

## Additive Fertigung von Titanaluminiden

# Qualitätssteigerung beim PBF-LB/M-Hochtemperaturprozess

E. Uhlmann, J. Polte, A. Gordei, G. Esser, J. Fock

**ZUSAMMENFASSUNG** Das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (PBF-LB/M) bietet vielversprechende Möglichkeiten zur Fertigung komplexer Titanaluminid-Bauteile. Jedoch stellen hohe Temperaturgradienten  $\Delta\vartheta$  und Eigenspannungen  $\sigma$  Herausforderungen dar, die Rissbildung und Porosität  $\Phi$  verursachen. In dieser Studie wird die Vorheizung der Substratplatte als Strategie zur Reduktion dieser Defekte untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung der Vorheiztemperatur  $\vartheta_{\text{Sub}}$  die Bauteilqualität durch geringere Rissbildung  $\omega$  und höhere Dichte  $\rho$  signifikant verbessert.

## STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Titanaluminide, PBF-LB/M

## Additive Manufacturing of titanium aluminide – Quality improvement by high-temperature PBF-LB/M

**ABSTRACT** Powder bed fusion-laser beam melting (PBF-LB/M) enables the production of complex titanium aluminide parts. However, high temperature gradients  $\Delta\vartheta$  and residual stresses  $\sigma$  lead to cracking and porosity  $\Phi$ . This study investigates substrate preheating as a strategy to mitigate these defects. The findings demonstrate that increasing the preheating temperature  $\vartheta_{\text{Sub}}$  significantly enhances part quality by reducing crack formation  $\omega$  and improving density  $\rho$ .

## 1 Einleitung

Die Additive Fertigung (englisch: Additive Manufacturing, AM) eröffnet durch einen schichtweisen Aufbau eines dreidimensionalen Körpers neue Gestaltungsmöglichkeiten und erlaubt dadurch unter anderem eine Gewichtsreduktion des fertigen Bauteils. Durch die zunehmende industrielle Anwendung der AM-Technologien stieg der globale Markt für AM-Produkte und Dienstleistungen im Jahr 2023 um 18,3 % auf einen Gesamtwert von 20,04 Milliarden US-Dollar [1]. Diese Entwicklung zeigt das wachsende Potenzial der Technologie in Schlüsselbranchen wie der Luft- und Raumfahrt und Automobilindustrie. Viele Werkstoffe können bereits zu hochqualitativen Bauteilen mit der Additiven Fertigung verarbeitet werden, jedoch stellen schwer schweißbare Werkstoffe, wie Titanaluminide (Ti-Al), weiterhin Herausforderungen dar. Ti-Al haben das Potenzial, Superlegierungen auf Nickelbasis in Anwendungsgebieten zu ersetzen, bei denen es auf Gewichtsreduktion und Temperaturstabilität ankommt [2]. Die Dichte der Ti-Al Legierung beträgt  $\rho_{\text{TiAl}} = 3,9 \text{ g/cm}^3$ . Diese Dichte  $\rho$  ist lediglich halb so groß wie die Dichte der Superlegierungen auf Nickelbasis mit  $\rho_{\text{Ni-Basis}} = 8,3 \text{ g/cm}^3$ . Dabei sind die spezifischen Eigenschaften der Ti-Al Legierung, wie die spezifische Festigkeit  $R_{\text{spez}}$ , wesentlich höher [3]. Der Werkstoff Ti-Al bietet aufgrund seiner hohen Festigkeit  $R_m$  bei geringer Dichte  $\rho$  und seiner Beständigkeit gegen hohe Temperaturen  $\vartheta$  erhebliche Vorteile für die Luft- und Raumfahrtindustrie. Trotz dieser Vorteile stellt die Fertigung von Ti-Al, insbesondere mittels pulverbettbasiertem Laserstrahlschmelzen (PBFLB/M), eine große Herausforderung dar. Diese

Herausforderungen resultieren hauptsächlich aus den hohen Temperaturgradienten  $\Delta\vartheta$  und Temperaturänderungsraten  $\dot{\vartheta}$ , die während des Fertigungsprozesses auftreten und zu Eigenspannungen  $\sigma$  führen. Diese Eigenspannungen  $\sigma$  können wiederum Risse und andere Defekte im Werkstoff verursachen.

