

Laserstrahlschweißen von Gusseisen mit induktiver Temperaturführung sowie oszillierender Strahlführung

Niklas Sommer, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff) der Universität Kassel
n.sommer@uni-kassel.de

Christian Wolf, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff) der Universität Kassel
c.wolf@uni-kassel.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm

Leiter des Fachgebiets für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff) der Universität Kassel
s.boehm@uni-kassel.de

Stichwörter

Laserstrahlschweißen, Gusseisen mit Kugelgraphit, Induktionserwärmung, Scannerschweißen, oszillierende Strahlführung

Das Laserstrahlschweißen von Gusseisen mit Kugelgraphit ohne artfremden Zusatzwerkstoff stellt aufgrund der Rissbildung und Aufhärtung des Schweißguts eine Herausforderung dar. Die vorliegende Untersuchung nutzt die Ansätze einer prozessintegrierten induktiven Erwärmung sowie oszillierender Strahlführung, um den Temperaturzyklus sowie die mikrostrukturelle Entwicklung während des Schweißens gezielt zu beeinflussen. Hierzu werden das vorwiegend ferritische EN-GJS-400-15 sowie das vorwiegend perlitische EN-GJS-700-2 mittels Festbrennweiten- und Scanneroptik in artgleichem Stumpfstoß miteinander verschweißt. Um den Einfluss induktiver Erwärmung sowie oszillierender Strahlführung ermitteln zu können, werden zerstörungsfreie Farbeindringprüfungen genutzt. Weiterhin wird die Entwicklung des Schweißnahtgefüges mittels geätzter Mikroschliffe sowie Härtemessungen bewertet. Ferner wird der Einfluss der identifizierten Risse auf die mechanische Festigkeit der Schweißverbindung über eine kombinierte Untersuchung mittels Computertomographen und Zugversuch erforscht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Nutzung von prozessintegrierter induktiver Erwärmung zu einer substantiellen Reduktion der Rissdichte sowie mittleren Schweißnaht Härte führt. Weiterhin kann die Morphologie des Schweißnahtgefüges über eine Variation der Strahloszillationsparameter gezielt beeinflusst werden, sodass eine abermalige Reduktion der Rissdichte und Schweißnaht Härte mit dieser einhergeht. Für das Versagen der Verbindung ursächlich erscheinen neben den Querrissen auch oberflächennahe Poren, die infolge des teilweisen Verdampfens von Kohlenstoff in der erstarrten Schmelze zurückbleiben.

1 Einleitung

Im Licht zunehmender Bestrebungen zur Eindämmung des Klimawandels bedarf es neuer Ansätze, um die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren und die Energieeffizienz zu erhöhen. Dies trifft auch auf industrielle Anwendungsfälle zu, bei denen derartige Bestrebungen typischerweise durch den

Einsatz von Bauteilen bzw. Baugruppen mit vermindertem Gewicht erreicht werden. In diesem Zusammenhang hat die Nutzung von Gusseisen als Substituent von Stahl in den vergangenen Jahren zugenommen, da es dem Stahl ähnliche Eigenschaften wie eine hohe Zugfestigkeit und Duktilität aufweist. Darüber hinaus zeichnet sich Gusseisen mit Kugelgraphit durch seine Rezyklier- und exzellente Spanbarkeit aus, während die Dichte mit rund $7,2 \text{ g cm}^{-3}$ unter jener gängiger Stahlsorten liegt [1, 2]. Aufgrund dessen wird Gusseisen in überwiegendem Maße für den Straßenfahrzeugbau und in der Automobilindustrie eingesetzt, wo es für Kurbelwellen, Differentialgetriebe und Gehäuse genutzt wird [3, 4]. Der zunehmenden Nutzung des Werkstoffsystems steht seine schlechte Schweißbeignung gegenüber, welche in der Formierung von aufhärtenden und versprödenden Phasen wie Martensit und Ledeburit durch die prozessimmanenten thermischen Randbedingungen des Schweißens sowie den hohen Kohlenstoffgehalt des Materials begründet liegt [5, 6]. Diese Effekte werden bei Strahlschweißprozessen, welche durch hohe Erstarrungs- und Abkühlgeschwindigkeiten gekennzeichnet sind, verstärkt [7]. Infolge der entstehenden Schrumpf- und Eigenspannungen, die durch das geringe Verformungsvermögen der spröden Phasen nicht abgebaut werden können, entwickeln sich Kaltrisse im Schweißgut [8]. Gängige Ansätze zur Vermeidung dieser Problematik umfassen das Schweißen mit artähnlichem oder artfremdem Zusatzwerkstoff [9, 10]. Die Nutzung des Zusatzwerkstoffs ist jedoch fertigungstechnisch mit erhöhten Kosten assoziiert und bietet somit die Möglichkeit, signifikante Einsparungspotentiale zu realisieren. Um die identifizierten Potentiale nutzbar zu machen, wird in der vorliegenden Untersuchung das Laser-Induktionsschweißen [11, 12] mit oszillierender Strahlführung als Verfahrensansatz präsentiert. Zur eingehenden Analyse des Verfahrensansatzes werden dabei die mikrostrukturelle Entwicklung in Schweißnaht und Wärmeeinflusszone sowie die entstehenden mechanisch-technologischen Eigenschaften betrachtet.

