

Einsatz induktionsangeregter Thermografie zur Detektion von Fehlern in Schweißverbindungen nach DIN 6520

Eugen PRINTS¹, Igor KRYUKOV¹, Malte MUND², Joachim LEHMANN³,
Christian SRAJBR⁴, Klaus DILGER², Stefan BÖHM¹

¹ Universität Kassel, Fachgebiet Trennende und Fügende Fertigungsverfahren, Kassel

² Technische Universität Braunschweig, Institut für Füge- und
Schweißtechnik, Braunschweig

³ GSI - Niederlassung SLV Hannover, Hannover

⁴ edevis GmbH, Stuttgart

Kontakt E-Mail: e.prints@uni-kassel.de

Kurzfassung. Das Fügen metallischer Werkstoffe durch Schweißen ist ein fester Bestandteil der Wertschöpfungskette in verschiedensten Branchen. Beim Schweißen kann eine Vielzahl von Unregelmäßigkeiten entstehen, die in der DIN EN ISO 6520 erfasst und kategorisiert sind. Schweißverbindungen unterliegen im allgemeinen hohen Qualitätsanforderungen. Die Zulässigkeit von Unregelmäßigkeiten wird anhand normativ festgelegter Kriterien (z. B. DIN EN ISO 5817 oder DIN EN ISO 10042) bewertet. Die aktive Thermografie ist bisher nicht hinreichend zur Prüfung von Schweißnähten qualifiziert, woraus sich eine Normungslücke ergibt.

Ziel des Forschungsvorhabens „QualiTWelt“, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen der Förderrichtlinie „WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen“ gefördert wird, ist die Qualifizierung thermografischer Verfahren mit aktiver Anregung für die Prüfung von Schweißverbindungen. Das Projekt trägt dazu bei, die thermografische Prüfung zur Anwendung an Schweißverbindungen zu etablieren. Zur objektiven Bewertung der Prüfverfahren und -systeme der aktiven Thermografie werden im Rahmen des Projektes Prüfkörper unter Verwendung relevanter Werkstoffgruppen mit typischen, realitätsnahen Schweißnahtunregelmäßigkeiten entwickelt.

Im Rahmen dieses Beitrages wird auf die Herstellung von Prüfkörpern zur Erzeugung von Unregelmäßigkeiten in Anlehnung an DIN EN ISO 5817 und 10042 eingegangen. Es werden beispielhaft die Ergebnisse von Untersuchungen zur Erfassung der Detektionsgrenzen induktionsangeregter Thermografie zum Nachweis dieser Unregelmäßigkeiten vorgestellt. Die zur Erwärmung der Prüfkörper eingesetzten Prüfanordnungen, deren Vor- und Nachteile in der Anwendung sowie das Potential zur Fehleridentifikation werden diskutiert.

Einführung

Das Fügen durch Schweißen gehört nach DIN 8520 zu der vierten Hauptgruppe in der Einteilung von Fertigungsverfahren und ist in der industriellen Produktionstechnik nicht mehr wegzudenken. Das Schweißen kann mit Hilfe verschiedener Verfahren mit und ohne Zusatzwerkstoff/Schutzatmosphäre erfolgen, die Auswahl eines geeigneten Fügeverfahrens



und das Sicherstellen der geforderten Qualitätsstandards obliegt jedoch dem Anwender. Zur Standardisierung der Anforderungen an eine Schweißverbindung sind in der Normung (z. B. DIN EN ISO 5817 oder DIN EN ISO 10042) drei Bewertungsgruppen definiert. Diese geben die Zulässigkeitsgrenzen der Unregelmäßigkeiten an, die in einer Schweißverbindung vorkommen können. Die Einteilung in die Bewertungsgruppen erfolgt anhand der Art, Lage und geometrischer Ausprägung der jeweiligen Unregelmäßigkeit. Zur Erfassung und Quantifizierung von Fehlstellen werden zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Durchstrahlungsprüfung (RT), Farbeindringprüfung (PT) und Ultraschallprüfung (UT) eingesetzt. Jedes Prüfverfahren besitzt jedoch aufgrund des physikalischen Wirkungsprinzips Vorteile aber auch verfahrensspezifische Einschränkungen, sodass die ganzheitliche Bewertung einer Fügeverbindung oftmals erst durch eine Kombination verschiedener ZfP-Verfahren möglich ist. [1–3]

Die aktive Thermografie wird trotz der robusten Funktionsweise und der bildgebenden Ergebnisse in der Normung zur Bewertung von Schweißverbindungen nicht aufgeführt. Die Anwendbarkeit dieses zerstörungsfreien Prüfverfahrens ist sehr breit gefächert und umfasst die Detektion von sowohl auf der Oberfläche eines Prüfkörpers vorkommenden als auch im Inneren eingeschlossenen Unregelmäßigkeiten. Die Eignung der aktiven Thermografie zum Nachweis von Fehlstellen in verschiedenen Werkstoffen hängt stark von der verwendeten Anregungsart ab. Anhand der von Infrarotkamera erfassten radiometrischen Daten kann der verlässliche Nachweis von Unregelmäßigkeiten erfolgen. Es ist jedoch die Aufgabe des Prüfers, eine geeignete Quelle zur Energieeinbringung, die möglicherweise notwendigen Referenzprüfkörper sowie die Verfahren zur Auswertung der Messdaten auszuwählen. Die Grundlagen, Gerätetechnik, Auswerteverfahren sowie idealisierte Referenzprüfkörper werden in den Normen der thermografischen Prüfung erfasst, jedoch fehlt dabei der einheitliche Bezug von Art, Lage und Ausprägung der Unregelmäßigkeiten zu den anwendungsorientierten Bewertungsgruppen aus dem Bereich Schweißtechnik. [4–8]

Das Ziel des Forschungsvorhabens „QualiTWeld“ ist, die Verfahren der aktiven Thermografie zur Prüfung von Schweißverbindungen zu qualifizieren. Die Zulässigkeitsgrenzen relevanter Unregelmäßigkeiten im Bereich Schweißtechnik werden erfasst und den Detektionsgrenzen thermografischer Verfahren gegenübergestellt. Zur objektiven Bewertung der Nachweisfähigkeit der aktiven Thermografie sind Prüfkörper notwendig, die schweißtypische Unregelmäßigkeiten abbilden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden Methoden zur reproduzierbaren Einbringung von Unregelmäßigkeiten innerhalb der Schweißverbindungen erarbeitet.

1. Stand der Technik und Zielsetzung

Das Fügen metallischer Werkstoffe durch Schweißen findet in der industriellen Fertigung eine weite Verbreitung und unterliegt hohen Qualitätsstandards. Abhängigkeit von Werkstoffen, Stoßart und Bauteilwandstärke können verschiedene Schweißverfahren eingesetzt werden. Bei der Auswahl des geeigneten schweißtechnischen Verfahrens für die konkrete Fügeaufgabe spielt für den Anwender die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung neben der Funktionalität eine entscheidende Rolle. [1] Aufgrund der Komplexität des Fügeverfahrens kann es zu einer Vielzahl von Unregelmäßigkeiten innerhalb einer Schweißverbindung kommen. Eine einheitliche Einteilung der geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen beim Schweißen und verwandten Prozessen für Schmelz- und Pressschweißverfahren wird in der DIN EN ISO 6520 vorgenommen.

