

Multi-Laser-Belichtungsstrategien beim Laserstrahlschmelzen von Wolframkarbid-Kobalt

Additive Fertigung von Hartmetall

E. Uhlmann, F. Unger

ZUSAMMENFASSUNG Aufgrund stark unterschiedlicher thermophysikalischer Eigenschaften von Wolframkarbid (WC) und Kobalt (Co) ist die additive Fertigung von WC-Co mittels pulverbettbasiertem Laserstrahlschmelzen (PBF-LB/M) besonders anspruchsvoll. Multi-Laser-Belichtungsstrategien erweitern das Verfahren durch zusätzliche, räumlich und zeitlich abgestimmte Energieeinbringung innerhalb einer Schicht. Durch eine Nachbelichtung mit einem zweiten Laser wird die relative Dichte von $\rho_{\text{rel,ref}} = 93,30\%$ auf $\rho_{\text{rel}} = 97,46\%$ erhöht.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Lasertechnik, Werkstoffe

Multi-laser exposure strategies in laser powder bed fusion of tungsten carbide-cobalt – Additive manufacturing of cemented carbides

ABSTRACT Due to different thermophysical properties of tungsten carbide (WC) and cobalt (Co), additive manufacturing of WC-Co by laser powder bed fusion (PBF-LB/M) is particularly challenging. Multi-laser exposure strategies extend the process by adding spatially and temporally coordinated energy input within a single layer. By applying a post-exposure with a second laser, the relative density is increased from $\rho_{\text{rel,ref}} = 93,30\%$ to $\rho_{\text{rel}} = 97,46\%$.

1 Einleitung

Wolframkarbid-Kobalt (WC-Co) zählt zu den marktbeherrschenden Hartmetall-Schneidstoffsystemen und wird gemäß DIN ISO 513 in mehreren Zerspanhauptgruppen eingesetzt. Die maßgeblichen Werkstoffeigenschaften resultieren aus der Kombination der hohen Druckfestigkeit und Härte der Wolframkarbid-Hartphase mit der Zähigkeit der metallischen Kobalt-Bindematrix [1]. Aufgrund dieser Eigenschaftskombination sowie der hohen chemischen Stabilität findet WC-Co breite Anwendung in Schneid- und Umformwerkzeugen, technischen Verschleißteilen sowie in Hochleistungsanwendungen [2].

Komponenten aus WC-Co werden konventionell durch Flüssigphasensintern verdichteter Pulvergrünlinge hergestellt. Dabei lassen sich Bauteile mit nahezu vollständiger Dichte $\rho_{\text{rel,konv}} > 99,9\%$ und einer feinen, homogenen Mikrostruktur fertigen [1]. Die hierfür erforderlichen Presswerkzeuge begrenzen jedoch die Designfreiheit, da komplexe Geometrien nur eingeschränkt realisierbar sind und die werkzeuggebundene Herstellung mit erhöhtem Zeit- und Kostenaufwand einhergeht [3]. Vor dem Hintergrund einer steigenden Nachfrage nach individualisierten Werkzeugen gewinnen additive Fertigungsverfahren, die ohne formgebundene Presswerkzeuge auskommen und zugleich Prozessketten verkürzen, daher zunehmend an Bedeutung [4].

Im Vergleich zu sinterbasierten additiven Verfahren ermöglicht das gemäß DIN EN ISO/ASTM 52911 bezeichnete pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (engl.: Powder bed fusion of metal with laser beam, PBF-LB/M) eine endkonturnahe und bindemittelfreie Herstellung von Bauteilen [5]. Hierbei wird der pulver-

förmige Werkstoff schichtweise aufgetragen und mittels Laserstrahlung selektiv aufgeschmolzen, sodass nach der Erstarrung eine stoffschlüssige Verbindung zur zuvor gefertigten Schicht entsteht [5]. Aus dem schichtweisen Aufbau resultieren erweiterte konstruktive Freiheitsgrade, insbesondere für Werkzeuggeometrien mit integrierten Kühl- und Spülkanälen [6, 7].

Die Prozessführung beim PBF-LB/M ist durch sehr kurze Aufheiz- und Abkühlzyklen geprägt, wodurch hohe Abkühlraten auftreten und thermisch induzierte Eigenspannungen entstehen [3]. Zudem liegt der Schmelzpunkt von Wolframkarbid bei $T_{\text{S,WC}} = 2.870^\circ\text{C}$ und der von Kobalt bei $T_{\text{S,Co}} = 1.495^\circ\text{C}$ [8]. Dadurch werden Defekte wie Poren und Risse begünstigt [9]. Porosität entsteht sowohl durch unzureichende Verschmelzung bei zu geringer als auch durch Kobaltverdampfung bei zu hoher Energieeinbringung [9]. Daraus ergibt sich ein technologisches Prozessfenster, in dem die Kobalt-Bindematrix aufzuschmelzen ist, während die Wolframkarbid-Hartphase möglichst unbeschädigt verbleibt [10].

