

Machbarkeitsstudie zur Verarbeitung von nicht rostendem Stahl 1.4404 unter Verwendung einer Diodenlaser-basierten LPBF-Maschine mit kartesischem Achssystem

M.Eng. Dawid Ziebura *Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT*

Dr.-Ing. Sebastian Bremen *Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT*

Prof. Dr.-Ing. Johannes Henrich Schleifenbaum *Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT*

Prof. Dr.-Ing. Andreas Gebhardt *Fachhochschule Aachen*

Zusammenfassungen

Machbarkeitsstudie an einer neu entwickelten LPBF-Maschine unter Verwendung eines Diodenlasers und kartesischen Achssystemen. Ziel der Untersuchung ist es, die Eignung eines Diodenlasers für den LPBF-Prozess zu verifizieren und geeignete Prozessparameter für den Werkstoff 1.4404 zu entwickeln. Untersucht werden Bauteildichte, Einschweißtiefe und Zugfestigkeit.

Feasibility study on a newly developed LPBF machine using a diode laser and cartesian axis systems. The aim of the investigation is to verify the suitability of a diode laser for the LPBF process and to develop suitable process parameters for the material 1.4404. The investigations cover component density, weld depth and tensile strength

URN: urn:nbn:de:0009-2-47935

1. Einleitung

Das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (engl. Laser Powder Bed Fusion -LPBF) gehört zu den additiven Fertigungsverfahren zur Verarbeitung von metallischen Werkstoffen und hat sich durch die Möglichkeit, hochkomplexe Bauteile herzustellen, in der Fertigungstechnik etabliert [1]. Aufgrund der hohen Investitionskosten für die Anlagentechnik und die damit verbundenen hohen Maschinenstundensätze ist vor allem für KMU der Einstieg in diese Technologie ein großes Hindernis und wirtschaftliches Risiko [2,3]. Aus diesem Grund werden in einer Kooperationsgruppe, dem Aachener Zentrum für 3D-Druck, bestehend aus dem Fraunhofer ILT und der FH Aachen Ansätze zur drastischen Kostenreduktion für LPBF-Maschinen gesucht. In dieser Machbarkeitsstudie wird ein neues Maschinenkonzept für den LPBF-Prozess vorgestellt und eine Parameterstudie durchgeführt.

2. Maschinenaufbau und –Charakterisierung

Das in der Studie verwendete Anlagenkonzept wird im Folgenden als Low Cost LPBF Prototyp bezeichnet und vorgestellt. Der wesentliche Unterschied zu konventionellen LPBF-Maschinen besteht darin, dass in diesem Prototypen auf kostentreibende Faserlaser und Scanner-Systeme verzichtet wird. Stattdessen wird ein fasergekoppelter Diodenlaser verwendet. Mittels einer Optik, die auf einem kartesischen Achssystem fest montiert wird, wird der Laserstrahl mit einem konstanten Abstand zum Pulverbett geführt. In Abbildung 1 wird der Aufbau der Maschine dargestellt. Die Eckdaten zur Maschine sind der folgenden Auflistung zu entnehmen.

- 2-Achsen-Laserbewegungssystem in x- und y-Richtung
- Bauraum: \varnothing 80 mm x 90 mm
- 120 W Diodenlaser
- Optik mit 131 μ m Fokussdurchmesser

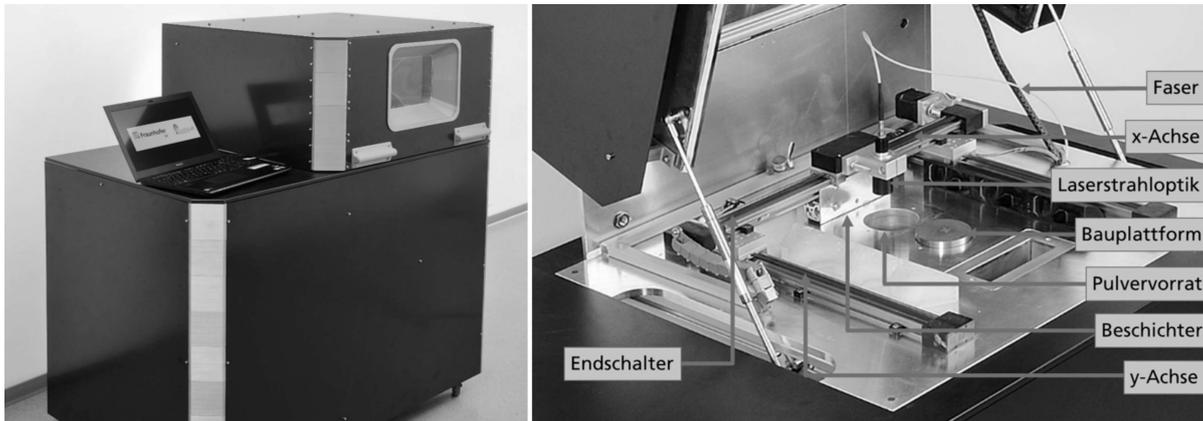


Abbildung 1: Low Cost LPBF Prototyp (links), Aufbau des Bauraums (rechts)