Zur Bewertung der Schweißverbindungen wird in der Normung nach Schweißverfahren und den eingesetzten Werkstoffen unterschieden. Es sind jedoch

einheitlich drei Bewertungsgruppen B, C und D definiert, wobei in der Gruppe B die höchsten Anforderungen an die Schweißverbindung voraussetzt werden. Für Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen werden die Zulässigkeitsgrenzen von Unregelmäßigkeiten für die drei Bewertungsgruppen in der DIN EN ISO 5817 zusammengefasst. Die Definition der Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten für Lichtbogenschweißverbindungen an Aluminium und seinen Legierungen ist in der DIN EN ISO 10042 festgehalten. Für die Bewertung der Strahlschweißverfahren und des Rührreibschweißens gelten verfahrensspezifischen Normen. Die Zulässigkeitsgrenzen einzelner Bewertungsgruppen der Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen sind in der DIN EN ISO 13919 zusammengefasst und nach Werkstoff in Teil 1 und 2 unterschieden. Die Richtlinien zur Bewertung der Fügeverbindungen beim Rührreibschweißen beschränken sich auf die Anwendung an Aluminium sowie seinen Legierungen und sind in der DIN EN ISO 25239-5 festgehalten. Die Bezeichnungen einzelner Unregelmäßigkeiten in den obengenannten Verfahrensnormen sind in Anlehnung an die DIN EN ISO 6520 eingeführt. Im Allgemeinen wird zwischen Oberflächenunregelmäßigkeiten, inneren Unregelmäßigkeiten, Unregelmäßigkeiten in der Nahtgeometrie und Mehrfachunregelmäßigkeiten unterschieden [2, 9–13]

Entsprechend der schweißtechnischen Normung, können die kritischen Unregelmäßigkeiten in zwei Gruppen eingeteilt werden: „unzulässig“ und „bedingt zulässig“. Zur ersten Gruppe zählen beispielsweise Risse und Bindefehler, deren Vorkommen in Schweißverbindungen detektiert werden muss. Als bedingt zulässig zählen Unregelmäßigkeiten, deren Vorliegen anhand bestimmter Grenzwerte toleriert wird (z. B. Poren). Hierbei hängt die zulässige Größe einer Unregelmäßigkeit von den eingesetzten Werkstoffen, der Stoßart sowie der Bauteilwandstärke ab. Anhand normativer Vorgaben können unzulässige Schweißnahtunregelmäßigkeiten mit Hilfe der ZfP-Verfahren nachgewiesen werden. Zu den im Bereich Schweißtechnik etablierten ZfP-Verfahren zählen VT, PT, MT, RT, UT und ET. Jedoch ist aufgrund der Art, Lage und der Ausprägung einer Unregelmäßigkeit in der Praxis mit verfahrensspezifischen Einschränkungen der ZfP-Verfahren bezüglich der Detektionsfähigkeit zu rechnen. [3]

Durch die Qualifizierung aktiver Thermografie zur Prüfung von Schweißverbindungen können die etablierte Prüfverfahren um ein weiteres verlässliches ZfP-Verfahren zum Nachweis relevanter Unregelmäßigkeiten ergänzt werden.

2. Prüfablauf und Prüfstandkonfiguration

Um die thermografische Prüfung von Schweißverbindungen erfolgreich durchführen zu können muss eine geeignete Prüfhardware ausgewählt werden. Im Rahmen des Projektes „QualiTWeld“ wird ein Anforderungskatalog erstellt, der die Auswahl einer geeigneten Prüfsystemkonfiguration (IR-Kamera, Anregungsquelle, Prüfkonfiguration, Auswerteverfahren) für die thermografische Prüfung ermöglicht. Dabei werden ebenfalls die Richtlinien aus europäischen und deutschen Normen für zerstörungsfreie Prüfung berücksichtigt. Zur Veranschaulichung wird im Folgenden ein Beispiel zur Definition des relevanten Prüfbereichs erläutert (Abb. 1). Zur Erhöhung der Prüfperformance wird gemäß der Abbildung eine Einschränkung des Sichtfeldes in horizontaler und vertikaler Richtung (HFOV/VFOV) auf eine angepasste Größe empfohlen. Dabei soll maximale örtliche Auflösung angestrebt werden, die durch den optimalen Arbeitsabstand zwischen der eingesetzten IR-Kamera in Kombination mit geeignetem Objektiv und der Prüfkörperoberfläche erreicht werden kann. Das aufgenommene Gesichtsfeld (FOV) soll umlaufend 5% größer als die eigentliche Prüfläche (ROI) sein. Die Prüflfläche beinhaltet in Anlehnung an DIN EN ISO 23277 und 23278 die Schweißnahtlänge bzw. -breite sowie die

Wärmeeinflusszone mit bis zu 10 mm Abstand von der Schweißnaht. Die Betrachtung der Wärmeeinflusszone ist notwendig, da beim Schweißprozess neben den Unregelmäßigkeiten innerhalb der Schweißnaht ebenfalls Fehler im Grundwerkstoff entstehen können (z. B. Erstarrungsrisse), welche deren mechanische Belastbarkeit maßgeblich mindern können.

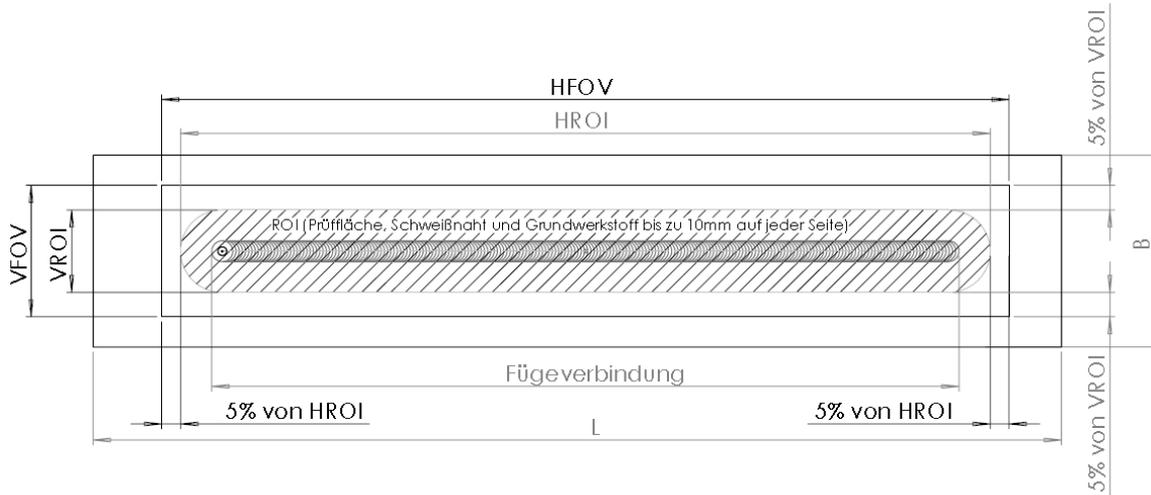


Abb. 1. Definition von FOV (field of view) und ROI (region of interest) zur thermografischen Prüfung von Schweißverbindungen.

