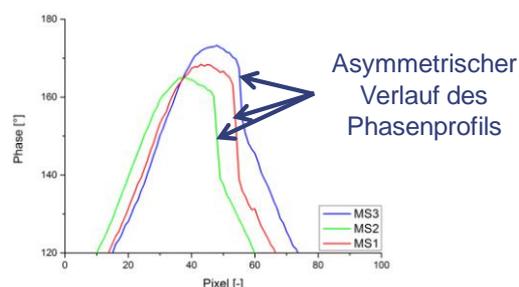


Abb. 6. Phasenprofile bei um 5 mm versetzter Induktorposition an der Probe 1706_1

Obwohl im Rahmen der Messungen die prinzipielle Eignung der Prüfmethode nachgewiesen werden konnte, ergeben sich Einschränkungen hinsichtlich der Anwendbarkeit. Zum einen konnte festgestellt werden, dass die Prüfrichtung erheblichen Einfluss auf die detektierbaren Fehler hat. Bei Anregung der Nahtunterseite konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse ermittelt werden. Zum anderen zeigte sich, dass nicht in allen Proben die Fehlstellen detektiert werden konnten und die Ultraschallanregung derzeit bessere Prüfergebnisse liefert. Allerdings besteht die Möglichkeit, den Induktor besser an die Prüfaufgabe anzupassen, was eine wesentliche Verbesserung der Prüfergebnisse erwarten lässt[vgl. 11].

5. Zerstörungsfreie Referenzmessungen

Um die Ergebnisse der aktiven Thermografieverfahren zur Detektion von unvollständigen Durchschweißungen bewerten und die Verfahrensgrenzen einschätzen zu können, wurden zerstörungsfreie Prüfverfahren (Farbeindringverfahren, Röntgen und μ -CT) eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind nachfolgend dargestellt.

5.1 Farbeindringprüfung

Die Farbeindringprüfung ist gut geeignet, oberflächliche Risse einfach und zuverlässig zu detektieren und wurde daher als maßgebliche Referenzmethode eingesetzt. Die Ergebnisse der Farbeindringprüfung stimmen gut mit den Ergebnissen der ultraschallangeregten Thermografie überein (Abb. 7). Am Beispiel der Probe 1706_01 sind die Ergebnisse dargestellt. Allerdings ist der Kontrast, insbesondere für kleine Risse, beim Einsatz der ultraschallangeregten Thermografie deutlich höher. Bei induktiver Anregung ist die Fehlerdetektion derzeit schlechter als im Referenzverfahren, jedoch wird eine Verbesserung der Prüfergebnisse durch den Einsatz von für die Rissdetektion optimierten Induktoren angestrebt.

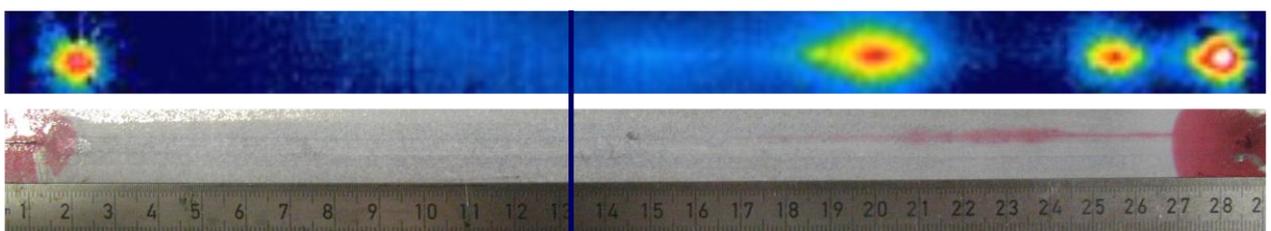


Abb. 7. Vergleich der Farbeindringprüfung und der Ergebnisse der ultraschallangeregten Thermografie anhand der Probe 1706_1

5.2 Durchstrahlungsprüfungen - Röntgen und μ -CT

Zudem wurden Durchstrahlungsprüfungen durchgeführt. Dabei wurden zum einen Röntgenbilder der Testplatten erzeugt und zum anderen μ -CT Messungen durchgeführt. Es zeigte sich, dass Röntgenuntersuchungen nicht als Referenzmethode zur Fehlstellendetektion geeignet sind, da die unvollständigen Durchschweißungen nicht zweifelsfrei zu detektieren waren. Die Ergebnisse der μ -CT Messungen der Probe 1706_1 sind in Abb. 8 exemplarisch dargestellt. Die Ergebnisse dieser Messungen bestätigen die

Resultate der ultraschallangeregten Thermografie. Allerdings versagt das CT-Verfahren bei zu geringen Ausprägungen der unvollständigen Durchschweißungen.

