

# Automatisierte Erkennung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten an Kehlnähten mittels Thermographie und 3D-Zeilenscan

Felix KOCH<sup>1</sup>, Sebastian T. HÜBNER<sup>2</sup>, Georg TRENDSCH<sup>1</sup>, Katharina SIMMEN<sup>2</sup>,  
Andreas BREITBARTH<sup>2</sup>, Steffen KEITEL<sup>1</sup>, Gunther NOTNI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH, Halle (Saale)

<sup>2</sup> Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

Kontakt E-Mail: felixkoch@slv-halle.de

**Kurzfassung.** Bei Kehlnähten beschränkt sich der Prüfumfang auf die Oberflächenprüfverfahren Sicht- und Farbeindringprüfung (z.B. gemäß DIN EN ISO 15614). Hintergrund ist die mangelhafte Darstellbarkeit von Fehlern mit standardisierten Volumenprüfverfahren insbesondere an durchgeschweißten Kehlnähten. Im Rahmen von einlagigen MSG-Kehlnaht-Arbeitsproben mit Blechdicken von 10 mm und 12 mm wird mithilfe der passiven Thermographie die Darstellbarkeit von Poren, Bindefehlern und Heißrissen sowie mit dem 3D-Zeilenscan die Detektion von Nahtstärke, -überhöhung, -symmetrie, -übergang und Einbrandkerben systematisch untersucht. Die Aufzeichnung der Temperaturverteilung an der Oberfläche von Grund- und Zusatzwerkstoff erfolgt mit der Wärmebildkamera OPTRIS PI 640, die in Schweißrichtung hinter dem Brenner mitbewegt wird. Eine qualitative Auswertung der Thermogramme z.B. anhand der Temperaturdifferenz zwischen einer Referenztemperatur und den Temperaturgradienten längs und quer zur Naht lässt Rückschlüsse auf die Art von Schweißnahtunregelmäßigkeiten zu. Die 3D-Daten der Schweißnaht werden mittels eines WENGLOR MSL 122 Zeilenscanners erfasst, welcher in Schweißrichtung hinter der Wärmebildkamera angeordnet ist. In den aufgezeichneten Signalen werden diejenigen ermittelt, welche den Basisblechen zuzuordnen sind und ausgehend davon die Naht geometrisch analysieren. Das Ableiten der zugehörigen Fehlergröße aus den optischen Messdaten und die Validierung durch alternative Prüfmethode sind Gegenstand aktueller Arbeiten. Hierbei werden die Bewertungsgruppen nach DIN EN ISO 5817:2014-06 berücksichtigt. Ziel der Untersuchung ist es eine blechdickenabhängige Datenbasis zu erstellen, mit der eine inline Prozesskontrolle und -steuerung möglich ist. Das lernfähige Messmodul soll in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern SIBAU Genthin GmbH & Co. KG und Dögel GmbH an einem Schweißtraktor Anwendung finden.

## 1. Einleitung und Problemstellung

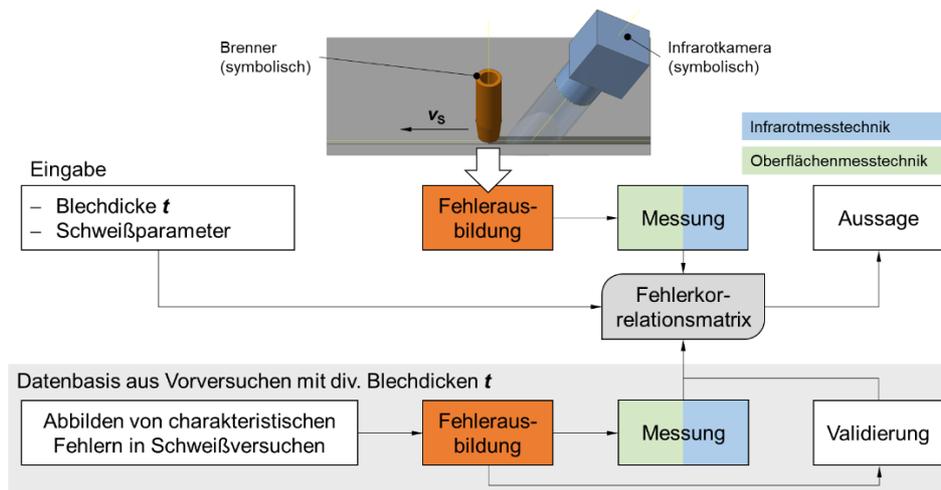
Kehlnähte sind neben Stumpfnähten bei Verbindungsschweißungen im Fahrzeug-, Maschinen- sowie Anlagen- und Stahlbau weit verbreitet. Das beispielsweise im Stahlbau angewendete Regelwerk zur Qualifizierung von Schweißverfahren (DIN EN ISO 15614 [1]) fordert für Stumpfnähte u.a. eine Volumenprüfung via Ultraschall- bzw. Durchstrahlungsprüfung. Bei Kehlnähten beschränkt sich der Prüfumfang auf die Oberflächenprüfverfahren Sicht- und Farbeindringprüfung. Hintergrund ist die mangelhafte Darstellbarkeit von Fehlern mit standardisierten Volumenprüfverfahren. Kritische innere Schweißnahtunregelmäßigkeiten, wie