2 Stand der Technik

Basierend auf der schlechten Schweißbeignung gibt DIN EN 1011-8 [13] Empfehlungen zum Schweißen von Gusseisen, wobei neben dem Schweißen mit artfremdem Zusatzwerkstoff auch die Nutzung von artgleichem oder artähnlichem Zusatzwerkstoffs benannt werden. In diesem Zusammenhang ist jedoch anzumerken, dass für den letztgenannten Fall ein Vorwärmen des Werkstücks auf 250 °C bis 700 °C bei langsamer Abkühlung nach dem Schweißen ratsam ist. Derartige Ansätze sind in der wissenschaftlichen Fachliteratur von zahlreichen Forschergruppen für konventionelle Schweißverfahren untersucht worden und legen dar, dass das Schmelzschweißen von Gusseisen ohne die Bildung von Rissen oder eine ausgeprägte Aufhärtung nur durch starkes Vorwärmen, die Nutzung von artfremdem Schweißzusatzwerkstoff oder eine Wärmenachbehandlung möglich ist [14–16]. Im Hinblick auf das Strahlschweißen werden in DIN EN 1011-6 [17] sowohl das Laserstrahlschweißen als auch in DIN EN 1011-7 [18] das Elektronenstrahlschweißen als ungeeignet für das Schweißen von Gusseisen deklariert. Eine mögliche Ausnahme bildeten laut beiden Normen das Gusseisen mit Kugelgraphit, wobei weitere Hinweise jedoch ausbleiben. In wissenschaftlichen Publikationen untersuchen Rührich et al. [19] den Einfluss einer prozessintegrierten Wärmebehandlung mittels Elektronenstrahl beim Elektronenstrahlschweißen von Guss-Guss-Verbindungen. Sie können derart demonstrieren, dass sowohl die Rissdichte als auch die Porenbildung und Aufhärtung mit Erwärmungsstrategien verbessert werden können [19–21]. Im Bereich des Laserstrahlschweißens wurden vornehmlich Untersuchungen zur Werkstoffkombination Stahl-Gusseisen vorgenommen [22–24]. Hierbei berichten Bünting und Franke [22] von einer gezielten Einstellung der Durchmischung beim Laserstrahlschweißen von Gusseisen und Einsatzstahl durch aktive Kontrolle des Strahlversatzes relativ zum Fügestoß sowie, subsequent, von einer Reduktion der Spritzerbildung. Dementgegen berichten Yu et al. [10] beim Schweißen von Stahl-Gusseisen-Mischverbindungen mittels CO_2 -Laser unter Einsatz von nickelhaltigem Zusatzwerkstoff von der Entstehung von Rissen. Um die Bildung versprödender Phasen zu hemmen nutzen Saffer et al. [24] einen Laser für die integrierte Wärmebehandlung beim Laserstrahlschweißen von Gusseisen-Mischverbindungen. Sie können die Aufhärtung derart auf bis 600 HV mindern [24]. Die Zahl der

Publikationen verdeutlicht das ungebrochene Interesse an der Nutzung von Strahlschweißprozessen für das Fügen von Gusseisen. Es muss jedoch gleichsam konstatiert werden, dass bisweilen vornehmlich Mischverbindungen und nicht Guss-Guss-Verbindungen untersucht worden sind. Ferner beschäftigen sich Ansätze zur Verbesserung der Schweißbarkeit hauptsächlich mit der Nutzung von Zusatzwerkstoff. An dieser Stelle setzt die vorliegende Untersuchung an, die eine umfangreiche Untersuchung zum für Gusseisen entwickelten Laser-Induktionsschweißen [11] darstellt. Der beschriebene Ansatz wird dabei durch die Nutzung von Strahloszillation erweitert, sodass eine direkte Beeinflussung der Schmelzbaddynamik realisiert wird.

3 Versuchsmaterialien und Versuchsdurchführung

3.1 Versuchsmaterialien

Als Versuchsmaterialien kamen das vorwiegend ferritische Gusseisen der Güte EN-GJS-400-15 sowie das vorwiegend perlitische Gusseisen der Güte EN-GJS-700-2 in Blechen der Maße $300 \times 100 \times 5 \text{ mm}^3$ zum Einsatz, deren chemische Zusammensetzung Tabelle 1 entnommen werden kann. Die Schweißversuche wurden als Stumpfstoß mit einer I-Naht durchgeführt.

3.2 Anlagentechnik und Prozessentwicklung

Zum Laserstrahlschweißen wurde ein Faserlasersystem (IPG YLS-10000-S4, IPG Laser GmbH, Burbach; $\lambda = 1070 \text{ nm}$) mit unterschiedlichen Bearbeitungsoptiken und einer Maximalleistung von 10 kW genutzt. Die Vorschubbewegung wurde über einen 4-Achs-Portalrobotersystem (Reis GmbH & Co. KG, Obernburg) realisiert. Die Entwicklung des kombinierten Induktions- und Schweißprozesses fand zunächst mittels einer Festbrennweitenoptik (MWO44, Reis Lasertec GmbH, Würselen) statt, bevor die Ergebnisse auf eine Bearbeitungsoptik mit oszillierender Strahlführung (ILV DCY-Scanner, ILV GmbH, Schwalbach am Taunus) übertragen wurden. Hierbei wurden sowohl Strahloszillation in Vorschubrichtung als auch orthogonal zur Vorschubrichtung untersucht. Durch das gleichbleibende Abbildungsverhältnis der beiden Optiken konnte stets ein Strahldurchmesser von $400 \mu\text{m}$ auf der Werkstückoberfläche realisiert werden. Die Schweißgeschwindigkeit betrug unabhängig von der genutzten Optik jeweils $2,5 \text{ m min}^{-1}$, wobei die Laserleistung im Falle der Festbrennweitenoptik zu 6000 W festgesetzt wurde. Um eine erfolgreiche Durchschweißung der Blechdicke auch bei Nutzung der Strahloszillation realisieren zu können, musste die Laserleistung auf 9000 W erhöht werden. Um eine Oxidation der Nahtoberseite zu verhindern, wurde der Prozesszone ferner ein Schutzgasstrom aus Argon (Reinheitsgrad 4.6) zugeführt.

