

Femtosekundenlaser-gestützte LPBF-Prozessentwicklung für hochauflösenden PA12-3D-Druck

Markus Kühn¹, Andrea Barz¹, Felix Thumann¹, Jens Bliedtner¹, Sebastian Matthes²,
Markus May², Patrick Hähle³, Daniel Störzner³

¹Ernst Abbe Hochschule Jena, Jena, Deutschland,

²Faktur GmbH, Jena, Deutschland

³LCP Laser Cut Processing GmbH, Hermsdorf, Deutschland

Kurzfassung

Diese Arbeit untersucht ein neuartiges Laser Powder Bed Fusion (LPBF)-Verfahren auf Basis eines Femtosekundenlasers zur Herstellung hochauflösender Bauteile aus PA12-Pulver. Durch die ultrakurzen Pulse (ca. 220 fs) wird der thermische Energieeintrag stark lokalisiert, was Überhitzungseffekte und Bauteilverzug erheblich reduziert. Somit lassen sich feinste Strukturen sowie komplexe Geometrien mit hoher Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität realisieren. Der Ansatz erweitert das Materialspektrum in der additiven Fertigung erheblich. Damit kann das vorgestellte Verfahren die Basis für neuartige hochpräzisions-Bauteile aus PA12 und vergleichbaren Polymeren schaffen.

1. Einleitung

Die ultrakurzen Femtosekundenpulse im UKP-LPBF erlauben eine extrem präzise Energieeinbringung und damit Strukturauflösungen im Sub- μm -Bereich ($0,1\text{--}1\ \mu\text{m}$) bei Scangeschwindigkeiten von bis zu $200\ \text{mm/s}$, was die Ausbildung einer feinkörnigen Mikrostruktur der Polymermaterialien mit minimaler Porosität unterstützt [1]. Verbelen et al. verwendet PA12-Pulver, welche eine enge Teilchengrößenverteilung ($D_{10} = 38,8\ \mu\text{m}$, $D_{50} = 58,6\ \mu\text{m}$, $D_{90} = 88,3\ \mu\text{m}$) und eine Schüttdichte von etwa $44\ \%$ aufweisen, sodass homogene Pulverschichten von $100\text{--}150\ \mu\text{m}$ Dicke realisierbar sind und gleichmäßige Bauteildichten erzeugt werden können [2]. Gleichzeitig verhindert die extrem kurze Energieeintragungsdauer eine thermische Zersetzung des PA12, sodass die Materialdegradation im Pulverbettprozess um mehr als $90\ \%$ gegenüber dem herkömmlichem SLS-Prozess gesenkt wird [1].

Das Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Verfahren von Polyamid 12 (PA12) mittels UltrakurzpulsLasern nutzt Pulsdauern im Bereich von $100\ \text{fs}$ bis $10\ \text{ps}$ bei Spitzenintensitäten von $10^{13}\text{--}10^{14}\ \text{W/cm}^2$, typischerweise bei Wellenlängen um $1030\ \text{nm}$ und fokussiert auf Spotradien von $15\text{--}30\ \mu\text{m}$ [3]. Um einen PA12-Partikel mit $100\ \mu\text{m}$ Radius vollständig zu schmelzen, sind etwa $192\ \mu\text{J}$ erforderlich; üblicherweise werden $384\ \mu\text{J}$ pro Puls appliziert, was einer Energiedichte von rund $0,54\ \text{J/mm}^2$ entspricht. Das ist eine Größenordnung höher als bei CO_2 -basierten Systemen ($0,02\text{--}0,04\ \text{J/mm}^2$) [4]. PA12 weist eine Schmelztemperatur T_m von $178\ ^\circ\text{C}$ und eine Schmelzenthalpie von $56,4\ \text{J/g}$ auf, kombiniert mit einer spezifischen Wärmekapazität von $1200\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ und einer thermischen Leitfähigkeit von $0,19\text{--}0,25\ \text{W/(m}\cdot\text{K)}$, welche eine rasche Wärmeaufnahme und kontrollierte Abkühlraten erlaubt [4]. Prakhya et al. verwenden Pulverpartikel mit Partikelgrößen von $50\text{--}200\ \mu\text{m}$ ($d_{50} \approx 125\ \mu\text{m}$). Die viskoelastischen Relaxationszeiten liegen bei $200\ ^\circ\text{C}$ und etwa

