

Einsatz der passiven Thermografie für die Bewertung der Güte metallschutzgasgeschweißter Feinblechverbindungen

Eberhard VOREIN¹, Sven JÜTTNER², Ulrike SIEMER¹, Volker TEßMAR¹
¹ Volkswagen AG, Braunschweig
² Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg

Kurzfassung. Der Einsatz der passiven Thermografie bietet den Vorteil, dass die Eigenwärme, die durch den Schweißprozess eingebracht wurde, für die Bewertung der Schweißnaht herangezogen wird. Somit ist es denkbar, dass diese Information der Wärmeverteilung für eine quasi online Qualitätsbewertung der Schweißverbindung verwendet werden kann. In der Schweißtechnik gibt es eine Vielzahl von Schweißnahtunregelmäßigkeiten Bindefehler, Poren, Einbrandkerben u.v.m.. Diese können durch zerstörende Prüfung oder aufwendig mit Zfp erkannt werden. Die bekannten automatisierbaren Zfp-Verfahren können nicht alle relevanten Schweißnahtunregelmäßigkeiten (DIN EN ISO 6520-1) wirtsch. in der Großserienfertigung detektieren. Das betrifft bspw. den Bindefehler. Diese Schweißnahtunregelmäßigkeit hat einen deutlichen Einfluss auf die Festigkeit der Schweißverbindung. Ein sicherer Nachweis dieser Schweißnahtunregelmäßigkeit z.B. bei einer Kehlnaht am Überlappstoß im Feinblechbereich, ist mit einem Querschliff möglich. In dieser Arbeit wird untersucht, in wieweit es möglich ist, mit der passiven vergleichenden Thermografie auf Schweißnahtunregelmäßigkeiten zuzuschließen. Für die Untersuchung wird eine Kehlnaht am Überlappstoß betrachtet. Dafür werden Schweißnähte erzeugt die der Norm (DIN EN ISO 5817-B) entsprechen und Schweißnähte die nicht normkonform sind. Die thermische Leistung des Lichtbogens wird konstant gehalten. Die Entstehungsphase, das Abkühlverhalten und die Wärmeeinflusszone (WEZ) der Schweißnaht wird mit einer Infrarotkamera betrachtet. Für die Messungen wird eine IR-Kamera verwendet die im mittleren Wellenlängenbereich arbeitet, eine hohe therm. u. geom. Auflösung besitzt. Im Anschluss an die Messung werden die Daten mit einander qualitative (o. Best. von absoluten Temperaturen) verglichen . auf signifikante Unterschiede untersucht. Dieser Beitrag betrachtet, wie sich das Abkühlverhalten der Schweißnaht/WEZ aufgrund von Schweißnahtunregelmäßigkeiten verändert. Diese zusätzliche Information, die die Thermografie liefert soll eine Aussage über das Vorhandensein von Schweißnahtunregelmäßigkeiten wie z.B. Bindefehlern liefern u. darüber hinaus soll eine Aussage über die Güte der Schweißnaht getroffen werden. Weiter wird dargestellt, welche Randbedingungen die IR-Aufnahmen beeinflussen.