beispielsweise Bindefehler, können an Kehlnähten oftmals nicht detektiert werden. Eine weitere Herausforderung beim Schweißen von langen Kehlnähten besteht in der Prozessüberwachung und Dokumentation der Prozessdaten. Üblicherweise werden lange Kehlnähte mit Schweißtraktoren teilmechanisiert ausgeführt. Die Überwachung und ggf. Korrektur eines solchen Schweißtraktors erfolgen vor Ort durch einen erfahrenen Schweißer. In der vorliegenden Arbeit wird ein Messmodul entwickelt, welches inline die Oberflächentemperatur, und -kontur sowie die Schweißprozessdaten erfasst. Diese Daten können für eine automatische Prozessüberwachung in Kombination mit einer zerstörungsfreien Werkstoffprüfung genutzt werden und bilden die Basis für eine inline Prozesssteuerung.

## 2. Lösungsweg

Mit dem Messmodul werden die Temperaturfelder und die Oberflächenkontur während des Schweißens am bereits erstarrten Bereich der Kehlnaht untersucht. Zum Einsatz kommt die passive Thermographie (Ausnutzung der Prozesswärme). Über Inhomogenitäten in den Verläufen der Oberflächentemperatur und -kontur werden Schweißnahtunregelmäßigkeiten nachgewiesen. Den Ablauf einer Messung zeigt Abb. 1.



**Abb. 1.** Lösungsweg mit Fehlerkorrelationsmatrix

Unter Berücksichtigung der Eingabedaten (Blechdicke und Schweißparameter) wird das aktuelle Messergebnis, während der Prozess und die Messung laufen, mit der Fehlerkorrelationsmatrix verglichen (siehe oberer Bereich von Abb. 1). Über- oder unterschreitet das Messergebnis die Toleranzgrenzen für eine i.O.-Schweißung aus der Fehlerkorrelationsmatrix kann der Schweißprozess abgebrochen oder angepasst werden. In der Fehlerkorrelationsmatrix werden den jeweiligen Schweißnahtunregelmäßigkeiten Muster bzw. Grenzwerte (Toleranzgrenzen) hinsichtlich der Oberflächentemperatur und -kontur zugeordnet. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der Bewertungsgruppen aus DIN EN ISO 5817 [2]. Grundlage sind mehrere Vorversuche, in denen Schweißnahtunregelmäßigkeiten provoziert werden (siehe unterer Bereich von Abb. 1). Die zugehörigen Messdaten mit den „Fehlermustern“ bilden eine Datenbasis für die Fehlerkorrelationsmatrix.

## 3. Versuchsaufbau und -durchführung

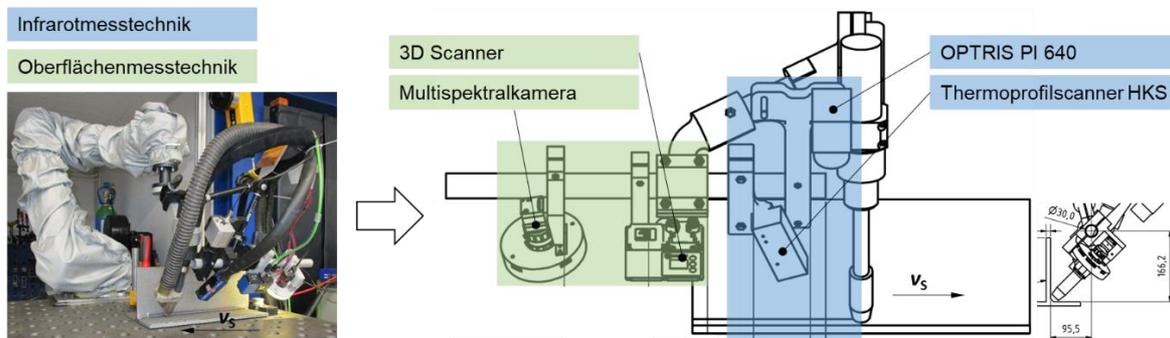
In Kooperation mit den Projektpartnern SIBAU Genthin GmbH & Co. KG und TU Ilmenau werden Arbeitsproben unter Laborbedingungen ausgeführt. Die Proben umfassen einen T-Stoß an dem i.O.-Bereiche und Bereiche mit provozierten Schweißnahtunregelmäßigkeiten