Zur Reduktion der Defektbildung beim PBF-LB/M von WC-Co werden erhöhte Pulverbettvorwärmtemperaturen, nachgelagerte Wärmenachbehandlungen sowie Wiederbelichtungsstrategien angewendet [11, 12, 13, 14]. Diese Maßnahmen können die Defektausprägung reduzieren, greifen jedoch nur begrenzt in die Prozessdynamik während der Belichtung ein oder erfordern zusätzliche Prozessschritte außerhalb des Fertigungsprozesses [11, 12]. Wiederbelichtungsstrategien mit einem einzelnen Laser verbessern die relative Dichte und können Defekte reduzieren [15, 16]. Aufgrund der zeitlich verzögerten Energieeinbringung sowie geometrie- und scanpfadabhängiger Belichtungsintervalle ist die gezielte Beeinflussung von Temperaturverlauf und

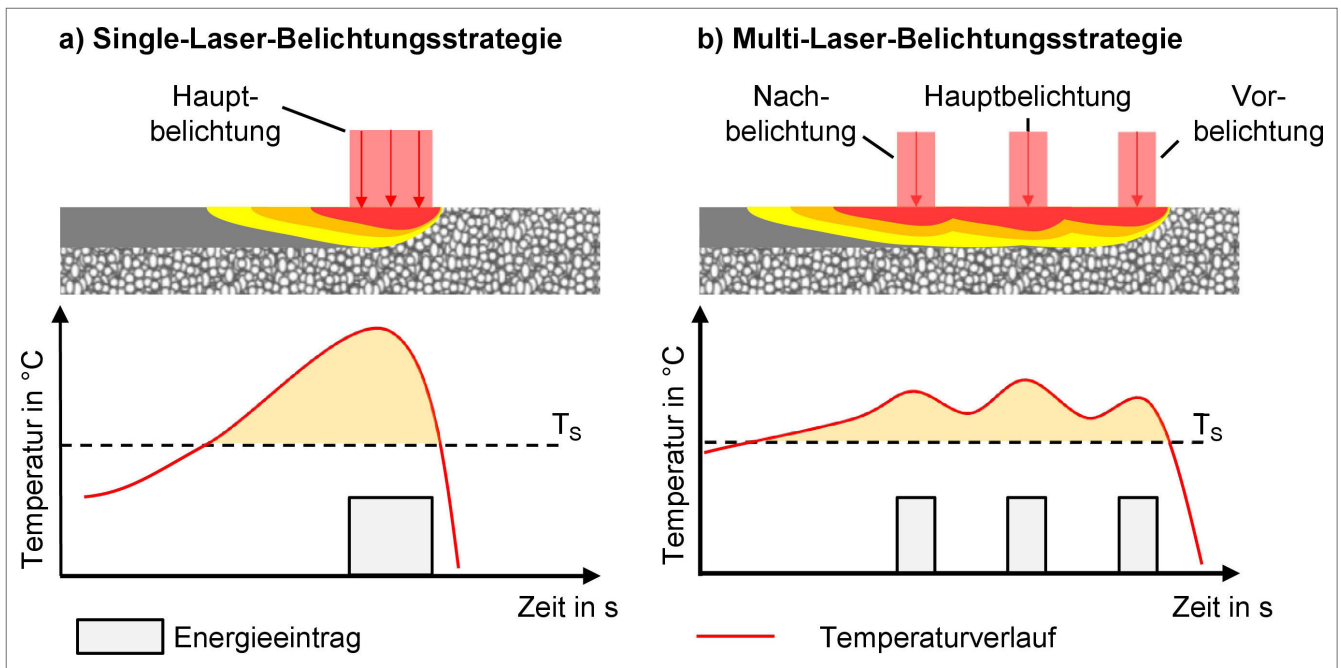


Bild 1 Vergleich der Energieeinbringung im PBF-LB/M; a) Single-Laser-Belichtungsstrategie; b) Multi-Laser-Belichtungsstrategie. Grafik: IWF / TU Berlin

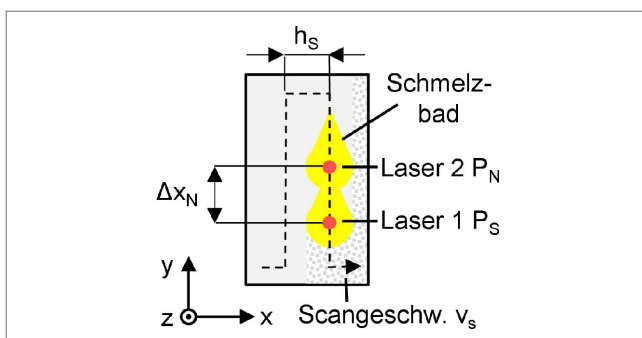


Bild 2 Schematische Darstellung der Nachbelichtungsstrategie und Prozessparameter. Grafik: IWF / TU Berlin

Erstarrungsbedingungen innerhalb einer Schicht jedoch nur eingeschränkt möglich [15, 16].

