

Steigerung der Wirtschaftlichkeit bei der additiven Fertigung

Ein Konzept zur Entwicklung eines wirtschaftlicheren PBF-LB

M. M. Müller, S. Ghansiyal, M. Huber, B. Kirsch, M. Glatt, J. C. Aurich

Die Integration des pulverbettbasierten Schmelzens mittels Laserstrahl (PBF-LB) in industrielle Prozessketten wird aktuell durch verschiedene Herausforderungen gehemmt. Hierzu zählen vor allem niedrige Aufbauraten sowie hohe Energie- und Ausschusskosten. Daher soll mit einer geeigneten thermischen Prozessüberwachung, einer multikriteriellen Optimierung des Prozesses sowie der Technologie des variablen Laserspotdurchmessers ein wirtschaftlicherer PBF-LB-Prozess realisiert werden.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Energieeffizienz, Künstliche Intelligenz (KI)

Approach for a more economical PBF-LB – Increasing the economic efficiency of additive manufacturing

Currently, a number of challenges restrict the implementation of laser-based powder bed fusion (PBF-LB) in existing manufacturing processes. These challenges mainly include low build-up rates and high energy and scrap costs. Therefore, a more economical PBF-LB process has to be put into practice by means of suitable thermal process monitoring, multi-criteria process optimization, as well as variable laser spot diameter technology.

1 Einleitung

Unter additiver Fertigung werden alle Fertigungsprozesse zusammengefasst, bei denen Bauteile durch das schichtweise Verbinden von Material aus 3D-Modelldateien aufgebaut werden [1]. Der schichtweise Materialauftrag erlaubt die Herstellung formkomplexer Bauteile [2]. In Verbindung mit der resultierenden Designfreiheit können so Leichtbaustrategien umgesetzt werden [3]. Zudem zeichnet sich die additive Fertigung durch die Möglichkeit der Funktionsintegration [4] sowie der Realisierbarkeit robusterer Lieferketten [5] aus. Die robusteren Lieferketten können durch eine lokale Fertigung von Funktionsbauteilen in kleinen Stückzahlen ermöglicht werden. Weiterhin werden keine bauteilspezifischen Werkzeuge oder Vorrichtungen benötigt [6].

Gängige Verfahren für metallische Werkstoffe sind neben dem PBF-LB etwa das pulverbettbasierte Schmelzen mittels Elektronenstrahl (PBF-EB) und das Laserauftragschweißen (DED-LB). Bei der Herstellung von Metallbauteilen besitzen diese additiven Fertigungsverfahren den höchsten technologischen Reifegrad [7]. Die höchste industrielle Verbreitung weist das PBF-LB auf [8].

Eingesetzt wird das PBF-LB beispielsweise in den Branchen Medizin, Fahrzeugtechnik sowie der Luft- und Raumfahrt [9]. Trotz des hohen Reifegrades des Verfahrens bestehen Herausforderungen, die die weitere Verbreitung und Nutzung der Technologie im industriellen Umfeld behindern. Hierzu zählen niedrige Aufbauraten [10] sowie der im Vergleich zu konventionellen Verfahren um eine bis zwei Größenordnungen höhere spezifische Energieaufwand [11]. Außerdem können in der additiven Fertigung durch Prozessinstabilitäten oder durch eine inadäquate

Wahl der Prozessparameter Defekte wie Poren oder Bauteilverzug entstehen. Diese Defekte verringern die Bauteilqualität und führen je nach Qualitätsanforderungen zu Ausschuss [12]. Um stabile Prozesse sicherzustellen, möglichst defektfreie Bauteile zu fertigen und somit den Ausschuss zu reduzieren, kommt der Entwicklung einer geeigneten In-situ-Prozessüberwachung eine entscheidende Bedeutung zu [13].

Dieser Beitrag stellt ein Konzept vor, das die aufgeführten Herausforderungen adressiert. Auf Basis dieses Konzeptes soll ein PBF-LB entwickelt werden, das sich zur wirtschaftlichen Herstellung kleiner Stückzahlen im industriellen Umfeld eignet.

