

UNTERSUCHUNGEN ZUM HOCHGESCHWINDIGKEITSSCHWEIßEN MIT BRILLANTER LASERSTRAHLUNG

U. Löschner, S. Schwind, L. Hartwig, F. Ullmann, H. Exner, P. Hübner, A. Eysert
Laserinstitut der Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Abstrakt

In neuester Zeit gewinnen brillante Laserstrahlquellen als Werkzeug für die Materialbearbeitung zunehmend an Interesse. Am Laserinstitut wurde bereits 2008 weltweit erstmalig die Kombination von hoher applizierter Laserleistung einer solchen Strahlquelle und ultraschneller Strahlablenkung im Bereich der Lasermikrobearbeitung demonstriert. Beim Laserstrahlschweißen nutzt man brillante Laserstrahlquellen bisher meist für Mikroschweißanwendungen, ihr Einsatzpotenzial für das Hochgeschwindigkeitsschweißen im Makrobereich hingegen ist noch nicht tiefgreifend erforscht.

In diesem Artikel wird von detaillierten Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitsschweißen zweier verschiedener Stähle mit brillanter Laserstrahlung bis zu einer Laserleistung von 3 kW berichtet. Die schnelle Strahlablenkung erfolgte mit einem Galvanometerscanner. Mit zwei signifikant unterschiedlichen Brennweiten der f-theta-Objektive konnte die Strahlfleckgröße auf dem Material gezielt variiert werden. Die prozessbeeinflussenden Faktoren wie Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit, Materialdicke und Laserstrahlfleckgröße wurden in weiten Bereichen untersucht. Die erzeugten Schweißnähte sind hinsichtlich ihrer Geometrie, der Schweißnahtqualität und metallografischer Merkmale analysiert worden. Anhand dieser Ergebnisse konnten optimale Prozessparameter und -grenzen identifiziert werden.

1. Einleitung

Für den Laserstrahl-tiefschweißprozess sind hohe Intensitäten von 10^6 W/cm² erforderlich. Der Werkstoff wird nicht nur aufgeschmolzen, sondern teilweise verdampft, sodass sich eine Dampfkapillare (engl. Keyhole) in der Schmelze bildet, die dem Laserstrahl über Mehrfachreflexion an der Kapillarwand ein tieferes Vordringen im Material ermöglicht. Gleichzeitig absorbiert die Schmelze die mehrfach auftreffenden Laserstrahlanteile fast vollständig. Damit wird beim Tiefschweißen ein hoher Wirkungsgrad bei gleichzeitig großen Schweißgeschwindigkeiten erreicht.

Das Ergebnis eines Lasertiefschweißprozesses sind sehr schlanke Schweißnähte mit Einschweißstiefen von über 15 mm. In der grundlegenden Arbeit von Weberpals [1] wird gezeigt, dass sich hohe Strahlqualitäten grundsätzlich positiv auf den Schweißprozess auswirken. Eine hohe applizierte Intensität führt zu einer steilen Dampfkapillare und die wiederum zu einer großen Einschweißtiefe. Monomode-Hochleistungsfaserlaserquellen bieten die für den Hochgeschwindigkeits-Laserschweißprozess im makroskopischen Bereich erforderliche hohe Strahlleistung bei gleichzeitig sehr guter Strahlqualität und überwinden damit die existierenden Limits bei Festkörperlaserquellen. Mit Brennweiten von 500 mm sind Fokusdurchmesser von 50 µm und Rayleigh-Längen von einigen Millimetern bei Laserleistungen von mehreren Kilowatt und damit Intensitäten von 10^8 W/cm² möglich.

Je nach Art der Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstückoberfläche unterscheidet man zwei grundlegende Technologien: Beim Remote-Schweißen wird der Laserstrahl mittels eines geeigneten Ablenkensystems, z.B. eines Scanners, in die gewünschte Vorschubrichtung gelenkt [2]. Alternativ ist der Schweißprozess mit einem ruhenden Strahl

möglich, unter dem das Werkstück über ein Handlingsystem bewegt wird. Die für das Hochgeschwindigkeits-Laserschweißen erforderlichen Geschwindigkeiten von ca. 100 m/min können grundsätzlich mit beiden Technologien realisiert werden. Das Remote-Schweißen mit Scanner ermöglicht dabei eine größere Dynamik.

