

# Entwicklungen zum Makro-SLM für die additive Fertigung großvolumiger Metallbauteile

Martin Erler, Sebastian Weinhold, Michael Pfeifer, André Streek  
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Mittweida, Deutschland

*Das Makro-SLM ist eine Weiterentwicklung des etablierten laser-pulverbettbasierten 3D-Drucks von Metallbauteilen (auch SLM oder L-PBF). Durch die Steigerung von Laserleistung, Spotdurchmesser, Schichtdicke und Pulverkorngröße werden Strukturauflösung im Millimeter- statt wie üblich im Mikrometer-Bereich erzeugt. Dies wiederum ermöglicht eine enorme Steigung der Aufbauraten bis aktuell 1.300 cm<sup>3</sup>/h. Es ähnelt damit den Strukturauflösungen und Aufbauraten beim Auftragschweißen. Das stützende Pulverbett bietet jedoch den Vorteil komplexere Geometrien zu realisieren. Makro-SLM vereint damit die Vorteile beider Welten: hohe Gestaltungsfreiheit bei gleichzeitig hoher Produktivität. Ziel ist es, mit dem Makro-SLM komplexe, endkonturnahe Metallbauteile in Kubikmeter-Dimensionen herstellen. In der vorliegenden Veröffentlichung werden das neue Anlagenkonzept erläutert und prozesstechnische sowie mechanische Kennwerte benannt. Abschließend werden verschiedene aktuelle Anwendungen vorgestellt und ein Ausblick zu den geplanten Entwicklungen gegeben.*

---

## 1. Einleitung

Die aktuellen technischen Weiterentwicklungen der additiven Fertigungsverfahren im laser- und pulverbettbasierten Metalldruck (SLM oder L-PBF) zeigen mehr als deutlich einen Bedarf hin zu höherer Produktivität und zu immer großvolumigeren Bauteilen. Nahezu alle namenhaften Anlagenhersteller haben großvolumige Anlagen in ihr Portfolio aufgenommen und übertreffen sich mit Angaben hinsichtlich erzielbarer Bauvolumen, eingesetzter Laserquellen pro Anlage und resultierender Aufbauraten [1, 2, 3]. Der Ansatz dabei ist die Parallelisierung des Prozesses in einer Anlage. Die derzeit größte kommerziell verfügbare Anlage bietet die Firma E-Plus-3D mit einem Bauraum von 1,5 x 1,5 x 1,1 m<sup>3</sup> und 16 x 700 W Lasersystemen mit einer Aufbauratenrate bis zu 650 cm<sup>3</sup>/h [3]. Um die Bauteile in gewohnt hoher Strukturauflösung und Maßhaltigkeit fertigen zu können, sind diese Anlagen hochkomplex und dadurch entsprechend teuer. Alle Laserscanbereiche müssen perfekt aufeinander abgestimmt sein, die schwere Bauplattform muss präzise abgesenkt werden und das Handling mit großen Mengen an feinem, reaktivem und gesundheitsschädlichem Pulver muss sichergestellt werden. Eine hohe Produktivität wird auch nur dann erreicht, wenn möglichst viele Lasergeräte gleichzeitig arbeiten, was wiederum stark von der Bauteilgeometrie, -orientierung und dem Packungsgrad abhängig ist. Bei solch großen Bauräumen müssen für die Erstbefüllung mehrere Tonnen Pulver vorgehalten werden, was wiederum Kosten von mehrere 100 T€ bedeutet.

Alternativen für die pulverbettbasierte additive Fertigung großer Metallbauteile sind das drahtbasierte Auftragschweißen mit Lichtbogen (WAAM - Wire Arc Additive Manufacturing) und das Laserauftragschweißen mit Draht oder Pulver (LMD - Laser Metal Deposition) [4, 5]. Bei beiden Verfahren sind hohe Auftragsraten bis über 1.000 cm<sup>3</sup>/h möglich [5]. Dies wird durch die Umsetzung

hoher Leistungen im Multi-kW-Bereich und der Erzeugung größerer Spurgeometrien im Millimeterbereich erzielt. Vorteil ist zudem, dass nur die Menge an Ausgangsmaterial, die für das Bauteil benötigt wird, vorgehalten werden muss. Mit den Verfahren sind jedoch die konstruktiven Gestaltungsfreiheiten begrenzt, da Überhänge und Brücken durch heruntertropfende Schmelze nicht realisiert werden können. Teilweise kann dies durch Verwendung von Robotern oder 5-Achssystemen kompensiert werden, wobei der Bearbeitungskopf selbst die Zugänglichkeit erschwert. Die Bauräume bzw. Bauteilgrößen sind weitestgehend unbegrenzt und nur von dem verwendeten Bewegungssystem vorgegeben.

