

Post-Processing additiv gefertigter Innenstrukturen mittels CO₂-Hochdruckstrahlen

Rückstandsfreie Reinigung

E. Uhlmann, T. Braun, W. Reder

ZUSAMMENFASSUNG Die industrielle Bedeutung der additiven Fertigungstechnologien steigt stetig durch wachsendes Prozessverständnis und die Nutzung der spezifischen Verfahrensvorteile. Prozessbedingt kommt es bei den pulverbettbasierten Fertigungsverfahren zu Partikelanhaftungen. Durch Parameteranpassung können diese Pulveranhaftungen verringert, jedoch nicht vermieden werden. Daher gewinnt die Nachbearbeitung an Bedeutung. Das Hochdruckstrahlen mit flüssigem Kohlenstoffdioxid (CO₂) bietet hierbei großes Potenzial.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Reinigung, Oberflächentechnik

Post-processing of additively manufactured internal structures using CO₂ high-pressure blasting – Residue-free cleaning

ABSTRACT The industrial importance of additive manufacturing technologies is steadily increasing due to a growing understanding of the process and the utilization of the specific process advantages. Particle adhesion occurs during the powder bed-based manufacturing processes. These powder adhesions can be reduced, but not completely avoided, by adjusting the manufacturing parameters. Post-processing is therefore becoming increasingly important. High-pressure blasting with liquid carbon dioxide (CO₂) offers significant potential in this area.

1 Einleitung

Die industrielle Bedeutung von additiven Fertigungsverfahren steigt jährlich durch zunehmendes Prozessverständnis und die Nutzung der spezifischen Vorteile der Verfahren [1]. Besonders die Möglichkeit, komplexe Geometrien für hochfunktionale technische Komponenten mit hoher Designfreiheit herzustellen, eröffnet zunehmend neue Anwendungsfelder und Einsatzgebiete [2]. Prozessbedingt kommt es bei den pulverbettbasierten additiven Fertigungsverfahren jedoch zu Anhaftungen von Pulverpartikeln an der Oberfläche der erzeugten Bauteile, welche vor dem Einsatz als technische Komponente erst abgetragen werden müssen, um eine hinreichende Oberflächenqualität zu erzielen. Eine zusätzliche Herausforderung stellen innenliegende Geometrielemente wie Gitterstrukturen und poröse Gefüge in additiv gefertigten Komponenten dar, da diese nicht durch konventionelle Verfahren zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften bearbeitet werden können [3]. Durch eine gezielte Parameteranpassung im additiven Fertigungsverfahren können diese Pulveranhaftungen verringert, allerdings nicht vollständig vermieden werden. Daher gewinnt die Nachbearbeitung zunehmend an Bedeutung. Vor diesem Hintergrund stellt das Hochdruckstrahlen mit flüssigem Kohlenstoffdioxid (HDCO₂-Strahlen) einen innovativen Ansatz für die Nachbearbeitung von komplexen, additiv gefertigten Bauteilen dar. Die vorliegende Arbeit zeigt das Potenzial des HDCO₂-Strahlens für die Entfernung von Pulveranhaftungen an innenstrukturierten Bauteilen, welche mit dem Verfahren des pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzens (engl.: Laser-Powder-Bed-Fusion – PBF-LB) hergestellt worden sind.

2 Stand der Forschung

Additive Fertigungsverfahren und insbesondere das PBF-LB-Verfahren eignen sich zur Herstellung von Komponenten mit komplexen Geometrien [4]. Diese finden unter anderem Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, der Medizintechnik und der Energiewirtschaft [5; 6]. So lassen sich durch das Laserstrahlschmelzen topologieoptimierte Leichtbaustrukturen, medizinische Implantate oder Komponenten für Wärmetauscher herstellen, deren geometrischer Aufbau sich durch konventionelle Fertigungsverfahren nicht realisieren ließe [7]. Aktuelle Forschungsthemen befassen sich daher sowohl mit der Qualifizierung von neuen Werkstoffen für den PBF-LB-Prozess als auch mit der Weiterentwicklung der eingesetzten Fertigungsverfahren [8]. Die Fertigung gezielt eingebrachter offener Porositäten stellt hierbei ein aktuelles Forschungsfeld dar [9]. Dabei kann die additive Fertigung offener Porositäten sowohl nach der geometrischen Ausprägung der Porenstrukturen als auch nach der eingesetzten additiven Fertigertechnik unterschieden werden.

Hinsichtlich der eingesetzten Fertigertechnik kann die Erzeugung von Porenstrukturen erfolgen, indem einerseits definierte Gitterstrukturen, welche als geometrisches Volumenmodell in Form eines STL-Datensatzes vorliegen, die Grundlage des Fertigungsverfahrens bilden. Andererseits kann die Fertigung von Poren mittels Variation der Belichtungsparameter eines geometrischen Vollkörpers erfolgen, wobei Prozessparameter wie die Laserleistung P_L , der Bahnabstand h_s und die Laserscangeschwindigkeit v_s sowie die Scanstrategie, also das Muster in dem die Belichtung durch den Laser erfolgt, gezielt eingestellt werden.

Der Aspekt der geometrischen Ausprägung der Porenstrukturen kann unterschieden werden nach stegbasierten Gitterstrukturen, sogenannte Lattice-Strukturen, TPMS-Strukturen (engl.:

Tabelle. Parametervariation des vollfaktoriellen Versuchsplans der PBF-LB-Prozessparameter.

Faktor	Einheit	Stufen			
Laserleistung P_L	W	150	250	350	
Scangeschwindigkeit v_s	mm/s	500	750	1.000	
Bahnabstand h_s	μm	250	500	750	1.000

Triply periodic minimal surface), durch welche große Oberflächen bei minimaler Volumennutzung generiert werden, und metallischen Schwammstrukturen, bei welchen das Material im Fertigungsprozess gezielt unvollständig aufgeschmolzen und dadurch zu versinterten Schmelzagglomeraten gefügt wird [10; 11; 12].