Der in dieser Studie verwendete Laser ist ein 120 W JDSU Diodenlaser mit 106,5 μ m Faserkerndurchmesser. Um die Kosten möglichst gering zu halten, besteht die Optik aus einer Achromat-Kollimationslinse und Fokussierlinse. Die ermittelte Strahlkaustik ist in Abbildung 2 dargestellt. Der daraus ermittelte minimale Fokussdurchmesser beträgt 131 μ m und ergibt einen Arbeitsabstand von 40 mm zum Pulverbett.

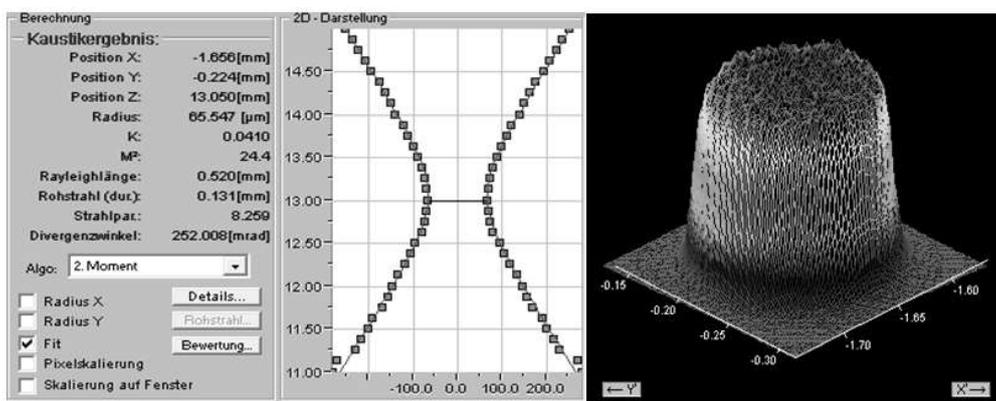


Abbildung 2: Ermittelte Top-Hat Strahlkaustik mit 131 μ m Fokussdurchmesser

Die Optikpositionierung wird in diesen Prototypen mittels Nema 17 Schrittmotoren mit 0,5 Nm Haltemoment und einem schmierstofffreien kartesischen Achssystem der Firma igus GmbH durchgeführt. Zur Vorbereitung der Einzelspurversuche in Kapitel 2.1 wurden zunächst Geschwindigkeits- und Beschleunigungskurven für das Achssystem aufgenommen, um die Grenzen des Positioniersystems aufzuzeigen. Wie in Abbildung 3 dargestellt, wurde mittels eines Keyence Triangulationsmessgerätes die Geschwindigkeit über den Weg aufgenommen. Die Geschwindigkeiten wurden im Bereich von 40 mm/s - 100 mm/s auf einer Gesamtstrecke von 10 mm gemessen. Die gewählte Beschleunigung ist zur Vermeidung von Schrittverlusten auf 1000 mm/s² begrenzt.

Bei allen untersuchten Geschwindigkeiten zeigt sich ein ähnliches Beschleunigungsverhalten. In den Anfangsphasen überschneiden sich alle Kurven und es kommt bei der jeweiligen Geschwindigkeit zu einer Überschwingung über den eingestellten Sollwert, welche sich über die Messstrecke stabilisiert. Bei einer eingestellten Geschwindigkeit von 40 mm/s beträgt der Beschleunigungsweg etwa 1 mm, bei einer eingestellten Geschwindigkeit von 100 mm/s beträgt der Beschleunigungsweg etwa 5 mm. Um in den Vorversuchen eine möglichst konstante Schweißraupenform zu erhalten, wird die Geschwindigkeit in den weiteren Versuchen auf 40 mm/s begrenzt.