Die prozessintegrierte, induktive Erwärmung wurde mittels eines wassergekühlten Mittelfrequenz-Induktionssystems (EW100, IFF GmbH, Ismaning) mit einer Maximalleistung von 10 kW realisiert. Die Kontrolle des Induktionssystems erfolgt dabei über die Steuerung des Robotersystems, sodass die Erwärmung der Bleche in exakter zeitlicher Sequenz zum Schweißprozess durchgeführt werden konnte. Das Induktionssystem war mit zwei Koaxialinduktoren (IT-0079, IFF GmbH, Ismaning) gekoppelt, welche sich in einer dem Laserstrahl vor- und nachlaufenden Anordnung befanden und parallel eingeschaltet werden konnten. Während der Versuche wurde das Induktionssystem mit einer Induktionsfrequenz von 12,5 kHz und einer Pulsweitenmodulation von 525 % betrieben, sodass eine Leistung von 7,8 kW ausgekoppelt werden konnte. Im Rahmen der Prozessentwicklung wurden unterschiedliche Erwärmungsstrategien entwickelt, welche sich aus einer diskreten Zahl von Heizfahrten zusammensetzten:

- a) keine Heizfahrt, beim Schweißprozess mitlaufende Induktoren
- b) eine Heizfahrt, beim Schweißprozess mitlaufende Induktoren
- c) zwei Heizfahrten, beim Schweißprozess mitlaufende Induktoren

Eine Heizfahrt bezeichnete in diesem Zusammenhang das zweimalige, vollständige Überfahren der Blechgeometrie mit den beiden Induktoren. Mittels der unterschiedlichen Erwärmungsstrategien konn-

te gezeigt werden, dass die Nutzung von zwei Heizfahrten eine substantielle Minderung der Rissdichte zur Folge hatte, wie Abbildung 1 verdeutlicht. Folglich wurde die Erwärmungsstrategie mit zwei Heizfahrten für die nachfolgenden Versuche mittels oszillierender Strahlführung eingesetzt.

3.3 Auswertungsverfahren

Nach dem Schweißvorgang wurden die Proben einer zerstörungsfreien Farbeindringprüfung nach DIN EN ISO 3452-1 [25] unterzogen, um die Rissdichte zu ermitteln. Zur Beurteilung der mikrostrukturellen Entwicklung der Schweißnähte wurden Querschliffe herangezogen, welche mittels eines Nasstrennschleifers aus den Schweißnähten herausgearbeitet wurden. Diese wurden dann geschliffen, poliert und mit alkoholischer Salpetersäure (97 % Ethanol, 3 % Salpetersäure) geätzt, um das Gefüge zu entwickeln. Die Untersuchung des Gefüges erfolgte an einem Lichtmikroskop (Leica DM2700, Leica Microsystems GmbH, Wetzlar).

Zur Beurteilung der mechanisch-technologischen Güterwerte der Schweißnähte wurden Härteprüfungen nach DIN EN ISO 6507-1 [26] an einem automatisierten Härteprüfgerät (KB30, KB Prüftechnik GmbH, Hochdorf-Assenheim) mit dem Prüfstandard HV0.1 durchgeführt. Weiterhin erfolgte die Herausarbeitung von Zugproben nach DIN 50125 [27], welche in Anlehnung an DIN EN ISO 6892-1 an einer Universal-Prüfmaschine (Z100, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm) mit kontaktlosem Videoextensometer getestet wurden. Zuvor erfolgte bei ausgewählten Proben eine *pre-mortem* Durchstrahlungsprüfung mittels Mikro-Computertomograph (Zeiss X Radia Versa 520, Carl Zeiss X-Ray Microscopy Inc., Pleasanton, USA).

4 Einfluss der Strahloszillation auf die Rissbildung, mikrostrukturelle Entwicklung und Schweißnaht Härte

Zunächst wurde der Einfluss einer Variation von Scanbreite und Scanfrequenz sowie der Scanrichtung auf die erzielbare Rissdichte bei beiden Werkstoffsystemen untersucht. Der zugrundeliegende, vollfaktorische Versuchsplan kann Tabelle 2 entnommen werden. Die Ergebnisse der Rissprüfung, welche in Abbildung 2 dargelegt sind, demonstrieren den positiven Einfluss einer Verringerung der Scanfrequenz sowie einer Erhöhung der Scanbreite, wenn eine Strahloszillation quer zur Vorschubrichtung zum Einsatz kommt. Dieser Effekt ist unabhängig voneinander in beiden Werkstoffsystemen zu identifizieren und lässt sich auf die verbesserte Wärmeeinwirkung des oszillierenden Laserstrahls zurückführen, welcher bei einer größeren Scanbreite einen breiteren Bereich der Naht aufschmilzt und somit erwärmt. Gleichsam erhöht eine geringe Scanfrequenz die Verweilzeit des Laserstrahls auf dem Schweißnahtvolumen und sorgt derart für eine verbesserte Wärmeeinbringung in die Naht und umgebende Wärmeeinflusszone. Aufgrund dessen wurde die Parameterkombination aus einer Scanfrequenz von 200 Hz sowie einer Scanbreite von 0,5 mm für die weitere Auswertung herangezogen. Dementgegen konnte bei der Strahloszillation längs zur Vorschubrichtung ein Parametersatz untersucht werden, da es infolge der Scanrichtung zu einer verstärkten Ablösung von Schweißspritzern in Richtung der Induktoren sowie einer Beschädigung derer kam. Es konnten bei diesen Versuchen jedoch vergleichbare Rissdichten erzielt werden, sodass auch die Proben der Versuche mit der Strahloszillation in Vorschubrichtung weiteren Untersuchungen zugeführt wurden. Abbildung 3 verdeutlicht in diesem Zusammenhang, dass unter Nutzung der oszillierenden Strahlführung sowie der inhärenten Wärmeführung derer eine abermalige Reduktion der Rissdichte im Vergleich zur Festbrennweitenoptik möglich war.

