

Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeits-Mikro-SLM unter Einsatz eines Polygonspiegelscanners

Florian Heinrich, Martin Erler, André Streek
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Mittweida, Deutschland

Der Einsatz von Polygonspiegelscannern zur ultraschnellen Strahlableitung im Mikro-SLM besitzt das Potential, die Effizienz dieses Fertigungsverfahrens um ein Vielfaches zu steigern. Durch die hohen Scangeschwindigkeiten von bis zu 100 m/s kann die Bestrahlungszeit deutlich reduziert werden, ohne dabei die hohe Auflösung des Verfahrens zu beeinträchtigen. In ersten Untersuchungen zeigte sich, dass aufgrund der kurzen Wechselwirkungszeiten im Bereich einiger 100 ns und der Verwendung von hohen mittleren Laserleistungen die Verdampfung von Pulvermaterial den für die Schichtbildung maßgeblichen Prozess darstellt. Die so entstehenden Schmelzspuren weisen eine inhomogene Oberflächenstruktur sowie eine hohe Porosität auf. Durch die Anpassung der Prozessparameter konnten dennoch Strukturbreiten kleiner 100 μm und relative Dichten größer 94 % erzeugt werden.

1. Einleitung

Die additive Fertigung als innovative und zukunftssträchtige Technologie gewann über die letzten Jahre stetig an Relevanz. Insbesondere pulverbettbasierte Verfahren zur Herstellung metallischer Komponenten besitzen einen großen Anteil an dieser Entwicklung [1]. Das Mikro-SLM als eine Weiterentwicklung des Selektiven Laserstrahlschmelzens (SLM) ermöglicht dabei die Generierung von metallischen Bauteilen mit Strukturgrößen von unter 50 μm und stellt einen Fokuspunkt der aktuellen Forschungsbemühungen dar [2]. Als Kompromiss für die hohe Auflösung musste bisher eine geringere Produktivität in Kauf genommen werden, da aufgrund der notwendigen Reduzierung des Fokusbereichs auf unter 40 μm und der Schichtdicke auf unter 10 μm die Volumenbaurrate des Mikro-SLM um ein Vielfaches kleiner ist als die des herkömmlichen SLM [3,4]. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Volumenbaurrate unter gleichzeitiger Beibehaltung der hohen Auflösung des Verfahrens ist die Vergrößerung der Scangeschwindigkeit, welche einen der wichtigsten Prozessparameter in der lasergestützten additiven Fertigung darstellt. Übliche Werte für die Scangeschwindigkeit im Mikro-SLM betragen 1 – 2 m/s. Der Einsatz eines Polygonspiegelscanners zur ultraschnellen Strahlableitung ermöglicht die Erhöhung der Scangeschwindigkeit auf über mehr als 100 m/s und besitzt somit das Potential, die Produktivität des Mikro-SLM um ein Vielfaches zu steigern [5]. Allerdings ist es für einen erfolgreichen Bauprozess notwendig, eine Mindestmenge an Energie in das Pulver einzubringen, um sowohl das Pulver wie auch einen Teil des unter dem Pulver befindlichen festen Materials aufzuschmelzen, um während der Erstarrung der Schmelze eine stoffschlüssige Verbindung zu erzeugen [6]. Dies erfordert bei der Nutzung der hohen Scangeschwindigkeiten eine deutliche Erhöhung der mittleren Laserleistung [5].

Das Ziel dieser Arbeit war es, einen ersten systematischen Überblick über das Prozessverhalten und die

erzeugbaren Bauteileigenschaften des Hochgeschwindigkeits-Mikro-SLM bei der Nutzung von ultrahohen Scangeschwindigkeiten und hohen mittleren Laserleistungen zu verschaffen.

2. Versuchsaufbau und Material

Alle Versuche wurden auf einer Mikro-SLM-Forschungsanlage durchgeführt, welche mit einem 400 W Faserlaser des Herstellers IPG ausgestattet ist. Der Laserstrahl besitzt eine Wellenlänge von 1070 nm, ein M^2 von 1,19 und wird mithilfe einer F-Theta-Optik auf einen Durchmesser von 23 μm fokussiert. Die Strahlableitung erfolgt über einen selbstentwickelten Polygonspiegelscanner, dessen Aufbau und Funktionsweise in Abbildung 1 dargestellt ist. Der Strahl wird durch einen rotierenden Polygonspiegel auf einer Linie entlang der sogenannten fast axis auf der Bearbeitungsfläche abgelenkt. In dieser Richtung werden die charakteristischen ultrahohen Scangeschwindigkeiten erreicht. Ein Galvanometerspiegel ist für die Ablenkung des Strahls entlang der slow axis und damit für die parallele Versetzung der durch den Polygonspiegel erzeugten Linien verantwortlich.