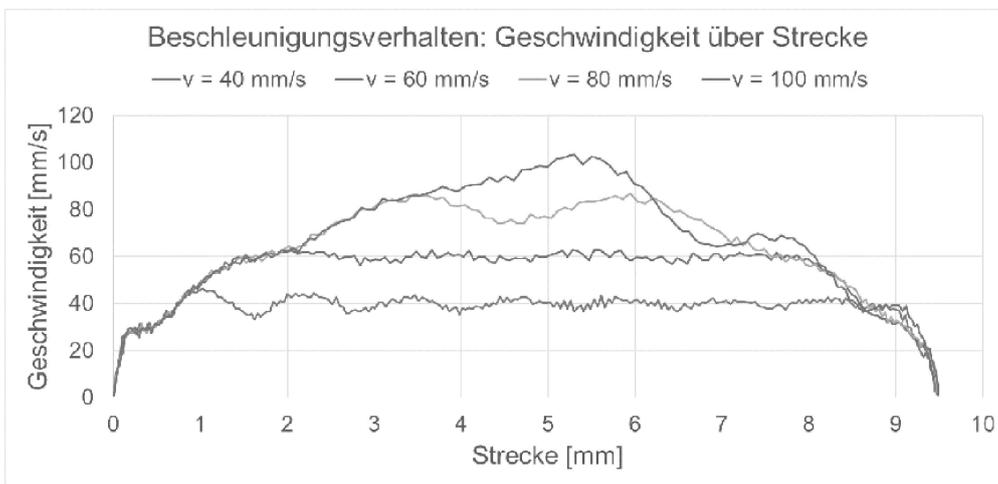


Abbildung 3: Mittels Triangulationsmessgerät aufgenommene Geschwindigkeit-Weg-Kurven des kartesischen Achssystems.

3. Versuchsdurchführung

3.1. Einzelspuren mit Variation der Laserleistung und Schichthöhe

Die in den folgenden Versuchen zu Grunde gelegte Belichtungsstrategie ist eine Punkt-zu-Punkt-Fahrt von 10 mm inkl. der Beschleunigungsstrecke der bewegten Optik. Auf Grund der verwendeten Schrittmotoren und der begrenzten Beschleunigung wird eine maximale Verfahrensgeschwindigkeit von 40 mm/s gewählt. Zur Ermittlung eines Startparameterfensters werden im ersten Schritt Einzelspuren unter Variation der Laserleistung gefahren und eine Schichthöhe von 50 μm gewählt. Die Laserleistung wird zwischen 30 W, 50 W und 80 W variiert.

Es zeigt sich, dass erst bei einer eingestellten Laserleistung von 80 W eine durchgehende und gleichförmige Schweißbraupe erzeugt werden kann, die eine durchschnittliche Schweißbraupenbreite (SWB) von etwa 250 μm aufweist. Die Ergebnisse werden in Abbildung 4 dargestellt. Aus diesem Grund wird für die weiteren Versuche eine Laserleistung von 80 W gewählt.

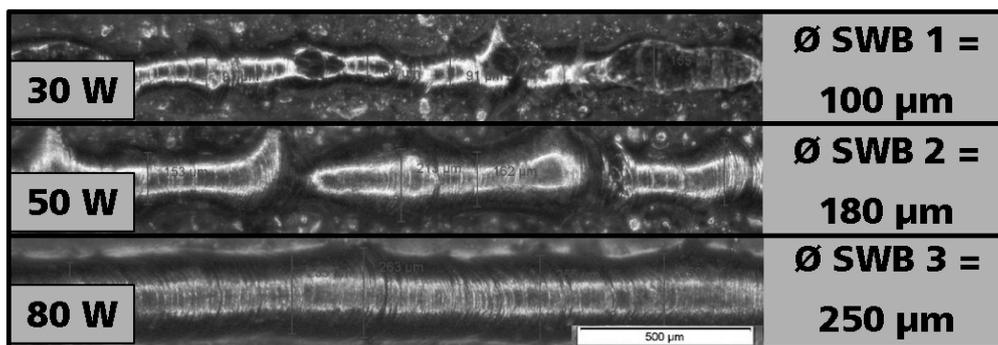


Abbildung 4: Schweißbraupenbreite unter Variation der Laserleistung zwischen 30 W (oben), 50 W (Mitte) und 80 W (unten) bei konstanter Scangeschwindigkeit von 40 mm/s und 50 μm Schichthöhe.

Im zweiten Schritt wird bei konstanter Laserleistung von 80 W und einer Scangeschwindigkeit von 40 mm/s die Schichthöhe zwischen 50 μm , 70 μm und 90 μm variiert. Bei allen variierten Schichthöhen werden stabile Schweißbraupen erzeugt, die sich in ihrer Breite unterscheiden. In Abbildung 5 werden die jeweils erzeugten Schweißbraupen dargestellt. Die mit einer Schichthöhe von 50 μm erzeugte Schweißbraupe weist Anlauffarben auf, die auf eine zu hohe Energieeinbringung hindeuten. Die Breite der Schweißbraupe beträgt im Durchschnitt 250 μm . Bei 70 μm Schichthöhe wird eine Schweißbraupenbreite von durchschnittlich 270 μm erzeugt. Die Schichthöhe von 90 μm führt zu einer durchschnittlichen Schweißbraupenbreite von 280 μm . Auffällig ist, dass bei steigender Schichthöhe auch die Schweißbraupenbreite steigt, trotz gleicher Streckenenergie.

$$E_{St} = \frac{P_L}{v_s} = \frac{80 \text{ W}}{40 \text{ mm/s}} = 2 \text{ J/mm} \quad [4]$$