Multi-Laser-Belichtungsstrategien (MLBS) erweitern das PBF-LB/M-Verfahren durch die simultane Nutzung mehrerer Laserquellen zur zeitlich und räumlich abgestimmten Energieeinbringung [17, 18]. **Bild 1** verdeutlicht, dass sich durch eine verteilte Energieeinbringung innerhalb derselben Schicht gegenüber einer Single-Laser-Belichtung eine homogenere Temperaturführung mit reduzierten lokalen Temperaturgradienten realisieren lässt. Abhängig von der gewählten Strategie kann dies über eine Vorbelichtung zur lokalen Vorerwärmung, eine Hauptbelichtung zur Ausbildung des Schmelzbads sowie eine Nachbelichtung zur gezielten Beeinflussung der Erstarrungsbedingungen innerhalb derselben Schicht erfolgen [17, 18]. Für WC-Co ist der Ansatz von MLBS von besonderer Relevanz, da Poren- und Rissbildung sensibel auf Temperaturgradienten, Erstarrungsverlauf und lokale Abkühlraten reagieren [4].

Dieser Beitrag untersucht den Einfluss einer Nachbelichtung durch einen zweiten Laser auf die relative Dichte ρ_{rel} , die Porosität Φ und die Rissbildung beim PBF-LB/M von WC-Co. Hierzu werden die Nachbelichtungsleistung P_N und der Laserabstand Δx_N systematisch variiert und den Ergebnissen einer Single-Laser-

Referenz ohne Nachbelichtung mit $P_N = 0$ W gegenübergestellt. Die Bewertung erfolgt über die Bestimmung der relativen Dichte ρ_{rel} nach dem Archimedes-Prinzip sowie über metallographische Analysen zur Quantifizierung der Porosität Φ und zur Bewertung der Rissausprägung über den Rissflächenanteil α_R .

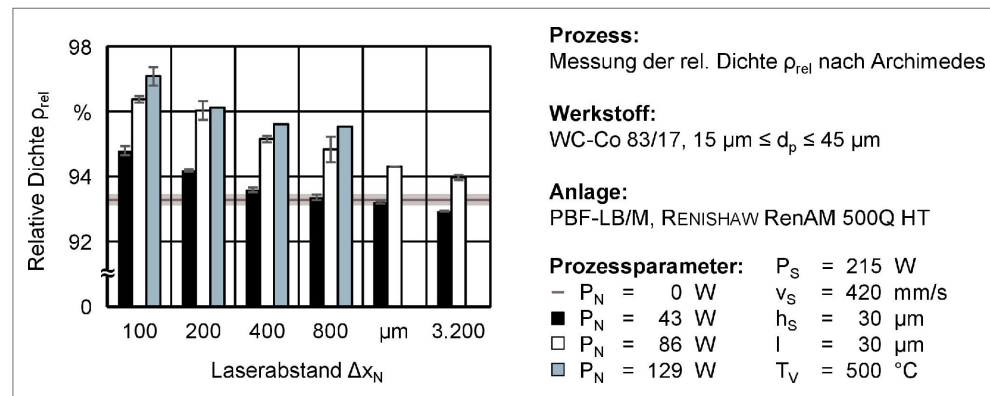
2 Versuchsbedingungen und Messmethoden

Die technologischen Untersuchungen wurden auf einer Fertigungsanlage des Typs „RenAM 500Q HT“ der Firma Renishaw GmbH, Pliezhausen, mit vier unabhängig steuerbaren 500-W-Faserlasern durchgeführt. Als Versuchswerkstoff wurde die WC-Co-Pulvermischung mit der Bezeichnung WOKA 3202 des Herstellers Oerlikon Metco GmbH, Raunheim, mit einer Partikelgröße von $15 \mu\text{m} \leq d_p \leq 45 \mu\text{m}$ verwendet. Die Zusammensetzung entspricht einem prozentualen Gewichtsanteil von WC mit $G_{WC} = 83$ wt. % und Co mit $G_{Co} = 17$ wt. % (WC-Co 83/17).

