

Qualifizierung der aktiven Thermografie zur Prüfung von Schweißverbindungen

Christian SRAJBR¹, Eugen PRINTS², Bernd HEUTLING³, Malte MUND⁴

¹ edevis GmbH, Stuttgart

² Universität Kassel, Fachgebiet Trennende und Fügende Fertigungsverfahren, Kassel

³ GSI - Niederlassung SLV Hannover, Hannover

⁴ Technische Universität Braunschweig, Institut für Füge- und Schweißtechnik, Braunschweig

Kontakt-E-Mail: christian.srajbr@edevis.de

Kurzfassung. In den letzten Jahren wurden erhebliche Fortschritte in der Anwendungsentwicklung der aktiven Thermografie zur Prüfung von Schweißnähten erzielt. Im Vergleich zu etablierten zerstörungsfreien Prüftechniken bieten die aktiven thermografischen Verfahren Vorteile, da unterschiedliche Werkstoffe schnell, berührungslos und somit effizient geprüft werden können. Zudem liegen die Prüfergebnisse in digitaler Form vor, was eine Dokumentation der Prüfung erleichtert. Allerdings sind die thermografischen Verfahren in den einschlägigen Normen zur Schweißnahtprüfung nicht erfasst, sodass die industrielle Anwendung begrenzt ist. Ursächlich hierfür sind mangelnde Kenntnisse über die Detektionsmöglichkeiten und Detektionsgrenzen. In dieser Studie werden Ergebnisse der thermografischen Prüfung von Schweißverbindungen vorgestellt, die mit aktiven thermografischen Verfahren erzielt wurden. Der Schwerpunkt liegt auf der Anwendung der Induktionsthermografie, aber auch die Ultraschallanregung und die Laseranregung werden berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass schweißnahtrelevante Unregelmäßigkeiten auf dem Niveau der Referenzverfahren nachgewiesen werden können.

Einführung

Verschiedene Forschungsprojekte haben das Potenzial der aktiven Thermografie zur Erkennung von qualitätsrelevanten Unregelmäßigkeiten in Schweißverbindungen aufgezeigt [1-5]. Durch die stetige Verbesserung der Systemtechnik der aktiven Thermografie konnten in der Folge Pilotlösungen in industriellen Anwendungen realisiert werden [6, 7]. Der nächste logische Schritt ist die Aufnahme der Prüftechnik in die einschlägigen Normen zur zerstörungsfreien Bewertung von Schweißverbindungen, damit die Technologie in größerem Umfang und auch in manuell auszuführenden Prüfungen eingesetzt werden kann. Die Integration der aktiven Thermografie in die Prüfnormen für die zerstörungsfreie Prüfung erfordert jedoch detaillierte Kenntnisse über die Detektionsmöglichkeiten und -grenzen. In diesem Paper werden Teilergebnisse eines Forschungsvorhabens vorgestellt, das die Qualifizierung der aktiven Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung von Schweißverbindungen zum Ziel hat.

Es ist bekannt, dass sich aktive thermografische Methoden in der Art der eingesetzten Anregungsquelle unterscheiden. Im Rahmen dieser Studie werden drei unterschiedliche Prüf-



techniken betrachtet. Der Schwerpunkt dieser Studie liegt dabei auf der Anwendung der induktiv angeregten Thermografie, aber auch die Möglichkeiten einer Ultraschallanregung sowie die Laseranregung zur Energieeinbringung der Prüfung werden berücksichtigt.

Der erste Teil der Studie befasst sich mit der Herstellung repräsentativer Probekörper mit künstlichen sowie künstlich erzeugten natürlichen Unregelmäßigkeiten und deren Validierung mit etablierten zerstörungsfreien Prüfverfahren. Der zweite Teil befasst sich mit der thermografischen Prüfung der Probekörper. Abschließend werden die thermografischen Prüfverfahren durch den Vergleich der Prüfergebnisse mit den Ergebnissen Referenzverfahren hinsichtlich ihres Potenzials zur Prüfung von Schweißverbindungen beurteilt.

1. Herstellung von Probekörper für die Qualifizierung der Prüfmethode

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zwei Arten von Schweißunregelmäßigkeiten (Risse und Hohlräume) betrachtet, die besonders gut durch thermografische Prüfungen erkannt werden können. Dazu wurden Probekörper mit solchen Unregelmäßigkeiten mit unterschiedlichen Verfahren hergestellt. In diesem Abschnitt werden beispielhaft drei verschiedene Probekörper mit unterschiedlichen Unregelmäßigkeiten sowie Verfahren zu deren Herstellung beschrieben.

Zunächst wurden Probekörper mit realitätsnahen Rissen (Probekörper Typ 1) und inneren Unregelmäßigkeiten (Probekörper Typ 2) durch Metall-Aktivgasschweißen (MAG) hergestellt. Die Probekörper haben eine Gesamtlänge von 300 mm und die Schweißnahtlänge beträgt 290 mm. Die Blechdicke liegt bei 8 mm. Die Schweißnaht besteht aus drei Lagen. Die Schweißparameter für jede Lage wurden so gewählt, dass Schweißnähte ohne Unregelmäßigkeiten sicher erzeugt werden können. Basierend auf diesen Referenzprobekörpern wurden Probekörper mit in Größe und Lage variierenden künstlich erzeugten natürlichen Unregelmäßigkeiten hergestellt. Die Herstellungsschritte werden im Folgenden erläutert und in Abbildung 1 dargestellt. Zur Herstellung der Probekörper vom Typ 1 wurden drei Nuten in die Zwischenlage der MAG-Schweißnaht gefräst (a). Diese Nuten wurden dann mit einer Kupferplatte (b) gefüllt, bevor die Decklage geschweißt wurde. Durch das eingebrachte Kupfer wurde lokal an drei Stellen über eine Länge von etwa 20 mm eine Rissbildung ausgelöst. Diese Risse unterschieden sich in Länge und Breite (c).