## 2 Einfluss der Vorheiztemperatur auf den Fertigungsprozess

Ein besonders vielversprechender Lösungsansatz zur Reduktion von Eigenspannungen  $\sigma$  ist die Einbringung zusätzlicher Energie  $E_g$  durch Vorwärmung der Substratplatte auf eine bestimmte Vorwärmtemperatur der Substratplatte  $\vartheta_{\text{Sub}}$ , bevor der Laserstrahl den Schmelzprozess initiiert. Das Hauptziel dieses Ansatzes besteht in der Verringerung der Temperaturgradienten  $\Delta\vartheta$ , die während des PBF-LB/M Prozesses auftreten. Die Vorwärmtemperatur der Substratplatte  $\vartheta_{\text{Sub}}$  stellt somit einen entscheidenden Prozessparameter für den PBF-LB/M-Herstellungsprozess dar. Des Weiteren führt das Vorwärmnen der Substratplatte zu einer Energiezufuhr  $E_g$  in das Pulver, wodurch eine geringere Volumenenergiedichte des Lasers  $E_V$  erforderlich ist, um die Überhitzung des Schmelzbades und Aluminiumverdampfung  $E_{\text{VAl}}$  zu vermeiden. Das Zusammenwirken der Energie durch Vorwärmung der Substratplatte  $E_g$  und der Volumenenergiedichte des Lasers  $E_V$  ist bisher noch kaum erforscht. Somit müssen Parametersätze, die für eine bestimmte Vorwärmtemperatur der Substratplatte  $\vartheta_{\text{Sub}}$  bestehen, für andere Vorwärmtemperaturen der Substratplatte  $\vartheta_{\text{Sub}}$  immer neu angepasst und entwickelt werden. Die Parametersätze für das PBF-LB/M Fertigungsverfahren

PBF-LB/M Prozessparameter		Legende
$P_L$	Laserleistung	
$d_L$	Lasdurchmesser	
$x_f$	Fokuslage	
$v_s$	Scangeschwindigkeit	
$d_p$	Punktabstand	
$h_s$	Spurabstand	
$l_z$	Schichtdicke	
$\theta_{\text{Sub}}$	Vorheiztemperatur der Substratplatte	

Bild 1. Schematische Darstellung der Belichtungsparameter beim PBF-LB/M Fertigungsverfahren [4]. Grafik: Fraunhofer IPK

ren unter Verwendung eines gepulsten Lasers (englisch: pulsed laser, pw) setzen sich aus der Laserleistung  $P_L$ , dem Punkt- abstand  $p_d$ , dem Spurabstand  $h_s$ , Belichtungszeit  $t_e$  der Schichtdicke  $l_z$  und der Fokuslage  $f_z$  zusammen, siehe Bild 1 [4; 5].

Aus den bekannten Parametern der Laserleistung  $P_L$ , Belichtungszeit  $t_e$ , Schichtdicke  $l_z$ , Lasdurchmesser  $d_L$  und Punkt- abstand  $p_d$  kann die Volumenenergiedichte gepulster Laser  $E_{V,pw}$  nach Gleichung 1 berechnet werden.

$$E_{V,pw} = \frac{P_L \cdot t_e}{l_z \cdot d_L \cdot p_d} \quad (1)$$

Die Volumenenergiedichte gepulster Laser  $E_{V,pw}$  ist ein wichtiger Parameter für die Qualitätskontrolle und Überwachung der Bauteile und lässt sich über alle seine Parameter variieren [6]. Die Gesamtvolumenenergiedichte  $E_G$  lässt sich aus der Energie durch Vorheizung der Substratplatte  $E_\theta$  und der Volumen- energiedichte gepulster Laser  $E_{V,pw}$  nach Gleichung 2 berechnen.

$$E_G = E_\theta + E_{V,pw} \quad (2)$$

Die zusätzliche Vorwärmung der Substratplatte hat sich bei verschiedenen Anwendungen als vielversprechend erwiesen, insbesondere bei der Verarbeitung schwer schweißbarer Werkstoffe [7; 8]. Der Ansatz trägt zur Minimierung der Rissbildung  $\omega$  bei, reduziert die Eigenspannungen  $\sigma$  und verbessert die mechanischen Eigenschaften der hergestellten Bauteile erheblich. Die Mehrheit der industriellen PBF-LB/M-Maschinensysteme setzt auf Widerstandsheizungen, die typischerweise eine Vorheiztemperatur der Substratplatte von bis zu  $\theta_{\text{Sub}} \leq 200^\circ\text{C}$  ermöglichen. Die neuesten Maschinensysteme sind sogar in der Lage, Vorheiztemperaturen der Substratplatte von bis zu  $\theta_{\text{Sub}} \leq 500^\circ\text{C}$  zu erreichen [9; 10].

