

Werkstoffkennwerte additiv gefertigter Strukturen

V. Wesling, M. Leicher, M. Gräbner, K. Treutler, S. Lorenz

Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren, TU Clausthal

swenja.lorenz@tu-clausthal.de

A. Esderts, M. Hupka, M. Wächter

Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, TU Clausthal

michael.waechter@tu-clausthal.de

K.-H. Spitzer

Institut für Metallurgie, TU Clausthal

Geschäftsleitung@imet.tu-clausthal.de

Abstract

In der additiven Fertigung erschließen sich für das seit über 30 Jahren durchgeführte robotergestützte Metallschutzgasschweißen durch neue Technologien weitere Entwicklungsfelder. Stetig steigende Anforderungen an höhere Abschmelzleistungen und sicherheitsrelevante Bauteilkonzepte verstärken den Fokus auf die mechanischen Eigenschaften additiv gefertigter Bauteile. Durch den fertigungsbedingten Aufbau von generativ gefertigten Strukturen erfahren bereits aufgebrachte Lagen mit jeder neuen Lage eine Wärmebeeinflussung, die sich auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt. Um diese Beeinflussung charakterisieren zu können, werden im Rahmen dieses Beitrags die mechanischen Eigenschaften von jeweils zwei Bauteilen miteinander verglichen. Dabei wird zum einen untersucht, welchen Einfluss die Zwischenlagentemperatur bei hohem Energieeintrag aufweist. Zum anderen werden zwei modifizierte Kurzlichtbögen angewendet, um dünnwandige Bauteile mit geringem Energieeintrag zu fertigen.

1 Einleitung

Die lichtbogen- bzw. drahtbasierte Fertigung (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) basiert darauf, dass ein Bauteil endkonturnah durch das Abschmelzen eines

Schweißzusatzwerkstoffs Lage für Lage schweißtechnisch aufgetragen wird. Die Vorteile bei dieser Vorgehensweise sind dabei, dass der Herstellungsprozess durch die Nutzung von CAD/CAM-Systemen einen sehr hohen Automatisierungsgrad aufweisen kann. Weiterhin wird der eingesetzte Werkstoff effizient genutzt, wodurch es auch möglich wird teure Edukte wie Titan und Nickel im Vergleich zu konventionellen Verfahren kostengünstig einzusetzen. Außerdem lassen sich sehr gut Prototypen mit komplexer Geometrie sowie Reparaturbauteile fertigen [1–3]. Die aktuellen Abschmelzleistungen liegen bei ca. 4 – 10 kg/h [3, 4]. Um möglichst wirtschaftlich zu produzieren, ist es wünschenswert, die Abschmelzleistung weiter zu steigern. Allerdings muss dabei die Zwischenlagentemperatur beachtet werden, die teilweise eine Erhöhung begrenzt [4]. Eine hohe Zwischenlagentemperatur führt zu langsamem Abkühlen des Bauteils, wodurch die Anbindung der einzelnen Lagen verbessert wird. Allerdings kann es aufgrund des Schweißprozesses zu einer Reduzierung der mechanischen Kennwerte wie Zugfestigkeit und Dehngrenze kommen. Eine geringe Zwischenlagentemperatur resultiert in einer hohen Abkühlrate, so dass im Bauteil Eigenspannungen und Verzug entstehen [5]. Der Wärmeeintrag in additiv gefertigte Bauteile wurde u. a. von Eriksson et al. [6] untersucht, wobei gezeigt wurde, dass mit höherem Wärmeeintrag Zugfestigkeit, Dehngrenze und Kerbschlagarbeit reduziert werden. Auch die Entnahmerichtung von Probenmaterial, die eine Aussage über die Anisotropie eines Bauteils zulässt, wurden bereits untersucht. Hierbei zeigen sich jedoch Diskrepanzen. Während Kyvelou et al. [7] und Ji et al. [8] mit ihren Versuchen eine Anisotropie der Werkstoffkennwerte ermitteln, kann dies durch Wächter et al. [5] und Ge et al. [9] zumindest für die Zugfestigkeit nicht nachgewiesen werden.

