

Qualifizierung der aktiven Thermografie zur Prüfung von Schweißverbindungen an Prüfkörpern mit realitätsnahen Unregelmäßigkeiten

Malte MUND¹, Eugen PRINTS², Igor KRYUKOV², Jonas HENSEL¹, Stefan BÖHM²,
Klaus DILGER¹

¹ Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

² Universität Kassel, Kassel

Kontakt E-Mail: m.mund@tu-braunschweig.de

Kurzfassung. Im Schweißprozess kann es zur Entstehung einer Vielzahl von Unregelmäßigkeiten kommen, die in Risse, Hohlräume, feste Einschlüsse, Bindefehler oder ungenügende Durchschweißungen, Form- und Maßabweichungen sowie sonstige Unregelmäßigkeiten eingeteilt werden. Die Bewertung der Unregelmäßigkeiten hinsichtlich ihrer Zulässigkeit erfolgt anhand normativ festgelegter Bewertungsgruppen. Grundlage der Bewertung der Schweiß- bzw. Bauteilqualität sind dabei oftmals die Ergebnisse zerstörungsfreier Prüfungen zur Ermittlung der Ausprägungen und Lagen der Schweißnahtunregelmäßigkeiten. Die aktive Thermografie wird trotz der bedeutenden Potenziale (wie etwa der robusten und bildgebenden Ergebnisse) in diesen Normen nicht berücksichtigt. Somit sind thermografische Verfahren bisher nicht hinreichend zur Prüfung von Schweißnähten qualifiziert.

Im Forschungsprojekt „QualiTWelt“, wird daher die Qualifizierung thermografischer Verfahren mit aktiver Anregung für die Prüfung von Schweißverbindungen betrachtet. Zur objektiven Bewertung der Prüfverfahren und -systeme der aktiven Thermografie werden dazu im Rahmen des Projektes realitätsnahe Prüfkörper aus relevanten Werkstoffgruppen mit typischen Schweißnahtunregelmäßigkeiten entwickelt. Dabei ist es das Ziel, auf Basis der Messergebnisse Normentwürfe zur Prüfung von Schweißverbindungen mittels der aktiven Thermografie zu erarbeiten. Das Projekt trägt somit dazu bei, die thermografische Prüfung zur Anwendung an Schweißverbindungen zu etablieren und diese Normungslücke zu schließen.

Im Rahmen dieses Beitrags wird zum einen auf die Fertigung von Prüfkörperprototypen sowie deren Validierung anhand etablierter Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung eingegangen (VT, RT). Zum anderen werden die ersten Ergebnisse bezüglich der Eignung thermografischer Verfahren zum Nachweis dieser Unregelmäßigkeiten vorgestellt. Dadurch kann gezeigt werden, dass thermografische Verfahren grundsätzlich zum Nachweis typischer Schweißnahtunregelmäßigkeiten eingesetzt werden können.

Einführung

Das Schweißen ist eines der gebräuchlichsten Verfahren zum Fügen metallischer Komponenten. Dazu wird eine große Bandbreite an unterschiedlichen Verfahren eingesetzt, sodass es möglich ist, für jede Fügeaufgabe das geeignete Verfahren auszuwählen. Unabhängig vom eingesetzten Schweißverfahren ist es dabei eine Herausforderung, die geforderten Qualitätsanforderungen sicherzustellen, da es aufgrund von Abweichungen im Schweißprozess zur Ausbildung von Unregelmäßigkeiten im Bereich der Schweißnaht kommen kann. Um die Bewertung zu vereinfachen, werden in der Normung (z. B. ISO 5817) Bewertungsgruppen definiert, die die Zulässigkeitsgrenzen für die möglichen Unregelmäßigkeiten festlegen, wobei die Bewertungsgruppe die Qualität unter Berücksichtigung der Art, Ausprägung und Anzahl der Unregelmäßigkeiten beschreibt. [1] Die Bewertungsgruppen bilden dabei keinen speziellen Anwendungsfall ab, sondern definieren die allgemein zu erfüllende Merkmale und werden für jeden Fall individuell festgelegt. [2] Um eine verlässliche Einordnung der Schweißnähte in die Bewertungsgruppen zu ermöglichen, sind zerstörungsfreie Prüfungen notwendig, in deren Rahmen die Unregelmäßigkeiten detektiert, lokalisiert und quantifiziert werden. Dazu steht eine Reihe von zerstörungsfreien Prüfverfahren wie Ultraschallprüfungen (UT), röntgenografische Verfahren (RT) oder die Farbeindringprüfung (PT) zur Verfügung, die allerdings verfahrensspezifische Beschränkungen aufweisen. Daher ist es nicht möglich, eine umfassende Bewertung einer Schweißnaht durch die Anwendung eines einzelnen Verfahrens durchzuführen und es ist notwendig, verschiedene Verfahren zu kombinieren.

Die aktive Thermografie hat sich in den vergangenen Jahren in zahlreichen Anwendungen als verlässliches Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung etabliert. Die Anwendungen reichen dabei vom Nachweis volumetrischer Unregelmäßigkeiten in Faserverbundwerkstoffen [3] bis hin zur Rissprüfung in geschmiedeten Bauteilen [4]. Diese große Bandbreite an Anwendungen ist eine Folge der Funktionsweise des Verfahrens. Dabei werden durch externe Anregungsquellen gezielt Wärmeströme in dem zu prüfenden Bauteil erzeugt. Diese Wärmeströme werden durch die Unregelmäßigkeiten beeinflusst, wodurch sich die Temperaturen an der Bauteiloberfläche gegenüber einem fehlerfreien Referenzprüfkörper ändern. Dies ermöglicht es, Rückschlüsse bezüglich der vorliegenden Unregelmäßigkeiten zu ziehen. Das Prüfergebnis wird dabei von einer Vielzahl von Einflussparametern bestimmt, die von der Wahl der Anregungsquelle über die Größe, Lage und Ausprägung der Unregelmäßigkeiten sowie der Oberfläche der Prüfkörper, die Datenerfassung bis hin zu den angewandten Auswertalgorithmen reichen. So kann sich das Prüfergebnis durch die Wahl der Anregungsquellen zur Initiierung der Wärmeströme im Bauteil und die Anregungsgestaltung, genauso wie durch die Änderung der eingesetzten Kameratechnik oder der Auswertalgorithmen ändern. Die Detektionsgrenzen der Verfahren sind daher von einer Vielzahl von Faktoren abhängig und es bedarf daher einer anwendungsfallspezifischen Betrachtung, ob die Prüftechnik zum Nachweis der jeweils relevanten Unregelmäßigkeiten geeignet ist. [5]

Das Ziel des Projektes „QualiTWeld“ ist daher, die Detektionsgrenzen der Verfahren der aktiven Thermografie zu ermitteln und darauf aufbauend die Potentiale zur Schweißnahtprüfung zu erfassen und auf diesem Weg die thermografischen Verfahren für die Schweißnahtprüfung zu qualifizieren. Um dieses Ziel zu erreichen, sind Prüfkörper erforderlich, die schweißtypische Unregelmäßigkeiten abbilden und anhand derer eine objektive Bewertung der Möglichkeiten und Grenzen der thermografischen Verfahren ermöglicht wird.