gegenübergestellt werden. Die Kehlnähte an Proben aus dem Material S235 ( $t = 10 \text{ mm}$ ) mit einem a-Maß von  $a = 5 \text{ mm}$  werden mittels MAG-Prozess (Prozess-Nr. 135) geschweißt. Die Vorgabe der Schweißparameter erfolgte durch eine Schweißanweisung (WPS) der Firma SIBAU Genthin GmbH & Co. KG gemäß Tab. 1.

**Tab. 1.** Schweißparameter und Probengeometrie

Parameter		Hinweis	Probengeometrie
$U$	30,9 V	Schweißspannung	
$I$	275 A	Schweißstrom	
$v_s$	51 cm/min	Schweißgeschwindigkeit	
$v_D$	11,1 m/min	Drahtvorschub	
$t$	10 mm	Blechdicke	
$a$	5 mm	a-Maß	
Schutzgas	Ar + 18% CO <sub>2</sub>	Arcal Force	
G-Wks.	S235	Grundwerkstoff	
Z-Wks.	G4Si1	Zusatzwerkstoff	

Die Infrarot-Gerätetechnik und die Oberflächenscanner werden an einem Ausleger direkt am abgewinkelten Maschinenbrennerhalter des MAG-Brenners befestigt und laufen in Schweißrichtung dem Brenner nach. Geführt wird die Konstruktion von einem MRK-10 Roboter der Fa. Universal Robots A/S gemäß Abb. 2. Als Stromquelle kommt die Maschinenstromquelle iROB Pulse 400 der Fa. Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH & Co. KG zum Einsatz.



**Abb. 2.** Versuchsaufbau mit Schweißprobe am MRK-10 Roboter

### 3.1 Infrarotmesstechnik

Die Oberflächentemperaturen werden mit der Wärmebildkamera OPTRIS PI 640 und dem HKS Thermoprofilscanner erfasst (vgl. Tab. 2).

**Tab. 2.** Eingesetzte Infrarot-Kameratechnik

Kamera	Spektralbereich	Optische Auflösung	Temperaturbereich
OPTRIS PI 640	7,5 ... 13,0 $\mu\text{m}$	640 x 480 Pixel	150 ... 900 °C
HKS Thermoprofilscanner	0,78 ... 1,4 $\mu\text{m}$	0,9 x 21 mm	650 ... 1350 °C

Vorversuche bei [3] zeigten, dass der Einsatz der PI 640 Kamera praktikabel ist. Diese Kamera ist im FIR (fernen Infrarot) Bereich von 7,5 bis 13,0  $\mu\text{m}$  sensitiv und eignet sich für die Detektion von Schweißnahtunregelmäßigkeiten beim Metallschutzgasschweißen (MSG).

Gegenüber dem HKS Thermoprofilscanner liefert die PI 640 Kamera eine Folge von zwei-dimensionalen Bildern, mit denen eine Auswertung des Temperaturfeldes in unterschiedlichen Abständen  $s$  zum Brenner möglich ist. Der Thermoprofilscanner liefert die Oberflächentemperaturen entlang einer Linie bzw. Zeile, die sich in einem festen Abstand hinter dem Brenner befindet (an der eine Referenztemperatur von ca.  $T_{\text{Ref.}} = 1000^\circ\text{C}$  vorliegt). Insbesondere für die Detektion von Rissen ist das zweidimensionale Wärmebild gegenüber einer Zeile bei  $1000^\circ\text{C}$  besser geeignet.

Die Auswertung der Infrarot-Bildfolge wird in Analogie zum Thermoprofilscanner mithilfe einer ausgewählten Zeile im Abstand  $s$  in Schweißrichtung hinter dem Brenner gemäß Abb. 3 durchgeführt. Ziel ist es aus der Gesamtheit der Daten einer Messung eine Übersichtsdarstellung abzuleiten, die Ausgangspunkt für weitere Auswertungsoperationen ist. Die Zeile befindet sich beispielsweise bei einer Referenz-Spitzentemperatur von  $T_{\text{Ref.}} = 850^\circ\text{C}$ . Der Temperaturverlauf entlang dieser Zeile  $T(y)$  wird für alle aufgezeichneten Zeitpunkte aneinandergereiht, sodass sich das Thermogramm  $T(y,t)$  als Fläche ergibt.