2 Material und schweißtechnische Durchführung

Im Rahmen dieser Untersuchungen wird ein niedriglegierter Schweißzusatzwerkstoff nach DIN EN ISO 14341-A-G50 7 M21 4Mo mit einem Drahtdurchmesser von 1,2 mm verwendet. Dieser Werkstoff wird bevorzugt zum Schweißen von hochfesten Feinkornbaustählen im Stahlbau mit einer maximalen Streckgrenze bis 540 MPa und einer maximalen Zugfestigkeit bis 620 MPa verwendet [10]. Die chemische Zusammensetzung ist in *Tab. 1* angegeben. Nach [11] erreicht das Schweißgut eine Zugfestigkeit von 560 – 720 MPa, eine Mindeststreckgrenze von 500 MPa sowie eine Mindestbruchdehnung von 18 %. Als Substratwerkstoff wurde ein S355 genutzt.

Tab. 1: chemische Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffes in Gew.-% [10]

Fe	C	Si	Mn	Mo
bal.	0,09	0,70	1,95	0,50

Es wurden zwei Bauteilstrukturen gefertigt, *Abb. 1*; zum einen ein Quader mit den Maßen 250 mm × 31 mm und einer Höhe von 110 mm, der in gependelter Weise geschweißt worden ist, zum anderen ein Hohlzylinder mit einem Durchmesser von 80 mm und einer Höhe von 50 mm. Beide Strukturen wurden aus 40 Lagen aufgebaut.

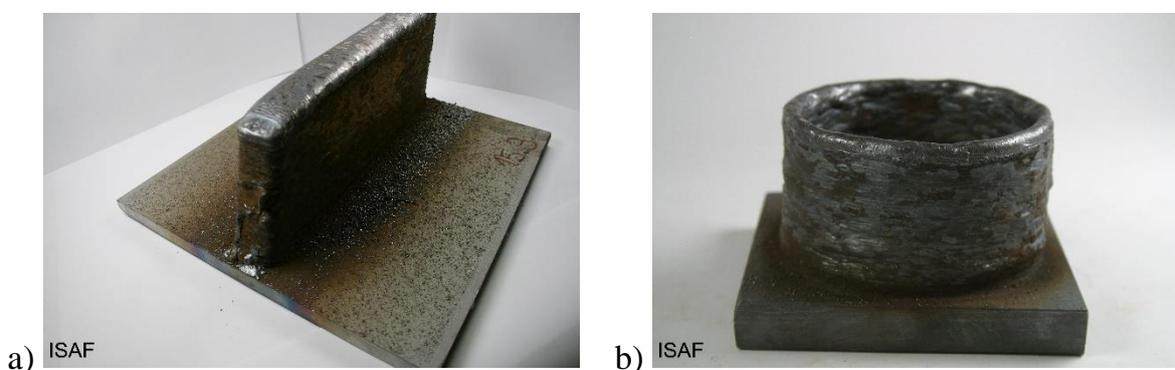


Abb. 1: additiv gefertigte Bauteile: a) Quader, b) Hohlzylinder

Die Quader wurden mit einer Schweißstromquelle „alpha Q551 Progress puls MM DFW“ der Firma EWM hergestellt. Aufgrund der gependelten Aufbauweise wurde ein großes Schmelzbad generiert, wodurch eine Anbindung der verschiedenen Lagen zueinander garantiert werden konnte. Außerdem war das Ziel möglichst hohe Abschmelzraten für einen möglichst wirtschaftlichen Prozess zu verwenden. Um den Einfluss der Zwischenlagentemperatur (ZLT) zu eruieren, wurden Quader unter Einhaltung der Zwischenlagentemperaturen 150 °C bzw. 300 °C schichtweise gefertigt. Die Zwischenlagentemperatur entspricht dabei der Temperatur, auf die die Oberfläche abgekühlt wird, bevor die nächste Lage aufgebracht wird. Die Hohlzylinder wurden unter Beachtung der Verwendung von modifizierten Kurzlichtbögen ohne Unterbrechung hergestellt. Dafür wurde zum einen die Verfahrensvariante coldArc der Firma EWM (Schweißstromquelle: alpha Q551 Progress puls MM DFW) und zum anderen die Verfahrensvariante CMT (Cold Metal Transfer) der Firma Fronius (Schweißstromquelle: CMT Advanced) verwendet. Die genutzten Schweißparameter können *Tab. 2* entnommen werden.