Der zweite Probekörpertyp wurde hergestellt, um innere Unregelmäßigkeiten (Hohlräume) zu untersuchen. Zur Erzeugung der Unregelmäßigkeiten wurden Bohrungen mit einem Durchmesser von 4 mm unter Variation der Bohrungstiefe in die Probekörper eingebracht (d). Anschließend wurden die Bleche geschweißt. Nach dem Schweißen der Zwischenlage waren Oberflächenporen sichtbar (e). Diese wurden jedoch von der Decklage überdeckt (f). Nach dem Schweißen der Decklage blieben nur wenige Oberflächenporen zurück, allerdings prägten sich oberflächennahe, innenliegende Poren bzw. Porennester aus.

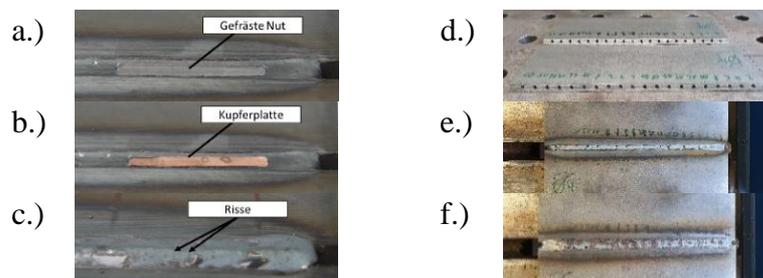


Abb. 1: Probekörper mit Unregelmäßigkeiten und die zur Herstellung notwendigen Prozessschritte. a.)-c.): Herstellung von Probekörpern Typ 1. (a.) Mechanische Vorbehandlung durch Fräsen, b.) Einlegen von Kupferblech und c.) Entstehende Risse); d.)-f.): Herstellung von Probekörpern Typ 2. (d.) Bohrungen, e.) Schweißen der Zwischenlage und f.) Schweißen der Decklage

Neben den Probekörpern mit realitätsnahen Schweißnähten wurden idealisierte Prüfkörper mittel dem Laser-Pulverbettsschmelzens (LPBF) hergestellt. Ein Beispiel für einen solchen additiv hergestellten Probekörper mit künstlichen Rissen unterschiedlicher Größe ist in Abbildung 2 dargestellt. Dieser Probekörper (Typ 3) enthält künstlich erzeugte Risse in Form eines Halbkreises und wurde eingesetzt, um die Auflösungsgrenzen der laserangeregten Thermografie zu untersuchen.

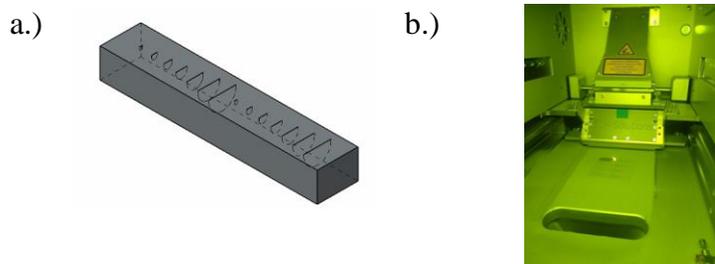


Abb. 2: Herstellung künstlicher Defekte mit LPBF
a.) Skizze des hergestellten Probekörpers und b.) Probekörper während des Herstellungsprozesses

Die künstlichen Risse wurden mit nominalen Rissbreiten von 10 μm und 20 μm hergestellt, um die Möglichkeiten und Grenzen der additiven Fertigung zur Herstellung rissähnlicher Probekörper zu bewerten. Die Grundform der Risse und die geometrischen Ausprägungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Die einzelnen Risse unterscheiden sich im Rissradius r . Es wurde eine Konstante k mit einem Wert von 0,7 eingefügt, um die Risstiefe zusätzlich zu erhöhen. In dieser Studie wurden nur die Risse B8-B14 betrachtet, da diese Unregelmäßigkeiten die geringste reale Breite von ca. 80 μm aufweisen.

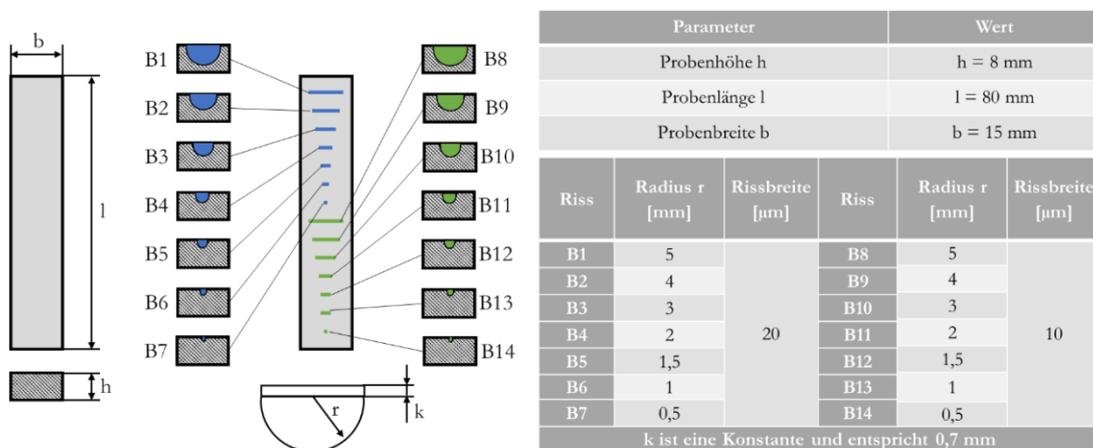


Abb. 3: Definition der Parameter und Nennrissgrößen für Probekörper Typ 3

2. Zerstörungsfreie Referenzprüfung der Probekörper

Die Probekörper wurden mit etablierten zerstörungsfreien Prüfverfahren untersucht, um die beabsichtigten Unregelmäßigkeiten zu validieren und zu charakterisieren. Die Untersuchungen dienen zudem dazu, Vergleichsdaten zur Bewertung der Möglichkeiten der thermografischen Prüfungen zu gewinnen. Entsprechend der Charakteristika der etablierten Prüfverfahren (Tabelle 1) wurden Prüfverfahren ausgewählt und die verschiedenen Probekörper mit diesen zerstörungsfrei untersucht, sodass eine Übersicht über die eingebrachten Unregelmäßigkeiten sowie der Möglichkeiten der bestehenden Prüfverfahren zu deren Nachweis generiert werden konnte. [8]