2 Stand der Technik

2.1 Verfahren

Beim PBF-LB werden Werkstücke auf Basis eines pulverförmigen Ausgangswerkstoffes hergestellt. Hierzu wird zunächst durch den Beschichtungsmechanismus eine Pulverschicht mit der gewählten Schichtdicke aufgetragen. Der durch die Lasereinheit erzeugte Laserstrahl wird über einen Ablenkspiegel auf die Bauplattform projiziert und die Pulverpartikel werden selektiv aufgeschmolzen. Nach der Fertigstellung einer Schicht wird der Hubtisch um eine Schichtdicke abgesenkt, eine neue Pulverschicht aufgetragen und die Pulverpartikel werden analog aufgeschmolzen. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die vollständige Bauteilgeometrie erzeugt wurde. Das übrig gebliebene Pulver kann im Anschluss an den Herstellungsprozess unter der Bedingung einer noch ausreichenden Qualität aufbereitet und in einem Folgeprozess wiederverwendet werden [14].

2.2 Ansätze zur Steigerung der Produktivität

Aufgrund niedriger Aufbauraten und damit einhergehender hoher Bauteilkosten ist das PBF-LB bisher nur für die Produktion von Einzelstücken oder Kleinserien wirtschaftlich [10]. In Studien wurde zur Erweiterung des Einsatzbereichs bereits der Ansatz einer Vergrößerung der Schichtdicke untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass zwar die Aufbaurate erhöht werden kann, dies aber mit Einbußen bei den Materialeigenschaften einhergeht. Bei einer Steigerung der Schichtdicke von 60 μm auf bis zu 150 μm reduzierte sich die Mikrohärtigkeit um etwa 10 %. Außerdem verringerte sich ab einer Schichtdicke von 80 μm zunehmend die Zugfestigkeit sowie die 0,2 %-Dehngrenze. Bei der größten Schichtdicke von 150 μm ist die Zugfestigkeit um etwa 10 % sowie die 0,2 %-Dehngrenze etwa 20 % niedriger als bei einer Schichtdicke von 80 μm [15].

Über diesen Ansatz hinaus besteht die Möglichkeit, die Produktivität durch die Verwendung von Multi-Laser-Systemen zu steigern [16]. Dieser Ansatz hat den Nachteil, dass die Anlagenkosten signifikant steigen können [17]. Auch erfordert die Verwendung mehrerer Laserstrahlquellen eine Justierung und exakte Kalibrierung, um sowohl räumliche als auch zeitliche Abweichungen zu minimieren [18]. Diese Aspekte stehen im Zielkonflikt mit einer wirtschaftlichen Fertigung kleiner Stückzahlen.

Bei Erhöhung der Scangeschwindigkeit zur Steigerung der Aufbaurate steigt die Porosität im Falle einer zu niedrigen Laserleistung an. Somit erfordert die Erhöhung der Scangeschwindigkeit eine Erhöhung der Laserleistung [19]. Bei konstanten Laserspotdurchmessern ist eine Steigerung der Laserleistung jedoch nur begrenzt möglich. Der Grund liegt in der hohen Intensität von Lasern mit Gaußschem Laserstrahlprofil im Zentrum des Laserstrahls. Eine zu starke Erhöhung der Laserleistung bei konstantem Laserspotdurchmesser kann zu hohen Intensitäten hervorrufen, welche in der Folge Prozessinstabilitäten verursachen [20] und durch einen zu hohen Wärmeeintrag die Dichte der Bauteile reduzieren [21]. Auch steigt infolgedessen die Verdampfungsrate, wodurch es zu einem vermehrten Auftreten von Spritzern kommt [22]. Vor allem bei Werkstoffen mit niedriger Wärmeleitfähigkeit, wie Titanlegierungen [23], kann die Aufbaurate somit nur begrenzt erweitert werden [20, 24]. Eine Möglichkeit zur Vermeidung von Prozessinstabilitäten, die durch eine Erhöhung der Laserleistung verursacht werden, besteht darin, den Laserspotdurchmesser zu vergrößern [20, 22]. Dies bewirkt eine Verringerung der Intensität des Laserstrahls und führt zu einer Vergrößerung des belichteten Bereiches und somit zu einer Steigerung der Produktivität [17].