Tab. 2: Schweißparameter für die Herstellung der Bauteile

	Quader (EWM)	Hohlzylinder coldArc	Hohlzylinder CMT
Strom in A	112	100	115
Spannung in U	23,1	15	13
Drahtvorschub in mm/min	4,5	2,2	2,2
Schweißgeschwindigkeit in cm/min	5,0	40	40
Pendelbreite in mm	24	-	-
Pendelfrequenz in Hz	0,7	-	-

Aus den so gefertigten Bauteilen wurden quer zur Vorschubrichtung Proben für eine metallographische Untersuchung sowie für Zugversuche entnommen.

3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Untersuchungen wiedergegeben. Zunächst werden die Querschnitte sowie die Gefüge der unterschiedlich geschweißten Bauteile aufgeführt. Anschließend werden Härteverläufe über den Querschnitten der Bauteile dargestellt. Zuletzt werden die Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche vorgestellt.

3.1 Metallographie

In *Abb. 2* sind Übersichtsaufnahmen von Querschliffen der additiv gefertigten Bauteile wiedergegeben. Der massiv aufgebaute Quader zeigt einen sehr geraden Lagenaufbau. Dahingegen haben die erstellten Hohlzylinder keine geradlinige Aufbauweise.

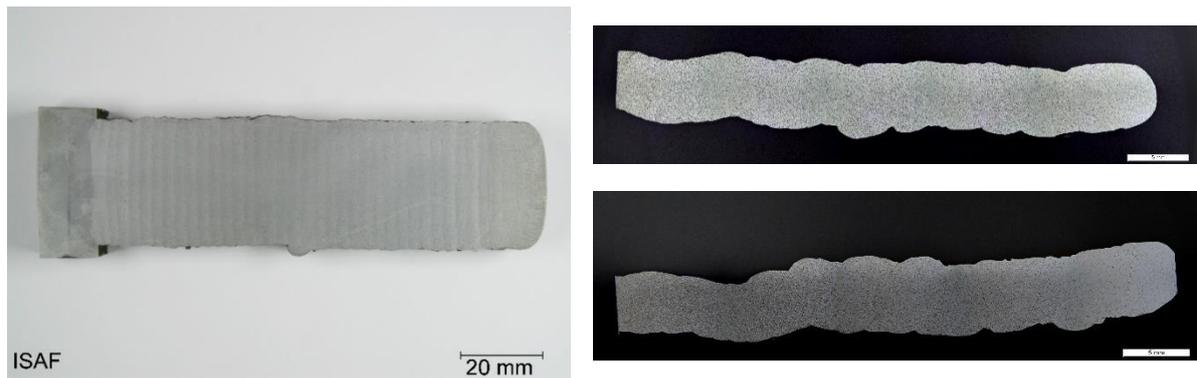


Abb. 2: Übersichtsaufnahmen der additiv gefertigten Bauteile: links) Quader, rechts) Hohlzylinder coldArc (oben), Hohlzylinder CMT (unten)

Die hergestellten Quader besitzen eine vergleichsweise glatte Oberfläche an den Seiten und die einzelnen Lagen eine nahezu konstante Dicke von 2,8 mm. Der mit dem CMT-Verfahren erzeugte Hohlzylinder weist eine große Welligkeit der Oberfläche auf. Beim CMT-Verfahren wird, aufgrund von höheren Wärmeverlusten, in der einzelnen Lage mehr Wärme generiert, die schnell an die Umgebung abgegeben wird, wodurch eine höhere Formänderung resultiert als beim coldArc-Verfahren.

