

# Anwendung des metallischen Mikro-3D-Druckes für die Demonstratorherstellung

Julian Drechsel, Martin Erler, Robby Ebert und Horst Exner  
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

*Das am LHM etablierte Verfahren des Mikro-SLM ist eine Weiterentwicklung des bereits seit mehreren Jahren in der Industrie etablierten „makroskopischen“ Selektiven Laserschmelzen (SLM). Unter Verwendung von idealen Parametern wurden unter Zuhilfenahme der VDI3405 Bauteile, Teststrukturen unterschiedlicher Art und Struktur und ein Demonstrator aus den Edelstahlpulvern 316L und 17-4PH angefertigt. Die Besonderheiten des Verfahrens sind der geringe Fokussdurchmesser von  $<30\ \mu\text{m}$  und die geringen Pulverkorngrößen von  $<10\ \mu\text{m}$ . Dadurch können Bauteile mit extrem kleinen Strukturauflösungen realisiert werden.*

## 1. Einleitung

Das am Laserinstitut Hochschule Mittweida etablierte Verfahren des Mikro-SLM basiert auf der Weiterentwicklung des Selektiven Laserschmelzverfahrens [1]. Durch die Verwendung feinerer Pulverkorngrößen können mit Hilfe des Verfahrens kleinere Strukturauflösungen realisiert werden [2]. Für das konventionelle Makro-SLM Verfahren existiert die VDI 3405: „Laser-Strahlschmelzen metallischer Bauteile“ [3]. Die VDI Norm gibt Hinweise und Empfehlungen zur Messung von Pulver-Schüttdichte, Rakeldichte und zur Gestaltung von Teststrukturen für die additive Fertigung. Betrachtet man die Bandbreite in der mittlerweile Mikro-SLM Verfahren unterschiedlichster Art in der Forschung verbreitet sind [4, 5], so können mit Hilfe dieser Gestaltungsempfehlungen verschiedene Demonstratoren mit dem Mikro-SLM Verfahren hergestellt werden. Die Notwendigkeit der Demonstrator Herstellung liegt nicht allein im Erzeugen von Bauteilen, sondern zeigt die gestalterischen und anlagentechnischen Möglichkeiten des Verfahrens in beeindruckender Art und Weise.

## 2. Versuchsaufbau und -anordnung

Bei der verwendeten Versuchsanlage handelt es sich um eine Mikro-SLM Forschungsanlage mit einem 400 W cw Faserlaser der Firma IPG. Die Laserstrahlung hat eine Wellenlänge von 1070 nm und wird auf einen Durchmesser von 26  $\mu\text{m}$  fokussiert. Das Strahlparameterprodukt des Laserstrahles beträgt 1,3. Die Fokussierung erfolgte mit einer F-Theta Optik mit einer Brennweite von 255 mm. Die Strahlablenkung erfolgt mit einem Galvanometerscanner auf der Bauteiloberfläche bei 2 m/s. Die Versuchsdurchführung erfolgte mit Edelstahlpulver 316L und 17-4-PH mit Korngrößen von  $d_{90} < 10\ \mu\text{m}$  und  $d_{90} < 5\ \mu\text{m}$ . Die Versuche werden mit einer eigens entwickelten älteren Rakelmaschine sowie einer neueren Iteration derselben durchgeführt [4]. Zur Pulverwürfelherstellung wird zudem ein gepulster 20 W Laser verwendet.