Einleitung

Das Metallschutzgasschweißen ist ein sehr wirtschaftliches Fügeverfahren, welches im Fahrwerkbereich eingesetzt wird. Die damit erzeugten Schweißnähte müssen die geforderte Qualität erfüllen (bspw.: DIN EN ISO 5817-B /1/). Aufgrund verschiedener Einflussgrößen können Schweißnahtunregelmäßigkeiten (DIN EN ISO 6520-1 /2/) entstehen. Einige von diesen Schweißnahtunregelmäßigkeiten (z. B. Poren /3/) können anhand von Prozessgrößen wie Schweißstrom und –spannung erkannt werden. Ein Bindefehler, bei dem das Schweißgut keinen stoffschlüssigen Verbund zum Grundwerkstoff hat, kann anhand dieser Größen nicht erkannt werden. Derartige innere Fehler haben jedoch entscheidenden Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit. Weiter kann eine Schweißnaht mit verschiedenen zerstörungsfreien Prüfverfahren (z. B. Durchstrahlungsprüfung, Ultraschall, u.v.m.) und zerstörenden Prüfverfahren (z. B. Querschliff) geprüft werden. Die zerstörungsfreien Prüfverfahren sind nur bedingt automatisierbar in der Großserienfertigung. Aufgrund der Komplexität der Bauteile, Blechdicke (Feinblech) und/oder der Nahtgeometrie stoßen diese Verfahren an Ihre Grenzen in Bezug auf die Fehlererkennung. Die zerstörungsfreien Prüfverfahren können nicht alle Schweißnahtunregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 6520-1 /2/ in der Großserienfertigung erkennen. Die Komplexität der Fahrwerkbauteile wird in Abbildung 1 deutlich. Aufgrund dieser Komplexität, der Bauteile bietet es sich an, die Thermografie zu verwenden um die Qualität der Schweißnaht zu bewerten. In dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit die passive Thermografie für die Bewertung der Schweißnahtgüte herangezogen werden kann. Mit der passiven Thermografie kann die Temperaturverteilung im Bauteil nach dem Schweißen ermittelt und die Information der Temperaturverteilung als Merkmal für die Güte der Schweißnaht herangezogen werden. Für die Untersuchungen wird der Fügeprozess, das Abkühlverhalten der Schweißnaht und deren Temperaturverteilung im Bauteil direkt nach dem Schweißprozess thermografisch betrachtet. Anhand dieser Informationen sollen Rückschlüsse auf die Güte der Schweißnaht gezogen werden.



Abbildung 1: Beispiele für metallgeschweißte Fahrwerkbauteile aus Stahlblech

Die Thermografie wird in einigen Bereichen der Schweißtechnik bereits für die Bewertung der Schweißnaht herangezogen. Das betrifft bspw. die Endlosrohrfertigung. /4/ In diesem Bereich wird der Thermoprofilscanner (TPS) eingesetzt. Der TPS ist ein Infrarotlinienscanner. Neben dem TPS wird eine Infrarotkamera verwendet, die sich durch eine hohe geometrische und thermische Auflösung auszeichnet. In dieser Arbeit wird untersucht, welche Schweißnahtunregelmäßigkeiten mithilfe der Thermografie erkannt

werden können und welchen Einfluss Schweißnahtunregelmäßigkeiten auf das Abkühlverhalten der Schweißnaht haben. Weiter wird untersucht, in welchem Maße Schweißnahtunregelmäßigkeiten durch einen Infrarotlinienscanner oder durch eine Infrarotkamera erkannt werden können.

Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen wurde ein Versuchsaufbau entworfen, wie in Abbildung 2 dargestellt. Er besteht aus einer Spannvorrichtung (5), in der die Versuchsbleche während des Schweißens positioniert werden. Die Spannvorrichtung wird von einem Handlingroboter (4) unter dem Schweißbrenner (3) bewegt. Der Schweißbrenner, TPS (2) und Infrarotkamera (1) sind während der Versuche ortsfest.

Bei der Infrarotkamera handelt es sich um das Modell ImageIR 8300 von Fa. Infratec. Diese arbeitet im mittleren Infrarotspektrum ($2 \dots 5,5 \mu\text{m}$). Die Kamera zeichnet sich durch eine hohe geometrische (640×512 IR-Pixel) und thermische Auflösung (20 mK) aus. Durch eine entsprechende Kombination aus Objektiv ($f=100 \text{ mm}$) dem dazugehörigen Makrovorsatze wurde die geometrische Auflösung auf $0,075 \text{ mm/Pixel}$ verbessert. Der betrachtete Bildausschnitt ist rund $38 \times 48 \text{ mm}$ groß. Für die Untersuchungen wird ein Messbereich von $700\text{-}1700 \text{ }^\circ\text{C}$ verwendet. Die Kalibrierung der Infrarotkamera erfolgte typischerweise mit einem „Schwarzen Strahler“. Um die tatsächliche Temperatur der Schweißnaht zu bestimmen, muss der Emissionsgrad bekannt sein. /5/ Der TPS ist ein Infrarotlinienscanner von Fa. HKS-Prozesstechnik. Dieser arbeitet im nahen Infrarotspektrum ($0,78 \dots 1,4 \mu\text{m}$). Die Messstrecke des TPS ist ca. $1 \times 20 \text{ mm}$ lang. Der TPS ist so ausgelegt, dass er direkt am Schweißbrenner montiert werden kann. /6/