Je nach Anwendungsfall ergeben sich durch die Wahl der jeweiligen Porenstrukturen spezifische Vorteile. So lassen sich mit Lattice-Strukturen für spezifische Lastfälle optimierte Leichtbaustrukturen herstellen, welche vorzugsweise in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden [13]. TPMS-Strukturen können künftig zu Effizienzverbesserungen in Wärmetauschern beziehungsweise Wärmepumpen führen [14]. Poröse Schwammstrukturen finden ebenfalls als sogenannte Heatpipes Anwendung in Wärmetauschern sowie als passive Kühlelemente in elektronischen Baugruppen [15]. Zudem werden sie in der Medizintechnik als Oberfläche von Implantaten eingesetzt, welche eine hohe Fähigkeit des Einwachsens in organisches Körpergewebe und Knochen aufweisen [6].

Die additive Fertigung derartiger innenstrukturierter Bauteile setzt dabei besondere Kompetenzen in der Fertigungstechnik voraus. So wirkt sich während der PBF-LB-Fertigung die durch die Laserstrahlung eingebrachte Wärmeenergie auf die feinen geometrischen Strukturen aus und bewirkt durch thermischinduzierte Eigenspannungen eine ungewollte Deformation des hergestellten Bauteils [16]. Dies ist in der Fertigungsvorbereitung simulativ zu erfassen und kann durch geeignete Maßnahmen wie die Anpassung der Belichtungsparameter, die Ausrichtung des Bauteils in der Fertigungsanlage und eine gezielte Wärmenachbehandlung teilweise kompensiert werden [17].

Auch im Rahmen des Post-Processings stellt die Entfernung des in den porösen Strukturen enthaltenen unaufgeschmolzenen Pulvermaterials eine Herausforderung dar [11]. Während die Entpulverung von additiv gefertigten Bauteilen oft noch als manueller Arbeitsschritt erfolgt, existieren auch halbautomatisierte Lösungen mit Dreh-Kipp-Kinematiken, wie die des Herstellers Solukon Maschinenbau GmbH, Augsburg, Deutschland, welche das im Bauteil enthaltene Pulver durch entsprechende Bewegungen aus innenliegenden Bereichen entfernt. Diese Lösungen arbeiten meist unabhängig von der Bauteilgeometrie, was eine effiziente Pulverentfernung aus innenliegenden Bereichen nicht ermöglicht.

Vor diesem Hintergrund zeigten durchgeführte Arbeiten das Potenzial des HD CO_2 -Strahlens als Methode zur Nachbearbeitung von additiv hergestellten Bauteilen auf. Dabei wurde die Erzeugung von porösen Stützstrukturen mit PBF-LB sowie das Trennen dieser mit HD CO_2 -Strahlen untersucht. Es zeigte sich, dass das Verfahren für das Trennen von Stützstrukturen nicht wirtschaftlich angewendet werden kann. Jedoch konnte die Eignung des Verfahrens für die Reinigung von additiv gefertigten Bauteilen von Pulveranhaftungen aufgezeigt werden. Ein maßgeb-

liches Vorteil dabei ist, dass das Strahlmittel nach der Applikation auf dem Bauteil vollständig sublimiert. Somit verbleibt nach dem Strahlprozess ein vollständig trockenes und rückstandsfrei gereinigtes Bauteil, was das HD CO_2 -Strahlen von anderen Strahlprozessen wie dem Sandstrahlen oder dem Wasserstrahlen abgrenzt. Ein weiterer Vorteil ist, dass das verwendete CO_2 als Abfallprodukt aus anderen chemischen Industrieprozessen anfällt und daher nicht extra für den HD CO_2 -Prozess erzeugt werden muss. Infolgedessen gilt es in Bezug auf das verwendete Strahlmittel als weitgehend umweltneutral. Neben den eigenen Forschungsarbeiten zur Reinigung von additiv hergestellten Porenstrukturen mittels HD CO_2 -Strahl, sind bisher keine weiteren Forschungsarbeiten zu dem Thema bekannt [18]. Die erarbeiteten Erkenntnisse zur Fertigung und Reinigung innenstrukturierter Bauteile werden im Folgenden beschrieben. Dafür werden die verschiedenen oben genannten Arten von inneren Strukturen unter dem Oberbegriff der porösen Strukturen zusammengefasst.

3 Additive Fertigung von porösen Probekörpern

Das Hauptziel der durchgeführten Arbeiten war es, additiv gefertigte Bauteile aus der Legierung AlSi10Mg, welche oft für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, dem Leichtbau und der Medizintechnik zum Einsatz kommt, durch Innenstrukturierung zu funktionalisieren und diese mit CO_2 als Strahlmedium zu reinigen [3; 19]. Zu diesem Zweck wurden Erkenntnisse über Zusammenhänge von PBF-LB-Prozessparametern auf die Ausbildung gitterförmiger durchgängiger Innenstrukturen und deren Herstellungsgrenzen sowie den Verunreinigungsgrad durch Pulveranhaftungen erarbeitet. Weiterhin wurde Wissen über die Wirkung des HD CO_2 -Strahls auf additiv gefertigte Bauteile und die Reinigungsleistung an innenstrukturierten Bauteilen geschaffen. Dafür wurden technologische Untersuchungen mit Variation der Laserleistung P_L , der Scangeschwindigkeit v_s und des Bahnabstands h_s durchgeführt. Die Herstellung der für die Untersuchungen gefertigten Proben erfolgte mit einer Anlage des Typs „SLM 250 HL“ des Herstellers Nikon SLM Solutions AG, Lübeck. Es wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan aufgestellt, wobei die Faktoren Laserleistung P_L und Scangeschwindigkeit v_s in drei Stufen und der Bahnabstand h_s in vier Stufen variiert wurden. Eine übersichtliche Darstellung der gewählten Parametervariation ist der **Tabelle** zu entnehmen.