$0,014\ \text{s}$, was für die Schmelz- und Fließkinetik entscheidend ist [4]. Durch die extrem kurzen Pulse wird der Wärmeeintrag auf wenige Mikrometer begrenzt, wodurch die Schmelzbadgröße klein ist und die Pulverkonsolidierung sehr präzise gesteuert wird. Dies minimiert Wärmeeinflusszonen und fördert eine feinkristalline Mikrostruktur mit geringer Porosität, wie es in Ultrakurzpuls-LPBF-Anwendungen beschrieben wird [5].

In der vorliegenden Arbeit werden die Laser- und Prozessparameter für die Prozessierung von PA12, sowie die Scanlinienstrategie ermittelt, um endkonturnahe 3D-Formkörper im LPBF-Verfahren mittels UltrakurzpulsLaser zu erzeugen.

2. Methode Versuchsaufbau

Das Versuchsaufbau (Abbildung 1) nutzt einen kompakten Yb:YAG-UltrakurzpulsLaser (Compact Ytterbium-60 der Firma AFS, Deutschland) mit einer zentralen Wellenlänge von $1030\ \text{nm}$, einer einstellbaren Pulswiederholrate zwischen $200\ \text{kHz}$ und $32\ \text{MHz}$ (bzw. Einzelpulsbetrieb), maximal $200\ \mu\text{J}$ Pulsenergie und minimal $220\ \text{fs}$ Pulsdauer bei nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität ($M^2 < 1,2$). Der Strahl wird über einen galvo-basierten Scankopf auf das Pulverbett gelenkt, der auf einer Z-Achse mit einer Auflösung von $\pm 5\ \mu\text{m}$ positioniert ist. Die Bauteilplattform aus Kupfer wird von unten auf 180°C erwärmt. Die Temperatur während des Bestrahleins wird mittels einer IR-Thermografiekamera (Teledyne FLIR, Wilsonville, OR, USA) kontinuierlich überwacht.

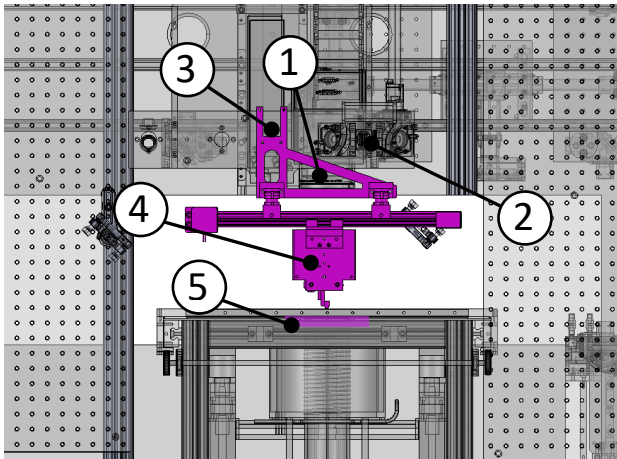


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung mit: Telezentrisches Objektiv; 2: Teil des Strahlengangs; 3: Z-Achse; 4: Pulverbehälter (2 Kammern); 5: Heizplatte

Pulvermagazin und Rakeleinheit sind eine Baugruppe, welche über eine Linearachse entlang der Rakelrichtung bewegt wird. Im Kontrast zu konventionellen Pulverauftragssystemen wird im verwendeten Versuchsstand das Bauteil nicht abgesenkt, sondern verbleibt in der initialen Position. Dabei wird das Bauteil nach oben hin entsprechend der definierten Schichthöhe über eine Zustellbewegung mit der Z-Achse, an welcher der Galvoscanner montiert ist, aufgebaut. Abbildung 2 beschreibt den Aufbau zweier beispielhafter Kunststoffschichten.

