

Pulvercharakterisierung und Parameteroptimierung zur additiven Verzahnungsfertigung mittels LPBF

Lukas Klee, M.Eng.^a; Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs^a; Dr.-Ing. Jens Brimmers, M.Sc.^a;
Tim Lantzsch, M.Sc.^b; Prof. Dr. rer. nat. Constantin Häfner^{b, c}

^aWerkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University

^bFraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

^cLehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen University

https://doi.org/10.58134/fh-aachen-rte_2022_003

Einleitung

Additiv hergestellte Zahnräder weisen aufgrund der endkonturnahen Fertigung ein hohes Potenzial zur Steigerung der Kosten- und Ressourceneffizienz auf. Die steigende Individualisierung von Bauteilen verlangt eine zunehmende Flexibilisierung der Fertigung [1]. Verglichen mit konventionellen subtraktiven Fertigungsverfahren werden die benötigten Werkzeugoperationen reduziert und die Ressourceneffizienz gesteigert. Aktuell werden mittels additiven Fertigungsverfahren, z.B. Laser Powder Bed Fusion (LPBF), vielfach Funktionsteile in Klein- und Mittelserie gefertigt, wohingegen das pulvermetallurgische Matrizenpressen in der variantenärmeren Großserienfertigung etabliert ist [2]. Neben einer qualitativ hochwertigen standardisierten Pulvereingangsprüfung bedarf die Prozessstabilität beim LPBF sowie die konturgenaue Herstellung von Oberflächen und die damit einhergehende Nachbearbeitung weiteren Forschungsaktivitäten.

Anhand des Einsatzstahls 16MnCr5 wird eine Methodik zur Pulvereingangsprüfung für die additive Fertigung mittels LPBF entwickelt. Ergänzend zur konventionellen Fertigung hochbelastbarer Zahnräder ist die Entwicklung des LPBF Prozesses für das Werkstoffpulver 16MnCr5 erforderlich. Die Verarbeitbarkeit des für LPBF unkonventionellen Pulvers wurde bereits von BRECHER ET AL. nachgewiesen [3].

Bei Lieferung des Pulvers ist die Pulvercharakterisierung standardmäßig auf die Analyse der Korngrößenverteilung sowie die chemische Analyse der Legierungselemente gemäß Herstellerangabe begrenzt. Dabei wird die Übereinstimmung der Herstellerangabe mit dem spezifizierten Toleranzbereich der jeweiligen Legierung überprüft. Das Pulver wird allerdings in der Regel nicht auf Fremdpartikel analysiert. Durch die Lagerung kann weiterhin die Feuchtigkeit des Pulvers ansteigen. Zusätzlich zum verunreinigten Ausgangszustand können bei Verwendung des Pulvers Verunreinigungen entstehen, insbesondere, wenn auf den Maschinen und Siebanlagen

unterschiedliche Pulverwerkstoffe genutzt werden. Die Fremdpartikel können nicht reproduzierbare Ergebnisse über einen Bearbeitungszeitraum verursachen. Aufgrund dessen ist zur Sicherung gleichbleibender Qualität eine detailliertere und in Intervallen zu wiederholende Pulveranalyse nötig, welche Rückschlüsse auf die relevanten Bewertungskriterien zulässt. Zusätzlich zu einem fremdpartikelfreien Pulver resultiert aus einer angepassten, werkstoffgerechten Optimierung der LPBF Prozessparameter eine steigende Bauteilqualität und Tragfähigkeit. Die Prozessentwicklung umfasst dabei sowohl die relative Bauteildichte als auch die Konturgenauigkeit der gefertigten Bauteile. Abschließend werden nach der Verzahnungsfertigung die Messungen des Rauheitsprofils der Oberfläche im Vergleich zum additiven Fertigungsverfahren Binder Jetting sowie dem Matrizenpressen eingeordnet.

Stand der Technik

Das folgende Kapitel bietet einen Überblick über den heutigen Stand der Technik des zur Metallverarbeitung nutzbaren pulverbettbasierten additiven Fertigungsverfahrens (Additive Manufacturing, AM) LPBF. Zunächst wird ein Verständnis für die additiven Fertigungsverfahren sowie deren Funktionsweise entwickelt. Anschließend wird die Verarbeitbarkeit des typischen Verzahnungsstahls 16MnCr5 mittels LPBF beschrieben.

Pulverbettbasiertes additives Fertigungsverfahren LPBF

Das additive Fertigungsverfahren LPBF ist der Untergruppe der Pulverbettsschweißverfahren zuzuordnen und stellt einen einstufigen additiven Fertigungsprozess dar [5]. Sowohl die geometrische Grundgestalt als auch die Werkstoffeigenschaften des Endbauteils werden in einem einzigen Betriebsablauf ohne formgebende Werkzeuge hergestellt [6, 7]. Die Generierung des Bauteils erfolgt schichtweise. Der Verfahrensablauf des LPBF-Prozesses ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

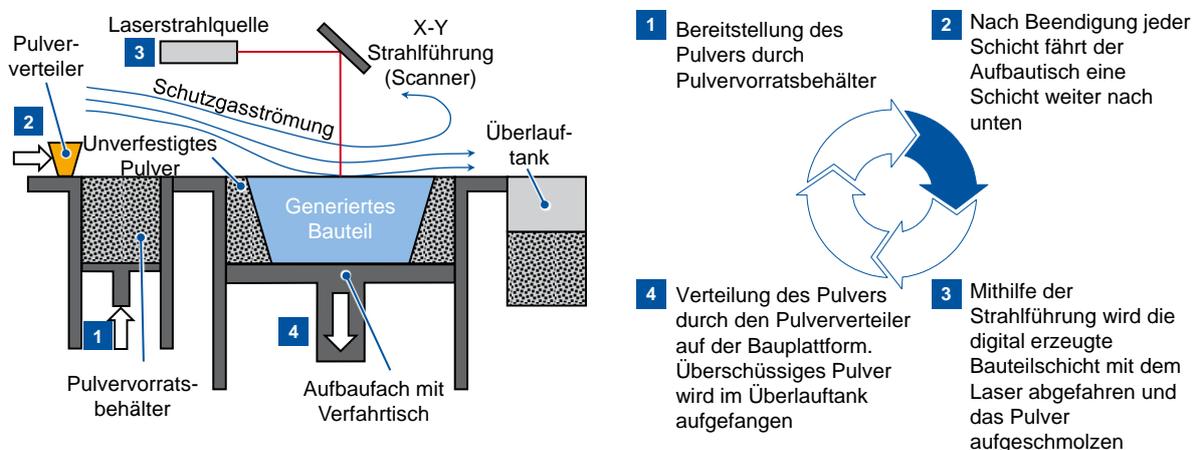


Abb. 1: Schematische Darstellung des LPBF-Prozesses angelehnt an [7]