Mit den beschriebenen Parametern wurden zylinderförmige Probengeometrien mit einem Durchmesser $d_p = 10$ mm und einer Höhe $h_p = 10$ mm gefertigt. Weiterhin wurden die Proben mit einem massiven Ring der Breite $b_R = 0,5$ mm umschlossen. Nach Fertigung und Entpulverung der Proben vom überschüssigen Pulver erfolgte die metallografische Präparation mittels Einbetten, Schleifen und Polieren mit einer Diamantsuspension mit einer Korngröße von $d_p = 1 \mu\text{m}$. Die präparierten Proben wurden

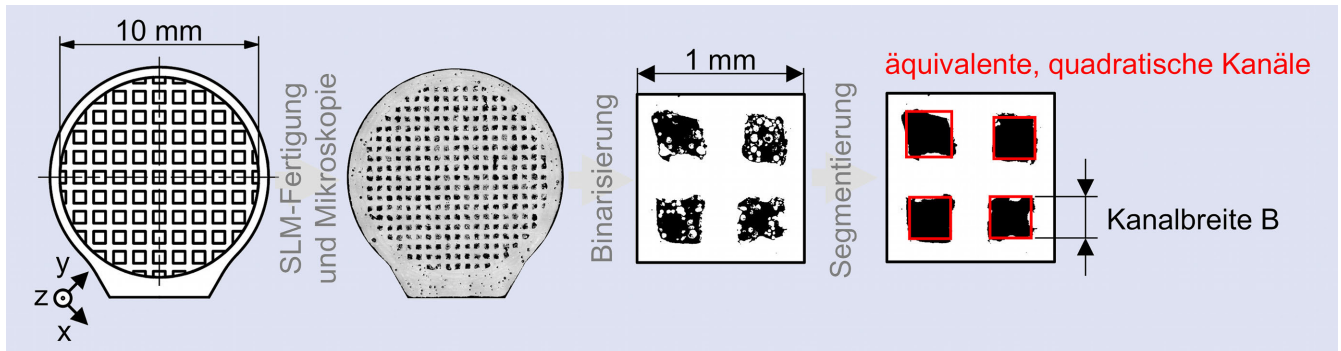


Bild 1. Vorgehensweise zur Ermittlung der Kanalbreite B in Abhängigkeit der PBF-LB-Parametervariation. Grafik: IWF, TU Berlin

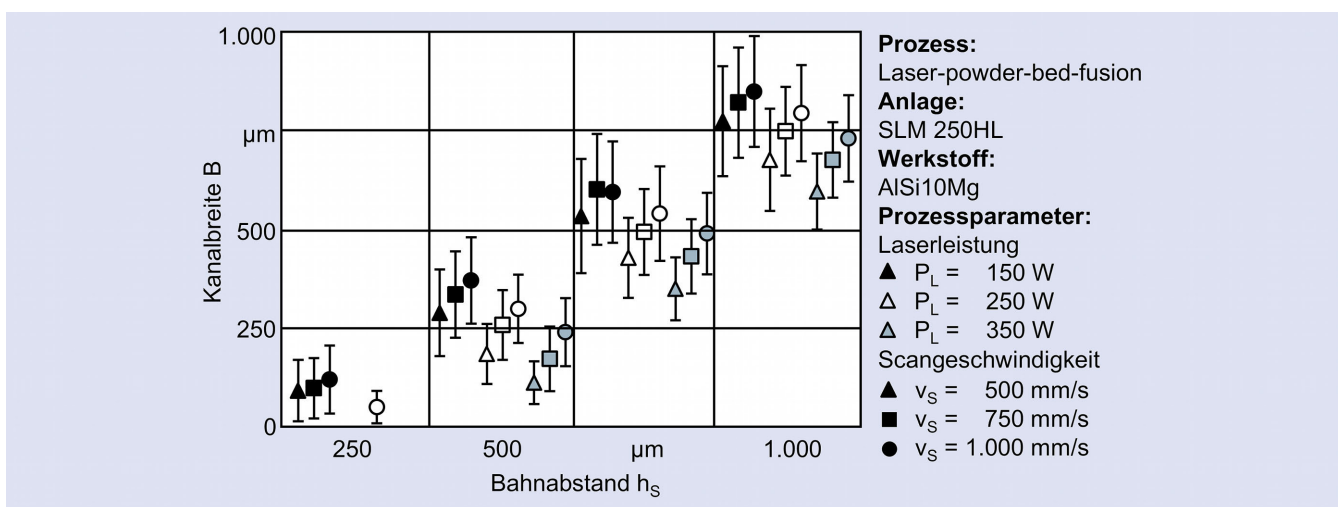


Bild 2. Ausbildung der Kanalbreite B in Abhängigkeit von Bahnabstand h_s , Laserleistung P_L und Scangeschwindigkeit v_s . Grafik: IWF, TU Berlin

anschließend mit einem Aufricht-Mikroskop der Firma Keyence, Osaka/Japan, vom Typ „VHX 5000“ erfasst und mit der Software „MatLab“ der Firma The MathWorks Inc., Natick/USA analysiert. Das Vorgehen ist in Bild 1 dargestellt. Die Aufnahmen der präparierten Proben wurden in einem ersten Schritt binarisiert und anschließend in Flächen von $A_p = 1 \text{ mm}^2$ große Raster segmentiert, um die Kanalstruktur auswerten zu können. Dadurch war es möglich die einzelnen Kanäle zu detektieren und deren Flächeninhalt A_K zu ermitteln. Die Fläche A_K wurde anschließend in äquivalente, quadratische Kanäle umgerechnet, indem die Kanalbreite B aus der Wurzel der Einzelkanalfläche A_K berechnet wurde.

Mithilfe der beschriebenen Methodik konnten 1588 Datenpunkte für die ausgebildete Kanalbreite B in Abhängigkeit von Bahnabstand h_s , Laserleistung P_L sowie Scangeschwindigkeit v_s ermittelt werden, die nachfolgend beschrieben werden.

