

Fügen von additiv und konventionell gefertigten nichtrostenden Stählen mittels automatisiertem Laserstrahlschweißen

F. Probst, J. de Freese, S. El Awad, N. Fellner, SLV München

Die Notwendigkeit ressourcenschonend zu fertigen sowie Produktionsprozesse unter Berücksichtigung sich wandelnder Rahmenbedingungen effizient zu gestalten und somit flexibel agieren zu können, führt zu einer stetig steigenden Nachfrage nach additiven Fertigungsverfahren seitens der Industrie. Nachaktuellen Zahlen wird hierfür ein jährliches Umsatzwachstum von 22,1% bis zum Jahr 2030 prognostiziert.

Die additive Fertigung wird dabei häufig als Konkurrenz zu konventionellen Fertigungsverfahren betrachtet, wenngleich die Kombination der beiden Ansätze ein hohes Anwendungspotential aufweist. Im Bereich der pulverbettbasierten additiven Fertigung wird die begrenzte Bauraumgröße oft als limitierender Faktor angeführt. In diesem Zusammenhang bietet die Nutzung moderner automatisierter Schweißverfahren die Möglichkeit einzelne Bauteile zu größeren Baugruppen zu verbinden und dabei die technischen, funktionalen und geometrischen Anforderungen des Endproduktes zu berücksichtigen.

Aufgrund der zum Teil anisotropen Materialeigenschaften additiv gefertigter Komponenten birgt das Verschweißen von AM-Bauteilen besondere Herausforderungen, die zum aktuellen Zeitpunkt nicht ausreichend erforscht sind. Infolgedessen wird in dieser Arbeit der Einfluss des Laserstrahlschweißens auf Schweißverbindungen zwischen additiv und konventionell gefertigten Bauteilen untersucht. Als Werkstoff wird der in vielen Industriebereichen verwendete austenitische Stahl 1.4404 verwendet. Dabei werden sowohl additive Bauteile miteinander als auch konventionelle Bauteile mit additiv gefertigten Bauteilen verschweißt. Die AM-Probekörper wurden sowohl unter Verwendung von selektivem Laserstrahlschmelzen als auch mittels Lichtbogenauftragsschweißen gefertigt, sodass auch mögliche Einflüsse des jeweiligen Herstellungsprozesses berücksichtigt werden können. Die hergestellten Schweißverbindungen werden zunächst zerstörungsfrei geprüft, bevor im Anschluss mechanisch-technologische Kennwerte ermittelt werden und die vorliegende Mikrostruktur untersucht wird.

1 Einführung

Die Additive Fertigung (engl. Additive Manufacturing (AM)) gilt bereits seit einigen Jahren als zukunftsweisend. Es wird ein stetig steigendes Marktpotential, basierend auf einer erhöhten Nachfrage und einem kontinuierlich wachsenden Anwendungsspektrum für diese Technologien, prognostiziert. Gemäß den Berichten der Wohler Associates, einem führenden Beratungsunternehmen im Bereich der additiven Fertigung, werden seit mehreren Jahren stetig steigende Umsätze für die weltweite AM-Industrie erwartet. Getrieben werden diese Entwicklungen maßgeblich durch das Bedürfnis ressourcenschonend zu fertigen sowie Produktionsprozesse unter Berücksichtigung sich wandelnder Rahmenbedingungen effizient zu gestalten und somit flexibel agieren zu können. [1 - 5]

Der durch AMPOWER veröffentlichte Reifegradindex (Abbildung 1) bestätigt, dass zum aktuellen Zeitpunkt das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (PBF-LB/M) das industriell am weitesten verbreitete metallbasierte additive Fertigungsverfahren darstellt. Im Zusammenhang mit limitierten Abmessungen aufgrund der beschränkten Bauraumgröße additiv gefertigter PBF-LB/M Bauteile bietet das stoffschlüssige Fügen mehrerer AM-Bauteile die Möglichkeit zur Herstellung additiver Baugruppen.

Metal AM Maturity Index 2022



Abbildung 1. Reifegradindex metallbasierter additiver Fertigungstechnologien 2022 (AMPOWER)

Bisherige Publikationen auf diesem Gebiet widmen sich fast ausschließlich einem Schweißprozess und einer ausgewählten Legierung. Eine vergleichende Übersicht unter Einbeziehung unterschiedlicher Legierungssysteme und verschiedener Schweißprozesse liegt zum aktuellen Zeitpunkt nicht vor. Das COAMWELD Projekt verfolgt in diesem Zusammenhang das Ziel industriell relevante Schmelz- und Pressschweißverfahren auf ihre Eignung zum Fügen additiv gefertigter Komponenten zu untersuchen und dabei die technischen, funktionellen und geometrischen Anforderungen des Endprodukts zu berücksichtigen.

2 Stand der Technik

2.1 Additive Fertigung

Seit dem Aufkommen der ersten additiven Fertigungsverfahren, die auf dem Prinzip der lokal induzierten Photopolymerisation beruhen, hat sich die Technologie der additiven Fertigung stetig weiterentwickelt. Vor dem Hintergrund ständig neuer Herausforderungen im Bereich der industriellen Produktion werden fortwährend innovative technologische Ansätze – und darauffolgend Fertigungsverfahren – zur schichtweisen Bauteilherstellung entwickelt. [1, 2]

Das Prinzip der additiven Fertigung reduziert den Bedarf an notwendigem Rohmaterial durch die lokale Materialzuführung im Vergleich zu abtragenden Fertigungsverfahren. Die Nutzung von CAD-Daten als unmittelbaren Input für die Fertigung ermöglicht zum einen eine bedarfsorientierte lokale Produktion und zum anderen entfällt die Notwendigkeit für den Einsatz spezifischer Werkzeuge, sodass sich ein gleichbleibendes Verhältnis zwischen Stückkosten und zu produzierender Stückzahl einstellt. Aus konstruktionstechnischer Sichtweise können mittels AM komplexe Geometrien wie beispielsweise feine Gitter- oder innenliegende Strukturen umgesetzt werden, die darüber hinaus eine Funktionsintegration zum Beispiel in Form von integrierten Kühlkanälen ermöglichen. Des Weiteren kann mittels Prozessintegration ein additiv gefertigtes Bauteil auf einer einzigen Anlage hergestellt werden, indem beispielsweise notwendige spanende Nachbearbeitungsprozesse für die Aufbereitung von Funktionsflächen integriert werden. [1, 2, 3]

2.2 Fügen additiv gefertigter Bauteile

Die Möglichkeit, AM-Bauteile durch Schweißen zu fügen, wird seit mehreren Jahren untersucht. Erste Arbeiten in diesem Bereich von Prasaht et al. [6] und Casalino et al. [7] untersuchten die Eignung des Rührreib- bzw. Laser-MSG-Hybridschweißens im Zusammenhang mit dem Fügen additiv gefertigter Bauteile. Im Bereich der Schmelzschweißverfahren stand neben Pressschweißverfahren wie dem Rührreibschweißen oder dem Linearreißschweißen vor allem das Laserstrahlschweißen [8 - 11] im Mittelpunkt der Untersuchungen. Unabhängig vom Schweißverfahren liegt der Fokus der verschiedenen Forschungsarbeiten vor allem auf den Legierungen 3.2381 (AlSi10Mg) [12 - 15] und dem Cr-Ni-Stahl 1.4404 (316L) [6, 11, 16 - 18]. Die Analyse und Bewertung der Schweißverbindungen basiert in den meisten Fällen auf Zugversuchen, Härtemessungen und optischer Mikroskopie (OM). Die Rasterelektronenmikroskopie (REM) oder die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) werden ebenfalls vermehrt eingesetzt, oft in Verbindung mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) oder Elektronenrückstreuung (EBSD).

