

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Sicherung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands ist ein zentrales Ziel, das durch die Zukunftsstrategie Forschung und Innovation vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung* verfolgt wird [PRE24]. Die inhaltlichen Schwerpunkte der Zukunftsstrategie Forschung und Innovation liegen insbesondere in der Förderung einer ressourceneffizienten und international wettbewerbsfähigen Industrie sowie der Sicherung der technologischen Souveränität im Bereich von Schlüsseltechnologien. Letzteres meint in diesem Sinne Schlüsseltechnologien, die eine hohe Relevanz für die technologische und wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands aufweisen, zu fördern und auszubauen. Die Zukunftsstrategie Forschung und Innovation dient dabei der strategischen Ausrichtung des Forschungs- und Innovationssystems mit dem Ziel, aktuelle Herausforderungen wie beispielsweise die Ressourcenverknappung und kürzer werdende Innovationszyklen bei steigender Produktkomplexität zu adressieren. Im Kontext dieser Zielsetzung bietet die additive Fertigung, die als Schlüsseltechnologie im produktionstechnischen Umfeld gilt, diverse Potentiale zur Bewältigung der genannten Herausforderungen [SCH20a, HEL23]. Hierunter fallen [GEB19]:

- Ressourceneffiziente Fertigung
- Effiziente Fertigung komplexer Geometrien mit integrierten Funktionen
- Effiziente Fertigung individualisierter und personalisierter Produkte
- Verkürzung von Innovationszyklen

Von besonderer Relevanz für die industrielle Anwendung ist das additive Fertigungsverfahren des pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen mittels Laserstrahl (engl. powder bed fusion of metals with laser beam, PBF-LB/M), welches das am häufigsten eingesetzte additive Fertigungsverfahren für die Herstellung metallischer Bauteile repräsentiert [DEJ23, MUN24, WOH23]. Das PBF-LB/M umfasst einen zweistufigen, zyklischen Fertigungsprozess (vgl. Abbildung 1) [KRA16]. In der ersten Stufe erfolgt der Pulverauftrag. Die Bauplatte wird um eine Schichtdicke abgesenkt und der pulverförmige Ausgangswerkstoff wird aus dem Pulvervorratsbehälter mittels Beschichter auf die Bauplatte aufgetragen. Überschüssiges Pulver wird in einem Pulverüberlauf gesammelt und kann nach dem Fertigigungsprozess wiederaufbereitet werden. Die zweite Stufe stellt die selektive Belichtung der aufgetragenen Pulverschicht durch einen Laserstrahl dar. Die Absorption der Laserstrahlung führt zu einem lokalen Temperaturanstieg der Partikel des Metallpulvers über den Schmelzpunkt und zur Ausbildung eines Schmelzbades [KRA16]. Die anschließende Abkühlung und Verfestigung des Schmelzbades resultiert in einer festen Verbindung mit der darunterliegenden Schicht [GEB19]. Durch Ablenkung des Laserstrahls mittels Spiegeloptik werden kontinuierliche Schmelzbahnen erzeugt, die zusammengesetzt den Querschnitt des Bauteils abbilden. Die beschriebenen Stufen des Fertigigungsprozesses werden solange wiederholt, bis das gesamte Bauteilvolumen aufgeschmolzen und verfestigt wurde.