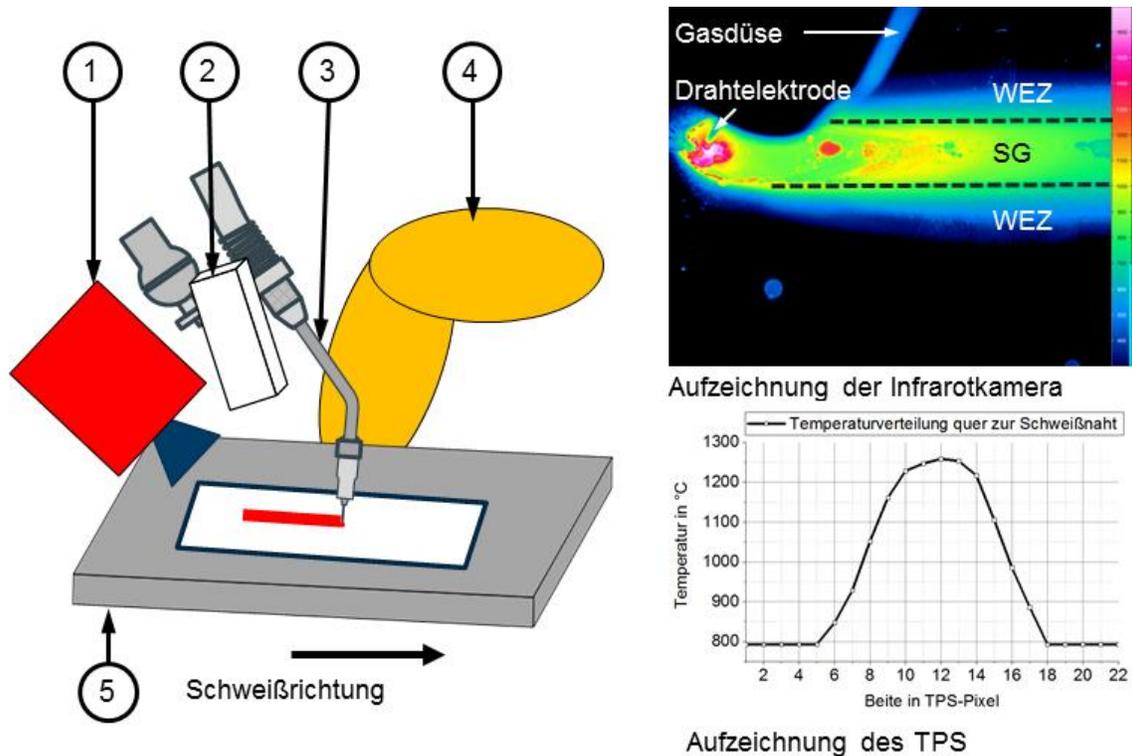


Abbildung 2: Versuchsaufbau (1: Infrarotkamera, 2: Thermoprofilscanner (TPS), 3: Schweißbrenner, 4: Handlingroboter, 5: Schweißvorrichtung) und die thermischen Aufzeichnungen von IR-Kamera und TPS

Er zeichnet das Temperaturprofil quer zur Schweißnaht auf. Für die Untersuchungen wurden zwei Messbereiche (793 - 1358 °C und 905 - 1575 °C) des TPS verwendet. Im Vergleich zur Infrarotkamera ist der TPS auf die Messaufgabe kalibriert, d. h. die gemessenen Temperaturen entsprechen der Objekttemperatur.

Für die Untersuchungen wird eine Kehlnaht am Überlappstoß verwendet. Die Versuchskontur besteht aus zwei Blechen mit einer rechteckigen Grundfläche. Der Grundwerkstoff ist ein unbeschichtetes Stahlblech der Güte S 420 MC (t=2 mm).

Die Schweißnaht wird nach DIN EN ISO 5817-B /6/ bewertet. Ergänzend zur Norm wird für die Versuche eine Einbrandtiefe im Unterblech von $\geq 0,2$ mm gefordert, um die Bewertung „i. O.“ zu erhalten.

