

# Aktive Thermografie zur Fehlerdetektion in Aluminiumschweißungen am Beispiel rührreibgeschweißter Bleche

Malte MUND<sup>1</sup>, Stefan KRELING<sup>1</sup>, Klaus DILGER<sup>1</sup>, Igor KRYUKOV, Stefan BÖHM

<sup>1</sup> TU Braunschweig - Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs), Braunschweig

<sup>2</sup> Universität Kassel - Fachgebiet für Trennende und Fügende  
Fertigungsverfahren (tff), Kassel

**Kurzfassung.** Das Rührreibschweißen ist ein modernes Schweißverfahren, das sich durch einen geringen Wärmeeintrag in die Fügezone auszeichnet und hervorragende Ergebnisse hinsichtlich der Festigkeiten ermöglicht. Vor allem zum Schweißen von Aluminium findet das Verfahren eine immer weitere Verbreitung. Dabei wird über ein rotierendes Werkzeug Wärme erzeugt, die den Werkstoff in der Schweißzone plastifiziert und verrührt, sodass sich eine stoffschlüssige Verbindung ausbildet. Obwohl es sich um einen automatisierten und sehr robusten Fügeprozess handelt, kann es durch Schwankungen der Prozessparameter, durch Fertigungstoleranzen, durch Werkstoffschwankungen oder falsche Fügeparameter zu Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht kommen. Besondere Relevanz haben dabei innenliegende Poren und unvollständige Durchschweißungen.

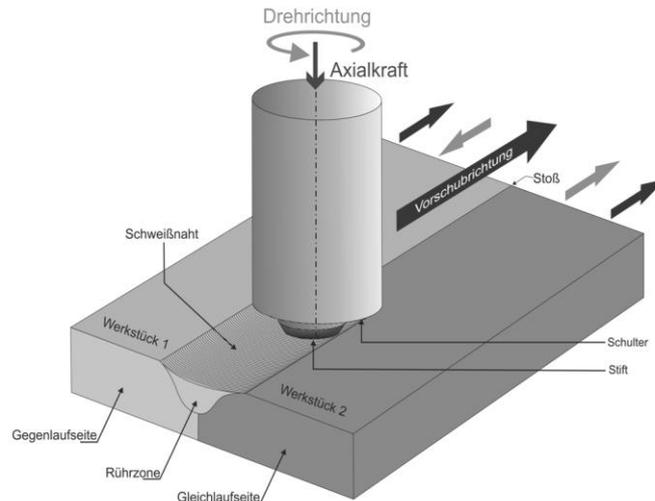
Im Rahmen des Projekts „ThermoFSW“ wurden definierte Unregelmäßigkeiten in Rührreibschweißungen eingebracht und mit Hilfe von zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen (z.B.  $\mu$ -CT und Schliffbildern) validiert. Aufbauend auf den Ergebnissen wurden die Möglichkeiten der induktiven Puls-Phasen-Thermografie sowie der Ultraschall angeregten Lockin-Thermografie zur Detektion dieser Unregelmäßigkeiten evaluiert. Dabei wurden schwerpunktmäßig linienförmige Schweißungen (Überlappschweißungen und Stumpfstöße) mit unterschiedlichen Fehlerausprägungen betrachtet.

Im Verlauf der Untersuchungen konnten die Möglichkeiten und Grenzen beider Thermografiertechniken aufgezeigt werden. Dabei zeigte sich, dass unvollständige Durchschweißungen an Stumpfstößen mit beiden Techniken sehr gut detektierbar sind. In dieser Studie werden die Ergebnisse der Ultraschall angeregten Lockin-Thermografie zur Prüfung von Stumpf- und Überlappstößen dargestellt.

## 1. Einführung

Das Rührreibschweißen (engl. Friction Stir Welding- FSW) ist ein vergleichsweise junges Schweißverfahren, das im Jahre 1991 vom „The Welding Institute“ (TWI, Cambridge, England) der Öffentlichkeit vorgestellt wurde. Dabei wird durch ein rotierendes Werkzeug, das aus einem zylindrischen Werkzeugschaft und einem zentrisch an der Stirnfläche (Schweißschulter) angebrachten Schweißstift besteht, Reibungswärme in der Fügezone generiert, wodurch das Material plastifiziert wird. Der Schweißprozess ist schematisch in Abb. 1 dargestellt.