Im Gegensatz dazu ermöglichen kleinere Laserspotdurchmesser feinere Strukturdetails, schärfere Kanten sowie eine höhere Oberflächenqualität. Da herkömmliche Anlagen über konstante Laserspotdurchmesser verfügen, führte dies bisher zu einem Zielkonflikt zwischen Produktivität und Qualität. Aktuelle Anlageninnovationen erlauben es, den Laserspotdurchmesser im Prozess zu variieren und somit eine flexible und bedarfsgerechte Prozessgestaltung zu erreichen. So bietet die Technologie des variablen Laserspotdurchmessers unter Berücksichtigung von Bauteilqualität, Bauteileigenschaften und Energieeffizienz einen vielversprechenden Ansatz, um die Wirtschaftlichkeit des PBF-LB zu steigern. Zudem ermöglicht dies eine systematische Untersuchung der Einflüsse des Laserspotdurchmessers auf den Prozess sowie auf die resultierende Bauteilqualität an einer einzigen Anlage.

2.3 Prozessüberwachung

Durch zu hohe oder zu niedrige Temperaturen während des PBF-LB-Prozesses können unerwünschte Effekte wie mangelnde Schichtanbindung, Poren- und Rissbildung sowie thermomechanischer Verzug durch lokale und globale Temperaturgradienten auftreten [10]. Diese negativen Effekte beeinflussen die Bauteileigenschaften und verhindern eine anschließende Nutzung des Bauteils insbesondere in kritischen Anwendungsbereichen wie der Luft- und Raumfahrt. Aufgrund der dynamischen Beanspruchung sind in diesem Bereich die Ermüdungseigenschaften von großer Bedeutung [25, 26]. Da der Einfluss der Porosität auf die Ermüdungseigenschaften neben der Porendichte auch von der Porengröße und -form sowie der Lage der Poren abhängig ist [27], können Bauteile mit einer hohen relativen Dichte, die im Zuge additiver Prozesse hergestellt werden, dennoch über unzureichende Ermüdungseigenschaften verfügen.

Um die Barriere der fehlenden Qualitätssicherung im Bereich additiver Fertigungsverfahren zu überwinden, kann eine In-situ-Prozessüberwachung durch optische Tomografie genutzt werden, um die weitere Verbreitung des Verfahrens in Bereichen hoher Qualitätsanforderungen voranzutreiben [28]. Durch eine möglichst frühe Erkennung von Fehlern im Bauprozess durch ein In-situ-Prozessüberwachungssystem kann der Prozess in einem frühen Stadium gestoppt oder angepasst werden. Dies ermöglicht eine Reduktion des Ausschusses.

3 Konzept zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit des PBF-LB

Aufgrund der zuvor erläuterten Nachteile des PBF-LB bei Aufbauraten, Ausschusskosten sowie Energieaufwand wurde ein Forschungskonzept entwickelt, durch das die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens verbessert werden kann. Auf Basis der drei Faktoren Prozessparameter, Prozessüberwachung und Energieeffizienz soll ein wirtschaftlicheres PBF-LB entwickelt werden, das sich für die wirtschaftliche Integration des Verfahrens in industrielle Prozessketten eignet. Eine Übersicht des Konzeptes ist im Bild dargestellt.

3.1 Parameterstudie mit variablem Laserspotdurchmesser

Die Prozessparameter beeinflussen beim PBF-LB maßgeblich die Qualität der gefertigten Komponenten. Die Verwendung unvorteilhafter Prozessparameterkombinationen kann zur Entstehung von Porosität führen und somit die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen. Auch können Prozessinstabilitäten hervorgerufen werden, die durch einen zu hohen Wärmeeintrag zur Entstehung von Bauteilverzug führen. Das Auftreten von Verzug kann während des Beschichtungsvorganges zu einem Kontakt zwischen Bauteil und Beschichter führen. Dies kann in einem mangelhaften Pulverauftrag resultieren und somit die Bauteilqualität negativ beeinflussen. Ist der Verzug zu groß, kann dies zum Abbruch des Bauprozesses führen. Die Entstehung von Spritzern aus dem Schmelzbad durch einen zu hohen Energieeintrag wirkt sich ebenfalls auf die Bauteilqualität aus und muss bei der Beurteilung der Prozessstabilität berücksichtigt werden.