Tabelle 1: Merkmale von ZfP-Verfahren [8-11]

ZfP Verfahren	Möglichkeiten / Vorteile	Begrenzungen	Werkstoff		
			Ferritischer Stahl	Martensitischer Stahl	Aluminium
VT	<ul style="list-style-type: none"> - leicht anwendbar - schnell - preiswert 	<ul style="list-style-type: none"> - nur oberflächliche Unregelmäßigkeiten - Zugänglichkeit muss gegeben sein - Mindestgröße der Unregelmäßigkeit ca. 1 mm 	+++	+++	+++
MT	<ul style="list-style-type: none"> - sehr schnell - leicht interpretierbar 	<ul style="list-style-type: none"> - nur bei ferromagnetischen Werkstoffen (in diesem Fall ferritische und perlitische Stähle) - detektiert nur Unregelmäßigkeiten an der Oberfläche (oder in deren Nähe) 	+++	+++	--
PT	<ul style="list-style-type: none"> - leicht zu interpretieren 	<ul style="list-style-type: none"> - detektiert nur Unregelmäßigkeiten, die zur Oberfläche hin offen sind - sehr langsam 	+++	+++	+++
RT	<ul style="list-style-type: none"> - detektiert vorzugsweise räumliche Unregelmäßigkeiten - detektiert sowohl verdeckte als auch oberflächliche Unregelmäßigkeiten - langsam 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Investitionen - großer Aufwand für Umsetzung und Betrieb - Strahlenschutz obligatorisch - Schwierigkeiten, zweidimensionale Unregelmäßigkeiten parallel zur Strahlungsrichtung zu erkennen 	+++	+++	+++
ET	<ul style="list-style-type: none"> - schnell - erkennt sowohl oberflächliche als auch innere Unregelmäßigkeiten (abhängig von der Tiefenlage der Inhomogenitäten) 	<ul style="list-style-type: none"> - komplexe Signalinterpretation - vergleichende Methode = keine direkten Größen von Unregelmäßigkeiten - mit zunehmender Tiefe können nur immer größere Unregelmäßigkeiten erkannt werden 	+0	+0	0 ++
UT	<ul style="list-style-type: none"> - Geschwindigkeit abhängig vom Prüfpersonal - detektiert verdeckte Unregelmäßigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> - detektiert nur innere Unregelmäßigkeiten - nur bei Probekörpern mit Wandstärken von 8 mm und mehr - komplexe Signalinterpretation 	-- ¹⁾	-- ¹⁾	-- ¹⁾
++ sehr gut anwendbar + gut anwendbar o anwendbar, aber Ergebnisse sind von geringem Informationswert - nicht wirklich anwendbar -- absolut nicht anwendbar ¹⁾ Herkömmliche UT-Methoden können bei Wanddicken von 8 mm und weniger nicht angewandt werden; nur spezielle UT-Methoden könnten angewandt werden, sind aber nicht in diesem Bereich der konventionellen ZfP-Methoden enthalten					

Die mittels MAG-Schweißen hergestellten ferritischen Probekörper vom Typ 1 und vom Typ 2 wurden visuell (VT), mit Farbeindringprüfung (PT), Magnetpulverprüfung (MT) und Röntgenprüfung (RT) untersucht. Die Prüfungen wurden nach den Standards für die Prüfung und Bewertung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten durchgeführt. Der Probekörper Typ 3 mit künstlichen Rissen, wurde hingegen nur mit CT geprüft, da mit diesem Verfahren bereits

eine ausreichende Charakterisierung erfolgte. Eine Übersicht über die Probekörper und die angewandten Prüfverfahren ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Probekörper mit verschiedenen Unregelmäßigkeiten und zur Validierung genutzte ZfP-Verfahren

Probekörper Typ	Herstellungsmethode	Art der Unregelmäßigkeit	Referenzprüfungen
1	MAG	Risse (künstlich erzeugt, natürliche Ausprägung)	VT, PT, MT, RT
2	MAG	Hohlräume (künstlich erzeugte natürliche und künstlich erzeugte)	VT, PT, MT, RT
3	LPBF	Risse (künstlich erzeugt)	CT-Prüfungen

Die Ergebnisse der Referenzprüfungen für die Probekörper vom Typ 1 und 2 sind in Abbildung 4 dargestellt. Wie aus den Bildern, die die Ergebnisse der eingesetzten Prüftechniken gegenüberstellen, ersichtlich wird, wurden wie angestrebt verschiedene, schweißrelevante Unregelmäßigkeiten provoziert. Der dargestellte Probekörper vom Typ 1 enthält überwiegend rissartige Unregelmäßigkeiten, während der Probekörper vom Typ 2 überwiegend innere Unregelmäßigkeiten in Form von Porennestern aufweist. Zudem liegen hier geometrisch bestimmte, idealisierte Poren in Form von Bohrlöchern neben der Schweißnaht vor.