Im weiteren Projektverlauf wird nach vollständiger Auswertung der durchgeführten Untersuchungen eine Mindestanforderung an die örtliche Auflösung für thermografische Prüfung von Schweißverbindungen festgelegt, die dem Anwender als Richtlinie für die Auswahl der Hardware sowie Auslegung einer Prüfstation dienen kann.

Der sinnvolle Prüfbereich kann durch den Einsatz von Anregungsquellen, die lediglich in einem geometrisch definierten Bereich eine ausreichende homogene Temperaturänderung innerhalb des Bauteils erreichen können (z. B. Induktionsanregung), eingeschränkt sein. In diesem Fall ist es notwendig die Fügeverbindung in mehreren Abschnitten zu untersuchen. Hierzu ist die eingesetzte Prüfvorrichtung eine reproduzierbare Anregung sowie Untersuchung der Prüfkörper in verschiedenen Bereichen ermöglichen. In Abb. 2 ist die Prüfplattform vorgestellt, die im Rahmen des Projektes „QualiTWeld“ für thermografische Prüfung von Schweißverbindungen entwickelt wurde. Diese Vorrichtung ermöglicht es, die für die Thermografie relevanten Anregungsquellen einzubinden und die Detektionsparameter zu berücksichtigen. Ein CAD-Modell der vollständigen Prüfplattform mit diversen Anregungsquellen ist in Abb. 2 (2) zu sehen. Durch den modularen Aufbau können optische, induktive und ultraschallbasierte Anregungsquellen sowie unterschiedliche IR-Kameras eingebunden und die relevanten Prüf- und Anregungsparameter eingestellt werden. Für die laserangeregte Thermografie wurden individuelle Prüfplätze entworfen, die auf dem modularen System aufbauen, um die Laserschutzrichtlinien einzuhalten und die an den Forschungsstellen vorhandene Anlagentechnik integrieren zu können.

Weiterhin ermöglicht der modulare Aufbau der Prüfvorrichtung unterschiedliche Kombinationen der relativen Positionierung der Anregungsquelle, der IR-Kamera und des Prüfobjekts. So kann der Prüfkörper beispielsweise mittels induktiver Anregung sowohl in Transmissions- (Abb. 2, 1a) als auch in Reflexionsanordnung (Abb. 2, 1b) untersucht werden. Die Prüfkörperhalterung ist auf motorisierten Linearführungen angebracht, sodass zum einen eine hohe Reproduzierbarkeit bei der Positionierung des Prüfkörpers gewährleistet und zum anderen eine automatisierte Untersuchung verschiedener Bereiche der Fügeverbindung ermöglicht wird. Die Halterung für Prüfkörperpositionierung ist für drei zuvor festgelegte Prüfkörpergrößen ausgelegt, sodass sowohl Schweißnähte, hergestellt mit verschiedenen Schweißverfahren, als auch die im Rahmen des Projektes entwickelten Referenzprüfkörper auf der Prüfplattform einheitlich untersucht werden können.

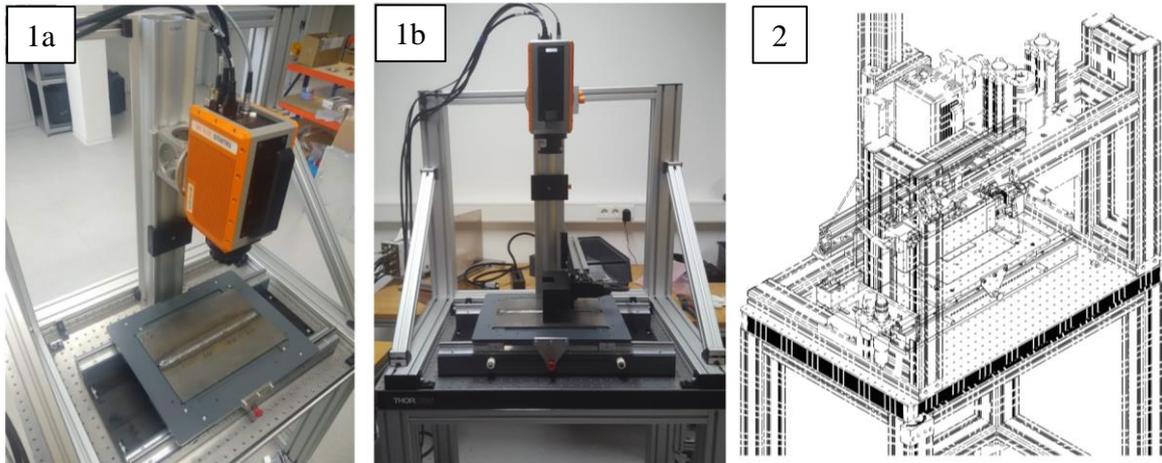


Abb. 2. Aufbau der Modularen Prüfplattform. Prüfkörperpositionierung zur Untersuchung in Transmissionsanordnung (1a). Prüfkörperpositionierung in Reflexionsanordnung (1b). Schematische Darstellung (CAD) der Prüfplattform unter Verwendung diverser Anregungsarten (2).

Für eine einheitliche Gegenüberstellung der Ergebnisse verschiedener Prüfverfahren ist die metrische Kalibrierung des FOV notwendig. Hierdurch kann die Lage und Größe einer Unregelmäßigkeit innerhalb der erfassten Messdaten bestimmt und eine Bewertung der Detektionsfähigkeit verschiedener Messsysteme vorgenommen werden. Am Beispiel der Abb. 3 wird der für thermografische Untersuchung von Schweißverbindungen festgelegte metrische Kalibrierprozess erläutert. Für die metrische Kalibrierung eines thermografischen Messsystems wurden von edevis GmbH spezielle Kalibrierkörper sowie Algorithmen zur automatisierten Kalibrierung der IR-Bilder entwickelt. Diese Vorrichtung wird zur Kontrasterhöhung beheizt und mit speziellen Symbolen beschichtet. Die Symbole enthalten relevante Positionsinformationen zur metrischen Kalibrierung. Vor der Prüfung einer Schweißverbindung ist die Kalibriervorrichtung innerhalb der ROI zu positionieren (Abb. 3, 1). Im nächsten Schritt wird softwareseitig eine metrische Kalibrierung durchgeführt. Hierdurch kann die Lage des Koordinatensystems beliebig gewählt sowie eine Entzerrung des Bilds, sofern es die relative Positionierung der IR-Kamera zum Prüfkörper erfordert, vorgenommen werden (Abb. 3, 2 und 3). Anschließend ist unmittelbar vor der thermografischen Untersuchung der Prüfkörper sowie die Anregungsquelle, im vorgestellten Beispiel ein Induktor zur Prüfung in Reflexionsanordnung, auf dem Prüfstand zu positionieren (Abb. 3, 4).