Im Hinblick auf die Entwicklung der Schweißnahtgeometrie zeigt Abbildung 4 für beide Werkstoffsysteme, dass die Nutzung von Strahloszillation quer zur Vorschubrichtung eine Verbreiterung der Schweißnaht zur Folge hat. Vor dem Hintergrund der limitierten Akkomodation von Schrumpfspannungen in schmalen Schweißnähten, welche aus hohen Vorschubgeschwindigkeiten resultieren [8], kann dies bei gleichbleibender Vorschubgeschwindigkeit als positiver Beitrag zur Reduktion von Schrumpfspannungen und – damit einhergehend – Verminderung der Rissdichte gesehen werden.

Auch das Schweißnahtgefüge weist in Abhängigkeit der Scanrichtung Unterschiede bei der Morphologie auf, wie Abbildung 5 unterstreicht. Der Ledeburit, der vorrangig im Schweißnahtgefüge zu finden ist, sowie der feine Martensit, welcher sich um residuale Kugelgraphitausscheidungen ansammelt, entstehen infolge der hohen Erstarrungs- und Abkühlgeschwindigkeiten beim Laserstrahlschweißprozess und können auch unter Zuhilfenahme von induktiver Erwärmung nicht verhindert werden. Es ist jedoch zu beobachten, dass die Strahloszillation quer zur Vorschubrichtung für beide untersuchten Werkstoffsysteme eine Vergrößerung der Ledeburit-Strukturen zur Folge hat. Der Ledeburit jener Proben, welche mit Strahloszillation in Vorschubrichtung geschweißt wurden, zeigt sich deutlich feiner. Dies kann auf die verstärkte Wärmeeinwirkung der Strahloszillation quer zur Vorschubrichtung auf das Schweißnahtgefüge zurückgeführt werden.

Die Beobachtungen der mikrostrukturellen Entwicklungen können durch die Härteverläufe quer zur Schweißnaht bestätigt werden, welche in Abbildung 6 dargelegt sind. Sowohl bei EN-GJS-400-15 als auch bei EN-GJS-700-2 resultiert die Strahloszillation quer zur Vorschubrichtung in einer verminderten mittleren Schweißnaht Härte gegenüber der Strahloszillation in Vorschubrichtung. Dies kann auf die mithin höhere Härte des feinkörnigeren Gefüges zurückgeführt werden und ist in Kongruenz zu den Erkenntnissen von Rührich [21] zu sehen. Jedwede Schweißnaht Härte, die mittels Laser-Induktionsschweißen und oszillierender Strahlführung innerhalb der vorliegenden Ausarbeitung erreicht werden konnte, liegt deutlich unter jenen einer Schweißung ohne induktive Erwärmung und artfremdem Zusatzwerkstoff [8].

5 Computertomographische Untersuchung und Zugprüfung

Um exakte Informationen über die räumliche Ausbreitung der zuvor identifizierten Risse erlangen zu können, wurden *pre-mortem* Untersuchungen mittels Mikro-Computertomographen durchgeführt. Wie Abbildung 7 zeigt, durchdringen sowohl bei Strahloszillation quer zur Vorschubrichtung als auch bei Strahloszillation in Vorschubrichtung die Risse das Schweißnahtvolumen vollständig. Dies ist weiterhin unabhängig vom Werkstoff zu beobachten. Ferner werden die Risse an oberflächennahen Poren initiiert und verlaufen von dort durch die gesamte Schweißnahtbreite bzw. -höhe. Offenkundig führt der fokussierte und gerichtete Energieeintrag des Laserstrahls wie beim Elektronenstrahl [21] zur teilweisen Überführung von Kohlenstoff in die gasförmige Phase, welcher im Verlauf des Schweißprozesses nicht vollständig aus der Schmelze ausdampfen kann und als oberflächennahe Pore zurückbleibt. Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften der Fügeverbindung lässt sich festhalten, dass die Festigkeitswerte des Grundwerkstoffes für beide Werkstoffsysteme und Oszillationsrichtung nicht erreicht werden können (siehe Abbildung 8). Da die Verbindung stets innerhalb der Schweißnaht versagt und die aufgezeichneten Kurven werkstoffunabhängig ähnliche Kenngrößen aufweisen, ist zu konstatieren, dass hier die mechanische Güte des Schweißnahtgefüges mit den zuvor identifizierten Imperfektionen aufgezeichnet wird. Erwartungsgemäß wird das Versagen der Schweißverbindung durch die zuvor identifizierten Poren und Risse initiiert.