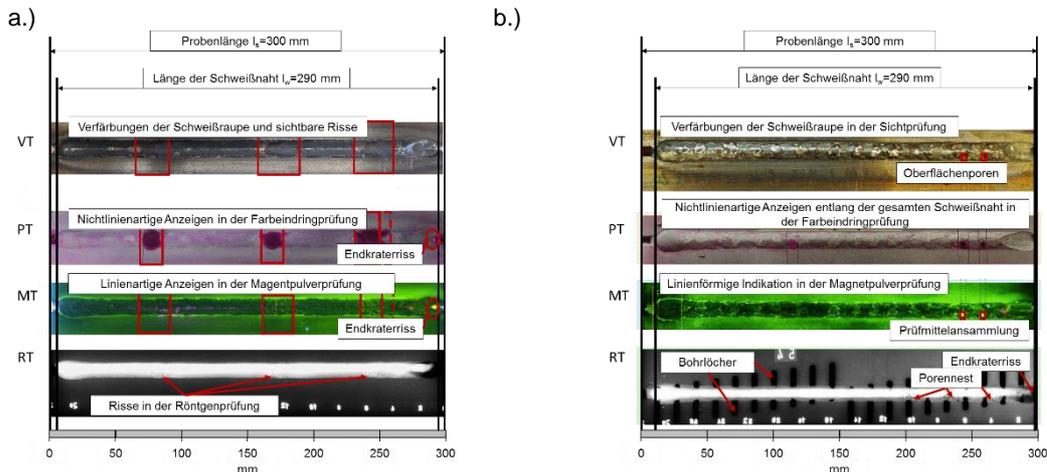


Abb. 4: Ergebnisse der Referenzprüfungen

a.) Probekörper Typ 1 mit Rissen und b.) Probekörper Typ 2 mit inneren Unregelmäßigkeiten

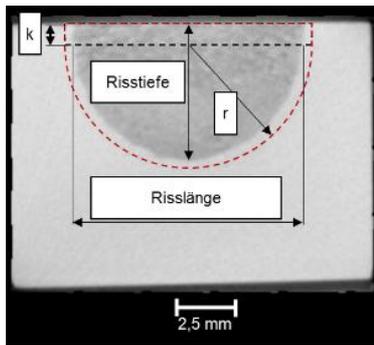
Die Sichtprüfung des Probekörpers Typ 1 zeigt eine leicht unterschiedliche Oberfläche an den drei Stellen, an denen das Kupfer aufgetragen wurde. Außerdem sind größere Risse auf der Oberfläche der Probekörper sichtbar. Dies kann sowohl durch die PT-Prüfung als auch durch die MT-Prüfung bestätigt werden. Während die PT-Prüfergebnisse große eingefärbte Bereiche zeigen, die eine Unterscheidung der einzelnen Risse verhindern, sind diese Querisse in Form von linienförmigen Anzeigen in den MT-Ergebnissen zu erkennen. Auch die RT-Prüfung zeigt die Risse an. Wie auf dem RT-Bild zu sehen ist, sind keine inneren Unregelmäßigkeiten vorhanden.

In der Auswertung der VT-Prüfung des Probekörpers Typ 2 sind entlang der gesamten Schweißnaht Verfärbungen zu erkennen. Es sind auch zwei Oberflächenhohlräume sichtbar. Diese Hohlräume können ebenfalls anhand der PT-/MT-Prüfungen nachgewiesen werden, da sie zur Oberfläche hin geöffnet sind. Wird das Ergebnis der RT-Prüfung betrachtet, so sind am Ende der Schweißnaht mehrere Porennester sichtbar. Es handelt sich hierbei um künstlich erzeugte natürliche innere Unregelmäßigkeiten. Außerdem werden die Bohrungen am Rand der Schweißverbindung, die von außen nicht erkennbar sind, mittels RT eindeutig

visualisiert. Diese künstlichen Unregelmäßigkeiten können dazu dienen, das Potenzial der Thermografie zur Erkennung innerer Unregelmäßigkeiten zu bestimmen.

Zur Beurteilung des Probekörpers Typ 3 wurden computertomographische Prüfungen durchgeführt. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der CT-Aufnahmen zur Charakterisierung der Risse und das Verfahren zur Bestimmung der Risstiefe und Rissbreite. Abbildung 5a) zeigt den längsten Riss B8 mit einer Nennlänge von 10 mm sowie die definierten Parameter zur Beschreibung der Risskontur, während Abbildung 5b) die kleinste Unregelmäßigkeit und beispielhafte Prüfergebnisse für die Länge und Tiefe eines Risses zeigt.

a.)



b.)

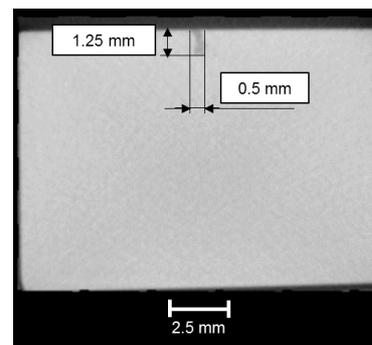


Abb. 5: CT- Aufnahmen der halbkreisförmigen Rissstrukturen

- a.) Darstellung zur Bestimmung der Parameter Risstiefe und Rissbreite am Beispiel der Unregelmäßigkeit B8
 b.) Darstellung der Rissstruktur und Bestimmung der geometrischen Parameter der Unregelmäßigkeit B14

3. Thermografische Prüfung

Die thermografischen Prüfungen wurden in einer speziell entwickelten Prüfplattform durchgeführt, um wiederholbare und vergleichbare Prüfergebnisse zu erzielen. Diese Plattform ermöglicht es, die für die Thermografie an Schweißverbindungen relevanten Anregungsquellen einzubinden und die Detektionsparameter zu berücksichtigen. Es wurde eine Einrichtung zur Positionierung der Probekörper und eine Möglichkeit zur Vermessung der Fehlstellen durch die Bestimmung der metrischen Auflösung der Thermogramme mit einem Objektaraget integriert. Es können optische, induktive und ultraschallbasierte Anregungsquellen sowie verschiedene Kamertypen integriert und alle relevanten Parameter variiert werden. Für die laserangeregte Thermografie wurden gesonderte Prüfplätze konzipiert, die auf der modularen Prüfplattform aufbauen. Dies war notwendig, da hier die vorhandene Systemtechnik der Forschungsinstitute integriert wurde und hohe Anforderungen an die Sicherheit der Anwender (z. B. Laserschutz) bestehen. Abbildung 6 zeigt den Prüfaufbau in der Konfiguration für die Durchführung induktiv angeregter Prüfungen.

