

Einsatz der Infrarotthermografie zur zerstörungsfreien online-Fehlererkennung beim Rührreibschweißen

Igor KRYUKOV¹, Sven SCHÜDDEKOPF¹, Stefan BÖHM¹, Malte MUND²,
Stefan KRELING², Klaus DILGER²

¹ Fachgebiet für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff), Universität Kassel

² Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs), TU Braunschweig

Kurzfassung. Das Rührreibschweißen (RRS) ist ein innovatives Pressschweißverfahren, bei dem ein rotierendes Werkzeug durch die Fügepartner geführt wird und diese durch Reibung erwärmt. Anschließend werden die zu fügenden Werkstoffe miteinander verrührt und es entsteht eine metallische Verbindung. Das RRS ist ein Prozess mit vielen sich gegenseitig beeinflussenden Parametern. Abweichungen von Einstellungen können zu Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht führen. Diese Anomalien reduzieren die technologisch, mechanischen Eigenschaften der rührreibgeschweißten Verbindung. Um das Versagen von Schweißverbindungen zu verhindern und eine gleichbleibende Nahtqualität sicherzustellen, ist es notwendig, kritische Unregelmäßigkeiten zerstörungsfrei zu detektieren.

Als Mittel zur Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) bietet sich für das RRS die Infrarotthermografie an. Dabei wird die Infrarotabstrahlung des untersuchten Objektes berührungsfrei gemessen. Unregelmäßigkeiten lassen sich bereits aufgrund von geringen Temperaturdifferenzen an der Objektoberfläche erkennen. Signifikante Unregelmäßigkeiten im Rührreibschweißprozess sind die „Schlauchporen“ und die „Unvollständige Durchschweißung“. Diese Unregelmäßigkeiten sind durch Sichtprüfung nicht erkennbar, beeinflussen aber die statische und dynamische Festigkeit der Schweißnaht erheblich. Neben der Thermografie ist momentan kein anderes klassisches ZfP-Verfahren in der Lage, diese in Echtzeit zu erkennen.

Im Artikel wird die Umsetzung der Online-Thermografie zur Fehlerdetektion beim Rührreibschweißen vorgestellt. Durch geeignete Parameterwahl werden gezielte signifikante Inhomogenitäten in die rührreibgeschweißte Naht eingebracht und online erfasst. Es werden verschiedene Konzepte zur Erkennung von Schweißfehlern im Schweißprozess dargestellt und diskutiert. Dazu zählt beispielsweise das Abkühlverhalten der Schweißnaht mit zunehmender Entfernung zum Werkzeug zu einem beliebigen Zeitpunkt oder auch das Aufheizverhalten der gesamten Schweißnaht über die Dauer des Schweißprozesses. Zudem werden Entscheidungskriterien zur Fehleridentifikation benannt.

1. Einführung

Das Rührreibschweißen (RRS) ist ein 1991 am TWI (The Welding Institute, England) entwickeltes, innovatives Pressschweißverfahren. Ein rotierendes Werkzeug, bestehend aus Schulter und Stift, wird durch die Fügepartner geführt und erwärmt diese durch Reibung bis kurz unterhalb des Schmelzpunktes. Anschließend werden die zu fügenden Werkstoffe miteinander verrührt und es entsteht eine metallische Verbindung (siehe Abb. 1). Ein



wesentlicher Vorteil des RRS ist, dass keine Hilfs- oder Zusatzwerkstoffe für den Prozess benötigt werden. Zudem sorgt der vorrangige Einsatz des Verfahrens bei niedrig schmelzenden Metallen wie Aluminium und Magnesium für ein hohes Interesse am RRS für Anwendungen im Automobil- und Leichtbau.