Das am Laserinstitut Hochschule Mittweida entwickelte Makro-SLM-Verfahren kann die Vorteile beider Welten miteinander vereinen: hohe Bauteilkomplexität des SLMs mit den Auftragsraten der Auftragschweißens. Erreicht wird dies durch die Bestrahlung des Pulverbetts mit Laserleistungen im Multi-kW-Bereich (Einzelstrahl). Dafür wurde der Spotdurchmesser, die Schichtdicke und die Pulverkorngröße vergrößert, um solch hohe Laserleistung ohne Verdampfung des Materials umzusetzen. Die Vergrößerung der Pulverpartikel erlaubt den Einsatz von kostengünstigem Metallgranulat (bis Faktor 10 günstiger), was die Kosten einer Erstbefüllung stark senkt. Des Weiteren wurden mehrere neue Ansätze für ein neues skalierbares Anlagenkonzept gewählt um die Komplexität und damit die Kosten zu reduzieren. Ziel ist es, damit individuelle metallische Bauteile mit einer deutlich höheren Aufbauratenrate in Kubikmeter-Dimensionen herzustellen.

## 2. Anlagentechnik

Nach ersten Machbarkeitsstudien zum Makro-SLM-Verfahren an bestehenden Forschungsanlagen des LHMs wurde eine erste Prototypen-Anlage mit einem Bauraum von 1 x 0,8 x 0,5 m<sup>3</sup> aufgebaut (Abb. 1). Hiermit konnten weitere grundlegende Untersuchungen zum Verfahren

durchgeführt sowie die schnelle additive Fertigung großer Metallbauteile demonstriert werden. Gegenüber den klassischen SLM-Maschinen wurden hierfür verschiedene neue Ansätze gewählt. Der erste neue Ansatz ergab sich aus der Machbarkeitsstudie. Da die Prozessgeschwindigkeiten unter 100 mm/s lagen, war eine Strahlablenkung mittels Galvanometerscanner nicht erforderlich. Stattdessen wird der Laserstrahl durch ein kartesisches Achssystem über das Pulverbett geführt. Der zweite neue Ansatz war, dass nicht mit einer klassischen, sich nach unten absenkenden Bauplattform gearbeitet wird. Aufgrund der enormen Massen im Bereich mehrerer Tonnen und der erforderlichen Genauigkeit im Submillimeterbereich ist dies nur schwer zu realisieren. Daher bleibt die Bauplattform stationär und der Bearbeitungskopf mit Achssystem und Rakeleinheit hebt sich Schicht für Schicht nach oben, was aufgrund der vergleichsweise geringen Massen einfacher zu realisieren ist. Somit ist die Größe des Pulverbetts nicht mehr durch das zu handhabende Gewicht begrenzt. Ein dritter neuer Ansatz war die Verwendung einer Schutzgasglocke, die sich unter dem Bearbeitungskopf befindet und mit einem geringen Abstand zum Pulverbett mitgeführt wird, wodurch der Schmelzprozess unter Schutzgas erfolgen kann. Üblicherweise wird bei den klassischen SLM-Maschinen der ganze Bauraum mit Schutzgas geflutet, was jedoch bei solch großen Bauräumen sehr zeit- und kostspielig ist. In der Regel kommt auch eine Schutzgasumwälzung zur Abführung von Prozess-Nebenprodukten (Schmauch, Spritzer) zum Einsatz, die sonst das umliegende Pulver verunreinigen, wodurch es zu Baufehlern kommen kann, was jedoch bei großen Bauräumen über das gesamte Pulverbett homogen nicht umsetzbar ist. Daher wurde beim Makro-SLM besonderes Augenmerk auf die Reduzierung der Nebenprodukte gelegt. Alle drei Ansätze ermöglichten es, ein kostengünstiges Anlagenkonzept für die additive Fertigung großvolumiger Metallbauteile aufzubauen.