Der Prozessraum der Maschine besteht aus dem Vorratsbehälter des Werkstoffpulvers, dem inertisierten Bauraum mit absenkbarer Bauplattform und Schutzgasströmung sowie einer Beschichtereinheit. Sowohl die Vorratskammer als auch die Baukammer verfügen über einen beweglichen Boden. Oberhalb des Bauraumes ist ein Scanner angebracht, welcher den Laserstrahl entsprechend der vorgegebenen Bauteilgeometrie in X- und Y-Richtung und definierter Geschwindigkeit auf dem Pulverbett führt. Die Wärmeeinbringung - das selektive Verschmelzen (Diffusion) der Pulverpartikel zu einem Kompaktbauteil - erfolgt mittels der Laserstrahlquelle unmittelbar nach dem schichtweisen Pulverauftrag im Bauraum. Die Erstarrung des Schmelzbades führt zur Erzeugung einer weiteren Schicht des Bauteils [4]. Stützstrukturen müssen im selben Prozessschritt aufgebaut werden, um zum einen das Bauteil im Bauraum zu fixieren und zum anderen die Temperaturspitzen aus dem Bauteil abzuführen [7]. Das Entfernen der Stützstrukturen ist nicht als separater Prozessschritt zu betrachten [5]. Nach dem Generieren einer Schicht des Bauteils wird die Bauplattform um eine Schichtdicke abgesenkt und der Vorratsbehälter angehoben [8]. Anschließend wird mittels eines Nivelliersystems (Rakel oder Walze) eine neue Pulverschicht (Schichtdicken typischerweise $D_s = 30 - 50 \mu\text{m}$) gleichmäßig in dem Bauraum aufgetragen und das Generieren der nächsten Schicht gemäß der bereitgestellten 3D-CAD-Daten erfolgt erneut [9]. Die Wiederholung des Generierungskreislaufes erfolgt bis zur Fertigstellung des physischen metallischen Bauteils. Das für den Bauprozess ungenutzte lose Metallpulver wird nach dem Prozess abgelassen, zur Entfernung von Schweißspritzern gesiebt und kann für folgende Bauteilgenerierungen wiederverwendet werden [6]. Die hohen Prozesstemperaturen können die Bildung von Rissen und Bauteilverzügen sowie das ungewollte Einbringen von Spannungen in das Bauteil induzieren. Daher sollten beim Generieren jeder Schicht möglichst kleine Flächen hergestellt werden, um thermischer Spannung und damit einhergehendem lokalem Verzug des Bauteils, dem Curl-Effekt, vorzubeugen [4]. Daher ist eine angepasste Prozessauslegung und Prozesssteuerung unabdingbar. Bei der Belichtung im Bauraum werden die Bereiche der Bauteilaußenkontur (Konturbelichtung) sowie der innenliegende Volumenbereich (Hatchbelichtung) unterschieden, Abb. 2. Exemplarisch werden zudem während der additiven Fertigung der Zahnrädern unter Verwendung der Maschine SLM SOLUTIONS SLM 280 HL am Fraunhofer ILT Prozessaufnahmen erstellt, welche zum einen den Aufbau des innenliegenden Volumenbereiches (Hatchbelichtung) sowie das Schärfen der Bauteilkontur (Konturbelichtung) zeigen, vgl. Abb. 2 rechts.

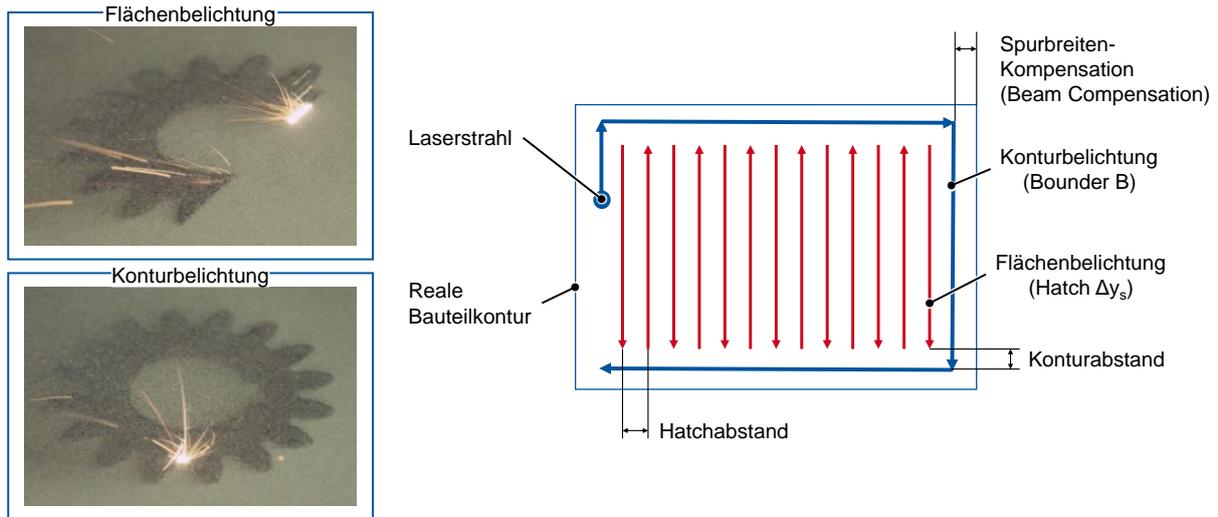


Abb. 2: Belichtungsstrategien im Bauraum angelehnt an [7]

Zur Vermeidung von Kantenüberhöhungen an den Bauteilaußenseiten, sollte zunächst die innenliegende Volumenfläche (Hatch) vor der Konturfahrt (Bouder) belichtet werden. Die entstehenden Kantenüberhöhungen können einen mechanischen Kontakt mit dem Beschichtungsmechanismus (Rakel) verursachen und somit einen ungleichmäßigen Pulverauftrag in den nachfolgenden Schichten bedingen [10]. Sowohl Flächen- als auch Konturbelichtung können jeweils mit separaten Parametern durchgeführt werden. Variable Belichtungsparameter sind die Scangeschwindigkeit, die Laserleistung sowie die Abstände der einzelnen Schweißspuren (Spurabstände) zueinander. LPBF erfolgt in einer von Schutzgas (Argon, Helium oder Stickstoff) durchströmten Prozesskammer, um Oxidationsvorgänge zu vermeiden und verdampftes Material aus der Prozesskammer zu entfernen. Die Verhältnisse im Bauraum sind über den gesamten Fertigungsprozess hinweg konstant zu halten.

Verarbeitbarkeit des Einsatzstahls 16MnCr5 mittels LPBF

Durch die Pulvereingangsprüfung - Analyse der Korngrößenverteilung und der chemischen Zusammensetzung - wurde überprüft, ob die Pulverspezifikationen dem spezifizierten Toleranzbereich der Herstellerangaben entsprechen. Zur Erprobung der Verarbeitbarkeit wurden mittels LPBF Prüfritzel hergestellt und in Stichversuchen hinsichtlich der Zahnfuß- und Grübchentragefähigkeit untersucht. [3]

Die erneute Analyse des Werkstoffpulvers 16MnCr5 vier Monate nach den ersten Versuchen der Bauteilfertigung deutete auf eine Veränderung des Pulverwerkstoffs hin. Das Pulver beinhaltete zusätzliche Fremdpartikel und Verunreinigungen in Form wollartiger Faserkugeln und glasartiger, transparenter Partikel, vgl. Abb. 3

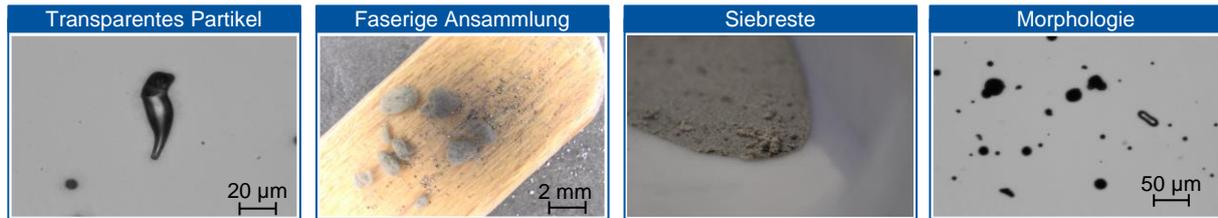


Abb. 3: Fremdpartikel im Pulver

Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Studie ist eine umfangreiche Pulvercharakterisierung des verwendeten Einsatzstahlpulvers 16MnCr5 sowie eine Parameteroptimierung hinsichtlich Bauteildichte und Kontur zur additiven Verzahnungsfertigung mittels LPBF, vgl. Abb. 4 [3]. Die Prozessentwicklung wird zusätzlich von topologischen Messungen begleitet.