## 3. Versuchsdurchführung

Die zur Demonstrator Herstellung erzeugten Strukturen sind Eigenkonstruktionen nach dem Vorbild aktueller Entwicklungen aus dem Stand der Technik oder Eigenkreationen. Die mittels CAD Programm erstellten Bauteile werden im „.stl“ Format an die Fertigungsanlage übergeben. Als Teststrukturen werden Untersuchungen nach VDI 3405 zu Spannungen mit sogenannten „Cantilevern“ (Bild 1) durchgeführt. Mit diesen Teststrukturen können auftretende Spannungen in den Bauteilen sichtbar gemacht werden. Beim Cantilever-Test wird ein Biegebalken mit Hilfe von Stützstrukturen auf dem Substrat aufgebaut. Diese werden anschließend durchtrennt und der Cantilever verbleibt nur mit einer Verbindung auf dem Substrat. So kann die Durchbiegung des Balkens anschließend vermessen werden. Je geringer der resultierende Verzug, desto weniger Spannungen sind im Biegebalken und desto effizienter ist die Bestrahlungsart.

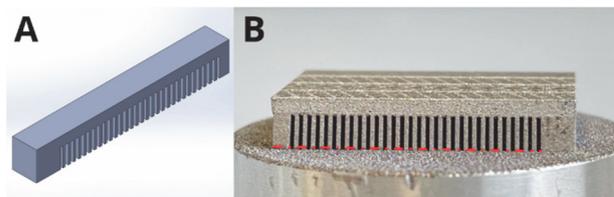


Bild 1: Schema Cantilever – Konstruktion aus SolidWorks (A) und real erzeugter Test auf Substrat (B) mit verschiedenen Bestrahlungsmustern vor dem Abtrennen (rote Linie markiert Trennlinie)

Die Bestrahlungsstrategien die verwendet werden sind innerhalb des Additive Manufacturing übliche Bestrahlungsarten. Die Linienbestrahlung (A) wurde als Referenz verwendet, die Streifenbestrahlung, welche sich durch Lücken zwischen den Linien auszeichnete, war die erste untersuchte Bestrahlung. Zusätzlich wurden noch die Rechteckbestrahlung, welche einzelne Rechtecke generierte, sowie die Schachbrett Bestrahlung, die sich von der Streifenbestrahlung dadurch unterschied, dass sie

nicht nur in Bestrahlungsrichtung Separierungen aufwies, sondern auch senkrecht dazu, durchgeführt. (Bild 2).

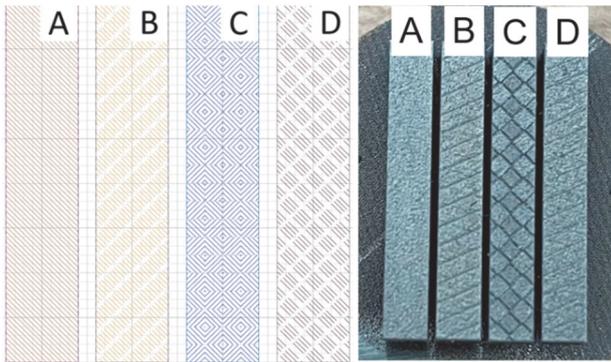


Bild 2: Bestrahlungsstrategien zur Spannungsreduzierung: Referenz (A), Streifenbestrahlung (B), Rechteckbestrahlung (C) und Schachbrettbestrahlung (D)

Für die Versuche wird Edelstahlpulver 17-4-PH verwendet. Die Schüttdichte wird nach dem in [6] vorgestellten Verfahren untersucht, wobei das Verfahren hinsichtlich Beschichtungsanlage und Pulverart angepasst wird. Dabei handelt es sich um eine Untersuchung, bei der zeitgleich an pulverbasierten additiven Fertigungsanlagen ein Referenzwürfel und ein Pulverwürfel aufgebaut wird. Die Besonderheit des Pulverwürfels liegt darin, dass er einen kugelförmigen Hohlraum während der Strukturgenerierung enthielt (Bild 3).