Das größte Problem beim Hochgeschwindigkeits-Laserschweißen stellt das Humping dar [3]. Humping entsteht nicht an der aktuellen Bestrahlungsstelle, sondern am Ende des Schmelzbades durch Schmelzrückfluss in Verbindung mit der laserinduzierten Dampffackel und einer höheren Oberflächenspannung infolge der schmalen Schmelzbadbreite. Hauptursache ist eine periodisch auftretende starke Bewegung des Schmelzbades. Durch den sogenannten Pincheffekt wird ein ungleichmäßiges verflüssigen von Metall begünstigt, wodurch ein unruhiges Schmelzbad entsteht. Der schmale Dampfkanaal verursacht eine hohe Oberflächennormalspannung und verhindert so das weitere Auffüllen aus dem hinteren Nahtbereich. Das geschmolzene Material sammelt sich dort in Tropfenform. Die so gebildeten Tropfen erstarren aufgrund des hohen thermischen Gradienten und der hohen Prozessgeschwindigkeit. Das Material wird sozusagen „eingefroren“ [4,5]. Außerdem kann die inkonstant ausgebildete Plasmafackel zur Ausbildung von Humping beitragen. Die Laserstrahlung wird in einem dichteren Plasma stärker absorbiert, wodurch nur noch ein geringerer Leistungsanteil bis zum Werkstück vordringt. Dadurch wird weniger Werkstoff verdampft bzw. in den Plasmazustand überführt, die Absorption im Plasma sinkt und es kann wieder stärker eingeschweißt werden. Der Prozess beginnt nun von neuem.

Das Auftreten des Effekts hängt vom Strahlfleckdurchmesser, der applizierten Laserleistung und der Schweißgeschwindigkeit ab. Kleinere Strahlfleckdurchmesser, höhere Laserleistungen und größere Schweißgeschwindigkeiten begünstigen die Entstehung von Humping. Dies muss bei der Verfahrensentwicklung beachtet werden. In [6,7] wird berichtet, dass mit einem kleinen Fokusbereich von 24 µm zwar Schweißgeschwindigkeiten von 100 m/min bei großen Aspektverhältnissen von > 1:15 erreicht werden können, die Qualität der Schweißnähte aber durch zunehmende Kerbwirkung und Auftreten von Humping eingeschränkt ist. Mit der Applikation von kleineren Fokusbereichen kann die Schweißgeschwindigkeit um den gleichen Faktor gesteigert werden wie sich der Fokusbereich verkleinert, ohne Einbußen der Schweißnahtqualität hinnehmen zu müssen [8].

Das Schweißen mit hochbrillanter Laserstrahlung wurde bisher vorrangig im Mikrobereich untersucht. Diese Untersuchungen sollen auf den Makrobereich erweitert werden, z.B. bei Schweißverbindungen an Getriebeteilen im Fahrzeugbau. Das Hochgeschwindigkeits-Laserschweißen setzt gerade an den bisher bekannten technologischen Grenzen an. Dieser Artikel berichtet über Ergebnisse zum Hochgeschwindigkeits-Laserschweißen mit einer Monomode-Faserlaserquelle. Durch eine breite Variation der Prozessparameter wurden geeignete Parameterbereiche identifiziert und die Verfahrensgrenzen ausgetestet.

2. Experimentelle Details

Die Untersuchungen wurden mit einer im kontinuierlichen Betrieb bei einer mittleren Wellenlänge von 1070 nm arbeitenden Monomode-Faserlaserquelle mit einer Laserleistung von bis zu 3 kW am Laserzugang durchgeführt. Zur schnellen Strahlablenkung und -fokussierung diente ein speziell auf hohe Scangeschwindigkeiten ausgelegter Galvanometer-scanner mit leichten SiC-Spiegeln in Verbindung mit zwei f-theta-Objektiven verschiedener Brennweiten. Ausgewählte Kennwerte des optischen Systems sind in Tab.1 aufgeführt.

Brennweite [mm]	230	500
Strahlfleckdurchmesser [µm]	21	65
Scangeschwindigkeit [m/s, m/min]	20	43
	1.200	2.580
Spitzenintensität (2,5 kW) [10^8 W/cm ²]	14,4	1,5

Tab.1: Kennwerte des optischen Systems:

Als Probenmaterial dienten ein vollständig austenitischer Edelstahl X5CrNi18-10 (1.4301) und ein kaltgewalzter, verzinkter mangan- und borlegierter vollständig martensitischer Vergütungsstahl 22MnB5 mit Dicken von 1 bis 3 mm. In den Untersuchungen

wurde die Abhängigkeit des Schweißprozess unter Variation wichtiger Prozessparameter, wie applizierte Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit, Strahlfleckgröße und Materialdicke und -art detailliert mit der Maßgabe untersucht, stets eine Durchschweißung zu erzielen. Um ein Minimum an statistischer Sicherheit zu gewährleisten, sind mit jedem Parametersatz 4 Schweißnähte hergestellt worden. Die Schweißnähte wurden im Anschluss hinsichtlich Nahtgeometrie und Schweißnahtunregelmäßigkeiten beurteilt.

3. Ergebnisse und Diskussion

In einer ersten Untersuchungsreihe wurde die Laserleistung beginnend bei 920 W schrittweise erhöht und dabei die jeweils größtmögliche Schweißgeschwindigkeit ermittelt, die noch eine durchgängige Naht mit homogener Wurzelbildung über die gesamte bestrahlte Länge gewährleisten konnte. Dabei fiel auf, dass bei bestimmten Parameterbereichen die Wurzelbildung unetwig erfolgte und das Material nur teilweise durchgeschweißt war, vgl. Abb.1.