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der zuvor angeführten Forschungsarbeiten [6 - 18] kann die allgemeine Schweißbarkeit von AM-Bauteilen bestätigt werden. Es bleiben jedoch noch zahlreiche Fragen offen, beispielsweise hinsichtlich der Auswirkungen der verschiedenen Schweißverfahren auf die mikrostrukturellen Veränderungen von AM-Bauteilen und auf das mechanische Verhalten geschweißter AM-Bauteile. Zudem fehlt es an Wissen und Methoden zur Optimierung der Schweißparameter im Hinblick auf die vorgegebenen und geforderten Bauteileigenschaften. Darüber hinaus besteht Bedarf hinsichtlich validierter Vorgehensweisen zur Implementierung additiver Fertigungstechnologien in Kombination mit entsprechenden Schweißverfahren innerhalb einer Produktionskette.

2.3 Laserstrahlschweißen von additiv gefertigten nichtrostenden Stählen

Zhang et al. [11] untersuchten die Möglichkeit des Schmelzschweißens PBF-LB/M gefertigter Wände mittels Laserstrahlschweißen. Die Proben wurden aus dem nichtrostenden Stahl 1.4404 (316L) hergestellt. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden zwei unterschiedliche Schweißgeschwindigkeiten und Laserleistungen verwendet, sodass insgesamt vier Parameterkombinationen untersucht wurden. Zusätzlich wurde die Aufbaurichtung der AM-Probekörper berücksichtigt. Die Strukturen wurden dabei sowohl senkrecht als auch parallel zur Aufbaurichtung verschweißt. Die Porosität des AM-Grundmaterials wurde mit weniger als 0,5 % angegeben. In der Schweißzone wurden weniger Poren beobachtet, was auf den höheren Energieeintrag (geringere Scangeschwindigkeit und höhere Laserleistung) beim Schweißen im Vergleich zum PBF-LB-Verfahren zurückgeführt wurde. In der Mikrostruktur des Grundmaterials ist die schuppenartige Form der so durch den Laserstrahl verfestigten Pulverpartikel zu erkennen. Die vollständig austenitischen Körner können in zwei Gruppen unterteilt werden: Große (bis zu 200 µm) säulenförmige Körner mit epitaktischem Wachstum und entsprechender Orientierung in Aufbaurichtung sowie kleine (bis zu 1 µm) Körner ohne einheitliche Orientierung. Die Morphologie des Gefüges in der Schweißzone zeigte zelluläre, säulenförmige sowie gleichachsige Dendriten, wobei letztere in der Schweißnahtmitte dominierten. Die durchschnittliche Korngröße betrug 300 µm und liegt damit deutlich über der durchschnittlichen Korngröße des additiv gefertigten Grundmaterials mit 28 µm. Im Falle von höherer Laserleistung verstärkte sich zudem die Kornvergrößerung. Bei den Probekörpern, die parallel zur Aufbaurichtung gefügt wurden, versagten die Zugproben im Bereich der Schweißnaht, wohingegen bei einer Schweißverbindung mit senkrechter Orientierung (bezogen auf die additive Aufbaurichtung) der Probekörper das Versagen im Grundmaterial festzustellen war. Die Bruchdehnung bei einem Versagen im Bereich der Schweißnaht war etwa 50% geringer im Vergleich zu einem Bruch im Grundmaterial. Die Autoren führten dies auf die "langen Dendriten- und Korngrenzen" im Mikrogefüge der Schweißnaht zurück, die "eine leichtere Rissbildung bei geringerer Verformung ermöglichen". Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass das Laserstrahlschweißen grundsätzlich für das Fügen von PBF-LB/M gefertigten Strukturen geeignet ist. Jedoch gilt es, die Einflüsse des Schweißprozesses insbesondere im Bereich des Schweißguts zu berücksichtigen. [11]

Die Arbeit von Akbari et al. [19] ist eine der wenigen Arbeiten, die sich mit dem Schmelzschweißen von DED-Komponenten beschäftigt. Unter Verwendung eines robotergestützten Systems wurden die Wandstrukturen zunächst mittels Laserauftragsschweißen aus dem Werkstoff 1.4430 (316LSi) additiv gefertigt. Als Grundmaterial wurden Substratplatten aus 1.4307 (304L) verwendet. Nach der Fertigung erfolgte eine spanende Nachbearbeitung zur Sicherstellung einer einheitlichen Probendicke und entsprechenden Oberflächenqualität. Im Rahmen der folgenden Schweißversuche wurden die Probekörper mittels Laserstrahlschweißen in unterschiedlichen Orientierungen in Bezug zu der additiven Aufbaurichtung gefügt. Dabei wurden die Strukturen sowohl senkrecht als auch parallel zur Aufbaurichtung im Stumpfstoß gefügt. In der Schmelzzone zeigten sich feinere Dendriten im Vergleich zum additiv gefertigten Grundwerkstoff. Nach Ansicht der Autoren ist dies auf den geringeren Gesamtwärmeeintrag beim Laserstrahlschweißen im Vergleich zum wiederkehrenden Wärmeeintrag, welcher mit der additiven Anwendung des Verfahrens einhergeht, zurückzuführen. Unabhängig vom Messpunkt wurde eine einheitliche chemische Zusammensetzung festgestellt. Im Rahmen der Zugversuche kam es bei beiden in beiden Fällen (senkrecht und parallel zur Aufbaurichtung) zu einem Versagen im Grundmaterial. Unterschiedliche Festigkeiten konnten gemäß den Autoren auf eine fehlende Verschmelzung im Zwischenschichtbereich zurückgeführt werden und bestätigen die häufig vorherrschende Anisotropie additiv gefertigter Strukturen im Zusammenhang mit den mechanischen Eigenschaften. „Es wurde kein signifikanter Unterschied zwischen der Mikrohärtigkeit der Schmelzzone und der DED-Teile beobachtet“, so die Autoren, was mit den "nahe beieinander liegenden Werten der Korngröße" übereinstimmt. Die Porenverteilung im Schweißgut verhielt sich ähnlich wie im Grundmaterial. Des Weiteren wurde die Durchführung einer Machbarkeitsstudie beschrieben, bei dem ein Bauteil mit Überhangstrukturen erfolgreich unter der Verwendung additiv gefertigter Komponenten in Verbindung mit konventionellem Laserstrahlschweißen hergestellt wurde. [19]