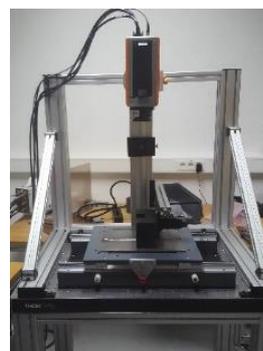


Abb. 6: Aufbau der entwickelten modularen Prüfplattform für die thermografische Prüfung von Schweißverbindungen mit Induktionsanregung in Transmissions- (links) und in Reflexionskonfiguration (rechts).

Der Probekörperhalter mit verfahrbarem Schlitten und integriertem Wegmesssystem ermöglicht es, Schweißnähte segmentweise zu prüfen und die Einzelergebnisse wiederhol- und lagengenau zusammzusetzen. Um die Vergleichbarkeit mit den Prüfergebnissen der Referenzverfahren sicherzustellen, wurde ein Algorithmus in die Prüfsoftware integriert, der die Thermogramme mit speziellen Objekttargets in ein metrisches Koordinatensystem überführt.

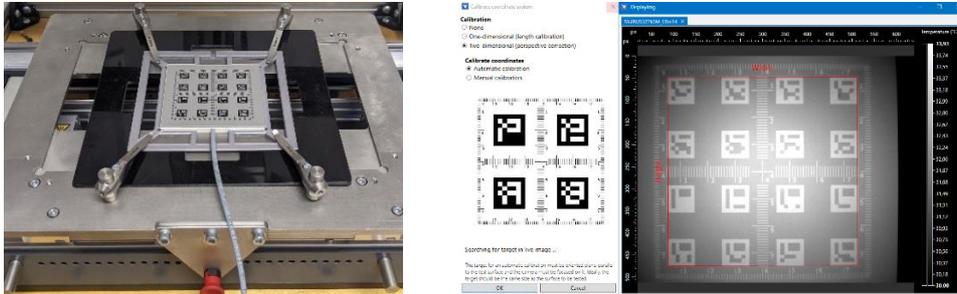


Abb. 7: Beheiztes Objekttarget und automatische metrische Justage in der edevis® DI 7 Software

3.1 Durchführung der Prüfungen

Einen Überblick über die in dieser Studie vorgestellten thermografischen Prüfungen gibt Tabelle 3. Die Probekörper Typ 1 wurden sowohl mit induktiv angeregter Impuls-Phasen-Thermografie als auch mit ultraschallangeregter Thermografie untersucht, da beide Verfahren zur Erkennung von Rissen geeignet sind. Die Probekörper Typ 2 wurden nur mit der induktiv angeregter Impuls-Phasen-Thermografie untersucht. Diese weisen innere Hohlräume auf, die sich mit ultraschallangeregter Thermografie nicht detektieren lassen. Die Probekörper Typ 3 wurden mit laserangeregter Thermografie geprüft. Sowohl die Größe als auch die Form des Probekörpers waren für die anderen Prüftechniken nicht geeignet.

Tabelle 3: Probekörper mit verschiedenen Unregelmäßigkeiten und angewandte thermografische Methoden

Probekörper Typ	Herstellungsmethode	Art der Unregelmäßigkeit	Thermografische Prüfmethode
1	MAG	Risse (künstlich erzeugt, natürliche Ausprägung)	Induktiv angeregte Impuls-Phasen-Thermografie, Ultraschallangeregte Thermografie
2	MAG	Hohlräume (künstlich erzeugte natürliche und künstliche)	Induktiv angeregte Impuls-Phasen-Thermografie
3	LPBF	Risse (künstliche Erzeugung)	Laserangeregte Thermografie

Die Prüfungen wurden mit IR-Kameras mit gekühlten MWIR-FPA-Quantendetektoren (InSb) und mittleren Vollbildraten (100 Hz ... 355 Hz) durchgeführt (FLIR SC5650 bzw. IRCAM Taurus 327k SM). Das Gesichtsfeld wurde durch verschiedene Objektive (25 mm / 50 mm) und Distanzringe bzw. Nahlinsen an die Erfordernisse der Prüfungen angepasst.

Zur induktiven Anregung der Probekörper Typ 1 und 2 wurde ein speziell für die Rissprüfung entwickelter Induktor, Liney-QTW, verwendet. Er zeichnet sich durch die Größe des Prüfbereichs (ca. 100 x 20 mm²) und einer Ausrichtung der Wirbelströme entlang der Schweißnaht aus. Als Stromquelle dient ein Induktionsgenerator mit einer Ausgangsleistung von 5 kW in einem Induktionsfrequenzbereich von 15 bis 60 kHz.

Zur Erzeugung der Ultraschallanregung für die Prüfung der Probekörper Typ 1 wurde ein Ultraschallgenerator vom Typ Branson 2000b verwendet, der für die thermografische Prüfung modifiziert ist. Der Generator liefert eine maximale Leistung von 2,2 kW und

arbeitet im Frequenzbereich zwischen 15 kHz und 25 kHz. Der Ultraschall wird über einen Konverter, einen Booster und eine Sonotrode in das Prüfobjekt eingekoppelt.

Für die Prüfung der Probekörper Typ 3 wurde ein diodengepumpter Ytterbium-Faserlaser (YLR-150_1500-QCW-MM) mit einer mittleren Ausgangsleistung von 150 W (Pulsspitzenleistung von 1,5 kW) eingesetzt. Er emittiert Laserstrahlung (Klasse 4) bei einer Wellenlänge von 1070 nm. Zur Vergrößerung der thermisch angeregten Fläche wurde ein diffraktives optisches Element einem Beugungswinkel von $20,1^\circ$ verwendet. Es erzeugt eine Linie mit einer Länge von 15 mm, was der Breite des Prüfkörpers entspricht und es darüber hinaus ermöglicht, auch die hergestellten Schweißnähte thermografisch zu prüfen.