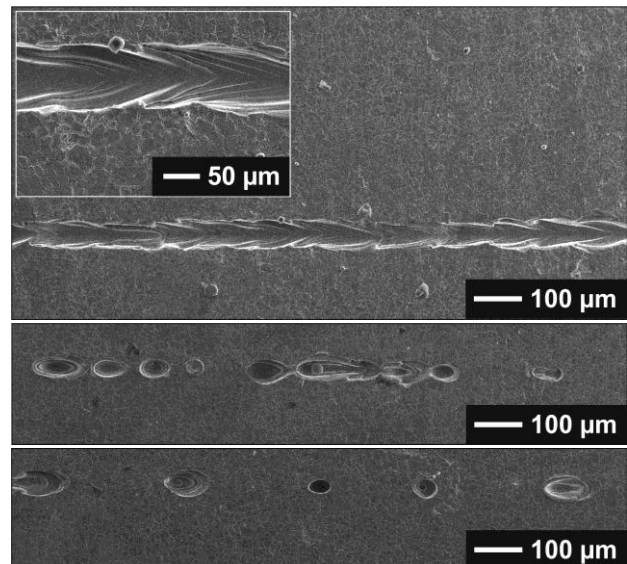


Abb.1: Schweißnahtrückseiten an Edelstahlblech Dicke 1,5 mm, oben: homogen ausgebildete Wurzel, Mitte: unetwig ausgebildete Wurzel - beginnendes Spiking, unten: ausschließlich Spiking

Dieses Verhalten wird als Spiking bezeichnet. In [9] wird berichtet, dass das Auftreten des Spiking-Effekts von der applizierten Strahlspitzenintensität und -leistung bestimmt wird. Beim Schweißen mit hohen Strahlspitzenintensitäten ist das Einsetzen des Spikings von der Lage der Strahlfokusebene bezüglich des parabolisch ausgebildeten Bodens der Dampfkapillare abhängig [10]. Durch unterschiedliche Reflexions- und Absorptionsverhältnisse an den Wänden und am Boden der Kapillare infolge einer Relativbewegung zwischen Fokusebene und Kapillarboden kann es zu verstärkter und periodischer Schmelzausbildung kommen. Damit variiert die Schweißtiefe entlang der Naht – es tritt Spiking auf. Solche teilweise durchgeschweißten Nähte wurden deshalb als nicht durchgeschweißt gewertet. Abb.2 zeigt für Edelstahlblech der Dicke 1 mm und

3 mm größtmöglich erzielte Schweißgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der applizierten Strahlleistung bei einer Strahlfleckgröße von 65 µm. Die Schweißnahtqualität blieb dabei unberücksichtigt.

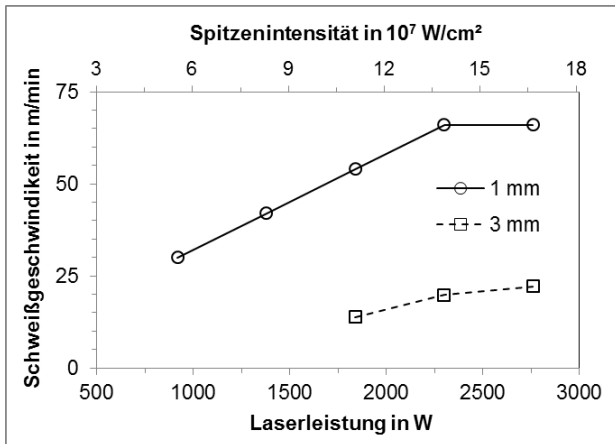


Abb.2: erzielte maximale Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der applizierten Laserleistung beim Schweißen von Edelstahlblech (Parameter: Blechdicke 1 mm und 3 mm, Strahlfleckdurchmesser 65 µm)

Aus dem Diagramm ist zu entnehmen, dass beträchtlich höhere Laserleistungen von mindestens 1,8 kW und damit Strahlspitzenintensitäten größer $1,1 \cdot 10^8$ W/cm² notwendig waren, um das dickere Blech durchschweißen zu können. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die Schweißgeschwindigkeit bei gleicher Blechdicke mit zunehmender Laserleistung erhöht werden kann. So ließ sich die Schweißgeschwindigkeit beim 1 mm dicken Blech auf 66 m/min bei einem Leistungseinsatz von 2,3 kW steigern. Für das 3 mm dicke Blech konnte mit der am Bearbeitungsort maximal zu Verfügung stehenden Laserleistung von 2,8 kW eine maximale Schweißgeschwindigkeit von 24 m/min erzielt werden. Für beide Blechdicken deutet sich in der grafischen Darstellung an, dass die Zunahme der maximal erzielbaren Schweißgeschwindigkeit bei größeren Laserleistungen geringer ausfällt und im weiteren Verlauf eine Stagnation zu erwarten ist. Einen Überblick zu den erreichten maximalen Schweißgeschwindigkeiten bei den verschiedenen Blechdicken und Stählen in