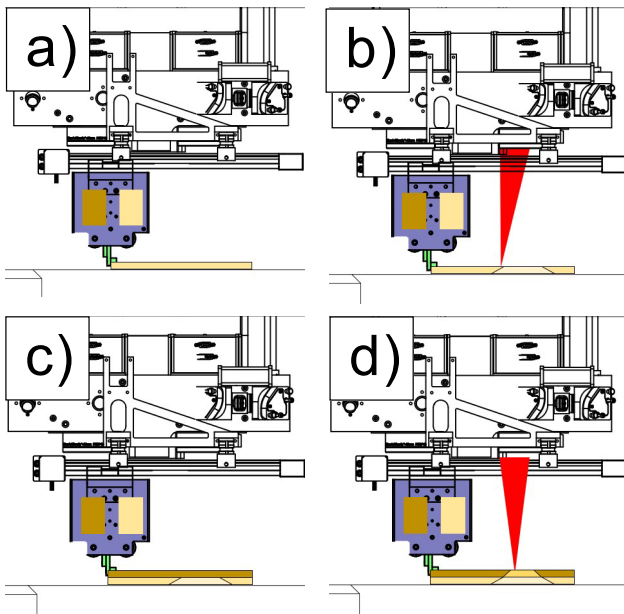


Abbildung 2: Darstellung des Schichtauftrages für zwei Schichten; a) Applizieren der Initialschicht; b) Lasersintern der Initialschicht; c) Applizieren der zweiten Schicht; d) Lasersintern der zweiten Schicht

Materialauftrag und Pulverhomogenisierung werden in einem einzigen Arbeitsgang ausgeführt. Mit dem UKP-Laser werden die jeweiligen Kunststoffschichten gesintert bzw. geschmolzen.

Material

Das verwendete PA12-Pulver ist ein feines, weißes Pulver mit einem Schmelzbereich von 184–187 °C und einer spezifischen Schüttdichte von etwa 0,4 g/cm³.

Versuchsdesign

Für die Prozessierung von PA12-Pulver werden zwei Scanstrategien verfolgt. Einerseits werden Laserparameter gesucht, welche es ermöglichen, im Pulverbett Flächen homogen im LPBF-Prozess auszuhärten. Dafür werden Scanning-Vektoren äquidistant für die gesamte Fläche angeordnet und ausgegeben. Das Kriterium für eine erfolgreiche Parametersuche sind stabile und endkonturnahe Einzelflächen.

Die zweite Bearbeitungsstrategie besteht darin, Einzel- und Mehrfachlinien zu scannen. Diese sind vorteilhaft, um dünnwandige Körper herzustellen. Dafür werden in einem Pattern von 3 x 3 jeweils Quadrate mit der Seitenlänge von 10 mm abgebildet.

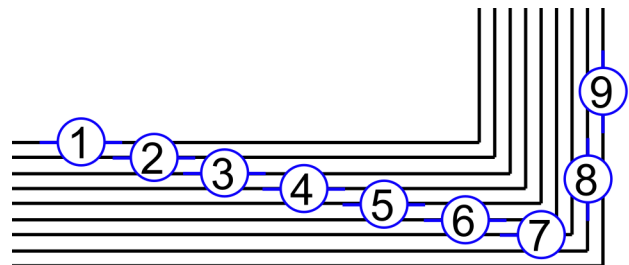


Abbildung 3: Prinzipdarstellung der Anordnung der äquidistanten Konturen

Die Konturen der jeweiligen Quadrate werden mit verschiedenen Anzahlen an äquidistanten Linien gescannt (Abbildung 3). Es soll festgestellt werden, welche Scanlinienkonfiguration die höchste Endkonturnähe und Detailtreue liefert. Dafür wird das Querschnittsprofil der jeweiligen Testgeometrie mit einem Digitalmikroskop (VHX-7000, Keyence, Osaka, Japan) aufgenommen und ausgewertet. Die Geometrie wird in 20 Schichten aufgebaut

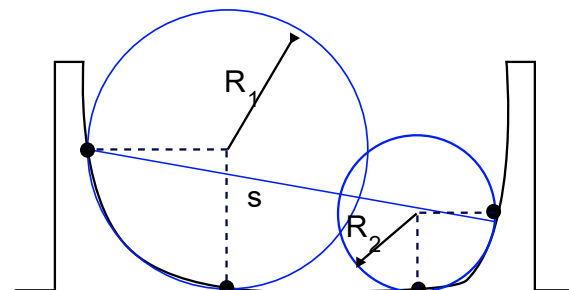


Abbildung 4: Auswerteprinzip des Flankenüberganges

Die Auswertung umfasst den Übergang der Basisfläche zur Volumenflanke, welche durch die quadratische Scan-Geometrie definiert wird. An die linken oder rechten Übergänge werden Kreise angefütt. Das Anfütt erfolgt so, dass die Kreise in zwei Punkten die Testgeometrie berühren. Diese Berührungspunkte weisen einen Winkel von 90° zum Kreisschwerpunkt auf. Die beiden