1. Kenntnisstand

1.1 Unregelmäßigkeiten in Schweißverbindungen und deren Bewertung

Beim Schweißen metallischer Bauteile handelt es sich, unabhängig vom eingesetzten Schweißprozess, um einen komplexen Prozess, der durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst wird. Beim Schweißen kann es zu zahlreichen Unregelmäßigkeiten kommen. Diese werden in den Normen DIN EN ISO 6520-1 für Schmelzschweißungen und DIN EN ISO 6520-2 für Pressschweißungen aufgeführt. Dabei erfolgt eine Zuordnung in eine der nachfolgenden Gruppen:

- Risse
- Hohlräume
- Feste Einschlüsse
- Bindefehler und ungenügende Durchschweißungen
- Form- und Maßabweichungen
- Sonstige Unregelmäßigkeiten

Zur Bewertung wird, unabhängig vom verwendeten Schweißverfahren, für Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen die ISO 5817 und für Aluminium und seinen Legierungen die ISO 10042 genutzt. Dabei erfolgt die Bewertung anhand von drei Gruppen, wobei die einzelnen Unregelmäßigkeiten in diesen Gruppen direkt oder als Gruppe aus den Normen ISO 6520-1 und ISO 6520-2 übernommen werden. In den Normen werden für die einzelnen Unregelmäßigkeiten, in Abhängigkeit der Bewertungsgruppe, Grenzwerte definiert. Daraus ergeben sich unterschiedlich hohe Anforderungen an die Schweißnahtqualität. Die zulässigen Grenzwerte orientieren sich dabei an den geometrischen Abmessungen der Schweißnaht und der Blechdicke. Alternativ werden die Unregelmäßigkeiten als nicht tolerierbar ausgeschlossen. [6–9] Daneben gibt es für einige Verfahren, z.B. die Strahlschweißverfahren und das Rührreibschweißen, verfahrensspezifische Normen. Die Grundlage hierfür bilden für strahlgeschweißte Verbindungen die Normen ISO 13919-1 und ISO 13919-2 und für rührreibgeschweißte Verbindungen die ISO 25239-5. Analog zu den anderen Schweißverfahren ergeben sich die Grenzwerte aus den geometrischen Abmessungen der Schweißnähte oder werden als nicht tolerierbar ausgeschlossen. [2, 10, 11]

In der Normung werden somit Grenzwerte für die Ausprägung zulässiger Unregelmäßigkeiten definiert. Um jedoch eine Eingruppierung der Schweißnähte in die Bewertungsgruppen vornehmen zu können, sind zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Erfassung der Größe der Fehlstellen notwendig.

1.2 Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen

Um eine Evaluierung von Schweißverbindungen vornehmen zu können, sind neben dem Nachweis der Unregelmäßigkeiten die Lokalisierung, die Quantifizierung sowie darauf aufbauend die Einordnung der Unregelmäßigkeit notwendig. [12] Grundlage der Bewertung der Schweiß- bzw. Bauteilqualität sind die Ergebnisse zerstörungsfreier Prüfungen zum Ausschluss nicht zulässiger Schweißnahtunregelmäßigkeiten oder aber zur Ermittlung der Ausprägungen und Lage der selbigen.

Die zur zerstörungsfreien Prüfung einsetzbaren Verfahren sind dabei vielfältig. Die Detektionsmöglichkeit der Fehlstellen und die Ergebnisqualität hängen maßgeblich von den eingesetzten Prüfverfahren, der Anlagentechnik, der Erfahrung des Prüfers, der Bauteilgeometrie sowie der Lage, Größe und Ausprägung der Unregelmäßigkeiten im Bauteil ab. Daher ist die Auswahl der Prüfverfahren, ebenso wie die Durchführung und Bewertung der Prüfungen, eine sehr komplexe und anspruchsvolle Aufgabe. [13] In der

Tabelle 1 sind die in der DIN EN ISO 17635 spezifizierten Verfahren zum Nachweis schweißtypischer Unregelmäßigkeiten aufgeführt. Die Zulässigkeit der Verfahren ist dabei werkstoffabhängig. Zum Nachweis von innenliegenden Unregelmäßigkeiten stehen lediglich röntgenografische Verfahren oder aber Ultraschallprüfungen zu Verfügung, während zugängliche Oberflächeninhomogenitäten mittels Sichtprüfungen (VT), Wirbelstromprüfungen (ET), Magnetpulverprüfungen (MT) oder Farbeindringprüfungen nachgewiesen werden können. Allerdings ist keines der Verfahren uneingeschränkt und Werkstoffunabhängig für alle Unregelmäßigkeiten zulässig. [1]

Tabelle 1: Verfahren zum Nachweis von Inhomogenitäten an Stumpfstößen nach DIN EN ISO 17635 [1]

Verfahren zum Nachweis von...	Werkstoffgruppe				
	Ferritischer Stahl	Austenitischer Stahl	Aluminium	Nickel- und Kupferlegierungen	Titan
... zugänglichen Oberflächeninhomogenitäten	VT VT und MT VT und PT VT und (ET)			VT VT und PT VT und (ET)	
... inneren Inhomogenitäten	(RT) oder (UT)	(RT) oder (UT)	RT oder (UT)	-	-