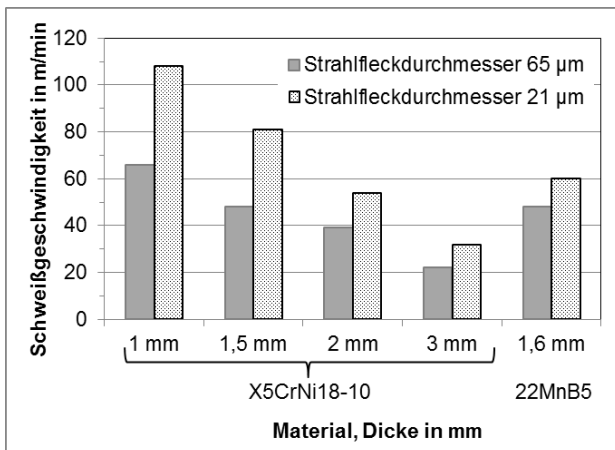


Abb.3: erreichte maximale Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Blechdicke, Material und Strahlfleckdurchmesser

Abhängigkeit vom Strahlfleckdurchmesser zeigt Abb.3. Die grafische Darstellung verdeutlicht erwartungsgemäß, dass bei beiden Strahlfleckdurchmessern mit dünneren Blechdicken größere Schweißgeschwindigkeiten möglich sind. Eine detailliertere Analyse der Werte bestätigte den bekannten hyperbolischen Zusammenhang zwischen Materialdicke bzw. Einschweißtiefe und Schweißgeschwindigkeit. Die Ergebnisse zum größeren Strahlfleckdurchmesser wurden durchweg mit einer Laserleistung von 2,8 kW respektive einer Spitzenintensität von $1,7 \cdot 10^8$ W/cm² generiert, die zum kleineren Strahlfleckdurchmesser für Blechdicken bis 1,5 mm mit 2,3 kW bzw. $1,3 \cdot 10^9$ W/cm² und die größeren Blechdicken mit 2,8 kW bzw. $1,6 \cdot 10^9$ W/cm².

Nachdem geeignete Parameterbereiche für das Durchschweißen identifiziert werden konnten, erfolgte eine Beurteilung der erzeugten Schweißnähte. Zunächst sind die Nähte hinsichtlich aufgetretenen Humpings, eine die Schweißnahteigenschaften negativ beeinflussende Begleiterscheinung, analysiert worden.

Humping tritt bei Veränderung der Parameterbereiche nicht abrupt, sondern allmählich auf. Es wurde ein Übergangsbereich von gewohnter Nahtüberhöhung zu vereinzelt, unregelmäßig und sehr schwach ausgebildeten Humps beobachtet, vgl.

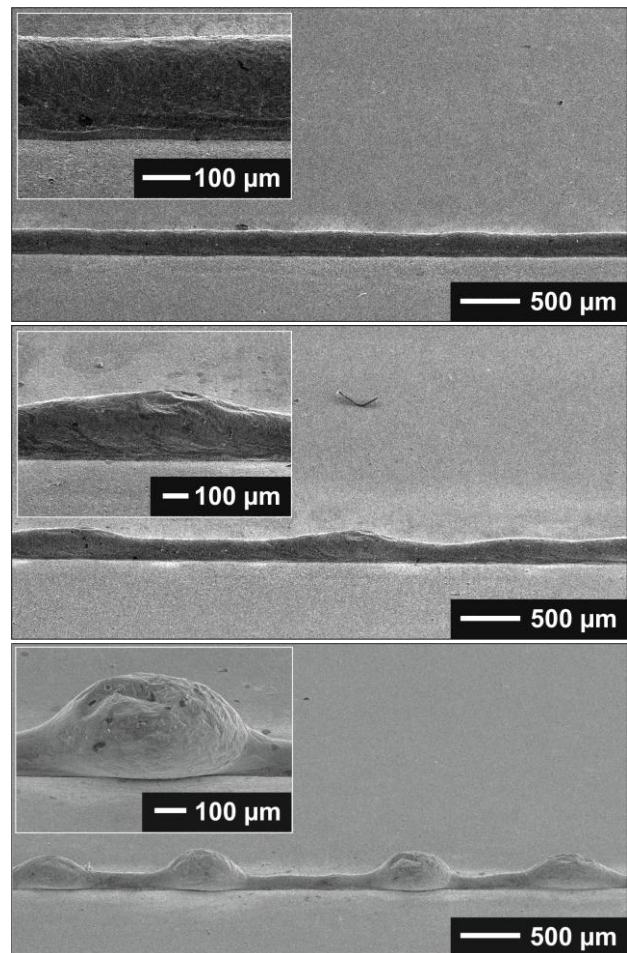


Abb.4: Schweißnahtvorderseiten an Edelstahlblech der Dicke 1,5 mm, oben: homogene Naht mit normaler Nahtüberhöhung, Mitte: beginnendes Humping, unten: ausgeprägtes homogenes Humping mit regelmäßigem periodischen Abstand der einzelnen Humps