Berührungspunkte der Kreise an den Flanken spannen eine Linie mit der Länge s auf. Das Verhältnis aus s und dem mittleren Durchmesser aus $2R_1$ und $2R_2$ beschreibt den Übergangsaspekt von der Grundfläche zu den Flanken der Testgeometrie. Die ermittelten optimalen Parameter werden genutzt, um eine finale und komplexere Testgeometrie zu erzeugen.

3. Ergebnisse

Die Partikel weisen eine enge Größenverteilung auf ($D_{10} \approx 35 \mu\text{m}$, $D_{50} \approx 52 \mu\text{m}$, $D_{90} \approx 91 \mu\text{m}$), was eine homogene Schichtdicke von 100–150 μm im Pulverbett gewährleistet. Mit diesen Parametern ist das verwendete Material vergleichbar zu den Materialien von Verbelen et al. [2] und Prakhvat et al. [4].

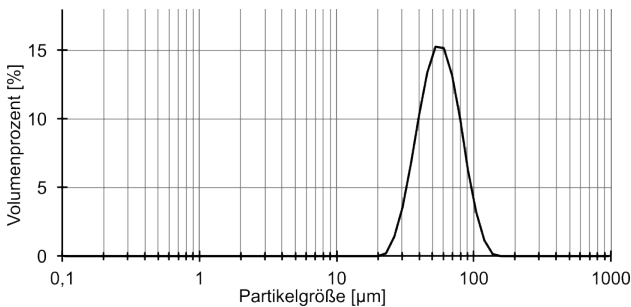


Abbildung 5: Partikelgrößenverteilung mit $D_{50} \approx 52 \mu\text{m}$

Identifiziertes Parameterfenster

Die Netzdiagramme in Abbildung 6 a bis c quantifizieren die relevanten Parameterfenster für drei fundamentale Prozesszustände beim UKP-LPBF von PA12.

In Abbildung 6a (gesintertes, weißes Pulver) liegt der Sinterschwellenbereich bei Laserleistungen von etwa 32 bis 37 W und Pulsfrequenzen zwischen 4 bis 8 MHz. Scangeschwindigkeiten von 500 bis 700 mm/s in Kombination mit einem Scanlinienabstand von 6–10 μm und positiven Fokus-Offsets ($z = +0$ bis $+2 \text{ mm}$) genügen, um eine partielle Partikelkohäsion zu erreichen, ohne dass die Pulverfarbe sich dunkel verfärbt oder Transparenz eintritt. Die Aufschmelztiefe ist hier auf wenige Mikrometer begrenzt und die Wärmeeinflusszone minimiert, was für homogene Schicht-Strukturen bei erhöhten mechanischen Festigkeiten sorgt.

In Abbildung 6b (vollständige Schmelze, braune Transluzenz) verschiebt sich das Prozessfenster zu höheren Energiedichten. Leistungen von 33 bis 37 W bei 1 bis 8 MHz Pulsfrequenz, Scangeschwindigkeiten von 300–700 mm/s und Scanlinienabständen von 3 bis 5 μm bei einer Bearbeitung im Fokus ($z = 0$) liefern eine durchgehende Schmelzpool-Bildung. Unter diesen Bedingungen verflüssigt sich das Material vollständig, es tritt eine deutliche Farbveränderung zu Braun auf und die Bauteile zeigen erhöhte optische Transluzenz aufgrund der reduzierten Porosität. Der weite Bereich der Repetitionsrate zeigt, dass der Prozess weitestgehend unabhängig von dem Parameter der Repetitionsrate ist.