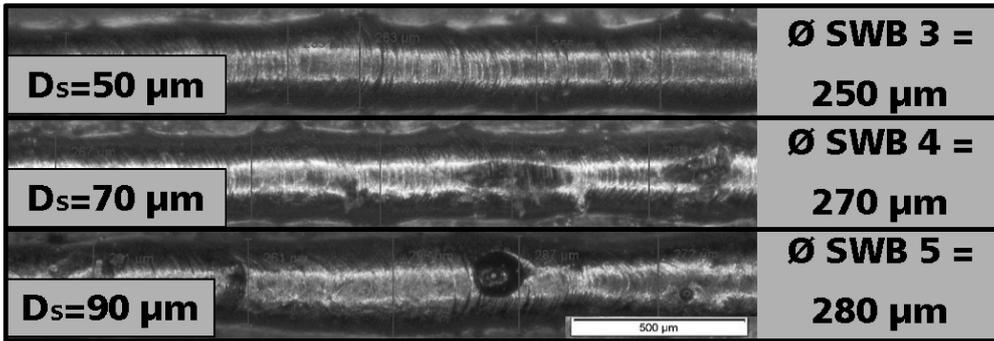


Abbildung 5: Schweißraupenbreite in Abhängigkeit der Schichthöhe

3.2. Untersuchung der Bauteildichte unter Variation des Spurabstandes und der Schichthöhe

Im dritten Schritt werden Volumenkörper mit der Zieldichte von $> 99,5 \%$ erzeugt. Der je nach Schichthöhe definierte Spurabstand entspricht etwa 70 % der Schweißraupenbreite der Einzelspurversuche. Die Scangeschwindigkeit von 40 mm/s und die Laserleistung von 80 W werden hier konstant gehalten. In Tabelle 1 sind die jeweiligen Parameter mit entsprechender Bauteildichte und der eingebrachten Volumenenergiedichte E_v dargestellt, die dem Energieeintrag pro Volumen entspricht.

$$E_v = \frac{P_L}{v_s * D_s * \Delta y_s} = \frac{\text{Laserleistung}}{\text{Scangeschwindigkeit} * \text{Schichthöhe} * \text{Hutabstand}} \quad [5]$$

In Abbildung 6 werden mit Kalling II geätzte Schliffbilder dargestellt. Verglichen werden Proben, die mit 50 µm und mit 90 µm Schichthöhe aufgebaut wurden. Trotz der gleichen Streckenenergie kann gezeigt werden, dass die Schweißraupenbreite (SWB) und Schweißraupentiefe (SWT) mit zunehmender Schichthöhe gestiegen sind.

Laserleistung P_L	Scangeschwindigkeit v_s	Schichthöhe D_s	Schweißraupenbreite der Einzelspur SWB	Eingestellter Spurabstand Δy_s	Volumenenergiedichte E_v	Dichte mit Varianz
80 W	40 mm/s	50 µm	250 µm	175 µm	228,6 J/mm ³	99,73 % ± 0,16 %
80 W	40 mm/s	70 µm	270 µm	190 µm	150,4 J/mm ³	99,7 % ± 0,08 %
80 W	40 mm/s	90 µm	281 µm	197 µm	112,8 J/mm ³	99,33 % ± 0,33 %

Tabelle 1: Ermittelte Bauteildichte unter Variation der Schichthöhe zwischen 50 µm und 90 µm