**Abb. 1. Schematische Darstellung des Rührreißschweißprozesses [Quelle: tff Kassel]**

Der Schweißstift hat die Aufgaben die Reibungswärme zur Plastifizierung der Schweißzone zu generieren und das Schweißgut während der Vorschubbewegung zu verrühren. Die Schulter unterstützt, nachdem der Stift vollständig in die Fügezone eingetaucht ist, die Wärmeproduktion und ebnet die Schweißnaht ein. Durch den Prozess entsteht eine stoffschlüssige Verbindung zwischen den Fügepartnern. Im Gegensatz zu herkömmlichen Schmelzschweißverfahren liegen die Prozesstemperaturen unterhalb der Schmelztemperaturen des Grundwerkstoffs und die Schweißnaht ist eben, sodass die Kerbwirkung verringert wird. [1]

Der Prozess des Rührreißschweißens läuft vollautomatisiert ab und wird durch eine Kontrolle der Prozessparameter (insbesondere der Prozesskräfte) überwacht. Auf Basis dieser Daten kann auf Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht geschlossen werden. Um die Ausprägung der Unregelmäßigkeiten bewerten, und somit fehlerhafte Schweißnähte identifizieren zu können, bedarf es geeigneter zerstörungsfreier Prüfverfahren. Diese müssen in der Lage sein, kritische Unregelmäßigkeiten, deren Ausprägung außerhalb der in der Normung vorgegebenen Abnahmekriterien liegen, zu identifizieren. [2]

In dieser Arbeit werden die Möglichkeiten zur Detektion unvollständiger Durchschweißungen an Stumpfstößen mit Hilfe der Ultraschall angeregten Lockin-Thermografie beschrieben. Zudem werden unterschiedliche Durchschweißungen an Überlappstößen, die die Auswirkungen innerer Verformungen simulieren, betrachtet. Dazu wurden definierte Unregelmäßigkeiten in die Schweißnähte eingebracht, thermografische Messungen durchgeführt und anhand von Schlibfbildern bewertet.

## **2. Stand der Technik**

Nachfolgend ist der Stand der Technik kurz dargestellt. Zunächst werden die möglichen Unregelmäßigkeiten beim Rührreißschweißen vorgestellt. Anschließend wird ein Überblick über die derzeit eingesetzten zerstörungsfreien Prüfmethoden zur Beurteilung von Rührreißschweißungen gegeben.

### *2.1 Unregelmäßigkeiten beim Rührreißschweißen*

In der DIN EN ISO 25239-5 sind die Unregelmäßigkeiten, die beim Rührreißschweißen auftreten können sowie die Abnahmekriterien definiert. Die Unregelmäßigkeiten werden dabei in oberflächliche und innere Unregelmäßigkeiten eingeteilt. Während die oberflächlichen Unregelmäßigkeiten in der Regel durch eine Sichtprüfung bewertet werden

können, sind die inneren Unregelmäßigkeiten derzeit nur durch Schliffbilder sicher zu identifizieren. Eine Ausnahme im Bereich der oberflächlichen Unregelmäßigkeiten bilden unvollständige Durchschweißungen, für deren Nachweis ebenfalls makroskopische Untersuchungen durch Schliffbilder vorgeschrieben sind. Eine Übersicht über die Unregelmäßigkeiten, die Abnahmekriterien sowie die zulässigen Abnahmeprüfungen zur Qualifizierung der Schweißungen ist in Tabelle 1 gegeben. [3]