Anhand der relativen Dichte und Prozessstabilität müssen zur Prozessentwicklung zunächst geeignete Prozessfenster für ver-

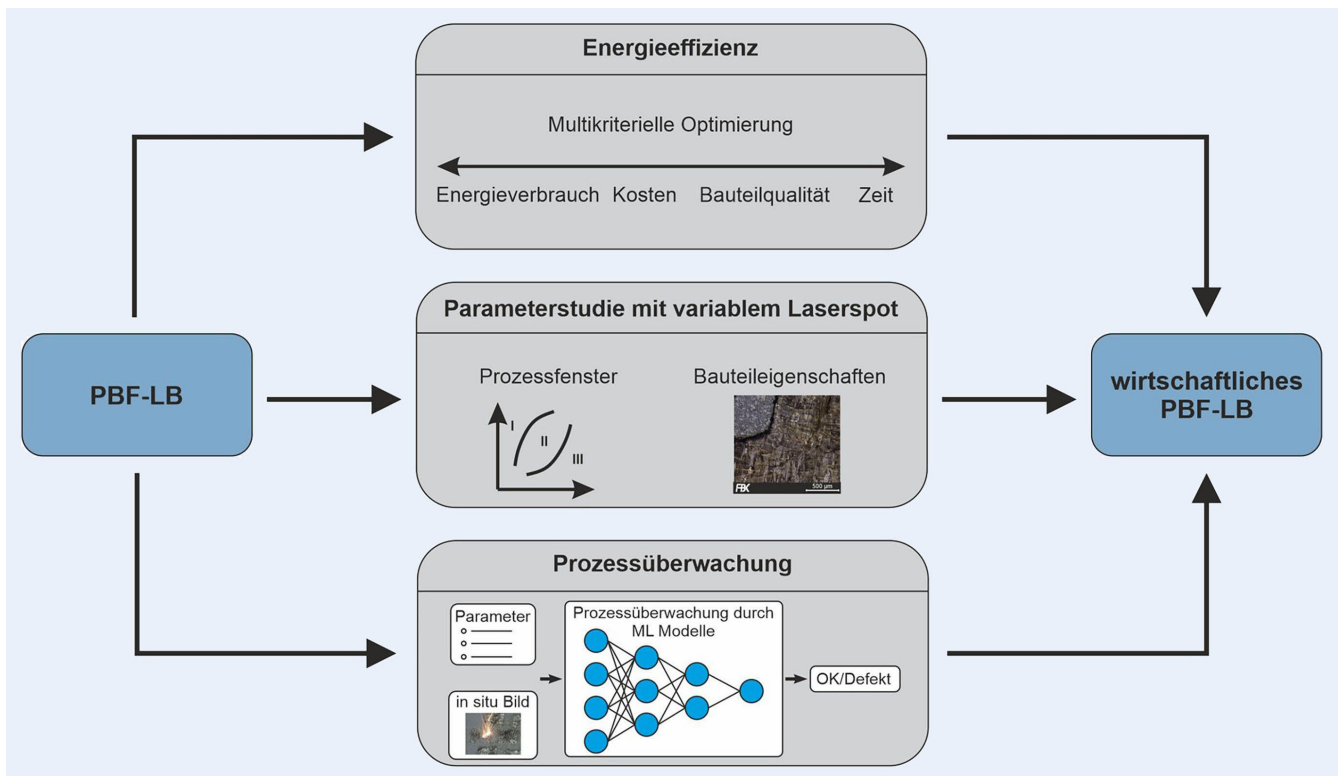


Bild. Forschungskonzept zur Entwicklung eines wirtschaftlicheren PBF-LB Prozesses. Grafik: FBK

schiedene Laserspotdurchmesser ermittelt werden. Neben Laserleistung und Scangeschwindigkeit ist hier insbesondere der Spurb Abstand von Bedeutung. Dieser muss in Abhängigkeit der resultierenden Schmelzbäder angepasst werden, da bei einer zu großen Überlappung Verdampfungseffekte und Überhitzung auftreten können. Ist der Abstand für die gewählten Prozessparameter zu niedrig, werden Bereiche des Pulverbettes nicht aufgeschmolzen. Die Festlegung der Prozessfenster auf Basis der zuvor erläuterten Kriterien und Parametervariationen erfolgt anhand einer geforderten relativen Dichte von mindestens 99 %.

