

# 1 Ausgangssituation und Motivation

Die additive Fertigung ist eine der wichtigsten Zukunftstechnologien und hat insbesondere für den Standort Deutschland eine sehr hohe strategische Relevanz [SCH 20b]. Sie hat nicht nur das Potenzial, konventionelle Fertigungsverfahren oder ganze Herstellungsprozesse zu substituieren, sondern ermöglicht auch neue Geschäftsmodelle, neue Produkte und neue Lieferketten [VAN19, S. 2, BAY23]. Die additive Fertigung wird bereits heute in einigen Bereichen kommerziell genutzt und weist ein extremes Entwicklungs- und Wachstumspotenzial auf [NEW23]. Gründe hierfür sind ihre vielfältigen technologischen und wirtschaftlichen Potenziale, die sich aus der werkzeuglosen Fertigung, der hohen geometrisch-konstruktiven Freiheit und der hohen Ressourceneffizienz ergeben [KEM17].

Für die wirtschaftliche und ressourceneffiziente additive Fertigung von Bauteilen aus Polymeren im industriellen Maßstab mit hoher Qualität besitzen die Prozesse bzw. Verfahren der Kategorie pulverbettbasiertes Schmelzen von Polymeren (engl. Powder Bed Fusion of Polymer PBF/P) ein großes Potenzial [NEW23, S. 130]. So wird bereits heute ein Drittel der gesamten Masse an Material, die in der additiven Fertigung verarbeitet wird, in den Verfahren des PBF/P verarbeitet [NEW23, S. 130]. Darüber hinaus sind die Verfahren der Kategorie des PBF/P diejenigen mit der höchsten Anzahl an Fertigungsanlagen, die von Dienstleistern der additiven Fertigung betrieben werden [NEW23, S. 138].

Das in der Industrie am längsten etablierte und bisher am weitesten verbreitete Verfahren des PBF/P ist das Lasersintern (LS). Das „jüngere“ und noch deutlich weniger erforschte Verfahren des PBF/P High Speed Sintering (HSS) weist jedoch sowohl technische als auch ökologische und ökonomische Vorteile gegenüber dem LS auf [ELL17, ZAP17]. Diese ergeben sich im Wesentlichen daraus, dass der Energieeintrag für das selektive Verschmelzen (selektiver Energieeintrag) des Materials flächig und nicht punktuell erfolgt. Dadurch kann eine deutlich längere Dauer des selektiven Energieeintrags pro Flächeneinheit (ca. 0,01 ms [VAS12, S. 60] vs. 1 s [ZAP17, S. 657]) bei hoher Produktivität realisiert werden. Dies ermöglicht die Verarbeitung von Polymeren mit hoher Schmelzviskosität [ZAP17, S. 656], was insbesondere für die Verarbeitung von thermoplastischen Elastomeren (TPE) relevant ist [ZAP17, S. 657, ELL17, S. 113]. Ebenso ergeben sich beim selektiven Energieeintrag deutlich geringere Maximaltemperaturen, wodurch die Degradation vieler Polymere während des additiven Fertigungsprozesses reduziert oder vermieden werden kann. Darüber hinaus kann grundsätzlich eine höhere Recyclingquote der Materialien realisiert werden [ZAP17, S. 657]. Des Weiteren ermöglicht der flächige selektive Energieeintrag eine konstante Schichtzeit, unabhängig von der jeweiligen aufzuschmelzenden Fläche einer Schicht. Hierdurch kann eine hohe Produktivität und Reproduzierbarkeit des additiven Fertigungsprozesses sowie eine wirtschaftliche Skalierung der Anlagentechnik realisiert werden [ZAP17, S. 655, ELL17, S. 113].