**Tabelle 1. Unregelmäßigkeiten beim Rührreibschweißen nach DIN EN ISO 25239-5 [3]**

<b>Bezeichnung der Unregelmäßigkeit</b>	<b>Prüfung und Untersuchung in ISO 25239-4</b>	<b>Abnahmekriterium</b>
Unvollständige Durchschweißung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Makroskopische Untersuchung</li> </ul>	Nicht zulässig
Zu große Wurzelüberhöhung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Makroskopische Untersuchung</li> <li>▪ Sichtprüfung</li> </ul>	$h \leq 3 \text{ mm}$
Gratbildung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Makroskopische Untersuchung</li> <li>▪ Sichtprüfung</li> </ul>	-
Kantenversatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Makroskopische Untersuchung</li> <li>▪ Sichtprüfung</li> </ul>	$h \leq 0,2 t \text{ oder } 2 \text{ mm}$ (je nachdem, welcher Wert geringer ist)
Nahtunterhang	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Makroskopische Untersuchung</li> <li>▪ Sichtprüfung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ für <math>t \geq 2 \text{ mm}</math> <math>h \leq 0,2t + 0,1t</math></li> <li>▪ für <math>t &lt; 2 \text{ mm}</math> <math>h \leq 0,15t</math></li> </ul>
Unregelmäßige Breite	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sichtprüfung</li> </ul>	-
Unregelmäßige Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sichtprüfung</li> </ul>	-
Schlauchporen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Makroskopische Untersuchung</li> </ul>	$d \leq 0,2s \text{ oder } 4 \text{ mm}$ (je nachdem, welcher Wert geringer ist)
Innere Verformungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Makroskopische Untersuchung</li> </ul>	-

Insbesondere die Unregelmäßigkeiten, für deren Nachweis derzeit nur makroskopische Untersuchungen in Form von Schliffbildern zulässig sind, stellen eine prüftechnische Herausforderung dar und sind als kritisch anzusehen. Dabei handelt es sich um die unvollständigen Durchschweißungen, Schlauchporen sowie innere Verformungen, die ausschließlich bei Überlappstößen beachtet werden müssen. Um Produktionsauschüsse zu vermeiden, bedarf es geeigneter zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Beurteilung dieser Unregelmäßigkeiten.

## 2.2 Zerstörungsfreie Prüfung von Rührreibschweißungen

In der Regel werden Unregelmäßigkeiten durch die Auswertung während des Schweißprozesses aufgezeichneter Prozessparameter identifiziert. Zudem wurden in der Forschung in den vergangenen Jahren verschieden zerstörungsfreie Prüfverfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur Detektion von Unregelmäßigkeiten untersucht. Dazu wurden verschiedene ultraschall- [4-8] und wirbelstrombasierte Verfahren [9] betrachtet. Weitere Arbeiten beschäftigen sich mit röntgenografischen Verfahren [10]. Allerdings haben diese zerstörungsfreien Prüftechniken Nachteile, die einem industriellen Einsatz entgegenstehen. Diese begründen sich entweder darin, dass die Prüfverfahren lediglich eine lokale Prüfung

erlauben und somit für die Serienprüfung ungeeignet sind oder aber sie sind nicht in der Lage, alle relevanten Fehlstellen zu detektieren.

Die Thermografie wurde in der Vergangenheit zur Prüfung von Rührreibschweißungen eingesetzt, allerdings konzentrieren sich die Arbeiten vornehmlich auf die Untersuchung der Temperaturverteilung im Schweißprozess [11-14]. In [15] wurden zudem Rührreibschweißnähte mittels einer optisch angeregten Lockin-Thermografie betrachtet. Zudem konnten in [16] simulierte Oberflächendefekte nachgewiesen werden. In [17] und [18] werden verschiedene Stoßarten und Defekte hinsichtlich ihrer Detektierbarkeit durch die Ultraschall angeregte Lockin-Thermografie sowie die induktive Puls-Phasen Thermografie bewertet.

### 3. Experimentelle Arbeiten

Da die derzeitigen zerstörungsfreien Prüfverfahren entweder nicht zur Detektion der kritischen Unregelmäßigkeiten geeignet sind oder verfahrensspezifische Einschränkungen aufweisen, wird im Rahmen dieser Arbeit die Eignung der Ultraschall angeregten Thermografie zur Bewertung dieser Unregelmäßigkeiten untersucht. Im Laufe der Arbeiten wurden durch externe Prozessbeeinflussungen Schweißnähte mit unterschiedlichen Ausprägungen hergestellt. Dazu wurden die Eigenschaften des Schweißwerkzeugs geändert oder der Schweißprozess lokal durch das Einbringen von Fremdstoffen in den Stoßbereich beeinflusst.