Abb.4 oben und Mitte. Mit steigender Schweißgeschwindigkeit und applizierter Intensität entwickelt sich zunehmend homogenes Humping. Die Humping-Buckel entstehen in einem regelmäßigen periodischen Abstand von ca. 1,3 mm, s. Abb.4 unten. Eine weitere Erhöhung dieser beiden Parameter führt jedoch zu ungleichmäßigem Humping bis hin zu massiver Spritzerbildung. Das Auftreten von Humping kann Prozessparameterbereichen zugeordnet werden. Abb.5 zeigt die Abhängigkeit des Humping-Effekts von den Prozessparametern Laserleistung bzw. Spitzenintensität

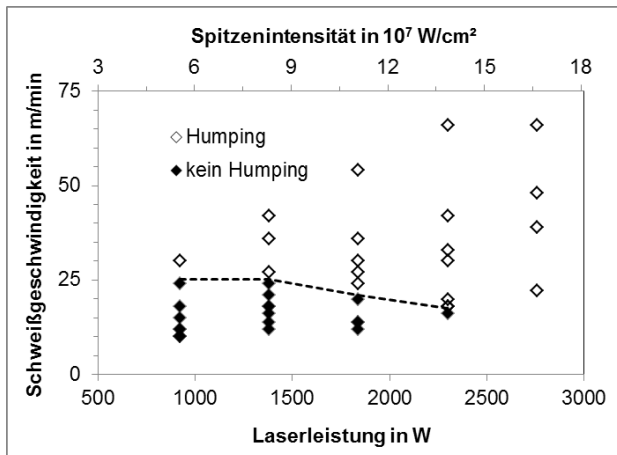


Abb.5: in Abhängigkeit von Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit auftretender Humping-Effekt bei Edelstahlblech (Parameter: $2w_0 = 65 \mu\text{m}$)

und Schweißgeschwindigkeit für Edelstahlblech unabhängig von der Blechdicke bei einer Strahlfleckgröße von $65 \mu\text{m}$. Das Auftreten von Humping wird von der applizierten Laserleistung und der Schweißgeschwindigkeit beeinflusst. Beispielsweise wurde Humping in den Untersuchungsergebnissen in Abb.5 bei einer Laserleistung von 920 W und einer Schweißgeschwindigkeit oberhalb von 24 m/min beobachtet. Bei größeren Laserleistungen von z.B. 2,3 kW sank die für humpingfreies Schweißen nutzbare Schweißgeschwindigkeit auf 16,2 m/min. Zusätzlich ergibt sich eine Abhängigkeit des Humpings in Verbindung mit der applizierten Laserleistung bzw. Spitzenintensität für verschiedene Einschweißiefen, repräsentiert durch die Blechdicken, vgl. Abb.6. Von der Schweißgeschwindigkeit unabhängig setzt Humping für eine bestimmte Blechdicke respektive Einschweißtiefe oberhalb einer gewissen Laserleistung bzw. Spitzenintensität ein. Beispielsweise konnte ein 1,5 mm dickes Edelstahlblech bis zu einer Leistung von knapp 1,4 kW humpingfrei geschweißt werden. Im untersuchten Parameterbereich besteht in guter Näherung eine lineare Abhängigkeit für die Humping-Grenze. Im Vergleich weist der niedriglegierte Mangan-Borstahl eine stärkere Neigung zum Humping auf. Die größtmögliche Schweißgeschwindigkeit ohne Humping-Effekt betrug 15 m/min bei einer Laserleistung von 1,4 kW respektive einer Spitzenintensität von $8,3 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ und passt bezüglich der Blechdicke zu den Werten in Abb.6. Die Schweißgeschwindig-

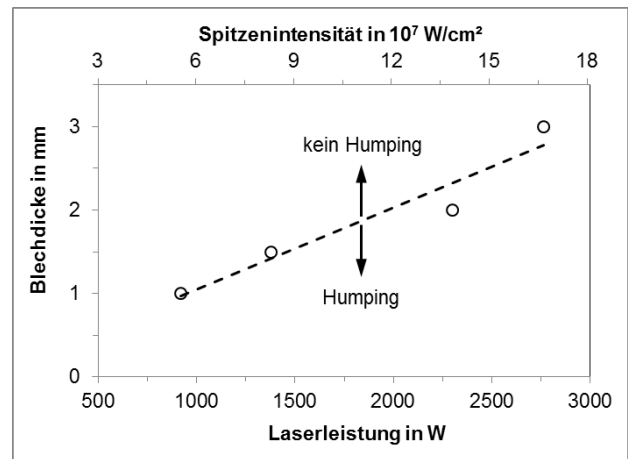


Abb.6: Humping in Abhängigkeit von Blechdicke und Laserleistung (Parameter: $2w_0 = 65 \mu\text{m}$, Material Edelstahl)

keit liegt jedoch unter jener von Edelstahl bei vergleichbaren Parametern. Das Humping hängt demnach, wie in [4] berichtet, auch von den Werkstoffeigenschaften, wie thermische Eigenschaften oder Viskosität und von den Legierungselementen ab, die entscheidenden Einfluss auf das Schmelzbad und seine Dynamik haben.

