

In-Situ Dehnungsbestimmung mittels energiedispersiver Röntgenbeugung während des Laserschweißens

Uwe Reisgen, Konrad Mäde, Fatma Akyel, Rahul Sharma, Simon Olschok, Maximilian Gamedinger, Timm Evers

Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen

office@isf.rwth-aachen.de

Guilherme Abreu Faria, Gleb Dovzhenko

Helmholtz-Zentrum Hereon, Hereon-Außenstelle am DESY in Hamburg

guilherme.abreu@hereon.de

Abstract

Der Umgang mit Schweißeigenspannungen und -verzug erfordert detaillierte Werkstoff- und Prozesskenntnis. Vielfältige Randbedingungen bei Schmelzschweißprozessen erschweren die Kontrolle von Bauteileigenschaften zusätzlich. Insbesondere die Entstehung von Eigenspannungen als Folge lokaler Erwärmung durch eine konzentrierte Wärmequelle, wie sie meist zum Schmelzschweißen verwendet wird, ist aufgrund der hohen Temperaturgradienten und des hochdynamischen Prozessverhaltens bisher nicht prozessnah erfasst und verstanden. Hierfür werden Schweißversuche mit unterschiedlichen technischen Werkstoffen durchgeführt. Stellvertretend wird ein hochlegierter X5CrNi18-10 Stahl verwendet, da dieser nach der Erstarrung keine Umwandlung von Austenit zu Ferrit durchläuft. Es werden einseitig Blindraupen ohne Zufuhr von Schweißzusatz geschweißt. Die erzeugten elastischen Dehnungen im Werkstoff werden mittels Synchrotron-Strahlung in-Situ beobachtet. Für die Bestimmung elastischer Dehnungen im Bauteilinneren wird ein energiedispersiver transmissiver Ansatz verwendet. Hierbei wird durch ein Blendensystem ein Messvolumen innerhalb des Werkstücks festgelegt. Durch geeignete Anordnung der Detektoren wird die Veränderung der erzeugten Beugungsspektren verfolgt. Die hohe Flussdichte der verwendeten Röntgenstrahlung zusammen mit der Versuchsanordnung ermöglicht bei wiederholter Durchführung der Versuche eine Kartierung der lokalen Dehnung relativ zur Position des Schmelzbades. Die im Bauteil verbleibende Eigenspannung wird anschließend durch Aufzeichnung der Dehnungsänderungen im statischen Zustand während der Abkühlung erfasst. Eine Interpolation der gewählten Messpunkte gibt anschließend ein Bild über die Entstehung

von Eigenspannungen in der gewählten Versuchsanordnung. Es konnte gezeigt werden, dass die gewählte Methode, eine zerstörungsfreie Auswertung von Dehnungen mittels energiedispersiver Röntgenbeugung ermöglicht und somit Einflüsse verschiedener Randbedingungen auf die Entwicklung von Eigenspannungen charakterisiert werden können. Die erzielten Dehnungskarten zeigen im Gegensatz zu bisherigen Versuchen einen kontinuierlichen Dehnungsverlauf, wie er in den Bauteilen zu erwarten ist.