#### 3.1 Prüfung von Überlappstößen

Nachfolgend sind die Ergebnisse der thermografischen Untersuchungen an Überlappstößen mittels der Ultraschall angeregten Lockin-Thermografie sowie die zur Bewertung der Ergebnisse angefertigten Schliffbilder dargestellt. Durch unterschiedlich starke Durchschweißungen und das Einbringen von Fremdstoffen wurde versucht, innere Verformungen zu simulieren. Dazu zeigt Abb. 2 das Schliffbild einer i.O.-Naht sowie das zugehörige Phasenbild einer thermografischen Messung. Für die Schweißung wurde ein Schweißstift mit einer Länge von 2,29 mm eingesetzt. Dadurch durchdringt der Stift das obere Blech (Blechdicke 2 mm) vollständig und taucht in das untere Blech ein. Somit wird das plastifizierte Material beider Bleche durchmischt und es bildet sich die in Abb. 2a.) dargestellte Schweißnaht aus. Im Bereich der Schweißnaht sind die Bleche stoffschlüssig miteinander verbunden und es kann keine Trennung der Bleche beobachtet werden. In Abb. 2b.) ist das zugehörige Thermogramm der Überlappnaht dargestellt, das aus einer Prüfung mittels der Ultraschall angeregten Lockin-Thermografie resultiert.



Abb. 2: i.O.-Naht einer Überlappverbindung: a.) Schliffbild und b.) Phasenbild nach thermografischer Prüfung

Dabei zeichnet sich deutlich die Kontur der Schweißverbindung ab. In Folge der Reibung zwischen den Blechen, die im Bereich der Schweißnaht eng aufeinander liegen, entsteht Reibungswärme, die durch die thermografische Messung erfasst und als Phasenverschiebung dargestellt wird. Die Reibung entsteht dabei nicht in der Schweißnaht selber, sondern im Kontaktbereich der beiden Bleche.

In der Abb. 3 sind demgegenüber die Ergebnisse der Schliff- und Phasenbilder von Überlappnähten mit externen Prozessbeeinflussungen dargestellt. Dabei haben insbesondere das Einbringen von Maschinenfett (Abb. 3b.) und Abb. 3c.) und Papier (Abb. 3d.) Auswirkungen auf die Prüfergebnisse. Das Einbringen dieser Fremdstoffe wurde ausgewählt, um definiert lokale Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht zu erzeugen. In den entsprechenden Phasenbildern kommt es durch diese Prozessbeeinflussungen zu auffälligen Abweichungen im Vergleich zur i.O.-Naht.