Die Schweißnähte werden mittels Sichtprüfung (VT), Durchstrahlungsprüfung (RT) und Querschliff bewertet. Während der Untersuchungen werden die eingestellten Schweißparameter (Drahtvorschub, Spannungskorrektur und Schweißgeschwindigkeit) nicht verändert, da diese Größen die eingebrachte Energie (Streckenenergie) beeinflussen.

Auswertung der Infrarotaufnahmen

Die Thermogramme der Infrarotkamera werden qualitativ vergleichend ausgewertet /6/. Es werden keine absoluten Temperaturen mit der Infrarotkamera bestimmt. Für die Auswertung werden die scheinbaren Temperaturen von i. O.-Schweißverbindungen mit n. i. O.-Schweißverbindungen verglichen und auf signifikante Unterschiede hin untersucht. Für die Bestimmung von absoluten Temperaturen muss der Emissionsgrad hinreichend genau bekannt sein. Das ist bei dieser Messaufgabe nicht gegeben.

Mit der Auswertesoftware IRBIS3 erfolgt die Auswertung der Thermogramme. In die Thermogramme wird eine Messlinie gelegt und die Temperaturverteilung wird dargestellt. Die Auswertung der Thermogramme erfolgt in Analogie zum TPS, d. h. es wird eine Messlinie quer zur Schweißnaht verwendet, die ein Temperaturprofil quer zur Schweißnaht ausgibt, wie in Abbildung 3 dargestellt.

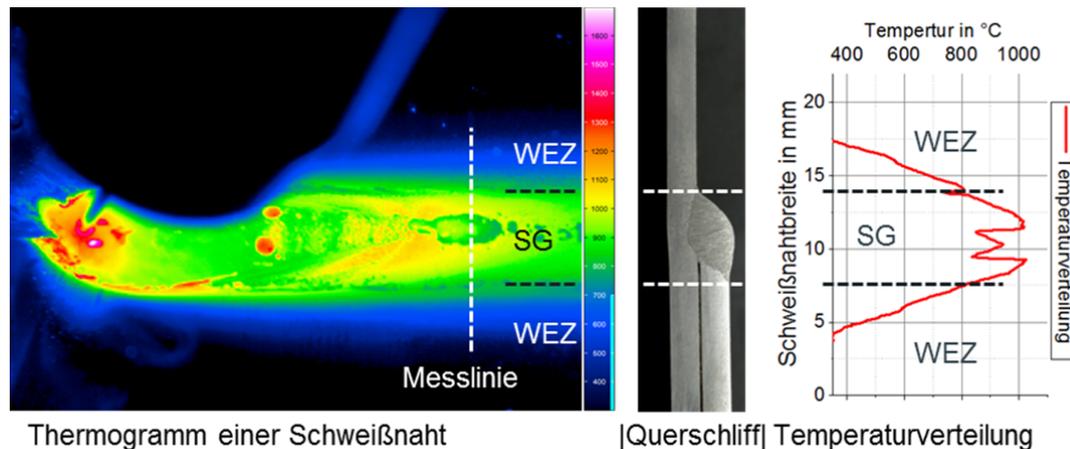


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Thermogramm, Querschliff und Temperaturverteilung

Das Thermogramm bietet den Vorteil, dass die Position der Messlinie frei wählbar ist und dass der optimale Messabstand hinter dem Schweißbrenner für die Erkennung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten bestimmt werden kann. Weiter ist es möglich, das Abkühlverhalten der Schweißnaht darzustellen. In Abbildung 3 – Temperaturverteilung, ist ein deutlicher Temperatureinbruch von rund 200 K in der Temperaturverteilung sichtbar. Dieser Bereich der Schweißnaht wurde näher betrachtet. Die Schweißnaht erfüllt die geforderte Qualitätsanforderung. Auf der Schweißnahtoberfläche und im Übergangsbereich

zwischen Schweißgut (SG) und Wärmeeinflusszone (WEZ) lagert sich prozessbedingt Silikat ab. In Abbildung 4 – rechts, ist eine Schweißnaht mit Silikatablagerung (goldfarbener Fleck) abgebildet. Es wird deutlich, dass Silikatablagerungen in unterschiedlicher Ausprägung auftreten.