Untersuchungen mit der Brennweite 230 mm führten immer zu humpingbehafteten Schweißnähten. Bei der niedrigsten applizierten Leistung von 920 W betrug die Strahlspitzenintensität bereits $5,3 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ und lag um knapp eine Größenordnung über den Werten, die bei einer Brennweite von 500 mm entstanden. Offensichtlich hängt das Auftreten von Humping ebenfalls noch von der applizierten Spitzenintensität der Laserstrahlung ab. Dabei steigt die Humping-Neigung bei höheren Spitzenintensitäten an.

An den geschweißten Proben wurde anschließend die Nahtgeometrie beurteilt. Prinzipiell wiesen alle Nähte eine Nadelform auf, s. Abb.7. Für beide Materialien in gleicher Weise zutreffend war das Gefüge

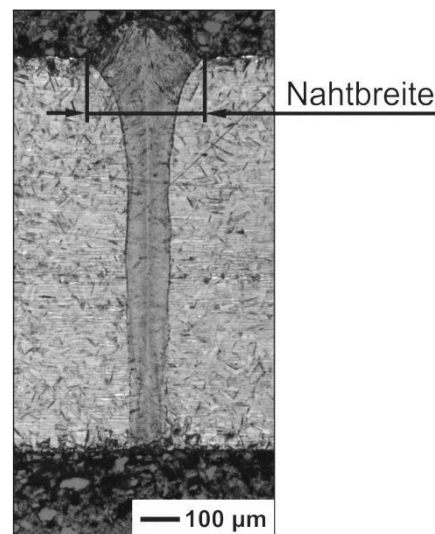


Abb.7: Querschliffpräparation einer Schweißnaht in 1 mm dickem Edelstahlblech (Parameter: $P_{\text{cw}} = 920 \text{ W}$, $v = 18 \text{ m/min}$, $2w_0 = 65 \mu\text{m}$)

in der Naht homogen und unterscheidet sich hinsichtlich Korngröße und -form nicht vom Grundmaterial.

Aufgrund der Vorgabe, das Material durchzuschweißen, entsprach die Einschweißtiefe der Blechdicke. Die Nahtbreite wurde an der Blechoberfläche gemessen, vgl. Abb.7. In Abb.8 ist der Zusammenhang zwischen Schweißgeschwindigkeit und Nahtbreite in Abhängigkeit von der applizierten Laserleistung für

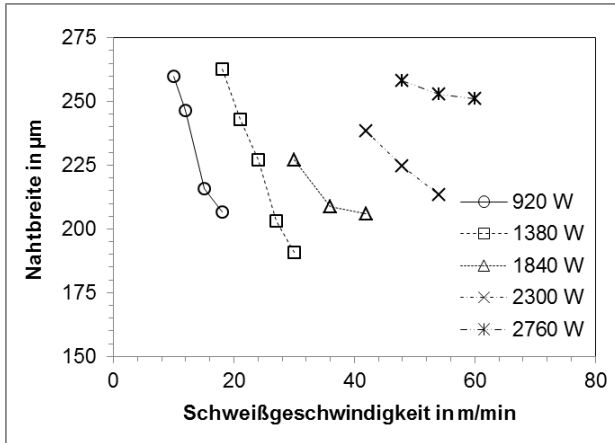


Abb.8: Nahtbreite in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit für verschiedene Laserleistungen (Parameter: $2w_0 = 65 \mu\text{m}$, Edelstahl Dicke 1,5 mm)

Edelstahlblech der Dicke 1,5 mm grafisch dargestellt. Generell sank die Nahtbreite mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit bei konstanter Laserleistung. Mit zunehmender Laserleistung fiel die Abnahme der Nahtbreite jedoch sukzessive geringer aus. Tendenziell waren mit steigender Laserleistung und damit höherer Spitzenintensität bei gleicher Schweißgeschwindigkeit größere Nahtbreiten zu verzeichnen. Ursache dafür ist in erster Linie der zunehmende wirkende Strahlradius für die Intensitätsschwelle zum Schmelzen infolge erhöhter Laserleistung bzw. Spitzenintensität. Die Nahtbreiten betragen für diese Versuchsreihe ca. 260 μm im Maximum. Daraus ergibt sich ein Aspektverhältnis von



Abb.9: Schweißnaht mit Nahtüberhöhung und Wurzelrückfall (Parameter: $2w_0 = 65 \mu\text{m}$, Edelstahl)

1:6. Bei 3 mm Blechdicke stieg die Nahtbreite bis auf maximal 400 μm an. Der 1,6 mm dicke Mangan-Borstahl zeigte ähnliche Nahtbreiten. Mit dem kleineren Strahlfleckdurchmesser der kurzbrennweitigeren Optik entstanden erwartungsgemäß geringere Nahtbreiten von weniger als 300 μm bei einer Blechdicke von 3 mm.