3 Versuche

3.1 Rahmenbedingungen für das Laserstrahlschweißen

Die Schweißversuche wurden an einer Faserlaseranlage der Firma IPG des Typs YLS-4000 durchgeführt. Als Schutzgas wurde Argon verwendet. Da die Kanten der additiv hergestellten Proben, bedingt durch den Fertigungsprozess, eine für das Laserstrahlschweißen unzureichende Qualität aufwiesen, wurden die Stirnseiten der Proben vor dem Schweißen spanend nachbearbeitet. Dies soll eine optimale Nahtvorbereitung für die Schweißversuche mit I-Stumpfnahht gewährleisten. Es galt zu berücksichtigen die Kanten der Proben nach dem Fräsen nur zu brechen, eine Fase war unzulässig. Die Materialstärke der Proben beträgt 3 mm (as build). Eine Parameterstudie wurde mit konventionell hergestelltem, warmgewalztem Blech aus dem gleichen Werkstoff (1.4404) im Vorfeld durchgeführt. Dazu wurde ein konventionelles Blech aus 1.4404 mit einer Dicke von > 3 mm blind geschweißt. Hierzu wurde das Blech ohne einen Fügepartner mittels Laserstrahl aufgeschmolzen. Dabei wurden die Bestrahlungsparameter bzgl. Leistung und Schweißgeschwindigkeit variiert. Zwischen den einzelnen Schweißversuchen wurde der Probenwerkstoff auf Raumtemperatur abgekühlt, um eine veränderte Einschweißtiefe durch Vorwärmen des Bauteiles auszuschließen. Ziel war es, eine Auskunft über Einschweißtiefe und Schweißnahtbreite zu erhalten. Als grobe Orientierung diente die von IPG zur Verfügung gestellte Kurve über Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit. Im Nachgang wurde das Schweißverhalten der konventionellen Bleche mit einer Stärke von 3 mm untersucht. Hierzu wurden die Proben im I-Stumpfstoß positioniert und festgespannt. Es wurden ausschließlich die Parameter für Leistung, Schweißgeschwindigkeit und Fokusabstand variiert.

Mit den ermittelten Schweißparametern werden die Kombinationen AM-konventionell und AM-AM (additive manufacturing) gefügt. Hier werden gegebenenfalls Anpassungen der Parameter vorgenommen. Sofern die Parameter verändert wurden, wird mit den gleichen Parametern eine konventionelle Probe angefertigt, um die Vergleichbarkeit der Versuche zu gewährleisten. Die verwendeten AM-Werkstoffe werden quer zur Aufbau-richtung verschweißt. Diese Orientierung wurde gewählt, damit der konservativste Fall dargestellt wird. Es ist zu erwarten, dass die Orientierung in Aufbau-richtung bessere Werte bzgl. der mechanischen Eigenschaften aufweisen wird.

3.2 Probenherstellung

Die verwendeten Proben sind im PBF-LB/M-Verfahren (powder bed fusion – laser based / metal) hergestellt. Das bedeutet, dass der Aufbau schichtweise mittels Metallpulver (316L, 1.4404), welches von einer Schneide auf die gewünschte Dicke abgezogen wird und Verschweißen mittels Laserstrahl stattfindet. Die Proben wurden von der Firma Oerlikon zur Verfügung gestellt. Sie haben eine Abmessung von (50x150x3) mm^3 und wurden stehend auf der kürzeren Kante aufgebaut. Verschweißt werden als Referenz zum einen konventionell hergestellte Bleche (konv. Verbindung). Die additiv hergestellten Bleche werden zum einen artgleich (AM Verbindung), zum anderen mit einem konventionellen Blech (hybride Verbindung) verschweißt.

3.3 Verwendete Parameter

Für das Verschweißen der Proben wurden Parameter ermittelt, welche im Keyholeschweißbereich liegen und eine Einschweißtiefe von min. 3 mm garantieren. In den Vorversuchen wurde sich auf die Parameter 3 kW Laserstrahlleistung und 3 m/min Schweißgeschwindigkeit (hohe Streckenenergie) und 4 kW Laserstrahlleistung und 6 m/min Schweißgeschwindigkeit (niedrige Streckenenergie) geeinigt. Im Verlauf der Schweißversuche stellte sich heraus, dass der Parameter x/x zu starker Porosität führte, daher wird im Fortgang der Untersuchung lediglich der Parameter 4 kW / 6 m/min betrachtet.

4 Analytik und Ergebnisse

Bei der experimentellen Vorgehensweise zur Untersuchung von mit Laserstrahl verschweißten austenitischen Blechen wurden die Schweißnähte zuerst einer Härteprüfung unterzogen, um deren Härteprofile zu bestimmen. Anschließend wurden Zugversuche an den einzelnen Verbindungen durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften und die Festigkeit der Schweißnähte zu analysieren. Abschließend erfolgte eine metallografische Betrachtung, bei der geschliffene Proben der Schweißnaht mikroskopisch untersucht wurden, um Einblicke in die Gefügestruktur und eventuelle Defekte zu gewinnen.

4.1 Härteprüfung nach Vickers (DIN EN ISO 6507)

Ein entscheidender Schritt bei der Qualitätsprüfung von Schweißverbindungen ist die Härteprüfung. Aus den Ergebnissen der Härtemessung lassen sich Rückschlüsse über die richtige schweißtechnische Verarbeitung ziehen. Mithilfe der Härteprüfung kann die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegen das Eindringen eines anderen, härteren Werkstoffs ermittelt werden [20]. Bei der Härteprüfung nach Vickers wird dazu eine kleine vierseitige Diamantpyramide mit einer definierten Kraft (hier verwendet: HV 0,3; 2,942N) über eine definierte Zeit (10 Sekunden) in die Probe gedrückt. Anschließend werden die Diagonalen des durch den Eindringkörper erzeugten Abdrucks gemessen. Daraus wird der Härtewert bestimmt. Je tiefer sich die Diamantpyramide in das Werkstück hineindrücken konnte, desto größer werden die Diagonalen und desto weicher ist das Material.

Zu beachten ist, dass es sich bei HV 0,3 um eine Messung im Kleinlastbereich handelt. Durch die geringe Eindringtiefe des Prüfkörpers in die Probe wird das Verhältnis zwischen elastischer Verformung und plastischer Verformung größer. Demnach wirkt es so, dass bei Kleinlast- und Mikrohärtmessungen die gemessenen Härtewerte etwas höher liegen als im Bereich der Makrohärte. Daher sind Härtewerte aus dem Makrobereich (z.B. HV10) nicht mit Werten aus dem Kleinlast- bzw. Mikrohärtbereich vergleichbar. Abbildung 2 zeigt einen Härteverlauf exemplarisch über der Schweißnaht. Alle nachfolgend gezeigten Härtediagramme wurden auf diese Weise geprüft.