In Bild 2 ist die Kanalbreite B der additiv gefertigten Proben über den Bahnabstand h_s unter Variation von Laserleistung P_L und Scangeschwindigkeit v_s dargestellt. Der Bahnabstand h_s hat den größten Einfluss auf die Kanalbreite B . Mit Vergrößerung des Bahnabstands h_s vergrößert sich auch die Kanalbreite B linear dazu. Ebenfalls nahezu linear vergrößert sich die Kanalbreite B bei zunehmender Scangeschwindigkeit v_s . Im Gegensatz dazu verhält sich die Kanalbreite B reziprok zur Laserleistung P_L . Bei einem Bahnabstand $h_s = 1000 \mu\text{m}$, einer Laserleistung $P_L = 150 \text{ W}$ und einer Scangeschwindigkeit $v_s = 1000 \text{ mm/s}$ wurde die maximale Kanalbreite $B_{\text{max}} = 854 \mu\text{m}$ ermittelt. Unab-

hängig von den untersuchten Scangeschwindigkeiten v_s konnten bei einem Bahnabstand $h_s = 250 \mu\text{m}$ lediglich bei niedrigen Laserleistungen $P_L = 150 \text{ W}$ sowie der Parameterkombination aus Laserleistungen $P_L = 250 \text{ W}$ und Scangeschwindigkeit $v_s = 1000 \text{ mm/s}$ durchgängige Gitterstrukturen erfasst werden. Bei einem Bahnabstand $h_s = 250 \mu\text{m}$ wurden Kanalbreiten im Bereich von $50 \mu\text{m} \leq B \leq 120 \mu\text{m}$ detektiert. Wohingegen bei einem Bahnabstand $h_s = 1000 \mu\text{m}$ die Kanalbreiten zwischen $599 \mu\text{m} \leq B \leq 854 \mu\text{m}$ variierte.

Die ermittelten 1588 Datenpunkte wurden mit einer linearen Regressionsanalyse ausgewertet, um die funktionalen Zusammenhänge zwischen variierten PBF-LB/M-Prozessparametern und der resultierenden Kanalbreite B zu korrelieren, siehe Gleichung 1.

$$B = -182,2 \mu\text{m} - 0,7860 \cdot P_L \frac{\mu\text{m}}{\text{W}} + 1,974 \cdot 10^{-4} \cdot v_s \text{ s} + 0,9620 \cdot h_s \quad (1)$$

Mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 99,51 \%$ und einem adjustierten Bestimmtheitsmaß von $R^2_{\text{adj}} = 0,9946$ beschreibt das in Gleichung 1 aufgeführte Modell die Kanalbreite B in einem hohen Maße von den variierten PBF-LB-Prozessparametern im untersuchten Parameterraum. So sind die einzelnen Parameter Bahnabstand h_s , Laserleistung P_L und Scangeschwindigkeit v_s ausreichend, um die Kanalbreite B zu beschreiben. Das Hinzufügen der Wechselwirkungen zwischen Laserleistung P_L , Scangeschwindigkeit v_s und Bahnabstand h_s führt zu einer marginalen Verbesse-

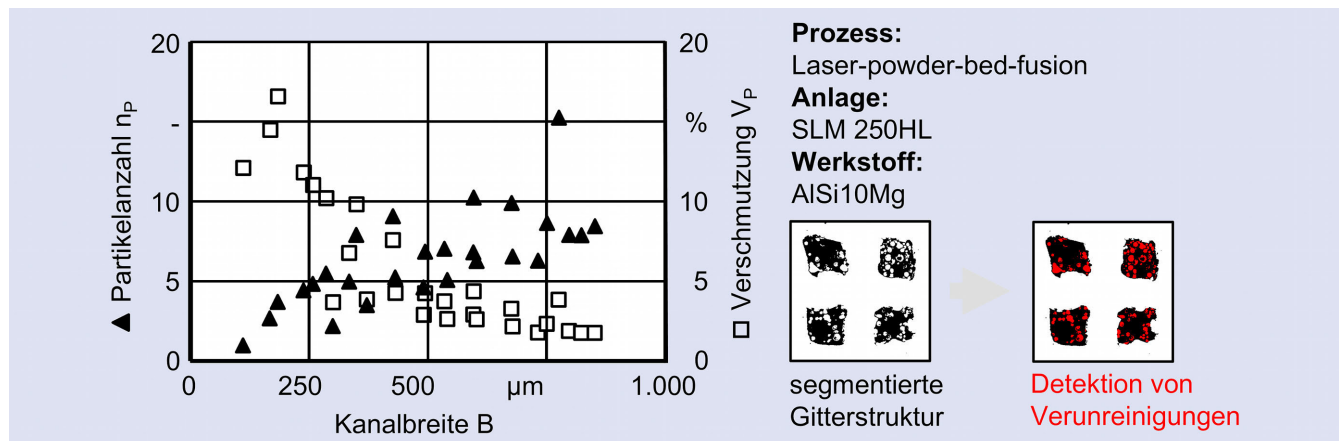


Bild 3. Partikelanzahl n_p sowie Verschmutzung V_p über die erzielte Kanalbreite B aller Prozessparameter. Grafik: IWF, TU Berlin

