

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

In einem stetigen und schnellen Wandel des Marktumfeldes bedarf es einer Weiterentwicklung und Flexibilisierung der Produktionstechnik, um die Anforderung der Kunden hinsichtlich des Zieldreiecks aus Kosten, Qualität und Zeit zu erfüllen [WES06, S. 69]. Diese weiterentwickelte und flexibilisierte Produktionstechnik muss frühzeitig in den Produktentwicklungsprozess integriert und dadurch Megatrends antizipiert werden, sodass der Markt konkurrenzfähig bedient werden kann. Als Megatrends sind dabei die Bekämpfung des Klimawandels, ein Entgegenwirken der Ressourcenverknappung, Nachhaltigkeit, kundenindividuelle Produkthanforderungen, die Dynamisierung der Produktlebenszyklen und die Globalisierung zu nennen. [ABE11]

Die additive Fertigung (engl. additive manufacturing, AM) kann in der Produktionstechnik diesen Bedarf erfüllen. AM-Verfahren sind Verfahren zur Herstellung komplexer dreidimensionaler Bauteile, indem ein Material schichtweise konsolidiert wird. Laut *Wohlers Report* betrug das durchschnittliche Wachstum der Branche über die letzten vier Jahre 20,4 % [WOH22]. Die AM-Verfahren ergänzen die bisherigen konventionellen Fertigungsverfahren insbesondere bei der Fertigung von Bauteilen mit hoher geometrischer Komplexität, da keine Werkzeuge notwendig sind. Da nur Material aufgetragen wird, welches für das Bauteil notwendig ist, können zudem Ressourcen eingespart werden und es wird weniger Abfall produziert. Dies ist insbesondere in Anbetracht des Wandels hin zu einer nachhaltigen und flexiblen Produktion von besonderer Bedeutung.

Basierend auf der DIN EN ISO/ASTM 52900:2022 werden die AM-Verfahren in sieben Prozesskategorien eingeteilt (siehe Abbildung 1) [DIN22]. Materialien können während des Auftrags durch fokussierte Wärmeenergie beim Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung geschmolzen und verbunden werden.

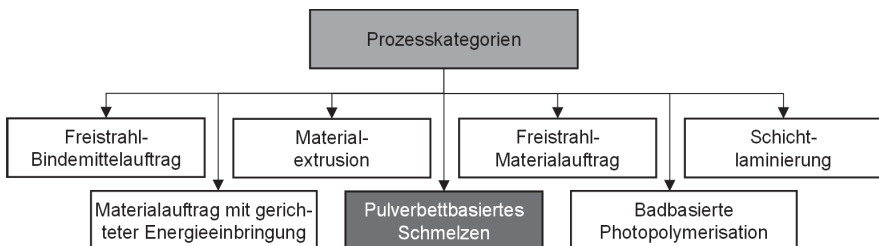


Abbildung 1: Übersicht der Prozesskategorien nach der DIN EN ISO/ASTM 52900:2022 [DIN22, S. 8]

Zudem können feste Materialien als Draht (Materialextrusion) oder als Folien (Schichtlaminierung) zu einem Bauteil aufgebaut werden. Für die Verarbeitung von flüssigen Ausgangsmaterialien können diese entweder in einem Bad mittels Laser/Projektor (Badbasierte Photopolymerisation) ausgehärtet oder direkt mittels Druckköpfen auf eine Bauplattform aufgebracht

und vernetzt (Freistrah-Materialauftrag) werden. Die Kombination durch Aufbringen eines flüssigen Bindemittels auf ein festes pulverförmiges Material wird als Freistrah-Bindemittel-auftrag bezeichnet. Beim pulverbettbasierten Schmelzen wird das pulverförmige Material direkt durch Wärmeenergie aufgeschmolzen, wobei das Pulver als Stützmaterial dient und wodurch das überschüssige Pulver nach dem Fertigungsprozess wiederverwendet werden kann. Gleichzeitig kann zur hohen Materialausnutzungsrate ein breites Materialspektrum realisiert werden [WAN20].

In der kunststoffverarbeitenden AM eröffnet insbesondere das High Speed Sintering (HSS) aus dem pulverbettbasierten Schmelzen großes Potential hinsichtlich der Möglichkeiten, einen zukünftigen industriellen Fertigungsprozesses abzubilden [PEZ22a, PEZ22b]. Mit einer konstanten Schichtzeit durch die Überfahrt eines Infrarot (IR)-Strahlers im Fertigungsprozess ist die wirtschaftliche Skalierbarkeit der HSS-Maschinen und somit die Fertigung großvolumiger Bauteile gegeben [HOP17, S. 656]. Gleichzeitig erhöht die Verwendung eines IR-Strahlers als Energiequelle die Bestrahlungsdauer des Polymerpulvers auf eine Sekunde gegenüber der Verwendung eines Lasers wie im Lasersintern (LS). Durch die Erhöhung der Bestrahlungsdauer ist die erstmalige Verarbeitung von langkettigen Polymeren wie Polyethylen mit hoher Dichte (PE-HD) im pulverbettbasierten Schmelzen möglich [VOX22].