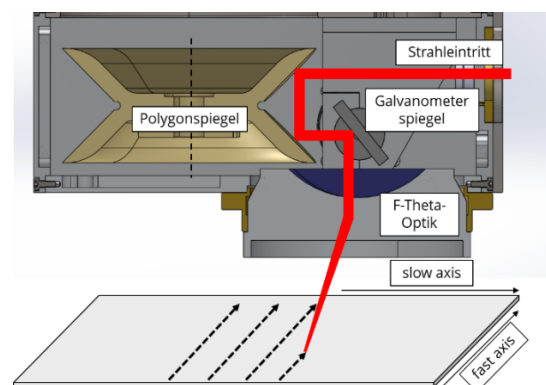


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Funktionsweise des genutzten Polygonspiegelscanners.

Durch die linienhafte Bearbeitung ist ein Polygonscanner im Vergleich zu einem Galvanometerscanner nicht in der Lage, gekrümmte Konturen zu bestrahlen. Ebenso

ist keine bidirektionale Bestrahlung oder Drehung der Bestrahlungsrichtung möglich. Der realisierbare Scangeschwindigkeitsbereich ist abhängig von der Drehzahl, mit welcher der Polygonspiegel konstant rotieren kann, und der Brennweite der F-Theta-Optik. Die minimale Scangeschwindigkeit betrug in den Untersuchungen 50 m/s.

Als Material wurde ein Pulver aus Edelstahl 17-4PH mit einer Korngröße von $d_{90} = 10 \mu\text{m}$ des Herstellers Sandvik Osprey verwendet. Der Pulveraufzug erfolgte mit einer Weiterentwicklung des bereits in früheren Veröffentlichungen vorgestellten Druckbeschichters [7]. Der Bauprozess fand unter einer Argonatmosphäre mit einem Sauerstoffgehalt von 0,1 % statt.

3. Erzeugung dünner Wandstrukturen

3.1 Versuchsdurchführung

Das Ziel der ersten Versuche war es, ein Prozessfenster für die Nutzung von ultrahohen Scangeschwindigkeiten anhand von Einzelspuren und die minimalen, erreichbaren Strukturgrößen zu ermitteln. Die Erzeugung dieser Einzelspuren stellte sich allerdings als nicht möglich heraus, da diese sich teilweise bereits während der Bestrahlung, spätestens aber beim Beschichtungsprozess von der Substratplattform ablösten. Erst durch die enge Aneinanderreihung von mindestens vier Bestrahlungslinien konnten feste Strukturen generiert werden. Zur Untersuchung des Einflusses der Scangeschwindigkeit, sowie des Abstandes und der Anzahl der Bestrahlungslinien wurden Wände mit einer Breite von vier bzw. zehn Bestrahlungslinien, sowie Volumenkörper mit den in Tabelle 1 dargestellten Parametern generiert.

Tabelle 1: Untersuchte Parameter für die Erzeugung von Wandstrukturen.

Parameter	Wert
<i>mittlere Laserleistung in W</i>	350
<i>Scangeschwindigkeit in m/s</i>	50, 60, 70, 80, 90, 100
<i>Linienabstand in μm</i>	10, 20
<i>Schichtdicke in μm</i>	5
<i>Anzahl Bestrahlungslinien</i>	4, 10, 100 (Volumen)

Die erzeugten Proben wurden zunächst hinsichtlich ihrer Oberflächenstruktur mithilfe von Rasterelektronenmikroskopie (REM) ausgewertet. Für die Beurteilung der Porosität sowie zur Bestimmung der Wandstärken wurden im Anschluss Querschliffe der Bauteile angefertigt, welche mittels Laserscanningmikroskop fotografiert wurden. Die Messung der Wandstärken erfolgte mit einer Bildbearbeitungssoftware.