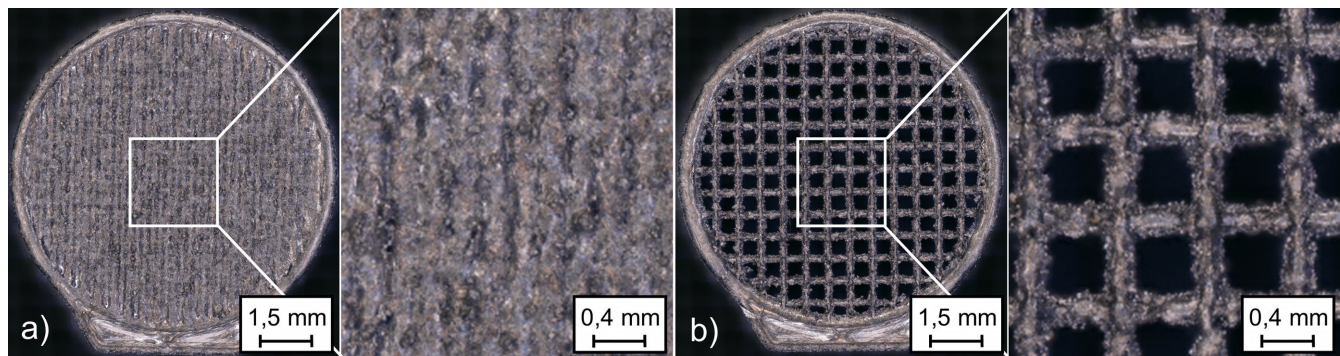


Bild 4. Gitterstruktur unterschiedlicher PBF-LB-Parameter; a) Laserleistung $P_L = 350$ W, Scangeschwindigkeit $v_s = 1000$ mm/s und Bahnabstand $h_s = 250$ µm; b) Laserleistung $P_L = 150$ W, Scangeschwindigkeit $v_s = 1000$ mm/s und Bahnabstand $h_s = 750$ µm. Foto: IWF, TU Berlin

rung der Bestimmtheitsmaße R^2 und R^2_{adj} um 0,32 % beziehungsweise 0,0032. Allerdings nimmt dabei die Komplexität des Modells unverhältnismäßig zu. Damit konnten die Einsatzgrenzen sowie die funktionalen Zusammenhänge zwischen Kanalbreite B und den PBF-LB-Prozessparametern Bahnabstand h_s , Laserleistung P_L und Scangeschwindigkeit v_s erarbeitet werden.

In Anlehnung an das beschriebene Vorgehen in Bild 1, wurde auch zur Erfassung des Verunreinigungsgrads eine Binarisierung und Segmentierung der Proben durchgeführt. Anschließend erfolgte die Erfassung des Flächeninhalts der anhaftenden Partikel A_p , die rot in **Bild 3** dargestellt sind. Die Erfassung einzelner Partikel stellte sich aufgrund von Agglomerationseffekten und Ansinterungen einzelner Partikel zu Partikelgruppen als problematisch dar. Die ermittelte Fläche der anhaftenden Partikel A_p wurde anschließend durch den Flächeninhalt eines einzelnen Partikels mit der gemittelten Partikelgröße des verwendeten AlSi10Mg-Pulvers von $d_p = 43,96$ µm dividiert. Das Ergebnis der resultierenden Partikelanzahl n_p über die erfasste Kanalbreite B sind in Bild 3 veranschaulicht. Mit zunehmender Kanalbreite B kann eine degressiv zunehmende Partikelanzahl n_p festgestellt werden. Aufgrund des nicht linearen Anstiegs wurde weiterhin die prozentuale Verschmutzung V_p durch Division der Einzelkanalfläche A_K mit der Fläche anhaftender Partikel A_p ermittelt. Die Verschmutzung V_p nimmt regressiv über die Kanalbreite B ab. Bei einer Kanalbreite $B = 500$ µm beträgt die Verschmutzung $V_p \approx 4,5$ % und bleibt mit zunehmender Kanalbreite B weitgehend konstant. Die maximal detektierte Partikelanzahl $n_p = 15$ wurde bei einer Kanalbreite $B = 776$ µm gemessen.

Die Ausbildung der funktionalisierten Innenstruktur durch Variation der PBF-LB-Parameter zeigt eindeutige Grenzen in der Fertigbarkeit durchgängiger Gitterstrukturen für den untersuchten Parameterraum. Wie in Bild 2 aufgezeigt, konnten bei einem Bahnabstand von $h_s = 250$ µm und einer Laserleistung $P_L = 350$ W keine durchgängigen Gitterstrukturen erzeugt werden. Gleiches gilt für den Bahnabstand $h_s = 250$ µm, die Laserleistung $P_L = 250$ W und die Scangeschwindigkeit $v_s = 500$ mm/s beziehungsweise 750 mm/s. Mit den genannten Parameterkombinationen wurden keine in sich geschlossenen, durchgängigen und detektierbaren Kanäle, sondern lediglich Teile mit erhöhter sowie zum Teil geschlossener Porosität erzeugt, siehe **Bild 4 a**. Mit zunehmender Kanalbreite B weisen die Kanäle deutlichere quadratische Strukturen auf, siehe Bild 4 b.

Bei der Verwendung geeigneter Fertigungsparameter ist es möglich, durchgängige offenporige funktionale Strukturen herzustellen und deren Form zu beeinflussen. Weiterhin wurde der Einfluss der Kanalbreite B auf den Verunreinigungsgrad der funktionalen Strukturen detektiert.

4 Reinigung durch HDCO₂-Strahlen

Für die Untersuchungen zur Reinigungsleistung durch das HDCO₂-Strahlen von porösen Probekörpern wurde eigens ein Versuchsstand konzeptioniert. In **Bild 5** ist schematisch der Aufbau des Versuchsstands visualisiert. Die Reinigungsleistung beim HDCO₂-Strahlen von Proben wird einerseits durch die Massedifferenz Δm der ungereinigten und gereinigten Proben sowie an-

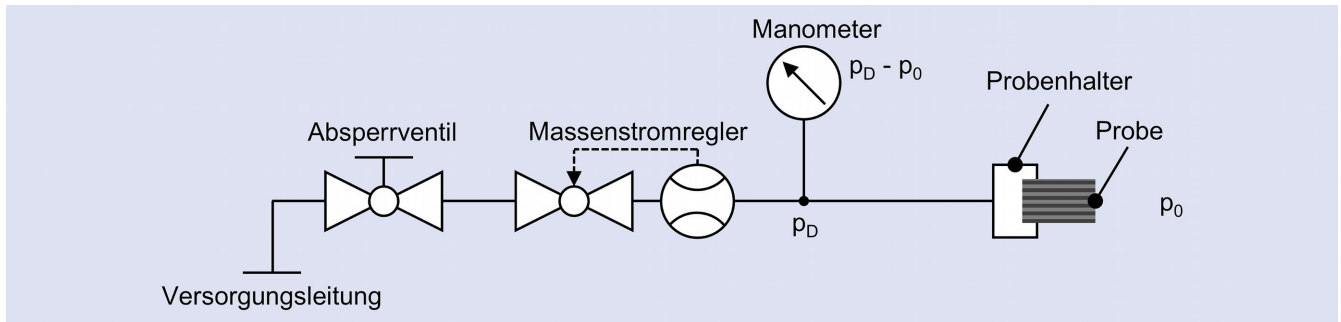


Bild 5. Schematischer Versuchsaufbau zur Bestimmung des Druckverlustbeiwerts ζ . Grafik: IWF, TU Berlin