### 3 Experimentelle Untersuchungen

#### 3.1 Versuchsaufbau und Methoden

Im Rahmen des PBF-LB/M-Fertigungsverfahrens für die Legierung Ti48Al2Cr2Nb wurden empirische Untersuchungen zur Optimierung der Prozessparameter durchgeführt. Hierzu

wurden insgesamt 120 Proben unter Anwendung von 60 verschiedenen Parametersätzen und zwei unterschiedlichen Vorwärmtemperaturen der Substratplatte von  $\theta_{\text{Sub}} = 200^\circ\text{C}$  und  $\theta_{\text{Sub}} = 500^\circ\text{C}$  hergestellt. Die Fertigung erfolgte mit dem PBF-LB/M-System „RenAM 500Q HTBV“ (englisch: High Temperature Build Volume) der Firma Renishaw plc, New Mills/UK. Dieses System verfügt über eine stationäre Vorwärmseinheit, welche die Substratplatte auf eine Vorwärmtemperatur der Substratplatte von bis zu  $\theta_{\text{Sub}} \leq 500^\circ\text{C}$  erwärmen kann. Im Rahmen der Untersuchung wurden die Proben hinsichtlich ihrer Rissbildung, Porosität  $\Phi$  und Dichte  $\rho$  analysiert, um den Einfluss der Vorwärmtemperaturen  $\theta_{\text{Sub}}$  auf die Prozessstabilität und Bauteilqualität zu evaluieren. Die Ergebnisse früherer Studien belegen, dass eine zu hohe Laserleistung  $P_L$  zu einer verstärkten Rissbildung  $\omega$  führt [11]. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, eine hohe Temperaturänderungsrate  $\Delta T$  zu verhindern und durch eine Optimierung der Parameter, insbesondere durch kleinere Punktabstände  $p_d$  und höhere Belichtungszeiten  $t_e$ , ein optimales Ergebnis zu erzielen. Die Schichtdicke  $l_z$  wird bei allen Proben konstant auf  $l_z = 50 \mu\text{m}$  gehalten. Die Untersuchung mit einer Schichtdicke  $l_z = 50 \mu\text{m}$  dient dem Vergleich mit wirtschaftlichen Fertigungsprozessen, da PBFLB/M-Fertigungsprozesse mit einer Schichtdicke  $l_z < 50 \mu\text{m}$  aktuell nicht wirtschaftlich sind [6]. Bild 2 gibt einen Überblick über die Randbedingungen, die variierten Parameter und die gefertigten Proben für die Parameterstudie.

Die erste Analyse der 120 hergestellten Proben erfolgt mittels der archimedischen Verdrängungsmethode. Die Messergebnisse werden mithilfe statistischer Versuchsmethoden (englisch: Design of Experiment, DoE) bewertet und der Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Dichte  $\rho$  der Proben analysiert. Im Anschluss an die Dichtemessung werden insgesamt zehn gefertigte Proben für die weitere optische Analyse ausgewählt. Die Rissbildung wurde durch die Analyse von mikroskopischen Aufnahmen der äußeren Oberfläche untersucht, wobei die gesamte Risslänge  $\omega_l$  ermittelt wurde. Hierbei wurden mikroskopische Aufnahmen der Seitenflächen der Proben angefertigt, um insbesondere Phänomene wie Delaminationen präzise zu detektieren. Im nächsten Schritt wurden Schliffbilder angefertigt und mit einem

Substratplatte mit Proben	Details
	<b>Anlagentechnik:</b> PBF-LB/M-Anlage RENAM 500Q HTBV <b>Randbedingungen:</b> Substratwerkstoff Titan Pulverwerkstoff Ti-48Al-2Cr-2Nb Schichtdicke $l_z$ 50 µm Laserdurchmesser $d_L$ 75 µm Proben $l \times b \times h$ 10 mm x 10 mm x 10 mm Probenumfang N 2 x 60 Vorheiztemperatur $\vartheta_{\text{Sub}}$ 200 °C, 500 °C <b>Steuerfaktoren:</b> Laserleistung 80 W $\leq P_L \leq$ 120 W Belichtungszeit 70 µs $\leq t_B \leq$ 110 µs Punktabstand 50 µm $\leq p_d \leq$ 90 µm Spurabstand 55 µm $\leq h_s \leq$ 95 µm