3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Grenzen des Prozessfensters konnten in den Versuchen nicht ermittelt werden, da mit allen untersuchten Parametern ein Bauprozess möglich war. Allerdings stellten sich im Prozess häufiger Probleme im Pulveraufzug ein, d.h. dass eine Pulverschicht insbesondere in den Bereichen um und auf den Bauteilen deutlich

erkennbare Fehlstellen aufwies, wodurch es teilweise zur Beschädigung von Bauteilen und damit zum Prozessabbruch kam. Das Auftreten dieses fehlerhaften Pulveraufzugs war zufällig und zeigte keine Abhängigkeit von den genutzten Parametern. Der Grund für dieses Verhalten waren Überhöhungen der Bauteile insbesondere im Bereich der Wandstrukturen (siehe Abbildung 2).

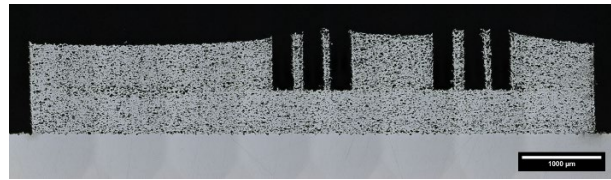


Abbildung 2: Querschliff eines Bauteils mit deutlichen Überhöhungen im Bereich der Wandstrukturen.

Zur Entstehung dieser Überhöhungen kam es aufgrund der starken Verdampfung von Pulvermaterial während der Bestrahlung. Dieses Verhalten lässt sich anhand der Oberflächenmorphologie, sowie der Querschliffe der Wandstrukturen erkennen. In Abbildung 3 ist die REM-Aufnahme sowie der Querschliff einer Wand mit einer Linienanzahl von vier Bestrahlungslinien, einem Linienabstand von $10 \mu\text{m}$ sowie einer Scangeschwindigkeit von 50 m/s dargestellt.

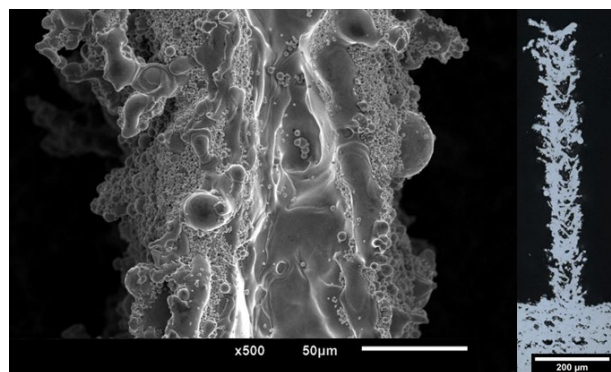


Abbildung 3: REM-Aufnahme der Oberflächenmorphologie (links) und Querschliff (rechts) einer dünnen Wand mit 50 m/s und einer Breite von vier Bestrahlungslinien.

Die Deckfläche weist eine stark inhomogene Nöpfchenstruktur auf, d.h. dass die Ränder der Wand überhöht sind, während sich in der Mitte ein Tal ausgebildet hat. Durch die im Prozess auftretenden hohen Intensitäten kommt es trotz der kurzen Wechselwirkungszeiten zwischen Laserstrahl und Pulverbett zur Verdampfung von Pulver und somit zur Entstehung einer Dampfkapillare in der Mitte der Schmelzspur. Die schmelzförmigen Bestandteile werden durch den so entstandenen Gasdruck seitlich aufgeworfen und bilden nach der Erstarrung die in Abbildung 3 erkennbaren Überhöhungen, während in der Mitte der Spur weniger Material zurückbleibt. Eine Erhöhung der Scangeschwindigkeit hat zur Folge, dass durch die verringerte Wechselwirkungszeit weniger Energie in das Pulver eingebracht und somit weniger Material verdampft wird. Dies lässt sich anhand der Wände erkennen, welche mit einer Scangeschwindigkeit von 100 m/s erzeugt wurden (siehe Abbildung 4). Die

Näpfchenstruktur ist weniger stark ausgeprägt, allerdings ist die Deckfläche weiterhin sehr inhomogen und weist keine einheitlichen Schmelzspuren auf. Bei Betrachtung des Querschliffes fällt auf, dass die Struktur eine deutlich schlechtere vertikale Vernetzung im Vergleich zur in Abbildung 3 dargestellten Wand besitzt, d.h., dass die einzelnen Schichten teilweise keine ausreichende stoffschlüssige Verbindung untereinander ausgebildet haben, da nicht ausreichend Energie in das Pulver eingebracht wurde. Die so entstehende Struktur ist zwar in horizontaler Richtung gut vernetzt und bildet eine geschlossene Deckfläche, weist allerdings im Querschnitt eine deutlich höhere Anzahl an Poren auf.