Die Verfahren der aktiven Thermografie werden in der Normung bislang nicht berücksichtigt. Dies ist auf die mangelnde Kenntnis der Detektionsgrenzen zurückzuführen. Zwar konnten in zahlreichen Veröffentlichungen gezeigt werden, dass ein Nachweis schweißtypischer Unregelmäßigkeiten prinzipiell möglich ist, die systematische Verknüpfung zwischen den in der Normung definierten und der den Bewertungsgruppen zugrundeliegenden Ausprägungen sowie den Möglichkeiten und Grenzen der thermografischen Verfahren steht allerdings noch aus. Somit werden die Vorteile der aktiven Thermografie in diesem Anwendungsbereich nicht hinreichend berücksichtigt und es bedarf der Qualifizierung der thermografischen Schweißnahtprüfung. [14–16]

2. Prüfkörperherstellung und Validierung

Zur objektiven Bewertung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten sind Prüfkörper erforderlich, die typische Schweißnahtunregelmäßigkeiten abbilden. Da die thermografischen Verfahren insbesondere für solche Unregelmäßigkeiten geeignet sind, die die Wärme Flüsse im Bauteil stark beeinflussen, wurde zunächst die Herstellung von zwei Arten von Unregelmäßigkeiten angestrebt. Auf der einen Seite wurden idealisierte Risse hergestellt und auf der anderen Seite idealisierte Poren erzeugt. Um die Unregelmäßigkeiten zu validieren, wurden in Abhängigkeit der angestrebten Unregelmäßigkeiten zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt. Zur Validierung der idealisierten Risse wurden Schliffbilder angefertigt und eine Farbeindringprüfung durchgeführt, während für die idealisierten Poren eine Bewertung mittels μ CT-Aufnahmen erfolgte.

2.1 Herstellung und Validierung idealisierter Risse durch Rührreißschweißen

Das Rührreißschweißen zählt zu den Pressschweißverfahren. Bei diesem Schweißverfahren wird ein rotierendes Werkzeug, das aus einer Werkzeugschulter und einem Stift besteht, zur Herstellung der Schweißnaht genutzt. Dabei werden die zu verschweißenden Werkstücke fest eingespannt. Das Werkzeug wird in Rotation versetzt und auf das Werkstück gepresst. In Folge der dabei entstehenden Reibungswärme geht das Werkstück in einen teigigen Zustand über, sodass der Stift in das Werkstück eintaucht. Im Anschluss wird das Werkzeug

entlang der Stoßkante der Werkstücke bewegt. Durch die Rotation wird der Werkstoff entlang der Stoßkante verrührt und es kommt zur festen Verbindung der Werkstücke. Die Einschweißtiefe lässt sich dabei durch die Wahl der Stiftlänge beeinflussen. Dies wurde ausgenutzt, um in einem zweistufigen Prozess (Abbildung 1) idealisierte Risse herzustellen. Zur Probenfertigung wurde eine Portalrührreibschweißmaschine der Fa. PTG Heavy Industries Ltd. (Elland, UK) eingesetzt. Die Proben wurden aus der Aluminiumlegierung EN AW 6082-T6 gefertigt.

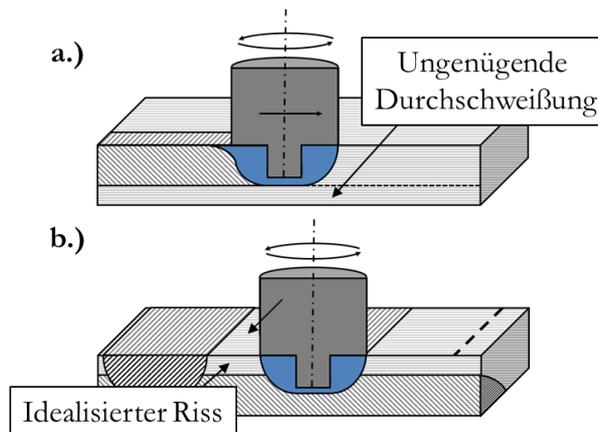


Abb. 1: Vorgehen zur Herstellung idealisierter Risse mittels Rührreibschweißen – a.) Herstellung einer unvollständigen Durchschweißung und b.) Herstellung der idealisierten Risse

Die idealisierten Risse wurden durch den Einsatz eines, für die im Rahmen der Arbeiten betrachtete Blechstärke von 8 mm, zu kurzen Stiften erzeugt, sodass zwei Bleche zwar verbunden wurden, es allerdings zu einer unvollständigen Durchschweißung kommt (Abbildung 1a)). Im Anschluss an das Verbindungsschweißen wurde zur Begrenzung der idealisierten Risse (Definition: In ihrer Länge begrenzte und zur Oberfläche geöffneten 2D-Unregelmäßigkeiten) der Prüfkörper umgedreht und orthogonal zur Stoßkante Blindnähte gesetzt, die die unvollständige Durchschweißung in einzelne Unregelmäßigkeiten unterteilen (Abbildung 1b.)). Um die Prüfkörper zu validieren, wurden Schliffbilder angefertigt und Farbeindringprüfungen durchgeführt. Exemplarische Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigt Abbildung 2.

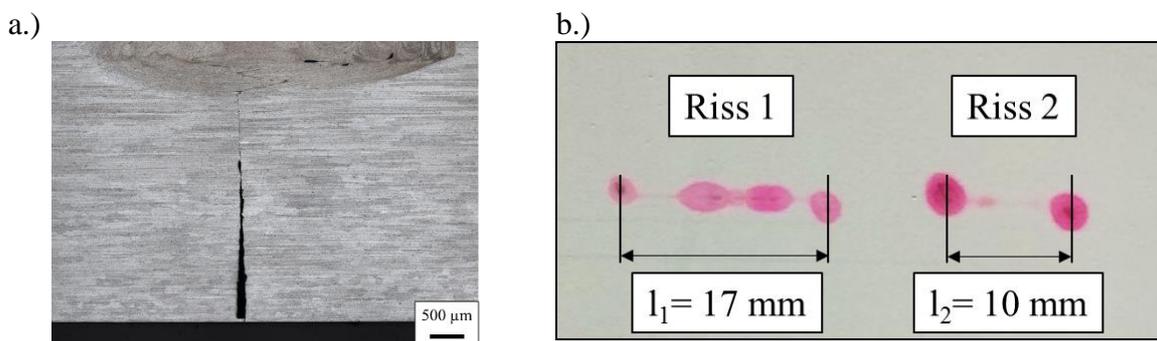


Abb. 2: Ergebnisse der Referenzuntersuchungen für idealisierte Risse – a.) Schliffbild durch eine erstellte Unregelmäßigkeit und b.) Farbeindringprüfung an zwei Stellen eines hergestellten idealisierten Risses

Das Schliffbild in Abbildung 2a.) illustriert einen idealisierten Riss, der sich an den Stoßkanten der Bleche ausbildet. Durch eine spanende Bearbeitung wurde die für das Rührreibschweißen typische Oberflächenstruktur entfernt, sodass ein Prüfkörper mit idealer Oberfläche vorliegt. Die Abbildung 2a.) zeigt das Ergebnis einer Farbeindringprüfung, auf deren Basis die Risslänge bestimmt werden kann.