Bild 2. Randbedingungen und Parameterbereich der gefertigten Proben. Grafik: Fraunhofer IPK

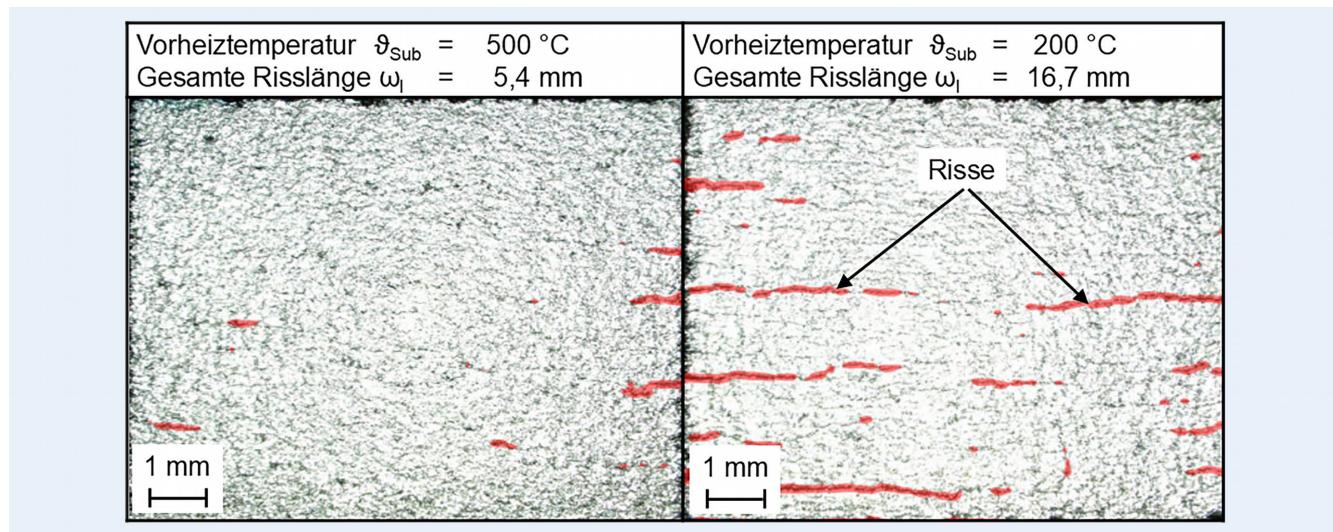


Bild 3. Mikroskopische Aufnahmen der Proben ID 1-24 und ID 2-8 mit markierten Rissen in rot. Grafik: Fraunhofer IPK

Mikroskop analysiert. Die Porosität  $\Phi$  wurde aus den mikroskopischen Aufnahmen der Probenschliffe bestimmt.

### 3.2 Analyse der gefertigten Proben

Aus der Analyse der Probewürfel konnten einige Rückschlüsse der Auswirkungen der Bearbeitungsparameter auf die Dichte  $\rho$  geschlossen werden. Ein kleiner Punktabstand  $p_d$  und eine lange Belichtungszeit  $t_e$  führen zu einer hohen Dichte  $\rho$ . Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass eine hohe Laserleistung  $P_L$ , einen größeren Spurabstand  $h_s$  erfordert, um hohe Dichten  $\rho$  zu erreichen. Außerdem besitzt die höhere Vorwärmtemperatur  $\vartheta_{\text{Sub}}$  einen positiven Einfluss auf die Dichte  $\rho$  der Proben. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die höchste Dichte  $\rho$  bei der Herstellung der Probe mit der höchsten Vorwärmtemperatur der Substratplatte  $\vartheta_{\text{Sub}}$  und der höchsten Volumenenergiedichte des Lasers  $E_V$  erreicht wurde.