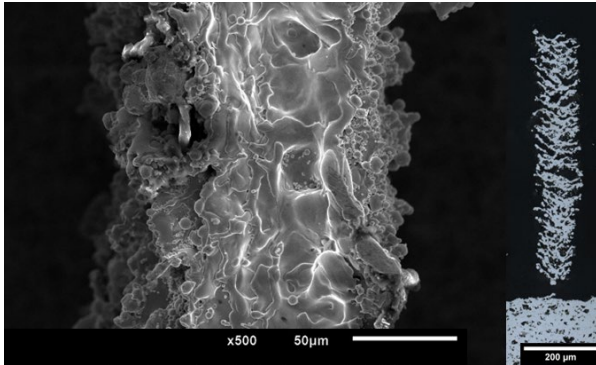


Abbildung 4: REM-Aufnahme der Oberflächenmorphologie (links) und Querschliff (rechts) einer dünnen Wand mit 100 m/s und einer Breite von vier Bestrahlungslinien.

Erst die Erzeugung einer Dampfkapillare durch die Nutzung geringerer Scangeschwindigkeiten ermöglicht die vertikale Vernetzung der Struktur, da der Laserstrahl einerseits tiefer in das Pulverbett eindringen kann und andererseits ein Teil der erzeugten Schmelze durch den Gasdruck nach unten verdichtet wird und so besser eine stoffschlüssige Verbindung mit dem darunter befindlichen festen Material bilden kann. Ein ähnlicher Effekt wurde bereits beim am Laserinstitut Hochschule Mittweida entwickelten Lasermikrosintern beobachtet, bei welchem gütegeschaltete Laserstrahlung, anstatt der im Mikro-SLM üblichen kontinuierlichen Strahlung zum Einsatz kommt [8]. Durch die Nutzung der ultrahohen Scangeschwindigkeiten sind die Wechselwirkungszeiten im Bereich einiger 100 ns allerdings vergleichbar, so dass geschlussfolgert werden kann, dass zur Erzeugung dichter Strukturen bei der Verwendung kurzer Wechselwirkungszeiten eine induzierte Verdampfung von Pulvermaterial notwendig ist.

Die mit dieser Verdampfung einhergehenden Überhöhungen stellen für den Beschichtungsprozess ein Problem dar, da der Beschichter an diesen anstößt. Das Auftreten dieser Überhöhungen nahezu ausschließlich bei den Wandstrukturen lässt sich damit erklären, dass durch die Aneinanderreihung und Überlappung mehrerer Bestrahlungslinien die Überhöhungen schrittweise abgetragen werden. Erst, wenn keine weitere Linie bestrahlt wird, was ausschließlich an den Rändern der Bauteile auftritt, verbleibt die Überhöhung. Dies lässt sich

gut an den Wänden mit einer Breite von zehn Bestrahlungslinien erkennen (siehe Abbildung 5).

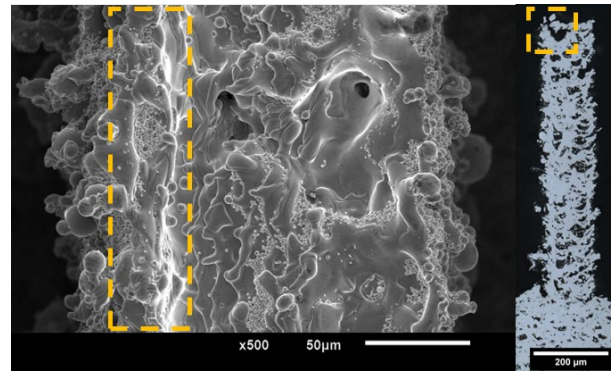


Abbildung 5: REM-Aufnahme der Oberflächenmorphologie (links) und Querschliff (rechts) einer dünnen Wand mit 50 m/s und einer Breite von zehn Bestrahlungslinien. Gelb markiert ist die Überhöhung am linken Seitenrand.