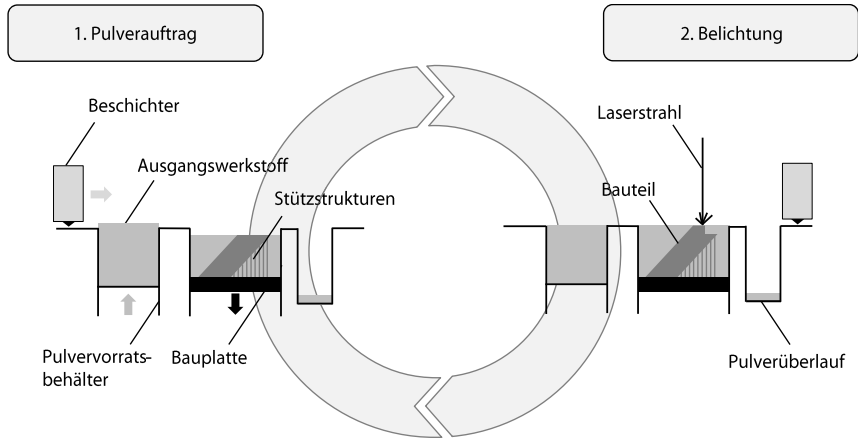


Abbildung 1: Zyklischer Prozessablauf des PBF-LB/M

Die Potentiale des PBF-LB/M werden in verschiedenen Branchen für die industrielle Fertigung metallischer Bauteile genutzt. Exemplarische Anwendungsfälle sind patientenindividuelle Dentalimplantate (Medizintechnik), Turbinenschaufeln und Triebwerkskomponenten für Raketen mit funktionsoptimierten Kühlkanälen (Luft- und Raumfahrttechnik) sowie hinsichtlich des Leichtbaus optimierte Fahrwerkskomponenten für Personenkraftwagen oder den Rennsport (vgl. Abbildung 2) (Automobiltechnik) [GEB19, WOH23].



Abbildung 2: Mittels PBF-LB/M gefertigter Lenkungskäfig aus Ti-6Al-4V

Das PBF-LB/M weist neben den eingangs genannten Potentialen der additiven Fertigung eine Reihe von Herausforderungen auf, die Hemmnisse für einen breiten industriellen Einsatz des Fertigungsverfahrens darstellen [DEJ23]. Eine Vielzahl dieser Herausforderungen ist auf die thermische Prozessführung beim PBF-LB/M zurückzuführen [XU18, ILL20]. Der zeitliche Temperaturverlauf sowie die lokale Tempera-

turverteilung während des PBF-LB/M stellen zentrale Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität (insbesondere relative Dichte, Oberflächenqualität sowie Form- und Maßhaltigkeit) dar. Diese Einflussfaktoren sind maßgeblich abhängig von den aus der Bauteilgeometrie und -orientierung resultierenden lokal unterschiedlichen Wärmeleitungsbedingungen, welche durch die Differenz der Wärmeleitfähigkeit der bereits verfestigten Bauteilbereiche und der vergleichsweise geringen effektiven Wärmeleitfähigkeit¹ des Pulverbettes entstehen [WEI18]. Dies führt dazu, dass die mittels Laserstrahl eingebrachte thermische Energie in überhängenden Bauteilbereichen unzureichend abgeleitet wird, was lokale Überhitzungen zur Folge hat. Diese Überhitzungen resultieren in einer erhöhten Porosität und Oberflächenrauheit sowie in einer verringerten Form- und Maßhaltigkeit der zu fertigenden Bauteile [CHE17,FEN21,YAS16]. Zusätzlich begünstigen inhomogene Wärmeleitungsbedingungen und lokal unterschiedliche Abkühlverläufe die Entstehung von thermisch induzierten Eigenspannungen und Verzug [PAT17]. In Abbildung 3 ist ein exemplarisches Fehlerbild bei der Fertigung überhängender Bauteilbereiche mittels PBF-LB/M dargestellt.

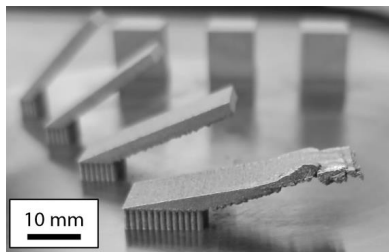


Abbildung 3: Exemplarisches Fehlerbild bei der Fertigung überhängender Bauteilbereiche mittels PBF-LB/M: Deformationen und Pulveranhaftungen an der Überhangfläche eines Prüfkörpers mit einem Überhangwinkel von $12,5^\circ$