Als Strahlquelle stand zunächst ein 4 kW Lasergerät und später ein 8 kW Lasergerät für die weitere Steigerung der Aufbaurrate zur Verfügung. Der Laserspotdurchmesser liegt im Millimeterbereich.

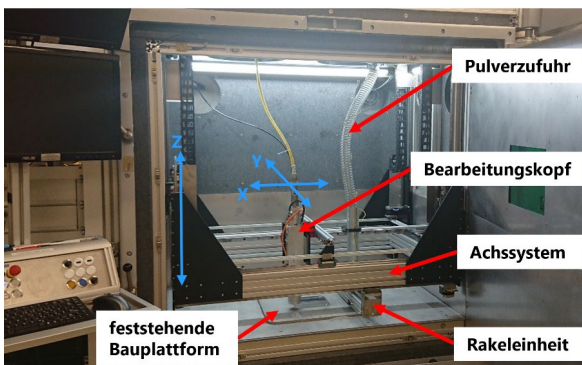


Abbildung 1: Erste Prototypen-Anlage für das Makro-SLM.

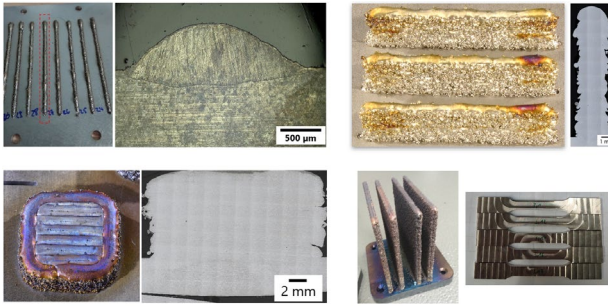
### 3. Entwicklung der Prozessparameter

Für die Entwicklung von Prozessparametern wurde ein Granulat aus nicht rostendem Stahl gewählt, da sich Edelstahl (z.B. 1.4301) im klassischen SLM bereits etabliert hat. Aus den Machbarkeitsstudien an bestehenden Forschungsanlagen konnten passende Korngrößenverteilungen, Laserleistungen, Spotdurchmesser sowie Schichtdicken abgeleitet, auf die Prototypen-Anlage übertragen und weiter optimiert werden. Der Fokus lag dabei auch auf einer Reduzierung von Prozess-Nebenprodukten wie Schmauch und Spritzer. Dies konnte durch umfangreiche Untersuchungen erfolgreich realisiert werden.

Es zeigte sich, dass sich Partikeldurchmesser  $> 200 \mu\text{m}$  zu gleichmäßigen Einzelspuren und Wänden umschmelzen lassen. Es konnte die maximale Laserleistung von zunächst 4 kW umgesetzt werden. Bei einer Geschwindigkeit von 40 mm/s ergaben sich Einzelwandstärken von ca. 3 mm bei einer Schichtdicke von 1 mm. Beim Aufbau von Volumenkörpern zeigte sich, dass die Geschwindigkeit aufgrund von Wärmeakkumulationseffekten auf 50 mm/s erhöht werden konnte und dass Linienabstände im Bereich der Einzelspurbreite möglich waren. Da der Spotdurchmesser größer als die Einzelspurbreite war, fand dennoch eine hinreichende Verschmelzung mit der Nachbarspur statt. Es ergaben sich Dichten von archimedisches  $7,8 \text{ g/cm}^3$  und bildanalytisch von  $> 99,5 \%$ . Aus den Prozessparametern ergab sich eine theoretische Aufbaurrate von bis zu  $520 \text{ cm}^3/\text{h}$  (entspricht:  $4,1 \text{ kg/h}$  für Edelstahl). Ein interessanter Aspekt dabei war die Volumenenergiedichte von nur knapp  $30 \text{ J/cm}^3$ . Im Vergleich dazu liegt der Wert beim klassischen SLM bei über  $80 \text{ J/cm}^3$ . Das bedeutet, dass die eingebrachte Energie deutlich effizienter zum Aufschmelzen genutzt wird. Gründe hierfür sind Wärmeakkumulationseffekte und die Reduzierung von Prozess-Nebenprodukten.