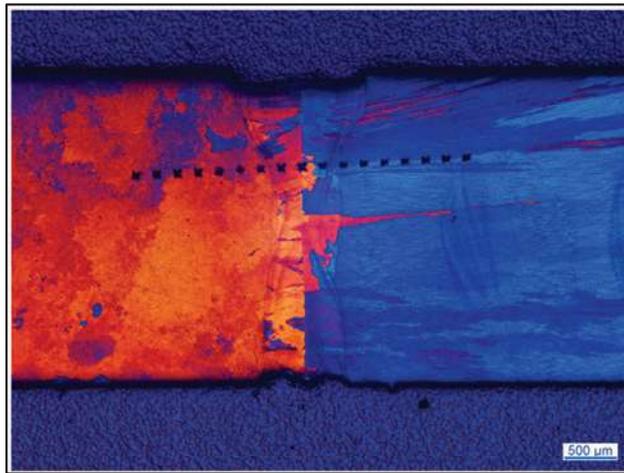


Abbildung 2. Eindrücke Härteprüfung, Erstellen eines Härteverlaufs über einer Lasernaht, exemplarisch

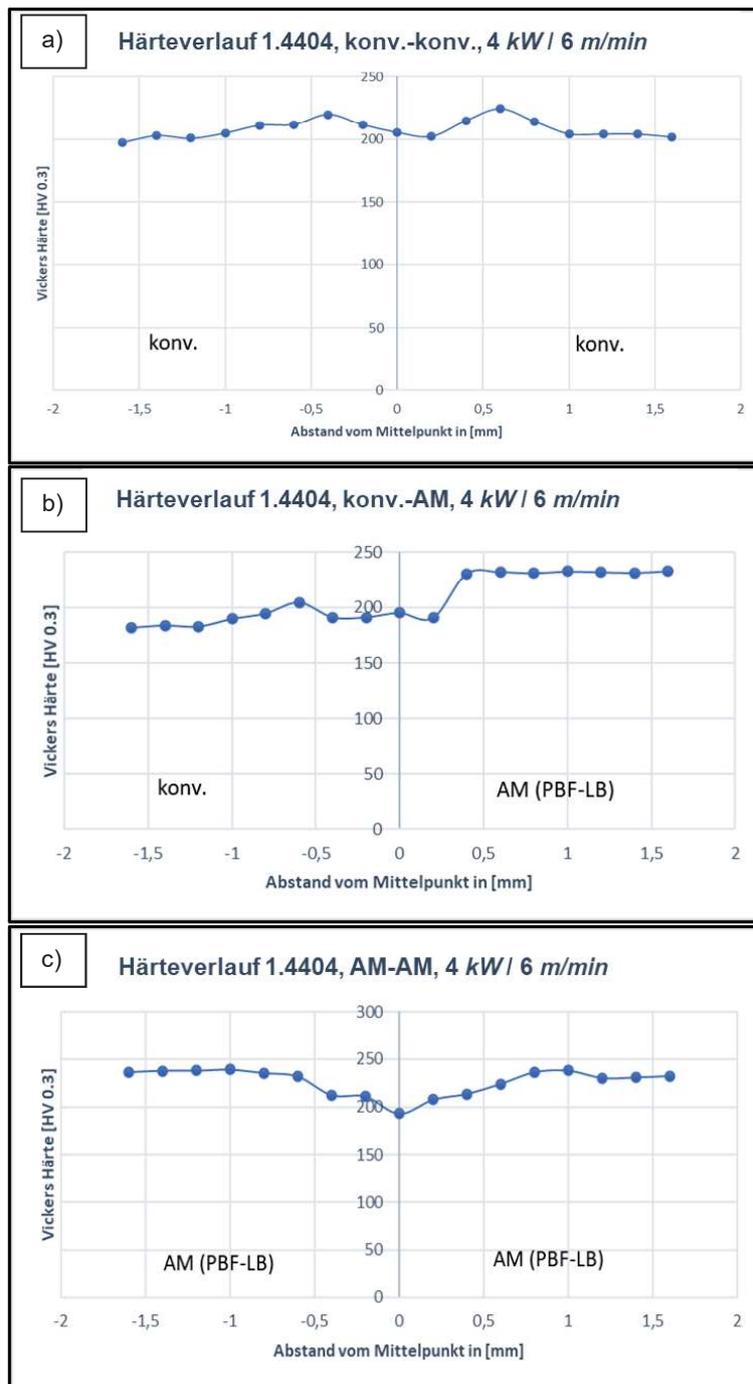


Abbildung 3. In der Abbildung sind die Härteverläufe über die drei verschiedenen Verbindungstypen gezeigt. In (a) ist die Verbindung der beiden konventionellen Bleche zu sehen. (b) zeigt die hybride Verbindung aus konventionellem Blech und AM-Werkstoff. Unter (c) befindet sich der Härteverlauf der Verbindung zweier additiv gefertigter Proben. Die Abkürzung konv. steht für konventionell.

Die Abbildung 3 zeigt die Härteverläufe der drei unterschiedlichen Schweißverbindungen. Die Mitte der Schweißnaht befindet sich in jedem Diagramm im Ursprung. Die konventionelle Verbindung (a) entfestigt leicht, erkennbar an der Senke in der Schweißnahtmitte. Die hybride Verbindung, Abbildung 3 (b), zeigt, dass der additive Werkstoff bzgl. der Grundfestigkeit um ca. 20 % höher liegt. Eine Entfestigung ist auch hier in der Schweißnahtmitte zu erkennen, jedoch lediglich bis etwa auf das Niveau des konventionellen Bleches. Die rein additive Verbindung, Abbildung 3 (c), zeigt dagegen eine stärkere Entfestigung in der Mitte der Schweißnaht, als die beiden anderen Verbindungen.

4.2 Zugversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 4136

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht und der Grundwerkstoffe werden sowohl das Grundmaterial im Zugversuch (DIN 50125) als auch die geschweißten Proben einer Quersugprüfung (DIN EN ISO 4136) unterzogen. Die Prüfung der Schweißnähte wird nach DIN EN ISO 4136 durchgeführt, [21, 22]. In Anbetracht des dafür benötigten Materials in den Abmessungen von ca. $150 \times 37 \text{ mm}$ pro Zugprobe wird in der Probengeometrie von der DIN EN ISO 4136 abgewichen. Die Lage der Schweißnaht bleibt unverändert. Um jedoch stets eine Vergleichbarkeit aller Proben zu gewährleisten, wird einheitlich für alle Proben die Probengeometrie nach DIN 50125 verwendet. Die Zugversuche wurden an einer Inspect table 50-1 Zugprüfmaschine durchgeführt. Diese hat eine Nennzugkraft von 50 kN . Als Testgeschwindigkeit wurden $7,5 \text{ MPa/s}$ gewählt. Da nur eine begrenzte Menge an additivem Material zur Verfügung stand, wurde jeweils nur eine exemplarische Probe erstellt und gezogen. Die Werte sind den Abbildungen 4 und 5 zu entnehmen. Da bei allen verschweißten Proben ein Bruch außerhalb der Messlänge auftrat, wurden Kraft-Weg-Diagramme zur besseren Vergleichbarkeit gewählt.