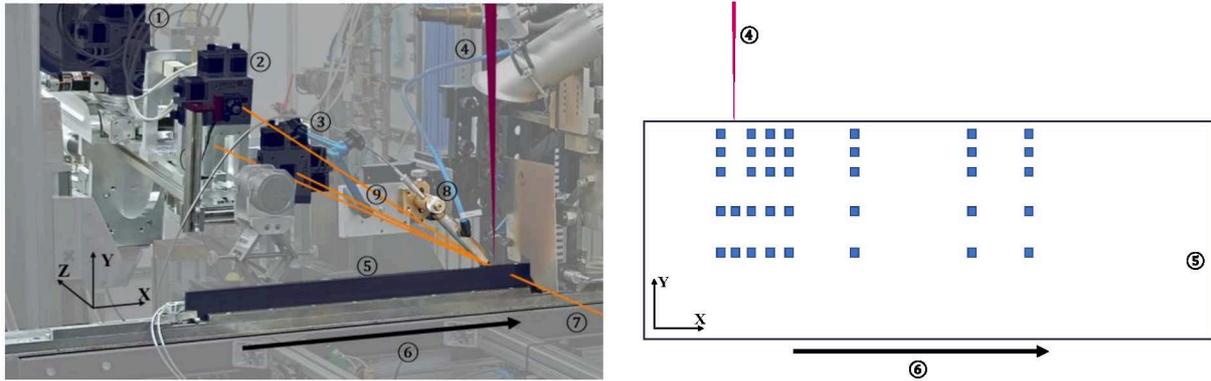
1 Einleitung

Eigenspannungen und Verzug sind wichtige Faktoren, die bei der Anwendung von Schmelzschweißverfahren berücksichtigt werden müssen. Die Bildung von Spannungen im Werkstoff infolge der Erwärmung und Abkühlung durch eine sich bewegende Wärmequelle führt zu einer vorübergehenden Änderung der thermomechanischen Eigenschaften. Eigenspannungen und Verzug sind das Ergebnis von thermischer Schrumpfung, Phasenumwandlungen und zahlreichen anderen Randbedingungen. Die Entstehung von Verzug kann durch ein ausreichend festes Einspannen des geschweißten Bauteils teilweise unterdrückt werden. Die so erzwungene Form führt statt zu Verzug teilweise zu Eigenspannungen. Dies kann im Einsatz die Lebensdauer einer Schweißkonstruktion beeinflussen. Die experimentelle Bestimmung solcher im Bauteil verbleibenden Eigenspannungen ist eine Herausforderung. Da die vorherrschenden Spannungen durch invasive Methoden sofort abgebaut werden, bleiben zur Bestimmung der Eigenspannungen nur die teilinvasiven Methoden wie die Bohrlochmethode [1]. Neben der Bohrlochmethode sind auch röntgendiffraktometrische Ansätze mit Laborröntgenquellen bekannt, Unterschiede und Möglichkeiten der beiden Methoden werden unter anderem in [1] beschrieben. Mit diesen Methoden kann jedoch nur eine Aussage über die Eigenspannungen in unmittelbarer Nähe der Oberfläche getroffen werden. Die ex-Situ Bestimmung von Eigenspannungen mittel Neutronenbeugung ist beispielsweise in [2] beschrieben. Die für die Erfassung hochdynamischer Prozesse wie des Schweißens oft notwendigen in-Situ Neutronenbeugungsversuche sind aus [3,4,5,6] bekannt. Hierbei wurden Dehnungen des Kristallgitters, als Folge einer bewegten lokalen Wärmequelle, bestimmt. Aufgrund der geringen Wechselwirkung der Neutronen mit dem Material kann in der Tiefe von Bauteilen gemessen werden. In bisherigen Experimenten war das Messvolumen mit mindestens 1 cm^2 sehr groß, dies verhindert eine ausreichend hohe räumliche Auflösung der Vorgänge bei der Erstarrung von Schmelzbädern zu erreichen. Auch die notwendige Belichtungszeit von mehreren zehn Sekunden ist zu lang, um die instationären Vorgänge im Material zu erfassen. Dieser Umstand kann durch höhere Flussdichten umgangen werden. Die stärkere

Wechselwirkung der Röntgenstrahlen mit dem Material führt zu einer geringeren Eindringtiefe und damit auch zu einer geringeren Probendicke, die potenziell durchstrahlt werden kann. Erste Versuche mit hochenergetischer Röntgenstrahlung wurden in [7,8,9,10,11] gemacht. Die Nutzung von hochenergetischer Synchrotronstrahlung stellt sich hier als eine gute Möglichkeit dar. Die Verwendung von weniger dichten Konstruktionswerkstoffen wie Aluminium als Schweißsubstrat in Kombination mit Röntgenbeugung ist ebenfalls ein bekannter Ansatz. Die zum Teil bereits beschriebenen Zusammenhänge von Eigenspannungen mit Werkstoff, Werkstoffherstellungsverfahren, Einspannung, Prozessparametern und zahlreichen weiteren Prozessrandbedingungen machen Versuche mit möglichst zielprozessnahen Werkstoff-Prozess-Kombinationen notwendig, daher sind Untersuchungen an Stahlwerkstoffen für das Verständnis notwendig.