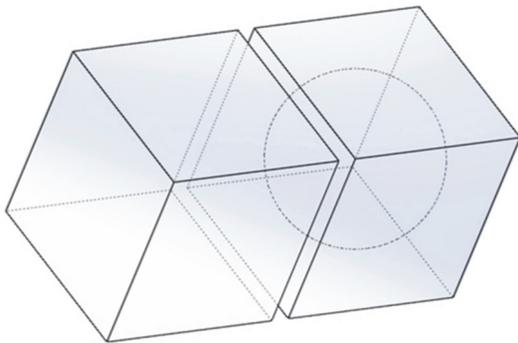


Bild 3: schematische Darstellung Referenzwürfel und Pulverwürfel mit Hohlraum

Nach der Beendigung der Herstellung erhält man zwei in ihren Abmaßen identische Würfel, wobei der Referenzwürfel komplett aus Vollmaterial besteht. Der Pulverwürfel hat im Inneren eine mit kompaktiertem Pulver gefüllte Kugel. Durch die Bestimmung der Dichte beider Würfel kann eine Aussage über die Schüttdichte des Pulvers im Inneren des Pulverwürfels getroffen werden, da Volumen von Würfel und Hohlkugel sowie die relative Dichte des Vollmaterials bestimmt werden könnten. Die Dichtebestimmung erfolgt mit dem archimedischen Verfahren der Dichtebestimmung. Die so bestimmten Werte sind vergleichbar mit den realen Werten, da in

diesem Fall die Verdichtung während des Aufbauprozesses berücksichtigt wird. Mit den erhaltenen Erkenntnissen von Spannungsreduzierung, Schüttdichtenmessung und den aus früheren Untersuchungen bekannten Parametern für ideale Dichtewerte werden Demonstratoren und Teststrukturen gefertigt.

Alle Demonstratoren und Teststrukturen werden mit einer Laserleistung von  $P_{AV}=40\text{ W}$ , einer Scangeschwindigkeit von  $v=2\frac{\text{m}}{\text{s}}$  und einem Linienabstand von  $h_s=20\text{ }\mu\text{m}$  (316L) und  $25\text{ }\mu\text{m}$  (17-4PH) sowie einer Schichtdicke von  $l_s=10\text{ }\mu\text{m}$  angefertigt. Daraus ergibt sich nach der Formel  $E_V=\frac{P_L}{v_s \cdot h_s \cdot l_s}$  eine Volumenenergie-dichte  $E_V=100\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ .

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1. Cantilever

Die Betrachtung der Durchbiegung der Cantilever nach dem Abtrennen vom Substrat zeigt, dass die Art der Bestrahlung einen Einfluss auf die Durchbiegung der Biegebalken hat. Die Vermessung der Durchbiegung erfolgte an der Oberfläche mit Hilfe eines Lasertriangulations Sensors. Da ein Steg noch stabil mit dem Substrat verbunden war konnte entlang der Oberfläche die Durchbiegung vermessen werden. In Bild 4 ist die Frontalansicht der verschiedenen Biegebalken dargestellt. Hier konnte die Durchbiegung der verschiedenen Bestrahlungsarten gut differenziert werden.

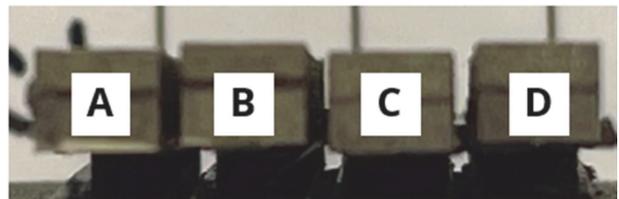


Bild 4: Spannung die den Cantilever nach dem Abtrennen vom Substrat hochhebt – Referenz (A), Streifenbestrahlung (B), Rechteck (C) und Schachbrett (D)