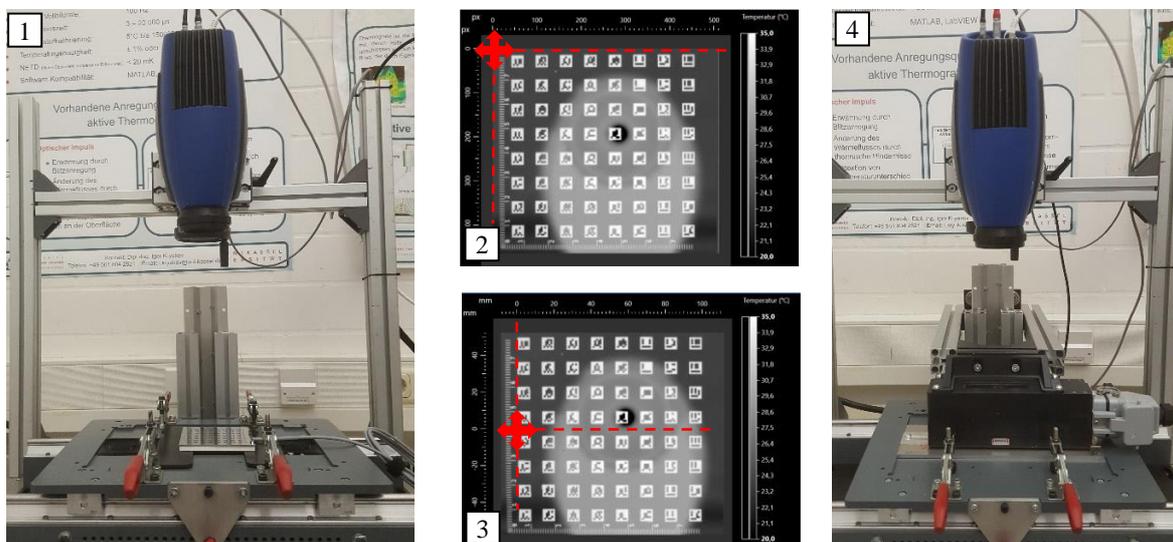


Abb. 3. Metrische Kalibrierung des Sichtfeldes zur Prüfung von Schweißverbindungen.

Anhand der erarbeiteten Vorgehensweise wird eine einheitliche Basis zur Bewertung der Detektionsgrenzen thermografischer Verfahren im Vergleich zu etablierten ZfP-Verfahren zur Prüfung von Schweißverbindungen geschaffen.

3. Ergebnisse

3.1 Prüfkörperherstellung

Zur Qualifizierung thermografischer Verfahren mit Bezug auf die normativen Vorgaben aus dem Bereich Schweißtechnik ist die Herstellung von Prüfkörpern mit definierten Unregelmäßigkeiten ein essenzieller Aspekt. Im Rahmen des Projektes werden Konzepte erarbeitet, die eine reproduzierbare Einbringung relevanter Fehlstellen unter Vorgabe deren Art, Größe und Lage ermöglichen. Die Auswahl geeigneter Konzepte erfolgt iterativ unter permanenter Kontrolle durch zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren, beispielsweise durch die metallografischen Untersuchungen, Farbeindringprüfung und die Durchstrahlungsprüfung. In der schweißtechnischen Normung werden die Qualitätsanforderungen anhand der Werkstoffart und des eingesetzten Fügeverfahrens unterschieden, da zum einen die Art einer Unregelmäßigkeit verfahrensspezifisch entstehen kann und zum anderen die Güte der Fügeverbindung mit bestimmten Fehlstellen in Abhängigkeit des Werkstoffs für den Anwendungsfall bewertet werden muss. [14, 15]

Realitätsnahe Unregelmäßigkeiten lassen sich durch Variation der Schweißanlagenparameter, Veränderung der Werkzeugparameter und Manipulation der Werkzeugführung oder Einspannvorrichtung bei maschinell gesteuerten Schweißanlagen reproduzierbar herstellen. Diese Herangehensweisen bilden reale Problemstellungen in der Fertigung ab, wie Werkzeugverschleiß, Fehler in der Programmierung oder Abweichung der Schweißparameter sowie falsche Positionierung der Werkstücke.

Am Beispiel des Rührreißschweißens wird auf die Herstellung der Prüfkörper zur Einbringung von Unregelmäßigkeiten innerhalb einer Schweißverbindung eingegangen (Abb. 4). Durch die geeignete Einstellung des Verhältnisses aus Dreh- und Vorschubgeschwindigkeit lassen sich beim Rührreißschweißen sowohl die Beschaffenheit der Schweißraupenoberfläche manipulieren als auch Oberflächendefekte erzeugen (Abb. 4, 1a). Durch die Einstellung eines definierten Fügespalts unter Verwendung verschiedener Schweißparameter können Tunnel- Bindefehler aber auch Volumetrische Unregelmäßigkeiten im Stumpfstoß erreicht werden (Abb. 4, 1b-d). Manipulation des Fügespalts durch Verunreinigung, beispielsweise durch Schmierstoff, kann zu Oberflächenporosität führen (Abb. 4, 1e). Eine Überhöhung der Eintauchtiefe des Werkzeugs resultiert in einer stark ausgeprägten Gratbildung (Abb. 4, 1f). Die Kontrolle der Lage von bestimmten Unregelmäßigkeiten ist zum Teil sehr schwierig, jedoch für die Qualifizierung thermografischer Verfahren zur Prüfung von Schweißverbindungen notwendig. Im Rahmen des Projektes werden ebenfalls Konzepte zur Prüfkörperherstellung erarbeitet, die eine definierte Einbringung von idealisierten Unregelmäßigkeiten in Bezug auf die Art und Lage gewährleisten. In Abb. 4, 2a und b ist ein Prüfkörper mit künstlich erzeugten Rissen sowie das Ergebnis der Farbeindringprüfung vorgestellt. Durch eine Kombination aus Schweißung mit verkürztem Stift entlang der Stumpfstoßkante und vollständigen Durchschweißung quer dazu, kann die Risstiefe und -länge kontrolliert eingebracht werden. Anhand dieser Prüfkörper kann eine objektive Bewertung der Detektionsfähigkeit verschiedener ZfP-Verfahren erfolgen.