3.2 Ergebnisse der thermografischen Prüfung von Probekörper Typ 1

Abbildung 7a zeigt die Ergebnisse der induktiven Puls-Phasen-Thermografie eines Probekörpers Typ 1. Es wird ein kurzer Induktionspuls von 0,05 s zur Erwärmung verwendet und die resultierende thermische Antwort einer pixelweisen diskreten Fouriertransformation unterzogen. Wie in den dargestellten Phasenbildern (Auswertefrequenz 5 Hz) zu sehen ist, heben sich die drei mit Rissen behafteten Bereiche stark vom homogenen Erscheinungsbild der restlichen Schweißnaht ab. Die Bereiche zeigen eine niedrigere Phasenlage, die von feinen Linien mit höherer Phasenlage durchzogen wird. Die hellen Linien stellen die Risse dar und sind in der vergrößerten Ansicht (Abbildung 7b) noch deutlicher zu sehen. Es fällt auf, dass hauptsächlich Querrisse sichtbar sind, während Längsrisse bei der verwendeten Prüfanordnung nicht angeregt werden. Zusätzlich zu den Rissindikationen weisen die Probekörper Bereiche auf, die in den Bildern dunkel dargestellt sind. Einige dieser Bereiche sind beispielhaft mit einem roten Pfeil markiert. Dabei handelt es sich um Silikatrückstände des Schweißzusatzes, die auf der Schweißbraupe verbleiben und die Rissindikation erschweren können.

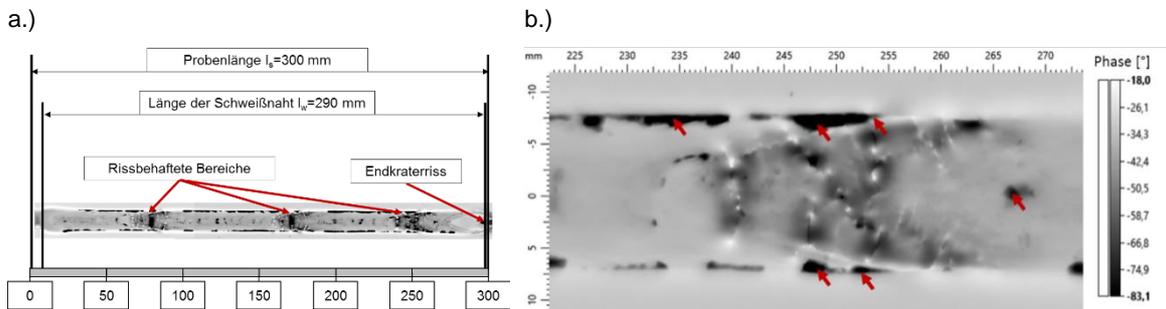


Abb. 7: Ergebnisse der induktionsangeregten Impuls-Phasen-Thermografie

a.) Übersicht über die Prüfung der gesamten Schweißnaht und b.) vergrößerte Darstellung des Rissbereichs

Die Probekörper wurden auch mit ultraschallangeregter Thermografie geprüft. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse einer Prüfung mit ultraschallangeregter Lockin-Thermografie für einen der Rissbereiche.

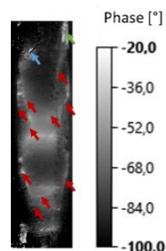


Abb. 8: Beispielergebnisse der Prüfung eines Rissbereichs mit ultraschallangeregter Lockin-Thermografie. Die Risse erscheinen als helle Flächen im Phasenbild (rote Pfeile). Darüber hinaus sind Störungen zu erkennen, die auf bewegte Partikel auf der Bauteiloberfläche (blauer Pfeil) und

stark reflektierende Bereiche (grüner Pfeil) zurückzuführen sind. Beides ist auf die hohe mechanische Belastung der Probekörper zurückzuführen, die dazu führt, dass Schlackenreste und Silikatpartikel auf der Oberfläche abgelöst werden und die Prüfergebnisse beeinflussen. Diese Technik ist jedoch ebenfalls grundsätzlich geeignet, um Risse in Schweißnähten zu erkennen.

3.3 Ergebnisse der thermografischen Prüfung der Probekörper Typ 2

In Abbildung 9 sind die Prüfergebnisse eines Probekörpers des Typs 2 dargestellt. Die Prüfergebnisse zeigen, dass die durch Bohrungen künstlich erzeugten Unregelmäßigkeiten neben der Schweißnaht sowie die künstlich erzeugten natürlichen Unregelmäßigkeiten (Porennester) detektierbar sind. Beide Typen von Unregelmäßigkeiten verursachen einen Wärmestau, da der Wärmeabfluss in das Innere der Probekörper behindert wird. Dies zeigt sich in einer Verschiebung der Phase zu niedrigeren Werten. Aufgrund dieses Effekts sind die oberflächennahen Porennester direkt zu erkennen. Die tieferliegenden künstlichen Unregelmäßigkeiten sind dagegen nur bedingt sichtbar, aber wie die vergrößerte Ansicht zeigt, lassen sich auch diese durch eine Phasenverschiebung erkennen. Im geplotteten Diagramm sind die einzelnen Bohrungen deutlich zu erkennen.