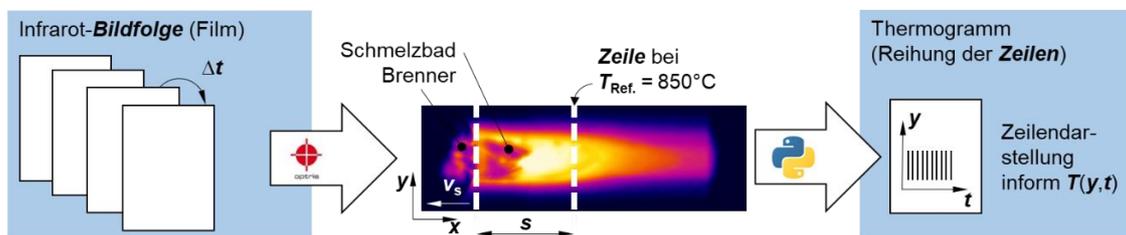


Abb. 3. Auswertung der Infrarot-Messdaten

Mithilfe einer Python-Routine wird auf Basis des Thermogramms der Verlauf der Maximaltemperaturen  $T_{\text{max}}(t)$ , die Temperaturdifferenz  $\Delta T = T - T_{\text{Ref.}}$ , die Aufheiz- bzw. Abkühlraten  $dT/dt$  und der Querrichtungsgradient  $dT/dy$  bestimmt. Für den Querrichtungsgradienten erfolgt die Ableitung in positiver  $y$ -Richtung und somit in der hier gewählten Darstellung von „unten nach oben“.

### 3.2 Oberflächenmesstechnik

Zur Erfassung der Nahtoberfläche kommt ein WENGLOR MSL 122 Zeilenscanner zum Einsatz. Dieser arbeitet mit einem Laser der Wellenlänge 660 nm und einer Abtastfrequenz von 200 Hz bei einer Belichtungszeit von 150  $\mu\text{s}$ . Die Ortsauflösung beträgt 42,5  $\mu\text{m}$ . Der Sensor ist in einem Abstand von etwa 20 cm in einer Linie hinter dem Schweißbrenner angebracht. Durch den Arbeitsabstand von 87,5 mm zur Nahtwurzel ergibt sich ein Messfeld mit einer Breite von 46,75 mm, was eine laterale Auflösung von 36,5  $\mu\text{m}$  bedeutet. Der Zeilenscanner erfasst den Nahtbereich und die umliegenden Basisbleche. Er erzeugt für jedes Profil eine Koordinatenwolke, in der für jeden Punkt Höhe und Breite angegeben werden. Entsprechend DIN EN ISO 5817 (Bewertungsgruppe B) [2] erfolgt die Bewertung der Profildaten und Identifikation der Oberflächenunregelmäßigkeiten. Es gelten nachfolgende Grenzwerte für Kehlnähte (KN) und eine Blechdicke von  $t = 10$  mm:

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| 1. Zu kleine KN-Dicke –           | nicht zulässig,                                     |
| 2. Zu große KN-Dicke –            | $h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 a$ aber max. 3 mm,      |
| 3. Zu große Nahtüberhöhung (KN) – | $h \leq 1 \text{ mm} + 0,1 b$ aber max. 3 mm,       |
| 4. Einbrandkerbe –                | $h \leq 0,05 t$ aber max. 0,5 mm,                   |
| 5. Schroffer Nahtübergang –       | $\alpha \geq 110^\circ$ ,                           |
| 6. Übermäßige Asymmetrie der KN – | $h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,15 a$ ,                  |
| 7. Mehrfachunregelmäßigkeiten –   | $\Sigma h \leq 0,2 t$ oder $\Sigma h \leq 0,15 a$ , |
| 8. Oberflächenpore –              | nicht zulässig.                                     |