Demgegenüber steht im Fertigungsprozess ein zusätzlicher Fertigungsschritt für den Einsatz eines Fertigungshilfsmittels zur Absorption der emittierten Strahlung des IR-Strahlers: die Aufbringung einer Tinte mittels Inkjet-Druckköpfen. Dabei wird hauptsächlich eine Tinte mit dem infrarotstrahlungsabsorbierenden Partikel Ruß eingesetzt, der eine graue bis dunkelgraue Färbung der Bauteile zur Folge hat. Ein Einfärben der Bauteile ist deshalb nur in dunklen Farbtönen möglich. Bei einer Skalierung des HSS-Verfahrens zur Fertigung großvolumiger Bauteile, bei denen eine hellere Farbabstufung gewünscht ist, können dahingehend nur Bauteile mit dunklen Farben gefertigt oder es müssen zusätzliche Nachbearbeitungsprozesse wie z. B. ein Beschichten durchgeführt werden. Der Energieeintrag durch die infrarotstrahlungsabsorbierenden Partikel kann zudem bisher nicht wie beim Lasersintern quantifiziert werden. Für eine Verarbeitung neuer Pulvermaterialien, die nur im pulverbettbasierten Schmelzen von Polymeren mittels IR-Strahlung verarbeitbar sind, wie bspw. PE-HD, besteht keine Möglichkeit einer hellen Farbgebung bzw. Farbabstufung der Bauteile und einer Vergleichbarkeit des Energieeintrags mit dem Lasersintern.

1.2 Zielsetzung

Aus der beschriebenen Ausgangssituation leitet sich für die vorliegende Arbeit die Zielsetzung zur Erforschung und fertigungstechnischen Reduktion des Einflusses der Tinte auf die Farbgebung der Bauteile beim High Speed Sintering ab. Dies soll primär durch die Reduzierung der Partikelmenge bei gleichzeitig gleichbleibenden Fertigungsparametern realisiert werden, womit hellere Bauteile gefertigt werden können. Hierfür gilt es anhand der bestehenden Forschungserkenntnisse im High Speed Sintering, ein Anforderungsprofil der infrarotstrahlungsabsorbierenden Partikel zu definieren. Zudem werden mit der Methode der Werkstoffauswahl die infrarotabsorbierenden Partikel nach der potentiellen Eignung für das High Speed Sintering ausgewählt und bewertet.

Weiterhin soll das Ziel durch den Einsatz neuer infrarotstrahlungsabsorbierender Partikel in der Tinte im High Speed Sintering und den Wissensaufbau über die Wechselwirkung zwischen dem Polymerpulver und der Tinte realisiert werden. Dies beinhaltet die Bestimmung des Energieeintrags im Fertigungsprozess durch die Anwendung geeigneter Messmethoden. Dazu zählen einerseits die Charakterisierung der eingesetzten Strahler, die elektromagnetische Strahlung emittieren, und andererseits der bisher verwendeten infrarotstrahlungsabsorbierenden Partikel, die die elektromagnetische Strahlung aufnehmen und anschließend in Wärmeenergie zum Aufschmelzen des Polymerpulvers umwandeln. Des Weiteren sind die Einflussgrößen auf die Bauteileigenschaften und somit die gesamtheitlichen Prozesszusammenhänge durch eine Prozessanalyse zu ermitteln, um eine gezielte Optimierung der Tinte auf das High Speed Sintering erreichen zu können.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Untersuchung der infrarotstrahlungsabsorbierenden Partikel, des Strahlers und somit des Energieeintrags werden abschließend im industriellen Fertigungsprozess validiert. Die wissenschaftliche Auswertung und Interpretation soll Aufschluss über die Potentiale geben und als Vorarbeit hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Aspekte der im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten strahlungsabsorbierenden Partikel dienen.

Daraus leiten sich folgende Ziele der vorliegenden Arbeit ab:

- 1. Reduzierung des Farbgebungseinflusses der Tinte bzw. Bauteile hellerer Farbabstufung*
- 2. Auswahl und Bewertung geeigneter infrarotstrahlungsabsorbierender Partikel*
- 3. Wissensaufbau über den Energieeintrag im Fertigungsprozess*
- 4. Ganzheitliche Betrachtung der Einflussgrößen auf die Bauteileigenschaften*
- 5. Validierung der Untersuchungsergebnisse im industriellen Fertigungsprozess*

1.3 Vorgehensweise

Zur Erreichung der formulierten Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird die Vorgehensweise in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

In **Kapitel 1** wird basierend auf der Ausgangssituation der additiven Fertigungsverfahren von Kunststoffen und insbesondere des High Speed Sinterings die Zielsetzung der Arbeit abgeleitet. Auf Basis der durchgeführten Eingrenzung des Betrachtungsraumes erfolgt die Vorstellung der Vorgehensweise.