Die Betrachtung der Querschliffe der Quader zeigt, dass im Bereich der oberen vier bis fünf Lagen ein sehr grobkörniges Gefüge vorliegt, das im weiteren Verlauf nach unten hin sehr fein wird, *Abb. 3*. Aufgrund des schichtweisen Lagenaufbaus kommt es zu einer Wärmebehandlung der bereits aufgeschweißten Lagen, wodurch eine Kornfeinung auftritt. Diese Wärmebehandlung geschieht unterhalb der Umwandlungstemperatur von Ferrit zu Austenit (A_{C1}), wodurch es zu einer Kornneubildung kommen kann, die in einem feinen Werkstoffgefüge resultiert. Die oberen, klar abgegrenzten Lagen erfahren einen höheren Wärmeeintrag, der deutlich über A_{C1} liegt, wodurch eine Umwandlung von Ferrit in Austenit vollzogen wird. Beim Abkühlen bildet sich ein grobkörniges Gefüge. Anhand dieser Ergebnisse zeigt sich, wie groß der Wärmeeintrag in das Bauteil ist. Der mit dem coldArc-Verfahren geschweißte Hohlzylinder weist ebenfalls im oberen Lagenbereich ein sehr grobes Gefüge auf. In den unteren Lagen tritt dann auch eine Kornfeinung auf. Der mit dem CMT-Verfahren hergestellte Hohlzylinder hingegen zeigt über den gesamten dargestellten Bereich ein sehr grobes Gefüge. Dies lässt darauf schließen, dass die eingebrachte Wärme sehr hoch ist, wodurch ein Kornwachstum erfolgen konnte.

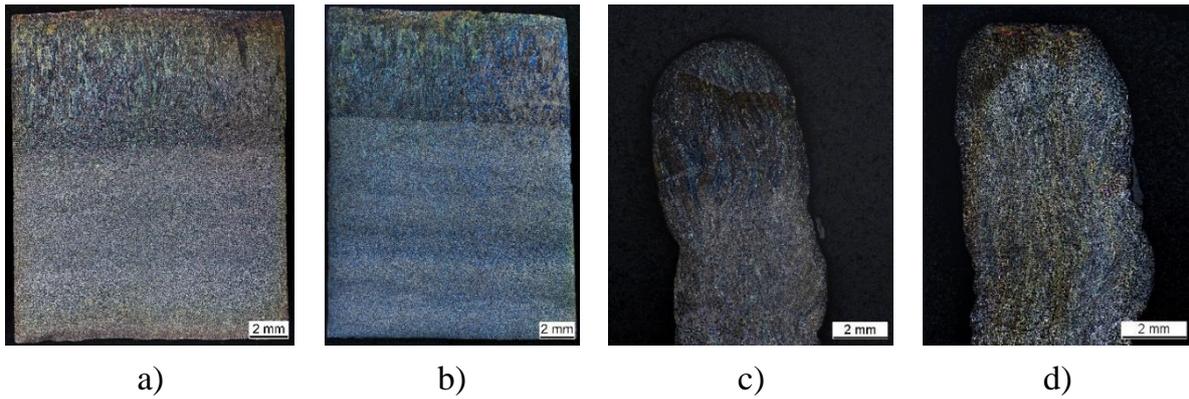


Abb. 3: Detailaufnahmen, geätzt mit Nital: a) Quader, ZLT = 150 °C, b) Quader, ZLT = 300 °C, c) Hohlzylinder coldArc, d) Hohlzylinder CMT

Die Mikrostruktur der Quader besteht hauptsächlich aus globularem Ferrit und Perlit für beide Zwischenlagentemperaturen, Abb. 4. Aufgrund der höheren Zwischenlagentemperatur treten erste Perlitauflösungen auf. Optische Bestimmungen der Phasenanteile ergeben, dass bei der vorgenommenen Verdopplung der Zwischenlagentemperatur der Perlitanteil im Gefüge nur leicht vergrößert wird.