An den Rändern der Wand, insbesondere am linken Rand, sind die Überhöhungen gut zu erkennen. Die Mitte der Wand weist dagegen keine Überhöhung auf und ist, trotz ihrer Inhomogenität, relativ eben. Die Erzeugung der Wandstrukturen war deshalb problematisch, da hier aufgrund der größeren Anzahl an Rändern der Beschichtungsprozess stärker gestört wurde als im Bereich des Vollmaterials, welcher lediglich eine Randüberhöhung aufwies.

Die Ergebnisse der Wandstärkenmessung sind in Abbildung 6 dargestellt. Die geringste gemessene Wandbreite beträgt $68 \pm 2,2 \mu\text{m}$ und wurde mit einer Scangeschwindigkeit von 50 m/s erzeugt. Eine Erhöhung der Scangeschwindigkeit hatte eine Zunahme der Wandstärke zur Folge. Dieses Verhalten lässt sich mit der stärkeren horizontalen Vernetzung erklären, da sich die Schmelze aufgrund des geringeren Gasdrucks besser in dieser Richtung ausbreiten kann.

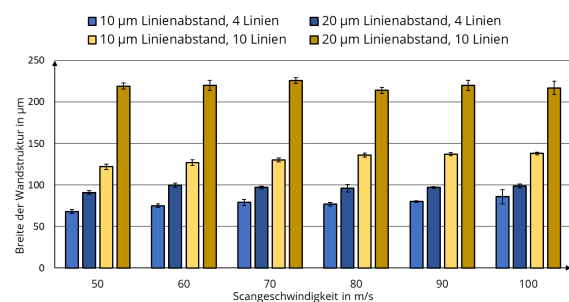


Abbildung 6: Wandbreite in Abhängigkeit von Scangeschwindigkeit, Linienabstand und Anzahl an Bestrahlungslinien.

4. Parameterstudie zur relativen Dichte

4.1 Versuchsdurchführung

Das Ziel der nachfolgend dargestellten Untersuchungen war es, anhand von Messwerten den Einfluss der verschiedenen Prozessparameter auf die realisierbaren Bauteileigenschaften zu ermitteln. Die relative Dichte stellt dabei einen der wichtigsten Werte zur Beurteilung

der Prozessqualität dar und berechnet sich aus dem prozentualen Verhältnis von Bauteildichte zur Dichte des Vollmaterials. Angestrebt werden hohe relative Dichten nahe 100 %. Eine Übersicht über die untersuchten Parameter ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Untersuchte Parameter für die Parameterstudie zur relativen Dichte.

Parameter	Wert
mittlere Laserleistung in W	350
Scangeschwindigkeit in m/s	50, 60, 70, 80, 90, 100
Linienabstand in μm	10, 15, 20
Schichtdicke in μm	3, 5, 10, 15

Es wurden Proben entsprechend des in Abbildung 7 dargestellten Testfeldes in Form einer Stufenpyramide erzeugt. Diese Form wurde gewählt, um in der späteren Auswertung die Unterscheidung zwischen den einzelnen Parametern zu erleichtern.

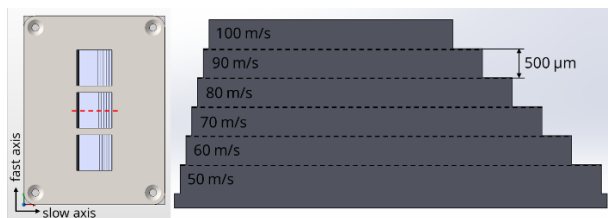


Abbildung 7: Testfeld zur Ermittlung der relativen Dichte mit Anordnung und Ausrichtung der Proben (links) sowie Darstellung des Querschnittes eines Bauteils (rechts).

Von den Proben wurden Querschliffe angefertigt und von diesen mittels Laserscanningmikroskop Aufnahmen gemacht. Die Messung der relativen Dichte erfolgte bildanalytisch, indem der Flächenanteil der Poren an der Gesamtfläche des Querschnittes mithilfe einer Bildbearbeitungssoftware bestimmt wurde.