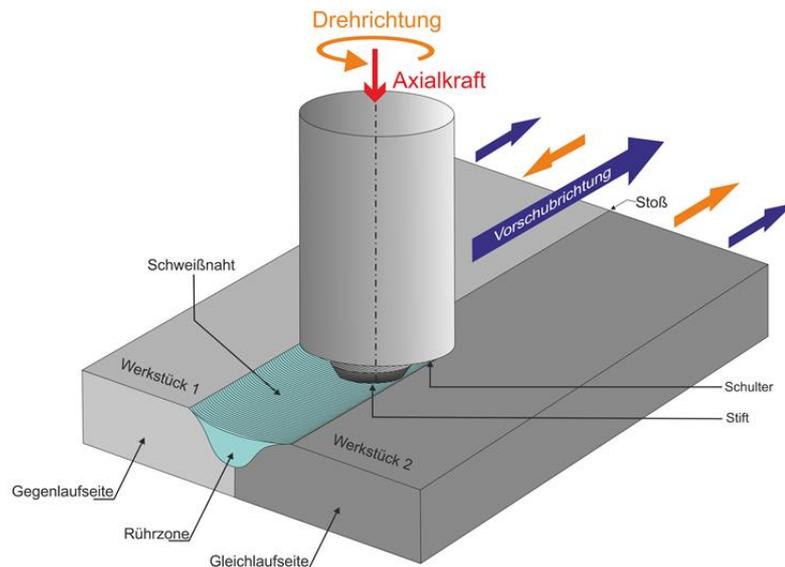


Abb. 1. Darstellung des Rührreibschweißprozesses

Das RRS ist ein Prozess mit vielen sich gegenseitig beeinflussenden Parametern, die in Werkzeug- sowie Prozessparameter aufgeteilt werden. Abweichungen von Einstellungen können zu verschiedenen Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht führen [1]. Diese Merkmale haben Einfluss auf die mechanischen und dynamischen Eigenschaften der rührreibgeschweißten Naht, sowie auf den Widerstand gegen Korrosion und die Verformbarkeit und Zähigkeit. Um das Versagen von Schweißverbindungen zu verhindern und eine gleichbleibende Nahtqualität sicherzustellen, ist es notwendig, aus dem Prozess resultierende Unregelmäßigkeiten zu identifizieren und zerstörungsfrei hinsichtlich ihrer Ausprägung zu bewerten. Das Ziel dabei ist es, unkritische Unregelmäßigkeiten von Schweißfehlern zu unterscheiden. Eine geeignete zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) sollte neben der schnelleren Verfügbarkeit von Prüfergebnissen die Möglichkeit der 100% Überprüfung der Schweißnähte bieten.

Als Mittel zur Zerstörungsfreien Onlineprüfung bietet sich für das RRS die Infrarotthermografie an. Bei der passiven online-Thermografie wird die Infrarotabstrahlung der noch nicht erkalteten Schweißnaht direkt nach dem Schweißen berührungsfrei erfasst. Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht lassen sich bereits aufgrund von geringen Temperaturdifferenzen an der Objekt Oberfläche erkennen. Fehler in der Naht führen zu einer Änderung im Temperaturabfluss, wodurch die Oberflächentemperatur lokal von der in benachbarten Regionen differiert. Die Vorteile der Thermografie liegen in der hohen Genauigkeit bei dem Vermessen großer Flächen in Echtzeit. Durch die kurze Messdauer bietet das rückwirkungsfreie Verfahren zudem ein hohes Automatisierungspotential, wodurch der Einsatz bei automatisierten Schweißverfahren prozessbegleitend als 100%-Prüfung erfolgen kann. [2,3]

In diesem Artikel wird die Thermografie dazu verwendet, beim Stumpfstoß von rührreibgeschweißten Verbindungen online Unregelmäßigkeiten der Schweißnaht zu detektieren. Dazu werden fehlerfreie und modifizierte Schweißungen miteinander verglichen. Anhand des Abkühlverhaltens der Schweißnaht sowie der

Temperaturentwicklung im Prozess lassen sich Aussagen über Unregelmäßigkeiten im Schweißprozess machen.

2. Experimenteller Aufbau

Zur online-Thermografiemessung wird eine Infrarotkamera mit gekühltem Quantendetektor ausgewählt und ortsfest bezüglich des Schweißwerkzeugs positioniert. Als Thermografiekamera wird die FLIR SC5600-M eingesetzt. Diese aktiv gekühlte Kamera mit einem Indium Antimonid (InSb)-Sensor zeichnet sich durch eine hohe Auflösung von 640 Pixel x 512 Pixel, einer Aufnahmefrequenz von 100Hz bei Vollbildauflösung sowie dem Spektralbereich von 2,5 μ m - 5,1 μ m aus. Bei einer Integrationszeit ab 3 μ s lassen sich selbst schnellste thermische Vorgänge mit einer Messgenauigkeit von $\pm 1^\circ\text{C}$ oder $\pm 1\%$ vom Messwert erfassen. Durch die kleinste detektierbare Temperaturdifferenz (NETD) von $< 20\text{mK}$ eignet sich diese Kamera besonders zur Erkennung kleinster Temperaturunterschiede [4].

Die Kamera wird über eine Konstruktion direkt über der Schweißnaht positioniert, so dass während des Schweißvorgangs die Position zum Werkzeug immer gleich bleibt. Durch das Folgen des Werkzeugs lässt sich der Abkühlvorgang eines konstant großen Bereichs (min. 90mm x 100mm) überwachen und auswerten. Der Abstand der Kamera zum Werkzeug r beträgt dabei ca. 270mm, die Neigung der Kamera φ bezüglich der Schweißebene beträgt ca. 55° , wie Abb. 2 zeigt. Unter diesen Parametern lässt sich der gesamte Schweißvorgang aufzeichnen und auswerten. Zudem wirkt sich ein am Nahrand entstehender Grat nicht negativ auf die Thermografiemessung aus, weil dieser die Schweißnaht nicht verdeckt.

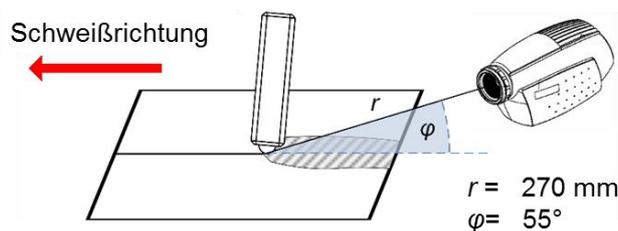


Abb. 2. Ortsfeste Positionierung der Thermografiekamera bezüglich des Werkzeugs

Zur Verbesserung des Nutzsignals wurden Maßnahmen zur thermischen Isolation getroffen. Diese haben das Ziel, Reflexionen der Umgebung zu vermeiden sowie die Temperaturstrahlung der Schweißmaschine und deren Reflexionen aus den Messungen zu entfernen. Dazu ist der Schweißbereich sowie alle darin befindlichen Elemente gegenüber der Umgebung mit Plexiglas eingekapselt worden. Störende Wärmequellen sind beseitigt worden. Sämtliche Oberflächen (z.B. Spannvorrichtung) sind zur Reduzierung der Reflexionen matt schwarz lackiert worden. Die zu schweißenden Aluminiumproben sind hingegen bewusst ungeschwärzt geblieben um eine Kontaminierung der Schweißnaht und die damit verbundene Beeinflussung des Schweißergebnisses durch die Farbe zu vermeiden. Zudem wird dadurch die Realitätsnähe gewahrt.