2.2 Herstellung und Validierung idealisierter Poren

Mithilfe additiver Fertigung durch Laser Powder Bed Fusion (LPBF) können räumliche Strukturen schichtweise aus einem pulverförmigen metallischen Ausgangsstoff hergestellt werden. Auf einer Trägerplatte werden dünne Schichten des Pulvers aufgetragen und durch Laserstrahlung aufgeschmolzen. Dabei rastert der Laser entlang vordefinierter Pfade über das Pulverbett und schmilzt das Pulver auf. Nach jedem Laserschnitt wird eine neue Schicht Pulver aufgetragen und der Schmelzvorgang wiederholt, sodass sukzessive eine dreidimensionale Struktur entsteht.

Der im Rahmen der Untersuchungen hergestellte Prüfkörper aus der Aluminiumlegierung AlSiMg10 besteht aus einer quadratischen Platte (80 mm x 80 mm x 4 mm), in die kugelförmige Poren in unterschiedlichen Größen und Tiefenlagen eingebracht sind. An der Unterseite der einzelnen Poren befindet sich ein Kanal zum Entfernen von überschüssigem, nicht aufgeschmolzenem Pulver. Eine schematische Darstellung des Prüfkörpers findet sich in der Abbildung 3.

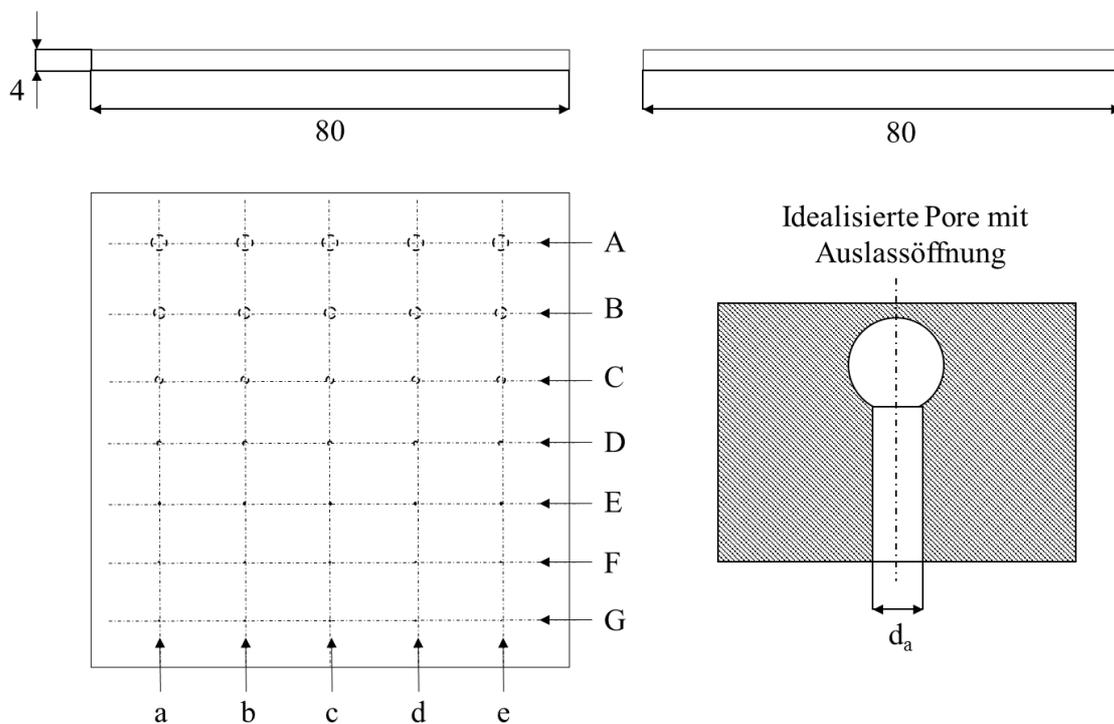


Abbildung 3: . Schematische Darstellung des Prüfkörpers 2 mit idealisierten Poren

Auf dem Prüfkörper sind insgesamt 35 idealisierte Poren angeordnet, die sich in ihrem Durchmesser und ihrer Tiefenlage, das heißt dem geringsten Abstand der Poren zur Oberfläche des Prüfkörpers, unterscheiden. Diese Werte sind für beide Parameter in der Tabelle 2 dargestellt. Die Porendurchmesser wurden so definiert, dass sowohl die höchsten Anforderungen der drei schweißtechnischen Bewertungsgruppen berücksichtigt werden.

Tabelle 2: Übersicht über die geometrischen Eigenschaften (Porendurchmesser und Tiefenlage) der eingebrachten idealisierten Poren

Porendurchmesser [mm]	Reihe						
	A	B	C	D	E	F	G
	3,2	2,4	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1
Tiefenlage [mm]	Spalte						
	a	b	c	d	e		
	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6		

Die Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse röntgenografischer Untersuchungen, die zur Validierung der Unregelmäßigkeiten durchgeführt wurden und als Referenz für die thermografischen Messungen dienen.