4.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Messung für eine Schichtdicke von 5 μm sind in Abbildung 8 dargestellt. Wie bereits im vorherigen Kapitel festgestellt, führt eine Erhöhung der Scangeschwindigkeit zu einer Verringerung der relativen Dichte bzw. zu einer Erhöhung der Porosität aufgrund der geringeren, in das Pulver eingebrachten Energie. Ein geringerer Linienabstand hat eine höhere relative Dichte aufgrund der dadurch erzeugten stärkeren Überlagerung der Bestrahlungslinien zur Folge. Allerdings führt dies auch zu einem größeren Anteil an abgetragenem Material, da, wie bereits diskutiert, jede Bestrahlungslinie einen Teil der vorangegangenen, erstarrten Schmelzspur verdampft. Bei Betrachtung der Ergebnisse lässt sich vermuten, dass eine weitere Verringerung des Linienabstandes auf unter 10 μm eine weitere Erhöhung der relativen Dichte ermöglicht. Dies konnte in der hier vorgestellten Arbeit allerdings nicht ausreichend untersucht werden und erfordert daher weiterführende Forschungsbemühungen.

Die höchste relative Dichte bei einer Schichtdicke von 5 μm wurde mit einem Wert von $88,2 \pm 1,4 \%$ gemessen, welcher deutlich unter den angestrebten 100 % liegt.

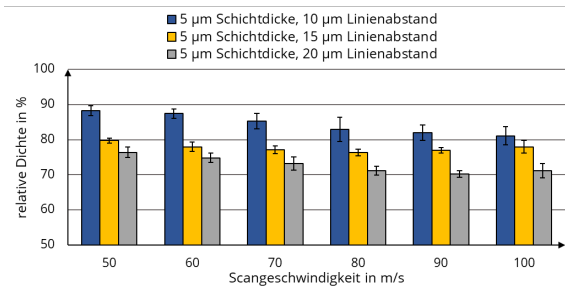


Abbildung 8: Relative Dichte in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit und des Linienabstandes für eine Schichtdicke von 5 μm .

Zur Beurteilung des Einflusses der Schichtdicke sind in Abbildung 9 die relativen Dichten für jede Schichtdicke bei einer Scangeschwindigkeit von 50 m/s und 10 μm Linienabstand sowie die dazugehörigen Querschliffaufnahmen dargestellt.

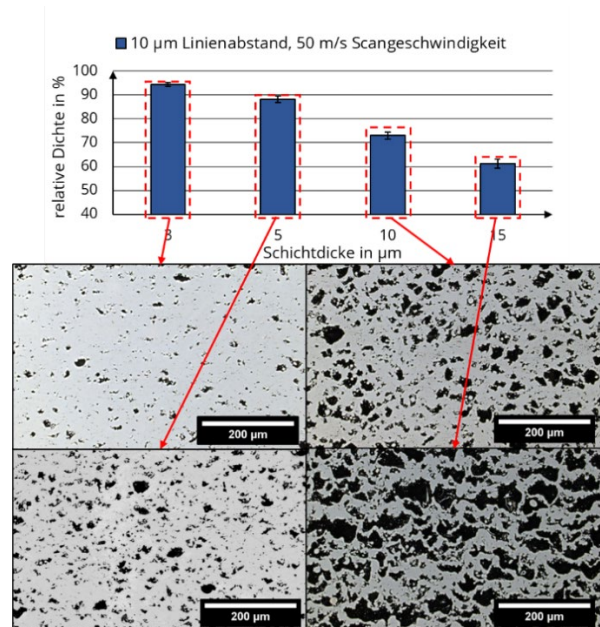


Abbildung 9: Relative Dichte in Abhängigkeit der Schichtdicke für einen Linienabstand von 10 μm und einer Scangeschwindigkeit von 50 m/s.