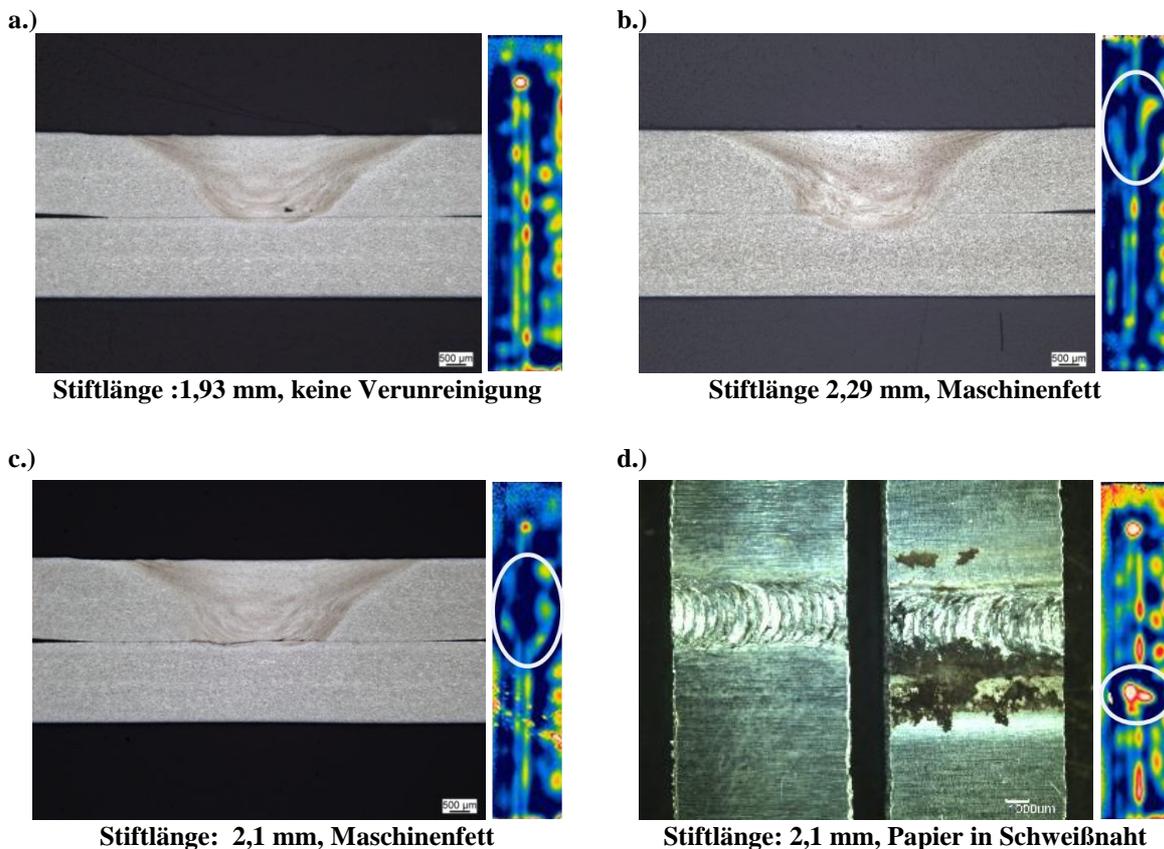


Abb. 3: Auswirkung von Prozessbeeinflussungen auf die Schweißnahtausprägung

Wie aus dem Vergleich der Ergebnisse aus Abb. 3a.) mit der Referenzmessung hervorgeht, hat eine Verkürzung des Schweißstiftes keine Auswirkung auf das thermografische Prüfergebnis. Zwar zeigt sich beim Vergleich der Schliffbilder der i.O.-Naht und der mit einem auf 1,93 mm verkürzten Stift geschweißten Naht, dass die Durchmischung der beiden Bleche abnimmt und die Stoßkante zwischen den Blechen nicht vollständig verrührt ist, allerdings hat dies keine Auswirkungen auf die Ausprägung des Phasenbildes. Auch der Vergleich der Schliff- und Phasenbilder in den Abb. 3b.) und Abb. 3c.) bestätigt, dass die Stiftlänge keinen Einfluss auf das thermografische Prüfergebnis hat. Die in den Phasenbildern auftretenden Unregelmäßigkeiten (weiße Kreise) sind auf die durch das Maschinenfett auftretenden Änderungen des tribologischen Verhaltens zurückzuführen. Das Maschinenfett wirkt zwischen den Blechen als Schmierstoff und reduziert somit die Entstehung von Reibungswärme. Einen deutlichen Effekt zeigt hingegen das Einbringen von Papier in den Überlappstoß (Abb. 3d.)). Durch das Papier

wird, trotz eines für die Blechdicke geeigneten Schweißstifts, die Durchmischung des Materials verhindert. Daher wird an dieser Stelle keine Schweißnaht erzeugt. Die Ultraschallanregung bewirkt durch die Reibung der beiden Bleche in diesem Bereich eine messbare Erwärmung, die im Phasenbild detektierbar ist (weißer Kreis).

Somit kann festgehalten werden, dass es durch den Einsatz der Ultraschall angeregten Lockin-Thermografie möglich ist, Trennungen sowie Verunreinigungen im Schweißbereich nachzuweisen. Eine Aussage über die Ausbildung der Schweißnaht, die zur Detektion innerer Verformungen notwendig wäre, kann jedoch auf Basis der Messungen nicht gegeben werden.

### 3.2 Prüfung von Stumpfstößen

Neben den Überlappstößen wurden auch Stumpfstöße betrachtet, bei denen durch eine Variation der Länge des Schweißstifts in 2 mm dicken Aluminiumblechen unvollständige Durchschweißungen eingebracht wurden. Eine i.O.-Naht, die mit einem Schweißstift mit einer Länge von 1,82 mm hergestellt wurde, ist in Abb. 4 im Schliff- und Phasenbild dargestellt.