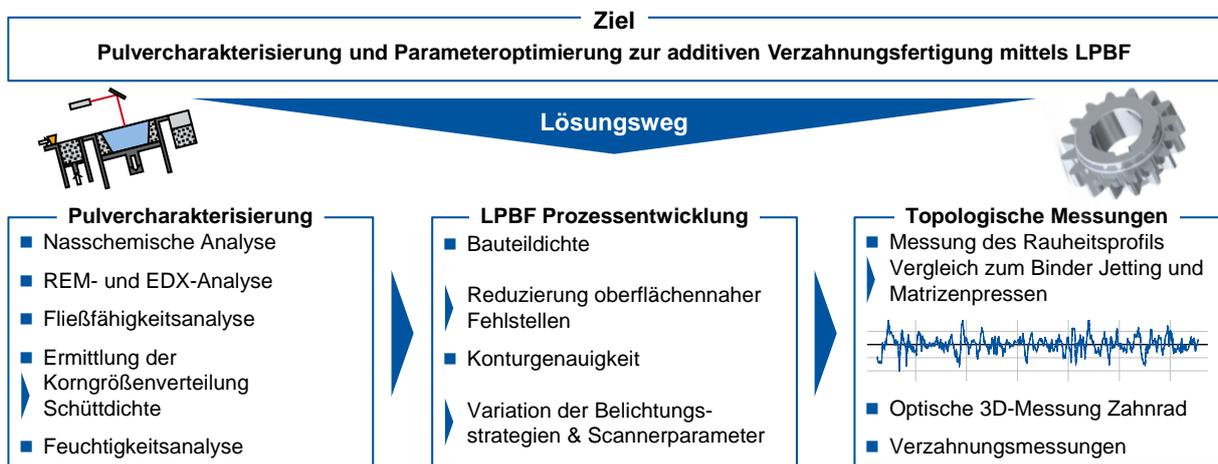


Abb. 4: Zielsetzung und Vorgehensweise

Zum Ausschluss von Fremdpartikeln im Pulver für die laufende Versuchsreihe wird unmittelbar nach der Pulverlieferung eine umfangreiche Pulvercharakterisierung durchgeführt. Anschließend werden hinsichtlich der Zielgrößen Bauteildichte, Fehlstellenverteilung und Konturgenauigkeit optimierte Parameter zur Verzahnungsfertigung mittels LPBF für den Werkstoff 16MnCr5 entwickelt. Mit den entwickelten Prozessparametern werden Verzahnungen endkonturnah gefertigt. Nach der Verzahnungsfertigung werden die Messungen des Rauheitsprofils der Oberfläche im Vergleich zum Binder Jetting und dem Matrizenpressen eingeordnet [11]. Abschließend werden Verzahnungsmessungen aller Zahnräder sowie die optische 3D-Messung eines Zahnrades analysiert.

Pulvercharakterisierung

Zur Charakterisierung und Qualitätskontrolle des Pulvers stehen eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung, mit deren Hilfe die Pulvereigenschaften quantifiziert werden können. Die

Pulvercharakterisierung wird während der Prozessentwicklung und Bauteilfertigung dreifach wiederholt, um mögliche Veränderungen des Pulvers, beispielsweise durch Effekte im Prozess oder bei der Pulveraufbereitung, zu erkennen. Die Pulvercharakterisierung wird zum einen unmittelbar nach der Anlieferung und zum andern nach Abschluss der Parametervariation sowie abschließend nach der LPBF-Zahnradfertigung durchgeführt. Die Pulvercharakterisierung erfolgt mittels sechs Prüfmethoden, welche die notwendigen Kennzahlen zur Einordnung der Pulverqualität liefern. Zur Charakterisierung des Werkstoffpulvers werden folgende Verfahren angewandt:

- Nasschemische Analyse
- Rasterelektronenmikroskopie / Röntgenspektroskopie (REM / EDX)
- Fließfähigkeitsanalyse
- Korngrößenverteilung
- Schüttdichte / Feuchtigkeitsanalyse

Die nasschemische Analyse dient der Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des Pulvers. Die ermittelte Zusammensetzung wird mit den Werkstoffspezifikationen gemäß Herstellerdatenblatt abgeglichen. Die Vorgehensweise sowie ein Auszug der Analyseergebnisse der weiteren Verfahren werden im Folgenden näher erläutert. Die Bewertung des Pulvers erfolgte als Summe sämtlicher Teilanalysen.

Rasterelektronenmikroskopie / Röntgenspektroskopie

Die Analyse des Pulverwerkstoffs mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) sowie energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) ermöglicht eine qualitative Betrachtung des Pulvers hinsichtlich der Pulverform sowie der chemischen Zusammensetzung und kann Hinweise auf mögliche Fremdkörper liefern. Wie im Stand der Technik gezeigt, wurden durch BRECHER ET AL. vier Monate nach den ersten Versuchen mittels REM-Analyse Fremdpartikel aus Aluminiumoxiden nachgewiesen [3]. Die Fremdpartikel wurden wegen einer unzureichenden Eingangsanalyse nicht erfasst. Aufgrund ihrer abweichenden chemischen Zusammensetzung und des daraus resultierenden Kontrasts konnten die Partikel deutlich in der REM-Analyse vom übrigen Pulver differenziert werden. Die chemische Zusammensetzung konnte mittels EDX-Analyse bestimmt werden.

Das in dieser Studie verwendete Pulver wurde ebenfalls mittels REM und EDX analysiert (vgl. Abb.5). Das Pulver wies keinerlei Auffälligkeiten hinsichtlich Fremdkörpern bzw. Verunreinigungen auf (links). Die detaillierte Pulveraufnahme (Mitte) zeigte eine überwiegend sphärische Partikelform, welche auf eine gute Fließfähigkeit und somit auf einen homogenen Pulverauftrag im LPBF-Prozess hinweist. Im rechten Teil des Bildes ist ein Schliffbild einer Pulverprobe, in dem vereinzelte, für den Prozess unkritische Poren erkennbar sind, dargestellt.

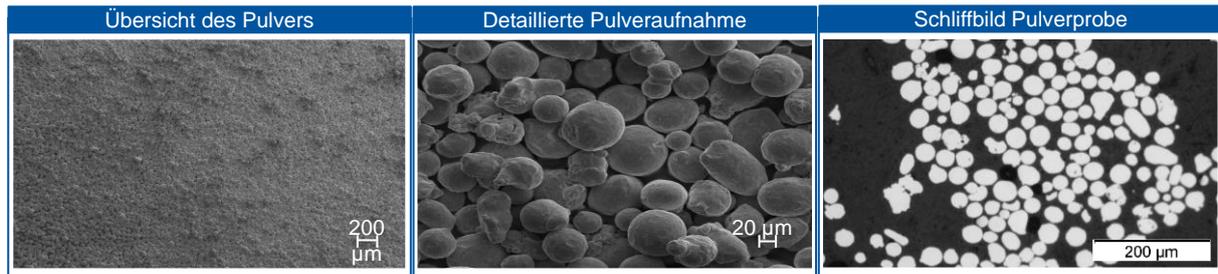


Abb. 5: Pulveraufnahmen

Fließfähigkeitsanalyse mittels Revolution Powder Analyzer (RPA)