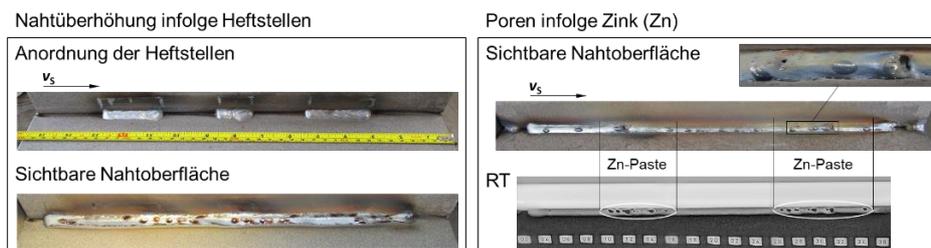
Der Übergang zwischen dem Grundmaterial und der Schweißnaht wird innerhalb des Profils ermittelt, um zwischen Naht- und Blechbereich unterscheiden zu können. Dafür werden die Umkehrpunkte identifiziert, welche in der zweiten Ableitung der Koordinaten sichtbar werden. Im Hinblick auf einen robusten Auswertungsprozess wird die zweite Ableitung mit jeder zehnten Koordinate unter Verwendung eines gleitenden Schwellwerts gebildet. Treten Poren oder Schweißspritzern auf dem Grundmaterial auf, kann es zu einer Fehlidentifikation kommen. In diesem Fall wird für das Profil „nicht berechenbar“ vermerkt. Die zwei Basisbleche werden durch lineare Regression abgebildet. Mit den ermittelten Gleichungen kann der scheinbare Schnittpunkt der Basisbleche bestimmt werden, welcher notwendig ist, um die Profildaten für die weiteren Berechnungen zu rotieren und/oder translatieren gemäß Tab. 3.

**Tab. 3.** Identifikation von Unregelmäßigkeiten aus Basis der Oberflächenmessdaten

Unregelmäßig	Auswertung der Messdaten
Kehlnahtdicke $a$	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Rotation des Profils, sodass die Winkelhalbierende der Basisbleche der Vertikalen entspricht (Schnittpunkt im Koordinatenursprung)</li> <li>– Höhenminimum der Koordinaten im Bereich der Naht = Nahtdicke.</li> <li>– Abgleich mit den Grenzwerten für die minimale und maximale Kehlnahtdicke</li> </ul>
Nahtüberhöhung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Vorgehen analog zur Kehlnahtdicke mit Identifikation vom Höhenmaximum</li> <li>– Abstand zwischen Kehlnahtdicke und Maximum = Nahtüberhöhung</li> <li>– Nahtbreite <math>b = a/2</math> (gleichschenkliges Dreieck)</li> </ul>
Einbrandkerben	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Rotation des Profils, sodass jeweils ein Basisblech die Basis der Koordinaten bildet (→ Basislinie - Gleichung der linearen Regression = 0)</li> <li>– Suche nach erster Koordinate unter der Basislinie und nachfolgender Koordinate oberhalb der Basislinie (Bereich zwischen den Koordinaten = pot. Einbrandkerbe)</li> <li>– Einbrandtiefe = Minimum der Koordinaten aus dem gefundenen Bereich</li> <li>– Bei ermittelter Einbrandtiefe im Bereich des Fehlers der lin. Regression: Tiefe der Kerbe wird null gesetzt</li> </ul>
Nahtübergang	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Winkelberechnung zwischen den Geraden der Basisbleche (aus linearer Regression) und der jeweiligen Tangente am Nahtansatz</li> <li>– ersten 50 Punkte zum Ableiten der Tangentengleichung ausreichend (für vorliegenden Daten und Randbedingungen)</li> </ul>
Symmetrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Längenbestimmung der Basisblechschenkel ausgehend von scheinbarer Wurzel</li> <li>– Abgleich der Differenz der Längen mit der Norm</li> </ul>
Mehrfachunregelmäßigkeiten	– Auswertung unter Berücksichtigung von Einbrandkerben und Nahtüberhöhung (Poren für Detektion ungeeignet)
Oberflächenporen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tiefenbestimmung in Folge Streuung des Lasers am Sensor vorbei nicht möglich</li> <li>– Indirekte Nachweisbarkeit über andere Kriterien (Muster die die gesamte Schweißnaht betreffen)</li> </ul>

### 3.3 Schweißen von Unregelmäßigkeiten

Exemplarisch wird hier die Untersuchung der Unregelmäßigkeiten Nahtüberhöhung und Poren vorgestellt. Die zugehörigen Kehlnahtschweißproben, welche jeweils unbeeinflusste Schweißnahtbereiche und Bereiche mit provozierten Unregelmäßigkeiten aufweisen zeigt Abb. 4. Beim Überschweißen von Heftstellen kann eine Nahtüberhöhung auftreten, welche in den Schweißproben anhand von 30 mm bzw. 60 mm langen Heftstellen untersucht wird.