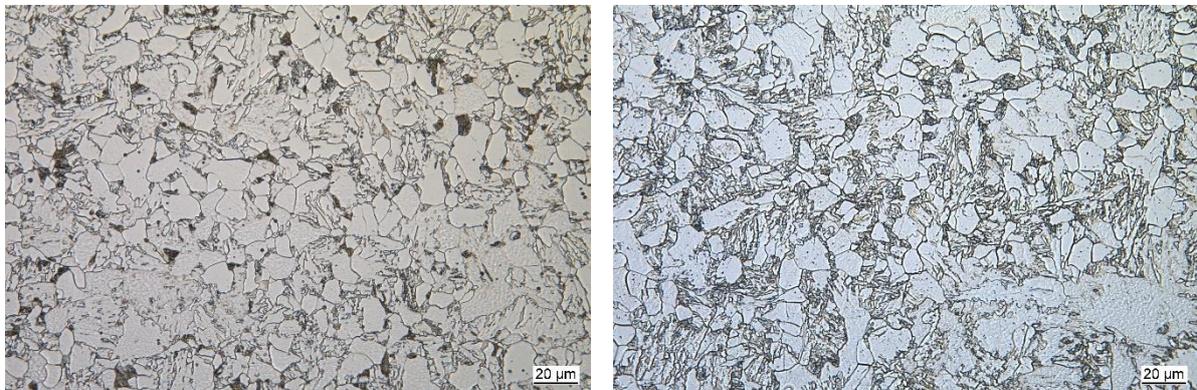


Abb. 4: Detailaufnahmen Quader, geätzt mit Nital, links: Zwischenlagentemperatur 150 °C, rechts: Zwischenlagentemperatur 300 °C; Probenahme in der Mitte des Bauteils (Feinkornbereich)

Die Mikrostrukturen der Hohlzylinder zeigen ebenfalls globularen Ferrit mit Perlit, wobei bei diesen Strukturen ein größerer Anteil an Perlit vorliegt, Abb. 5. Das durch die Verwendung des coldArc-Verfahrens erhaltene Gefüge besitzt dabei den insgesamt größten Perlitanteil.

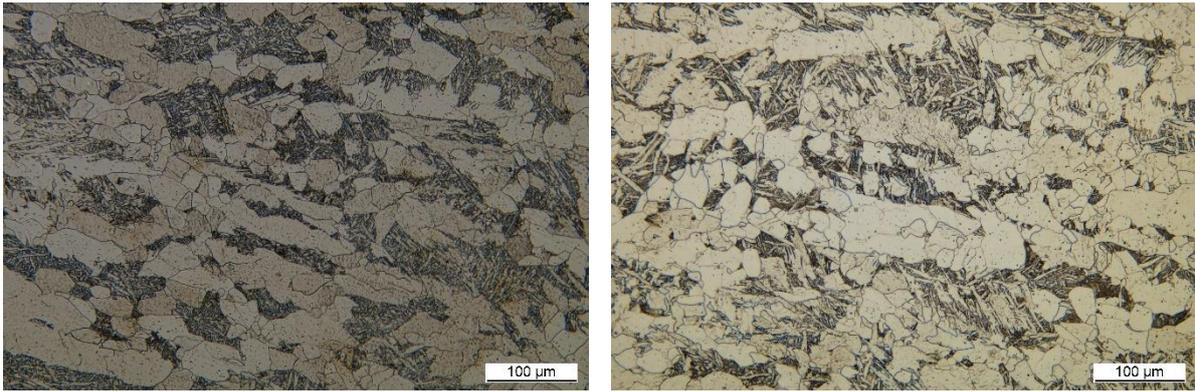


Abb. 5: Detailaufnahmen Hohlzylinder, geätzt mit Nital, links: coldArc, rechts: CMT, Probenahme in der Mitte des Bauteils (Feinkornbereich)