Das Werkzeug strahlt durch die starke Eigenerwärmung sehr viel Wärme ab. Da die Aluminiumbleche nicht geschwärzt sind und einen sehr hohen Reflexionsgrad besitzen, ist eine Messung im Bereich direkt um das Werkzeug herum sehr stark überlagert. Um diesen Bereich aus der Messung herauszuhalten, ist das Werkzeug samt Werkzeughalterung mit einem dünnwandigen, matt-schwarzen Hohlzylinder (\varnothing ca. 50mm) verkleidet worden, sodass der Spalt zwischen Hülse und Aluminiumblech weniger als 1mm beträgt. Dadurch wird eine Großteil der vom Werkzeug ausgehenden IR-Strahlung vom Messbereich abgeschirmt. Nur

ein kleiner Anteil an Reststrahlung dringt durch den verbleibenden Spalt in den Messbereich ein, beeinflusst die Messung jedoch nicht maßgeblich.

Als Werkstoff ist für die vorliegenden Versuche die Aluminium-Knetlegierung EN AW 6082-T6 zum Einsatz gekommen (chemische Zusammensetzung siehe Tabelle 1). Die 2 mm starken Aluminiumplatten mit einer Größe von 500 x 120 mm werden über eine Nahtlänge von 430 mm im Stumpfstoß mit einander verschweißt.

Tabelle 1. chemische Zusammensetzung der verwendeten Aluminiumlegierung

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
EN AW 6082-T6	1.00	0.38	0.10	0.52	0.70	0.04	0.05	0.03

Die für i.O.-Nähte verwendeten Parameter der kraftgesteuerten RRS-Anlage sowie die Parameter der verwendeten Werkzeuge können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2. Verwendete Parameter der i.O.-Schweißnaht

Vorschub [mm/min]	Drehzahl [1/min]	Kraft [N]	Ø Schulter [mm]	Ø Stift [mm]	Stiftlänge [mm]	Nahtlänge [mm]
600	2000	2400	10	4	1,82	430

3. Vorversuche

Vorversuche haben gezeigt, dass die größte und aussagekräftigste Temperaturreduzierung in Bereich direkt nach dem Hohlzylinder zu beobachten ist. Aus diesem Grund ist der aufgezeichnete Messbereich auf 240 x 370 Pixel verkleinert worden. Dadurch ist eine Erhöhung der Bildrate auf 200 Hz erreicht worden. Die Integrationszeit ist auf 0,3 ms eingestellt worden.

Zur Auswertung der Temperaturverteilung ist ein rechteckiger Messbereich mit der Größe von 80 x 100 Pixel direkt unterhalb des Hohlzylinders definiert worden (siehe Abb. 3 links oben). Dieser entspricht ungefähr einer Größe von 14 x 18 mm. Um die Herausforderung des niedrigen, nicht exakt bekannten Emissionsgrades zu umgehen, erfolgt eine Auswertung der Intensitäten anstatt der Temperatur. Die Intensitäten werden über das gesamte Messfenster aufgezeichnet und können zur besseren Visualisierung als Intensitätswert über dem ausgewerteten Pixel dargestellt werden (siehe Abb. 3 rechts). Die Abbildung zeigt beispielhaft eines der zur Auswertung genutzten dreidimensionalen Intensitätbilder eines Stumpfstoßen.

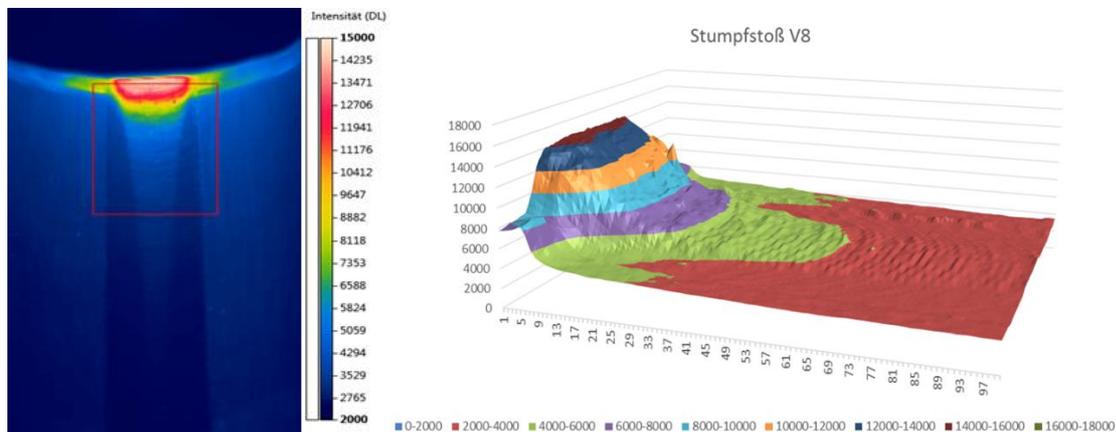


Abb. 3. Thermogramm einer i.O.-Naht mit Messfenster (links) und die dazugehörige Intensitätswertdarstellung über das Messfenster (rechts)

Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Thermografiedaten sind 6 Schweißungen durchgeführt worden. Aus diesen Datensätzen sind zu verschiedenen Zeitpunkten des Schweißprozesses jeweils ein Mittelwert und die dazugehörige Standardabweichung berechnet worden. Wie Abb. 4 zu entnehmen ist, stimmen die aufgezeichneten Intensitätswerte zum selben Zeitpunkt des Prozesses gut mit der einzelnen Naht aus Abb. 3 überein. Das bestätigt auch die geringe Standardabweichung (siehe Abb. 4 rechts). Somit lässt sich festhalten, dass die Reproduzierbarkeit der Thermografiedaten gegeben ist.

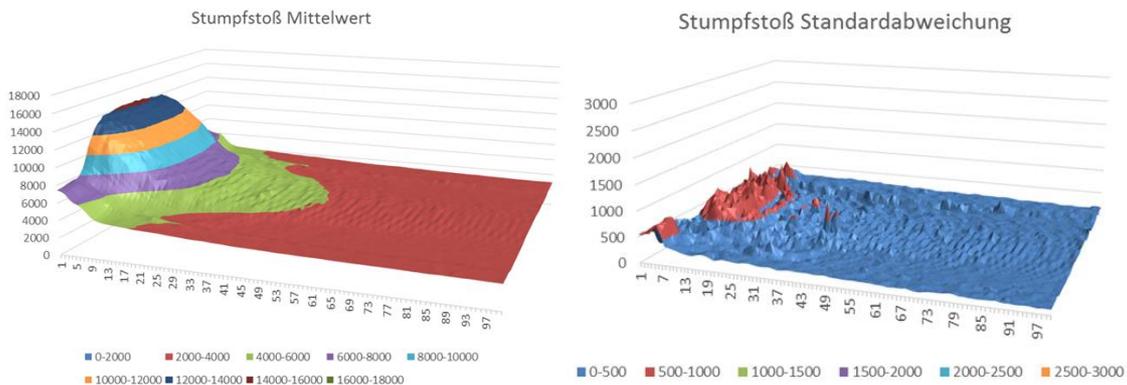


Abb. 4. Mittelwert der Intensitätsverteilungen der Testschweißungen an Stumpfstößen (links) und die dazugehörige Standardabweichungen (rechts)

4. Einbringung von Unregelmäßigkeiten

Wie bei allen Schweißprozessen, können auch beim Rührreibschweißen Fehler aufgrund fehlerhafter Anlagenparameter oder lokaler Störfaktoren in der Schweißnaht entstehen. Signifikante Unregelmäßigkeiten im Rührreibschweißprozess sind durch die AWS D17.3/D17.3M:2010 [5] sowie die DIN EN ISO 25239-5 [6] definiert. Zu den besonders kritischen Fehlern zählen Fehler, die durch eine einfache Sichtprüfung nicht erkannt werden wie die „Schlauchporen“ und die „Unvollständige Durchschweißung“ (siehe Abb. 5).

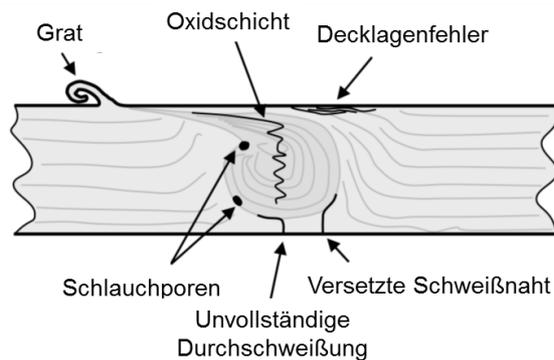


Abb. 5. Darstellung einiger relevanter Unregelmäßigkeiten in RRS-Nähten nach Völlner [7]

Eine Schlauchpore entsteht bei unzureichendem Materialfluss im Prozess. Durch niedrige Dreh- und hohe Vorschubgeschwindigkeiten wird zu wenig Wärme in die Schweißnaht eingebracht, wodurch sich zunächst eine Pore bildet, die bei unveränderten Schweißparametern einen Tunnel an der Gleichlaufseite entlang der Schweißnaht bildet.

Eine „Unzureichende Durchschweißung“ ist die Folge einer zu geringen Durchmischung der Fügepartner im Wurzelbereich. Grund ist eine zu geringe Eintauchtiefe

des Stiftes in das Material. Dieser Fehler lässt sich bei einseitigem Zugang zur Schweißnaht nur schwer erkennen.