Die untersuchte Nachbelichtungsstrategie sowie die dabei variierten Prozessparameter sind in **Bild 2** schematisch dargestellt. Die Hauptbelichtung erfolgte mit einer Laserleistung von $P_S = 215$ W, einer Scangeschwindigkeit von $v_s = 420$ mm/s und einem Spurabstand von $h_s = 30 \mu\text{m}$ [19]. Die Schichtdicke wurde auf $l = 30 \mu\text{m}$ festgelegt und die Pulverbettvorwärmung auf $T_V = 500$ °C eingestellt, da sich erhöhte Vorwärmtemperaturen als wirksame Strategie zur Erhöhung der Bauteildichte beim PBF-LB/M von Hartmetallen erwiesen haben [11, 19]. Die genannten Prozessparameter wurden für alle Versuche konstant gehalten, während die Nachbelichtungsleistung P_N und der Laserabstand Δx_N variiert wurden.

Die Nachbelichtung wurde als vollfaktorieller Versuchsplan mit drei Laserleistungsstufen relativ zur Hauptbelichtung im Bereich $0,2 \cdot P_S = 43 \text{ W} \leq P_N \leq 129 \text{ W} = 0,6 \cdot P_S$ sowie mit sechs Stufen des Laserabstands im Bereich $100 \mu\text{m} \leq \Delta x_N \leq 3.200 \mu\text{m}$ durchgeführt. Als Referenz diente eine Single-Laser-Belichtung

Bild 3 Relative Dichte ρ_{rel} nach Archimedes-Prinzip von WC-Co gefertigt durch PBF-LB/M in Abhängigkeit der Nachbelichtungsleistung P_N und Laserabstand Δx_N .
Grafik: IWF/TU Berlin



ohne Nachbelichtung mit $P_N = 0 \text{ W}$. Zur statistischen Absicherung wurden je Parameterkombination drei Proben gefertigt und durch drei Referenzproben ergänzt, sodass insgesamt 57 Proben zur Auswertung vorlagen.

Zur Bewertung der Materialeigenschaften wurde die relative Dichte ρ_{rel} der quaderförmigen Proben mit einer Kantenlänge von $L_Q = 10 \text{ mm}$ nach dem Archimedes-Prinzip gemäß DIN EN ISO 3369 bestimmt. Die Proben wurden in z-Richtung aufgebaut. Ausgewählte Parameterkombinationen wurden parallel zur Aufbaurichtung aufgetrennt, geschliffen und poliert. Die Porosität Φ wurde mit einem Digitalmikroskop über digitale Bildverarbeitung erfasst und auf repräsentativen Schliffbereichen über mehrere Bildausschnitte ausgewertet. Ergänzend wurde der Rissflächenanteil α_R ebenfalls mittels digitaler Bildverarbeitung als Verhältnis der Rissfläche zur ausgewerteten Querschnittsfläche bestimmt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur relativen Dichte ρ_{rel} , zur lokalen Porosität Φ sowie zum Rissflächenanteil α_R dargestellt und im Hinblick auf den Einfluss von Nachbelichtungsleistung P_N und Laserabstand Δx_N diskutiert.

3.1 Relative Dichte ρ_{rel}

Die Single-Laser-Referenz ohne Nachbelichtung bei $P_N = 0 \text{ W}$ erreichte gemäß **Bild 3** eine relative Dichte von $\rho_{\text{rel,ref}} = 93,30 \%$. Bei kleinen Laserabständen Δx_N und hoher Nachbelichtungsleistung P_N ergab sich eine deutliche Steigerung der relativen Dichte ρ_{rel} . Das Maximum von $\rho_{\text{rel}} = 97,46 \%$ wurde bei Laserabstand $\Delta x_N = 100 \mu\text{m}$ und Nachbelichtungsleistung $P_N = 129 \text{ W}$ erzielt und entspricht einer Steigerung um $\Delta\rho_{\text{rel}} = 4,16 \%$ gegenüber der Single-Laser-Referenz. Mit zunehmendem Laserabstand Δx_N und abnehmender Nachbelichtungsleistung P_N verringerte sich die relative Dichte ρ_{rel} . Kombinationen aus großen Laserabständen Δx_N und hoher Nachbelichtungsleistung P_N führten zu ausgeprägter Rissausprägung und Prozessinstabilitäten, sodass Proben im Bereich $1.600 \mu\text{m} \leq \Delta x_N \leq 3.200 \mu\text{m}$ bei Nachbelichtungsleistung $P_N = 129 \text{ W}$ sowie $P_N = 86 \text{ W}$ nicht prozessstabil gefertigt werden konnten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei rissbehafteten Proben oberflächenoffene Defekte die Archimedes-Bestimmung beeinflussen können, sodass Messwerte in diesen Bereichen nur eingeschränkt vergleichbar sind.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass kleine Laserabstände Δx_N in Kombination mit hoher Nachbelichtungsleistung P_N

die Verdichtung begünstigen, während hohe Nachbelichtungsleistungen P_N bei großen Laserabständen Δx_N rissdominierte Defektzustände fördern. Dies ist auf den zeitlichen Abstand zwischen Haupt- und Nachbelichtung zurückzuführen, der durch den Laserabstand Δx_N bestimmt wird. Bei kleinen Laserabständen Δx_N erfolgt die Nachbelichtung kurz nach der Hauptbelichtung, sodass ein vollständigeres Aufschmelzen der Bindematrix und eine homogenere Durchmischung im Schmelzbad unterstützt werden sowie Restporosität reduziert wird. Bei großen Laserabständen Δx_N erfolgt der zusätzliche Energieeintrag nach weiter fortgeschrittener Abkühlung, wodurch lokale Temperaturgradienten und thermisch induzierte Spannungen auftreten können sowie rissdominierte Defektzustände begünstigt werden.