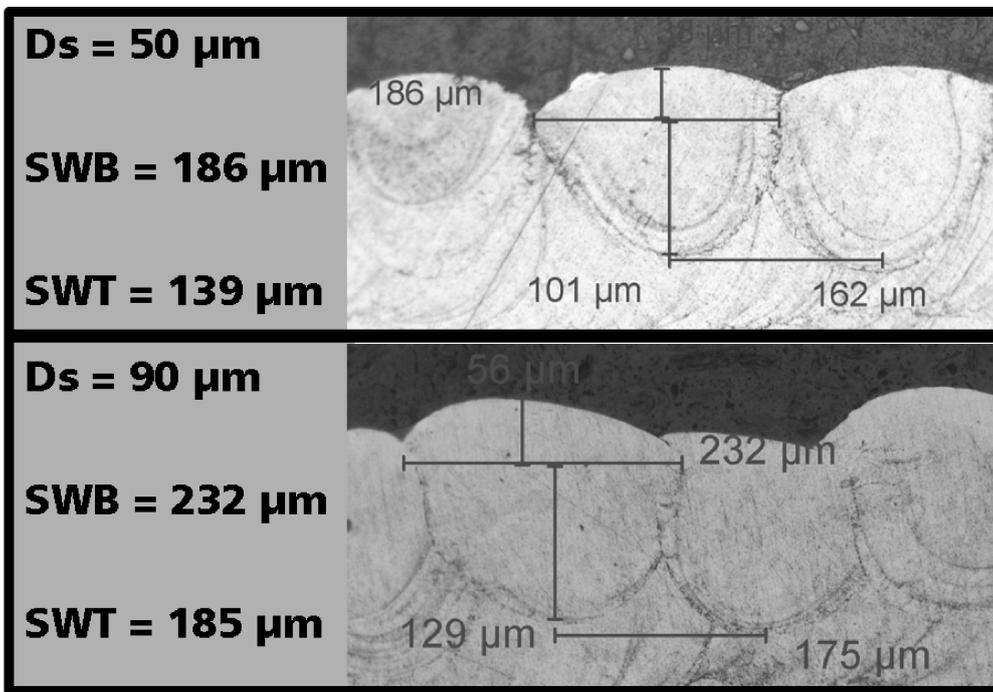


Abbildung 6: Querschliffe geätzter Proben mit konstanter Energieeinbringung unter Variation der Schichthöhe von 50 µm und 90 µm Schichthöhe

3.3. Untersuchung der Oberflächenrauheit

Zur Ermittlung der Oberflächenrauheit wurden Proben mit den Schichthöhen von 50 µm, 70 µm und 90 µm in einem Winkel von 90° und 45° zur Bauplattform aufgebaut und mittels Tastschnittgerät untersucht. Ermittelt wurde jeweils die gemittelte Rautiefe R_z , die maximale Rautiefe R_{max} und der Mittenrauwert R_a . Die ermittelten Rauheitswerte wurden jeweils seitlich in Aufbaurichtung und auf der Oberfläche (Deckfläche) ermittelt und sind in Tabelle 2 für die jeweiligen Schichthöhen dargestellt. Bei den Proben mit 90° Aufbauwinkel zeigt sich, dass die Rauheit mit steigender Schichthöhe sinkt. Dies spricht für einen zu hohen Energieeintrag ins Bauteil. Mit steigender Schichthöhe wurde auch die Spurbreite vergrößert. Dies resultiert ebenfalls in einer höheren Rauheit an der Oberfläche.

Schichthöhe D_s Spurabstand Δy_s	Aufbaurichtung $\alpha = 90^\circ$	Aufbaurichtung $\alpha = 45^\circ$	Oberfläche $\alpha = 0^\circ$
$D_s = 50 \mu\text{m}$ $\Delta y_s = 175 \mu\text{m}$ $E_v = 228,6 \text{ J/mm}^3$	$R_z = 54,58 \mu\text{m}$ $R_{max} = 75,18 \mu\text{m}$ $R_a = 10,96 \mu\text{m}$	$R_z = 75,99 \mu\text{m}$ $R_{max} = 101,19 \mu\text{m}$ $R_a = 19,11 \mu\text{m}$	$R_z = 32,11 \mu\text{m}$ $R_{max} = 38,24 \mu\text{m}$ $R_a = 6,73 \mu\text{m}$
$D_s = 70 \mu\text{m}$ $\Delta y_s = 190 \mu\text{m}$ $E_v = 150,4 \text{ J/mm}^3$	$R_z = 43,58 \mu\text{m}$ $R_{max} = 64,64 \mu\text{m}$ $R_a = 8,21 \mu\text{m}$	$R_z = 64,36 \mu\text{m}$ $R_{max} = 94,97 \mu\text{m}$ $R_a = 13,81 \mu\text{m}$	$R_z = 61,18 \mu\text{m}$ $R_{max} = 83,76 \mu\text{m}$ $R_a = 12,77 \mu\text{m}$
$D_s = 90 \mu\text{m}$ $\Delta y_s = 197 \mu\text{m}$ $E_v = 112,8 \text{ J/mm}^3$	$R_z = 33,18 \mu\text{m}$ $R_{max} = 43,89 \mu\text{m}$ $R_a = 7,04 \mu\text{m}$	$R_z = 117,63 \mu\text{m}$ $R_{max} = 163,69 \mu\text{m}$ $R_a = 22,74 \mu\text{m}$	$R_z = 99,05 \mu\text{m}$ $R_{max} = 149,90 \mu\text{m}$ $R_a = 18,71 \mu\text{m}$

Tabelle 2: Mittels Tastschnittgerät ermittelten Rauheitswerte an den Oberflächen parallel und senkrecht zur Aufbaurichtung unter Variation des Aufbauwinkels und Schichthöhen von:

$D_s = 50 \mu\text{m}$, $D_s = 70 \mu\text{m}$ und $D_s = 90 \mu\text{m}$

3.4. Ermittlung der statischen Zugfestigkeit

Im vierten Schritt werden jeweils drei Zugproben mit $50 \mu\text{m}$ und $90 \mu\text{m}$ Schichthöhe aufgebaut. Diese sind nach DIN EN 6892 mit der Geometrie B4x20 stehend in Z-Richtung aufgebaut. Zum Vergleich werden Werte konventionell gefertigter Zugproben aus der Literatur aufgeführt. Die erreichten Festigkeitswerte sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Das entsprechende Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist in Diagramm 1 abgebildet.