Die Fließfähigkeitsanalyse ermöglicht die Bestimmung von Kennzahlen zur Beschreibung der zu erwartenden Pulverförderung und des Pulverauftrags (rheologische Pulvereigenschaften) auf der Bauplattform. Die dynamische Rotations-Pulver-Analyse wurde mit dem Messgerät REVOLUTION POWDER ANALYZER (RPA, PS PROZESSTECHNIK GMBH, Schweiz) durchgeführt sowie durch integrierte Software ausgewertet. Dazu wird eine Pulverprobe in einer durchsichtigen Walze rotiert und von einer Seite mittels einer Lichtquelle bestrahlt. Die resultierende Silhouette des Pulvers wird auf der anderen Seite der Walze mithilfe einer CCD-Kamera aufgezeichnet. Das Erreichen eines kritischen Winkels löst einen Lawinenabgang aus, bei dem das Pulver zu fließen beginnt. Mit dem Messgerät RPA wird zum einen der Lawinenabgangswinkel (Avalanche Angle), d.h. der Winkel des Pulvers kurz vor dem Auslösen einer Lawine, und der sich nach der Lawine ergebende Winkel des zur Ruhe gekommenen Pulvers (Rest Angle) aufgezeichnet. Zum anderen wird die Oberflächenstruktur (Surface Fractal) im Schnittbild aufgenommen. Das Surface Fractal ist ein dimensionsloser Kennwert, der die intrinsische Reorganisation des Pulvers nach Lawinenabgang beschreibt [12]. Der Wertebereich ist von eins bis elf definiert, wobei eins eine optimal glatte Pulveroberfläche und Werte zwischen zwei und vier eine glatte Oberfläche beschreiben. Mit aufsteigendem Surface Fractal bis zum Wert von elf nimmt die Rauheit der Pulveroberfläche zu. Dieser Lawinenvorgang wird insgesamt 150 Mal wiederholt, um statistisch aussagekräftige Werte zu erhalten. Ein Lawinenabgangswinkel $> 45^\circ$ weist auf eine ungenügende Fließfähigkeit hin, die beispielsweise durch eine spratzige Pulverform (mechanische Verkeilung des Pulvers) entstehen kann. Die Verkeilung des Pulvers bedingt ebenfalls einen großen Rest Angle sowie eine stufige Oberflächenstruktur (Surface Fractal). Die Werte des untersuchten Werkstoffpulvers werden automatisiert vom RPA über ein dynamisches Zeitsegment ermittelt und entsprechen den zuvor definierten Vorgaben. Die Messung der Fließeigenschaften des im Rahmen dieser Studie verwendeten 16MnCr5 Pulvers ergab einen Lawinenabgangswinkel $< 45^\circ$, einen Winkel des Pulvers nach Lawinenabgang (Rest Angle) $< 35^\circ$ sowie ein Surface Fractal < 2 . Somit weist das Pulver geeignete Fließeigenschaften für das LPBF auf.

Korngrößenverteilung, Schüttdichte und Feuchtigkeitsanalyse

Die Analyse des Pulverwerkstoffs hinsichtlich Partikelgrößenverteilung und Pulvermorphologie erfolgt mittels dynamischer Bildanalyse durch das Messgerät CAMSIZER X2 (MICROTRAC RETSCH GMBH, Deutschland). Die Partikelgrößenverteilung kann in den drei Ausgabevarianten volumengewichtet, anzahlgewichtet oder flächengewichtet beschrieben werden. Die volumengewichtete Partikelgrößenverteilung, bei der der Analysewert auf ein rechnerisches Partikelvolumen zurückgeführt wird, wurde für diese Studie als Vergleichswert definiert. Zusätzlich zur Partikelgrößenverteilung wurde die Sphärizität des Pulvers ermittelt, wobei die Sphärizität aus dem Verhältnis der gemessenen Partikelform zu einer idealen Kugelform gemäß Formel 1 berechnet wird. Ein Wert von SPHT = 1 entspricht dabei der idealen Kugelform.

$$\text{SPHT} = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{U^2} \quad \text{Formel 1}$$

SPHT [-] Sphärizität; A [mm²] Partikelfläche; U [mm] Partikelumfang

Die Pulverkorngröße ist zur Einstellung der LPBF-Prozessparameter bei der Prozessparameterentwicklung entscheidend. Idealerweise entspricht die Pulverkorngröße den Spezifikationen zwischen $20 \leq d \leq 60 \mu\text{m}$ und hat eine Sphärizität von $\text{SPHT} = 0,9$. Eine große Abweichung der Pulverkorngröße führt zu Fehlstellen im gefertigten Bauteil, da bei gleichbleibender Laserleistung und zu kleinen Pulverpartikeln Verdampfungseffekte entstehen. Zu große Pulverpartikel können zudem Anbindungsfehler in den gefertigten Bauteilen begünstigen. Die Messung der volumengewichteten Partikelgrößenverteilung zeigte eine gute Übereinstimmung mit der Herstellerangabe von $d = 20 - 60 \mu\text{m}$. Dabei wiesen 10 % aller Partikel einen Durchmesser kleiner als $d = 31,37 \mu\text{m}$, 50 % aller Partikel einen Durchmesser kleiner als $d = 44,02 \mu\text{m}$ und 90 % aller Partikel einen Durchmesser kleiner als $d = 58,5 \mu\text{m}$ auf. Die berechnete Sphärizität betrug $\text{SPHT} = 0,89$ und lag innerhalb der Toleranz. Zusätzlich wurde ein Schlibbild des Pulvers angefertigt, um etwaige Hohlkörper im Pulver auszuschließen, Abb. 5 (rechts). Die Analyse der Schüttdichte diente der Pulvermengenabschätzung, welche für den LPBF-Fertigungsprozess notwendig ist. Dazu wird ein Volumenkörper ($V = 25 \text{ ml}$) mittels Trichter gefüllt, gewogen und ebenfalls mit den Herstellerangaben abgeglichen. Mittels Feuchtigkeitsanalyse wurde die Feuchtigkeitsaufnahme des Pulvers überprüft. Sowohl die Schüttdichte als auch der Feuchtigkeitsgehalt des Pulvers lagen innerhalb der definierten Toleranzwerte.

Prozessentwicklung

Das übergeordnete Ziel der LPBF-Prozessentwicklung ist die Ermittlung und Optimierung der LPBF-

Prozessparameter für den Hatch- und Konturbereich zur Steigerung der Maßhaltigkeit und Zahnfußtragfähigkeit der additiv gefertigten Verzahnungen. Mit den hinsichtlich geringer Rauheit und hoher Maßhaltigkeit optimierten LPBF-Prozessparametern wird eine Reduzierung der oberflächennahen Fehlstellen sowie eine relative Bauteildichte von $\rho = 99,99\%$ angestrebt. Zuerst ist eine Optimierung der Prozessparameter hinsichtlich der Bauteildichte (Volumenbereich) nötig, ehe mit diesen Parametern die Optimierung der Konturparameter durchgeführt wird. Die gesamte LPBF-Prozessentwicklung wird mittels einer am FRAUNHOFER ILT verfügbaren LPBF-Maschine des Typs SLM280HL der Firma SLM SOLUTIONS GROUP AG (Lübeck, Deutschland) durchgeführt.

Relative Bauteildichte

Für die Bestimmung der LPBF-Hatchparameter wurden zwei Laserleistungsbereiche zwischen $P_L = 100\text{ W}$ und $P_L = 500\text{ W}$ analysiert. Für jede Laserleistung wurden jeweils Quader mit einer Kantenlänge von $10 \times 10 \times 10\text{ mm}^3$ sowie konstruktiv angebrachten Stützstrukturen zur Befestigung an der Bauplattform in Schichthöhen von $D_s = 30\text{ }\mu\text{m}$ und $D_s = 50\text{ }\mu\text{m}$ gefertigt und anschließend analysiert. Für die Untersuchungen wurden zusätzlich die Scangeschwindigkeit v_s im Bereich von $v_s = 400\text{ mm/s}$ - 1500 mm/s und der Spurbabstand (Hatchabstand) zwischen $\Delta y_s = 70\text{ }\mu\text{m}$ - $130\text{ }\mu\text{m}$ variiert. Eine Übersicht der Parametervariationen ist in Abb. 6 dargestellt.