3.2 Porosität Φ

Für ausgewählte Parameterkombinationen über den gesamten untersuchten Parameterbereich wurden metallographische Schliffbilder angefertigt und hinsichtlich Mikrostruktur und Porosität Φ ausgewertet. Die Ergebnisse der Porositätsauswertung sind in **Bild 4** dargestellt. Es zeigt sich, dass hohe Nachbelichtungsleistungen P_N in Kombination mit kleinen Laserabständen Δx_N mit einer geringeren lokalen Porosität Φ einhergehen. Im Bereich des Laserabstands von $100 \mu\text{m} \leq \Delta x_N \leq 400 \mu\text{m}$ und bei einer Nachbelichtungsleistung $P_N = 129 \text{ W}$ wurde die geringste Porosität mit $1,6 \% \leq \Phi \leq 1,9 \%$ gemessen. Mit sinkender Nachbelichtungsleistung P_N oder zunehmendem Laserabstand Δx_N steigt die Porosität bis $7,7 \% \leq \Phi \leq 8,7 \%$ an und liegt damit teilweise oberhalb der Single-Laser-Referenz mit $\Phi_{\text{ref}} = 6,9 \%$.

Die Schliffbilder deuten im Parameterbereich kleiner Laserabstände Δx_N und hoher Nachbelichtungsleistung P_N zusätzlich auf eine feinere Gefügeausbildung mit kleineren WC-Körnern und einer reduzierten Porenanzahl im Übergang zur Kobalt-Bindematrix hin. Die erhöhten Porositäten Φ bei geringer Nachbelichtungsleistung P_N und großen Laserabständen Δx_N weisen darauf hin, dass der zusätzliche Energieeintrag in diesem Parameterbereich die Porenschließung nur begrenzt unterstützt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Porosität Φ aus der metallographischen Auswertung eine lokale Kenngröße darstellt, während die relative Dichte ρ_{rel} eine globale Bewertung liefert. Insbesondere bei gleichzeitigem Auftreten von Poren und Rissen kann die Korrelation zwischen relativer Dichte ρ_{rel} und Porosität Φ eingeschränkt sein, da Defektarten und deren räumliche Verteilung in beiden Methoden unterschiedlich erfasst werden.