Abb. 4. Referenzmessungen an Stumpfstößen mit optimierten Schweißparametern ohne Prozessbeeinflussung

Die Schweißnaht ist über die komplette Blechdicke ausgeprägt. Es sind keine Oxidlinien oder Poren im Schliffbild erkennbar (Abb. 4a.)). Da somit keine Reibung in der Schweißnaht möglich ist, zeigt das Phasenbild lediglich am Beginn und am Ende der Schweißnaht Auffälligkeiten, da in diesen Bereichen nicht geschweißt wurde. Abgesehen von diesen Bereichen ist das Phasenbild homogen und es gibt keine Indizien für Schweißnahtunregelmäßigkeiten.

Eine Verkürzung des Schweißstiftes auf Längen von 1,2 mm und 1,5 mm führt zu den in Abb. 5 dargestellten Schliffbildern. Durch diese Maßnahmen verringert sich die Einschweißtiefe, wodurch das Aluminium an der Nahtunterseite nicht mehr plastifiziert und verrührt wird. Somit verbleibt an der Nahtunterseite in beiden Fällen ein nicht geschweißter Bereich.

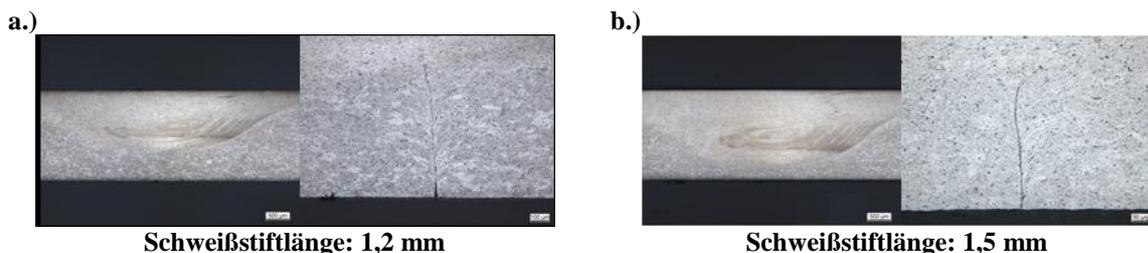
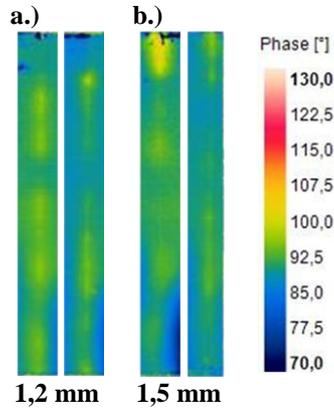


Abb. 5: Auswirkungen von verkürzten Schweißstiften auf die Schweißnahtausprägung - a.) Schliffbild einer Schweißnaht mit einer Stiftlänge von 1,2 mm; b.) Schliffbild einer Schweißnaht mit einer Stiftlänge von 1,5 mm

Die Auswirkungen, die diese Unregelmäßigkeiten auf das Ergebnis thermografischer Prüfungen haben, sind anhand der Phasenbilder in Abb. 6 dargestellt. Im Vergleich zum Phasenbild der i.O.-Naht ist eine Phasenverschiebung im Bereich der Schweißnaht erkennbar, die den Nachweis der unvollständigen Durchschweißung ermöglicht.



**Abb. 6: Phasenbilder stumpfgeschweißter Bleche mit unvollständiger Durchschweißung in Folge verkürzter Schweißstifte – a.) Stiftlänge 1,2 mm und b.) Stiftlänge 1,5 mm**

Da die Stoßkanten sehr eng zusammenliegen, kommt es durch die Ultraschallanregung zu Reibungseffekten in den unvollständigen Durchschweißungen. Dadurch erwärmt sich der Bereich der Schweißnaht, wodurch die unzulässigen Unregelmäßigkeiten nachgewiesen werden können. Es fällt auf, dass die Phasenbilder qualitativ mit den Schlifffbildern korrelieren, da die Phasenverschiebung im Fall der ausgeprägten unvollständigen Durchschweißung, die durch den Einsatz des Schweißstiftes mit einer Länge von 1,2 mm erzielt wurden, einen stärkeren Signalkontrast aufweist als die schwächer ausgeprägte unvollständige Durchschweißung mit dem etwas längerem Stift (1,5 mm).