Im nächsten Schritt ist es notwendig, die Einflüsse der Laserspotvariation auf den Prozess und die Bauteileigenschaften zu untersuchen. Ziel ist, die Korrelation zwischen Prozessparametern, Temperaturen und Mikrostruktur zu analysieren und zu modellieren. Die gesammelten Erkenntnisse und Daten werden zur Entwicklung eines Optimierungsmodells sowie eines Prozessüberwachungssystems verwendet. Ein in der verwendeten Anlagentechnik integriertes Überwachungssystem, welches mit einer „sCMOS“-Kamera für jede Schicht das Schmelzbad anhand der Intensitäten des emittierten Lichtes überwacht, wird zur Analyse der beobachteten Effekte und Wechselwirkungen eingesetzt.

3.2 Prozessüberwachung

Neben der experimentellen Studie wird ein auf maschinelles Lernen (ML) gestütztes Prozessüberwachungssystem zur Erkennung und Diagnose von Prozessinstabilitäten und -fehlern entwickelt, die während des PBF-LB-Prozesses auftreten können. Dazu wird für jede Schicht ein Datensatz aus Prozessparametern sowie Aufnahmen des integrierten sCMOS-Systems erstellt und auf Basis dieser Daten das ML-Modell zur Fehlererkennung trainiert. Das Training eines ML-Modells zur Klassifizierung von

Defekten im Prozess erfordert eine große Menge an markierten Daten, deren Erfassung schwierig sein kann. Um alle Arten von Defekten abzudecken, müssten weitere Experimente unter bestimmten Konditionen durchgeführt werden, die zur Bildung von Defekten führen, was zeitaufwendig und teuer sein kann.

Um diese Hürden zu überwinden, wird ein unüberwachtes Lernverfahren verwendet, um das Modell zu trainieren. Dieser Ansatz macht markierte Daten überflüssig und kann unbekannte Fehler oder Anomalien im Prozess erkennen. Anhand der Daten, die im Zuge der Studien zur Ermittlung der Prozessfenster gesammelt werden, sowie unter der Annahme, dass die gesammelten Daten den normalen Prozessablauf darstellen, wird ein ML-Modell zur Erkennung von Anomalien trainiert. Während des Trainings lernt das ML-Modell das Verhalten des Normalprozesses. Da das Modell lernt, wie ein normaler Prozess aussehen soll, kann das trainierte Modell genutzt werden, um Rückschlüsse auf die identifizierten sowie nicht identifizierten Defekte zu ziehen.

Da die Daten aus verschiedenen Modalitäten stammen (Bildquellen und numerische Datenquellen), wird die Architektur des ML-Modells an die Verarbeitung mehrerer Modalitäten angepasst. Zum Beispiel kann ein vollständig verknüpftes Netz für die numerischen Daten und ein Convolutional Neural Network für die Aufnahmen des Überwachungssystems verwendet werden. Die Qualität des Trainings wird anhand statistischer Metriken wie der Konfusionsmatrix oder dem Bestimmtheitsmaß bewertet. Die statistischen Kennzahlen messen die Fähigkeit des Modells, die Variationen in den Daten zu erklären. Sobald das ML-Modell trainiert ist, kann es für die prozessbegleitende Überwachung eingesetzt werden. Das Modell erkennt die Fehler, die im Prozess auftreten können, was eine entsprechende Reaktion auslöst. So wird beispielsweise der Prozess gestoppt, wenn die Anzahl der