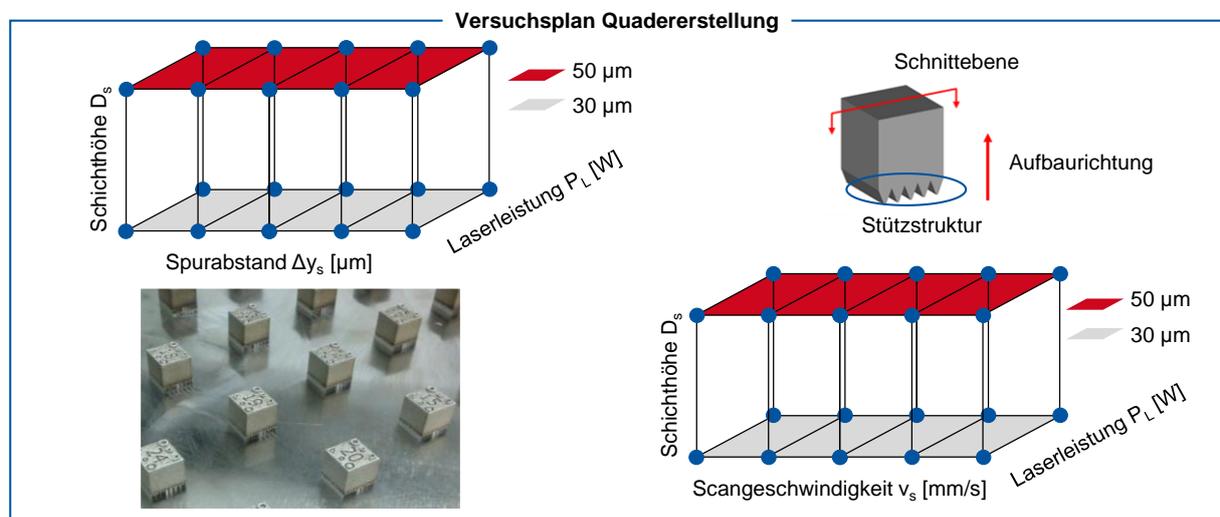


Abb. 6: Übersicht der Parametervariation bei der LPBF Prozessentwicklung

Für jede Parameterkombination wurden je zwei Quader gefertigt. Die Messung der relativen Bauteildichte erfolgte optisch anhand von Schlibfbild und anschließender lichtmikroskopischer Analyse. Eine beispielhafte Schnittebene zur Analyse der relativen Bauteildichte der Quader ist in Abb. 6 gekennzeichnet. Dabei wird mittels eines Graustufenfilters die Durchschnittsdichte der gesamten Schnittfläche bestimmt. Zur Analyse der Defektgröße wird zusätzlich der Durchmesser der jeweils größten Pore für jedes Schlibfbild bestimmt. Die gefertigten Quader wurden hinsichtlich der

erzielten Bauteildichte, der Reproduzierbarkeit, der Maßhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit bewertet und einander gegenübergestellt. In Abb. 7 ist beispielhaft eine Auswertematrix für die Parameterkombinationen mit Laserleistungen zwischen $P_L = 100 \text{ W} - 300 \text{ W}$ und einer Schichthöhe von $D_s = 50 \mu\text{m}$ dargestellt.

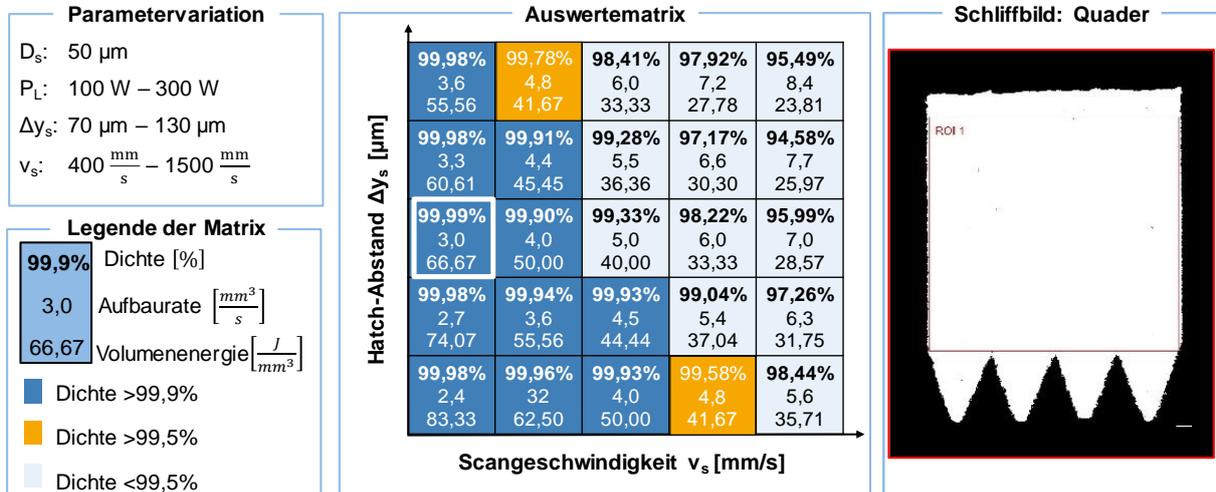


Abb. 7: Beispielhafte Auswertematrix der Dichte und Fehlstellenverteilung

Im jeweiligen Feld der Auswertematrix ist die ermittelte relative Bauteildichte (in Prozent), die theoretische Aufbaurrate (parameterabhängiger Volumenaufbau pro Zeit, mm^3/s) und die Volumenenergie-dichte (parameterabhängiger Energieeintrag pro Volumen, J/mm^3) angegeben. Diese Angaben ermöglichen neben der Darstellung der Bauteildichte sowohl einen Vergleich der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Prozessparameterkombinationen, als auch eine Übersicht des Energieeintrags. Die Laserleistung zwischen $P_L = 100 \text{ W} - 300 \text{ W}$ sowie die Schichthöhe von $D_s = 50 \mu\text{m}$ wiesen die größte relative Bauteildichte und den geringsten Bauteilverzug auf und wurden deshalb für die weitere Prozessparameterentwicklung ausgewählt. Die Prozessparameter Hatchabstand Δy_s und Scangeschwindigkeit v_s wurden in den angegebenen Wertebereich variiert. Ein Schliffbild des in der Matrix hervorgehobenen Parametersatzes inklusive der Stützstruktur ist in Abb. 7 dargestellt. Das Schliffbild weist weder im Volumenbereich noch am Übergang zur Außenkontur Poren auf. Folglich ermöglicht der entwickelte Hatchparameter die Fertigung von Bauteilen mit einer relativen Bauteildichte von $\rho = 99,99\%$ bei gleichzeitiger Vermeidung von oberflächennahen Fehlstellen. Der resultierende Parametersatz wurde als Grundparameter für die nachfolgende Konturparameterentwicklung herangezogen.

Die Parametervariationen mit Laserleistungen zwischen $P_L = 200 \text{ W}$ und $P_L = 300 \text{ W}$ sowie einer Schichthöhe von $D_s = 30 \mu\text{m}$ erzielten ebenfalls hohe Dichtewerte. Aufgrund größerer Maßabweichungen und geringer Wirtschaftlichkeit wurde die benannte Parametervariation für die Konturparameterentwicklung jedoch nicht weiter berücksichtigt.