Da Schlauchporen in einem stabilen Prozessablauf sehr selten auftauchen, werden lokale Unregelmäßigkeiten in die Schweißnaht eingebracht, die Schlauchporen oder zumindest eine unzureichende Materialdurchmischung zur Folge haben. Die Erzeugung von Schlauchporen soll auf 2 Varianten erfolgen. Zum einen sollen lokale Papiereinschlüsse entlang der Stoßkante der Schweißnaht lokal eine Materialdurchmischung negativ beeinflussen. Zum anderen sollen Bohrungen im Grundmaterial von der Unterseite dafür sorgen, dass im Prozess Material fehlt. Beim Auffüllen der Bohrungen mit Material entstehen aufgrund des fehlenden Materials kleine Schlauchporen. Durch die Verkürzung des Stiftes wird eine unvollständige Durchschweißung erreicht.

5. Auswertungen lokaler Unregelmäßigkeiten

Zur Auswertung von lokalen Unregelmäßigkeiten wie Schlauchporen werden im Schweißprozess die Intensitätsdarstellungen mit einem Zeitverzug Δt von 0,4 s betrachtet. Bei dem angegebenen Vorschub bewegt sich die Naht unter der Thermografiekamera um 4 mm zwischen zwei Messungen. Die Intensitätsdarstellungen einer beispielhaften Schweißung mit einer gezielt verursachten Unregelmäßigkeit bei t3 sind in Abb. 7 dargestellt.

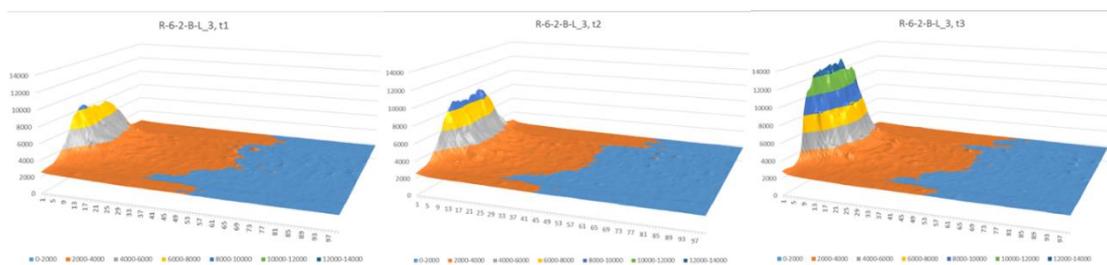


Abb. 7. Darstellung der Intensitäten einer Schweißnaht zu den Zeitpunkten t1, t2 und t3 mit einer Unregelmäßigkeit bei t3

Während die Unterschiede zu den Zeitpunkten t1 und t2 (jeweils i.O.-Nahtbereich) eher gering sind, lässt sich ein Intensitätssprung bei der lokalen Unregelmäßigkeit bei t3 feststellen. Zur einfacheren Darstellung der Änderungen der Intensitäten werden jeweils die Differenzen zweier aufeinander folgender Intensitäten (späterer Zeitpunkt minus früherer Zeitpunkt: $dl = I2 - I1$) gebildet und ausgewertet. So lassen sich Änderungen der Intensitäten am übersichtlichsten darstellen. Die Änderungen der Intensitätswerte aus Abb. 7 sind in Abb. 8 dargestellt.

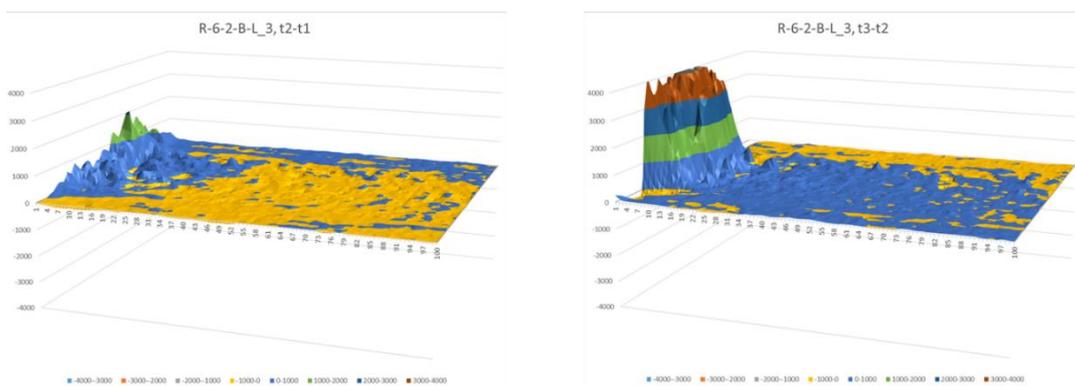


Abb. 8. Darstellung der Intensitätsdifferenzen einer Schweißnaht zwischen den Zeitpunkten t2 – t1 (links) und t3 – t2 (rechts)

Die Intensitätsdifferenz zwischen dem Zeitpunkt $t_2 - t_1$ zeigt geringe Werte, die um den Wert 0 schwanken. Lediglich im linken Bereich gibt es nennenswerte Schwankungen, die allerdings sehr an die Standardabweichung erinnern. Währenddessen lässt sich in der Differenzdarstellung zwischen dem Zeitpunkt $t_3 - t_2$ aufgrund der eingebrachten Inhomogenität eine starke Intensitätsdifferenz feststellen.

Bei den folgenden Auswertungen der lokal eingebrachten Inhomogenitäten wird diese Differenzdarstellung der Intensitäten zu den angegebenen Zeitpunkten ausgewertet.