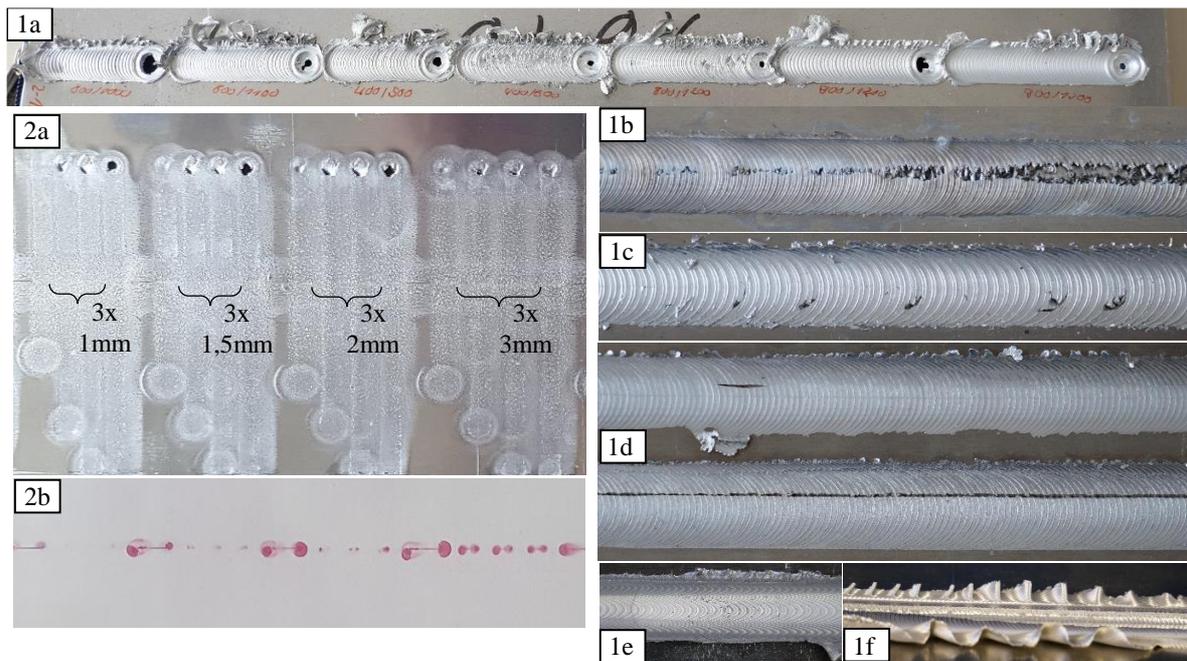


Abb. 4. Fehlererzeugung durch Schweißparametervariation und Manipulation bei der Schweißvorbereitung: Variation von Vorschub- und Drehgeschwindigkeit (1a), Veränderung des Fügespalts unter Variation der Schweißparameter (1b-d), Einbringung von Verunreinigungen (1e), Überhöhung der Eintauchtiefe (1f). Einbringung idealisierter Unregelmäßigkeiten: Konzept zur definierten Risserzeugung durch mehrfaches Schweißen: Prüfkörper an schweißnahtabgewandten Seite (2a), Farbeindringprüfung (2b).

Für eine weitere Beschreibung der erarbeiteten Konzepte zur Prüfkörperherstellung sowie einen Vergleich verschiedener Anregungsquellen bezüglich der Detektion von unzulässigen und bedingt zulässigen Unregelmäßigkeiten wird an dieser Stelle auf vorangegangene Arbeiten verwiesen. [16] Die im weiteren Verlauf vorgestellten Prüfkörper wurden mit Hilfe der induktionsangeregten Thermografie in Reflexions- und Transmissionsanordnung untersucht.

3.2 Risse

Risse zählen zu den kritischen Unregelmäßigkeiten beim Schweißen metallischer Werkstoffe. In Abb. 5 ist eine Schweißverbindung vorgestellt, die mittels Metall-Aktivgas-Schweißen (MAG) handgeführt hergestellt wurde (Stumpfstoß, je 220 x 100 mm mit 8 mm Wandstärke, S235JR). Durch Zugabe von Kupfer in das Schweißgut entstehen aufgrund metallurgischer Unverträglichkeit der geschmolzenen Werkstoffe Erstarrungsrisse. Anhand visueller Prüfung können deutlich ausgeprägte Risse, die quer zu Schweißrichtung verlaufen, erkannt werden (Abb. 5, 1). Durch die Farbeindringprüfung können weitere Risse mit geringeren Abmessungen erfasst werden (Abb. 5, 2). Das Farbeindringmittel wird dabei durch den Entwickler an die Oberfläche befördert, hierdurch können kleinere Anzeigen während der Prüfung überdeckt werden, sodass deren Detektion nicht möglich ist. In Abb. 5 (3) ist das Ergebnis der thermografischen Prüfung in Reflexionsanordnung vorgestellt. Mit Hilfe des speziell zur Rissprüfung entwickelten Induktors wurden oberflächennah bei 60 kHz Anregungsfrequenz mit einer Amplitude von ca. 60 % über eine Pulsdauer von 0,1 s Wirbelströme eingebracht. Für die Prüfung wurde der Prüfkörper zwecks Erhöhung des Emissionsgrades schwarz lackiert. Anhand der Amplitudendarstellung bei einer Auswertefrequenz von 10 kHz, dass einer Prüfdauer von 0,1 s entspricht, können die Risse eindeutig visualisiert werden. Mit Hilfe der aktiven Thermografie kann eine höhere Detektionswahrscheinlichkeit als bei der Farbeindringprüfung sowie bei der Durchstrahlungsprüfung erreicht werden (Abb. 5 (2, 3 und 4)).

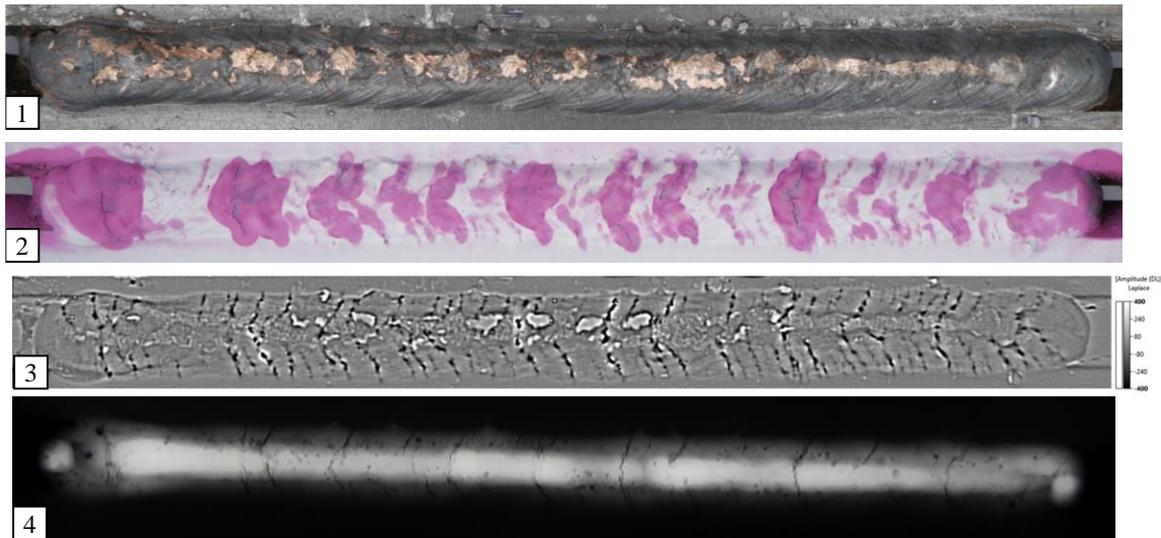


Abb. 5. Risse innerhalb einer MAG-Schweißverbindung. Foto der Schweißverbindung (1), Farbeindringprüfung (2), Induktionsangeregte Thermografie [Amplitudendarstellung bei einer Auswertefrequenz von 10 Hz] (3), Durchstrahlungsprüfung (4).

Neben der geringen Prüfdauer ist das hohe Automatisierungspotential thermografischer Verfahren ein weiterer Vorteil dieser Prüftechnik. Im Rahmen des Projektes werden neben der Erfassung der Detektionsgrenzen aktiver Thermografie geeignete Auswerteverfahren entwickelt, um die spezifischen Nachteile, wie der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit, zu minimieren.