während des Prozesses entdeckten Fehler den zulässigen Wert übersteigt. Im Gegensatz dazu wird der Prozess fortgesetzt, wenn die Anzahl der Fehler innerhalb des zulässigen Wertes liegt. Um zu überprüfen, ob das entwickelte Prozessüberwachungssystem die Anforderungen erfüllt, ist es nötig, dieses anhand eines praktischen Anwendungsfalles zu validieren. Zu diesem Zweck wird ein topologieoptimiertes Werkstück mittels PBF-LB hergestellt, während das trainierte Modell die möglichen Fehler überwacht, die während des Bauprozesses auftreten können. Im Anschluss wird das Werkstück auf zuvor definierte Qualitätsparameter getestet.

3.3 Energieeffizienz

Beim PBF-LB Verfahren ist die Energieeffizienz abhängig von den gewählten Prozessparametern. Ein Ziel des Konzeptes ist es, die Energieeffizienz des Verfahrens zu verbessern, um die geforderte Bauteilqualität bei einem minimalen Energieeinsatz zu erreichen. Dafür müssen zunächst geeignete Energieleistungskennzahlen (EnPI) zur Quantifizierung der Energieeffizienz definiert werden. DIN ISO 50006 [29] liefert hierzu einen Leitfaden mit dem die EnPI auf Basis der Daten der Prozessparameterstudien ermittelt werden können.

Zur Entwicklung eines multikriteriellen Optimierungsmodells müssen die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern, EnPI und Bauteileigenschaften bestimmt werden. Simulationsbasierte Optimierungsverfahren erreichen dies durch eine genaue mathematische Beschreibung des Prozesses. Durch den hochdimensionalen Parameterraum des PBF-LB-Prozesses ist eine exakte mathematische Beschreibung, die alle möglichen Interaktionen berücksichtigt, mit erheblichem Zeit- und Rechenaufwand verbunden. Ähnliches gilt für datenbasierte Optimierungsverfahren, die eine große Menge an Daten benötigen, um latente Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Faktoren genau zu erlernen. Aufgrund dieser Probleme werden die Zusammenhänge auf Basis der durchgeführten Experimente empirisch beschrieben.

Um die Wirtschaftlichkeit zu steigern, ist es nötig neben der Energieeffizienz weitere Ziele wie Bauteilqualität, Fertigungszeit sowie Prozesskosten zu berücksichtigen. Die Prozesskosten sind eine Funktion von Energie-, Schutzgas-, Material-, und Personalkosten. Die Materialkosten hängen bei einer festgelegten Bauteilgeometrie von dem Supportvolumen und der Bauteilorientierung ab. Zum einen muss der Support auf die gewählten Prozessparameter abgestimmt werden, um einen ausreichenden Wärmeabtransport zu gewährleisten sowie entstehende Kräfte durch auftretende Spannungen zu kompensieren. Zum anderen wird das Supportvolumen durch die Orientierung des Bauteils im Bauraum beeinflusst.

Die Bauteilorientierung hat durch die resultierende Höhe des Bauteils im Bauraum auch Einfluss auf das aufzubringende Pulvervolumen. Eine Quantifizierung der Materialkosten ist sehr komplex und eine Auslegung der Supportstruktur abhängig von den spezifischen Prozessbedingungen. Da die Bauteilorientierung und -geometrie darüber hinaus nicht variiert wird, werden die Materialkosten zur Vereinfachung nicht in das Modell miteinbezogen. Da die Rüstzeiten als konstant angenommen werden und die Prozessbeobachtungszeit eine individuelle Größe darstellt, werden im Modell zudem keine Personalkosten berücksichtigt. Als notwendiges Kriterium muss der Lösungsraum durch die geforderte Bauteilqualität beschränkt werden, um die Erfüllung der Qualitätsanforderungen zu gewährleisten.