In **Kapitel 2** werden der Stand der Technik der pulverbettbasierten additiven Fertigung von Kunststoffen sowie die Forschungserkenntnisse im High Speed Sintering hinsichtlich des Fertigungsprozesses und des Einsatzes infrarotstrahlungsabsorbierender Partikel (sogenannte IR-Absorber) in Tinten ausgeführt. Des Weiteren gilt es, die physikalischen Grundlagen der Wärmeübertragung darzulegen, um den Energieeintrag durch die elektromagnetische Strahlung bestimmen zu können.

Mit einer zusammenfassenden Bewertung der Erkenntnisse und einer Darstellung des Handlungsbedarfs für das High Speed Sintering wird in **Kapitel 3** die Notwendigkeit des Einsatzes neuer infrarotstrahlungsabsorbierender Partikel in Tinten zur Reduzierung der Farbgebung und der messtechnischen Erfassung des Energieeintrags aufgezeigt.

In **Kapitel 4** wird die Auswahl der Eignung verschiedener Materialien als IR-Absorber in der Tinte für das High Speed Sintering anhand einer etablierten Methodik zur Werkstoffauswahl durchgeführt.

In **Kapitel 5** erfolgt die Vorbereitung, Planung und Durchführung der Versuche im High Speed Sintering zur Erreichung der Zielsetzung. Dafür werden die verwendete Anlagentechnik zur Bauteilfertigung, der zu evaluierenden IR-Absorber, die darauf abzustimmenden Energie- bzw. Strahlungsquellen und die zur Bestimmung der verschiedenen Eigenschaften notwendigen Messaufbauten- bzw. -geräte dargestellt. Anschließend wird die Versuchsmethodik präzisiert, um die Haupteinflussgrößen zu definieren und damit die Basis zur Erforschung der maßgeblichen Korrelationen zwischen den Prozessgrößen, der Tinte und den Bauteileigenschaften abzuleiten.

In **Kapitel 6** findet die Erarbeitung des grundlegenden Prozessverständnisses durch die Charakterisierung der Haupteinflussgröße – dem Energieeintrag – und der Identifizierung der damit in Verbindung stehenden, signifikanten, maschinenseitigen Einstellgrößen durch die Tinte statt. Aufbauend auf den ermittelten Zusammenhängen und der durchgeführten Materialauswahl hinsichtlich IR-Absorbieren wird die bisherige rußhaltige Tinte der neuen Tinte gegenübergestellt. Erreicht werden sollen die gleichen Bauteileigenschaften wie mit den bisherigen Tinten bei geringerer Menge an IR-Absorber. Gleichzeitig wird neuartige Messtechnik angewendet zur generellen Weiterentwicklung des Prozesses und der zugehörigen Maschinenteknik.

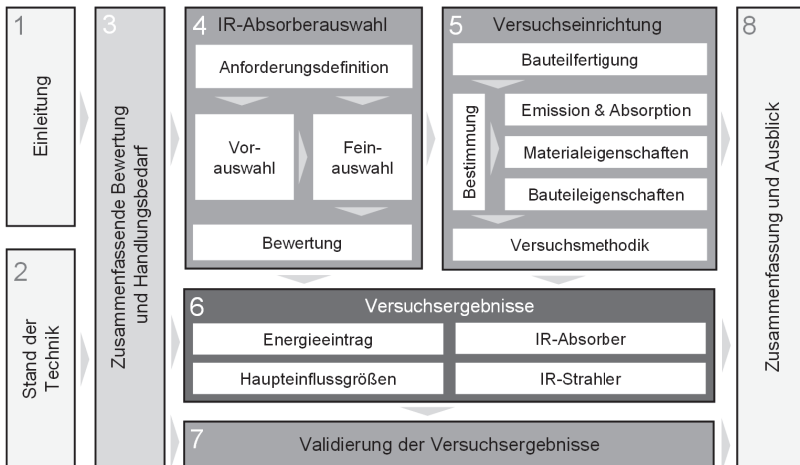


Abbildung 2: Aufbau der Arbeit und Ablauf der Forschungstätigkeiten

In **Kapitel 7** werden die Versuchsergebnisse des Fertigungsprozesses auf einer marktverfügbaren HSS-Maschine der Firma *voxeljet AG* validiert. Dazu wird die Tinte mit dem neuen IR-Absorber zur Herstellung von Prüfkörpern verwendet und erstmals mittels der Druckköpfe aufgebracht. Anschließend werden die Bauteileigenschaften hinsichtlich der Zielgrößen untersucht und die Ergebnisse interpretiert.

Abschließend werden in **Kapitel 8** die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst sowie ein Ausblick über die notwendige maschinenseitige Weiterentwicklung des HSS-Prozesses gegeben.