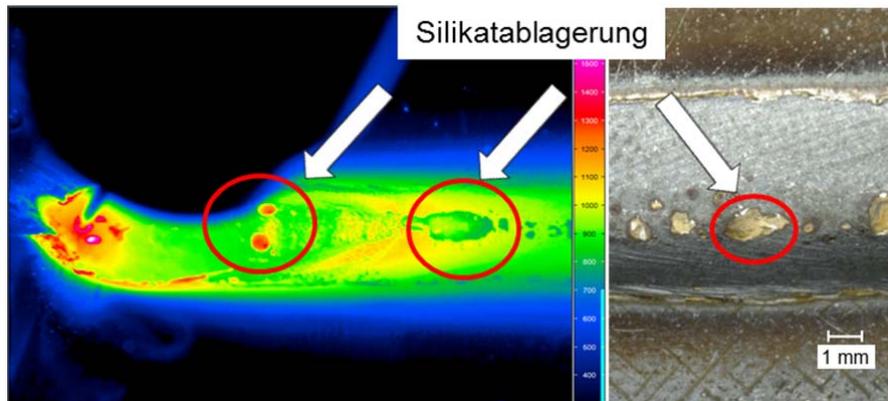


Abbildung 4: Thermogramm (IR-Kamera) und Realbild Schweißnaht mit Silikatablagerung

Weiter sind in Abbildung 4 – links, zwei „Hot-Spots“ direkt unter der Gasdüse erkennbar. Dabei handelt es sich ebenfalls um Silikat. Die scheinbare Temperaturerhöhung ist auf die Reflexion des Lichtbogens auf den Silikatablagerungen zurückzuführen. Bei Silikatablagerungen handelt es sich um eine glasartige Ablagerung auf der Schweißnaht, die u.a. aus Siliziumdioxid besteht /8/. Auf der Schweißnaht wirken die Silikatablagerungen „kälter“. Sie besitzen im Vergleich zur Schweißnaht einen anderen Emissionsgrad und ein anderes thermografisches Verhalten.

Betrachtet man exemplarisch das spektrale Verhalten von Glas (Abbildung 5) wird deutlich, dass sich der Transmissionsgrad in Abhängigkeit der Wellenlänge stark ändert. In den Temperaturprofilen des TPS sind keine derartigen Temperatureinbrüche durch Silikat sichtbar. Der TPS arbeitet im Vergleich zur IR-Kamera im SW-Bereich (Abbildung 5 – a). In diesem Wellenlängenbereich besitzt Glas einen guten Transmissionsgrad. Das bestätigt die Annahme, dass es sich bei Silikatablagerungen um einen Werkstoff mit glasähnlichen optischen Verhalten handelt.

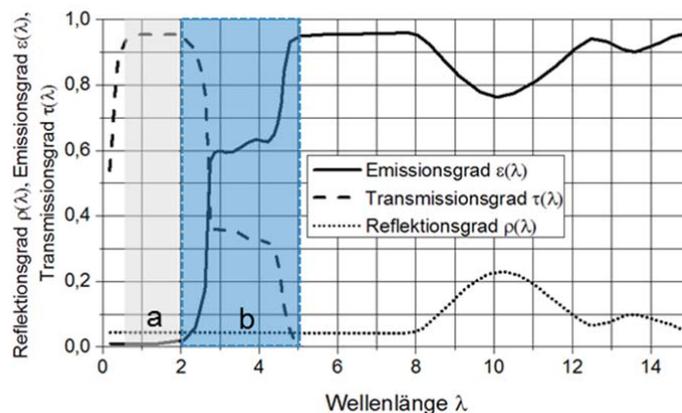


Abbildung 5: Spektraler Transmissions-, Reflexions- und Emissionsgrad von Glas nach /9/ mit den Wellenlängenbereichen von TPS (a) und IR-Kamera (b)