Nach Ermittlung der Prozessparameter wurden mechanische Kennwerte anhand von Zugproben ermittelt. Für die Anfertigung der Zugproben wurden Platten aufgebaut, von der Bauplattform getrennt, auf Maß abgefräst und in die gewünschte Form geschnitten. Die Auswertung der Zugversuche ergab dabei normgerechte Werte. Es konnten zudem keine Unterschiede zwischen liegenden oder stehenden Proben festgestellt werden. Härtemessungen mit 210HV1 spiegelten die Ergebnisse wider.

Sichtbare Oxidationen, wie sie in der Abb. 2 zu erkennen sind, entstehen nur in Randbereichen und nur, wenn die Schutzgasglocke bewegt wird, bevor die Temperatur ausreichend sinken konnte. Eine Oxidation im Inneren der Strukturen konnte anhand von Ätzungen und Messungen der chemischen Zusammensetzung nicht festgestellt werden.



	1.4301 (Vollmaterial, DIN EN 10088-3)	Makro-SLM (Proben liegend)	Makro-SLM (Proben stehend)
Zugfestigkeit, $R_m$	500 - 700 MPa	615 ± 3,6 MPa	614 ± 2,6 MPa
Dehngrenze, $R_{p0,2}$	≥ 190 MPa	321 ± 21,2 MPa	315 ± 11,4 MPa
Bruchdehnung, A	≥ 25 %	43 ± 1,1%	44,2 ± 1,9%

Abbildung 2: Parameterentwicklung für Edelstahl 1.4301. *Oben links:* Erste Machbarkeitsstudie zum Makro-SLM. Draufsicht und Querschliff der Einzelspuruntersuchungen. *Oben rechts:* Aufbau von Wandstrukturen zur Ermittlung der Einzelspurbreiten. *Mitte links:* Aufbau von Volumenkörpern zur Ermittlung von Linienabständen, Konturparametern, Aufbauraten usw. *Mitte rechts:* Fertigung von Zugproben in liegender und stehender Ausrichtung. *Unten:* Vergleichstabelle der mechanischen Kennwerte mit der Norm für die unterschiedlichen Ausrichtungen.

Aufbauend auf den Untersuchungen mit dem 4 kW Lasersystem wurden die Parameter auf ein neu angeschafftes 8 kW Lasersystem übertragen. Damit konnten Einzelwandstärken von 2 mm bis 5,5 mm bei angepasster Laserleistung realisiert werden. Letzteres mit der Umsetzung der maximalen Laserleistung von 8 kW und einer Schichtdicke von 1,5 mm. Daraus ergab sich eine theoretische Aufbaurrate von bis zu 1.300 cm<sup>3</sup>/h (entspricht: 10 kg/h für Edelstahl). Die Variation des Spotdurchmessers und damit der Strukturauflösung ermöglicht z.B. die zukünftige Anwendung einer Hülle-Kern-Strategie beim Aufbau von Bauteilen.

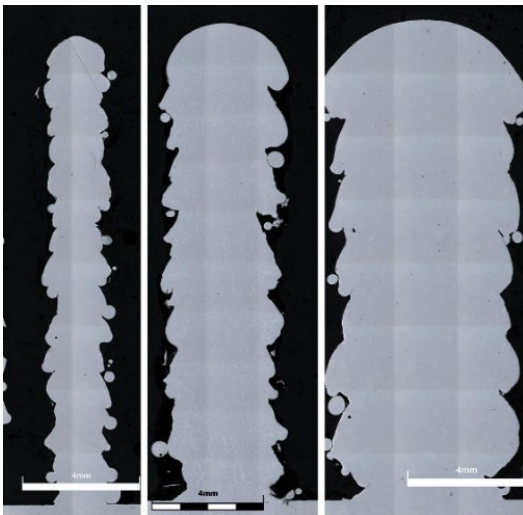


Abbildung 2: Querschliffe von verschiedenen Wandstärken die mit unterschiedlichen Laserspotdurchmessern und Laserleistungen aufgebaut wurden.