Konturgenauigkeit

Auf Basis der im vorherigen Kapitel ausgewählten LPBF-Hatchparameter erfolgte die Konturparameterentwicklung. Verschiedene Konturparameter wurden mit unterschiedlichen Belichtungsstrategien (Reihenfolge der einzelnen Belichtungsbereiche für Kontur, Füllkontur und Bauteilvolumen) sowie Scannerparametern erprobt. Zur Vermeidung von Kantenüberhöhungen an den Bauteilaußenseiten wird zunächst die innenliegende Volumenfläche (Hatch) vor der Konturfahrt (Bouncer) belichtet. Der Optimierungsprozess von Kontur- und Scannerparametern ist in Abb. 8 dargestellt.

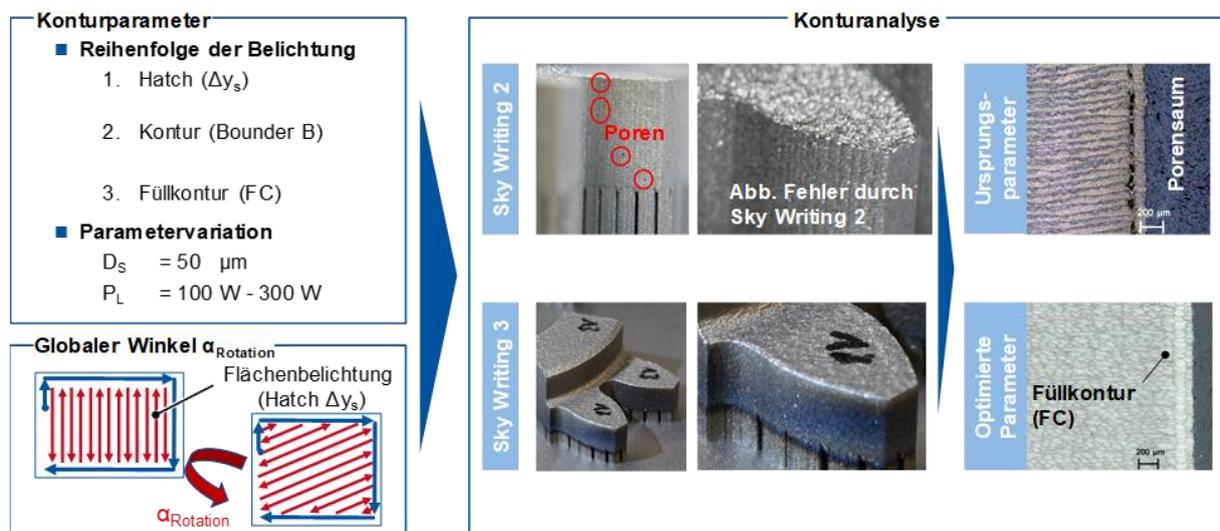


Abb. 8: Optimierung von Kontur- und Scannerparametern

Zur Vermeidung eines Porensaumes, d.h. Poren zwischen Kontur und Volumenbereich durch unzureichende Anbindung, wird eine zusätzliche Belichtung mit einer Füllkontur (FC) zwischen den bereits belichteten Bereichen durchgeführt. Somit können oberflächennahe Anbindungsfehler zwischen den Volumen- und Konturbereichen vermieden werden. Aus der gewählten Parameterkombination resultierte eine Schmelzbadbreite, sodass die tatsächliche Bauteilkontur über die Sollkontur herausragt. Aus diesem Grund wurde eine Spurbreitenkompensation (Engl.: Beam Compensation) mit $\Delta = 50 \mu\text{m}$ verwendet, um die Konturvektoren nach innen zu versetzen. Durch inkrementelle Rotation der Hatchvektoren um einen globalen Rotationswinkel von $\alpha_{\text{Rotation}} = 67^\circ$ zwischen aufeinanderfolgenden Schichten, konnte die Porenanzahl an der Oberfläche zusätzlich reduziert werden. Neben der Variation der genannten Prozessparameter besteht die Möglichkeit die Scannerparameter zu variieren. Damit der Belichtungsbereich mit einer möglichst konstanten Scangeschwindigkeit belichtet werden kann, ist bei den Scannersystemen der Firma SCANLAB GMBH die Funktion *Sky Writing* implementiert. Dabei wird der Scannerspiegel außerhalb des Belichtungsbereiches auf die eingestellte Geschwindigkeit beschleunigt und nach dem

Belichtungsbereich wieder abgebremst. Im Belichtungsbereich wird mittels der Funktion *Sky Writing Modus 2* mit einer konstanten Scannergeschwindigkeit gearbeitet. Durch Einsatz eines kritischen Winkels $\cos(F)$ zwischen aufeinanderfolgenden Scanvektoren, bei dem die Belichtung trotz Richtungswechsel nicht unterbrochen wird, kann mittels der Funktion *Sky Writing Modus 3* eine weitere Glättung der Außenkontur erzielt werden.

Einstellung der Maßhaltigkeit

Die endgültige Maßhaltigkeit der mittels LPBF gefertigten Bauteile wird neben den eigentlichen Prozessparametern außerdem vom thermischen Verzug und der Stabilität der gewählten Stützstrukturen beeinflusst. Zu diesem Zweck wurde der ausgewählte Parametersatz auf die zu fertigende Zahnradgeometrie des Typs FZG-C-Verzahnung mit einem Modul von $m_n = 4,5$ mm übertragen und mittels LPBF gefertigt. Aufgrund des wesentlich größeren Bauteilvolumens im Vergleich zu den zuvor gefertigten Prüfquadern, können am Bauteil geometrische Abweichungen in der Gesamtgröße des Bauteils auftreten. Die Abweichung der Soll-Ist-Geometrie wurde mittels 3D-Scan (GOM ATOS Q, GOM GMBH, Deutschland) festgestellt. Der resultierende 3D-Scan des Bauteils wird im Anschluss mit dem 3D-CAD-Modell des Bauteils verglichen. Die Abweichungen von der Soll-Geometrie können ermittelt und dargestellt werden. Zur Kompensation der geometrischen Abweichungen wurde im Rahmen dieser Studie eine Skalierung bzw. das Einfügen eines Aufmaßes an speziellen Bereichen des zu fertigenden Bauteils eingesetzt. Die gefertigten Zahnräder wurden auf der Bauplattform gescannt. Die Verzahnung wies einen geringen unkritischen Verzug auf. Nach Trennung der Bauplattform wies das Zahnrad einen größeren Verzug an einigen Zahnoberflächen, insbesondere an Stirnflächen auf. Ursächlich für diese Verzugsbereiche sind thermisch induzierte Eigenspannungen, welche sich nach der Trennung von der Bauplattform lösen. Geometrische Abweichungen im Bereich des Zahnfußes konnten anhand der 3D-Messungen nicht nachgewiesen werden, weshalb das detektierte Verzugsverhalten für die fortlaufenden Untersuchungen vor dem Hintergrund der übergeordneten Zielsetzung als unkritisch bewertet wurden. Resultierend aus sämtlichen Parametervariationen und -analysen wurde ein LPBF-Parametersatz, bestehend aus Hatch- und Konturparametern, für die weitere Zahnradfertigung ausgewählt.

Topologische Messungen und Rauheit

Für die Einordnung der Fertigungsergebnisse in den Stand der Technik ist versuchsbegleitend eine umfassende Charakterisierung und Dokumentation der fertigungsbedingten Bauteileigenschaften notwendig. In einem ersten Schritt erfolgte die Analyse der geometrischen Eigenschaften, wozu die Verzahnungsqualität sowie die Oberflächengüte am fertigen Bauteil untersucht wurden. Auf der Verzahnungsmessmaschine vom Typ P16 der Firma KLINGELBERG wurde am

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University die Verzahnungsqualität sowie mittels dem taktilen Rauheitsmessgerät der Firma JENOPTIK vom Typ HOMMEL ETAMIC NANOSCAN 855 die Rauheit des jeweiligen Zahnprofils messtechnisch erfasst. Die Rauheitsmessungen wurden mit denen eines mittels Binder Jetting sowie Matrizenpressen gefertigten Zahnrades verglichen [11].