3.2 Härte

Die Härteverläufe zeigen, dass im oberen Bereich des groben Kornes eine Härte leicht oberhalb von 200 HV_{0,2} vorliegt, wohingegen im unteren Bereich des feineren Kornes eine durchschnittliche Härte von etwa 175 HV_{0,2} gemessen werden kann, Abb. 6. Weiterhin lässt sich kein nennenswerter Unterschied zwischen den verschiedenen erzeugten Strukturen erkennen. Die Hohlzylinder weisen lediglich einen etwas breiteren Schwankungsbereich der Härtewerte auf, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der Herstellungseinfluss auf die Härte vernachlässigt werden kann.

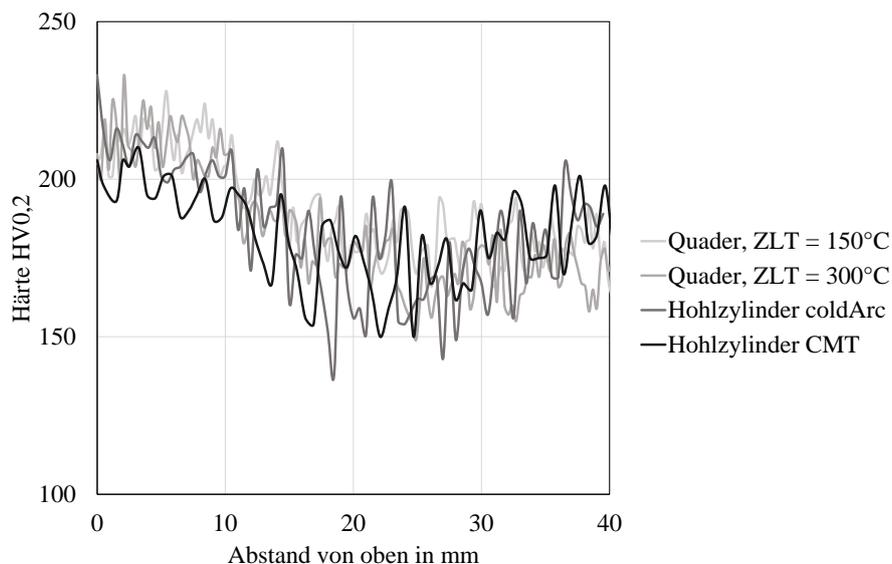


Abb. 6: Härteverläufe (Grobkornbereich im oberen Probenbereich mit höherer Härte, Feinkornbereich im Probenverlauf nach unten mit niedrigerer Härte)

3.3. Zugversuch

Die Proben für die Zugversuche wurden quer zu den Lagen entnommen, da bei den Werkstoffen, bei denen anisotrope Eigenschaften vorliegen, der potenziell ungünstigste Zustand für die mechanischen Eigenschaften in dieser Richtung auftritt. Außerdem wurden die Proben unterhalb der größeren Decklagen entnommen. Die aus den Hohlzylindern entnommenen Proben sind aufgrund der Bauteilgröße Kleinstproben, wodurch die Vergleichbarkeit zu den aus den Quadern entnommenen Proben nur eingeschränkt gegeben ist.

In *Tab. 3* sind die Werte des Zugversuchs dargestellt. Für die Quader ist die obere Streckgrenze angegeben, da die Spannungs-Dehnungs-Kurven eine ausgeprägte Streckgrenze aufweisen [5]. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der Hohlzylinder zeigten dies nicht, weswegen die Dehngrenze $R_{p0,2}$ verwendet wird.