6 Fazit

Die vorliegende Untersuchung demonstriert die Möglichkeiten der Nutzung des Laser-Induktionsschweißens mit oszillierender Strahlführung für Gusseisenwerkstoff mit Kugelgraphit. Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass die Nutzung der Induktionstechnik eine substantielle Reduktion der Rissdichte zur Folge hat und die Schweißnaht Härte drastisch gegenüber typischen Schweißungen aus Gusseisen mit Kugelgraphit ohne Zusatzwerkstoff abnimmt. Durch die Nutzung von Strahloszillation konnte die Morphologie des Ledeburits in der Schweißnaht gezielt beeinflusst werden. Die Nutzung von Strahloszillation quer zur Vorschubrichtung führte so zu einer deutlichen Vergrößerung des Gefüges, welches sich in einer verminderten Schweißnaht Härten äußerte. Bemerkenswert erscheint weiterhin die Rolle der Poren, die sich infolge der partiellen Sublimation von Kohlenstoff auf der Nahtoberseite bilden und dort als Initiierungspunkte für die mittels Farbeindringprüfung identifizierten Querrisse dienen. Da auch die Nutzung von Strahloszillation offenkundig nicht zu einem vollständigen Entga-

sen der Schmelze führt, bedarf es weiterer Forschungsansätze, um die Bildung derartiger Poren bei hochenergetischen Verfahren wie dem Laserstrahlschweißen zu unterbinden. Hier erscheinen beispielsweise Doppelfokus-Techniken [28] sowie die gezielte Anpassung des Schutz-/Prozessgasgemischs zielführend.

Förderhinweis und Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nummer 20.070 N/DVS-Nummer 06.112 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Für die Förderung sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Darüber hinaus gilt der Dank den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses für die hervorragende Unterstützung und angenehme Zusammenarbeit.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Berns und W. Theisen, *Eisenwerkstoffe: Stahl und Gusseisen*, 4. Aufl. s.l.: Springer-Verlag, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=367332>
- [2] S. Hasse, *Gefüge der Gusseisenlegierungen: Structure of cast iron alloys*. Berlin: Schiele & Schön, 2008.
- [3] J. R. Keough und K. L. Hayrynen, „Automotive Applications of Austempered Ductile Iron (ADI): A Critical Review“ in *SAE 2000 World Congress*, 2000, doi: 10.4271/2000-01-0764.
- [4] N.N., *Straßenfahrzeugbau*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bdguss.de/einsatzgebiete-maerkte/strassenfahrzeugbau/> (Zugriff am: 20. April 2021).
- [5] U. Dilthey, *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [6] G. Schulze, *Die Metallurgie des Schweißens: Eisenwerkstoffe - nichteisenmetallische Werkstoffe*, 4. Aufl. Heidelberg, New York: Springer, 2010. [Online]. Verfügbar unter: <http://search.ebs-cohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=341026>
- [7] U. Dilthey, *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: Schweiß- und Schneidtechnologien*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [8] N. Sommer, J. M. Lehto, S. Völkers und S. Böhm, „Laser Welding of Grey Cast Iron with Spheroidal Graphite-Influence of Process Parameters on Crack Formation and Hardness“, *Metals*, Jg. 11, Nr. 4, S. 532, 2021, doi: 10.3390/met11040532.
- [9] M. Pascual, J. Cembrero, F. Salas und M. P. Martínez, „Analysis of the weldability of ductile iron“, *Materials Letters*, Jg. 62, 8-9, S. 1359–1362, 2008, doi: 10.1016/j.matlet.2007.08.070.
- [10] J. Yu, T. Jung, S. Kim und S. Rhee, „Laser welding of cast iron and carburized steel for differential gear“, *J Mech Sci Technol*, Jg. 25, Nr. 11, S. 2887–2893, 2011, doi: 10.1007/s12206-011-0809-x.