In Abb. 9 sind die Ergebnisse der Verzahnungsmessung nach dem LPBF-Prozess zusammengefasst. Die Messung wurde an allen vorliegenden Prüfritzeln durchgeführt, um eine möglichst gute statistische Absicherung der Messergebnisse zu erreichen.

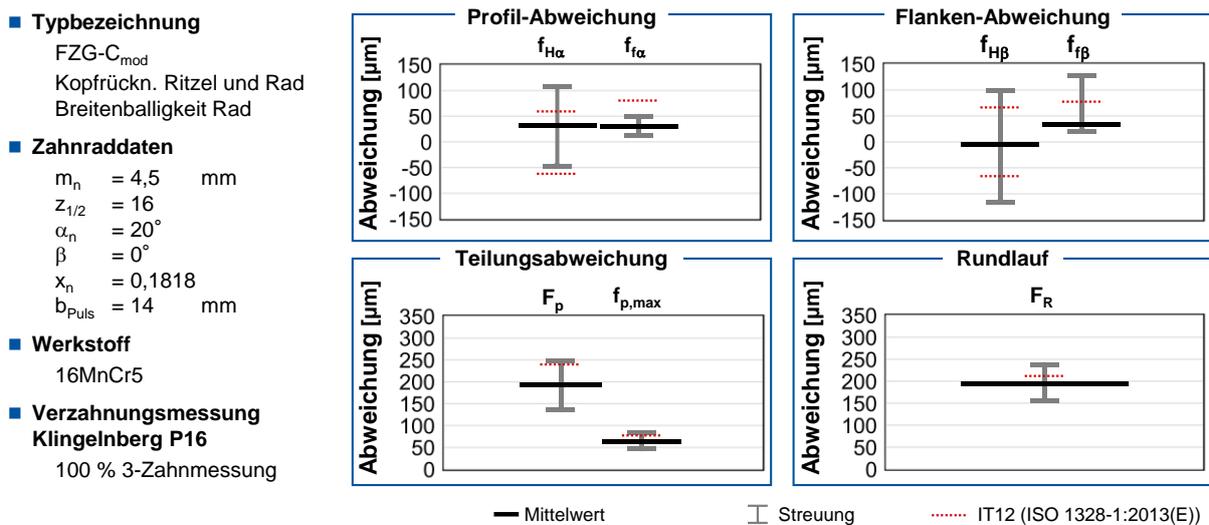


Abb. 9: Ergebnisse der Verzahnungsmessung

Als Messparameter wurden die Profil-Winkelabweichung $f_{H\alpha}$, die Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$, die Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{H\beta}$, die Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$, der Einzel- und Summenteilungsfehler $f_{p,max}$ und F_p sowie der Rundlauffehler F_R nach ISO 1328 aufgeführt. In Profil- und Flankenlinienrichtung lagen sämtliche Mittelwerte innerhalb der Qualitätsklasse IT12 nach ISO 1328 [13]. Vereinzelt Ausreißer sind in der Darstellung der Streuung berücksichtigt. Daher sind vereinzelt Werte in den Diagrammen außerhalb der Toleranzklasse IT12 aufgeführt. Die Teilungsabweichungen entsprachen ebenfalls der Qualitätsklasse IT12. Der Rundlauffehler lag vor dem Bohrungsschleifen innerhalb der Toleranzen der Qualitätsklasse IT12.

Des Weiteren wurden Rauheitsmessungen der LPBF-Prüfritzel durchgeführt und mit den Rauheitsmessungen eines mittels Binder Jetting und Matrizenpressen gefertigten Zahnrades verglichen. Das mittels Binder Jetting hergestellte Zahnrad wurde aus dem Werkstoff 316L (hochlegierter Stahl) und das matrizengepresste Zahnrad aus Fe + 0,85% Mo + 0,25% C gefertigt. Aufgrund der unterschiedlichen Werkstoffe ist im Folgenden lediglich ein qualitativer Vergleich der Fertigungsverfahren möglich. Die Auswertung der Rauheitskennwerte und Messschriebe erfolgte gemäß DIN EN ISO 4288 in Profilrichtung [14]. Die Gesamtmesstrecke nach DIN EN ISO 4288 betrug für

das LPBF-Ritzel $l_n = 4,8$ mm [14]. Bei der Messstrecke der Zahnräder vom Binder Jetting und Matrizenpressen war eine Verkürzung auf $l_n = 3,2$ mm aufgrund der Verzahnungsprofilhöhe notwendig. Die Messstrecke wurde in vier Einzelmessstrecken der Länge $l_t = 0,8$ mm unterteilt. Ausgewertet wurden drei Messstrecken, da sowohl am Anfang als auch am Ende eine halbe Einzelmessstrecke wegen des Einschwingverhaltens mit der Grenzwellenlänge $\lambda_c = 0,8$ mm abgeschnitten wurde. Entsprechend der, aufgrund des schichtweisen Aufbaus zu erwartenden höheren Zielrauheiten der BJT-Verzahnungen, wurde eine Grenzwellenlänge $\lambda_c = 2,5$ mm verwendet [14]. Aufgrund der Vergleichbarkeit der Messungen wurde die Erfassung der jeweiligen Rauheiten mit identischen Parametern durchgeführt, Abb. 10.

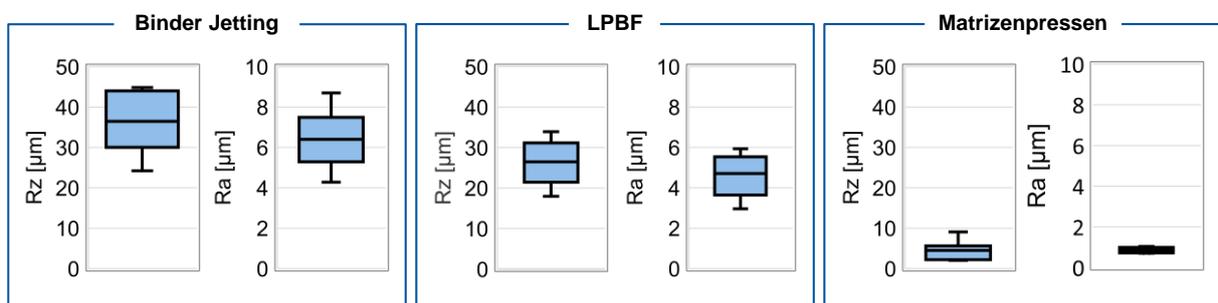


Abb. 10: Rauheitsprofile unterschiedlicher pulvermetallurgischer Verzahnungsverfahren