2 Materialien und Methoden

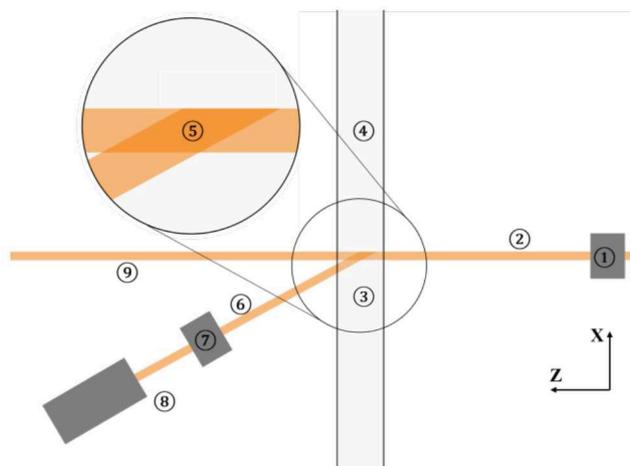
Für die folgenden Untersuchungen wird ein X5CrNi18-10 mit der Werkstoffnummer 1.4307 verwendet. Um den Einfluss der Phasenumwandlung auf die im Werkstoff verbleibenden Spannungen auszuschließen, wird dieser Werkstoff, welcher bei Raumtemperatur vorwiegend in kubisch flächenzentrierter Kristallstruktur vorliegt, gewählt. Die Materialproben mit den Abmessungen $500 \times 50 \times 8 \text{ mm}^3$ werden auf einer Kante geschweißt. Diese Anordnung wird gewählt, da zum einen der einfallende Röntgenstrahl eine geringere Materialdicke durchdringen muss und zum anderen die Eigensteifigkeit der Probe einer Verformung zusätzlich zur Einspannung der Probe entgegenwirkt. Dies ist nicht nur wegen der so eingestellten erhöhten Eigenspannungen im Bauteil wichtig, sondern auch, da das durch das in Abbildung 1 ②, ③ und Abbildung 2 ①, ⑦ dargestellte Blendensystem erzeugte Messvolumen wie in Abbildung 3 räumlich diskret ist und eine Translokation der Probe zu einer Verfälschung des Messergebnisses führt.



① Punktdetektor ②, ③ Blendensystem ④ Laserstrahl ⑤ Werkstoffprobe ⑥ Bewegungsrichtung Werkstoffprobe ⑦ einfallender Röntgenstrahl ⑧ Schutzgaszufuhr ⑨ gebeugter Röntgenstrahl

Abb. 1: Versuchsanordnung und Bewegungsrichtung der Probe und Messpositionen

Die in Abbildung 2 dargestellte quasi-statische Versuchsanordnung ermöglicht die gezielte Auswahl von Messvolumina in den Probenkörpern. Während des Experiments wird nur die Probe bewegt. Der Abstand des Messvolumens zur Wärmequelle, dem laserinduzierten Schmelzbad, bleibt während des Schweißens stets konstant. Die betrachtete Zone des Werkstoffs ist während der Schweißung isotherm. Die gezielte Einstellung des Messvolumens innerhalb der Probe wird durch Blendensysteme Abbildung 2 ①, ⑦ erreicht, die den einfallenden Röntgenstrahl ② auf eine Fläche von $0,1 \text{ mm}^2$ begrenzen. Der gebeugte Röntgenstrahl wird ebenfalls durch eine Blende ⑦ begrenzt, wie in Abbildung 2 dargestellt. Auf diese Weise entsteht eine rautenförmige Messvolumen-Grundfläche ⑤, deren genaue Position und Volumen durch eine vorgehaltete Kalibrierung genau bekannt ist und in Abbildung 3 dargestellt wird.



① Blendensystem ② Röntgenstrahl ③ Beugungszone ④ Grundwerkstoff ⑤ Messvolumengrundfläche ⑥ gebeugter Röntgenstrahl ⑦ Blendensystem ⑧ Punktdetektor ⑨ transmittierter Röntgenstrahl

Abb. 2: Detektoranordnung schematisch und Blendensystem

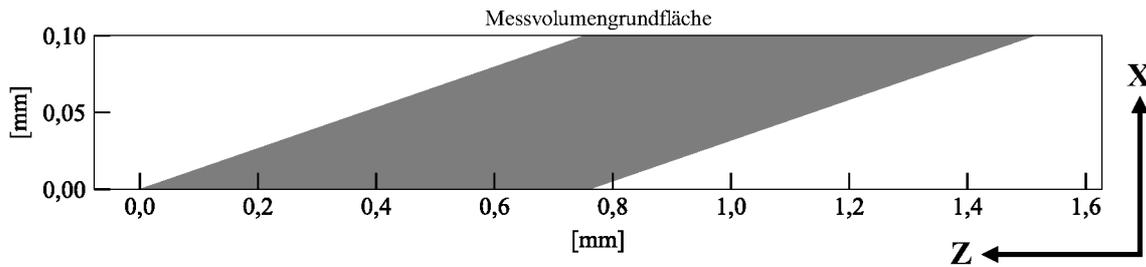


Abb. 3: Messvolumen definiert durch Blendensystem unter Winkel 7.601° bzw. 7.559°

Mit dem gezeigten Aufbau können Dehnungen in X-Richtung und Y-Richtung quantitativ erfasst werden. Da Dehnungen in Blechdickenrichtung (Z-Richtung) durch die Einspannung stark unterdrückt werden und eine zusätzliche Messung in Z-Richtung die Drehung der Proben erfordert, die mit dem gezeigten Aufbau nicht realisierbar ist, werden im Folgenden nur Dehnungen in X- und Y-Richtung betrachtet.