Weiterhin wurden die Schweißnähte hinsichtlich Nahtunregelmäßigkeiten nach ausgewählten Kriterien, wie Nahtüberhöhung und Wurzelüberhöhung/-rückfall gemäß DIN EN ISO 13919-1 analysiert, s. Abb.9. Die Bestimmung der Nahtüberhöhung erfolgte ausschließlich an humpingfreien Schweißnähten. Abb.10 zeigt den Zusammenhang zwischen Nahtüberhöhung und Materialdicke für Schweißnähten

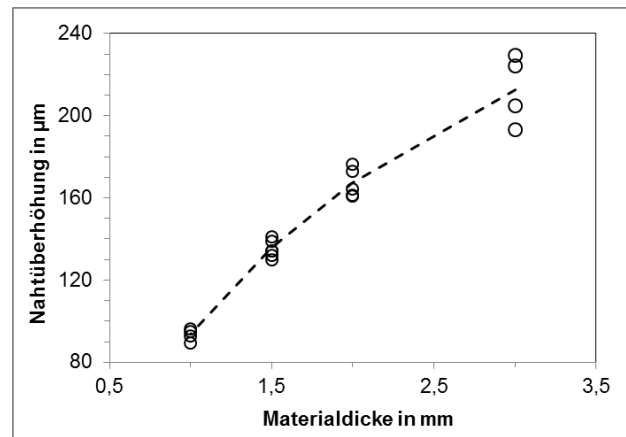


Abb.10: Nahtüberhöhung in Abhängigkeit von der Materialdicke (Parameter: $2w_0 = 65 \mu\text{m}$, Edelstahl)

te, die mit einem Strahlfleckdurchmesser von 65 μm erzeugt wurden. Unabhängig von der applizierten Laserleistung und der Schweißgeschwindigkeit nahm die Nahtüberhöhung beginnend von knapp 100 μm bei 1 mm Blechdicke stetig bis zu ca. 200 μm bei 3 mm Blechdicke zu. Das Material, das die Nahtüberhöhung ausbildet, muss der Schweißnaht entstammen, wie man aus Abb.7 entnehmen kann. Weil sich das Gefüge durch den Schweißprozess nicht verändert hat, muss das Material aus Gründen der Volumenkonstanz demzufolge quer zur Schweißnaht eine Kontraktion erfahren haben. Dieser Kontraktionseffekt dürfte bei größeren Materialdicken sukzessive schwächer ausfallen, weil der Widerstand der umgebenden kälteren Materialbereiche ansteigt. Infolgedessen ist der Kurventrend leicht degressiv. Für die mit dem kleineren Strahlfleckdurchmesser von 21 μm generierten Schweißnähte konnten aufgrund des durchgängigen Auftretens von Humping keine Nahtüberhöhungen ermittelt werden.

Für die Ausbildung von Wurzelüberhöhung bzw.-rückfall mit dem größeren Strahlfleckdurchmesser von 65 μm ergab sich eine tendenzielle Abhängigkeit zur applizierten Spitzenintensität, s. Abb.11. Mit zunehmender Spitzenintensität schlug die Wurzelüberhöhung bei allen Dicken in einen Wurzelrückfall um, d.h. die Wurzel lag rückwärtig im Material. Dabei neigte der Mangan-Borstahl 22MnB5 am stärksten zum Wurzelrückfall. Grund für den Wurzelrück-

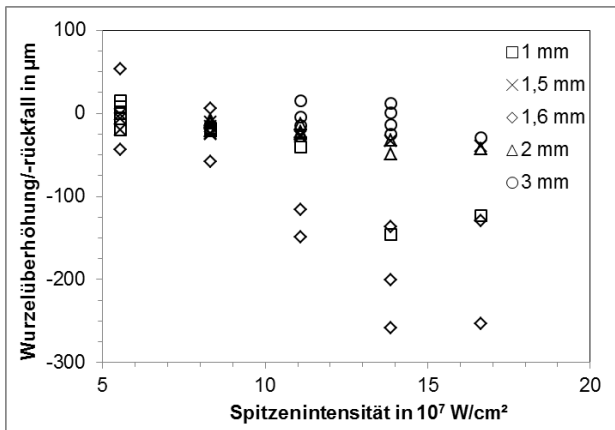


Abb.11: Wurzelüberhöhung/-rückfall in Abhängigkeit von der Spitzenintensität (Parameter: $2w_0 = 65 \mu\text{m}$, Edelstahl Dicke 1-3 mm und 22MnB5 Dicke 1,6 mm)

fall dürfte die heißere und damit niedrigviskosere Schmelze sein, die durch den Druck in der Dampfkapillare zum Teil nach unten ausgetrieben wird und somit in der Naht fehlt. Dies äußerte sich in den Experimenten durch stärkeren Funkenflug an der Nahrückseite bei höheren Laserleistungen und damit Spitzenintensitäten.