- [11] M. Vollmer, G. Mienert, M. Fehlbier, S. Böhm und T. Niendorf, „Induction-assisted laser beam welding of cast iron materials – Microstructure and mechanical properties“, *Welding and Cutting*, Jg. 16, Nr. 5, S. 316–320, 2017.
- [12] B. Brenner, R. A. Gnann, C. Duschek, T. Lynen und E. Beyer, „Laser induction welding of hardenable steels“ in *ICALEO® '97: Proceedings of the Laser Materials Processing Conference*, San Diego, California, USA, 1997, A61-A70, doi: 10.2351/1.5059624.
- [13] *Schweißen - Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe: Teil 8: Schweißen von Gusseisen; Deutsche Fassung EN 1011-8:2004*, 1011-8, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2005.
- [14] M. Askari-Paykani, M. Shayan und M. Shamanian, „Weldability of Ferritic Ductile Cast Iron Using Full Factorial Design of Experiment“, *J. Iron Steel Res. Int.*, Jg. 21, Nr. 2, S. 252–263, 2014, doi: 10.1016/S1006-706X(14)60039-X.
- [15] E.M. El-Banna, „Effect of preheat on welding of ductile cast iron“, *Materials Letters*, Jg. 41, Nr. 1, S. 20–26, 1999, doi: 10.1016/S0167-577X(99)00098-1.
- [16] R. C. Voigt und C. R. Loper, *A Study of Heat-Affected Zone Structures in Ductile Cast Iron*. [Online]. Verfügbar unter: http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1983_03_s82.pdf (Zugriff am: 23. Februar 2021).
- [17] *Schweißen - Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe: Teil 6: Laserstrahlschweißen; Deutsche Fassung EN 1011-6:2018*, 1011-6, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2018.
- [18] *Schweißen - Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe: Teil 7: Elektronenstrahlschweißen; Deutsche Fassung EN 1011-7:2004*, 1011-7, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2004.
- [19] K. Rührich, R. Zenker und M. Mangler, „Untersuchungen zum Elektronenstrahl-Mehrbad-schweißen von Gusseisen in Verbindung mit Thermofeldern“, *DVS-Berichte*, Nr. 275, S. 113–121, 2011.
- [20] K. Rührich und M. Mangler, „Elektronenstrahl-Mehrprozess-technik – Schweißen mit integrierter Wärmebehandlung“, *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, Jg. 67, Nr. 1, S. 22–30, 2012, doi: 10.3139/105.110129.
- [21] K. Rührich, „Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahl-Mehrspot/Mehrprozess-Schweißens von Gusseisen/Gusseisen- und Gusseisen/Stahl-Verbindungen ohne Schweißzusatzstoffe“. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2014.
- [22] A. Bünting und S. Francke, „Laserstrahlschweißen von Gusseisen und Einsatzstahl ohne Zusatzwerkstoff“, *DVS-Berichte*, Nr. 267, S. 212–214, 2010.
- [23] U. Dilthey und X. Shu, „Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen der Werkstoffkombination Gußeisen mit Kugelgraphit/Stahl mit Nickelzusatzwerkstoff“, *Schweißen und Schneiden*, Jg. 45, Nr. 6, S. 317–319, 1993.
- [24] J. Saffer *et al.*, „Laser beam welding of heat-resistant mixed joints using laser-based pre- and post-heating“, *Procedia CIRP*, Jg. 94, 8-9, S. 671–675, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.09.105.
- [25] *Zerstörungsfreie Prüfung Eindringprüfung: Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO/DIS 3452-1:2019); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 3452-1:2019*, 3452-1, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2020.
- [26] *Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers: Teil 1: Prüfverfahren (ISO 6507-1:2018); Deutsche Fassung EN ISO 6507-1:2018*, 6507-1, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2018.

- [27] *Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben: DIN 50125:2016-12*, 50125, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2016.
- [28] B. Hohenberger, *Laserstrahlschweißen mit Nd:Yag-Doppelfokustechnik - Steigerung von Prozessstabilität, Flexibilität und verfügbarer Strahlleistung*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2003. München: Utz, 2003.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Versuchsmaterialien, nach Schmelzanalyse des Herstellers.

	Chemische Zusammensetzung [Gew.-%]						
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Fe
EN-GJS-400-15	3,40	3,50	0,20	0,04	0,01	-	Rest
EN-GJS-700-2	3,60	3,50	0,25	0,04	0,01	1,00	Rest

Tabelle 2: Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses von Strahloszillation auf die Schweißnahtqualität von Gusseisen mit Kugelgraphit.

Scanrichtung	Scanfrequenz [Hz]	Scanbreite [mm]
Quer	200	0,5
Quer	200	0,25
Quer	300	0,5
Quer	300	0,25
Längs	150	1,2

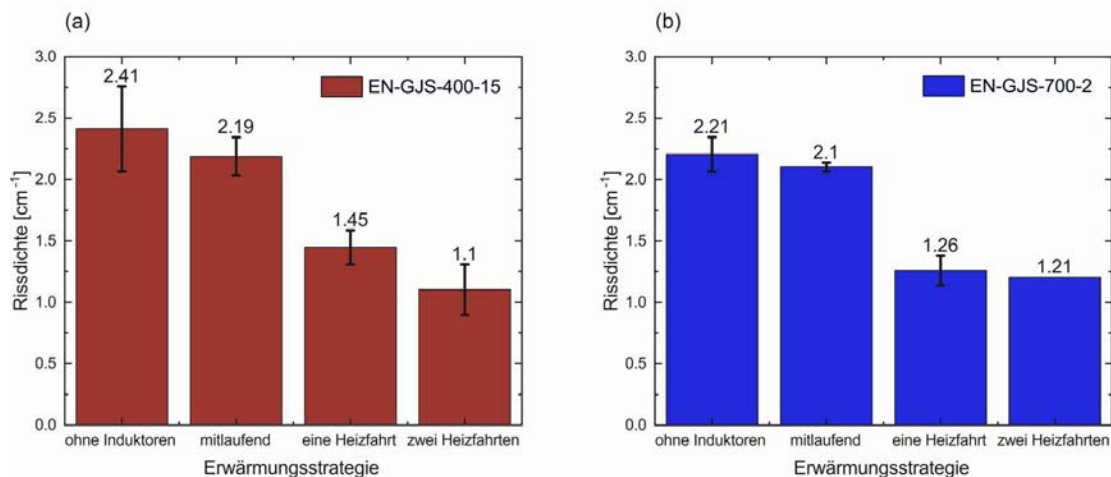


Abbildung 1: Entwicklung der Rissdichte von (a) EN-GJS-400-15 und (b) EN-GJS-700-2 in Abhängigkeit der untersuchten Erwärmungsstrategie, mit Standardfehler.