Die Lösung des Optimierungsproblems erfolgt auf Basis verschiedener Heuristiken unter Beurteilung der jeweiligen Leistungsfähigkeit. Die Verwendung von Heuristiken liefert im Gegensatz zu exakten Lösungsverfahren zwar nicht notwendigerweise die Optimallösung des Optimierungsmodells, jedoch sind diese durch die kürzere Rechenzeit in der Anwendung praktikabler und liefern dennoch hinreichend gute Ergebnisse.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Konzept zur Entwicklung eines wirtschaftlicheren PBF-LB zur Herstellung kleiner Stückzahlen im industriellen Umfeld vorgestellt. Im ganzheitlichen Ansatz wurden hierzu die Faktoren Bauteilqualität, Energieeffizienz, und Produktionszeit berücksichtigt. Anhand des vorgestellten Konzeptes wird in zukünftigen Arbeiten die Technologie des variablen Laserspotdurchmessers mit umfassenden Prozessparameterstudien am Werkstoff Ti-6Al-4V untersucht.

Zudem wurde unter Berücksichtigung der Bedingungen einer konstanten Bauteilgeometrie und -orientierung sowie der beschriebenen Vereinfachungen bei Material- und Personalkosten das multikriterielle Optimierungsmodell beschrieben und Lösungsalgorithmen entwickelt und implementiert. Weiterhin wurde das ML-basierte Prozessüberwachungssystem in einer unüberwachten Lernumgebung trainiert, um den Aufwand der Datenmarkierung und einer vollfaktoriellen Datenerfassung zu vermeiden.

Um das Konzept zu erweitern, könnten im Zuge zukünftiger Forschungsaktivitäten die Beschränkungen einer spezifischen Bauteilgeometrie und Bauteilorientierung aufgehoben werden. Auch könnten die Einflüsse des Laserspotdurchmessers auf weitere Bauteileigenschaften analysiert und diese in das Optimierungsmodell integriert werden. Für das Prozessüberwachungssystem wäre eine Klassifizierung der Defekte und eine Erweiterung des Modells um instabile Prozessdaten möglich.

DANKSAGUNG

Das Forschungsvorhaben „Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Laser-Strahlschmelzens für den Einsatz in der industriellen Produktion“ wird mit Mitteln des Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau des Landes Rheinland-Pfalz gefördert.

Literatur

- [1] DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03: Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie (ISO/ASTM 52900:2021); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52900:2021
- [2] Pérez, M.; Carou, D.; Rubio, E. M. et al.: Current advances in additive manufacturing. *Procedia CIRP* 88 (2020), pp. 439–444
- [3] Plocher, J.; Panesar, A.: Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. *Materials & Design* 183 (2019), # 108164
- [4] Yang, S.; Tang, Y.; Zhao, Y. F.: A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes* 20 (2015), pp. 444–449