## 4. Anwendungsbeispiele

### Geometrisch individuelle Fassadenknoten:

In Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe FLEX der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK Leipzig) ergab sich ein erster Anwendungsfall für die Fertigung individueller Knotenelemente für das Bauwesen. Bei der Realisierung von gekrümmten, freigeformten Fassaden- und Dachkonstruktionen werden vorgefertigte, einfach zu transportierende, gerade Stabprofile mittels individueller Knotenelemente verbunden. Diese Verbindungselemente sind geometrisch komplex und mit konventionellen Fertigungsmethoden nur sehr aufwendig herstellbar und damit oft nicht wirtschaftlich. Auch die Herstellung der Knotenelemente mit dem klassischen SLM stellt sich zu zeit- und kostspielig dar. Die hohe Strukturauflösung beim SLM ist hierfür nicht erforderlich und eine Nachbearbeitung von Befestigungsflächen ebenso notwendig. Daher bietet sich hierfür das Makro-SLM-Verfahren bestens an. Anhand von ersten additiv gefertigten Prototypen der Knotenelemente und dem Aufbau eines Ausschnitts einer Fassadenfläche konnte das Potenzial verdeutlicht werden (Abb. 3). Die Fertigung erfolgte mit dem 4 kW Lasersystem auf der bereits beschriebenen Prototypen-Anlage. Die reale Aufbaurrate bei der Fertigung (inkl. aller Nebenzeiten) lag bei 2,5 kg/h. Damit konnten die reine Bauzeit von 80 h (mit 400 W SLM-Maschine) auf 5 h und die Herstellungskosten (nur Energie-, Gas- und Materialkosten) von ca. 1000 € auf 150 € reduziert werden. Zukünftig könnten zudem Kanäle für Stromleitungen, Sprinkleranlagen und weitere Features integriert werden, um die Möglichkeiten der additiven Fertigung voll auszuschöpfen.

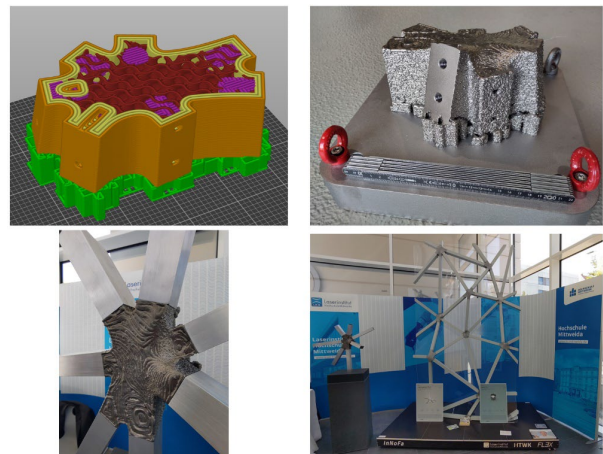


Abbildung 3: Additive Fertigung eines Fassadenknotens. *Oben links:* geslichtes 3D-Modell mit Blick ins Innere, 30% Infill. *Oben rechts:* Gefertigter Knoten auf der Bauplattform mit einseitig nachbearbeiteter Befestigungsfläche. Offset von 3 mm für Nachbearbeitung notwendig. *Unten links:* Fertiger Knoten mit Verbindungsstäben als Demonstrator. *Unten rechts:* Fassaden-Prototyp InNoFa mit individuell geformten, additiv gefertigten Knotenverbindungen.



### Topologieoptimierte Leichtbau-Rahmenstruktur:

In Zusammenarbeit mit der Firma Kobra Formen GmbH und der Forschungsgruppe FLEX der HTWK Leipzig sollen erstmalig großvolumige Stahlformen additiv gefertigt werden. Es handelt sich hierbei um hochwertige Stahlformen für die Betonsteinindustrie, die vom Weltmarktführer in diesem Bereich bisher noch konventionell durch subtraktive Verfahren hergestellt werden, wodurch teils bis zu 70 % Material entfernt werden muss. Bei der additiven Fertigung wird hingegen nur so viel Ausgangsmaterial verarbeitet, wie für das Bauteil notwendig ist. Hinzu kommen die Vorteile der konstruktiven Gestaltungsfreiheit. So soll im ersten Schritt eine Rahmenstruktur für die additive Fertigung optimiert und mit dem Makro-SLM-Verfahren hergestellt werden. Hierzu wurde die Rahmenstruktur einer Topologieoptimierung unterzogen und mit Leichtbau-Füllstrukturen versehen. Das spart nicht nur Materialeinsatz sondern auch Bauzeit. Alle Befestigungsflächen und Gewindebohrungen sollen anschließend spanend endbearbeitet werden.