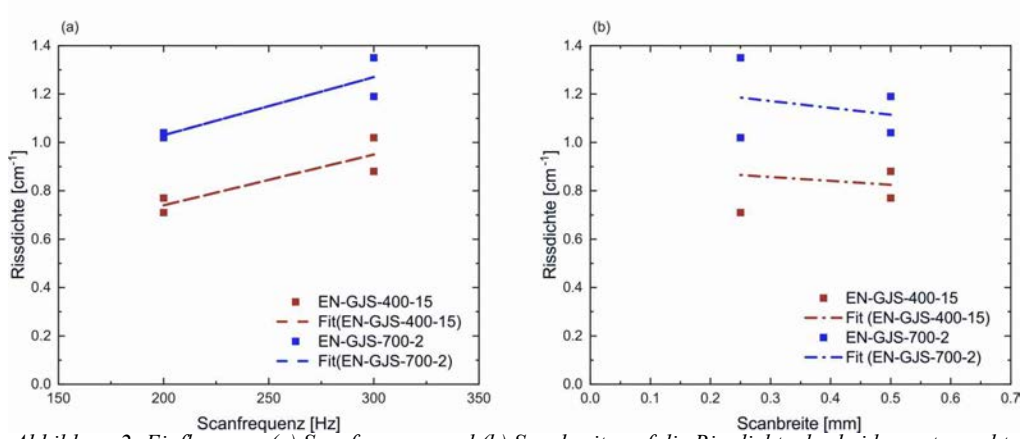


Abbildung 2: Einfluss von (a) Scanfrequenz und (b) Scanbreite auf die Rissdichte der beiden untersuchten Werkstoffsysteme.

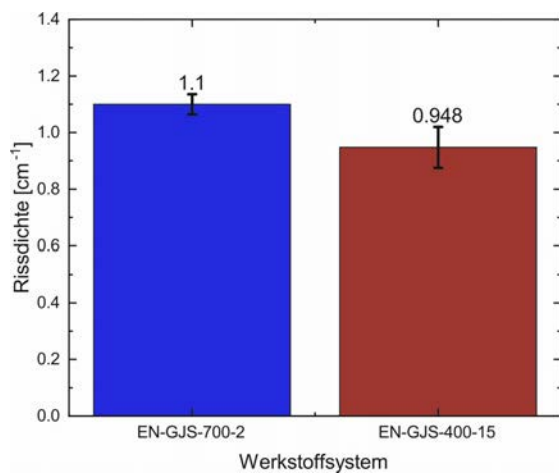


Abbildung 3: Mittlere Rissdichten von (a) EN-GJS-400-15 und (b) EN-GJS-700-2 bei Nutzung von oszillierender Strahlführung, mit Standardfehler.

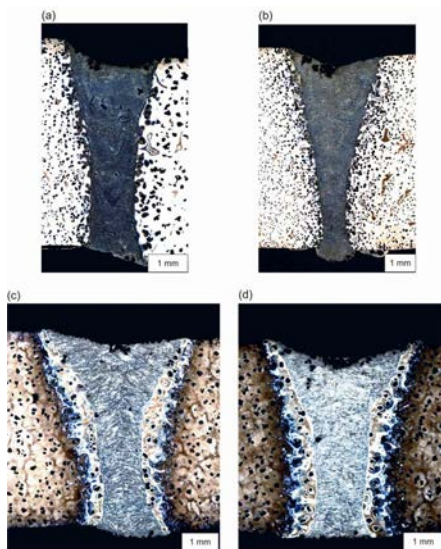


Abbildung 4: Schweißnahtgeometrie in Abhängigkeit der Strahloszillationsrichtung. (a): EN-GJS-400-15 quer zur Vorschubrichtung, (b) EN-GJS-400-15 in Vorschubrichtung, (c) EN-GJS-700-2 quer zur Vorschubrichtung sowie (d) EN-GJS-700-2 in Vorschubrichtung.

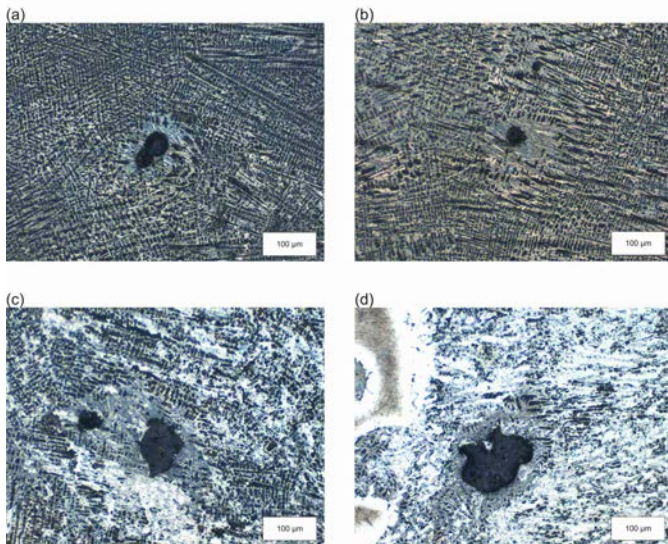


Abbildung 5: Mikrostrukturelle Entwicklung des Schweißnahtgefüges in Abhängigkeit der Strahloszillationsrichtung. (a): EN-GJS-400-15 quer zur Vorschubrichtung, (b) EN-GJS-400-15 in Vorschubrichtung, (c) EN-GJS-700-2 quer zur Vorschubrichtung sowie (d) EN-GJS-700-2 in Vorschubrichtung.