Kennwerte	Schichthöhe = $50 \mu\text{m}$	Schichthöhe = $90 \mu\text{m}$	Vergleichswerte [6]
Zugfestigkeit R_m	$655 \text{ MPa} \pm 7 \text{ MPa}$	$542 \text{ MPa} \pm 12 \text{ MPa}$	$500 \text{ MPa} - 700 \text{ MPa}$
Dehngrenze $R_{p0,2}$	$502 \text{ MPa} \pm 7 \text{ MPa}$	$447 \text{ MPa} \pm 11 \text{ MPa}$	200 MPa
Gleichmaßdehnung A_g	$25,08 \% \pm 4,19 \%$	$7,82 \% \pm 0,42 \%$	40%

Tabelle 3: Ermittelte statische Zugfestigkeit von B4*20 Zugproben unter Variation der Schichthöhe D_s von $50 \mu\text{m}$ und $90 \mu\text{m}$

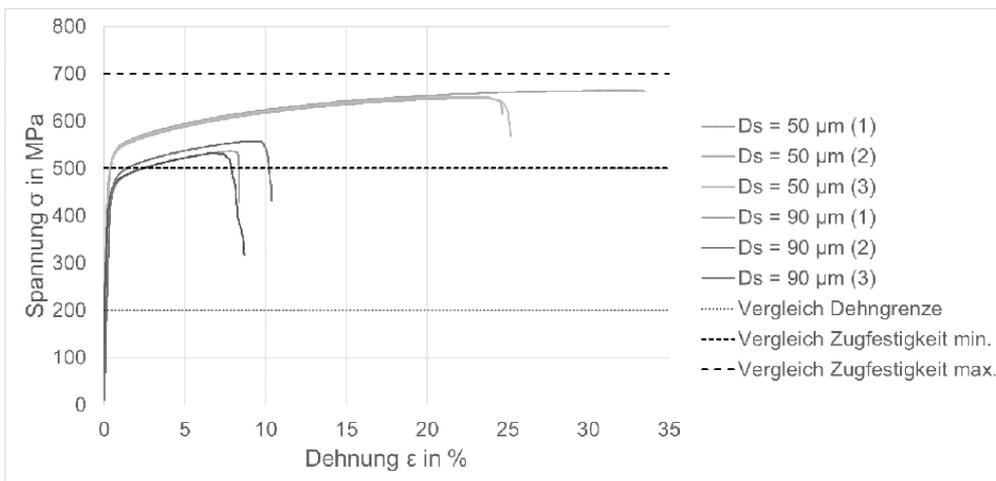


Diagramm 1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für jeweils drei stehend gebaute B4*20 Zugproben mit einer Schichthöhe von $D_s = 50 \mu\text{m}$ und $D_s = 90 \mu\text{m}$

4. Aufbau von Demonstratoren aus 1.4404

Die erzielte Bauteilqualität wird anhand von drei Demonstratorbauteilen nochmals verdeutlicht. Die erste gewählte Testgeometrie wird in Abbildung 7 dargestellt und enthält folgende geometrischen Strukturen:

Neigungswinkel zwischen 10° und 50° . Bohrungen und Stege jeweils als Prägung und Erhebung mit Durchmessern zwischen $0,5 \text{ mm}$ und 5 mm in horizontaler und zwischen 1 mm und 5 mm in vertikaler Ausrichtung zur Aufbaurichtung. Zusätzlich wurde eine 10 mm lange Brücke mit Stützstrukturen und eine 45° Spirale auf der Oberfläche aufgebaut.

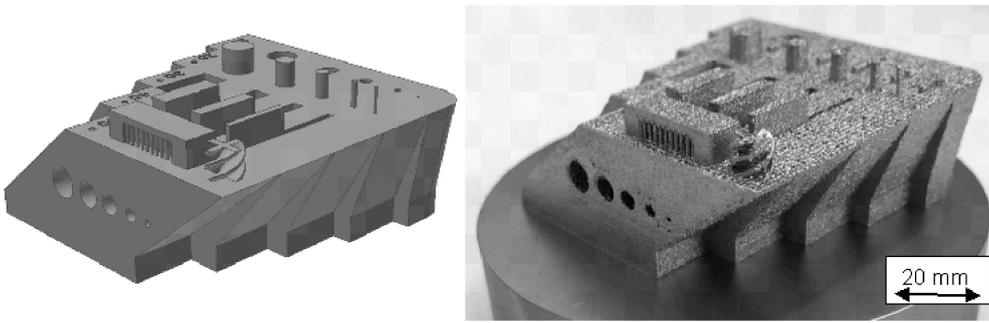


Abbildung 7: Testbauteil mit 90 µm Schichthöhe

Um den Einfluss kurzer Vektorlängen auf die Geometriegenauigkeit zu testen, wurde ein Modell des Aachener Doms aufgebaut, welches durch seine komplexe Geometrie und Kontur geeignet ist. Der Dom hat eine Höhe von 32 mm und ist in Abbildung 8 dargestellt.