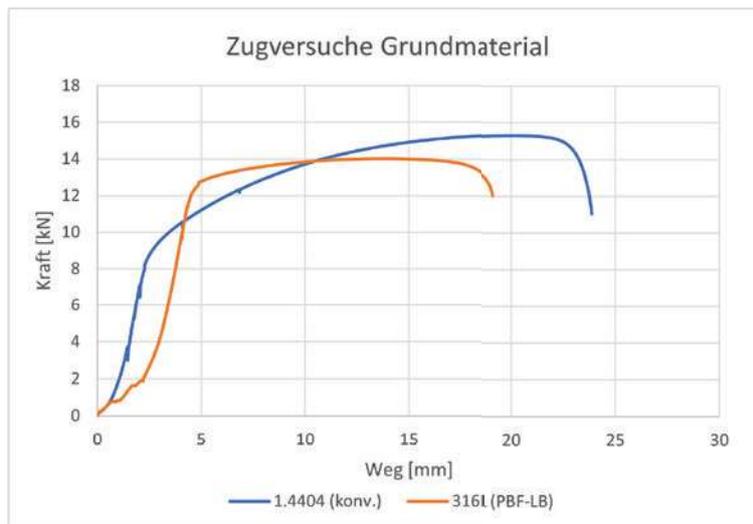


Abbildung 4. Die Abbildung zeigt das Kraft-Weg-Diagramm der Grundwerkstoffe. Die blaue Linie entspricht dem konventionellen Stahl 1.4404, die orange Linie stellt den Werkstoff 316L aus dem Pulverbettprozess dar. Zum einen liegt die maximale Kraft, respektive die Zugfestigkeit, des konventionell gefertigten Stahls höher, zum anderen längt sich der konventionelle Stahl um ca. 24% mehr, verglichen mit der additiv hergestellten Probe.

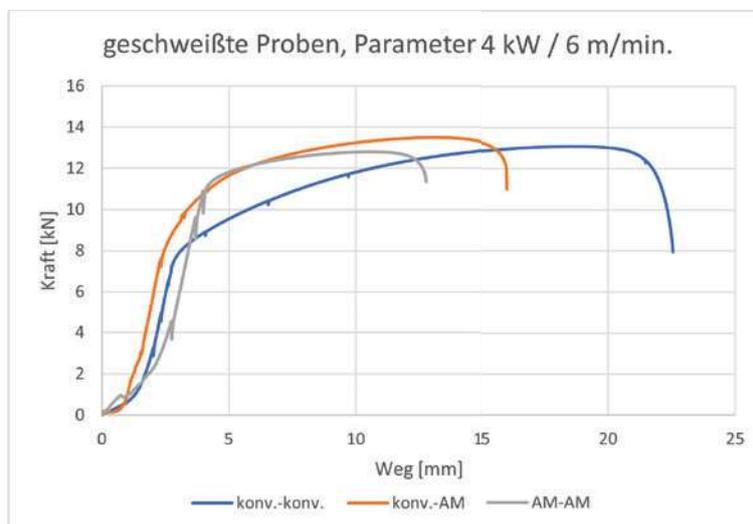


Abbildung 5. Die Abbildung zeigt das Kraft-Weg-Diagramm der geschweißten Verbindungen. Die blaue Linie entspricht hier der Verbindung konventioneller Bleche aus dem Werkstoff 1.4404. Die orangefarbene Linie stellt den Werkstoff 316L aus dem Pulverbettprozess, verschweißt mit dem konventionellen 1.4404, dar. Bei der grauen Linie handelt es sich um die Verbindung zweier aus dem Pulverbett stammender Proben aus dem Werkstoff 316L. Verglichen mit den Grundwerkstoffen ist zu sehen, dass die Probe aus rein konventionellem Material sich auch hier mehr längt. Die maximale Kraft, respektive die Zugfestigkeit, der hybriden Verbindung liegt jedoch höher. Der konventionelle Stahl längt sich um ca. 24% mehr, verglichen mit der additiv hergestellten Probe.

Vergleicht man die zu Grunde liegenden Werkstoffe, so fällt auf, dass die additiv hergestellte Probe ein deutlich spröderes Verhalten aufweist, siehe Abbildung 4. Die Längenänderung der konventionellen Probe bis zum

Bruch ist entsprechend größer. Auch nimmt der konventionelle Werkstoff mehr Kraft bis zum Bruch auf. Ein Grund hierfür ist das Herstellungsverfahren der additiv gefertigten Bauteile.

Vergleicht man die verschweißten Proben miteinander, Abbildung 5, so zeigt die Verbindung konventioneller Bleche ein ähnliches Verhalten, wie der reine Grundwerkstoff. Die Proben brachen ausschließlich fernab der Schweißnaht im unbeeinflussten Gebiet. Die Festigkeit liegt jedoch unter der des Grundwerkstoffes.

Die Schweißverbindung zweier additiver Proben lieferte das schlechteste Ergebnis bzgl. Festigkeit und Dehnung. Dies liegt an den deutlich schlechteren Werten des Grundwerkstoffes. Betrachtet man die hybride Verbindung, so liegen die Werte für aufgenommene Kraft, Festigkeit und Längenänderung, bzw. Dehnung zwischen den artgleichen Verbindungen. Die Längenänderung wurde hier durch den konventionellen Fügepartner bis zum Erreichen der Kraftgrenze des additiven Fügepartners erzielt. Der Bruch erfolgte im additiven Werkstoff.

4.3 Metallografische Betrachtung

Um mögliche Werkstoffunregelmäßigkeiten im Grundwerkstoff und in der Schweißnaht nachweisen zu können, werden mikroskopische Untersuchungen der Proben durchgeführt. Eine Auflistung der zu erkennenden Merkmale je nach Untersuchungstyp ist DIN EN ISO 4136 zu entnehmen.