5.1 Auswertung der lokalen Unregelmäßigkeit durch Papiereinschluss

In der vorliegenden Messung ist eine lokale Unregelmäßigkeit aufgrund von Papiereinschluss auf einer Länge von 5 mm erzeugt worden. Wie an den einzelnen Intensitätsspitzen im rechten Bereich in Abb. 9 links zu entnehmen ist, hat die Naht schon vor der Inhomogenität eine leicht raue Oberfläche, die an den Intensitätsspitzen erkannt werden können. Zum Zeitpunkt t_2 ist erstmals die durch die Inhomogenität hervorgerufene Schwankung der Intensitätswerte erkennbar. Die folgenden Darstellung $t_3 - t_2$ und $t_5 - t_4$ (Abb. 9) visualisieren das Durchlaufen der Unregelmäßigkeit durch den Messbereich der Thermografiekamera. In Abb. 10 ist das zum Zeitpunkt t_4 entstandene Thermogramm sowie die Aufnahme der entstandenen Naht zu sehen.

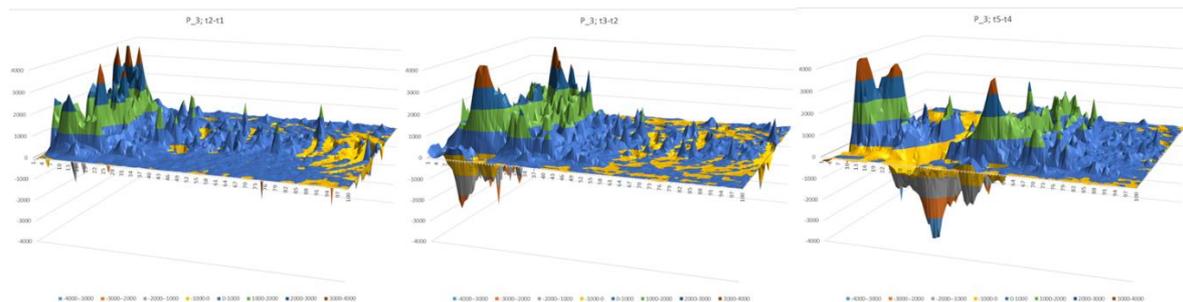


Abb. 9. Darstellung der Intensitätsdifferenzen der lokalen Unregelmäßigkeit durch Papiereinschluss zu den Zeitpunkten $t_2 - t_1$ (links), $t_3 - t_2$ (mittig) und $t_5 - t_4$ (rechts)

Zum Nachweis des tatsächlichen Unregelmäßigkeiten sind Querschliffe von der Schweißnaht angefertigt worden. Wie Abb. 11 zu entnehmen ist, hat das eingebrachte Papier die Materialdurchmischung behindert. Papierteilchen sind in die Naht verrührt worden und als durchgezogene schwarze Linie im oberen Bereich der Naht sichtbar. Teile des Papiers sind abgerissen und mit in die Naht verrührt worden. Eine einer i.O.-Naht üblichen Ausbildung der Rührzone hat nicht stattgefunden.

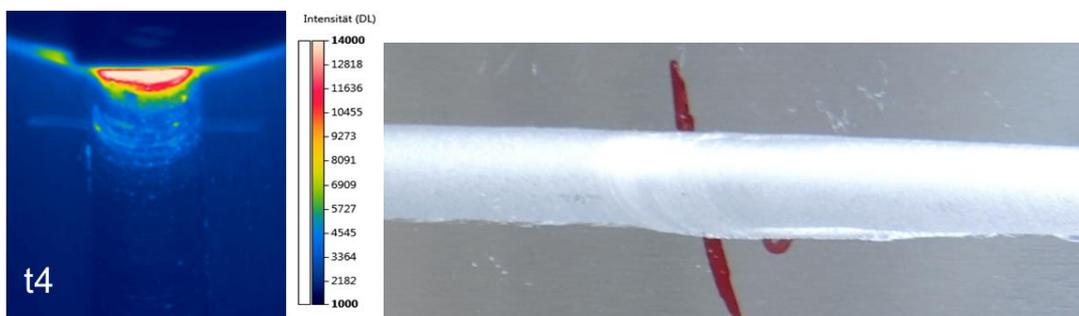


Abb. 10. Thermogramm (links) der lokalen Unregelmäßigkeit durch Papiereinschluss zu dem Zeitpunkt t_4 und Abbildung der resultierenden Schweißnaht (rechts)



Abb. 11. Querschliff durch den Bereich mit der lokalen Unregelmäßigkeit Papiereinschluss

Mit Hilfe der Intensitätsdifferenzen kann somit eine unzureichende Materialdurchmischung detektiert werden.