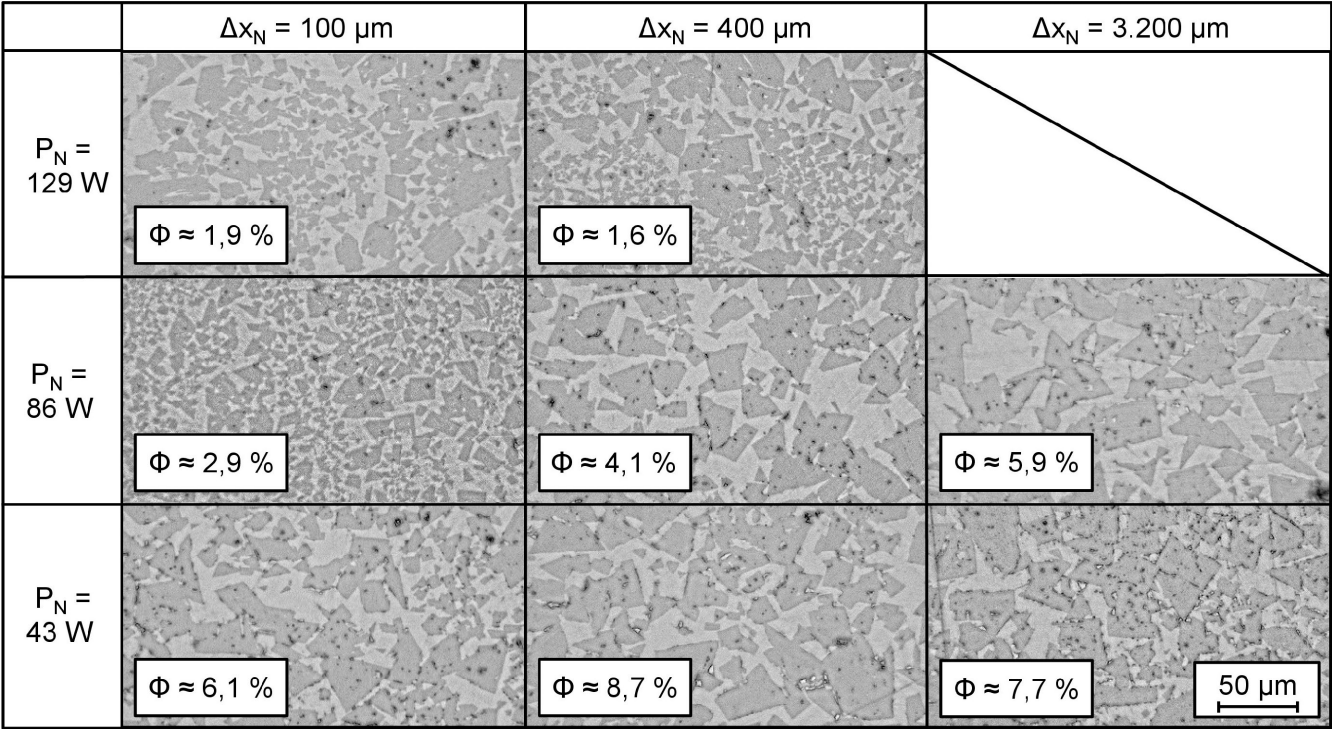


Bild 4 Mikrostruktur und Porosität Φ von WC-Co gefertigt durch PBF-LB/M mit MLBS in Abhängigkeit der Nachbelichtungsleistung P_N und Laserabstand Δx_N . Grafik: IWF / TU Berlin

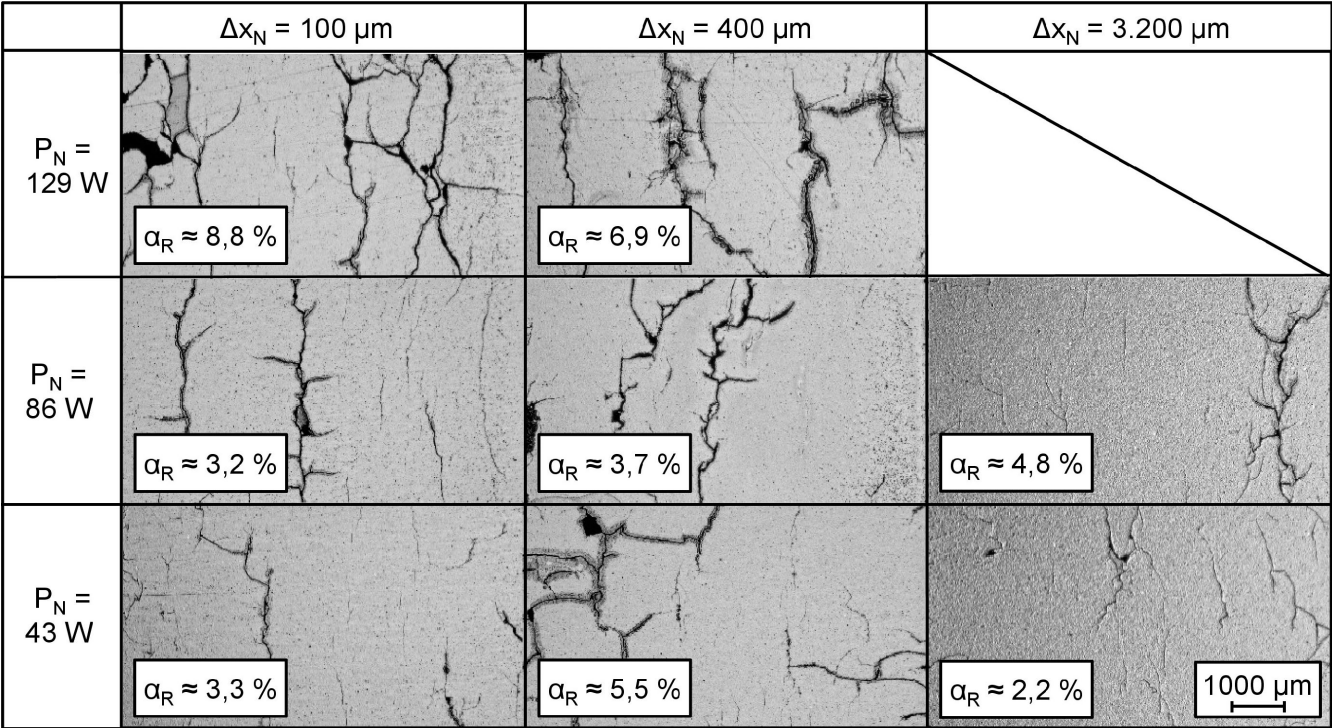


Bild 5 Querschliffe mit Rissflächenanteil α_R von WC-Co gefertigt durch PBF-LB/M in Abhängigkeit der Nachbelichtungsleistung P_N und Laserabstand Δx_N . Grafik: IWF / TU Berlin