Schweißversuche wurden mit einem Scheibenlaser TruDisk 16002 der Firma TRUMPF mit einer maximal möglichen Leistung von 16 kW durchgeführt. Einer Kugleroptik mit einem Abbildungsverhältnis von 1:3 eines Ellipsoidspiegels und einer 400 μm Faser wurde genutzt, was in einem Fokusbereich von 1200 μm resultiert. Alle Schweißungen wurden ohne Defokus (Oberflächenfokus) durchgeführt.

Die Schweißparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Schweißparameter

Werkstoff	Leistung [kW]	Schweiß- geschwin- digkeit [m/min]	Schutzgas- menge [l/min]	Strahl- pendel- figur	Strahl- pendel- amplitude [mm]	Strahl- pendel- frequenz [Hz]
1.4307	5	0,8	20	Sinus	2	180

Die Schweißparameter wurden auf die Möglichkeiten in der Versuchsumgebung abgestimmt, um die verfügbaren Analysemethoden möglichst effektiv zu nutzen. So wird eine Oszillation von 2 mm verwendet. Auch die Probenausrichtung an einer Längskante ist speziell für die Messung gewählt und entspricht nicht der üblichen Ausrichtung vergleichbarer Schweißversuche.

Die Experimente wurden am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg durchgeführt. Dabei wurde die hochenergetische Wiggler-Beamline P61A des Elektronenbeschleunigers Petra III genutzt. Der an der Beamline verwendete weiße Röntgenstrahl zeichnet sich durch ein breites Energiespektrum aus. Eine weitere Besonderheit

hier, neben dem breiten Wellenlängenbereich ist die enorm hohe Flussdichte, die es ermöglicht, hochdynamische Prozesse wie das hier beschriebene Schweißen aufzunehmen. Die daraus resultierenden kurzen Belichtungszeiten des Detektors ermöglichen es, die Experimente mit ausreichend hoher örtlicher und zeitlicher Auflösung durchzuführen. Die Punktdetektoren der Firma Canberra detektieren Röntgenphotonen mit Energien von 0 keV bis 200 keV.

Für die Auswertung der aufgenommenen Beugungsspektren ist die genaue Kenntnis der Detektorwinkel zur Bestimmung der Dehnung in X- und Y-Richtung notwendig. Mit hochreinen Eisenmetallpulverproben werden in Vorversuchen die in Abbildung 4 gezeigten Spektren aufgenommen. Da in den Pulvern keine Spannungen vorhanden sind und die Gitterparameter und Kristallsysteme bei Raumtemperatur der Kalibrierpulver genau bekannt sind, können aus den Messwerten mit Hilfe einer Spektralanalyse die genauen Detektorwinkel bestimmt werden.