Nach der Messung der Durchbiegung über die gesamte Länge kann festgestellt werden, dass der Biegebalken mit der geringsten Durchbiegung mit der Linienbestrahlung und mit der Rechteckbestrahlung erstellt wird. Daher sollten diese beiden Regime für Bauteilfertigung verwendet werden, wenn möglichst spannungsarm Bauteile gefertigt werden sollen. Als Grund für die geringen internen Spannungen wird die Ausprägung der Schmelzbahnen beim Bearbeitungsprozess vermutet. Eine Ursache für die geringen Spannungen während der Rechteckbestrahlung kann die Ausrichtung der Spannungsvektoren in mehrere Raumrichtung angenommen werden. Es wird vermutet, dass diese sich gegenseitig kompensieren. Für die Streifen und die Schachbrett Bestrahlung, welche sich im Großen und Ganzen sehr ähnlich verhalten, konnte keine signifikante Reduzierung beobachtet werden. Das hängt damit zusammen, dass durch die Unterbrechung der Linienbestrahlung dem

Biegebalken Raum zum Verziehen gibt. Durch die Unterbrechung der Bestrahlung und dem absichtlichen Einsetzen einer Lücke wurde hier Raum zum Spannungsausgleich geschaffen. Die Biegekurven der verschiedenen Bestrahlungsregime sind in Bild 5 dargestellt:

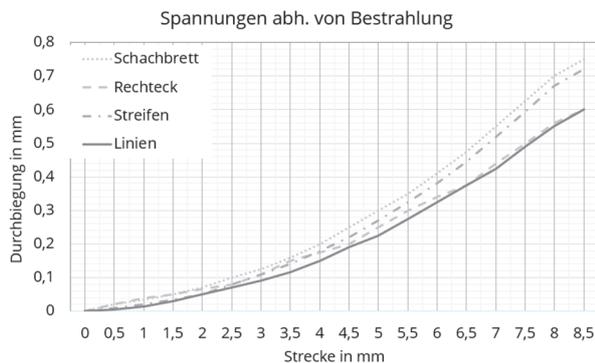


Bild 5: Durchbiegung über die Cantilever Länge der verschiedenen Bestrahlungsarten

Es wird beobachtet, dass sich die Durchbiegungen über die gesamte Länge der Biegebalken nur um rund 200 µm unterschieden. Alle Bauteile weisen über die Länge von rund 8 mm Verbiegungen von mindestens 550 µm auf, welche in zukünftigen Untersuchungen weiter zu reduzieren sind. Die Bearbeitungsdauer für die Referenzbestrahlung ist am kürzesten. Bei einer Veränderung der Bestrahlungsart sind längere Prozesszeiten zu erwarten. Da die Linienbestrahlung neben der besten Bearbeitungsgeschwindigkeit auch die geringsten Spannungen aufweist, wird dieses Bestrahlungsregime vorrangig verwendet. Ein Spannungsfreier Aufbau kann mit keiner der untersuchten Bestrahlungsregime erreicht werden.

#### 4.2. Pulverwürfel

Für die anlagenübergreifenden Untersuchungen zum Pulverwürfel werden jeweils Referenz und Pulverwürfel an drei unterschiedlichen Rakelsystemen aufgebaut und anschließend die Dichten der Referenzwürfel und der Pulverwürfel miteinander verglichen.

Tabelle 1: Werte der Dichtemessung von Referenz und Pulverwürfel

Beschichter	Pulver	Dichte in g/cm³
Druckverdichter Standard Anlage	Referenz 316L	7,8713
	Pulver <10 µm	6,6738
Druckverdichter neue Anlage	Referenz 17-4PH	7,6973
	Pulver <10 µm	6,6069
Ringrakel	Referenz 316L	7,8462
	Pulver <10 µm	6,5581
Druckverdichter neue Anlage	Referenz 17-4PH	7,6843
	Pulver <5 µm	6,2917

Die aus den Dichtemessungen ermittelbaren Ergebnisse könnten zur Bestimmung der Schüttdichte der verschiedenen Anlagen zurate gezogen werden. Mit Hilfe des bei der Dichtebestimmung ermittelten Volumens und der bekannten Größe der Hohlkugel konnte die Schüttdichte des Pulvers im Inneren der Kugel berechnet werden. Die Schüttdichten gaben im Verhältnis zur Referenzdichte einen Aufschluss über den Packungsgrad des Pulvers während der Strukturzeugung. Es wurden die in Tabelle 2 dargestellten Schüttdichten für die Probekörper nach der EN ISO 60:1999 [7] bestimmt.