Tab. 3: Übersicht mechanische Eigenschaften, Dehngrenze und Zugfestigkeit in MPa, Gleichmaßdehnung in %

	Quader, ZLT 150°C	Quader, ZLT 300°C	Hohlzylinder coldArc	Hohlzylinder CMT	Soll
Dehngrenze $R_{p0,2}$ bzw. Streckgrenze in MPa	376	325	400	388	≥ 560
Zugfestigkeit in MPa	539	531	533	546	≥ 620
Bruchdehnung in %	28	27,6	18	17	≥ 18

Mit Hinblick auf die Festigkeitskennwerte, Dehn-/Streckgrenze und Festigkeit, wird ersichtlich, dass die ermittelten Werte nicht den Sollvorgaben entsprechen. Dabei ist zu beachten, dass die Sollkennwerte der Verwendung des Schweißzusatzes in einer Verbindungsschweißung entsprechen, bei der andere Fertigungsgegebenheiten herrschen. Die Streckgrenze des Quaders mit der Zwischenlagentemperatur von 300 °C liegt deutlich unter den anderen Werten, was darauf zurückzuführen ist, dass weniger freie interstitiell eingelagerte Kohlenstoffatome, aufgrund des höheren Perlitanteils, vorliegen.

Die erhaltenen Zugfestigkeiten besitzen ein ähnliches Niveau liegen allerdings ebenfalls etwa 10 – 15 % unterhalb der Sollvorgaben. Dieser Umstand muss beispielsweise bei der Konstruktion von additiv gefertigten Strukturen beachtet werden. Die Bruchdehnung hingegen weist ähnliche (Hohlzylinder) oder sogar höhere (Quader) Werte als die Sollvorgabe auf.

4 Zusammenfassung

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass alle geschweißten Strukturen in den oberen Lagen ein sehr viel gröberes Gefüge aufweisen als in den unteren Lagen, die von einer Kornfeinung durch die immer wieder eingebrachte Wärme beim Aufschweißen der nächsten Lage beeinflusst werden. Eine höhere Zwischenlagentemperatur bewirkt einen höheren Perlitanteil im Gefüge ebenso wie der Einsatz von modifizierten Kurzlichtbögen. Bei der Bestimmung der Härte konnte festgestellt werden, dass im oberen Grobkornbereich für alle vier Bauteile eine Härte von ca. 200 HV_{0,2} vorliegt, die nach einer Tiefe von 10 mm ins Bauteilinnere auf ca. 175 HV_{0,2} absinkt. Die Kennwerte für die Streck- bzw. Dehngrenze lassen sich für die beiden Strukturen Quader und Hohlzylinder nur eingeschränkt miteinander vergleichen. Allerdings zeigt sich, dass die Streckgrenze des Quaders mit der Zwischenlagentemperatur 300 °C niedriger ist als die der Zwischenlagentemperatur 150 °C. Die ermittelten Zugfestigkeiten zeigen keine Abhängigkeit von der eingebrachten Wärme. Für die Streck- bzw. Dehngrenze und die Zugfestigkeit gilt zudem, dass sie nicht die im Datenblatt vorgegebenen Kennwerte erreichen. Dieser Umstand muss bei einer Konstruktion berücksichtigt werden. Die Bruchdehnungen hingegen entsprechen den Vorgaben oder sind deutlich besser. Es ist dabei kritisch anzumerken, dass die Soll-Kennwerte vom Hersteller für die Verwendung als Schweißzusatz in konventionellen Schweißverbindungen ausgewiesen werden und nicht für die Herstellung von WAAM-Material.

Alles in allem zeigen die Untersuchungen, dass für eine konstruktive Auslegung von additiv gefertigten Strukturen es nicht ausreicht, die vorgegebenen Kennwerte aus den Datenblättern eines Werkstoffs zu entnehmen, da die Wärmeführung einen sehr erheblichen Einfluss auf das sich ausbildende Gefüge und damit die mechanischen Kennwerte hat.