- [5] Schlingmann, T.: Die additive Fertigung löst größte Herausforderungen der Werkzeugtechnik. *Maschinenbau* 1 (2021) 5, S. 26–29
- [6] Mani, M.; Lyons, K. W.; Gupta, S. K.: Sustainability Characterization for Additive Manufacturing. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology* 119 (2014), pp. 419–428
- [7] AMFG Autonomous Manufacturing: Wie ausgereift sind die 3D-Metall-drucktechnologien? Stand: 2019. Internet: amfg.ai/de/2019/09/16/wie-ausgereift-sind-die-3d-metall-drucktechnologien/. Zugriff am 30.05.2023
- [8] AMPOWER: Additive Manufacturing Report. Internet: additive-manufacturing-report.com/additive-manufacturing-market/. Zugriff am 30.05.2023
- [9] Strano, G.; Hao, L.; Everson, R. M. et al.: Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology* 213 (2013) 4, pp. 589–597
- [10] Reznik, D.; Kastsian, D.; Lüthen, V. et al.: 3D-Drucken mit Metallen. *Physik in unserer Zeit* 50 (2019) 1, S. 28–35
- [11] Kellens, K.; Mertens, R.; Paraskevas, D. et al.: Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing? *Procedia CIRP* 61 (2017), pp. 582–587
- [12] Reisch, R. T.; Hauser, T.; Lutz, B. et al.: Context awareness in process monitoring of additive manufacturing using a digital twin. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 119 (2022) 5–6, pp. 3483–3500
- [13] Colosimo, B. M.; Grasso, M.: In-situ monitoring in L-PBF: opportunities and challenges. *Procedia CIRP* 94 (2020), pp. 388–391
- [14] Wycisk, E.: Ermüdungseigenschaften der laseradditiv gefertigten Titanlegierung TiAl6V4. Heidelberg: Springer 2017
- [15] Ma, M.; Wang, Z.; Gao, M. et al.: Layer thickness dependence of performance in high-power selective laser melting of 1Cr18Ni9Ti stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology* 215 (2015), pp. 142–150
- [16] Masoomi, M.; Thompson, S. M.; Shamsaei, N.: Quality part production via multi-laser additive manufacturing. *Manufacturing Letters* 13 (2017), pp. 15–20
- [17] Makoana, N.; Yadroitsava, I.; Möller, H. et al.: Characterization of 17–4PH Single Tracks Produced at Different Parametric Conditions towards Increased Productivity of LPBF Systems—The Effect of Laser Power and Spot Size Upscaling. *Metals* 8 (2018) 7, # 475
- [18] Wiesner, A.; Schwarze, D.: Multi-Laser Selective Laser Melting. *International Conference on Photonic Technologies, LANE 2014*
- [19] Gong, H.; Rafi, K.; Gu, H. et al.: Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing* 1–4 (2014), pp. 87–98
- [20] Schleifenbaum, H.; Meiners, W.; Wissenbach, K. et al.: Individualized production by means of high power Selective Laser Melting. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2 (2010) 3, pp. 161–169
- [21] Gong, H.; Rafi, K.; Starr, T. et al.: The Effects of Processing Parameters on Defect Regularity in Ti–6Al–4V Parts Fabricated By Selective Laser Melting and Electron Beam Melting. *24th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, SFF 2013*, pp. 424–439
- [22] Bremen, S.; Meiners, W.; Diatlov, A.: Selective Laser Melting. *Laser Technik Journal* 9 (2012) 2, pp. 33–38
- [23] An, Q.; Dang, J.: Cooling Effects of Cold Mist Jet with Transient Heat Transfer on High-Speed Cutting of Titanium Alloy. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 7 (2020) 2, pp. 271–282
- [24] Buchbinder, D.; Schleifenbaum, H.; Heidrich, S. et al.: High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts. *Physics Procedia* 12 (2011), pp. 271–278
- [25] Brandl, E.; Heckenberger, U.; Holzinger, V. et al.: Additive manufactured AISi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials & Design* 34 (2012), pp. 159–169
- [26] Du Plessis, A.; Beretta, S.: Killer notches: The effect of as-built surface roughness on fatigue failure in AISi10Mg produced by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing* 35 (2020), # 101424
- [27] Ye, C.; Zhang, C.; Zhao, J. et al.: Effects of Post-processing on the Surface Finish, Porosity, Residual Stresses, and Fatigue Performance of Additive Manufactured Metals: A Review. *Journal of materials engineering and performance* 30 (2021) 9, pp. 6407–6425
- [28] Everton, S. K.; Hirsch, M.; Stravroulakis, P. et al.: Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials & Design* 95 (2016), pp. 431–445
- [29] DIN ISO 50006:2017–04: Energiemanagementsysteme – Messung der energiebezogenen Leistung unter Nutzung von energetischen Ausgangsbasen (EnB) und Energieleistungskennzahlen (EnPI) – Allgemeine Grundsätze und Leitlinien (ISO 50006:2014). Deutsche Fassung Ausgabe 2017



Marius Marvin Müller, M.Sc.
Foto: FBK

Shradha Ghansiyal, M.Sc.

Marc Huber, M.Sc.

Dr.-Ing. **Benjamin Kirsch**

Moritz Glatt, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. **Jan C. Aurich**

Rheinland-Pfälzische Technische Universität

Kaiserslautern-Landau (RPTU)

Lehrstuhl für Fertigungstechnik

und Betriebsorganisation [FBK]

Gottlieb-Daimler-Str., Gebäude 42

67663 Kaiserslautern

Tel. +49 631 / 205-5938

marius.mueller@rptu.de

www.fbk-kl.de

LIZENZ



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