Die Rauheitsunterschiede von einem Faktor bis zu zehn vom gepressten Bauteil zum Binder Jetting Bauteil, von einem Faktor bis zu acht vom gepressten Bauteil zum LPBF Bauteil sind signifikant. Insgesamt wurden pro Zahnrad acht Rauheitsmessungen durchgeführt. Von vier gleichmäßig über den Umfang verteilten Zähnen wurde eine Rauheitsmessung sowohl der rechten als auch linken Flanke des jeweiligen Zahns durchgeführt. Die Mittel- sowie die Maximalwerte des arithmetischen Mittenrauwertes R_a und der gemittelten Rautiefe R_z sämtlicher Messungen sind in einer Boxplotdarstellung abgebildet. Die Box umfasst die mittleren 50 % der Messdaten. Für den Wert der Untergrenze (1. Quartil) der Box gilt, dass 25 % der Werte kleiner oder gleich dem Wert sind. Analog ist die Boxobergrenze (3. Quartil) der kleinste Wert der Datenreihe, für welchen gilt, dass maximal 25 % der Werte diesen Grenzwert übertreffen. Der Mittelwert aller R_z -Messungen betrug beim Binder Jetting $R_z = 36,4$ μm, beim LPBF $R_z = 26,5$ μm und beim Matrizenpressen $R_z = 4,5$ μm. Die arithmetischen Mittenrauwerte R_a betragen $R_a = 6,4$ μm für BJT, $R_a = 4,7$ μm für LPBF sowie $R_a = 0,84$ μm für das Matrixpressen. Ebenso ist die Streuung der einzelnen Messwerte durch die jeweilige Größe der Box ersichtlich. Durch Anpassung verschiedenster LPBF-Prozessparameter ist zum einen die Oberflächenstruktur weiter optimierbar und zum anderen wird die Wirtschaftlichkeit gesteigert. Wird die Schichtdicke D_s bei der Fertigung reduziert, so ist bei sinkender Produktivität eine höhere Oberflächengüte erreichbar. Die Erhöhung der Schichtdicke D_s impliziert eine gesteigerte Wirtschaftlichkeit des Prozesses bei Zunahme sowohl der Rauheit als auch der Welligkeit. Die

Prozessparameter müssen dabei auf die jeweiligen Anforderungen der Bauteile angepasst werden. Eine Kombination beider Fertigungsvarianten ist mit dem Hülle-Kern-Schema möglich [15, 16]. Das Bauteilvolumen (Hatch, Kern) wird hierbei mit einer größeren Schichtdicke D_s , als die Bauteilkontur (Hülle) gefertigt, um Produktivität und Bauteilqualität miteinander zu vereinen.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde anhand des zahnradtypischen Einsatzstahls 16MnCr5 eine Methodik zur Pulvereingangsprüfung entwickelt. Zusätzlich zur standardmäßigen Analyse der Korngrößenverteilung und der chemischen Analyse bei der Pulverlieferung wurden weitere detailliertere Prüfungen durchgeführt, welche Rückschlüsse auf die relevanten und sinnvollerweise heranzuziehenden Bewertungskriterien zulassen. REM / EDX Analysen sowie eine Analyse der Fließfähigkeit und Schüttdichte wurden durchgeführt, um prozessrelevante Pulvereigenschaften zu ermitteln. Der Vergleich der Messergebnisse mit den Toleranzbereichen gemäß der Herstellerangaben diente weiterhin der fortlaufenden Qualitätssicherung. Basierend auf der Analyse eines fremdpartikelfreien Bauteilpulvers sowie der Entwicklung angepasster, werkstoffgerechter LPBF-Prozessparameter kann eine Verbesserung der Bauteilqualität (Relative Bauteildichte, Oberflächengüte) und der Zahnradtragfähigkeit erzielt werden. Sowohl hinsichtlich der Bauteildichte als auch der Konturgenauigkeit konnte eine Verbesserung gegenüber vorangegangenen Forschungsarbeiten erreicht werden. Basierend auf den Ergebnissen der LPBF-Prozessentwicklung wurde ein Parametersatz zur Fertigung von Verzahnungen ausgewählt. Die mittels LPBF gefertigten Verzahnungen wurden einerseits hinsichtlich Profil-, Flankenlinien und Rundlaufabweichungen gemäß ISO 1328 charakterisiert [13]. Sämtliche Mittelwerte lagen innerhalb der Qualitätsklasse IT12 nach ISO 1328 [13]. Des Weiteren wurde die Abweichung der Ist-Geometrie nach dem LPBF von der Soll-Geometrie mittels 3D-Scan (GOM-Messung) quantifiziert. Die Verzahnungen wiesen eine hohe Maßhaltigkeit und einen geringen Verzug auf. Anschließend wurden Rauheitsmessungen an den gefertigten Verzahnungen durchgeführt. Die Analyse der Rauheitsprofile mittels LPBF, Binder Jetting und dem Matrizenpressen gefertigter Zahnräder ergab signifikante Rauheitsunterschiede bis hin zu einem Faktor zehn.

Danksagung



Die Autoren danken der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) sowie der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF) für die Bereitstellung der finanziellen Mittel zur Durchführung des den vorgestellten Ergebnissen zugrunde liegenden Forschungsprojekts.

Literatur

- [1] Brecher, C.: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin: Springer, 2011
- [2] Wohlers, T.; Campbell, R.: Wohlers Report 2018. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Re-port. Fort Collins, Colo.: Wohlers Associates, Inc, 2018
- [3] Brecher, C.; Löpenhaus, C.; Greschert, R.; Poprawe, R.; Schleifenbaum, J.; Ziebura, D.: Potenzial generativ gefertigter Bauteile in der Getriebe-technik. In: Antriebstechnisches Kolloquium Aachen, 2019
- [4] Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 4., neu bearb. und erw. Aufl. München: Hanser, 2013
- [5] Norm DIN EN ISO / ASTM 52900 (Juni 2017) Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie.
- [6] Meiners, W.: Direktes selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. Diss. RWTH Aachen University, 1999
- [7] Gebhardt, A.; Kessler, J.; Thurn, L.: 3D-Drucken. Grundlagen und An-wendungen des Additive Manufacturing (AM). 2., neu bearb. und erw. Aufl. München: Hanser, 2016
- [8] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 5. Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing. 4. Aufl. Berlin: Springer, 2015
- [9] Buchbinder, D.: Selective Laser Melting von Aluminiumgusslegierungen. Diss. RWTH Aachen University, 2013
- [10] Krauss, H.: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung. Diss. Technische Universität München, 2016
- [11] Bergs, T.; Löpenhaus, C.; Klee, L.: Binder Jetting - PM-Zahnräder in der Kleinserienfertigung. In: Tagungsband zur 60. Arbeitstagung "Zahnrad- und Getriebeuntersuchungen". Aachen, 05./06.06.2019, 2019
- [12] Witt, G.; Piechotta, Markus, Wegner, Andreas, Ünlü, Timur: Pulverpartikel-Design im Laser-

Sintern: Materialoptimierung von technischem Kunststoffpulver. In: Witt, G.; Kynast, M.; Eichmann, M. (Hrsg.): RapidTech + FabCon 3.D. München: Hanser, 2019, S. 287–302

- [13] Norm ISO 1328 Teil 1 (September 2013) Cylindrical gears. ISO system of flank tolerance classification. Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth.
- [14] Norm DIN EN ISO 4288 (April 1998) Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit.
- [15] Schleifenbaum, J. H.: Verfahren und Maschine zur individualisierten Produktion mit High Power Selective Laser Melting. Diss. RWTH Aachen University, 2011
- [16] BREMEN, S. W.: Korrelation der High Power SLM-Prozessführung mit der Produktivität, Effizienz und den Materialeigenschaften für den Werkstoff Inconel 718. Diss. RWTH Aachen University, 2017

Kontaktangaben

Lukas Klee, M.Eng.

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University
Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren
Abteilung Getriebetechnik - Gruppe Getriebeweichbearbeitung
Campus-Boulevard 30
D - 52074 Aachen
E-Mail: L.Klee@wzl.rwth-aachen.de

WEB: www.wzl.rwth-aachen.de

Tim Lantzsch, M.Sc.

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Abteilung Laser Powder Bed Fusion
Steinbachstraße 15
D – 52074 Aachen
E-Mail: tim.lantzsch@ilt.fraunhofer.de

WEB: www.ilt.fraunhofer.de/