Mit der eingesetzten IR-Kamera ist es möglich, durch spektrale Filter den erfassbaren Wellenlängenbereich der Kamera hin zum kurzwelligen Strahlungsanteil zu verschieben. In diesem Bereich ist der Transmissionsgrad von Glas höher und somit ist es möglich durch Glas Temperaturen zu messen. Die Versuche wurden mit einer IR-Kamera wiederholt, die einen speziellen Filter (Bandpass: 2,27 – 2,47 μm) besitzt. /10/

Dies kann daran liegen, dass die Silikatablagerungen ein anderes spektrales Verhalten im Vergleich zu Glas (Abbildung 5) aufweisen. Weiter wird in Abbildung 5 deutlich, dass die Thermografiesysteme, auch mit Bandpass in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen arbeiten. Die Temperaturverteilung der Schweißnaht unter der Silikatablagerung kann nicht bestimmt werden. Mit den stark schwankenden Temperaturverläufen im Bereich der Schweißnaht, hervorgerufen durch die Silikatablagerungen, erfolgt die weitere Auswertung der Infrarotaufnahmen.

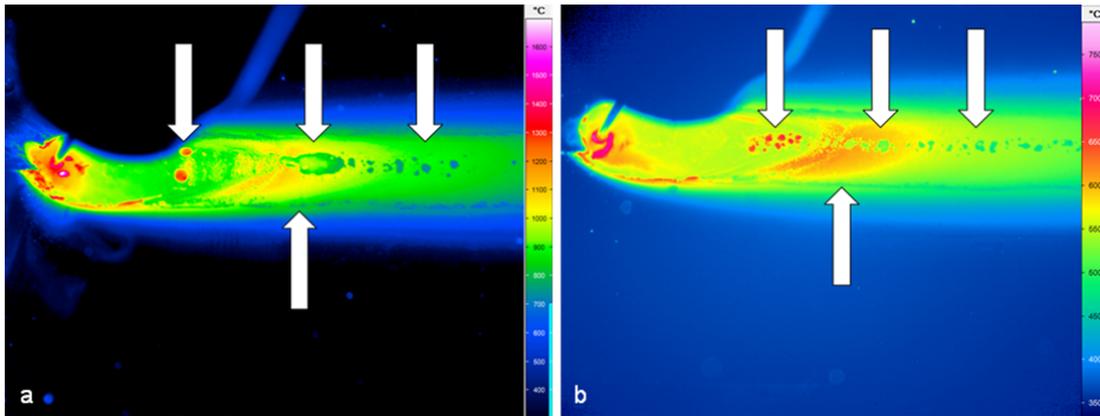


Abbildung 6: a: Infrarotaufnahme ohne Spektralfilter, b: Infrarotaufnahme mit Spektralfilter

Ergebnisse – Nachweis von Poren / Porennestern / Oberflächenporen

Für die Erzeugung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten wie Poren bzw. Oberflächenporen wurde der Schutzgasstrom manipuliert. Die Größe und Ausprägung der entstehenden Schweißnahtunregelmäßigkeit ist bei jeder Schweißnaht unterschiedlich.

Bei Poren handelt es sich um Gaseinschlüsse in der Schweißnaht (innere Schweißnahtunregelmäßigkeit). Diese können bspw. mittels Durchstrahlungsprüfung erkannt werden. Oberflächenporen sind Hohlräume in der Schweißnaht, die zur Oberfläche der Schweißnaht hin offen sind (äußere Unregelmäßigkeit), weshalb diese Schweißnahtunregelmäßigkeit mittels Sichtprüfung erkannt werden kann. /6/

Die Auswertung der Thermogramme erfolgte mit einer Messlinie (analog Abbildung 3) Diese Messlinie gibt die Temperaturverteilung des Thermograms wieder. Die einzelnen in einer Frequenz von 200 Hz gemessenen Temperaturverteilungen werden aneinandergelegt und als Falschfarbendarstellung abgebildet. Als Referenz ist in Abbildung 7 die Temperaturverteilung einer i. O.-Schweißnaht dargestellt. Die Schweißnaht, bei der der Schutzgasstrom manipuliert wurde, wird der Sichtprüfung unterzogen und u. a. vermehrt Oberflächenporen bestimmt.