In Abb. 6 sind Ergebnisse von Untersuchungen eines optimierten Konzepts zur Risseinbringung vorgestellt. Als Schweißverfahren wurde ebenfalls MAG-Schweißen gewählt, wobei eine positionsgesteuerte Schweißanlage eingesetzt wurde. Stoßart, Wandstärke und Werkstoff wurden gegenüber dem zuvor beschriebenen Konzept aus Abb. 5 nicht verändert. Zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit bei Prüfkörperherstellung wurde folgende Vorgehensweise eingeführt. Zunächst wird entlang der Stoßkante eine Wurzellage geschweißt. Anschließend erfolgt mit Hilfe des mechanischen Abtrags durch Fräsen Definition bestimmter Bereiche in denen ein Kupferblech in entsprechenden Abmessungen formschlüssig eingepresst wird. Abschließend wird die Decklage geschweißt. Durch die gewählte Vorgehensweise lässt sich ein Prüfkörper herstellen, der zum einen Rissentstehung in definierten Bereichen aufweist. Zum anderen enthält der Prüfkörper zugleich i.O. und n.i.O. Bereiche, dass eine objektive Beurteilung thermografischer Anzeigen sowie der Detektionsgrenzen des ZfP-Verfahrens ermöglicht. Die hierbei eingebrachten Risse sind eines natürlichen Ursprungs, sodass lediglich deren Entstehung und der Bereich in dem diese vorkommen gewährleistet werden kann. Die Länge, Tiefe und Lage einzelner Risse können bei diesem Konzept zur Herstellung nicht kontrolliert eingebracht werden. Sie bilden reale Problemstellungen der Rissentstehung beim Schweißen metallischer Werkstoffe ab.

Die Ergebnisse thermografischer Untersuchungen unter Verwendung der Induktionsanregung in Reflexionsanordnung (Abb. 6 (1-3 jeweils b)) zeigen, dass auch die feinen Querrisse eindeutig erfasst werden können. Die Oberfläche der Prüfkörper wurde vor der Untersuchung weder gereinigt, noch mit schwarzer Farbe zur Erhöhung des Oberflächenemissionsgrades behandelt. Die induktive Anregung erfolgte bei 20 kHz Anregungsfrequenz, einer Amplitude von ca. 40 % über die Pulsdauer von 0,05 s. Es ist ersichtlich, dass die beim MAG-Schweißen entstehenden Silikatrete die Auffindwahrscheinlichkeit von Rissen bei der thermografischen Prüfung negativ beeinflussen können. Die Entfernung von Silikatreten vor der Prüfung kann beispielsweise durch Sandstrahlen der Prüfkörperoberfläche erfolgen. Das kann jedoch zu Folge haben, dass

feine Risse auf der Schweißraupenoberfläche versiegelt werden. Die Untersuchungen zur Beurteilung der Detektionsgrenzen von Verfahren der aktiven Thermografie unter realen Bedingungen sowie Gegenüberstellung mit den Ergebnissen etablierter ZfP-Verfahren, wie MT und PT, sind zentrale Punkte im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens.

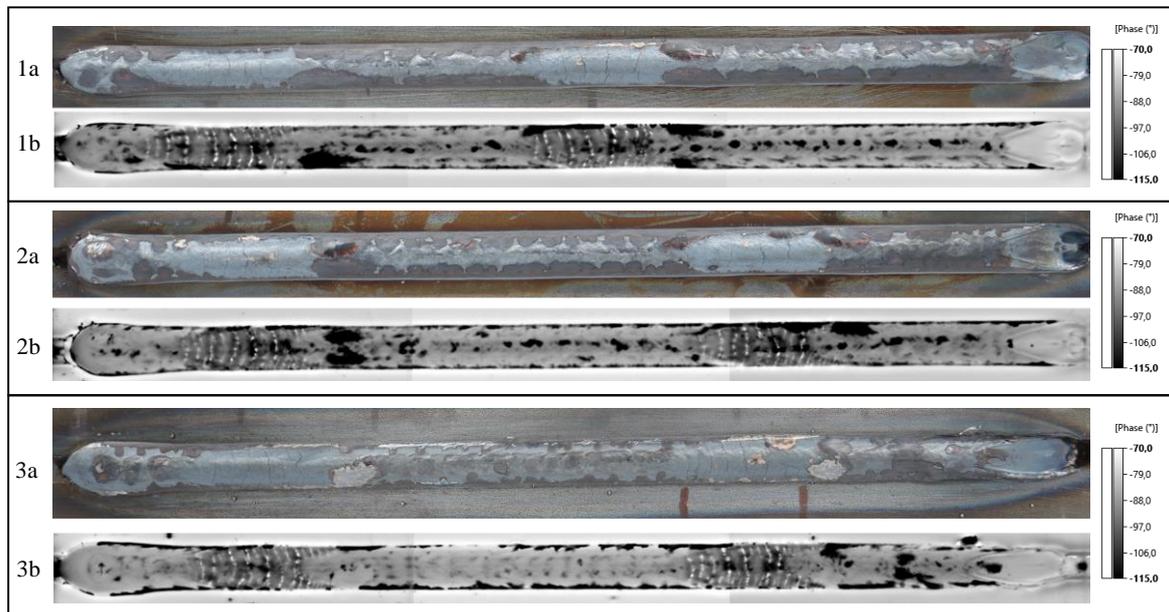


Abb. 6. Ergebnisse thermografischer Untersuchung von drei MAG-Schweißverbindungen. Foto der Schweißverbindung (a), Induktionsangeregte Thermografie [Phasendarstellung bei einer Auswertefrequenz von 5 Hz].

3.3 Hohlräume

Neben kontrollierter Risserzeugung werden im Rahmen des Forschungsvorhabens Konzepte erarbeitet, die eine gezielte Einbringung von volumetrischen Unregelmäßigkeiten ermöglichen. Anhand der in Abb. 7 vorgestellten Ergebnisse wird ein Konzept unter Verwendung der Werkstückpräparation diskutiert. Dabei wurden im ersten Schritt in einem Blech aus EN AW 6082-T6 mit 5 mm Wandstärke je 6 Bohrungen mit den Durchmessern von 1 mm bis 5 mm in definierten Abständen jeweils 4 mm tief gesetzt. Im nächsten Schritt erfolgte eine Rührreibschweißung entlang der Bohrungsmittelpunkte im Überlappstoß, wobei als oberer Fügepartner ein Blech aus EN AW 6082-T6 mit 1,5 mm Wandstärke diente (Abb. 7, 1). Bei diesem Konzept wurde Reproduzierbarkeit der Einbringung von Hohlräumen mittels Rührreibschweißen untersucht. Röntgenografische Untersuchung wurde mit Hilfe einer μ CT-Anlage (Zeiss xradia 520 Versa) durchgeführt. Aufgrund höherer Ortsauflösung wurde das Messfeld so gewählt, dass 4 von 6 Bohrungen mit einer Messung abgebildet werden konnten. Bei der Betrachtung von Mittelebene entlang der Schweißverbindung (Abb. 7 (2a bis 2e)) ist ersichtlich, dass aufgrund einer Kombination aus translatorischer und rotatorischer Bewegung des Rührreibschweißwerkzeugs das plastifizierte Grundwerkstoff in die Bohrung eingebracht wird. Fehlstellen, die mit Hilfe von Bohrungsdurchmesser 1 mm erzeugt wurden können näherungsweise als volumetrische Unregelmäßigkeiten betrachtet werden. Mit steigendem Bohrungsdurchmesser wird der Hohlraum mit dem Grundstoff gefüllt, sodass das Verhältnis vom Hohlraumdurchmesser zu Höhe von 1:1 nicht gegeben ist (Darstellungen 2b und 2c mit entsprechenden Ebenen quer zu Schweißrichtung). Bei Verwendung der Bohrungsdurchmesser größer 4 mm (Darstellungen 2d und 2e) kommt es aufgrund des fehlenden Grundmaterials in der Rührzone Bereichsweise zu einer ungenügenden Durchschweißung zwischen den Fügepartnern. Die Reproduzierbarkeit der Fehlstelleneinbringung mit Hilfe des untersuchten Konzepts ist gegeben. Um den