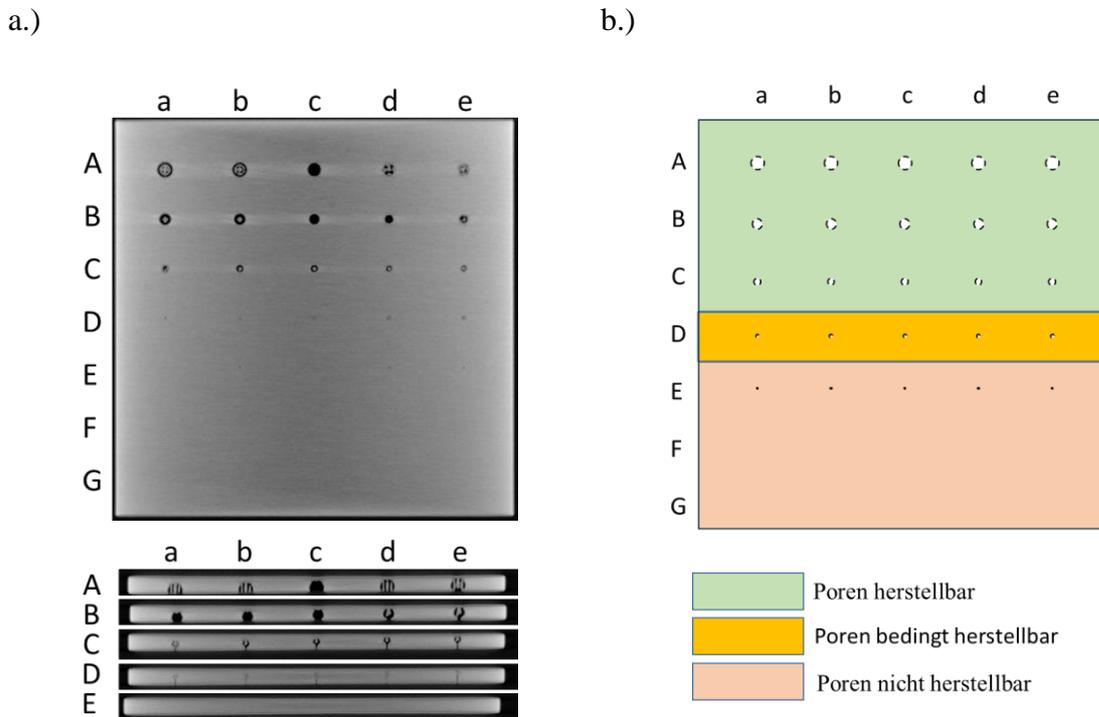


Abbildung 4: Ergebnisse der Untersuchung des Prüfkörpers anhand von μ CT-Aufnahmen - a.) Messergebnisse und b.) schematische Darstellung der nachgewiesenen, idealisierten Poren

Wie aus der Abbildung 4a.) hervorgeht, lassen sich mittels des LPBF-Verfahrens kugelförmige Poren mit definierten Tiefenlagen erzeugen. Allerdings ist dabei die herstellbare Größe begrenzt. So lassen sich lediglich Poren mit einem Durchmesser von 1,6 mm (Reihe 3) oder größer nachweisbar erzeugen. Die Poren mit einem Durchmesser von 0,8 mm zeichnen sich zwar in den μ CT-Aufnahmen ab, allerdings kann nicht bestimmt werden, ob das während der Fertigung aufgetragene Pulver durch die Auslassöffnung entfernt werden konnte. Poren mit einem kleineren Durchmesser ab 0,4 mm oder kleiner lassen sich ebenfalls nicht realisieren. Die Abbildung 4b.) illustriert die Möglichkeiten zur Herstellung der idealisierten Poren farblich.

3. Thermografische Messungen

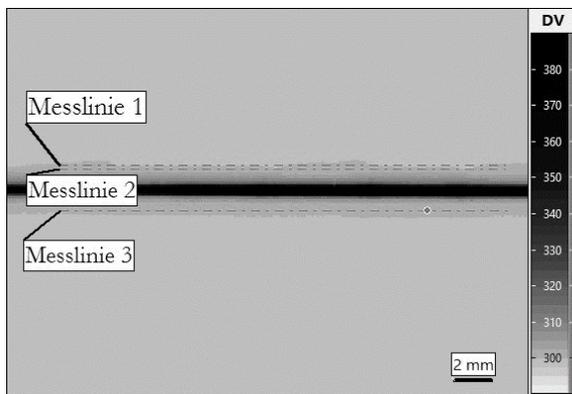
Um die Möglichkeiten und Grenzen der thermografischen Verfahren zum Nachweis von schweißtypischen Unregelmäßigkeiten bewerten zu können, werden die Probenkörper im Rahmen des Projektes mit verschiedenen Verfahren der aktiven Thermografie untersucht. Nicht alle thermographischen Verfahren sind zum Nachweis der idealisierten Unregelmäßigkeiten geeignet. Insbesondere die laserangeregte Wärmefluss thermografie, die induktiv angeregte Puls-Phasen Thermografie sowie die ultraschallangeregte Lockin-Thermografie haben gute Ergebnisse zum Nachweis von Rissen und rissähnlichen Unregelmäßigkeiten gezeigt. Zum Nachweis von Poren sind insbesondere optische Anregungstechniken sowie die induktive Erwärmung geeignet, wohingegen eine Anregung mittels Hochleistungsultraschall zum Nachweis dieser Unregelmäßigkeiten nicht zielführend ist. Nachfolgend sind exemplarische Ergebnisse dargestellt, die eine erste Einordnung der

Verfahren ermöglichen. Dabei wurde die laserangeregte Wärmefluss-thermografie betrachtet, sowie zum Nachweis der idealisierten Poren die optisch angeregte Puls-Phasen Thermografie.

3.1 Thermografischer Nachweis idealisierte Risse

Für die laserangeregte Wärmefluss-thermografie wurde zur Anregung ein Lasersystem eingesetzt, das aus einem Faserlaser der Fa. SPI Lasers UK Limited, (Southampton, UK), einer Scanneroptik der Firma Raylase GmbH (Wessling, Deutschland) sowie einer Steuerungseinheit besteht. Der Laserspot wird während der Prüfung entlang einer definierten Linie über die Probe geführt. Zur Datenerfassung wurde eine IR-Kamera von Typ VarioCAM HD head und die zugehörige Software IRBIS3plus der Firma Infratec GmbH (Dresden, Deutschland) eingesetzt. Die Prüfung erfolgte in Reflexionsanordnung. In der Abbildung 5 ist ein exemplarisches Messergebnis der laserangeregten Wärmefluss-thermografie dargestellt. Dabei wurde der im Abschnitt 2.1 dargestellte Prüfkörper mit den zwei idealisierten Rissen unterschiedlicher Länge untersucht. Es wurde mit einer Anregungsleistung von 14 W, einer Scangeschwindigkeit von 10 mm/s und einem Spotdurchmesser von ca. 1 mm gearbeitet. Die Abbildung 5a.) zeigt dazu eine Akkumulation der Rohwerte sowie die Lage der in der Abbildung 5b.) dargestellten Messlinien, wobei hier die Maximaltemperaturen dargestellt sind. Aus den Abbildungen wird deutlich, dass es möglich ist, mit dieser Thermografiertechnik die Unregelmäßigkeiten zu detektieren sowie deren Länge sehr gut zu quantifizieren.

a.)



b.)