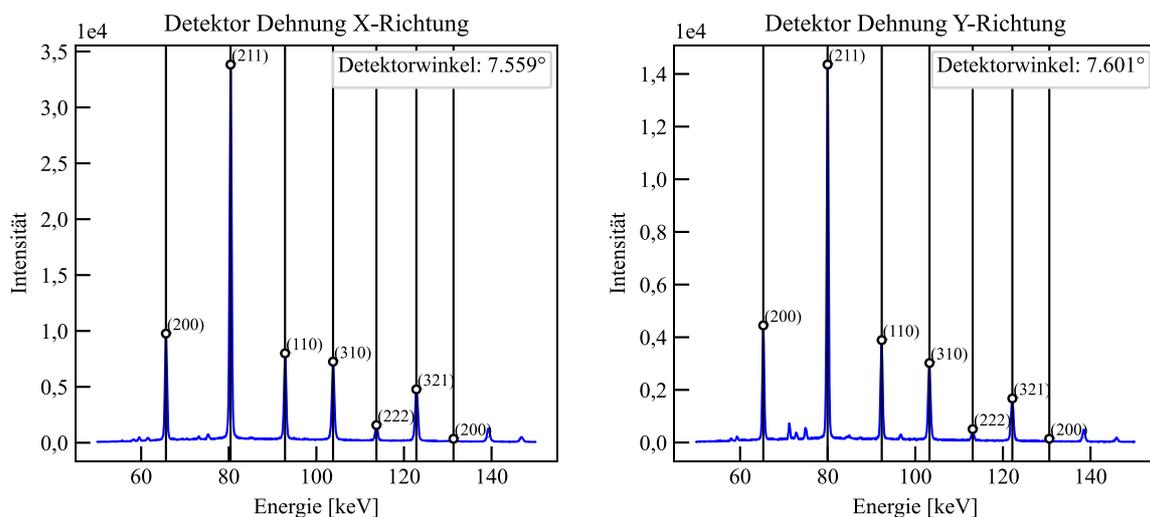


Abb. 4 Detektorwinkelbestimmung mit Hilfe hochreinen Eisenpulvers

Die Berechnung der Energien, bei denen Beugungsmaxima in dem verwendeten kubisch-raumzentrierten Eisenpulver auftreten, lässt sich anhand der folgenden Beziehungen nachvollziehen.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js} \quad (1)$$

$$n\lambda = 2d\sin\Theta \quad n = 1,2,3 \dots \quad (2)$$

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3)$$

$$h + k + l = 2n \quad n = 1,2,3 \dots \quad (4)$$

Die Miller-Indizes (hkl), die zur Beschreibung von Ebenenanordnungen verwendet werden, müssen die in (4) dargestellte Beziehung für einen kubisch-raumzentrierten Kristall wie Eisen erfüllen. Der Ebenenabstand d kann dann aus dem Gitterparameter (286.5 pm) und den Miller-Indizes wie in (3) gezeigt bestimmt werden. Die Ebenenabstände ergeben zusammen mit dem angenommenen Detektorwinkel gemäß (2) die möglichen Wellenlängen, bei denen mit dem Aufbau Beugungsmaxima zu erwarten sind. Die Energie der Röntgenstrahlen ist mit der Wellenlänge verknüpft, wie in (1) erläutert. Wenn der Gitterparameter a und das Kristallsystem bekannt sind, können die in Abbildung 4 gezeigten Spektren mit den jeweiligen Miller-Indizes korreliert und damit der jeweilige Detektorwinkel genau bestimmt werden. Für den Detektor zur Bestimmung von Dehnungen in X-Richtung ergibt sich daraus ein Winkel von $7,559^\circ$. Für den Detektor zur Ermittlung der Dehnungen in Y-Richtung ergibt sich ein Winkel von $7,601^\circ$.

Für jeden der in Abbildung 1 dargestellten Messpunkte wurde ein Schweißversuch durchgeführt. Das Diagramm in Abbildung 5 veranschaulicht das Verfahren zur Bestimmung der lokalen Dehnungen.

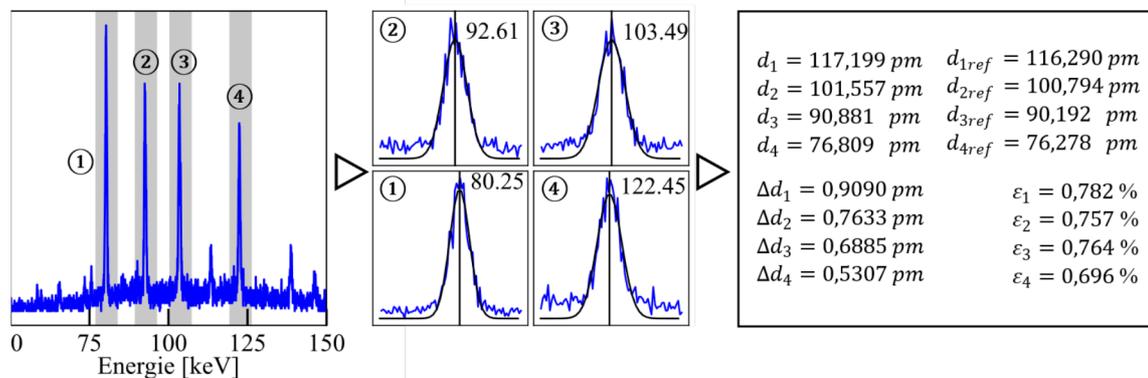


Abb. 5: Dehnungsbestimmung mit Hilfe aufgenommener Spektren

Während jeder Schweißprüfung werden kontinuierlich Spektren mit einer Belichtungszeit von 1 s aufgenommen. Jede Schweißung dauert 38 s. Die ungefähre Lage der Beugungsmaxima ist aus vergleichbaren Überlegungen bekannt, da sie als Grundlage für die Detektorwinkelbestimmung verwendet wurden. Die Positionen der vier hervorgehobenen Beugungsmaxima eines beispielhaft ausgewählten Spektrums, in Abbildung 5 links dargestellt, werden dann in jedem der ersten 38 Spektren jeder Messung genau bestimmt. Um die genaue Position des Maximums zu bestimmen, wird eine Gauß-Glocke an die Daten angepasst und dann die Mitte der Gauß-Kurve als Position des Beu-