5.2 Auswertung der lokalen Unregelmäßigkeit durch wurzelseitige Bohrungen im Material

Durch eine 1 mm tiefe wurzelseitige Bohrung (\varnothing 4,5 mm) im Fügeblech ist dem Schweißprozess vorab Material entnommen worden. Die Schweißnaht, als Blindnaht ausgeführt, ist direkt mittig über die Bohrung gesetzt worden. Wie Abb. 12 links zu entnehmen ist, schwanken die Intensitätsdifferenzen vor der Inhomogenität fast nahezu um den Wert 0. Beim Auftauchen der Inhomogenität ist im linken Bereich der Darstellung ein plötzlicher Intensitätswertanstieg zu erkennen. Anhand diesem lässt sich das Aufkommen von einer Inhomogenität erkennen, sowie die Position, Lage und Größe ableiten. In Abb. 13 ist das zum Zeitpunkt t_5 entstandene Thermogramm sowie die Aufnahme der entstandenen Naht zu sehen. Bis auf eine leichte Gradbildung lässt sich die darunterliegende Inhomogenität durch Sichtprüfung nur schwer erkennen.

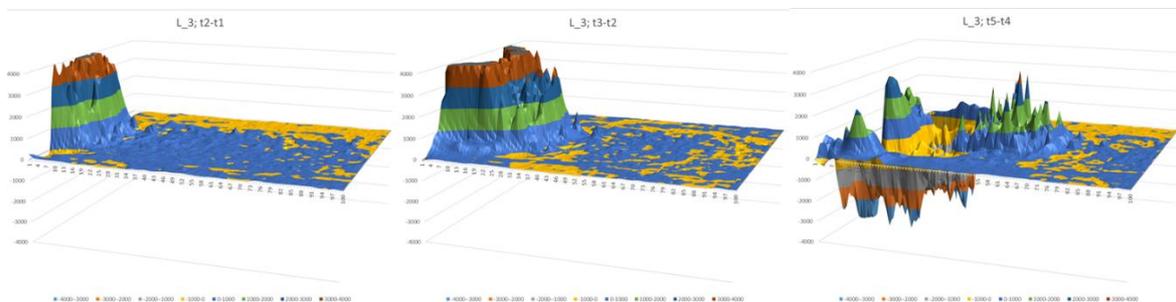


Abb. 12. Darstellung der Intensitätsdifferenzen der lokalen Unregelmäßigkeit durch wurzelseitige Bohrungen im Material zu den Zeitpunkten $t_2 - t_1$ (links), $t_3 - t_2$ (mittig) und $t_5 - t_4$ (rechts)

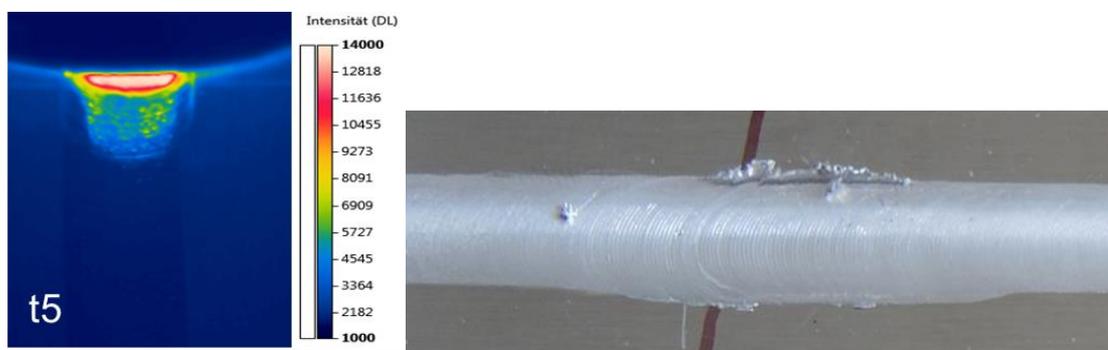


Abb. 13. Thermogramm (links) der lokalen Unregelmäßigkeit durch wurzelseitige Bohrungen im Material zu dem Zeitpunkt t_5 und Abbildung der resultierenden Schweißnaht (rechts)

Der Nachweis der detektierten Unregelmäßigkeit ist über Querschliffe von der Schweißnaht erreicht worden. In Abb. 14 ist eine Schlauchpore sichtbar. Diese ist allerdings

zu klein und liegt zu tief in der Naht, um an der Oberfläche eine Intensitätsschwankung zu erzeugen und die Messergebnisse zu erklären. Beim Auffüllen der Bohrung entstanden an der Mantelfläche der Bohrung Bindefehler, die einen veränderten Temperaturabfluss und somit Änderungen bei den Intensitäten zur Folge haben. Die Entstehung der Rührzone ist durch die Bindefehler zudem leicht gestört.



Abb. 14. Querschliff durch den Bereich mit der lokalen Unregelmäßigkeit wurzelseitige Bohrungen, Schlauchpore rot umrandet

Mit Hilfe der Intensitätsdifferenzen kann ein Bindefehler und die damit einhergehende reduzierte Materialdurchmischung detektiert werden. Dieser Fehler kann bei einseitigem Zugang zur Schweißnaht nicht erkannt werden.

6. Auswertungen globaler Unregelmäßigkeiten

Da globale Unregelmäßigkeiten, also Unregelmäßigkeiten, die sich durch die gesamte Schweißnaht ziehen, eine leicht veränderte Prozesstemperatur zur Folge haben, lassen sich diese nicht im Differenzenbild erkennen. Eine eindeutige thermische Detektion ist nicht möglich. Um trotzdem eine unvollständige Durchschweißung zu erkennen, sind die Intensitätswerte zu einem festen Zeitpunkt t_1 mit den Intensitätswerten einer i.O.-Referenznaht zum selben Zeitpunkt t_1 verglichen worden. Die Intensitätswerte der Referenznaht sind von denen der fehlerbehafteten Naht abgezogen worden. Die Darstellung der Intensitätsdifferenzen sowie die Thermogramme der Naht mit unvollständiger Durchschweißung und der i.O.-Naht zum selben Zeitpunkt t_1 sind Abb. 15 zu entnehmen.