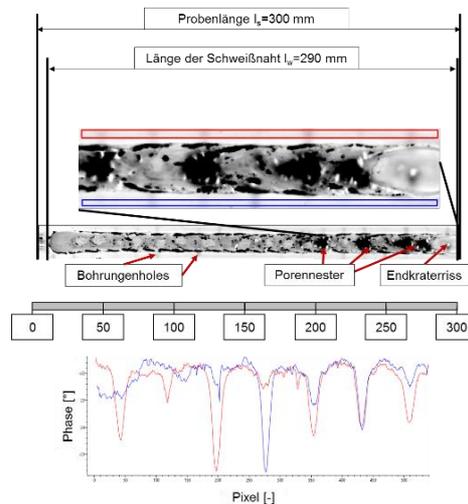


Abb. 9: Ergebnis der induktionsangeregten Puls-Phasen-Thermografie an einem Probekörper Typ 2

3.4 Thermografische Prüfung der Probekörper Typ 3 - Detektion von künstlichen Rissen mittels laserangeregter Thermografie

Im Folgenden werden beispielhaft Prüfergebnisse dargestellt, die mit laserangeregter Thermografie am Probekörper Typ 3 erzielt wurden. Es wurde eine Pulsdauer von 0,1 s und eine Amplitude von 15 % (entspricht 22,5 W) verwendet. Die Messdaten wurden anschließend einer diskreten Fouriertransformation unterzogen, wobei eine Auswertefrequenz von 1,5 Hz gewählt wurde. Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse in der Phasendarstellung.

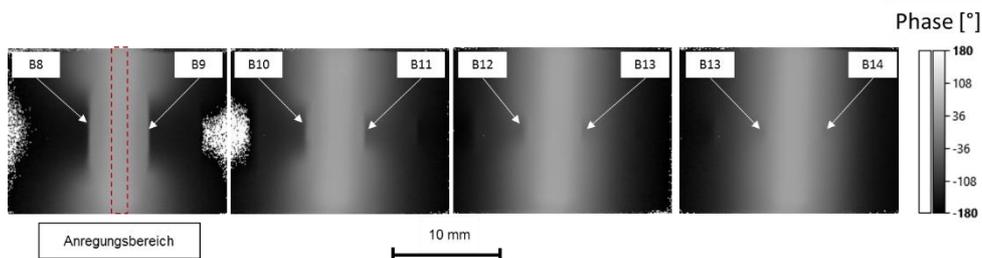


Abb. 10: Ergebnisse der laserangeregten Thermografie an Probekörper Typ 3

Wie in den Bildern ersichtlich, können nahezu alle künstlich erzeugten Risse erkannt werden. Allerdings nimmt die thermische Signatur der Risse mit abnehmender Rissgröße ab. Während große Risse (z. B. B8) gut erkennbar sind und eine deutliche Signatur hinterlassen, ist die Signatur kleiner Risse (z. B. B14) nur sehr schwach ausgeprägt. Die Prüfergebnisse zeigen jedoch, dass es möglich ist, mit einer Laseranregung auch kleinste Oberflächenunregelmäßigkeiten im Submillimeterbereich zu erkennen. Darüber hinaus ist über eine angepasste Auswertung eine Erhöhung des Signalkontrasts möglich. So kann durch die Betrachtung des Amplitudenbildes und die zusätzliche Anwendung eines Sobel-Filters die Unregelmäßigkeit hervorgehoben werden. Dies wird in Abbildung 11 anhand der Darstellung der künstlichen Risse B13 und B14 in einem so gefilterten Amplitudenbild verdeutlicht. Beide Unregelmäßigkeiten heben sich trotz der geringen Größe deutlich vom homogenen Hintergrund ab.

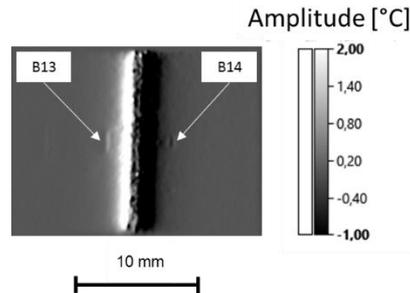


Abb. 11: Laserangeregte Thermografie an Probekörper Typ 3 - Amplitudenbild mit Sobel-Filterung

3.5 Diskussion der Prüfergebnisse und Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass die Herstellung von Probekörper mit natürlichen sowie künstlich erzeugten natürlichen Unregelmäßigkeiten möglich ist. Die eingebrachten Unregelmäßigkeiten decken ein breites Größenspektrum ab.

Die Probekörper wurden mit drei verschiedenen thermografischen Techniken untersucht. Die Detektierbarkeit der Unregelmäßigkeiten durch die Techniken wurde nachgewiesen und somit deren Möglichkeiten zur Prüfung von Schweißverbindungen aufgezeigt. Die Ergebnisse zeigen das Potential sämtlicher betrachteten thermografischen Verfahren, Volumenunregelmäßigkeiten an der Oberfläche und im Schweißnahtinneren, sowie rissartige Schweißnahtunregelmäßigkeiten zu erkennen. Die Detektierbarkeit innerer Unregelmäßigkeiten durch thermografische Verfahren ist jedoch auf die in Oberflächennähe beschränkt.

Die induktiv angeregte Thermografie zeigt dabei die vielversprechendsten Ergebnisse, es können sowohl Risse als auch innere Unregelmäßigkeiten detektiert werden. Die Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Referenzprüfungen ist sehr gut. Sowohl die Lage von Bereichen mit Rissen als auch die von Porennestern können sehr genau bestimmt werden. Hervorzuheben ist die Möglichkeit der Detektion einzelner, sehr kurzer Risse. Hier hat das thermografische Verfahren deutliche Vorteile gegenüber der Farbeindringprüfung.

Im Gegensatz dazu ist die Aussagekraft der Prüfergebnisse der ultraschallangeregten Thermografie begrenzt. Zwar lässt sich auch der Ort der gerissenen Bereiche und bei ausreichender Vergrößerung der Verlauf einzelner Risse erkennen, jedoch beschränkt sich der Nachweis auf Unregelmäßigkeiten, die unter mechanischer Last Reibungseffekte erzeugen.

Die laserangeregte Thermografie zeigt ebenfalls gute Ergebnisse. Da der Wärmefluss entlang der Oberfläche durch die Unregelmäßigkeiten gestört wird, können auch kleinste Unregelmäßigkeiten erkannt werden. Hier steht die Übertragung auf Unregelmäßigkeiten mit natürlicher Ausprägung jedoch noch aus.