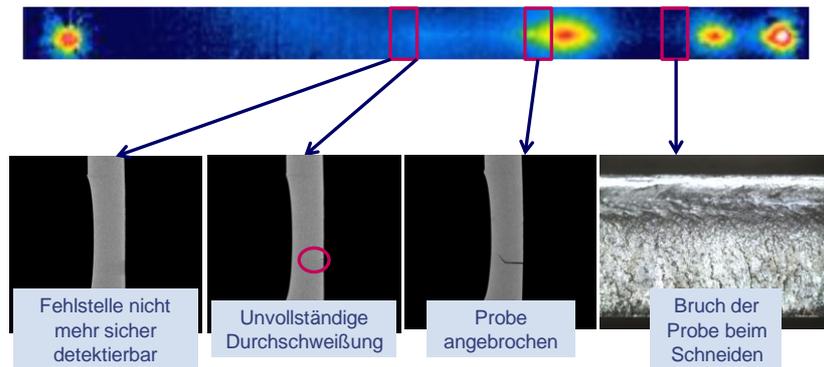


Abb. 8. Ergebnisse der μ -CT Messungen am Beispiel der Probe 1706_1

6. Schliffbilder

Ergänzend zu den zerstörungsfreien Prüfungen wurden Schliffbilder an verschiedenen Stellen der Schweißnaht entnommen, um die Detektionsgenauigkeit insbesondere bei den Proben mit schwacher Fehlerausprägung beurteilen zu können. Die Schliffe zeigen eine gute Übereinstimmung mit der ultraschallangeregten Thermografie, dargestellt anhand der Probe 1706_4 in Abb. 9. Die geringere Ausprägung der Fehlstelle 2 ist auch im Phasenbild deutlich detektierbar. In dieser Probe konnten weder mit der induktiv angeregten Thermografie noch mit μ -CT Messungen die unvollständige Durchschweißung nachgewiesen werden.

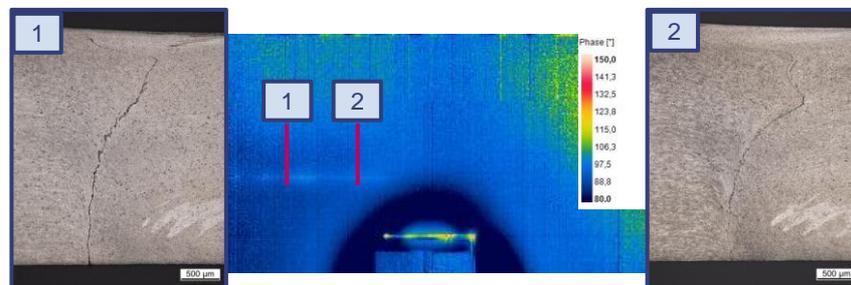


Abb. 9. Schliffbilder zur Beurteilung der Eignung der thermografischen Prüfverfahren zur Detektion unvollständiger Durchschweißungen

7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sowohl die Ultraschallanregung als auch die induktive Anregung der Prüfkörper prinzipiell geeignet sind, um unvollständige Durchschweißungen an rührreibgeschweißten Stumpfstößen zu detektieren. Die Ergebnisse der experimentellen Prüfungen, insbesondere die der ultraschallangeregten Thermografie, ergeben im Vergleich zu den eingesetzten Referenzverfahren sehr gute Prüfergebnisse. Allerdings konnten auch die Grenzen der Verfahren gezeigt werden und es besteht weiterer Forschungsbedarf, um die aktive Thermografie für die Prüfung von Rührreibschweißungen zu qualifizieren. Neben der Verbesserung der Detektion von unvollständigen Durchschweißungen bei der induktiv angeregten Thermografie durch die Anpassung der eingesetzten Induktoren ist auch der Nachweis der Detektierbarkeit von inneren Poren (Tunnelfehlern) und Oxidlinien zu

erbringen. Im Bereich der Ultraschallanregung ist zudem eine Minimierung der Überlagerung der Messergebnisse durch Anregungseffekte anzustreben.

8. Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17617 N der Forschungsvereinigung Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

9. Referenzen

- [1] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. ISBN 9783540694519; 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 2007.
- [2] Santos, T., Vilaca, P., Santos, J. d., Quintino, L.: A new NDT system for micro imperfections detection: application to FSW and FSpW. International Conference Advances in Welding and Allied Technologies, 2009. Welding in the World 52 (2008), S. 361–366.
- [3] Santos, T., Vilaca, P., Santos, J. d., Quintino, L.: Computational tools for modelling FSW and an improved tool for NDT. Welding in the World 53 (2009), S. R99-108.
- [4] Conrad, C., Dobmann, G., Wolter, B.: Neue Ansätze zur Überwachung und Optimierung des Rührreischweißens mit ZFP. DGZfP-Jahrestagung 2013.
- [5] Hirata, S., Sugiura, T.: Detection of closed crack by nonlinear acoustic using ultrasonic transducers; Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 32. Melville: American Institute of Physics, S. 277–282.
- [6] Lamarre, A., Moles, M.: Ultrasound phased array inspection technology for the evaluation of friction stir welds, Annual British Conference on NDT, 39. Northampton: British Institute of Non-Destructive Testing, S. 63–68.
- [7] Lévesque, D., Toubal, L., Cao, X., Dubourg, L.: Ultrasonic evaluation of friction stir welds and dissimilar intermixing using synthetic aperture focusing technique: NDT in Canada 2009 National Conference, Aug 25-27, 2009 London, Ontario, Canada.
- [8] Liu, F., Liu, S., Guo, E., Li, L.: Ultrasonic evaluation of friction stir welding. WCNDT, World Conference on NDT, 17. Shanghai: Chinese Society for Non-destructive Testing, S. 1–6.
- [9] Santos, T. G., Vilaca, P., Santos, J. d., Quintino, L., Rosado, L.: Innovative eddy current probe for micro defects. Innovative Wirbelstromsonde für Mikrofehler: QNDE, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 36. Melville: American Institute of Physics, S. 377–384.
- [10] Santos, T., Vilaca, P., Quintino, L.: Developments in NDT for detecting imperfections in friction stir welds in aluminium alloys. Welding in the World 52 (2008), S. 30–37.
- [11] Šrajbr, C.; Mehler, S.: Induktionsthermografie zur automatisierten Rissprüfung von Flugzeugstrukturen aus Aluminium. Thermographie-Kolloquium 2013.