Zur Vermeidung von Prozessfehlern in überhängenden Bauteilbereichen werden Stützstrukturen eingesetzt, um eine ausreichende Ableitung der thermischen Energie sowie homogene Wärmeleitungsbedingungen zu gewährleisten [HAN21,BAR19]. Darüber hinaus nehmen Stützstrukturen mechanische Kräfte auf, die infolge von prozessbedingten Eigenspannungen im Bauteil auftreten [PAT17]. Jedoch ist die Verwendung von Stützstrukturen mit einer Reihe von Nachteilen verbunden, wie einer Erhöhung der Fertigungsdauer, des Werkstoffbedarfs und des Nachbearbeitungsaufwandes sowie einer Beeinträchtigung der Oberflächenqualität [ILL20,CHE17,GAN16,FOX16]. Weiterhin ist die Gestaltung der Stützstrukturen nach *Hoeren und Witt* sowohl bauteil- als auch anwenderspezifisch und beeinträchtigt daher die Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität [HOE12].

¹ Die Wärmeleitfähigkeit ist eine physikalische Eigenschaft von isotropen Stoffen. Für anisotrope Stoffgemische wie das Pulverbett wird die effektive Wärmeleitfähigkeit zur Beschreibung des Wärmetransports durch einen Körper verwendet [BUG99]. Die effektive Wärmeleitfähigkeit des Pulverbettes beträgt etwa 3 % der Wärmeleitfähigkeit des Vollmaterials [WEI18].

Den beschriebenen Potentialen des PBF-LB/M zur effizienten Fertigung komplexer Metallbauteile stehen somit Herausforderungen gegenüber, die sich aus den bauteil- und orientierungsabhängigen Wärmeleitungsbedingungen und der daraus resultierenden Notwendigkeit von Stützstrukturen ergeben. Der Abbau dieser Hemmnisse für den breiten industriellen Einsatz des PBF-LB/M stellt die zentrale Motivation der vorliegenden Arbeit dar.

1.2 Handlungsbedarf

Aus der beschriebenen Ausgangssituation ergibt sich ein Handlungsbedarf in verschiedenen Bereichen. Einerseits ist es notwendig, geometrieunabhängig gleichbleibende Bauteileigenschaften wie Porosität, Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften sicherzustellen. In diesem Zusammenhang gilt es bauteil- und anwenderspezifische Einflüsse auf die im Fertigungsprozess vorherrschenden Wärmeleitungsbedingungen wie die Gestaltung von Stützstrukturen zu minimieren.

Andererseits muss die Wirtschaftlichkeit des PBF-LB/M über die gesamte Prozesskette gesteigert werden, um eine breite industrielle Anwendung des Fertigungsverfahrens zu ermöglichen. Hierfür ist eine Reduzierung des Aufwandes für die Datenvorbereitung – insbesondere für die Generierung von Stützstrukturen – sowie des dafür benötigten Technologiewissens erforderlich. Weiterhin ist eine Steigerung der Produktivität des PBF-LB/M-Prozesses notwendig, um neue wirtschaftliche Anwendungsfälle zu erschließen. Neben der Steigerung der Maschinenproduktivität liegt hier insbesondere Potential in der Minimierung nicht wertschöpfender Teile des PBF-LB/M-Prozesses, wie der Fertigung von Stützstrukturen. Einen weiteren signifikanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des PBF-LB/M hat nach *Gebhardt et al.* der Nachbearbeitungsaufwand [GEB19]. In diesem Kontext ist insbesondere die Entfernung von Stützstrukturen anzuführen, die einen erheblichen Teil der Herstellungskosten darstellt und durch ihre meist manuelle Ausführung eine Automatisierung der PBF-LB/M-Prozesskette hemmt [BAY22, DOG23].

Insgesamt ergibt sich somit ein ausgeprägter ingenieurwissenschaftlicher Handlungsbedarf zur Entwicklung von innovativen Lösungen zur Reduzierung der Stützstrukturen beim PBF-LB/M.