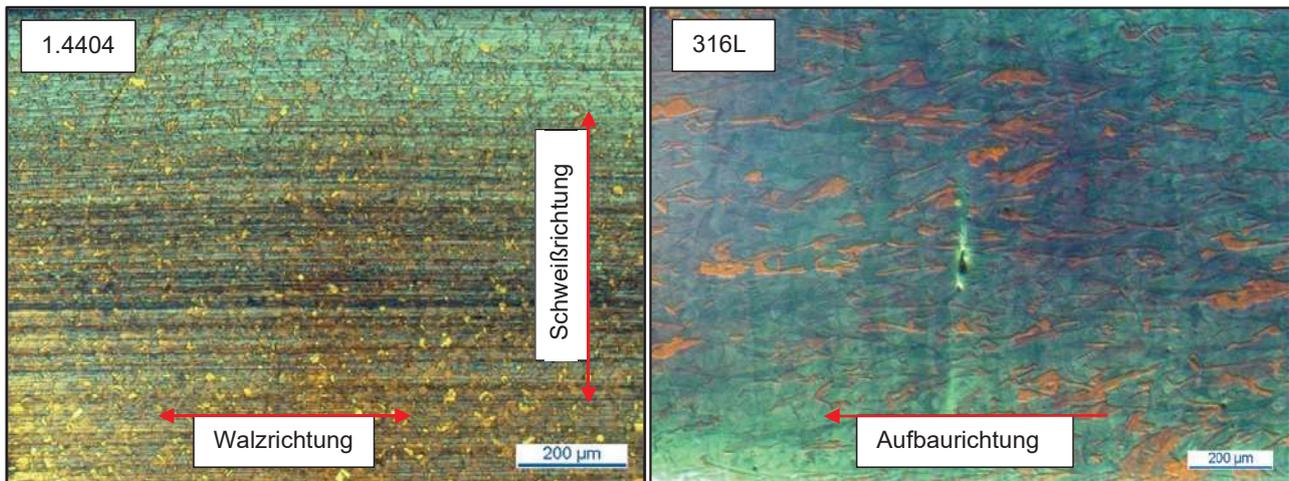


Abbildung 6. Die Abbildung zeigt das Grundgefüge der zu Grunde liegenden Materialien. Auf der linken Seite ist der konventionelle Werkstoff 1.4404 zu sehen. Die Walzrichtung ist klar an der Orientierung der Zeilen zu erkennen. Auf der rechten Seite ist der additiv hergestellte Werkstoff 316L gezeigt. Die Aufbaurichtung verläuft hier in horizontaler Richtung. Dies bedeutet, geschweißt wird in senkrechter Richtung. Im Gefüge ist eine Pore, vermutlich aus dem AM-Prozess stammend, zu erkennen

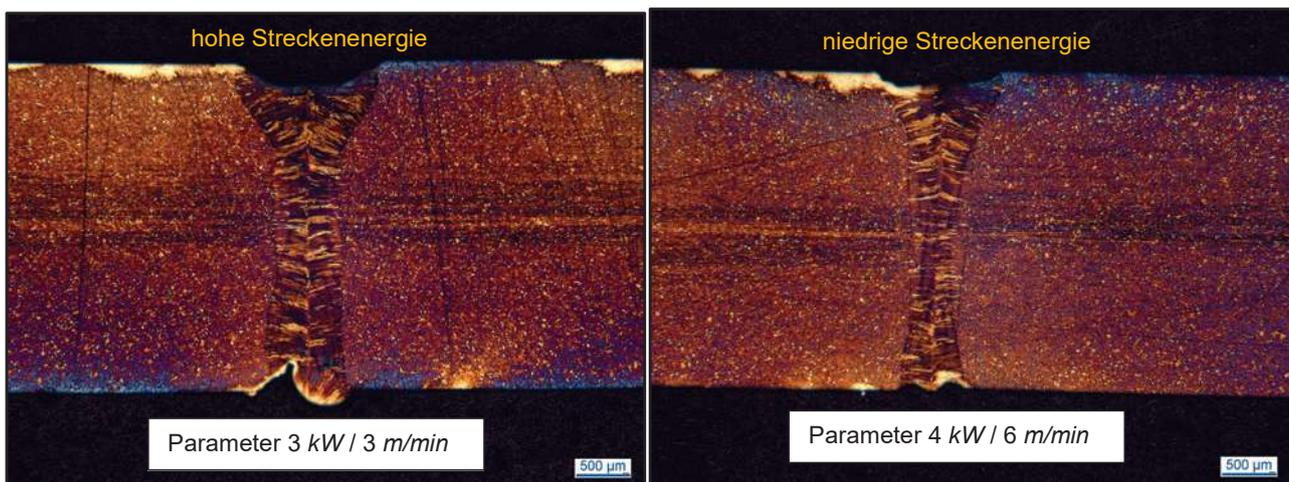


Abbildung 7. Zum Vergleich verschiedener Parameter wurden Schiffe angefertigt, welche die Naht im Ganzen zeigen. Der ausgewählte Parameter 4 kW / 6 m/min befindet sich hier rechts im Bild. Links ist der experimentelle Parameter 3 kW / 3 m/min zu sehen. Es fällt deutlich auf, dass die Naht des gewählten Parameters 4 kW / 6 m/min deutlich schlanker ist und auch bzgl. Einbrand und Wurzel ein günstigeres Verhältnis aufweist. Es handelt sich bei beiden gezeigten Verbindungen um die Vorversuche mit konventionellem Material aus 1.4404.

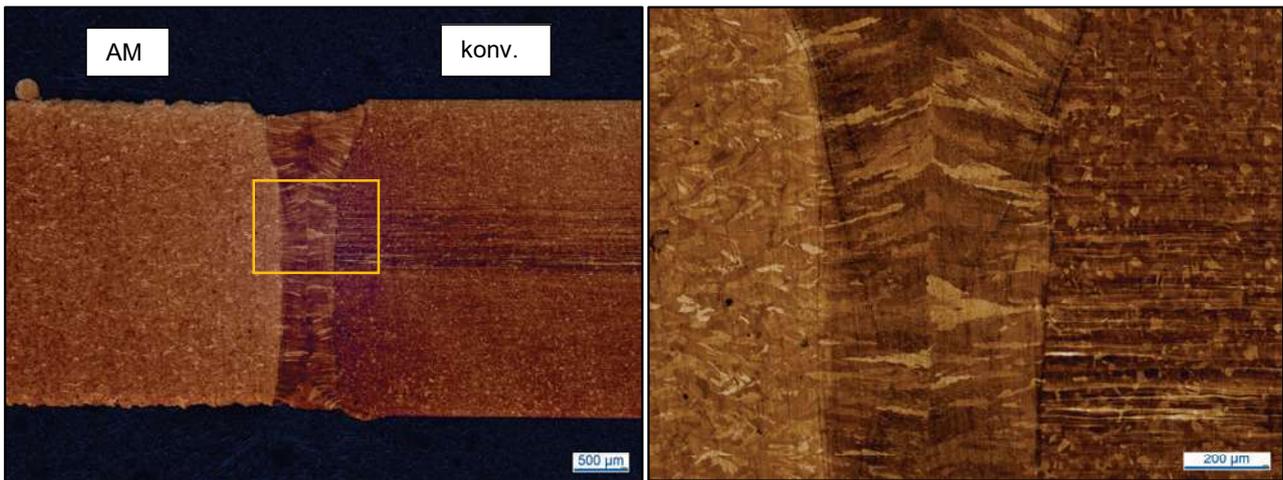


Abbildung 8. Die Abbildung zeigt die hybride Verbindung (Parameter $4 \text{ kW} / 6 \text{ m/min}$) aus additiv gefertigter Probe (links) und konventionellem Blech (rechts). Es fällt auf, dass die Schweißnaht im oberen Bereich nicht symmetrisch ist. Ein möglicher Faktor dafür ist eine andere Wärmeleitfähigkeit des additiven Materials, bedingt durch den Herstellungsprozess. Versuche hierzu dauern jedoch an. Der markierte Ausschnitt wird im rechten Bildteil vergrößert dargestellt.