beschriebenen negativen Effekten bei der Variation der Fehlergröße entgegenzuwirken, wird eine Weiterentwicklung der Rührreißschweißwerkzeuge sowie Optimierung der Schweißparameter erfolgen.

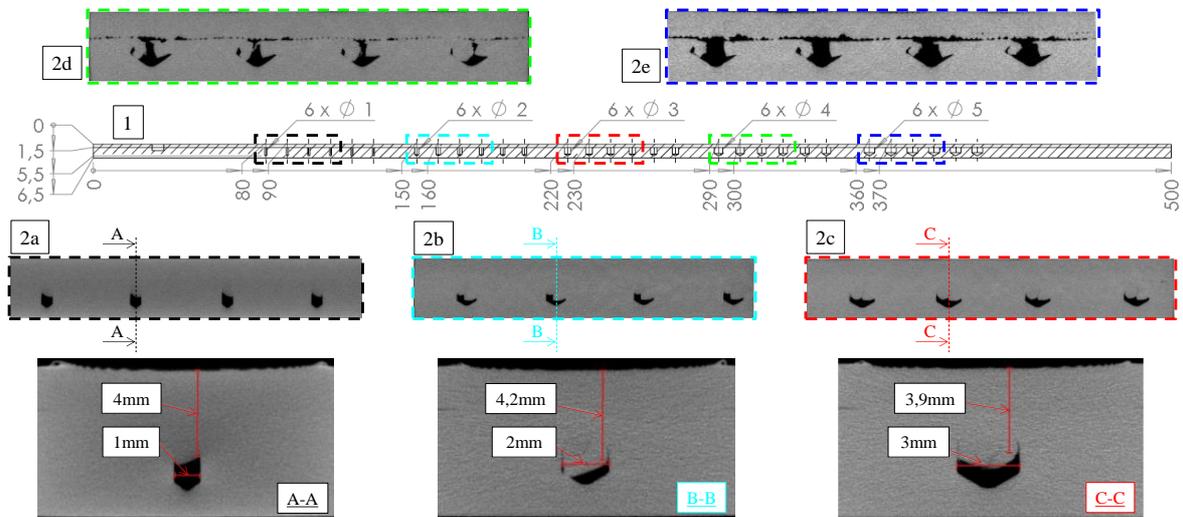


Abb. 7. Prüfkörper zur Erzeugung von Hohlräumen. CAD-Zeichnung, Schnittdarstellung entlang der Schweißverbindung (1). Ergebnisse Röntgenografischer Prüfung: Mittelebene entlang der Schweißverbindung (2a-e), Ebene quer zur Schweißverbindung an ausgewählten Bohrungen (A-A, B-B, C-C).

Der in Abb. 7 vorgestellte Prüfkörper wurde mit Hilfe der induktionsangeregten Thermografie in Transmissionsanordnung untersucht. Die Wärme wurde von der schweißnahtabgewandten Seite unter Verwendung der Induktionsfrequenz von 12,5 kHz sowie einer Amplitude von ca. 90 % über eine Pulsdauer von 0,5 s durch einen Koaxialstufeninduktor eingebracht. Zur Erhöhung des Emissionsgrades wurde die Schweißnahtoberfläche schwarz lackiert. Die Auswertung wurde jeweils auf die 4 röntgenografisch untersuchten Bohrungen beschränkt. Innerhalb der gewählten Bereiche erfolgt die Wärmeeinbringung durch Induktion nahezu homogen. In Abb. 8 ist die Auswertung der thermografischen Untersuchungen vorgestellt. Sowohl anhand der Phasendarstellung (Darstellungen 1a-1e) als auch der entsprechenden Signalverläufe (Darstellung 2) ist ersichtlich, dass Bohrungsgröße bis zu 2 mm (Darstellung 1b) eindeutig erfasst werden kann. Dabei ist Bohrungstiefe mehr als doppelt so groß im Vergleich zum Bohrungsdurchmesser. Der durch einen Hohlraum verursachte Wärmestau äußert sich durch geringere Phasenlage gegenüber den vollständig durchgeschweißten Bereichen. Die Unregelmäßigkeit mit 1 mm Durchmesser konnte nicht detektiert werden, hierbei entspricht das Verhältnis Bohrungstiefe zu -durchmesser einem Faktor von 4. Die Unregelmäßigkeiten mit den Bohrungsdurchmessern 4 mm und 5 mm weisen eine niedrigere Phasenlage auf (Darstellung 2), dass auf unvollständige Durchschweißung zwischen den Fügepartnern zurück zu führen ist (vgl. Abb. 7 (2d und 2e) mit Abb. 8, 2).