Derzeit wird eine größere Anlage mit einem Bauraum von  $2 \times 2 \times 1 \text{ m}^3$  realisiert, um die vollständige Rahmenstrukturen herstellen zu können. (siehe Kapitel 6. Ausblick).

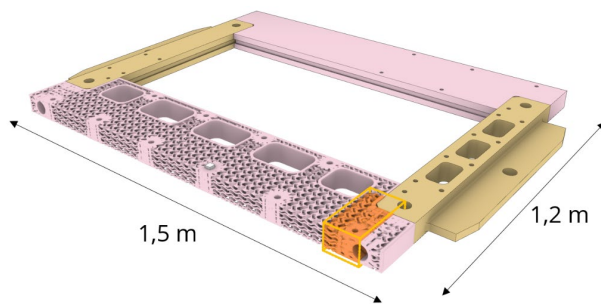


Abbildung 4: Beispiel eines CAD-Modells der Rahmenstruktur mit einseitig topologieoptimierter Leichtbaustruktur.

### Weitere Anwendungsbereiche:

- Fertigung endkonturnaher, großformatiger Halbzeuge
- Spritzgussformenbau mit innenliegenden Kühlkanälen
- Fertigung großformatiger, komplexer Bauteile für den Anlagen- und Maschinenbau (z.B. Energie- und Kraftwerksbau, Turbinen- und Pumpenbau)
- Fertigung großformatiger, komplexer Bauteile für die Luft- und Raumfahrt

## 5. Weitere Werkstoffe

### Einsatzstahl 1.7131 (16MnCr5)

Für das bereits vorgestellte Anwendungsbeispiel der Leichtbau-Rahmenstruktur für den Formenbau bedarf es Einsatzstahl. Daher wurden die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit Edelstahl auf den Einsatzstahl übertragen. Zunächst wurden Einzelwandstrukturen

und Volumenkörper aufgebaut. Es zeigte sich ein ähnliches Schmelzverhalten, wie beim Edelstahl, mit geringen Prozess-Nebenprodukten. Bei etwas reduzierter Geschwindigkeit (35 mm/s statt 40 mm/s wegen erhöhter Wärmeleitfähigkeit) konnten gleichmäßigere Schmelzspuren erzeugt werden. Es konnten jedoch vergleichbare Wandstärken und Dichten erreicht werden. Die Dichte der Volumenkörper lag, wie bei Edelstahl, archimedisch bei  $7,8 \text{ g/cm}^3$  und bildanalytisch bei  $> 99,5 \%$ . Weitere grundlegende Untersuchung zum Einsatzstahl werden derzeit noch durchgeführt.

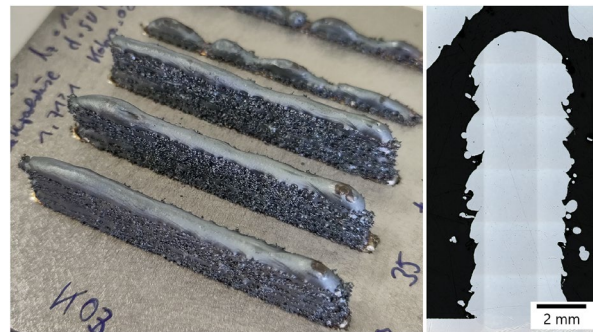


Abbildung 5: Erste Untersuchungen zum Aufbau von Wandstrukturen mit Einsatzstahl 1.7131. Links: Aufnahme von Wandstrukturen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Rechts: Querschliff einer Wand mit geeigneten Parametersatz.