Den Intensitätsdifferenzen zwischen unvollständiger Durchschweißung und der i.O.-Naht ist zu entnehmen, dass die Werte nicht, wie bei lokalen Unregelmäßigkeiten, um 0 schwanken, sondern einen positiven, wenn auch kleinen Wert aufweisen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Wärme, die in der modifizierten Schweißnaht erzeugt wird, aufgrund der verringerten Anbindungsfläche schlechter abfließen kann und sich über die Schweißnaht leicht höhere Intensitätswerte messen lassen.

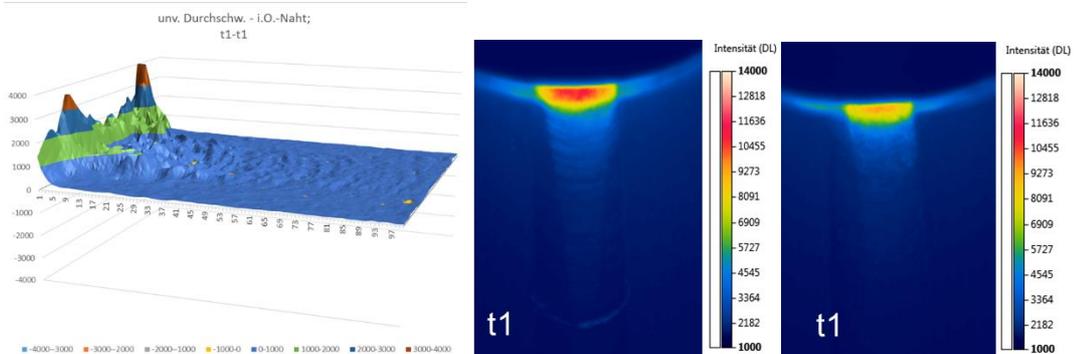


Abb. 15. Darstellung der Intensitätsdifferenzen zwischen unvollständiger Durchschweißung und der i.O.-Naht zum Zeitpunkt t_1 (links), Thermogramme der Naht mit unvollständiger Durchschweißung (mittig) und der i.O.-Naht (rechts) zum selben Zeitpunkt t_1

In Abb. 16 ist der Querschliff der Naht mit unvollständiger Durchschweißung dargestellt. Die unvollständige Durchschweißung ist eindeutig erkennbar. Diese lässt sich durch durchgängig positive Intensitätsdifferenzen beim Vergleich mit der i.O.-Naht detektieren.



Abb. 16. Querschliff der Naht mit unvollständiger Durchschweißung

7. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorgestellten Arbeit konnte gezeigt werden, dass die passive Thermografie beim Rührreißschweißen eingesetzt werden kann, um das Aufheiz- bzw. das Abkühlverhalten von Schweißnähten zu untersuchen. Zur Reduzierung von Störungen hat sich für die Thermografie eine gute Abschirmung von Umgebungs-, Prozessstörgrößen sowie dem Werkzeug als empfehlenswert herausgestellt. Es wurde gezeigt, dass die erzeugten Thermografiedaten eine gute Reproduzierbarkeit haben. Anhand von Intensitätsdifferenzen zwischen zwei Zeitpunkten konnten mit der vorgestellten Methode lokale, innere Fehler wie unzureichende Materialdurchmischung und die unzureichende Durchschweißung erkannt werden. Anzumerken ist allerdings, dass Oberflächenmerkmale wie Gratbildung durch höhere Wärmestrahlung die Thermografiemessung überlagern und dadurch die Detektion darunterliegender Unregelmäßigkeiten erschweren.

Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „ThermoFSW“ (IGF-Forschungsvorhaben 17.617 N / DVS-Nr. 05.049) erzielt. Unser besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie als Mittelgeber sowie der Forschungsvereinigung des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. und der AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V.. Zudem bedanken wir uns bei den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses für ihre Unterstützung.

Referenzen

- [1] Arbegast, W.J.: A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding. *Scripta Materialia*, Vol. 58, Seite 372-376, 2008
- [2] Bagavathiappan, S.; Lahiri, B.B.; Saravanan, T.; Philip, J.; Jayakumar, T.: Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology*, Vol. 60, Seite 35–55, 2013
- [3] Maldague, X. P.; Moore, P. O.: *Infrared and Thermal Testing – Volume 3: Nondestructive Testing Handbook – Third edition*. American Society for Non-destructive Testing, Columbus, 2001
- [4] FLIR Systems, Inc.: FLIR® Silver SC5000 MWIR. Rev. 10/09-R1, URL: <http://www.flir.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=20006>
- [5] An American National Standard, AWS D17.3/D17.3M:2010, American Welding Society Specification for friction stir welding of aluminum alloys for aerospace applications
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 25239-5: Rührreißschweißen - Aluminium - Teil 5: Qualitäts- und Prüfungsanforderungen
- [7] Völlner, G.: Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern. München, 2010