gungsmaximums gewählt. Die resultierenden Energien werden mit Hilfe der Beziehungen in (1) bis (4) in Ebenenabstände umgerechnet. Der Vergleich der ermittelten Ebenenabstände d in geschweißten Proben mit denjenigen von ungeschweißten Referenzmessungen d_0 ermöglicht die Berechnung einer Dehnung ε gemäß (5).

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (5)$$

Das in Abbildung 5 dargestellte Verfahren wird für jedes der 38 gemessenen Spektren einer jeden Schweißnaht wiederholt. Die ermittelten Ebenenabstände der einzelnen Beugungsmaxima werden dann gemittelt. Die berechneten Dehnungen der verschiedenen Beugungsmaxima werden dann verglichen und der Median gebildet. Mit dieser Methode wird jeder Messpunkt durch die Positionen von vier verschiedenen Beugungsmaxima bestimmt, die wiederum auf 38 Beugungsspektren während des Schweißens beruhen.

Diese Stützpunkte, die in Abbildung 1 qualitativ dargestellt sind, dienen als Grundlage für eine anschließende Interpolation und Schätzung des Dehnungszustands im Inneren der Schweißprobe.

3 Resultate und Diskussion

Das mittels energiedispersiver Röntgenbeugung bestimmte Dehnungsprofil für Dehnungen in X-Richtung für den Werkstoff 1.4307 ist in Abbildung 6 oben dargestellt.

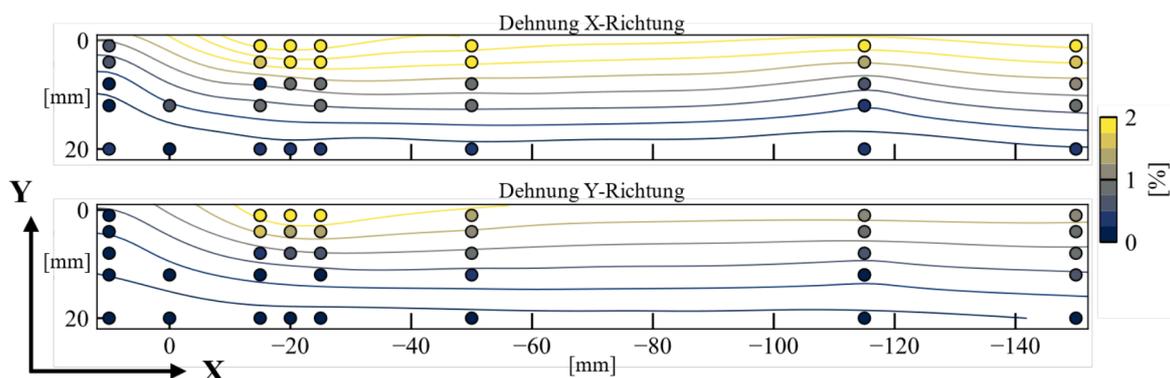


Abb. 6 Dehnungsprofil in Werkstoff 1.4307 in Folge von Umschmelzen mit 5 kW Laserleistung, Oben: Dehnungsprofil in X-Richtung, Unten: Dehnungsprofil in Y-Richtung, farblich dargestellt die lokale Dehnung als Resultat des Beugungsexperiments durch Interpolation vollflächig erweitert, Wärmequelle auf Position (0,0)

Die gemessenen Stützstellen aus Abbildung 1 rechts sind wiederzufinden. Die Farbkoordination der Punkte repräsentiert die mittels Beugung bestimmte Dehnung. Die Aus-

wertung ergibt für jeden Detektor eine Dehnung. Die Dehnung des Materials in horizontaler Probenrichtung oder X-Richtung ist in der oberen Hälfte von Abbildung 6 dargestellt. Die vertikale Dehnung oder Y-Richtung ist in Abbildung 6 unten dargestellt.