Es ist klar zu erkennen, dass geringere Schichtdicken höhere relative Dichten ermöglichen. Die in den Untersuchungen höchste gemessene relative Dichte von $94,30 \pm 0,81 \%$ wurde mit einer Schichtdicke von 3 μm erreicht. Die im Prozess für hohe relative Dichten notwendigen hohen Intensitäten führen bei einer Verringerung der Schichtdicke sehr wahrscheinlich neben der Verdampfung von Pulver zur teilweisen Ablation des unter dem Pulver befindlichen festen Materials. Es wird vermutet, dass dadurch Fehlstellen in der vorherigen Schicht ausgeglichen werden können, indem diese Bereiche durch den Abtrag von oben geöffnet werden und die Schmelze der aktuellen Schicht die so entstandenen offenen Poren schließt. Die partielle Ablation der vorherigen Schicht hätte zudem eine Vergrößerung der

Schichtdicke der nächsten Schicht zur Folge. Es wurde bereits gezeigt, dass die tatsächliche Dicke der Pulverschicht im Prozess um ein Vielfaches größer ist als die konstruktive Schichtdicke [5]. Dieser Effekt würde durch das Verdampfen im Hochgeschwindigkeits-Mikro-SLM weiter verstärkt werden. Die sich so selbst einstellende tatsächliche Pulverschichtdicke scheint vorteilhaft für die Erzeugung dichter Strukturen zu sein.

Bei einer Vergrößerung der Schichtdicke zeigen sich in den Querschliffen deutlich porösere Strukturen, da hier trotz der hohen Intensitäten die Pulverschicht nur stellenweise vollständig durchgeschmolzen werden konnte. Dadurch entsteht wieder eine vorrangig horizontale Vernetzung mit einer entsprechend geringen relativen Dichte.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit erfolgten die ersten systematischen Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeits-Mikro-SLM von Edelstahl, bei welchem die ultraschnelle Ablenkung des Laserstrahls mithilfe eines Polygonspiegelscanners realisiert wurde. Dabei stellte sich die

Verdampfung von Pulver- und Substratmaterial als der für das Verfahren entscheidende Prozess heraus.

Durch den entstehenden Gasdruck wird schmelzförmiges Material aufgeworfen und bildet so nach der Erstarrung eine Näpfchenstruktur mit überhöhten Rändern. Durch die Aneinanderreihung und Überlappung mehrerer Bestrahlungslinien können diese Überhöhungen abgetragen werden. In den Untersuchungen stellte sich eine Mindestanzahl von vier Linien heraus und es konnten dünne Wände mit Strukturbreiten von unter 70 µm generiert werden.

Die höchste gemessene relative Dichte lag bei über 94 % und wurde mit einer Schichtdicke von 3 µm sowie einer Scangeschwindigkeit von 50 m/s erzeugt. Die theoretische Volumenbaurrate bei einem Facettennutzungsgrad von 20 % ergibt sich zu einem Wert von 1,08 cm³/h und liegt damit im Bereich des herkömmlichen Mikro-SLM [4]. Allerdings bietet die Polygonscantechnik das Potential, durch eine Erhöhung der Facettenanzahl sowie des optischen Setups, den Facettennutzungsgrad und damit die Produktivität des Hochgeschwindigkeits-Mikro-SLM um ein Vielfaches zu steigern.

Literaturverzeichnis

- [1] AMPOWER Report 2022, S. 4f.
- [2] Schniedenharn, M.; Belting, M.; Batista, R.; Meiners, W.; & Weisheit, A. (2013): Micro scale laser based additive manufacturing for metals, in: *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Laser Institute of America, 2013, S. 661-666.
- [3] Fischer, J.; Kniepkamp, M.; & Abele, E. (2014). Micro laser melting: Analyses of current potentials and restrictions for the additive manufacturing of micro structures, in: *2014 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin.
- [4] Heinrich, F. (2022): Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeits-Mikro-SLM unter Einsatz eines Polygonspiegelscanners (Masterarbeit).
- [5] Streek, A.; Erler, M.; Ebert, R.; & Löschner, U. (2016): Untersuchungen zum Hochrate-Mikro-SLM, in: *Lasermaterialbearbeitung in der digitalen Produktion, DVS-Berichte, 328*, S. 217-226.
- [6] Streek, A. (2017): Lasermikrosintern (Dissertation).
- [7] Drechsel, J.; Erler, M.; Ebert, R.; & Exner, H. (2019): Pulver- und Prozessuntersuchungen für die generative Fertigung von Edelstahlbauteilen mittels Mikro-SLM, in: *Scientific Reports, 11. Mittweidaer Lasertagung*, S. 125-129.
- [8] Regenfuss, P.; Streek, A.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Brabant, T.; Horn, M.; & Exner, H. (2007): Principles of laser micro sintering, in: *Rapid Prototyping Journal, 13(4)*, S. 204-212.