Abbildung c schließlich definiert das engste Fenster für die Erzeugung einzelner Schmelzlinien. Mittlere Leistungen von 30 bis 37 W bei Frequenzen von 4 bis 8 MHz, Bearbeitung im Fokus bei $z = 0$, Scangeschwindigkeiten von 20 bis 50 mm/s genügen, um stabile, gleichmäßige Linien mit definierter Breite (ca. 150–200 μm) zu erzielen.

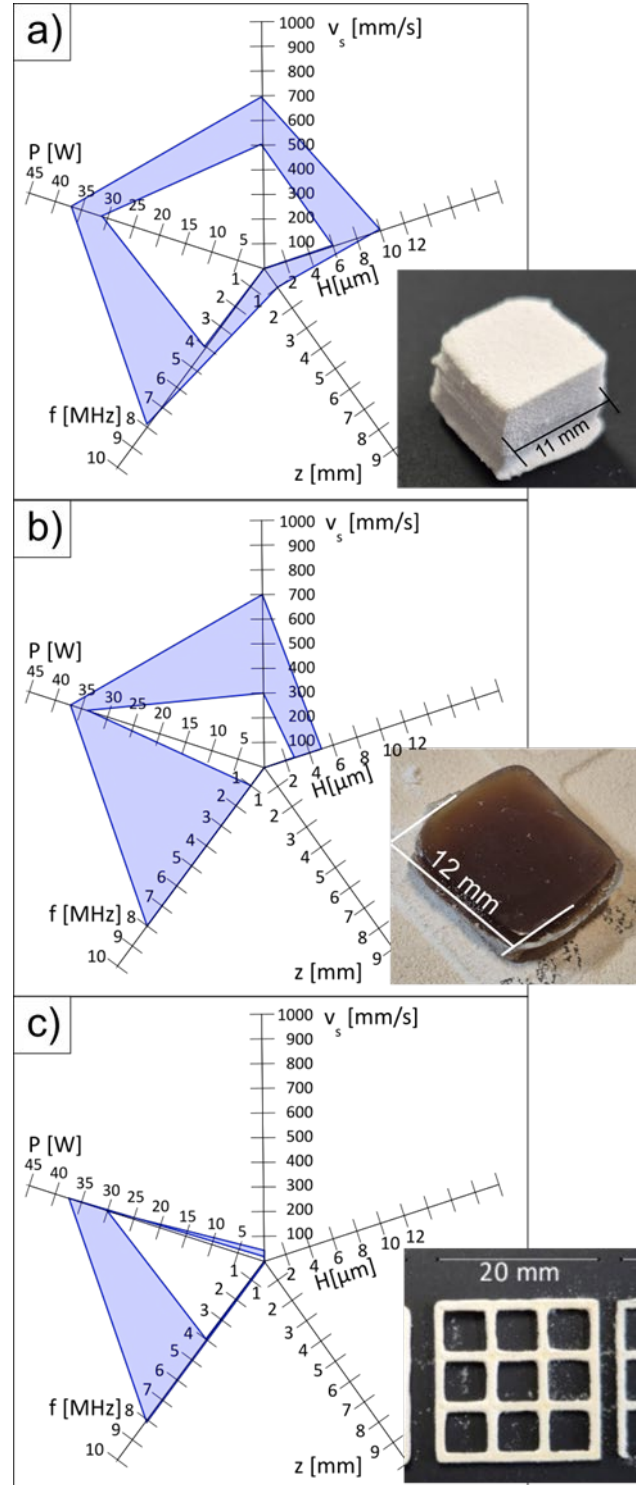


Abbildung 6: Parameterfenster für drei verschiedene PA12-Applikationen: a) gesintertes PA12 mit Flächenfüllung; b) verschmolzenes PA12 mit Flächenfüllung; c) Einzellinien-Scanning

Ein Scanlinienabstand wird nicht berücksichtigt, da mit Einzellinien gearbeitet wird. Das deutlich schmalere

Parameterfenster gegenüber den Flächenfüllungen zeigt, dass für feine Konturen das Prozessfenster enger abgesteckt werden muss und der Prozess sensibler auf Abweichungen reagiert. Es wird außerdem deutlich, dass mit steigender Prozesskomplexität, von Sintern über Schmelzen bis hin zu fein definierten Konturen, das Prozessfenster kontinuierlich schrumpft und in Richtung niedrigerer Repetitionsraten und präziserer Fokussierung verschoben wird. Dadurch lassen sich gezielt unterschiedliche Mikrostrukturen und Oberflächeneigenschaften des PA12 einstellen und optimieren.