Der Laser trifft an der Position (0,0) auf das Material auf und führt zu einer maximalen Dehnung von 2,92 % in X-Richtung etwa 20 mm nach der Wärmequelle und 2,25 % an derselben Position in Y-Richtung. Die Dehnungen nehmen weiter von der Wärmequelle entfernt auf 1,85 % und 1,01 % ab. Bei den gewählten Parametern der Wärmequelle ist in einer Tiefe von 15 mm unterhalb der Wärmequelle kein Unterschied des Dehnungszustands zu Referenzmessungen erkennbar.

In Abbildung 7 sind die Dehnungen in X- und Y-Richtung mit Hilfe der von Mises Vergleichsdehnung überlagert. Die Dehnungsanteile in vertikaler und horizontaler Richtung sind durch Verzerrung der Positionsmarker dargestellt. Zwecks Darstellung entspricht die dargestellte Verzerrung nicht maßstabgetreu den Dehnungsanteilen. Die genaue Vergleichsdehnung ist farblich dargestellt.

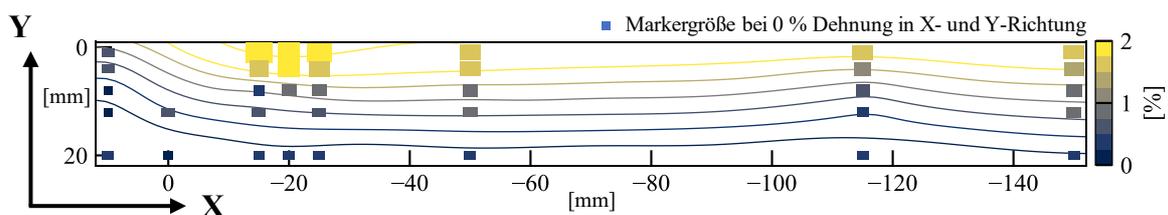


Abb. 7 Vergleichsdehnung, Darstellung von horizontal und vertikal Dehnung mit Hilfe verzerrter Quadrate welche den Dehnungszustand darstellen, Überlagerung der Ergebnisse aus Abbildung 7, Wärmequelle auf Position (0,0)

Die Darstellung der Dehnungsanteile in Form verzerrter Quadrate macht deutlich, dass, ein vorlaufendes horizontales Dehnungsfeld, von einem nachlaufenden wesentlich stärkeren Dehnungsfeld überlagert wird, welches durch Abkühlung zwar reduziert wird aber im Rahmen der Messdauer im Werkstoff verbleibt.

Basierend auf den gezeigten Messungen soll in weiteren Arbeiten die z.B. mittels digitaler Bildkorrelation ermittelte Oberflächendehnung mit der im Bauteilinneren ermittelten verglichen werden und somit auch in Kombination mit der numerischen Dehnungsabschätzung als Grundlage für ein tieferes Verständnis des Eigenspannungsaufbaus und Verzugs dienen.

5 Zusammenfassung

Der Werkstoff wurde mit einem quasistationären Versuchsaufbau und breitbandiger Synchrotronstrahlung hoher Flussdichte auf die Entwicklung von Eigenspannungen

beim Schweißen untersucht. Die Methode basiert auf der Auswertung mehrerer Beugungsmaxima und deren Vergleich mit Untersuchungen an nicht umgeschmolzenen Referenzmessungen desselben Materials. Trotz der Wahl diskreter Messpunkte und der anschließenden Interpolation zeigen die Messungen einen kontinuierlichen Dehnungs- und Spannungsverlauf. Auf der Grundlage der gezeigten Ergebnisse kann die Berechnung des Elastizitätsmoduls bei höheren Temperaturen eine interessante Anwendung der Ergebnisse sein, zusätzlich zur Kalibrierung numerischer Berechnungen der Entwicklung von Eigenspannungen.

6 Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB1120-236616214 „Bauteilpräzision durch Beherrschung von Schmelze und Erstarrung in Produktionsprozessen“ am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen durchgeführt und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG) gefördert. Für die Förderung und Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt.

Wir danken DESY (Hamburg, Deutschland), einem Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft HGF, für die Bereitstellung der experimentellen Einrichtungen. Teile dieser Forschung wurden an PETRA III durchgeführt, und wir möchten allen Mitarbeitern für die Unterstützung bei der Nutzung der Beamline P61A danken. Die Messzeit wurde für den Antrag I-20210328 bereitgestellt.