Die optische Untersuchung beginnt mit einer externen Rissanalyse der zehn ausgewählten Proben mit den höchsten Dich-

ten  $\rho$ . Die externen Mikroskopiebilder der ausgewählten Proben wurden unter Zuhilfenahme von Schwarz-Weiß-Masken und der Anwendung künstlicher neuronaler Netze (englisch: Convolutional Neural Network, CNN) analysiert. Die Ergebnisse sind für zwei Proben in Bild 3 dargestellt. Das trainierte CNN markiert die Risse mit roten Linien.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer höheren Vorwärmtemperatur von  $\vartheta_{\text{Sub}} = 500^\circ\text{C}$  die hergestellten Proben im Gesamtvergleich eine geringere gesamte Risslänge  $\omega_l$  aufweisen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Rissbildung durch hohe thermische Spannungen  $\sigma_{\text{th}}$  und Phasenübergänge angetrieben wird. Die Bildung der spröden Phase  $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$  während des Abkühlprozesses dient der Spannungskonzentration und trägt somit zur Rissbildung bei. Durch Vorwärmung der Substratplatte können Temperaturgradienten  $\Delta\vartheta$  und Eigenspannungen  $\sigma$  reduziert werden, was zu einer Verringerung der Rissbildung führt. In den meisten Fällen hat eine hohe Volumenenergiedichte des Lasers  $E_V$  einen negativen Einfluss auf die Qualität, in Bezug auf die gesamte Risslänge  $\omega_l$ . Eine höhere Volumenenergiedichte des Lasers  $E_V$

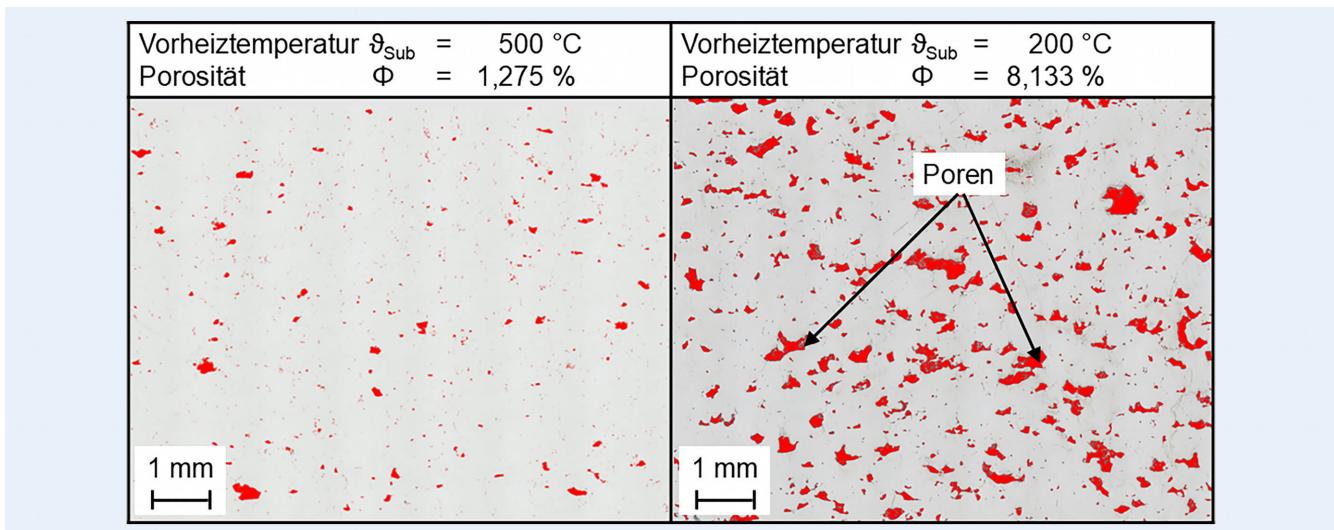


Bild 4. Monochromatische Mikroskopiebilder mit rot gefärbten Poren. Grafik: Fraunhofer IPK