3.3 Rissflächenanteil α_R

Die in **Bild 5** dargestellten Querschliffe verdeutlichen den Zusammenhang zwischen Laserabstand Δx_N , Nachbelichtungs-

leistung P_N und dem Rissflächenanteil α_R . Bei kleinen Laserabständen $100\ \mu\text{m} \leq \Delta x_N \leq 400\ \mu\text{m}$ nimmt der Rissflächenanteil α_R mit steigender Nachbelichtungsleistung P_N deutlich zu. Insbesondere bei der Nachbelichtungsleistung $P_N = 129\ \text{W}$ und Laser-

abstand $\Delta x_N = 100 \mu\text{m}$ sind ausgeprägte, teilweise vernetzte Rissstrukturen bei einem Rissflächenanteil von $\alpha_R = 8,8 \%$ erkennbar. Bei geringer Nachbelichtungsleistung $P_N = 43 \text{ W}$ und großem Laserabstand $\Delta x_N = 3.200 \mu\text{m}$ ist der Rissflächenanteil auf $\alpha_R = 2,2 \%$ reduziert, während Parameterkombinationen aus hoher Nachbelichtungsleistung P_N und großem Laserabstand Δx_N nicht prozessstabil gefertigt werden konnten. Proben bei großem Laserabstand Δx_N und geringer Nachbelichtungsleistung P_N können hinsichtlich Mikrostruktur und Defektzustand als Annäherung an den Referenzzustand eingeordnet werden.

Die Querschliffe zeigen, dass zusätzliche Energieeinträge zwar die Porositätsreduktion unterstützen, bei hohen Nachbelichtungsleistungen P_N jedoch zugleich die Rissbildung begünstigen und die Prozessstabilität begrenzen. Dies weist darauf hin, dass der zugrunde liegende Single-Laser-Parametersatz bereits hohe Energieeinträge aufweist und ein zusätzlicher Energieeintrag nur in einem engen Parameterbereich vorteilhaft wirkt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss einer Nachbelichtung durch einen zweiten Laser auf die relative Dichte ρ_{rel} , die Porosität Φ und den Rissflächenanteil α_R beim pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzen von WC-Co zu untersuchen. Hierzu wurden die Nachbelichtungsleistung P_N und der Laserabstand Δx_N variiert und mit einer Single-Laser-Referenz ohne Nachbelichtung mit $P_N = 0 \text{ W}$ verglichen.

Gegenüber der Single-Laser-Referenz mit einer relativen Dichte von $\rho_{\text{rel,ref}} = 93,30 \%$ wurde bei kleinen Laserabständen Δx_N und hoher Nachbelichtungsleistung P_N eine maximale relative Dichte von $\rho_{\text{rel}} = 97,46 \%$ erreicht, entsprechend einer Steigerung um $\Delta\rho_{\text{rel}} = 4,16 \%$. Die metallographische Auswertung zeigt im selben Parameterbereich die geringsten lokalen Porositäten mit $1,6 \% \leq \Phi \leq 1,9 \%$. Bei geringer Nachbelichtungsleistung P_N und großen Laserabständen Δx_N wurden erhöhte Porositäten Φ beobachtet, die teilweise oberhalb der Single-Laser-Referenz mit $\rho_{\text{rel}} = 6,9 \%$ liegen.

Die Querschliffe verdeutlichen, dass zusätzliche Energieeinträge durch die Nachbelichtung zwar die Verdichtung und Porositätsreduktion unterstützen können, bei hohen Nachbelichtungsleistungen P_N jedoch zugleich rissdominierte Defektzustände begünstigen und die Prozessstabilität begrenzen. Unter hoher Nachbelichtungsleistung P_N wurde ein maximaler Rissflächenanteil von $\alpha_R = 8,8 \%$ bestimmt. Damit ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen Porositätsreduktion und rissbedingter Prozessinstabilität.

In weiterführenden Untersuchungen wird die Hauptbelichtungsleistung P_S reduziert, um die Gesamtenergieeinbringung abzusenken und den zusätzlichen Energieeintrag der Nachbelichtung prozessstabil ohne die Entstehung von Rissen zu erlauben. Ergänzend wird eine Vorbelichtung mittels drittem Laser untersucht, um Temperaturverlauf und Erstarrungsbedingungen innerhalb einer Schicht gezielt zu steuern.