Literatur

- [1] DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H.: *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81 (2015) 1-4, S. 465-481. doi:10.1007/s00170-015-7077-3.
- [2] DICKENS, P. M.; PRIDHAM, M. S.; COBB, R. S.; GIBSON, I.; DIXON, G.: *Rapid Prototyping Using 3-D Welding*. In: International Solid Freeform Fabrication Symposium, Proceedings of the 3rd Symposium on Solid Freeform Fabrication (1992), S. 280-290.
- [3] BUCHANAN, C.; GARDNER, L.: *Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges*. Engineering Structures, 180 (2019), S. 332-348. doi:10.1016/j.engstruct.2018.11.045.
- [4] FELDMANN, M.; KÜHNE, R.; CITARELLI, S.; REISGEN, U.; SHARMA, R.; OSTER, L.: *3D-Drucken im Stahlbau mit dem automatisierten Wire Arc Additive Manufacturing*. Stahlbau, 88 (2019) 3, S. 203-213. doi:10.1002/stab.201800029.
- [5] WÄCHTER, M.; LEICHER, M.; HUPKA, M.; LEISTNER, C.; MASENDORF, L.; TREUTLER, K.; KAMPER, S.; ESDERTS, A.; WESLING, V.; HARTMANN, S.: *Monotonic and Fatigue Properties of Steel Material Manufactured by Wire Arc Additive Manufacturing*. Applied Sciences, 10 (2020) 15, S. 5238. doi:10.3390/app10155238.
- [6] ERIKSSON, M.; LERVÅG, M.; SØRENSEN, C.; ROBERTSTAD, A.; BRØNSTAD, B. M.; NYHUS, B.; AUNE, R.; REN, X.; AKSELSEN, O. M.: *Additive manufacture of superduplex stainless steel using WAAM*. In: MATEC Web of Conferences, 188 (2018), S. 3014. doi:10.1051/mateconf/201818803014.
- [7] KYVELOU, P.; SLACK, H.; DASKALAKI MOUNTANOOU, D.; WADEE, M. A.; BRITTON, T. B.; BUCHANAN, C.; GARDNER, L.: *Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material*. Materials & Design, 192 (2020), S. 108675. doi:10.1016/J.matdes.2020.108675.
- [8] JI, L.; LU, J.; LIU, C.; JING, C.; FAN, H.; MA, S.: *Microstructure and mechanical properties of 304L steel fabricated by arc additive manufacturing*. In: MATEC Web of Conferences, 128 (2017), S. 3006. doi:10.1051/mateconf/201712803006.

- [9] GE, J.; LIN, J.; CHEN, Y.; LEI, Y.; FU, H.: *Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties*. Journal of Alloys and Compounds, 748 (2018), S. 911-921. doi:10.1016/j.jallcom.2018.03.222.
- [10] HERMANN FLIESS & CO. GMBH: *ED-A 31. Schweißdraht für hochfesten Stahl*. URL: <https://www.fliess.com/de/produktprogramm/msg-drahtelektroden/fuer-hochfeste-feinkornbaustaehle/ed-a-31>, letzter Aufruf: 22.10.2020.
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN ISO 14341: Schweißzusätze - Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen*. 2011. Berlin: Beuth-Verlag

Autorenanschriften

Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling, Marcel Leicher, M.Sc., Maraike Gräbner, M.Sc.,
Dr.-Ing. Kai Treutler, Dr.-Ing. Swenja Lorenz

Technische Universität Clausthal

Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren

Agricolastraße 2

38678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: 05323-722503

Telefax: 05323-723198

E-Mail: office@isaf.tu-clausthal.de

Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts, Moritz Hupka, M.Sc., Dr.-Ing. Michael Wächter

Technische Universität Clausthal

Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit

Leibnizstraße 32

38678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: 05323-722201

Telefax: 05323-723516

E-Mail: office@imab.tu-clausthal.de

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Spitzer

Technische Universität Clausthal

Institut für Metallurgie

Robert-Koch-Straße 42

37678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: 05323-722644

Telefax: 05323-723120

E-Mail: Geschäftsleitung@imet.tu-clausthal.de