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeiten konnte gezeigt werden, dass die Detektion bestimmter kritischer Schweißfehler in Rührreißschweißnähten mit der Ultraschall angeregten Lockin-Thermografie möglich ist. Sowohl in Überlapp- als auch in Stumpfstößen können unvollständige Durchschweißungen hervorragend nachgewiesen werden. Durch die für diese Unregelmäßigkeiten charakteristischen, eng beieinanderliegenden Stoßkanten entsteht in der Fügezone durch die Ultraschallanregung Reibungswärme, die den Nachweis der Unregelmäßigkeiten ermöglicht.

Jedoch konnten im Projektverlauf auch Verfahrensgrenzen erfasst werden. So ist es zum einen nicht möglich, innere Fehlstellen in Form von Schlauchporen nachzuweisen, zum anderen ist auch der Nachweis innerer Verformungen nicht möglich. Das Ziel weiterführender Arbeiten ist es daher, durch die Betrachtung alternativer Anregungsquellen Schlauchporen detektierbar zu machen und die Ausprägung innerer Verformungen zu bestimmen.

## 5. Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17617 N der 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



## Referenzen

- [1] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. ISBN 9783540694519; 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 2007.
- [2] Jene, T., Dobmann, G., Wagner, G., Eifler, D.: Monitoring of the Friction Stir Welding Process to Describe Parameter Effects on Joint Quality, 2006
- [3] DIN EN ISO 25239-5:2012-03, Rührreißschweißen - Aluminium - Teil 5: Qualitäts- und Prüfungsanforderungen (ISO 25239-5:2011)
- [4] 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.
- [5] Bird, C.R.: Ultrasonic phased array inspection technology for the evaluation of friction stir welds. Insight-Non Destructive Testing and Condition Monitoring, 46 (1), 2004, S.31-35.
- [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] 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.
- [8] 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.
- [9] Santos, T.G., Vilaca, P., Santos, J. d., Quintino, L., Rosado, L.: Innovative eddy current probe for micro defects. QNDE, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 36. Melville: American Institute of Physics, S. 377–384.
- [10] Cosmi, F.; Rigon, L.; Tovo, R.; Tromba, G.; Volpone, M.: Preliminary Results in the Use of Synchrotron Radiation for Small Cracks and Defects in AA FSW Samples. In Material Engineering, 2005, Vol. 12; S. 1–4.
- [11] Forcellese, A., Martarelli, M., Pandarese, G., Simoncini, M.: Similar and Dissimilar FSWed Joints in Lightweight Alloys: Heating Distribution Assessment and IR Thermography Monitoring for On-Line Quality Control. In Key Engineering Materials, 2013, Vol. 554-557, S. 1055–1064.
- [12] Beccari, S., D'Acquisto, L., Fratini, L., Salamone, C.: Thermal Characterization of Friction Stir Welded Butt Joints. Advanced Materials Research, 2005, Vol. 6-8, S.583–590.
- [13] Rusu, C. C., Mistodie, L. R.: Thermography used in friction stir welding processes. Welding equipment and technology, 2010, Vol. 21, S. 62–65.
- [14] Darras, B. M., Omar, M. A., Khraisheh, M. K.: Experimental Thermal Analysis of Friction Stir Processing. In Materials Science Forum, 2007, Vol. 539-543, S. 3801–3806.
- [15] Lahiri, B. B., Bagavathiappan, S., Saravanan, T., Rajkumar, K. V., Kumar, A., Philip, J., Jayakumar, T.: Defect Detection in Weld Joints by Infrared Thermography. NDESAI, 2011, S. 191–197.

- [16] Dehelean, D., Safta, V., Cojocaru, R., Hälker, T., Ciuca, C.: Monitoring the quality of friction stir welded joints by infrared thermography-Safety and Reliability of Welded Components. Energy and Processing Industry, 2008, S. 621–626.
- [17] Mund, M., Fischer, F., Dilger, K., Kryukov, I., Hartmann, M., Böhm, S.: Einsatz der aktiven Thermografie zur Detektion von Schweißfehlern beim Rührreibschweißen. DGZfP-Jahrestagung 2014.
- [18] Mund, M., Kreling, St., Dilger, K., Kryukov, I., Schüddekopf, S., Böhm, S.: Möglichkeiten und Grenzen aktiver Thermografieverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung rührreibgeschweißter Aluminiumbleche. DACH-Jahrestagung 2015.