**Abb. 4.** Kehlnahtschweißproben mit Unregelmäßigkeiten

Poren werden durch das Überschweißen von Zinkpaste provoziert. Die Zinkpaste wird z.B. als Korrosionsschutz verwendet und kann bei unzureichender Nahtvorbereitung als Rückstand vorliegen. Beim Überschweißen verdampft das Zink ( $T_{\text{Sieden}} = 907^\circ\text{C}$ ) und bildet innere und nach außen geöffnete Poren, wie die Röntgenaufnahme und das Bild der sichtbaren Nahtoberfläche in Abb. 4 zeigen.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Infrarotmessung

Die Infrarot-Messergebnisse mit der OPTRIS PI 640 Kamera werden exemplarisch für die beiden nachfolgend aufgelisteten Kehlnahtschweißversuche in Abb. 5 und Abb. 6 dargestellt.

1. Nahtüberhöhung infolge Heftstellen mit  $T_{\text{Ref.}} = 900^\circ\text{C}$
2. Poren infolge Zink mit  $T_{\text{Ref.}} = 700^\circ\text{C}$

Der Verlauf der Maximaltemperaturen in Abb. 5 weist für beide Schweißversuche lokale Temperaturspitzen auf, die auf Schlackeinseln an der jeweiligen Nahtoberfläche zurückgeführt werden können (vgl. Abb. 4).

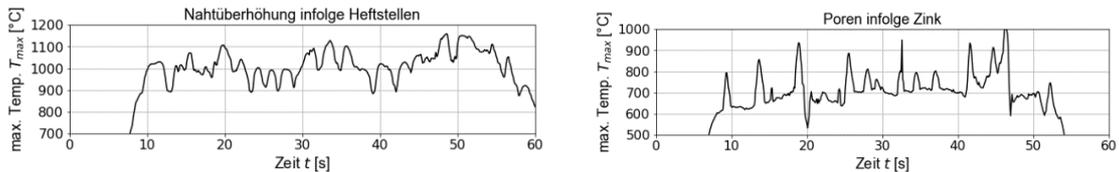


Abb. 5. Verlauf der Maximaltemperaturen gemäß Infrarot-Messung

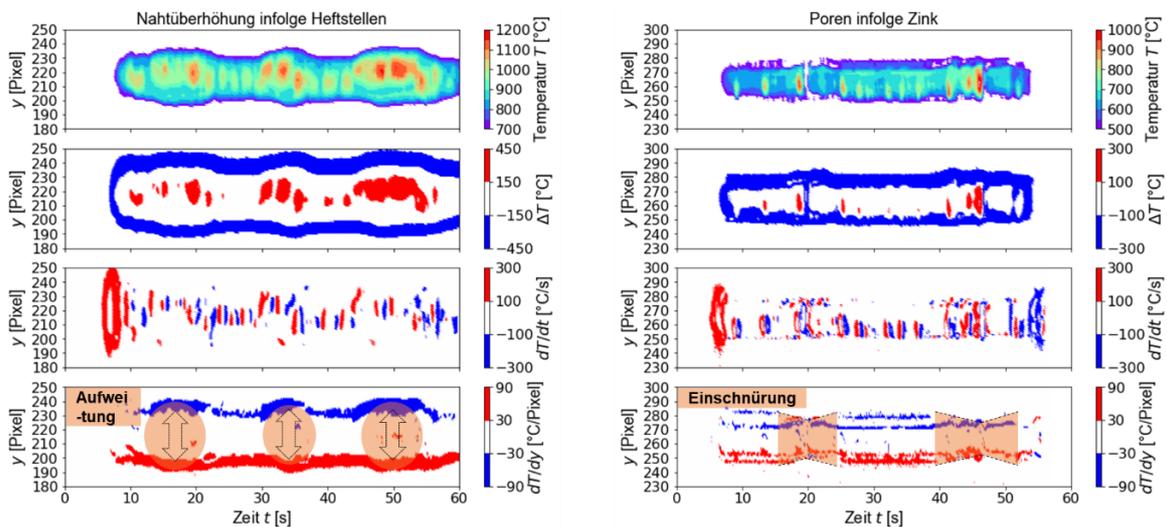


Abb. 6. Auswertung der Thermogramme

Die Thermogrammauswertung in Abb. 6 zeigt für beide Schweißversuche hinsichtlich der Temperaturdifferenzen  $\Delta T$  und den Aufheiz- und Abkühlraten  $dT/dt$  Anzeigen, die in Analogie zum Verlauf der jeweiligen Maximaltemperaturen auf Schlackeinseln zurückzuführen sind. Das  $dT/dt$  Diagramm ist jeweils durch eine markante Aufheizrate ( $t = 5$  s) und eine markante Abkühlrate ( $t = 55$  s) gekennzeichnet, welche den Start bzw. das Ende der Naht anzeigen. Der Querrichtungsgradient bildet für i.O.-Nähte zwei horizontale Linien aus (in der Darstellung von Abb. 6 rot für Aufheizen und blau für Abkühlen). An den Heftstellen werden diese horizontalen Linien nach außen verschoben (Aufweitung). Für die porenbehafteten Bereiche erfolgt eine Verschiebung der Linien nach innen - in Richtung der Schweißnahtwurzel (Einschnürung).