### Aluminiumlegierung AlSi10Mg

Für erste Untersuchungen mit AlSi10Mg wurden Einzelwandstrukturen und Volumenkörper aufgebaut. Dabei zeigte sich eine Verbreiterung der Wandstärke von ca. 50 % gegenüber Edelstahl. Zudem konnten höhere Geschwindigkeiten umgesetzt werden. Beides führt zu einer Steigerung der Volumenbaurrate von 50 - 70 % gegenüber Edelstahl. Jedoch wiesen die Proben eine hohe Porosität auf und die Dichten lagen archimedisch bei  $2,6 \text{ g/cm}^3$  und bildanalytisch bei 96 %. Weiter Untersuchungen hierzu stehen noch aus.

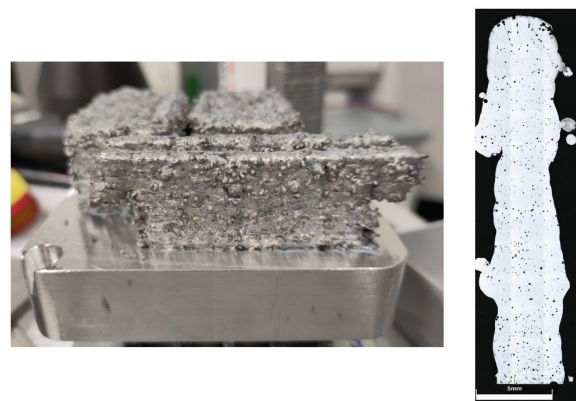


Abbildung 6: Erste Untersuchungen zum Aufbau von Wandstrukturen mit AlSi10Mg. Links: Aufnahme von Wandstrukturen. Rechts: Querschliff einer Wand mit geeigneten Parametersatz.

## 6. Ausblick

Parallel zu weiteren Prozess- und Materialuntersuchungen wird derzeit eine neue Anlage mit einem deutlich größeren Bauraum von  $2 \times 2 \times 1 \text{ m}^3$  aufgebaut. Damit soll die vorgestellte Leichtbau-Rahmenstruktur gefertigt werden. In die Anlage soll das bereits erwähnte 8 kW Lasersystem integriert werden. Durch Variation des Spotdurchmessers im Prozess können verschiedene Wandstärken realisiert werden und je nachdem passende Strukturauflösung gewählt werden. So sind theoretische Aufbauraten von bis zu 10 kg/h möglich. Eine weitere Neuerung ist die Einbindung und Erprobung einer Leistungsregelung mittels IR-Kamera.

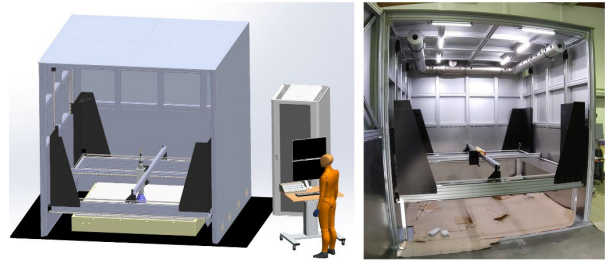


Abbildung 7: Neue Makro-SLM-Anlage mit einem Bauraum von  $2 \times 2 \times 1 \text{ m}^3$ . Links: CAD-Modell mit ausgeblendeter Tür. Rechts: Im Aufbau befindliche Anlage mit geöffneter Tür.

## Literaturverzeichnis

- [1] NXG XII 600 Metal 3D Printer von SLM-Solution: <https://www.slm-pushing-the-limits.com/>, zuletzt geprüft: 02.11.2023
- [2] FS621M Metal 3D Printer von Farsoon Technologie: <https://www.farsoon-gl.com/products/fs621m/>, zuletzt geprüft: 02.11.2023
- [3] EP-M1550 Metal 3D Printer von E-Plus-3D: <https://www.eplus3d.com/products/ep-m1550-metal-3d-printer/>, zuletzt geprüft: 02.11.2023
- [4] RODRIGUES, Tiago A., et al. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 2019, 12. Jg., Nr. 7, S. 1121.
- [5] LI, Zuo, et al. High deposition rate powder-and wire-based laser directed energy deposition of metallic materials: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2022, S. 103942.