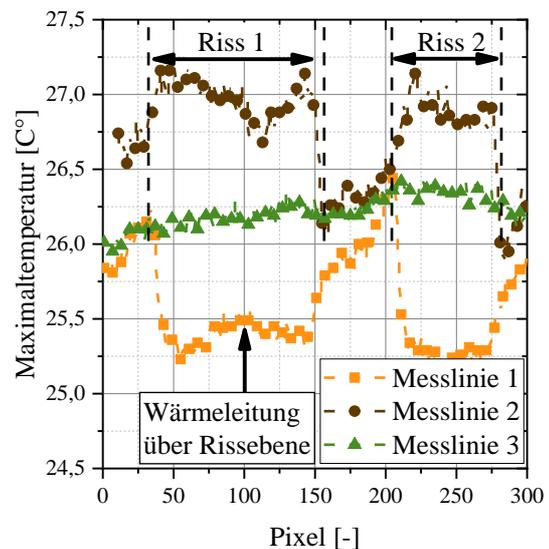


Abbildung 5: Ergebnisse der Untersuchung des Prüfkörpers mit idealisierten Rissen- a.) Akkumulierte Messergebnisse und b.) Maximaltemperaturen entlang der Messlinien 1-3

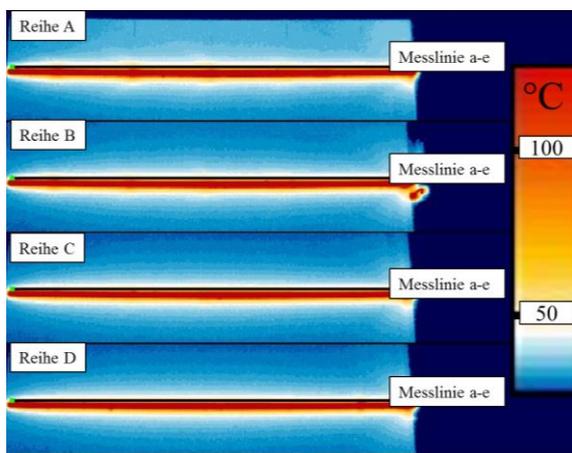
Bei der Betrachtung der Messlinien fällt allerdings auf, dass es, im Zentrum der Unregelmäßigkeiten zu einem Temperaturabfall kommt. Dies kann auf eine Wärmeleitung über die Rissebene zurückgeführt werden. Dies ist relevant, da bei realen Rissen in der Regel zum Kontakt der Rissflanken kommt. Daher ist zu erwarten, dass es bei einem geschlossenen Riss nicht möglich ist, die Unregelmäßigkeiten nachzuweisen. Daher ist eine intensive Betrachtung dieses Einflussfaktors notwendig und es wird derzeit an der Herstellung von Prüfkörpern gearbeitet, die die Einstellung definierter Kontaktbedingungen ermöglichen.

3.2 Thermografischer Nachweis idealisierter Poren

Nachfolgend werden die Ergebnisse zum Nachweis der idealisierten Poren im mittels LPBF hergestellten Prüfkörper aus Abschnitt 2.2 durch zwei optisch angeregte Thermografiertechniken dargestellt. Während bei der laserangeregten Wärmefluss-thermografie die gleiche Anlagentechnik wie bei der Prüfung der idealisierten Risse eingesetzt wurde, erfolgte die Anregung bei der optisch angeregten Puls-Phasen Thermografie durch einen Blitzlampe mit einer maximalen Energie von 6 kJ. In diesem Fall erfolgte die Datenerfassung mit einer IR-Kamera der Firma. Flir Systems Inc. (Wilsonville, USA) vom Typ Flir SC5600-M. Zur Durchführung der Messungen wurde die Software DisplayImg7 der Fa. edevis GmbH (Stuttgart, Deutschland) genutzt.

In der Abbildung 6 sind die Ergebnisse der laserangeregten Wärmefluss-thermografie dargestellt. Dabei wurde mit einer Anregungsleistung von 28 W, einer Scangeschwindigkeit von 10 mm/s und einem Spotdurchmesser von ca. 1 mm gearbeitet. Wie aus den Thermogrammen mit den akkumulierten Maximaltemperaturen in Abbildung 6a.) hervorgeht, zeichnet sich die zur Anregung genutzte Scanlinie mit hohen Temperaturen stark ab. In diesem Bereich ist keine Auswertung möglich. Zudem sind die Auswirkungen der idealisierten Poren in dieser Darstellung nur schwer erkennbar. Daher wurden die Maximaltemperaturen in direkter Nähe zur Scanlinie (Abstand ca. 1 mm) ausgelesen und im Diagramm in Abbildung 6b.) dargestellt.

a.)



b.)

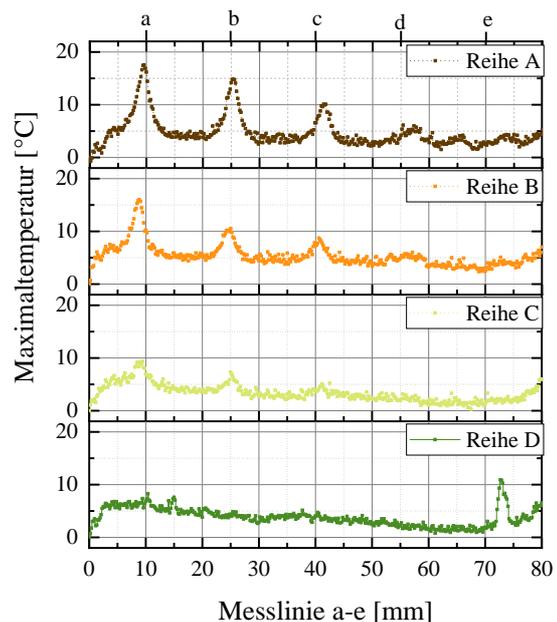


Abbildung 6: Ergebnisse der Untersuchung des Prüfkörpers mit idealisierten Poren mittels der laserangeregten Wärmefluss-thermografie - a.) Akkumulierte Maximaltemperaturen der Reihen A-D und b.) Maximaltemperaturen entlang der Messlinien für die der Reihen A-D