Die Schüttdichte war dementsprechend das Verhältnis der Masse des Pulvers im Pulverwürfel (rechnerisch ermittelt mit Hilfe des gemessenen Volumens) zum Volumen der Kugel. Die so erhaltenen Werte konnten mit den ermittelten stofflichen Dichten des Ausgangspulvers in ein Verhältnis gesetzt werden um eine Aussage über den Packungsgrad des Pulvers zu erhalten.

Es wurde beobachtet, dass mit der neuen Rakelanlage für 10 µm Pulver bessere Schüttdichten erreicht werden könnten als das mit dem ursprünglichen Druckverdichter System des Mikro-SLM Verfahrens und mit dem Ringrakel des Lasermikrosinterverfahrens der Fall waren. Auch kann beobachtet werden, dass die Schüttdichte bei Pulver mit Korngrößen von 10 µm dichter sind als bei Korngrößen mit 5 µm.

Tabelle 2: Schüttdichten des Pulvers im Inneren des Pulverwürfels

Beschichter	Pulver	$\rho_{SCH}$ in g/cm³	$\rho_{SCH}/\rho_{REF}$
Standard Anlage	316L <10 µm	4,5751	58,1 %
neue Anlage	17-4PH <10 µm	4,8192	62,6 %
Ringrakel	316L <10 µm	4,3827	55,9 %
neue Anlage	17-4PH <5 µm	4,1925	54,6 %

Für das Verhältnis Schüttdichte zu Referenzdichte bedeutete das, dass mit der Standard Anlage ein Verhältnis von 58,1 % erreicht werden kann. Mit der neuen Anlage ist sogar ein Verhältnis von 62,6 % möglich. Die Ringrakel Anlage erreicht ein Verhältnis von 55,9 %.

#### 4.3. Demonstrator

Für die Herstellung eines Demonstrators wurde Edelmetallpulver 17-4PH mit einer Korngröße von  $d_{90} < 10 \mu m$  verwendet. In Anlehnung an die Medizintechnik wurde eine Gitterstruktur mit Wandstärken von 150 µm und einer Strukturhöhe von 10 mm aufgebaut (Bild 6). Die Gitterstrukturen in Bild 6 wurden nach dem Aufbau mit Glasperlenstrahlen nachbearbeitet.

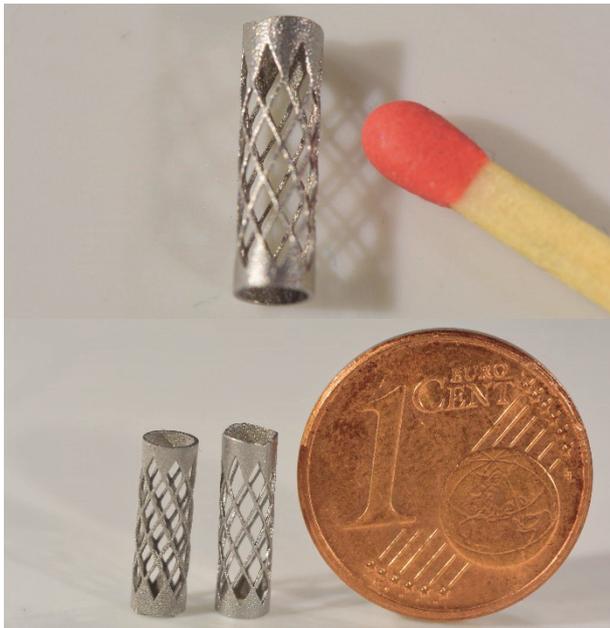


Bild 6: Stent Gitterstruktur mit dem Mikro-SLM Verfahren aufgebaut, Gitterstärke ~150 µm mit Strichholz und 1-Cent Münze zum Größenvergleich

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Cantilever-Test können Aussagen zu Spannungen in den Bauteilen nach der Generierung getroffen werden. Mit Hilfe von veränderlichen Bestrahlungsmustern können diese Eigenspannungen reduziert werden. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, welche Bestrahlungsmuster für eine Spannungsreduzierung günstig sind. Um Spannungsfreie Bauteile generieren zu können sind weitere Untersuchungen hinsichtlich der Art und Weise der Bestrahlung durchzuführen.