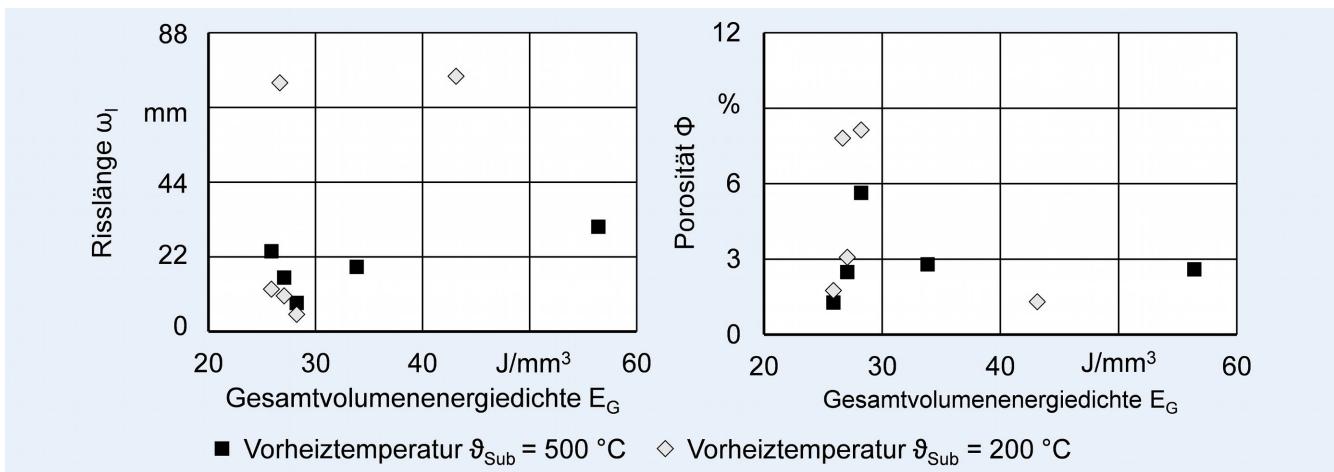


Bild 5. Vergleich der Porosität  $\Phi$  und der gesamten Risslänge  $\omega_l$  für das PBF-LB/M-Verfahren mit Vorheiztemperaturen von  $\vartheta_{\text{Sub}} = 200^\circ\text{C}$  und  $\vartheta_{\text{Sub}} = 500^\circ\text{C}$ . Grafik: Fraunhofer IPK

führt zu einer größeren gesamten Risslänge  $\omega_l$ . Zur Bestimmung der Porosität  $\Phi$  wurden die Schliffe der ausgewählten Proben präpariert und lichtmikroskopisch untersucht. Bild 4 veranschaulicht das Messverfahren für Schliffbilder anhand von zwei ausgewählten Proben. Die Poren und sonstigen Defekte auf den Mikroskopiebildern sind nach der Oberflächenanalyse in roter Farbe gekennzeichnet. Im nächsten Schritt wird die Fläche  $A_{\text{def}}$  der Poren und Defekte von der Materialfläche  $A_{\text{mat}}$  subtrahiert und berechnet. Es konnte festgestellt werden, dass für die Herstellung von Proben mit geringer Porosität  $\Phi$  eine hohe Vorheiztemperatur  $\vartheta_{\text{Sub}}$  sowie eine hohe Laserleistung  $P_L$  erforderlich sind.

Nach der Analyse der Dichte  $\rho$ , Porosität  $\Phi$  und gesamten Risslänge  $\omega_l$  zeigt sich, dass die Optimierung der Parameter entscheidend für die Qualitätsverbesserung der gefertigten Bauteile ist. Die Volumenenergiedichte des Lasers  $E_V$ , eine Schlüsselvariable im PBF-LB/M-Prozess, spielt dabei eine zentrale Rolle. Bild 5 veranschaulicht die Zusammenhänge zwischen der Volumenenergiedichte des Lasers  $E_V$ , der Vorheiztemperatur  $\vartheta_{\text{Sub}}$  und den Qualitätsmerkmalen der Porosität  $\Phi$  sowie der gesamten Risslänge  $\omega_l$ . Der dargestellte Zusammenhang wird im folgenden Abschnitt zusammengefasst.

## 4 Zusammenfassung

Bei einer Vorheiztemperatur der Substratplatte von  $\vartheta_{\text{Sub}} = 500^\circ\text{C}$  ist die gesamte Risslänge  $\omega_l$  tendenziell geringer als bei einer Vorheiztemperatur der Substratplatte  $\vartheta_{\text{Sub}} = 200^\circ\text{C}$  über den gesamten Bereich der Volumenenergiedichte gepulster Laser  $E_{V,\text{pw}}$ . Dies deutet darauf hin, dass höhere Vorwärmtemperaturen der Substratplatte  $\vartheta_{\text{Sub}}$  die Neigung zur Rissbildung  $\omega$  reduzieren können, aufgrund von geringeren Eigenspannungen  $\sigma$  während des Herstellungsprozesses. Die Porosität  $\Phi$  ist bei einer Vorwärmtemperatur der Substratplatte von  $\vartheta_{\text{Sub}} = 500^\circ\text{C}$  tendenziell niedriger im Vergleich zu Proben, die bei einer Vorheiztemperatur der Substratplatte  $\vartheta_{\text{Sub}} = 200^\circ\text{C}$  hergestellt wurden. Dies zeigt, dass eine höhere Vorheiztemperatur der Substratplatte  $\vartheta_{\text{Sub}}$  effektiv dazu beitragen kann, die Porosität  $\Phi$  in den gefertigten Bauteilen zu verringern, was zu einer verbesserten Dichte  $\rho$  führt. Eine hohe Volumenenergiedichte des Lasers  $E_V$  resultiert in einer hohen Dichte  $\rho$  der Proben, was auf eine Verdampfung des Aluminiums rückschließen lässt.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung demonstrieren, dass eine Erhöhung der Vorheiztemperaturen der Substrat-