Für die Untersuchungen mit dem kleineren Strahlfleckdurchmesser von $21 \mu\text{m}$ ergaben sich für die Wurzel Ausbildung ähnliche Tendenzen.

4. Zusammenfassung

Dieser Artikel berichtet über detaillierte Ergebnisse zum Hochgeschwindigkeitsschweißen von Stahl mit Laserscanner und hochbrillanter Laserstrahlung. Unter der Maßgabe, die jeweilige Blechdicke durchzuschweißen, wurden die Prozessparameter Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit in weiten Bereichen variiert und die größtmöglichen Schweißgeschwindigkeiten ermittelt. In Abhängigkeit der Blechdicke konnten für 1 mm dickes Material Schweißgeschwindigkeiten von mehr als 60 m/min (Strahlfleckgröße $65 \mu\text{m}$) bzw. 100 m/min (Strahlfleckgröße $21 \mu\text{m}$) mit Laserleistungen von 920 W bis 2,8 kW umgesetzt werden. In Abhängigkeit von den gewählten Prozessparametern stellte sich jedoch insbesondere bei hohen Spitzenintensitäten und Schweißgeschwindigkeiten Humping ein. Damit reduzierte sich die maximal erzielbare Schweißgeschwindigkeit für humpingfreie Nähte auf 25 m/min. Die Schweißnähte wurden nach verschiedenen Qualitätskriterien beurteilt. Das Gefüge in der Schweißzone zeigte für beide Stähle keinerlei Veränderungen gegenüber dem Grundwerkstoff. Die Nahtbreite betrug maximal $400 \mu\text{m}$ für das 3 mm dicke Blech, die Nahtüberhöhung variierte zwischen $100 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$ für das 1 mm bzw. 3 mm dicke Blech. Für beide Strahlfleckdurchmesser konnte für Edelstahl eine zunehmende Tendenz zum Wurzelrückfall bei höheren Intensitäten festgestellt werden. Der Mangan-Bor-Stahl neigt stärker zum Wurzelrückfall.

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt dem BMBF für die Förderung der Technologieentwicklung (Förderkennzeichen 03IP506 und 03IPT506X).

Literaturverzeichnis

- [1] Weberpals, J.-P.: „Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserschweißen“, deutsche Dissertation, Universität Stuttgart (2010), ISBN 978-3-8316-0995-6
- [2] Klotzbach, A.; Hartmann, A.; Morgenthal, L.: „Laserstrahlschweißen im kW-Leistungsbereich durch schnelle Strahlablenkung“, 13. Internationale Wissenschaftliche Konferenz Mittweida, Scientific reports: Journal of the Mittweida University of Technology and Economics (1998), Nr.9 - Lasertechnik, S. 149-156
- [3] Berger, P.; Hügel, H.; Hess, A.; Weber, R.; Graf, T.: „Understanding of Humping Based on Conservation of Volume Flow“, Physics Procedia 12 (2011), pp. 232-240
- [4] Wie, P. S.; Chuang, K.C.; Ku, J.S.; DebRoy, T.: „Mechanisms of Spiking and Humping in Keyhole welding“, IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, vol. 2, no.3 (2012), pp. 383-394
- [5] Kawahito, Y.; Mizutani, M.; Katayama, S.: „Investigation of High Power Fiber Laser Welding Phenomena of Stainless Steel“, Transactions of Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Vol.36 No.2 (2007), pp. 11-15
- [6] Kittel, S.: „Welding with brilliant lasers - prospects and limitations for industrial applications“, 4th International Workshop on Fiber Lasers, November 5-6 (2008), Dresden, Germany
- [7] Kittel, S.; Dausinger, F.: „Welding with Brilliant Lasers: Prospects and Limitations“, Proceedings of SPIE, Vol. 7585 (2010), 758502
- [8] Berger, P.: „Modellierung des Laserstrahlschweißens - Ein Weg zum Prozessverständnis“, Laser Technik Journal April 2007, Nr.2 (2007), S. 31-34
- [9] Armstrong, R.E.: „Control of spiking in partial penetration electron beam welds“, Weld. J., vol. 49, no. 8, Oct. 1970, pp. 382-388
- [10] Wei, P.S.; Ho, C.Y.: „Beam focusing characteristics effect on energy reflection and absorption in a drilling or welding cavity of paraboloid of revolution“, Int. J. Heat Mass Transf., vol. 41, no. 21 (1998), pp. 3299-3308