Hier zeichnen sich durch die veränderte Skalierung die Unregelmäßigkeiten deutlich ab. Insbesondere in den Reihen A und B lassen sich die Unregelmäßigkeiten sehr gut identifizieren, aber auch in Reihe C sind noch durch Poren ausgelöste Temperaturerhöhungen erkennbar. Zudem wird deutlich, dass neben dem Durchmesser der Poren, der die absolute Höhe der Maximaltemperaturen bestimmt, auch die Tiefenlage durch das Messverfahren abgebildet wird, da die Temperaturspitzen mit zunehmender Tiefe kontinuierlich abnehmen. Problematisch ist dabei, dass ein Peak entweder eine kleine Pore unter der Oberfläche oder eine große Pore weiter im Material sein repräsentieren kann und nur bei einer bekannten Tiefenlage auf die Porengröße geschlossen werden kann. Um sowohl die Größe und die Lage

erfassen zu können, ist eine detaillierte Auswertung des zeitlichen Temperaturverlaufs erforderlich.

Die Abbildung 7 zeigt das Ergebnis einer Prüfung an der gleichen LPBF-Probe, die mittels der optisch angeregten Puls-Phasen Thermografie durchgeführt wurde. Dabei wurde die Probe mit einem Anregungsimpuls der Länge 10 ms und der maximal möglichen Anregungsenergie von 6 kJ angeregt. Zur Auswertung wurde das Phasenbild (Abbildung 7a.) bei einer Auswertefrequenz von 5 Hz betrachtet. Dabei zeichnen sich die Poren der Reihen A und B klar ab, wohingegen die Reihe C lediglich schemenhaft erkennbar ist. Die Poren der Reihe D, die in den Ergebnissen der μ CT-Aufnahmen erkennbar sind, können hier nicht detektiert werden. Werden die Phasenverläufe (Abbildung 7b.) entlang der farblich markierten Messlinien betrachtet, so bestätigt sich dieses Erkenntnis. Dies bedeutet, dass mit abnehmender Porengröße die Detektierbarkeit abnimmt. Auf einen Einfluss der Tiefenlage kann lediglich auf Basis der Ergebnisse der Reihe C geschlossen werden. Hier sind die weniger tief liegenden Poren ansatzweise erkennbar, wobei das starke Rauschen eine klare Identifikation verhindert.

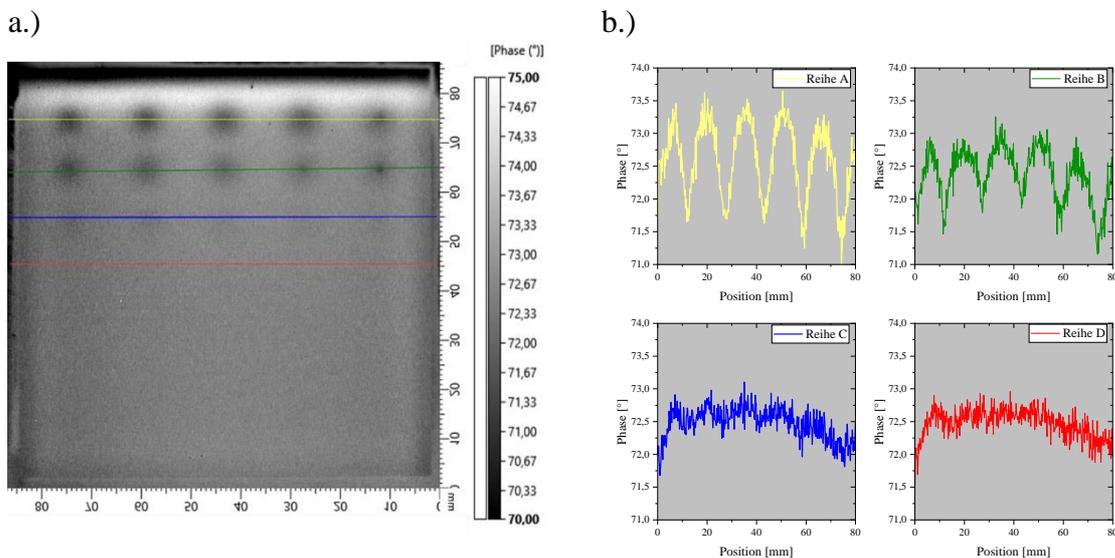


Abbildung 7: Ergebnisse der Untersuchung des Prüfkörpers mit idealisierten Poren mittels der optisch angeregten Puls-Phasen Thermografie - a.) Phasenbild bei einer Auswertefrequenz von 5 Hz und b.) Phasenverläufe entlang der Messlinien für die Reihen A-D

Werden die Ergebnisse verglichen, so zeigen sich Ähnlichkeiten in der Erkennbarkeit. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass bei der laserangeregten Wärmefluss thermografie eine ungekühlte IR-Kamera eingesetzt, weshalb nach [17] eigentlich schlechtere Ergebnisse erwartet wurden. Trotz dieses Nachteils kann allerdings der Einfluss der Tiefenlage beim Einsatz der laserangeregten Wärmefluss thermografie besser herausgearbeitet werden. Die Ursache hierfür dürfte im geringen Energieeintrag bei der optisch angeregten Puls-Phasen Thermografie zu sehen sein, der eine bessere Auflösung der Unregelmäßigkeiten verhindert.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Wie in den Ergebnissen dargestellt, konnten mit verschiedenen Herstellungsverfahren Prüfkörper gefertigt werden, die schweißtypische Unregelmäßigkeiten idealisiert abbilden. Dabei zeigt sich jedoch, dass einige Einschränkungen bestehen. Insbesondere bei den idealisierten Poren zeigt sich, dass noch ein erheblicher Verbesserungsbedarf bei der Prüfkörperherstellung besteht, da kleinste Unregelmäßigkeiten nicht hergestellt werden

können. Hier sind weitere Anstrengungen notwendig, um die Prüfkörper zu verbessern um eine qualitative und objektive Bewertung der Thermografieverfahren zu ermöglichen.