Aus den Ergebnissen dieser Studie lässt sich schließen, dass die induktiv angeregte Thermografie und die laserangeregte Thermografie vielversprechend sind, etablierte Referenzverfahren zur Prüfung von Schweißverbindungen zu ergänzen oder ersetzen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene Ansätze zur Herstellung von Probekörpern mit künstlich erzeugten, aber natürlichen Unregelmäßigkeiten sowie Probekörper mit künstlichen Unregelmäßigkeiten vorgestellt. Diese wurden anschließend mit verschiedenen etablierten zerstörungsfreien Prüfverfahren sowie mit aktiven Thermografieverfahren untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Probekörper mit definierten Unregelmäßigkeiten erfolgreich hergestellt werden können, und dass thermografische Methoden in der Lage sind, relevante Schweißnahtfehler zu erkennen. Insbesondere die induktiv angeregte Puls-Phasen-Thermografie zeigt vielversprechende Ergebnisse im Bereich der Rissdetektion. Die ultraschallangeregte Thermografie ist zwar ebenfalls in der Lage, Risse zu detektieren, jedoch ist die Auflösung deutlich geringer und die Ergebnisse erreichen nicht die der induktiv angeregten Thermografie. Anhand der Prüfungen am Probekörper Typ 3 kann gezeigt werden, dass auch die laserangeregte Thermografie ein vielversprechendes Prüfverfahren ist, da künstliche Risse mit Längen von 0,7-0,8 mm nachgewiesen werden können. Allerdings steht hier noch eine Übertragung auf natürliche Unregelmäßigkeiten aus.

Generell kann gezeigt werden, dass die thermografische Prüfung gut geeignet ist, um Risse in Schweißnähten zu erkennen. Die Erkennung innerer Unregelmäßigkeiten ist auf oberflächennahe Hohlräume beschränkt und hängt stark von der Anregungsquelle ab. Die Ergebnisse der induktiv angeregten Thermografie sind jedoch vielversprechend. Da derzeit nur die RT in der Lage ist, innere Defekte zu erkennen, kann diese Prüftechnik zumindest für Prüfteile mit geringeren Qualitätsanforderungen eine Alternative darstellen. Weitere Studien zur Bestimmung der Nachweisgrenzen werden derzeit durchgeführt.

Auf Grundlage der Studienergebnisse kann empfohlen werden, die thermografische Prüfung für die zerstörungsfreie Prüfung von Schweißnähten anzuwenden. Hierzu werden derzeit zwei Normentwürfe erarbeitet. Der erste Entwurf befasst sich mit den spezifischen Anforderungen an die thermografische Prüfung von Schweißverbindungen und baut auf den thermografischen Verfahrensnormen auf (z. B. DIN 54183:2018-02 Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Wirbelstromangeregte Thermografie). Der Normentwurf fasst unter anderem die Anforderungen an die Anlagentechnik, das Prüfverfahren und die Dokumentation der Prüfung zusammen. Der zweite Entwurf berücksichtigt Akzeptanzstufen, wie sie für andere gängige Prüfverfahren definiert sind (z. B. ISO 23278 - Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißnähten - Magnetpulverprüfung - Akzeptanzstufen und ISO 23277 - Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißnähten - Eindringprüfung - Akzeptanzstufen). Durch den Vergleich der Ergebnisse der thermografischen Prüfung mit denen der etablierten Referenzverfahren werden Akzeptanzstufen vorgeschlagen, so dass die Voraussetzungen für die Berücksichtigung thermografischer Prüftechniken in ISO 17635 - Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißnähten - Allgemeine Regeln für metallische Werkstoffe - gegeben ist.

5. Danksagung

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

Referenzen

- [1] MUND, Malte ; BLASS, David ; DILGER, Klaus: Möglichkeiten thermografischer Verfahren zum Nachweis von Oberflächeninhomogenitäten an Schweißverbindungen. In: DGZfP-Jahrestagung 2018 : 7. bis 9. Mai Leipzig. Berlin : DGZfP, 2018 (DGZfP-Berichtsband BB, 166).
- [2] BROBERG, Patrik: Surface crack detection in welds using thermography. In: NDT & E International 57 (2013), S. 69–73
- [3] RUNNEMALM, Anna ; AHLBERG, Jörgen ; APPELGREN, Anders ; SJÖKVIST, Stefan: Automatic Inspection of Spot Welds by Thermography. In: Journal of Nondestructive Evaluation 33 (2014), Nr. 3, S. 398–406
- [4] SRAJBR, Christian ; TANASIE, Gheorghe ; DILGER, Klaus ; BÖHM, Stefan: NDT of laser beam welded single lap joints by active thermography 53 (2009), S. 355–359
- [5] KRÖGER, T.: Hundertprozentiger Qualitätsnachweis–Zerstörungsfreie Schweißnahtprüfung mit aktiver Thermografie. In: Der Praktiker 2010, Nr. 2, S. 62–63
- [6] SIEMER, Ulrike; Universität des Saarlandes (Mitarb.): Einsatz der Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren in der Automobilindustrie : Entwicklung einer Ingenieurplattform : Universität des Saarlandes, 2010
- [7] DÖTTINGER, Christoph: Qualitätskontrolle bei Laserschweißnähten. In: Laser Technik Journal 6 (2009), Nr. 6, S. 23–25
- [8] SCHIEBOLD, Karlheinz: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (Schriftenreihe). Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015
- [9] ERHARD, Anton: Verfahren der zerstörungsfreien Materialprüfung : Grundlagen. 1. Aufl. Düsseldorf : DVS Media, 2014
- [10] DEUTSCH, Volker ; VOGT, Manfred: Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen. Düsseldorf : Dt. Verl. für Schweißtechnik DVS-Verl., 1995 (Die schweißtechnische Praxis 28)
- [11] RAJAMÄKI, Juho ; VIPPOLA, Minnamari ; NURMIKOLU, Antti ; VIITALA, Tuomo: Limitations of eddy current inspection in railway rail evaluation. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 232 (2018), Nr. 1, S. 121–129