Literatur

- [1] Bose, A.; et al.: Sinter-based additive manufacturing of hardmetals: Review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 119 (2024), 106493. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2023.106493
- [2] Uhlmann, E.; Bergmann, A.; Bolz, R.: Manufacturing of carbide tools by Selective Laser Melting. *Procedia Manufacturing* 21 (2018), S. 765–773. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.182
- [3] Toyserkani, E.; Sarker, D.; Ibadode, O. O.; Liravi, F.; Russo, P.; Taherkhani, K.: *Metal Additive Manufacturing*. New York: Wiley, 2022
- [4] Bergmann, A.: Vorgehensweise zur Auslegung des Laserstrahlschmelzens am Beispiel von Wolframkarbid-Kobalt. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Hrsg.: Uhlmann, E. Dissertation, Technische Universität Berlin. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2018
- [5] Gebhardt, A.: *Generative Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. 4. Auflage. München: Hanser Verlag, 2016
- [6] Uhlmann, E.; Polte, J.; Bolz, R.; Yabroudi, S.; Streckenbach, J.; Bergmann, A.: Application of additive manufactured tungsten carbide-cobalt electrodes with interior flushing channels in S-EDM. *Procedia CIRP* 95 (2020), S. 460 - 465. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.136
- [7] Seyfarth, M.; Vogelpoth, A.; Kaletsch, A.; Broeckmann, C.: Laser powder bed fusion of WC-Co form turning tools with integrated cooling features: Design, printing, and test machining of Ti6Al4V. *CIRP Annals* 73 (2024) 1, S. 187 - 190. DOI: 10.1016/j.cirp.2024.04.053.
- [8] Taylor, R. E. (Hrsg.): *CINDAS Data Series on Materials Properties - Thermal Expansion of Solids*, Vol. 1 - 4. Materials Park, OH: ASM International, 1998
- [9] Schwaneckamp, T.; Marginean, G.; Reuber, M.; Ostendorf, A.: Impact of cobalt content and grain growth inhibitors in laser-based powder bed fusion of WC-Co. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 105 (2022), 105814. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.105814
- [10] Uhlmann, E.; Bergmann, A.; Gridin, V.: Investigation on additive manufacturing of tungsten carbide-cobalt by SLM. *Procedia CIRP* 35 (2015), S. 8 - 15. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.060
- [11] Schwaneckamp, T.: Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen von Hartmetallen zur additiven Herstellung von Zerspanwerkzeugen. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2021. DOI: 10.13154/294-7802.
- [12] Papy, K.; Favre, J.; Sova, A.; et al.: Manufacturing of WC-17Co 3D-objects by Laser Powder Bed Fusion followed by heat-treatment. *Matériaux & Techniques* 111 (2023), 304. DOI: 10.1051/mattech/2023016
- [13] Xing, M.; Wang, H.; Zhao, Z.; Zhang, Z.; Li, P.; Zhang, H.; Guo, Z.: Additive manufacturing of cemented carbides inserts with high mechanical performance. *Materials Science and Engineering A* 861 (2022), 144350. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144350
- [14] Uhlmann, E.; Polte, J.; Cheres, J. D.; Kochan, J.; Alum, A. S.: Parameter Optimization of Additive Manufacturing Process LPBF Using an Evolution Strategy Algorithm Applied on the Material Tungsten Carbide Cobalt WC-Co 83/17. In: *Advances in Material Science Research*, Volume 64. New York: Nova Science Publishers, 2023, S. 245–255
- [15] Fortunato, A.; Lulaj, A.; Karpuschewski, B.: Additive manufacturing of WC-Co cutting tools for gear production. *Production Engineering* 13 (2019) 2, S. 145-154. DOI: 10.1007/s40516-019-00092-0
- [16] Liu, Y.; Liu, Z.; Yin, J.; et al.: Effect of laser remelting strategy on the forming ability of cemented carbide fabricated by laser powder bed fusion (LPBF). *Materials* 15 (2022) 7, 2380. DOI: 10.3390/ma15072380
- [17] Heeling, T.; Wegener, K.: The effect of multi-beam strategies on selective laser melting of stainless steel 316L. *Additive Manufacturing* 22 (2018), S. 334 - 342. DOI: 10.1016/j.addma.2018.05.026
- [18] Keller, N.; et al.: Influence of a rescanning strategy with different laser powers on the microstructure and mechanical properties of Hastelloy X elaborated by powder bed fusion. *Materials Science and Engineering A* 799 (2021), 140474. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140474
- [19] Uhlmann, E.; Polte, M.; Hörl, R.; Reimann, R.; Braun, T.; Hocke, T.: Increasing the Relative Density of Additively Manufactured Tungsten Carbide-Cobalt Tool Electrodes for EDM. In: *Proceedings of the 38th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering (ASPE)*, 2023, S. 310–313. DOI: 10.13140/RG.2.2.15617.63845

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

Felix Unger, M.Sc.

f.unger@tu-berlin.de

Technische Universität Berlin
Institut für Werkzeugmaschinen
und Fabrikbetrieb (IWF)
Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin
www.iwf.tu-berlin.de

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

Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

LIZENZ



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