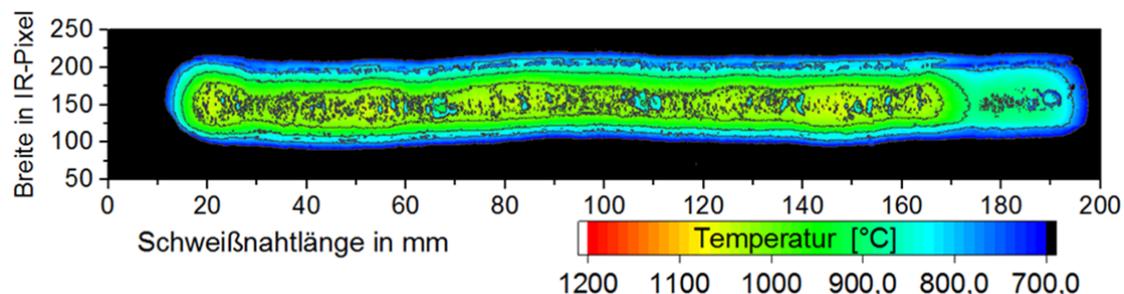


Abbildung 7: Falschfarbendarstellung der Temperaturverteilung einer i. O.-Schweißnaht

In Abbildung 8 – a ist diese Schweißnaht abgebildet. Im Anschluss erfolgte die Durchstrahlungsprüfung der Schweißnaht (Abbildung 8 – b). In dieser ist zu erkennen, dass die Schweißnaht Poren und Porennester aufweist. Weiter wurden die thermografischen Daten dieser Schweißnaht betrachtet (Abbildung 8 – c).

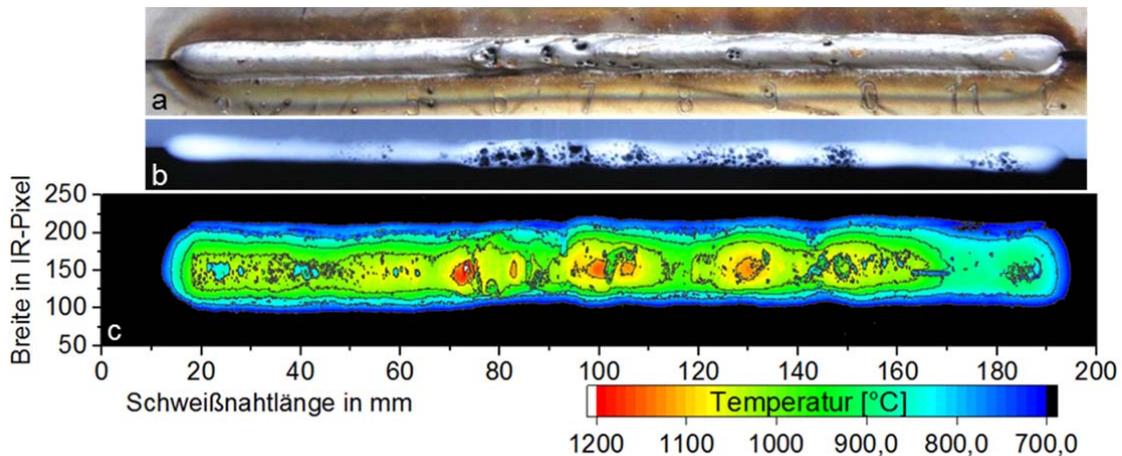


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen Realbild (a), Röntgenbild (b) und Falschfarbendarstellung der Temperaturverteilung (c) einer n. i. O.-Schweißnaht mit Poren/Oberflächenporen

Die Auswertung erfolgte mit der Aneinanderreihung von Temperaturmesslinien quer zur Schweißnaht analog Abbildung 3. Vergleicht man Abbildung 7 und Abbildung 8 – c miteinander, sind „cold-spots“ in beiden Falschfarbendarstellungen zu erkennen. Bei diesen Erscheinungen handelt es sich um Silikatablagerungen, die im Vorfeld beschrieben wurden. In Abbildung 8 – c sind zusätzlich „hot-spots“ erkennbar, die auf Poren/ Oberflächenporen zurückzuführen sind. Sie erzeugen eine scheinbare Temperaturerhöhung. Eine mögliche Ursache für diese thermografische Erscheinung ist, dass das Gas in den Poren die Abkühlung der Schweißnaht beeinträchtigt. Betrachtet man die Maximaltemperatur der Schweißnaht mit und ohne Schweißnahtunregelmäßigkeiten, ist ein deutlicher Unterschied ersichtlich.