platte  $\vartheta_{\text{Sub}}$  sowie eine sorgfältige Überwachung der Gesamtvolumenenergiedichte  $E_G$  als wesentliche Faktoren zu betrachten sind, um die Qualität der mittels PBF-LB/M hergestellten Ti-Al Bauteile zu optimieren. Ein weiterer bedeutsamer Aspekt ist die Aluminiumverdampfung  $EV_{\text{Al}}$ , die insbesondere durch hohe Laserleistungen  $P_L$  und eine zu hohe Gesamtvolumenenergiedichte  $E_G$  während des Prozesses hervorgerufen wird. Der Zusammenhang zwischen den Parameterkombinationen und der Aluminiumverdampfung  $EV_{\text{Al}}$  sowie deren Einfluss auf die Materialeigenschaften sollte Gegenstand zukünftiger, vertiefender Untersuchungen sein. Die Aluminiumverdampfung  $EV_{\text{Al}}$  kann sich nachteilig auf die Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften der Legierungen auswirken.

## LITERATUR

- [1] Wohlers Associates: Wohlers report 2023. 3D printing and additive manufacturing global state of the industry. Wohlers Associates, Fort Collins (Colo.), 2023
- [2] Leyens, C.; Peters, M.: Titanium and titanium alloys - Fundamentals and applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2003
- [3] Bartolotta, P.; Barrett, J.; Kelly, T.; Smashey, R.: The use of cast Ti-48Al-2Cr-2Nb in jet engines. JOM; New York Bd. 49, Ausg. 5, (May 1997), S. 48
- [4] Uhlmann, E.; Bergmann, A.; Gridin, W.: Investigation on Additive Manufacturing of Tungsten Carbide-cobalt by Selective Laser Melting. Procedia CIRP 35 (2015), S. 8–15
- [5] Renishaw: RenAM 500Q/T/D/S; Additives Fertigungssystem, Bedienungsanleitung; H-5800-4346-01-C, 2018
- [6] Bergmann, A.: Vorgehensweise zur Auslegung des Laserstrahlschmelzens am Beispiel von Wolframkarbid-Kobalt. Berlin: Fraunhofer Verlag, 2019
- [7] Gokuldoss, P. K.; Kolla, S.; Eckert, J.: Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting-Selection Guidelines. Materials 10 (2017) 6
- [8] Soliman, H. A.; Elbestawi, M.: Titanium aluminides processing by additive manufacturing – a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 119 (2022) 9–10, S. 5.583–5.614
- [9] Ali, H.; Le Ma; Ghadbeigi, H.; Mumtaz, K.: In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of Selective Laser Melted Ti6Al4V. Materials Science and Engineering: A 695 (2017) 695, S. 211–220
- [10] Caprio, L.; Chiari, G.; Demir, A. G.; Previtali: Development of Novel High Temperature Laser Powder Bed Fusion System for the Processing of Crack-Susceptible Alloys. Milano, Italy, 2018
- [11] Escher, C.; Mutke, C.: Additive Manufacturing of Tool Steels. HTM Journal of Heat Treatment and Materials 77 (2022) 2, S. 143–155



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

**Prof. Dr.-Ing. Julian Polte**

**Anzhelika Gordei, M.Sc.**  
anzhelika.gordei@ipk.fraunhofer.de

**Gero Maximilian Esser, M.Sc.**  
gero.maximilian.esser@ipk.fraunhofer.de

**Jaro Fock, M.Sc.**  
jaro.fock@ipk.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK  
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin  
www.ipk.fraunhofer.de

## LIZENZ



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