Bewertungsgröße: Übergangsaspekt

Drei beispielhafte Übergangsaspekte sind in Abbildung 7 zu sehen. Panel a repräsentiert dabei ein einziges Single-Line-Quadrat, welches in 20 Schichten aufgebaut wird. Deutlich erkennbar ist, dass der Untergrund bzw. die Basisfläche stetig (mit Rauschanteil) in die Volumenflanken übergeht.

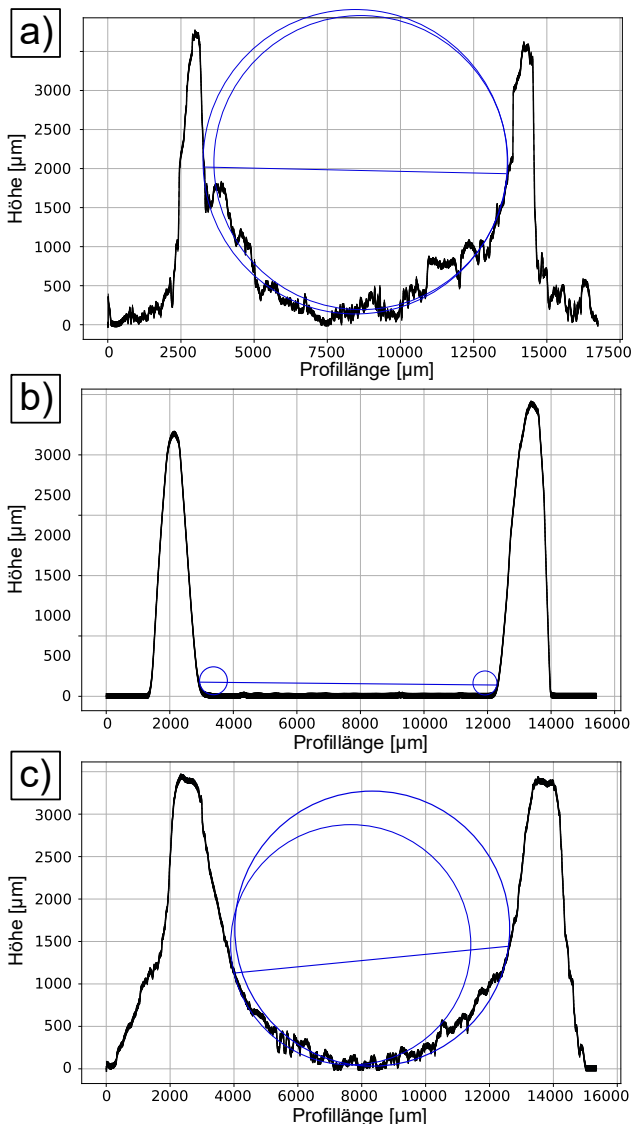


Abbildung 7: drei verschiedene Querschnittsprofile für a) $n=1$; b) $n=5$; c) $n=9$

Die Schwerpunkte der linken und rechten Kreise liegen beinahe deckungsgleich und die Durchmesser der

Kreise sind nahezu gleich groß ($D_l=10425 \mu\text{m}$; $D_r=10069 \mu\text{m}$). Mit $s = 10356 \mu\text{m}$ beträgt der Übergangsaspekt gleich 0,99 und liegt damit nahe dem maximal möglichen Wert von 1, was für eine schlecht definierte Geometrie spricht. Panel b zeigt das Profil der Testgeometrie mit einer Anzahl der äquidistanten Linien von $n = 5$.



Abbildung 8: Testgeometrien mit Anzahl n der äquidistanten Linien

Diese Geometrie ist mit einem Übergangsaspekt von nur noch 0,078 gut definiert. Panel c zeigt die Testgeometrie mit $n = 9$. Deren Übergangsaspekt nimmt wieder einen Wert nahe 1 an ($D_a \cdot s^{-1}=0,97$), was für eine schlechte Geometriedefinition spricht.