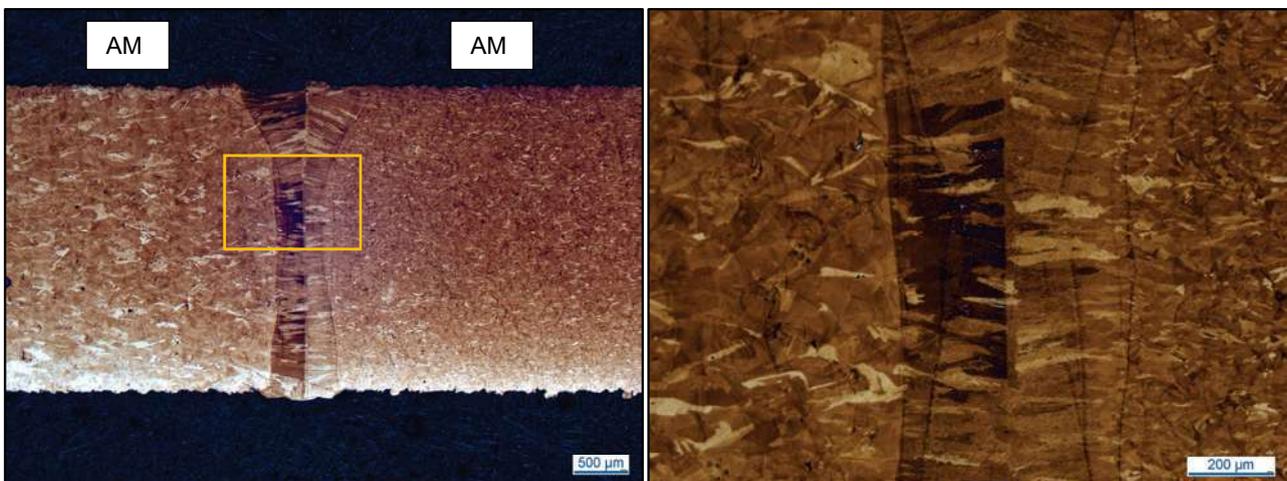


Abbildung 9. Hier ist eine Verbindung zweier, additiv hergestellter Bleche gezeigt. Auffällig ist die breite Oberseite der Naht, verglichen mit der rein konventionellen Verbindung. Auch hier sei auf die durch den Herstellungsprozess veränderte Wärmeleitfähigkeit verwiesen. Grundsätzlich ist die Naht jedoch, bedingt durch die niedrige Streckenenergie des Parameters $4 \text{ kW} / 6 \text{ m/min}$, sehr schmal. Die markierte Position (links) wird im rechten Bildteil vergrößert dargestellt.

Die gezeigten Schlitze stellen den Grundwerkstoff in den Varianten 1.4404 (konventionell) und 316L (additiv) dar (Abbildung 6). Der Werkstoff AISI 316L entspricht in Art und Zusammensetzung dem in Deutschland ge-läufigeren 1.4404. Es handelt sich hierbei um einen X2CrNiMo17-12-2. Daher sind im konventionellen Blech auch Körner mit Zwillingslinien zu finden. Des Weiteren erkennt man die charakteristischen Seigerungszeilen aus dem Walzprozess. Der additive Werkstoff hingegen weist eine für den Prozess der additiven Fertigung charakteristische Gefügestruktur auf.

Der Vergleich unterschiedlicher Parameter ist in Abbildung 7 dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass ein Parameter mit niedriger Schweißgeschwindigkeit und daher höherer Streckenenergie zu einer breiteren Naht führt. Es wurde ausschließlich im Keyhole-Bereich geschweißt. Da die Prämisse an die Laserstrahlschweißung war, die Vorzüge des Verfahrens zu nutzen, war lediglich die schmalste Naht als Parametersatz von Interesse. So fiel die endgültige Wahl auf den Parameter $4 \text{ kW} / 6 \text{ m/min}$. Die Abbildungen 8 und 9 stellen zum einen die hybride Verbindung eines konventionellen Bleches mit der additiv hergestellten Probe dar, zum anderen wird die Verbindung zweier additiver Bleche gezeigt. Bei der hybriden Verbindung fällt sofort die Asymmetrie im oberen Teil der Naht auf. Dies liegt vermutlich an einer verschiedenen Wärmeleitfähigkeit der Materialien. Diesen Umstand gilt es weiter zu untersuchen. Die Naht zwischen den additiven Blechen kann als symmetrisch bezeichnet werden.

5 Fazit

Grundsätzlich stellt das Verschweißen mittels Laserstrahl von additiv gefertigten Werkstücken aus 316L kein Problem dar. Bezüglich der Orientierung konnte ermittelt werden, dass der konservativste Fall einen erheblichen Einfluss auf die Festigkeit eines Bauteils hat. So wird vermutet, dass sich eine andere Orientierung des additiv gefertigten Bauteils bzgl. der Schweißnahtlage deutlich günstiger auf die Festigkeit der gesamten Struktur auswirkt. Dies sollte bei der konstruktiven Planung und Auslegung berücksichtigt werden. Im Vergleich zu den konventionellen Werkstoffen wurden mittels Funkenspektroskopie deutlich höhere Werte an Begleitelemente wie Schwefel und Phosphor ermittelt. Schwefel und Phosphor sind Elemente, die niedrigschmelzende Phasen oder Eutektika bilden, wie zum Beispiel Fe-FeS oder Ni-NiS. Diese weisen Schmelztemperaturen ≤ 1050 °C auf, die deutlich niedriger sind als die des Grundwerkstoffs [23-25]. Durch diese niedrigschmelzende Filme besteht auch in dem gut schweißgeeigneten Werkstoff 316L die Gefahr der Heißrissbildung.

Es wurde in Folge der Vorversuche festgestellt, dass die Zugfestigkeit der Proben beim Schweißen mit geringerer Streckenenergie $4 \text{ kW} / 6 \text{ m/min}$ einen höheren Wert erreicht. In Anbetracht der erzeugten Poren, die sich bei den erprobten Parametern von 4 kW bis 2 kW (versuchsweise Parameter) deutlich gesteigert haben, kann auch hier die Empfehlung ausgesprochen werden, dass ein Schweißen mit niedriger Streckenenergie zur Porenunterdrückung sinnvoll ist. Der Parameter $4 \text{ kW} / 6 \text{ m/min}$ stellte sich über alle Schweißversuche als optimal und prozesssicher heraus und kann bei Materialstärken um 3 mm gut verwendet werden.