## 4.2 Oberflächenmessung

Die Auswertungsergebnisse werden in Bewertungskarten gemäß Abb. 7 zusammengefasst, welche eine Übersicht über die gesamte Naht liefern und nachfolgendes Farbschema nutzen.

1. Dunkelgrün – Kriterium ist normgerecht (bzw. keine Einbrandkerbe)
2. Hellgrün – normgerecht, aber vorhandene Einbrandkerbe
3. Dunkelrot – Unregelmäßigkeit
4. Gelb – keine Berechnung (Detektion der Nahtkanten fehlgeschlagen)
5. Schattierungen – Unregelmäßigkeit wahrscheinlich, bzw. unwahrscheinlich

Alle Testnähte haben im Bereich der ersten und letzten Profile Stellen, die nicht berechnet werden können, da die Messung über Anfang und Ende der Naht hinausgeht.

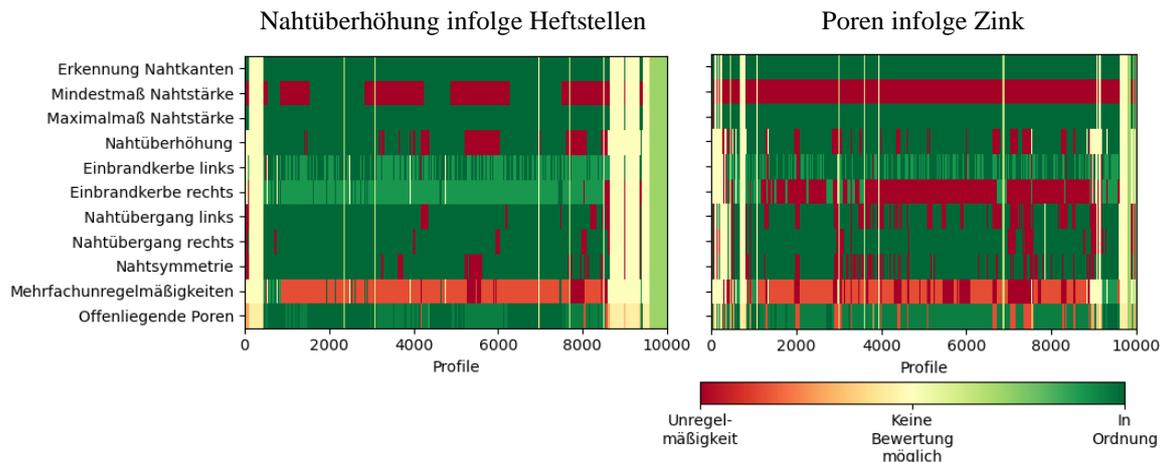


Abb. 7. Bewertungskarte der Oberflächenmessergebnisse

Für die Naht mit den überschweißten Heftstellen (Abb. 7 links) können eindeutig die Bereiche ausgemacht werden, an denen die Heftstellen liegen. Das notwendige Mindestmaß der Nahtstärke wird erreicht. Dies dokumentiert ein generelles Problem der Testmessungen, dass durchgehend die Einzellage nicht die erforderliche Dicke erreicht hat. Mit den überschweißten Heftstellen wird gezeigt, dass der Algorithmus eine normgerechte Schweißnahtdicke korrekt dokumentieren kann. Durchgehend sind nicht normkonforme Mehrfachunregelmäßigkeiten zu verzeichnen, die im Wesentlichen durch die Nahtüberhöhung die vorgegebene Grenze überschreiten. Einzelne Profile der Messung sind frei von Unregelmäßigkeiten. In Abb. 7 rechts sind die Evaluationsergebnisse der Schweißnaht mit den Zink-kontaminierten Basisblechen zu sehen. Trotz Poren und Spritzern können die Nahtkanten korrekt detektiert und damit die Auswertungen durchgeführt werden. Vereinzelt werden Nahtüberhöhungen verzeichnet, diese treten allerdings vor allem in den Bereichen auf, in den Spritzer oder Poren vorliegen und sind deshalb einer nicht korrekten Bestimmung der Nahtdicke zuzuordnen. Auffällig ist eine nahezu durchgehende, zu tiefe Einbrandkerbe auf der rechten Seite, die möglicherweise aus einer ungenauen Brennerführung resultiert und sich auf die Mehrfachunregelmäßigkeiten niederschlägt. In den Profilbereichen um 3000 und zwischen 6500 und 7800 werden korrekt die offenliegenden Poren identifiziert. Gleichzeitig können dort auch Unregelmäßigkeiten in den anderen Kategorien gesehen werden. Diese alleinige Zuordnung funktioniert nicht robust, wie anhand der Fehlanzeigen an den Profilen 2000, 4300 sowie 8200 für diese Naht zu sehen ist.