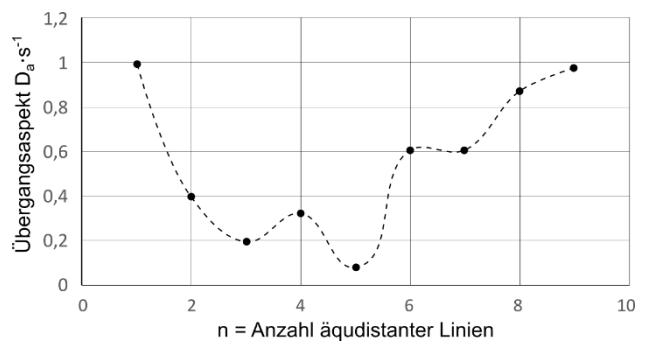


Abbildung 9: Übergangsaspekt abgetragen über die Anzahl der äquidistanten Linien der quadratischen Testgeometrie.

Die Übergangsaspekte von $n = 1$ bis $n = 9$ sind in Abbildung 9 abgetragen. Die Tendenz ist zu erkennen, dass sich ein Optimum von $n = 5$ unter den gewählten Laser- und Prozessparametern einstellt.

Herstellung eines 3-Formkörpers



Abbildung 10: 3D-Formkörper mit den Maßen 22 mm x 23 mm x 6 mm

Anhand der oben erhaltenen Ergebnisse konnte ein 3D-Formkörper hergestellt werden, welcher in Abbildung 10 dargestellt ist.

4. Diskussion

Die vorliegenden Untersuchungen demonstrieren, dass sich der femtosekundenlaser-gestützte LPBF-Prozess von PA12 für das vorliegende Lasersystem in drei klar abgegrenzte Parameterfenster unterteilen lässt: Sintern (32–37 W, 4–8 MHz, 500–700 mm/s, 6–10 µm Linienabstand, $z = +0...+2$ mm), vollständige Schmelze mit brauner Transluzenz (33–37 W, 1–8 MHz, 300–700 mm/s, 3–5 µm Linienabstand, $z = 0$ mm) sowie Single-Line-Scanning (30–37 W, 4–8 MHz, 20–50 mm/s, $z = 0$ mm). Insbesondere zeigt die Auswertung der Testgeometrien, dass fünf äquidistante Scanlinien das Optimum hinsichtlich Übergangsaspekt ($\approx 0,078$) und Detailtreue liefern, während sowohl geringere als auch höhere Linienzahlen die Geometriedefinition verschlechtern. Zukünftige Arbeiten sollten daher einerseits eine feinere Kalibrierung der Z-Achse und des Fokus-Offsets vorantreiben und andererseits einen mehrschichtigen Aufbau mit integrierter Vorheizstrategie untersuchen, um thermische

Gradienteneffekte weiter zu minimieren und die Reproduzierbarkeit hochauflösender PA12-Bauteile zu gewährleisten.

Angabe zu Fördermittelgebern

Das Projekt UKPino TP3.9.EAH (Förderkennzeichen 03RU2U033I) wird vom BMBF im Förderprogramm RUBIN gefördert.



Kontaktdaten

Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

Markus Kühn (M.Eng., M.Sc.)

m.kuehn@eah-jena.de / ORCID: 0009-0005-5114-3479

Literaturverzeichnis

- [1] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, Hayasaki Y, Mizeikis V, Buividas R, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry. *Light Sci Appl*. 2016 Mar 14;5(8):e16133–e16133.
- [2] Verbelen L, Dadbakhsh S, Van Den Eynde M, Kruth JP, Goderis B, Van Puyvelde P. Characterization of polyamide powders for determination of laser sintering processability. *European Polymer Journal*. 2016 Feb;75:163–74.
- [3] Soleimani M, Nankali M, Duley WW, Zhou YN, Peng P. Additive manufacturing processing with ultra-short-pulse lasers. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024 Dec;131:2133–63.
- [4] Hejmady P, Van Breemen LCA, Hermida-Merino D, Anderson PD, Cardinaels R. Laser sintering of PA12 particles studied by in-situ optical, thermal and X-ray characterization. *Additive Manufacturing*. 2022 Apr;52:102624.
- [5] Saunders J, Elbestawi M, Fang Q. Ultrafast Laser Additive Manufacturing: A Review. *JMMP*. 2023 May 5;7(3):89.