

1 Einleitung

Additive Fertigungsverfahren für metallische Werkstoffe (z. B. Laser- oder Elektronenstrahlschmelzen) ermöglichen die Herstellung von dreidimensionalen Bauteilen mittels sequentieller Addition von dünnen Materialschichten übereinander. Dabei wird das 3D-Modell des zu fertigenden Bauteils in Schichten unterteilt und das Bauteil schichtweise aus überwiegend pulverförmigen Ausgangswerkstoffen in einer Anlage aufgebaut. Dies ermöglicht die Herstellung von individualisierten Bauteilen komplexer Geometrie direkt aus einem CAD-Modell und erlaubt den Verzicht auf speziell für bestimmte Bauteile herzustellende Werkzeuge wie Stempel, Matrizen oder Gießformen. Darüber hinaus kann eine signifikante Reduzierung der Anzahl von Einzelteilen und der Masse eines Bauteils erreicht werden, indem ein Bauteil, das üblicherweise aus mehreren Komponenten hergestellt wird, als ein einzelnes komplexes Bauteil gefertigt wird [72], [77], [123]. Aus diesen Gründen wird die additive Fertigung zunehmend als ein Herstellungsverfahren für Einzelkomponenten und Kleinserien in z. B. Luft- und Raumfahrt, Turbomaschinbau, Medizintechnik und Automobilindustrie eingesetzt [1]. Die stark zunehmende Akzeptanz der additiven Verfahren wird durch das schnelle Umsatzwachstum belegt. Der jährliche Umsatz der gesamten additiven Fertigungsindustrie hat in 2021 15 Milliarden US-Dollar überschritten, im Vergleich zu knapp 12 Milliarden Dollar im Jahr 2019 und knapp 7,5 Milliarden im Jahr 2017. Der Anteil der additiven Fertigung der metallischen Werkstoffe beträgt 36 %, eine knappe Verdoppelung gegenüber dem Jahr 2018, und wächst rapide weiter. In 2021 wurden z. B. 2397 kommerzielle Metallbearbeitungssysteme verkauft, im Vergleich zu 2165 Systemen, die in 2020 und knapp 1800 Systemen, die in 2017 verkauft wurden [1], [14], [24], [75], [99].

Powder bed fusion of metal with laser beam (PBF-LB/M, im Folgenden als PBF abgekürzt), oft auch als Selective Laser Melting (SLM) oder Direct Metal Laser Sintering (DMLS) bezeichnet, ist ein additives Fertigungsverfahren, das durch den Eintrag von Laserenergie Pulverschichten definierter Dicke umschmilzt und mit der darunterliegenden Schicht schmelzmetallurgisch verbindet. So entstehen dichte Bauteile mit mechanischen Eigenschaften nahezu gleich zu anderen Herstellungsverfahren wie z. B. dem Gießen. Das PBF-Verfahren bietet unter anderem Möglichkeiten zur Herstellung von komplexen Geometrien, die mit anderen etablierten Verfahren wie beispielweise Gießen, Drehen oder Fräsen nicht produzierbar sind. Ein Beispiel sind Gitterstrukturen, die bei stark reduziertem Gewicht ähnliche Materialeigenschaften zu Vollmaterialbauteilen aufweisen. Ein weiterer großer Vorteil ist die individualisierte Produktion - dies wird beispielsweise in medizinischen Anwendungsbereichen genutzt: Implantate können für jeden Patienten individuell hergestellt werden. Dies eröffnet neue einzigartige Möglichkeiten nicht nur bei Knochenersatzimplantaten, sondern auch in der Konstruktion von gewichtsoptimierten Bauteilen. Darüber hinaus wird mit Hilfe von PBF sowohl die Produkteneinführungszeit signifikant verkürzt, als auch ressourcenschonend gearbeitet - es wird nur die Menge an Pulverwerkstoff

verarbeitet, die nötig ist, um ein Bauteil herzustellen [1], [2], [3], [32], [33], [49], [100], [101].

Dies, sowie intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der PBF-Verfahrens- und Systemtechnik, sind einige der Gründe warum PBF in den letzten Jahren größere und neue Anwendungsfelder erobert hat. Trotzdem steht das Verfahren erst an der Schwelle zu einem industriellen Serienfertigungsverfahren. Die wichtigsten Probleme sind dabei neben der geringen Produktivität und Reproduzierbarkeit die Anforderungen an die Qualität bezüglich Dichte, Defektfreiheit und Oberflächenqualität [101]. Diese Arbeit betrachtet die Einfluss-Wirk-Zusammenhänge beim PBF-Prozess und die dabei entstehenden Ungleichmäßigkeiten und Defekte beginnend mit Einzelpuren und überträgt die Ergebnisse für Einzelpuren auf Einzelschichten und Volumenkörper. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Oberflächenqualität und die Dichte gelegt. Abschließend werden Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf eine zweite PBF-Anlage durchgeführt und Maßnahmen zur Verbesserung der Bauteilqualität abgeleitet.