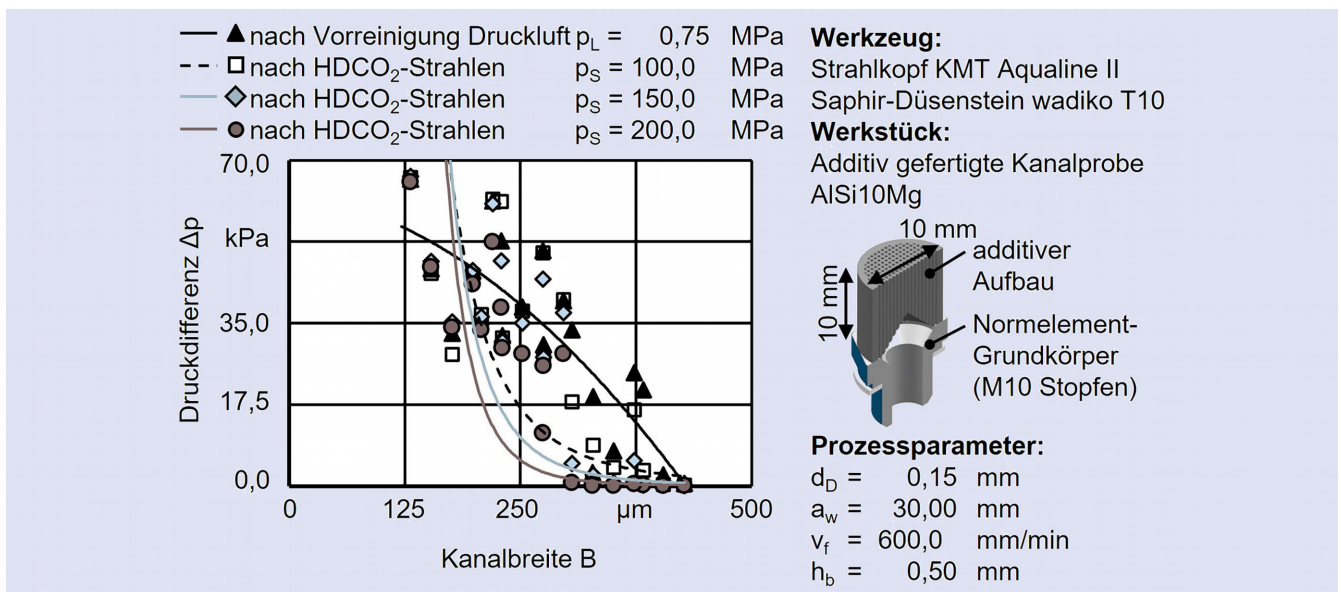


Bild 6. Druckdifferenz Δp über die Kanalbreite B unter Variation des Strahlendrucks p_s . Grafik: IWF, TU Berlin

dererseits der Durchströmbarkeit der Gitterstrukturen evaluiert. Für die Detektion der Durchströmbarkeit wird über einen Massenströmungsregler ein definierter Druckluftstrom eingestellt. In Abhängigkeit der Durchströmbarkeit der Probe und des eingestellten Massenstroms stellt sich ein Druck p_D in der Leitung ein. Mithilfe der Druckdifferenz Δp aus Druck in der Leitung p_D und Atmosphärendruck p_0 kann die Durchströmbarkeit der funktionalen Strukturen ermittelt und durch den Druckverlustbeiwert ζ angegeben werden. Die Druckdifferenz Δp stellt hierbei eine Vergleichsgröße dar und gibt Auskunft über den Strömungswiderstand, welcher durch die funktionalen Strukturen und Verunreinigungen vorliegt. Die Druckdifferenz Δp verringert sich entsprechend mit der Beseitigung von Verunreinigungen aus den Gitterstrukturen.

Um die additiv gefertigten Funktionsstrukturen in den Versuchsaufbau integrieren zu können, wurde ein Stopfen mit einer Durchgangsbohrung und einem M10 Gewinde genutzt. Entsprechend musste die Bauplatte der PBF-LB-Anlage mit M10 Gewinden präpariert werden. Darin wurden die Probenhalter eingeschraubt und die Gitterstrukturen direkt auf die Probenhalter gefertigt. Eine schematische Darstellung des Werkstückaufbaus ist in **Bild 6** abgebildet.

Als Reinigungsstrategie wurde ein vierstufiges Vorgehen definiert. Dabei wurden die Funktionsstrukturen nach Fertigung auf den Stopfen zunächst mit Druckluft $p_L = 0,75 \text{ MPa}$ gereinigt.