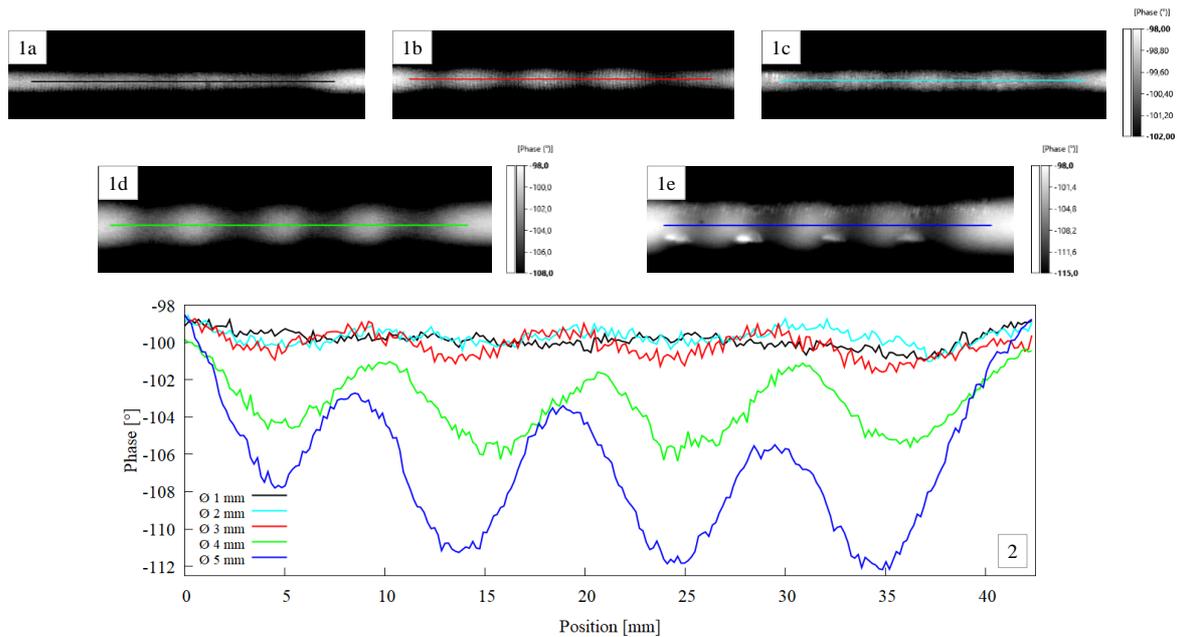


Abb. 8. Untersuchungen des Konzeptes „Hohlräume“. Induktionsangeregte Thermografie: Phasendarstellung bei Auswertefrequenz 0,6 Hz (1a bis 1e), Phasenverlauf entlang der markierten Bereiche (2).

Kontrollierte Einbringung volumetrischer Unregelmäßigkeiten in definierter Größe und Lage ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Im Rahmen des Projektes werden verschiedene Konzepte untersucht, um dieser Herausforderung gerecht zu werden. Ein Teilziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von Universalprüfkörpern, die für die Prüfung von Schweißverbindungen repräsentativen Unregelmäßigkeiten in der entsprechenden Ausprägung und Lage enthalten.

4. Zusammenfassung

Anhand der vorgestellten Ergebnisse wurde die methodische Herangehensweise zur Qualifizierung der aktiven Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren für die Prüfung von Schweißverbindungen erläutert. Hierbei wurde der Schwerpunkt auf die Abbildung repräsentativer Unregelmäßigkeiten in Abhängigkeit der Schweißverfahren und Werkstoffe, die eine breite Verwendung in der industriellen Fertigung finden, gelegt. Diese Prüfkörper sind notwendig, um die Detektionsgrenzen der aktiven Thermografie festzustellen und das Verfahren in die Reihe genormter zerstörungsfreier Prüfverfahren für Qualitätssicherung von Schweißverbindungen einzugliedern. Die vorgestellten thermografischen Untersuchungen zeigen das Potential der aktiven Thermografie zur Prüfung von Schweißverbindungen. Die Ergebnisse der thermografischen Untersuchung wurden anhand einer Durchstrahlungsprüfung sowie Farbeindringprüfung validiert.

Für eine objektive Bewertung von Detektionsgrenzen der Verfahren der aktiven Thermografie sind Prüfkörper mit idealisierten Unregelmäßigkeiten notwendig. Hierdurch kann der Einfluss, bzw. Einschränkung durch das verwendete Schweißverfahren sowie des eingesetzten Werkstoffs bei der thermografischen Prüfung erfasst werden. Diese Herangehensweise wurde am Beispiel von Prüfkörpern mit Rissen sowie Hohlräumen, erzeugt durch Metall-Aktivgas- und Rührreißschweißen, erläutert. Die Ergebnisse der thermografischen Untersuchungen wurden vorgestellt und diskutiert.

Der Herstellungsprozess der Prüfkörper mit natürlich entstehenden und künstlich erzeugten Unregelmäßigkeiten wird fortlaufend im Rahmen des Forschungsvorhabens weiterentwickelt. Abschließend werden die verschiedenen thermografischen Prüfverfahren hinsichtlich ihres Potenzials als geeignetes Prüfverfahren für die Bewertung von

Schweißverbindungen diskutiert, indem die Ergebnisse der thermografischen Prüfung mit den in den Prüfnormen definierten Anforderungen sowie den Ergebnissen der genormten Prüfverfahren verglichen werden. Auf dieser Grundlage kann empfohlen werden, Verfahren der aktiven Thermografie für die Prüfung von Schweißnähten einzusetzen und diese in die Normung zur zerstörungsfreien Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen aufzunehmen.

Danksagung

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.

Literatur

- [1] Matthes K-J, Schneider W, Hrsg. Schweißtechnik. Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen. 6. Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag; 2016
- [2] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 5817: Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten; 25.160.40 (DIN EN ISO 5817); 2014 (06.2014)
- [3] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 17635: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Allgemeine Regeln für metallische Werkstoffe; 25.160.40 (DIN EN ISO 17635); 2010 (08.2010)
- [4] Maierhofer C, Busse G, Holtmann N, et al. Standardisierung der Lockin-Thermografie: Vorstellung des TNS-Projektes und Auswahl der Probekörper. Thermographie-Kolloquium 2013: 1–8
- [5] Frey J, Srajbr C. Vollautomatische Thermografie ersetzt Magnetpulverprüfung an gehärteten Werkstücken. DGZfP-Jahrestagung 2018
- [6] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 17119 - Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Aktive Thermografie; 19.100 (DIN EN 17119); 2017 (06.2017)
- [7] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 54183: Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Induktiv angeregte Thermografie; 19.100 (DIN 54183); 2018 (02.2018)
- [8] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 54184: Zerstörungsfreie Prüfung – Impulsthermografie mit optischer Anregung; 19.100 (DIN 54184); 2017 (10.2017)
- [9] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 10042 Schweißen - Lichtbogenschweißverbindungen an Aluminium und seinen Legierungen - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten; 25.160.40 (DIN EN ISO 10042); 2006 (02.2006)
- [10] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 13919-1: Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen - Anforderungen und Empfehlungen für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten - Teil 1: Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (DIN EN ISO 13919-1); 2020 (03.2020)

- [11] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 13919-2: Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen – Anforderungen und Empfehlungen für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten – Teil 2: Aluminium, Magnesium und ihre Legierungen und reines Kupfer (DIN EN ISO 13919-2); 2020 (05.2020)
- [12] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 25239-5: Rührreißschweißen – Aluminium – Teil 5: Qualitäts- und Prüfungsanforderungen; 25.160.10 (DIN EN ISO 25239-5); 2020 (12.2020)
- [13] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 6520-1: Schweißen und verwandte Prozesse – Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen – Teil 1: Schmelzschweißen; 25.160.10 (DIN EN ISO 6520-1); 2007 (11.2007)
- [14] Dilthey U. Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1. Schweiß- und Schneidtechnologien. Bd. 1. VDI-Buch. 3. Aufl. Springer-Verlag; 2006
- [15] Dilthey U. Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2. Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. Bd. 2. VDI-Buch. 3. Aufl. Springer-Verlag; 2006
- [16] Malte Mund, Eugen Prints, Igor Kryukov, Jonas Hensel, Stefan Böhm, Klaus Dilger. Qualifizierung der aktiven Thermografie zur Prüfung von Schweißverbindungen an Prüfkörpern mit realitätsnahen Unregelmäßigkeiten. DGZfP-Jahrestagung 2021: 1–12