Die Prüfkörper wurden thermografisch geprüft und es kann gezeigt werden, dass potenziell beide dargestellten Thermografieverfahren zur Detektion von für die Schweißtechnik relevanten Poren und Rissen geeignet sind. Besonders im Bereich der Rissprüfung ist aufgrund der ersten Ergebnisse und der bekannten Erfahrungen ein hohes Anwendungspotential zu sehen. Nach derzeitigem Stand ist es allerdings nicht möglich, eine allein auf der aktiven Thermografie basierende Einordnung in die Bewertungsgruppen vorzunehmen, da tief liegende, relevante Poren nicht detektiert werden können. Die Verfahren sind lediglich zum Nachweis oberflächennaher Poren geeignet. Bezüglich der Tiefenauflösung reichen dementsprechend beide Verfahren nicht an die als Referenz durchgeführten μ CT-Messungen heran. Weiter ist eine Weiterentwicklung der Auswerteverfahren notwendig, um kleine Oberflächenporen von großen tiefliegenden Poren unterscheiden zu können. Zudem bedarf es einer tiefergehenden Betrachtung des Einflusses der Anregungs- und Aufzeichnungsparameter und deren Korrelation mit den Messergebnissen, sodass die Bereiche, abgesteckt werden können, in denen die thermografischen Verfahren als ergänzende oder alternative Prüfmethode zu den etablierten Verfahren eingesetzt werden können.

5. Förderhinweis

Die Untersuchungen sind im Rahmen des Projektes QualiTWeld (Fkz: 03TN0003) durchgeführt worden, das im Rahmen des Förderprogramms "WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen" durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wird. Die Autoren bedanken sich für die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literaturverzeichnis

- [1] *DIN EN ISO 17635:2017-04, Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen_- Allgemeine Regeln für metallische Werkstoffe (ISO_17635:2016); Deutsche Fassung EN_ISO_17635:2016*
- [2] *DIN EN ISO 13919-1:2020-03, Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen_- Anforderungen und Empfehlungen für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten_- Teil_1: Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ISO_13919-1:2019); Deutsche Fassung EN_ISO_13919-1:2019*
- [3] MAIERHOFER, Christiane ; RÖLLIG, Mathias ; GOWER, Michael ; LODEIRO, Maria ; BAKER, Graham ; MONTE, Christian ; ADIBEKYAN, Albert ; GUTSCHWAGER, Berndt ; KNAZOWICKA, Lenka ; BLAHUT, Ales: *Evaluation of Different Techniques of Active Thermography for Quantification of Artificial Defects in Fiber-Reinforced Composites Using Thermal and Phase Contrast Data Analysis*. In: *International Journal of Thermophysics* 39 (2018), Nr. 5
- [4] BOUTEILLE, P. ; LEGROS, G. ; WALASZEK, H. ; BODNAR, J. L.: *Non-destructive testing of metallic materials using passive and active infrared thermography*. In: *Mechanics & Industry* 15 (2014), Nr. 4, S. 313–321

- [5] MALDAGUE, Xavier P. V.: *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. New York, NY : Wiley, 2001 (Wiley series in microwave and optical engineering)
- [6] *DIN EN ISO 6520-1:2007-11, Schweißen und verwandte Prozesse_- Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen_- Teil_1: Schmelzschweißen*
- [7] *DIN EN ISO 6520-2:2013-12, Schweißen und verwandte Prozesse_- Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen_- Teil_2: Pressschweißungen*
- [8] *DIN EN ISO 5817:2014-06, Schweißen_- Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen)_- Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (ISO_5817:2014); Deutsche Fassung EN_ISO_5817:2014*
- [9] *DIN EN ISO 10042:2019-01, Schweißen_- Lichtbogenschweißverbindungen an Aluminium und seinen Legierungen_- Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (ISO_10042:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_10042:2018*
- [10] *DIN EN ISO 13919-2:2020-05, Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen_- Anforderungen und Empfehlungen für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten_- Teil_2: Aluminium, Magnesium und ihre Legierungen und reines Kupfer (ISO/DIS_13919-2:2020); Deutsche und Englische Fassung prEN_ISO_13919-2:2020*
- [11] *DIN EN ISO 25239-5:2020-12, Rührreibschweißen_- Aluminium_- Teil_5: Qualitäts- und Prüfungsanforderungen (ISO_25239-5:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_25239-5:2020*
- [12] RYTTER, Anders: *Vibration based inspection of civil engineering structures*. Aalborg, University of Aalborg, Dept. of Building Technology and Structural Engineering. Dissertation. 1993
- [13] STEEB, Siegfried ; BASLER, G. ; DEUTSCH, Volker ; GAUSS, G. ; GRIESE, A. ; GÜTTINGER, T. W. ; KOLB, Klaus ; SCHUR, F. ; STAIB, W. ; STEIN, W. ; VOGT, M. ; WEZEL, H.: *Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung : Die gebräuchlichsten Verfahren im Überblick*. 5., aktualisierte Auflage. Tübingen : expert, 2019 (Kontakt & Studium 243)
- [14] BROBERG, Patrik ; RUNNEMALM, Anna: *Detection of Surface Cracks in Welds using Active Thermography*. In: *18th WCNDT : Durban, South Africa, 2012 ; 18th World Conference on Non-Destructive Testing : 16 - 20 April 2012, International Convention Centre, Durban, South Africa*. Durban : South African Inst. for Non-Destructive Testing, 2012
- [15] SRAJBR, Christian ; TANASIE, Gheorghe ; DILGER, Klaus ; BÖHM, Stefan: *NDT of laser beam welded single lap joints by active thermography* 53 (2009), S. 355–359
- [16] DORAFSHAN, Sattar ; MAGUIRE, Marc ; COLLINS, William: *Infrared Thermography for Weld Inspection: Feasibility and Application*. In: *Infrastructures* 3 (2018), Nr. 4, S. 45
- [17] MAIERHOFER, C. ; ROTHBART, N. ; GOLDAMMER, M. ; HOHLSTEIN, F. ; KOCH, J. ; KRYUKOV, I. ; MAHLER, G. ; STOTTER, B. ; WALLE, G. ; OSWALD-TRANTA, B. ; SENGEBUSCH, M.: *A round robin test of flash thermography – detectability and quantification of artificial and natural defects in CFRP and metal structures*. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography* : QIRT Council, 4-8 July, 2016