Anschließend wurde die Masse m der Bauteile erfasst sowie deren Durchströmbarkeit in Form der ermittelten Druckdifferenz Δp im Versuchsaufbau aus **Bild 5** analysiert. Anschließend wurden die Proben mit einem Düsendurchmesser $d_D = 0,15 \text{ mm}$, einem Strahlabstand $a_w = 30 \text{ mm}$, einer Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 600 \text{ mm/min}$, einem Bahnabstand $h_b = 0,5 \text{ mm}$ und einem Strahldruck $p_s = 100 \text{ MPa}$ flächig in einem Mäandermuster gestrahlt. Nach dem Strahlvorgang wurde wiederholt die Masse m und die Druckdifferenz Δp gemessen. Nachfolgend wurden die Proben mit einem Strahldruck $p_s = 150 \text{ MPa}$ gestrahlt und wiederholt vermessen. Die übrigen Strahlparameter wurden konstant gehalten. Das Vorgehen wurde mit einem Strahldruck $p_s = 200 \text{ MPa}$ wiederholt. Der Strahldruck p_s wurde auf maximal 200 MPa festgelegt, um die Stege der Gitterstruktur nicht zu beschädigen. Der maximale Strahldruck von $p_s = 200 \text{ MPa}$ wurde im Rahmen von Vorversuchen definiert, bei welchen die Belastbarkeit der genutzten Gitterstrukturen festgestellt wurde. Die Ergebnisse der Druckdifferenz Δp über die Kanalbreite B für die einzelnen Reinigungsschritte sind in **Bild 6** dargestellt. Alle Messungen wurden drei Mal durchgeführt. Insbesondere für die Vorreinigung mit Druckluft werden über alle Kanalbreiten B die größten Druckdifferenzen Δp detektiert. Mit Erhöhung des Strahlendrucks p_s kann eine Verringerung der Druckdifferenz Δp beobachtet werden. Zur Unterstützung der Messpunkte wurden Trendlinien für die vier untersuchten Reini-

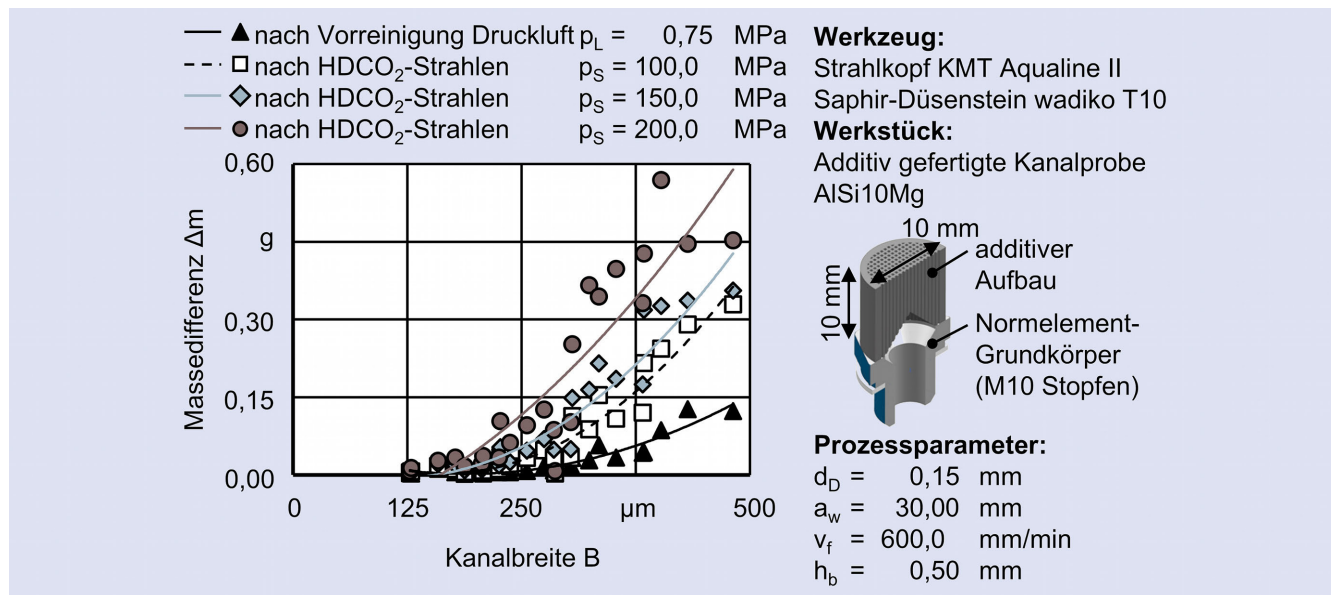


Bild 7. Massedifferenz Δm über die Kanalbreite B bei Variation des Strahldrucks p_s . Grafik: IWF, TU Berlin

gungsschritte ins Diagramm aufgenommen. Für die einzelnen Reinigungsschritte ergibt sich jeweils ein regressiver Verlauf der Druckdifferenz Δp mit zunehmender Kanalbreite B . Mit zunehmendem Strahldruck p_s verschiebt sich der Verlauf der Trendlinie zu niedrigeren Druckdifferenzen Δp . Dies verdeutlicht, dass die beste Reinigungsleistung nach dem HDCO_2 -Strahlen mit einem Strahldruck von $p_s = 200$ MPa erzielt wurde und grundsätzlich hohe Strahldrücke für die Erzielung maximaler Reinigungsergebnisse zu wählen sind.

Die Massedifferenz Δm über die Kanalbreite B bei Variation des Strahldrucks p_s ist in **Bild 7** dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die Massedifferenz Δm mit zunehmender Kanalbreite B deutlich zunimmt. Dieses Ergebnis korreliert mit den Ergebnissen aus **Bild 3**, worin ersichtlich wurde, dass die Partikelanzahl n_p als Verschmutzung in der Gitterstruktur mit der Kanalbreite B zunimmt. Weiterhin wird ersichtlich, dass eine Steigerung des Strahldrucks p_s ebenfalls zu einer Erhöhung der Massedifferenz Δm führt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den dargestellten Ergebnissen konnte aufgezeigt werden, dass sich das HDCO_2 -Strahlen für das Reinigen von additiv gefertigten porösen Strukturen eignet und dadurch unter Beachtung der höheren eingesetzten Strahldrücke p_s bessere Reinigungsergebnisse als durch das einfache Strahlen mit Druckluft erzielbar sind. Im untersuchten Parameterraum ist sowohl die Fertigung additiver Gitterstrukturen mit einer Kanalbreite $B \geq 125 \mu\text{m}$ als auch die Reinigung mittels HDCO_2 -Strahlen nachweislich möglich. Die besten Reinigungsergebnisse konnten bei einem Strahldruck $p_s = 200$ MPa erzielt werden. Dies lässt den Schluss zu, dass noch höhere Strahldrücke das Reinigungsergebnis weiter verbessern könnten, wobei jedoch die Belastbarkeit der zu reinigenden Strukturen zu berücksichtigen ist, um Defekte durch das HDCO_2 -Strahlen zu vermeiden. Weitere Untersuchungen sind nötig um den Einfluss des HDCO_2 -Strahlens auf andere Arten von porösen Strukturen wie TPMS-Strukturen oder metallischen Schwammstrukturen zu untersuchen. Hierfür sind sowohl weitere