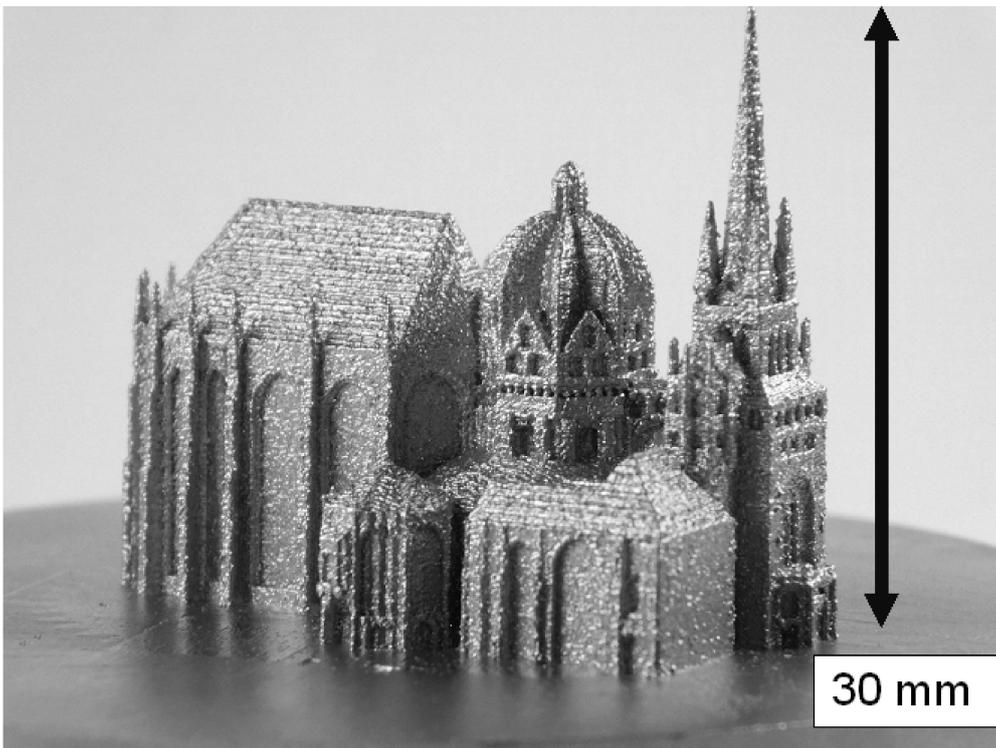


Abbildung 8: Modell des Aachener Doms zur Darstellung komplexer Geometrien mit kurzen Vektorlängen

Um die minimale Detailauflösung darzustellen, wurden Pin-Strukturen mit einem Durchmesser von 0,5 mm aufgebaut. Diese können als Stützstrukturen dienen und sind in Abbildung 9 dargestellt.

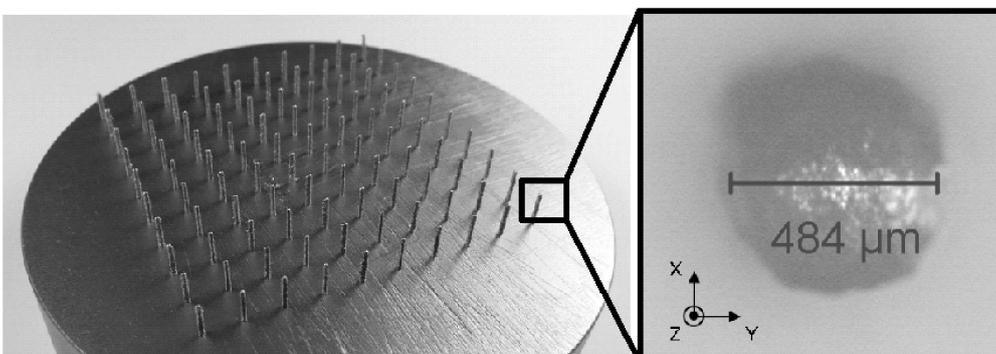


Abbildung 9: Pin-Strukturen mit 0,5 mm Durchmesser zur Darstellung der kleinsten möglichen Auflösung

5. Fazit und Ausblick

In der durchgeführten Untersuchung wurde eine diodenlaser-basierte LBPF-Prototypanlage mit kartesischen Achssystem zur Laserpositionierung entwickelt und auf ihre Eignung bzgl. des LPBF-Prozesses untersucht. Dazu wurde nicht rostender Stahl 1.4404 verarbeitet und der Zielwert für die Dichte von 99,5 % festgelegt.