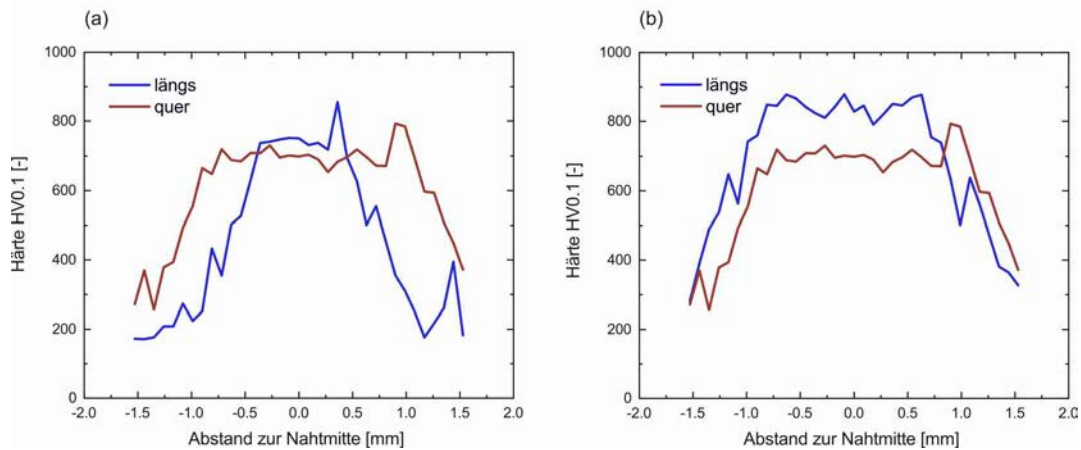


Abbildung 6: Härteverläufe quer zur Schweißnaht von (a) EN-GJS-400-15 und (b) EN-GJS-700-2 in Abhängigkeit der Strahloszillationsrichtung.

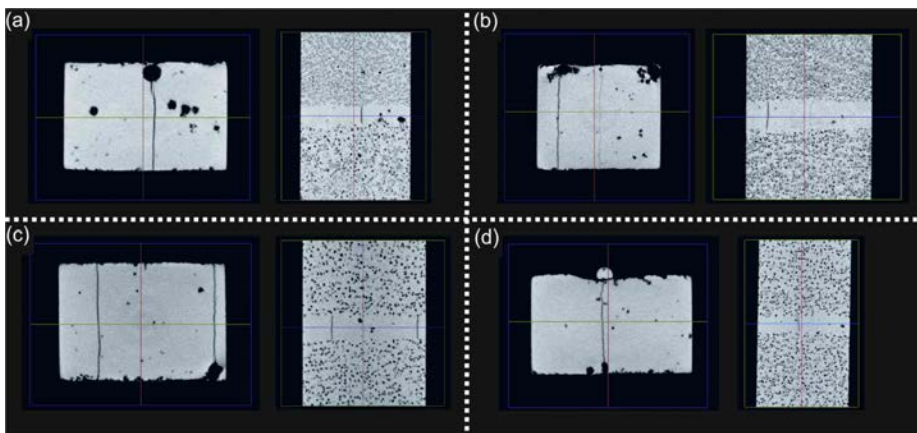


Abbildung 7: Ergebnisse der Durchstrahlungsprüfung am Mikro-Computertomographen in Abhängigkeit der Strahloszillationsrichtung, jeweils links: Längssicht, rechts: Aufsicht. (a): EN-GJS-400-15 quer zur Vorschubrichtung, (b) EN-GJS-400-15 in Vorschubrichtung, (c) EN-GJS-700-2 quer zur Vorschubrichtung sowie (d) EN-GJS-700-2 in Vorschubrichtung.

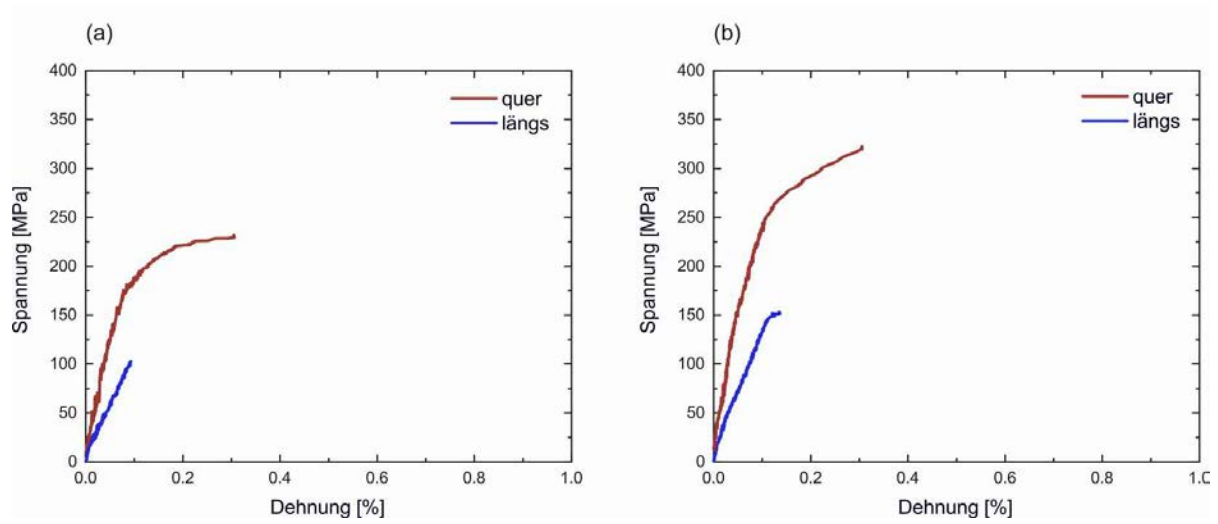


Abbildung 8: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der durchgeführten Zugversuche für (a) EN-GJS-400-15 und (b) EN-GJS-700-2 in Abhängigkeit der Strahloszillationsrichtung. Mittelwerte aus je drei Messungen.