Ein wesentliches, bisher noch kaum betrachtetes Potenzial des HSS, mit extremem Innovationscharakter ergibt sich aus dem Aspekt, dass der selektive Energieeintrag relativ einfach lokal bzw. auf Voxel<sup>1</sup>-Ebene eingestellt werden kann. Die Einstellung erfolgt dabei über die Definition der pro Voxel applizierten Menge des für den selektiven Energieeintrag verwendeten Hilfsstoffes Tinte, welche als Absorber dient. Dies ermöglicht eine gezielte lokale Einstellung der Temperaturen der aufzuschmelzenden Bereiche des Pulverbetts und damit eine gezielte lokale Einstellung der Bauteileigenschaften [KEM21]. Hierdurch eröffnet sich eine völlig neue Dimension der Fertigung von Bauteilen aus einem Material mit funktional gradierten mechanischen Eigenschaften bzw. von funktional gradierten Materialien (engl. Functionally Graded Materials, FGM). Neben dem generellen Potenzial von FGM, mechanische Eigenschaften zu realisieren, die mit konventionellen Materialien nicht abgebildet werden

<sup>1</sup> Die Dimension eines Voxels beim HSS wird durch die Punktdichte bzw. Auflösung des verwendeten Druckkopfs (x-, y-Richtung), mit der die Tinte auf die Pulverbetttoberfläche appliziert wird, und der Dicke einer aufgetragenen Schicht des Polymerpulvers (z-Richtung) definiert.

können [MAH17], ermöglicht dies die Substitution von Verbundwerkstoffen, wodurch sich ein wesentlich einfacheres Recycling der Produkte ergibt. Besonders groß ist dieses Potenzial für das HSS bei Materialien mit elastischen Eigenschaften, wie sie TPE, insbesondere thermoplastische Polyurethane (TPU) aufweisen, da bei diesen die Härte und Steifigkeit über einen relativ großen Bereich eingestellt werden können [KEM21].

Eine derzeit entscheidende Limitierung des HSS ergibt sich aus der sehr geringen Anzahl an verfügbaren Materialien für das HSS bzw. dem Nichtvorhandensein an Prozessen des HSS zur Verarbeitung geeigneter Materialien. Auch gibt es bisher kein etabliertes Vorgehen zur Parametrisierung von Materialien für das HSS. Derzeit wird im HSS hauptsächlich Polyamid 12 (PA 12) verarbeitet. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass die von der Charakteristik des additiven Fertigungsprozesses des HSS ausgehenden Anforderungen an das zu verarbeitende Material sehr gut von PA 12 erfüllt werden. Daher steht auch PA 12 im Fokus der im HSS durchgeführten Forschungsarbeiten. Demgegenüber besteht aufgrund der Vielzahl potenzieller Anwendungsmöglichkeiten [DES23] ein großer Bedarf an Bauteilen aus TPE, insbesondere TPU, die mittels PBF/P bzw. HSS gefertigt wurden [SCH 22b, S. 212]. Ein besonders großes Anwendungspotenzial ergibt sich bei der Berücksichtigung der vom HSS ausgehenden hohen geometrisch-konstruktiven Freiheit bei der Auslegung der Bauteile. So können Gitter- bzw. Lattice-Strukturen realisiert werden, die Bauteile mit hohem Leichtbaupotenzial und durch ihre Geometrie vorgegebene mechanische Eigenschaften ermöglichen. Erste Produkte die dieses Potenzial nutzen sind bspw. die von OECHSLER & TECHART [OEC 24a] entwickelten Polster für Autositze, die eine Gewichtsreduzierung bei gleichzeitiger Erhöhung des Sitzkomforts ermöglichen, oder die von OECHSLER und VAUDE [OEC 24b] entwickelten Rückenpolster für Rucksäcke, die zu einem höheren Tragekomfort führen.

Die sich daraus ergebende Motivation für diese Arbeit ist die Bereitstellung von additiven Fertigungsprozessen des HSS, die eine Fertigung von Bauteilen aus TPU ermöglichen. Insbesondere liegt die Motivation darin, unter der Berücksichtigung der material- und prozessspezifischen Restriktionen einerseits maximierte mechanische und geometrische Eigenschaften und andererseits funktional gradierte bzw. lokal eingestellte mechanische Eigenschaften zu erzielen.