6 Ausblick

Da bei den Schweißversuchen ein optimaler Parameter entwickelt werden konnte, gilt es diesen nun in anderen Schweißverbindungen zu verifizieren, die bzgl. ihrer Orientierung nicht mehr dem konservativen Fall entsprechen. Auch hier sind Zugversuche und eine metallographische Betrachtung notwendig.

Wie in den Schliffen zu sehen ist, bilden sich die Nähte in konventionellem wie additivem Material unterschiedlich aus. Daher sind weitere Untersuchungen zur Wärmeleitung beim Schweißen von AM-Materialien nötig.

Um einer breiten Masse das Fügen von additiv hergestellten Metallbauteilen zu ermöglichen, müssen dem Laserstrahlschweißen andere automatisierbare Prozesse gegenübergestellt werden, wie beispielsweise das klassische MSG-Schweißen oder das Plasmaschweißen. Auch müssen die Versuche mit CrNi-Stählen um andere Legierungen wie mikrolegierter Stahl oder Aluminium erweitert werden.

Schrifttum

- [1] Richard, H. A.; Schramm, B.; Zipsner, T.: Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019.
- [2] Kumke, M.: Methodisches Konstruieren Von Additiv Gefertigten Bauteilen, AutoUni - Schriftenreihe Ser, v.124, Springer, Wiesbaden, 2018.
- [3] Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion, 4. Aufl., Hanser; Ciando, München, 2013.
- [4] Wohlers, T.; Campbell, R. I.; Diegel, O.; Kowen, J.; Mostow, N.: Wohlers report 2021: 3D printing and additive manufacturing global state of the industry, Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado, 2021.
- [5] Wohlers, T.; Campbell, R. I.; Diegel, O.; Kowen, J.; Huff, R.; Mostow N.; Fidan I.: Wohlers report 2022: 3D printing and additive manufacturing global state of the industry, Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado, 2022.
- [6] G. Casalino, S. L. Campanelli, and A. D. Ludovico, "Laser-arc hybrid welding of wrought to selective laser molten stainless steel," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 68, 1-4, pp. 209– 216, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4721-z.
- [7] K. G. Prashanth, R. Damodaram, S. Scudino, Z. Wang, K. Prasad Rao, and J. Eckert, "Friction welding of Al-12Si parts produced by selective laser melting," *Materials & Design*, vol. 57, pp. 632–637, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.01.026.
- [8] H. Zapf, M. Höfemann, and C. Emmelmann, "Laser welding of additively manufactured medium manganese steel alloy with conventionally manufactured dual-phase steel," *Procedia CIRP*, vol. 94, pp. 655–660, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.09.102.

- [9] F. Caiazzo and V. Alfieri, "Optimization of laser beam welding of steel parts made by additive manufacturing," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 114, 9-10, pp. 3123–3136, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07039-w.
- [10] M. Xu, Y. Chen, T. Zhang, H. Deng, and Di Ji, "Effects of Solution Treatment on Laser Welding of Ti–6Al–4V Alloy Plate Produced through Wire Arc Additive Manufacturing," *Metals*, vol. 10, no. 10, p. 1310, 2020, doi: 10.3390/met10101310.
- [11] R. Zhang *et al.*, "Mechanical properties and microstructure of additively manufactured stainless steel with laser welded joints," *Materials & Design*, vol. 208, p. 109921, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.109921.
- [12] C. Zhang *et al.*, "A comparison between laser and TIG welding of selective laser melted AlSi10Mg," *Optics & Laser Technology*, vol. 120, p. 105696, 2019, doi: 10.1016/j.optlastec.2019.105696.
- [13] A. Biffi, J. Fiocchi, and A. Tuissi, "Laser Weldability of AlSi10Mg Alloy Produced by Selective Laser Melting: Microstructure and Mechanical Behavior," *J. of Materi Eng and Perform*, vol. 28, no. 11, pp. 6714–6719, 2019, doi: 10.1007/s11665-019-04402-7.
- [14] F. Scherillo *et al.*, "Friction Stir Welding of AlSi10Mg Plates Produced by Selective Laser Melting," *Metallogr. Microstruct. Anal.*, vol. 7, no. 4, pp. 457–463, 2018, doi: 10.1007/s13632-018-0465-y.
- [15] A. Schwarz, M. Schleser, B. Gerhards, P. Popoola, and A. Gebhardt, "Welding of additive manufactured AlSi10Mg: Using Laser Welding in a vacuum for high quality weld seams – A new approach to welding LPBF manufactured AlSi10Mg," *SAJIE*, vol. 32, no. 4, 2021, doi: 10.7166/32-4-2513.
- [16] M. Mokhtari, P. Pommier, Y. Balcaen, and J. Alexis, "Laser Welding of AISI 316L Stainless Steel Produced by Additive Manufacturing or by Conventional Processes," *JMMP*, vol. 5, no. 4, p. 136, 2021, doi: 10.3390/jmmp5040136.
- [17] V.-P. Matilainen, J. Pekkarinen, and A. Salminen, "Weldability of Additive Manufactured Stainless Steel," *Physics Procedia*, vol. 83, pp. 808–817, 2016, doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.083.
- [18] S. V. Sajadifar *et al.*, "On the Friction Stir Processing of Additive-Manufactured 316L Stainless Steel," *Adv Eng Mater*, vol. 24, no. 10, p. 2200384, 2022, doi: 10.1002/adem.202200384.
- [19] M. Akbari and R. Kovacevic, "Joining of elements fabricated by a robotized laser/wire directed energy deposition process by using an autogenous laser welding," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 100, 9-12, pp. 2971–2980, 2019, doi: 10.1007/s00170-018-2891-z.
- [20] *DIN EN ISO 6507-1 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers –*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Juli 2018.
- [21] *DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*, DIN 50125, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Aug. 2022.
- [22] *DIN EN ISO 4136: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Querzugversuch*, DIN EN ISO 4136:2022, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Sep. 2022.
- [23] M. Schäfer, „Laser in der Materialbearbeitung,“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.ifsw.uni-stuttgart.de/dokumente/dissertationen_und_habilitationen/dissertationen/Schaefer_978-3-8316-4742-2.pdf
- [24] J. Schuster, *Heißrisse in Schweißverbindungen: Entstehung, Nachweis und Vermeidung* (Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Habil.-Schr., 2004), 2004. Aufl. (DVS-Berichte 233). Düsseldorf: Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren DVS-Verl., 2004.
- [25] S. Kou, *Welding metallurgy*, 2. Aufl. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2003. Zugriff am: 18. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://ia800208.us.archive.org/31/items/bzbzbzManTech/>