Aufgrund der klein dimensionierten Motoren und der somit limitierten Beschleunigung der Laseroptik, wurden die Prozessparameter für Geschwindigkeit auf 40 mm/s limitiert. Um zu hohe Streckenenergien zu vermeiden wurde die Laserleistung auf 80 W begrenzt. Auffällig ist, dass mit steigender Schichthöhe auch die Schweißraupenbreite und Einschweißtiefe gestiegen ist. Der Einfluss der eingebrachten Energie auf die Schweißraupenstabilität, Schweißraupenbreite und -tiefe muss weiter untersucht werden.

In den folgenden Schritten konnte gezeigt werden, dass die kritische Bauteildichte von 99,5 % erreicht wurde. Insgesamt wurden Parameter für die drei Schichthöhen von 50 µm, 70 µm und 90 µm ermittelt. Zur Ermittlung der statischen Zugfestigkeit wurden jeweils drei Zugproben der kleinsten und größten Schichthöhe gefertigt und mit konventionell hergestellten Zugproben aus der Literatur verglichen. Der Vergleich zeigt, dass alle Zugproben innerhalb der Grenzwerte aus der Literatur liegen. Die Zugproben mit 90 µm Schichthöhe weisen ein spröderes Verhalten auf als die mit 50 µm Schichthöhe erzeugten Zugproben. Dies könnte an der geringeren Bauteildichte liegen und sollte weiter untersucht werden.

Die grundsätzliche Eignung von Diodenlasern für den LPBF-Prozess konnte gezeigt werden. Das Potenzial eines solchen Systems ist noch nicht ausgeschöpft. In zukünftigen Untersuchungen sollte das Zusammenspiel aus höher erzielbaren Geschwindigkeiten und der Variation der Fokusböschung untersucht werden.

6. Literatur

- [1] Gebhardt, Andreas: "Generative Fertigungsverfahren": 3.Auflage, München, Carl Hanser Verlag, 2007
- [2] Möhrle M, Müller J, Emmelmann C: „Industrialisierungsstudie Additive Fertigung – Herausforderungen und Ansätze“: RTeJournal - Fachforum für Rapid Technologie, Vol. 2017
- [3] R. Poprawe, C. Hinke, W. Meiners, J. Schrage, S. Bremen, S. Merkt: SLM Production Systems: Recent Developments in Process Development, Machine Concepts and Component Design. In: C. Brecher (ed.): Advances in Production Technology, Lecture Notes in Production Engineering. Springer 2015
- [4] Brecher, Christian: „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“, Berlin und Heidelberg, Springer-Verlag, 2011
- [5] Meiners, Wilhelm: „Direktes Selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe“. Dissertation RWTH Aachen, Shaker, Aachen 1999
- [6] Deutsche Edelstahlwerke GmbH: Werkstoffdatenblatt 1.4404 (2016): https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/.../RSH/1.4404_de.pdf

7. Kontaktangaben

Dawid Ziebura
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Steinbachstr. 15
52074 Aachen
Email: dawid.ziebura@ilt.fraunhofer.de
WEB: www.ilt.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Sebastian Bremen
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Steinbachstr. 15
52074 Aachen
Email: sebastian.bremen@ilt.fraunhofer.de
WEB: www.ilt.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Johannes Henrich Schleifenbaum
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Steinbachstr. 15
52074 Aachen
Email: johannes.henrich.schleifenbaum@ilt.fraunhofer.de
WEB: www.ilt.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Andreas Gebhardt
Fachhochschule Aachen
Goethestr. 1
52064 Aachen
Email: gebhardt@fh-aachen.de
WEB: www.goethelab.fh-aachen.de

Volltext

Lizenz

Jedermann darf dieses Werk unter den Bedingungen der Digital Peer Publishing Lizenz elektronisch übermitteln und zum Download bereitstellen. Der Lizenztext ist im Internet unter der Adresse http://www.dipp.nrw.de/lizenzen/dppl/dppl/DPPL_v2_de_06-2004.html abrufbar.

Empfohlene Zitierweise

Ziebura D, Bremen S, Schleifenbaum JH, Gebhardt A (2018). Machbarkeitsstudie zur Verarbeitung von nicht rostendem Stahl 1.4404 unter Verwendung einer Diodenlaser-basierten LPBF-Maschine mit kartesischem Achssystem. RTejournal - Fachforum für Rapid Technologien, Vol. 2018. (urn:nbn:de:0009-2-47935)

Bitte geben Sie beim Zitieren dieses Artikels die exakte URL und das Datum Ihres letzten Besuchs bei dieser Online-Adresse an.