Mit Hilfe von Referenzwürfel und Pulverwürfel können Aussagen über die Schüttdichte während des Sinterprozesses für additive Fertigungsverfahren getroffen werden. Um eine Aussage über weitere Anlagen treffen zu können müssen auch hier noch weiterführende Untersuchungen ins besonders an weiteren Anlagen durchgeführt werden.

Die Demonstrator Herstellung ermöglichte den Aufbau einer Stent ähnlichen Gitterstruktur mit Edelstahlpulver 17-4PH mit Wandstärken von 150 µm und 10 mm Bauteilhöhe. In Finazzi et.al [8] werden ähnlich kleine Strukturen aufgebaut, jedoch können mit dem Mikro-SLM Verfahren wesentlich feinere Wandstrukturen aufgebaut werden. Die anschließenden Nachbearbeitungsverfahren sind für beide Prozesse identisch. mit dem gleichen Nachbearbeitungsverfahren können wesentlich feinere Wandstrukturen mit dem Mikro-SLM Verfahren erzeugt werden. Inwieweit zukünftig eine Nachbehandlung erforderlich ist muss in weiteren Versuchen geklärt werden.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei dem Europäischen Sozialfonds (ESF) und der Sächsischen Aufbaubank (SAB) für

die Finanzierung des Projektes Eila-SAX - Antragsnummer: 100339506.



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

## Literaturverzeichnis

- [1] A. Streek, M. Erler, R. Ebert, U. Löschner: Untersuchungen zum Hochrate Mikro-SLM, In: Lasermaterialbearbeitung in der digitalen Produktion, DVS-Berichte Band 328, ISBN: 978-3-945023-66-2, S.217-226
- [2] M. Erler, S. Gronau, J. Drechsel, R. Ebert, H. Exner: Prozessoptimierung für die generative Fertigung von Mikro-Wärmeübertragern, In: Scientific Reports, 10. Mittweidaer Lasertagung 2/2017, S.67-71
- [3] VDI-Richtlinie 3405, Additive Fertigungsverfahren – Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen Dezember 2014
- [4] J. Drechsel, M. Erler, R. Ebert, H. Exner Pulver- und Prozessuntersuchung für die generative Fertigung von Edelstahlbauteilen mittels Mikro-SLM In: Scientific Reports, 11. Mittweidaer Lasertagung 2019
- [5] M. Kniepkamp, J. Fischer und E. Abele, „Dimensional accuracy of small parts manufactured by micro selective laser melting,“ Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF), pp. 1530-1537, 2016.
- [6] J. Drechsel, M. Erler, R. Ebert, H. Exner Vom Zahnrad bis zum Motor – Möglichkeiten des metallischen Mikro-3D Drucks Tagungsband „8. Mitteldeutsches Forum Rapid Technologien – 3D Druck in der Anwendung“
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., 1999. DIN EN ISO 60:1999 Bestimmung der scheinbaren Dichte von Formmassen, die durch einen genormten Trichter abfließen können (Schüttdichte) Deutsche Fassung EN ISO 60:1999, Berlin, Beuth
- [8] V. Finazzi, A. Gökhan Demir, C. Alberto Biffi, F. Migliavacca, L. Petrini, B. Previtali Design and functional testing of a novel balloon-expandable cardiovascular stent in CoCr alloy produced by selective laser melting Journal of Manufacturing Processes 55, 2020, pages 161-173