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden der Fügeprozess und das Abkühlverhalten der Schweißnaht mit zwei unterschiedlichen Infrarotmesssystemen betrachtet. In der Auswertung der thermografischen Daten der Messsysteme wurde deutlich, dass es Unterschiede gibt. Silikatablagerungen auf und neben der Schweißnaht sind deutlich in den Thermogrammen der IR-Kamera erkennbar. Die Silikatablagerungen verursachen einen scheinbaren Temperatureinbruch im Thermogramm. Diese beeinflussen die Auswertung der thermischen Daten negativ. In den thermischen Daten des TPS sind diese Silikatablagerungen nicht erkennbar. Es wurde untersucht, inwieweit es mit der spektralen Thermografie möglich ist, „durch“ Silikatablagerungen zu thermografieren, um so die Temperaturverteilung der Schweißnaht darzustellen. Der spektrale Messbereich der IR-Kamera wurde durch einen Bandpassfilter in den kürzeren Wellenlängenbereich verschoben. Der erhoffte Effekt, dass „durch“ die Silikatablagerungen thermografiert werden kann, blieb aus.

In einem Beispiel wurde gezeigt, dass die thermischen Daten der glühenden Schweißnaht Rückschlüsse auf Poren/Oberflächenporen erlauben. Der Nachweis einer minimal erkennbaren Porengröße konnte noch nicht bestimmt werden, soll jedoch in weiteren Untersuchungen erfolgen. In zukünftigen Versuchen werden weiter

Schweißnahtunregelmäßigkeiten wie z. B. Bindefehler, mangelhafter Einbrand oder Durchschmelzung untersucht werden.

Literatur

- /1/ Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 5817, Schweißen, Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen), Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten, Oktober 2014, Beuth Verlag GmbH Berlin
- /2/ Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 6520-1, Schweißen und verwandte Prozesse, Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen, Teil 1: Schmelzschweißen, November 2007, Beuth Verlag GmbH Berlin
- /3/ DVS-Berichte Band 279, Große Schweißtechnische Tagung, Roboter, Wirtschaftliche Fertigung durch fügetechnische Automatisierung, Integration von Schweißparameterüberwachungssystemen in die Großserienfertigung der Automobilindustrie am Beispiel des MSG-Schweißens, S. Herudek, K. Röhrs, S. Willinghöfer, Braunschweig, V. Teßmar, Wolfsburg, und V. Schauder, Halle/Saale, DVS Media GmbH, Düsseldorf 2011, [ISBN 978-3-87155-271-7]
- /4/ Fachmagazin „Blech“ Ausgabe 2/2010, Seite 50-51, „Thermografie statt Wirbelstrom“
- /5/ Produktflyer Wärmebildkamera ImageIR
http://www.infratec.de/fileadmin/downloads/pdf/Flyer_ImageIR_de_mail.pdf,
Stand 20.03.15
- /6/ Deutsches Institut für Normung: DIN 54190-1, Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung, Teil 1: Allgemeine Grundlagen, August 2004, Beuth Verlag GmbH Berlin
- /7/ Bedienungsanleitung, Thermoprofilscanner, Stand 11.19.2012, HKS-Prozesstechnik, Halle/Saale
- /8/ Killing, R., Über die Ursache für das Zerplatzen von Tropfen beim Metall-Aktivgasschweißen un- und niedrig legierter Stähle, Schweißen und Schneiden * Band 55 (2003) Heft 8, Seite 445-447
- /9/ F. Bernhard (Hrsg.): Technische Temperaturmessung, Physikalische und messtechnische Grundlagen, Sensoren und Meßverfahren, Meßfehler und Kalibrierung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004 [ISBN – 3-540-62672-7]
- /10/ Informationsbroschüre Spektrale Thermografie von Infratec,
http://www.infratec.de/fileadmin/downloads/pdf/Spektrale_Thermografie.pdf,
Stand: 21.05.2015