## 5. Diskussion

Mit der passiven Thermographie sollen insbesondere innere Unregelmäßigkeiten an Kehlnähten detektiert werden. Die Entstehung der inneren Unregelmäßigkeiten nimmt nur bedingt Einfluss auf die Oberflächentemperatur. Es kann exemplarisch gezeigt werden, dass sich bei der Ausbildung von Poren infolge Zink der Querrichtungsgradient  $dT/dy$  der Oberflächentemperaturen einschnürt bzw. in Richtung der Schweißnahtwurzel verschiebt. Ein Rückschluss auf die Größe der Poren ist aktuell nicht möglich. Abhilfe kann hier ggf. die Auswertung an zwei Referenztemperaturzeilen liefern. Beide Messmethoden, der Oberflächenscan und die Thermographie liefern sowohl für die Nahtüberhöhung und die Poren Anzeigen, die vom jeweiligen i.O. Signal abweichen.

In weiterführenden Untersuchungen mit der Blechdicke  $t = 12$  mm und konstanten Schweißparametern (vgl. Tab. 1) hat sich das hier vorgestellte Muster im Umfeld von Poren bestätigt. Aufgrund der verbesserten Wärmeableitung infolge der größeren Blechdicke tritt das thermographische Muster jedoch in abgeschwächter Form auf.

Die Nutzbarkeit der Profildaten des 3D-Zeilenscanners kann durch Schweißspritzer auf dem Basismaterial, wie durch offenliegende Poren im Nahtbereich beeinträchtigt sein. Dieser Einfluss kann nur teilweise algorithmisch aufgelöst werden. Auch durch die Bildung von Schlackeinseln im Bereich des Nahtübergangs können sich die Reflexionseigenschaften der Oberfläche derart ändern, dass es zu einer fehlerhaften Auswertung kommt. Eine alleinige, erfolgreiche Weiterentwicklung mit den aufgenommenen 3D-Daten ist an dieser Stelle nicht mehr wahrscheinlich. Dafür kann der multimodale Ansatz, also die Fusion aller aufgenommenen Sensordaten gemäß [4], hier eine korrekte Bewertung ermöglichen.

## 6. Zusammenfassung

Es wird ein Messmodul entwickelt und unter Laborbedingungen angewendet, mit dem die Oberflächentemperatur und -kontur während des Schweißens von Kehlnähten aufgezeichnet werden können. Anhand von Schweißversuchen mit einer provozierten Nahtüberhöhung und Porenbildung konnten den jeweiligen Unregelmäßigkeiten Messdatenmuster zugeordnet werden. Insbesondere der Querrichtungsgradient hat sich bei der Thermogramauswertung für die Identifikation von Mustern als geeignet erwiesen. Mit dem eingesetzten 3D-Zeilenscanner können eine Mehrzahl der möglichen Oberflächenunregelmäßigkeiten identifiziert und korrekt bewertet werden. Die daraus resultierenden Bewertungskarten können eine gute Hilfestellung für eine normgerechte Qualitätskontrolle sein. Für sämtliche Auswertungsschritte werden eigens entwickelte Python-Routinen verwendet. Eine finale Aussage hinsichtlich der Schweißnahtqualität steht aus und wird durch die Kombination der Messdaten mit den Schweißprozessdaten ggf. möglich.

Das entwickelte Messmodul soll in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern SIBAU Genthin GmbH & Co. KG und Dögel GmbH an einem Schweißtraktor Anwendung finden. Dieses Projekt ist gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Referenzen

- [1] DIN EN ISO 15614-1:2020-05, *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe\_ - Schweißverfahrensprüfung\_ - Teil\_1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen.*
- [2] DIN EN ISO 5817:2014-06, *Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten.*
- [3] Trench, G.: *Einfluss des Spektralbereichs auf thermografische Messungen an Schweißnähten*, Berichtsband Thermographie-Kolloquium 2019, Vortrag 14, 2019.
- [4] Simmen, K.; Buch, B.; Breitbarth, A. und Notni, G.: *Non-Destructive Inspection System for Welding Processes by applying Data Fusion*, Berichtsband 14<sup>th</sup> Quantitative InfraRed Thermography Conference, 2018.