Literatur

- [1] Bobzin, K.; Wietheger, W.; Knoch, M. A.; Schacht, A.; Reisgen, U.; Sharma, R.; Oster, L. (2020): Comparison of Residual Stress Measurements Conducted by X-ray Stress Analysis and Incremental Hole Drilling Method. In: J Therm Spray Tech 29 (6), S. 1218–1228. DOI: 10.1007/s11666-020-01056-z.
- [2] Ohms, C.; Youtsos, A. G. (2004): Neutron Diffraction Assisted Residual Stress Analysis in Welded Structures. In: Emmanuel E. Gdoutos (Hg.): Recent Advances in Experimental Mechanics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, S. 515–526. DOI: 10.1007/0-306-48410-2_49
- [3] Reisgen, Uwe; Geffers, Christoph; Sharma, Rahul; Heydt, Jana von der (2013): In Situ Measurement of Thermal Strain during Fusion Welding. In: MSF 768-769, S. 644–651. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.644.
- [4] Sharma, R.; Hofmann, M.; Reisgen, U. (2022): Investigation on the feasibility of strain measurement by in situ neutron diffraction in the area of the weld pool during welding. In: Forces in Mechanics 9, S. 100139. DOI: 10.1016/j.fin-mec.2022.100139.

- [5] Sharma, Rahul; Reisgen, Uwe; Stein, L.; Husemann, Jana; Hofmann, Michael (Georgenfeld, 16.-18.Sept.2010): Möglichkeiten der Eigenspannungsmessung mittels Neutronendiffraktometrie. In: DVS Media 2010 (DVS-Berichte Band 270), S. 42–47, zuletzt geprüft am 19.12.2022.
- [6] Sharma, R.; Reisgen, U.; Aretov, I.; Hofmann, M. (Nürnberg am 27. und 2010): Eigenspannungsmessung während des Schweißens durch Neutronendiffraktometrie. In: DVS Media 2010 (DVS-Berichte Band 267), S. 118–121. Online verfügbar unter <https://www.isf.rwth-aachen.de/go/id/jdjp/lidx/1/file/90473>, zuletzt geprüft am 19.12.2022.
- [7] Kannengiesser, T.; Kromm, A.; Rethmeier, M.; Gibmeier, J. (2008): S141 Residual Stresses and In-Situ Measurement of Phase Transformation in Low Transformation Temperature (LTT) Welding Materials. In: Powder Diffr. 23 (2), S. 188. DOI: 10.1154/1.2951824.
- [8] Gibmeier, J.; Held, E.; Altenkirch, J.; Kromm, A.; Kannengiesser, Th.; Buslaps, Th. (2014): Real time monitoring of phase transformation and strain evolution in LTT weld filler material using EDXRD. In: Journal of Materials Processing Technology 214 (11), S. 2739–2747. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.008.
- [9] Elmer, J. W.; Palmer, T. A.; Wong, Joe (2003): In situ observations of phase transitions in Ti–6Al–4V alloy welds using spatially resolved x-ray diffraction. In: Journal of Applied Physics 93 (4), S. 1941–1947. DOI: 10.1063/1.1537464.
- [10] Steuwer, A.; Santisteban, J. R.; Turski, M.; Withers, P. J.; Buslaps, T. (2004): High-resolution strain mapping in bulk samples using full-profile analysis of energy-dispersive synchrotron X-ray diffraction data. In: J Appl Crystallogr 37 (6), S. 883–889. DOI: 10.1107/S0021889804023349.
- [11] Yonemura, Mitsuharu; Osuki, Takahiro; Terasaki, Hidenori; Komizo, Yuichi; Sato, Masugu; Kitano, Akiko (2006): In-Situ Observation for Weld Solidification in Stainless Steels Using Time-Resolved X-ray Diffraction. In: Mater. Trans. 47 (2), S. 310–316. DOI: 10.2320/matertrans.47.310.

Autorenanschriften

Dr.-Ing., Universitätsprofessor Uwe Reisgen

Konrad Mäde M. Sc.

Fatma Akyel M. Sc.

Rahul Sharma M. Sc.

Dr.-Ing. Simon Olschok

Maximilian Gamerdinger M. Sc.

Timm Evers M. Sc.

RWTH Aachen University

Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik

Pontstraße 49

52066 Aachen

Telefon: +49 241 80 93870

Fax: +49 241 80 92170

E-Mail: office@isf.rwth-aachen.de

Dr. Guilherme Abreu Faria

Dr. Gleb Dovzhenko

Helmholtz-Zentrum Hereon

Hereon-Außenstelle am DESY in Hamburg

Notkestraße 85

22607 Hamburg

Telefon: +49 40 8998-5323

E-Mail: guilherme.abreu@hereon.de