Versuche für die additive Fertigung von entsprechenden Probenkörpern nötig wie auch die Evaluierung weiterer Parameterbereiche im Rahmen von HDCO_2 -Strahl-Versuchen.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 42631977.

LITERATUR

- [1] Nabavi, S.F.; Dalir, H.; Farshidianfar, A.: A comprehensive review of recent advances in laser powder bed fusion characteristics modeling: metallurgical and defects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 132 (2024) S. 2233–2269
- [2] Dev Singh, D.; Mahender, T.; Raji Reddy, A.: Powder bed fusion process: A brief review. *Materials Today: Proceedings* 46 (2021) S. 350–355
- [3] Subramaniyan, A. K.; Reddy, A. S.; Mathias, S.; Shrivastava, A.; Raghupatruni, P.: Influence of post-processing techniques on the microstructure, properties and surface integrity of AISiMg alloy processed by laser powder bed fusion technique. *Surface and Coatings Technology* 425 (2021) 127679
- [4] Uhlmann, E.; Braun, T.; Lahoda, C.: Automated Post-Processing of Additively Manufactured Ti5553-Components Using Robot-Guided Blasting. In: *Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC Conference Proceedings* 2023. Berlin, 2023
- [5] Plocher, J.; Panesar, A.: Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. *Materials & Design* 41 (2019) 183, S. 1–20
- [6] Abu-Gharbieh, M.; Braun, T.; Schwitala, A.; Akhmad, R.; Frieß, F.; Barvinska, V.; Uhlmann, E.: Additive Fertigung von Zahnimplantaten: Entwicklung einer innovativen additiv-subtraktiven Prozesskette für die Zahnmedizin mittels Laser Powder Bed Fusion-Verfahren. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 119 (2024) 7-8, S. 539–542
- [7] Li, S.; Essa, K.; Carr, J.; Chiwanga, S.; Norton, A.; Attallah, M.M.: The development of a high-performance Ni-superalloy additively manufactured heat pipe. *Advances in Manufacturing* 10 (2022) 4, S. 610–624
- [8] Uhlmann, E.; Wagner, M. H.; Gerlitzky, G.: Additives Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen mit Eigenschaftsgradienten. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (2018) 5, S. 290–294

- [9] Otto, R.; Kiener, C.; Küsters, Y.; Sørby, K.: Additive manufacturing of open porous functional structures: roadmap from manufacturing to the application. *Procedia CIRP* 112 (2022) S. 334–339
- [10] Echeta, I.; Feng, X.; Dutton, B.; Leach, R.; Piano, S.: Review of defects in lattice structures manufactured by powder bed fusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106 (2020) 5–6, S. 2649–2668
- [11] Majeed, M.; Khan, H. M.; Wheatley, G.; Situ, R.: Influence of post-processing on additively manufactured lattice structures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 44 (2022) 9
- [12] Ramos, H.; Pickering, E.; AlMahri, S.; Krishnan, K.; Oyeibanji, J.; Guan, Z.; Langdon, G.; Santiago, R.: Experimental evaluation of hybrid lattice structures subjected to blast loading. *Additive Manufacturing* 76 (2023)
- [13] Riva, L.; Ginestra, P. S.; Ceretti, E.: Mechanical characterization and properties of laser-based powder bed-fused lattice structures: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 113 (2021) 3–4, S. 649–671
- [14] Sharma, D.; Hiremath, S. S.: Additively manufactured mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surfaces: Performance, challenges, and application. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 29 (2022) 26, S. 5077–5107
- [15] Braun, T.; Kiener, C.: Additive Fertigung multi-funktionaler Bauteile: Methodische Produktentwicklung bei hoher Geometriekomplexität – Fallstudie: Heatpipe. *Wt Werkstatttechnik online* 110 (2020) 7–8, S. 526–531
- [16] Schmeiser, F.; Krohmer, E.; Schell, N.; Uhlmann, E.; Reimers, W.: Internal Stress Evolution and Subsurface Phase Transformation in Titanium Parts Manufactured by Laser Powder Bed Fusion – An In Situ X-Ray Diffraction Study. *Advanced Engineering Materials* 68 (2021) 23
- [17] Karayagiz, K.; Elwany, A.; Tapia, G.; Franco, B.; Johnson, L.; Ma, J.; Karaman, I.; Arróyave, R.: Numerical and experimental analysis of heat distribution in the laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V. *IJSE Transactions* 51 (2019) 2, S. 136–152
- [18] Uhlmann, E.; Krohmer, E.: Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile mit flüssigem CO₂-Hochdruckstrahl. *AWT magazin - Magazin des Arbeitskreis Wasserstrahltechnologie* (2020) S. 28–30
- [19] Ghio, E.; Cerri, E.: Additive Manufacturing of AISi10Mg and Ti6Al4V Lightweight Alloys via Laser Powder Bed Fusion: A Review of Heat Treatments Effects. *Materials* 15 (2022) 6



**Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing.
Eckart Uhlmann** 

Thomas Braun, M.Sc. 
braun@iwf.tu-berlin.de
Tel. +49 30 / 314 24963

Waldemar Reder, M.Sc. 
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik (IPK)
Technische Universität Berlin
Institut für Werkzeugmaschinen
und Fabrikbetrieb (IWF)
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin
www.iwf.tu-berlin.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)