

1 Einleitung

Introduction

Seit den 1960er Jahren etabliert sich die additive Fertigung in der Forschung und seit den späten 1980er Jahren zunehmend in der industriellen Anwendung. Die ersten Entwicklungen von Prozessen und Maschinen der additiven Fertigung beziehen sich auf polymerbasierte Anwendungen, die erste kommerziell erhältliche Maschine zur Verarbeitung eines Photopolymers erscheint 1987. Zwölf Jahre später, 1999, erlangen das am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT entwickelte Controlled Metal Build-up (CMB, engl. [KLOC15, S. 159]) und das am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT entwickelte Selektive Laserstrahlschmelzen Marktreife. Beide Verfahren dienen der Verarbeitung von Metallen [WOHL19a, S. 3]. Zur gleichen Zeit wird auch in den USA intensiv an dem Lasersintern von Metallen geforscht und u. a. von General Electric vorangetrieben [CART93]. Seitdem ist es gelungen, eine große Verfahrensvielfalt zu entwickeln und die einzelnen Prozesse fortwährend zu optimieren. Wenngleich der Absatz weltweit verkaufter additiver Fertigungssysteme (ca. 2,5 Mrd. € im Jahr 2019 [WOHL20, S. 92]) im Vergleich zum Absatz von Werkzeugmaschinen (75,2 Mrd. € im Jahr 2018 [DÍAZ20, S. 9]) gering ist und die Verfahrensgruppe damit eine Nische bedient, ist das Wachstum der Erlöse aus verkauften Anlagen und angebotenen Dienstleistungen dennoch beachtlich. In den Jahren 2014 bis 2018 betrug die Wachstumsrate 26,6% [WOHL19, S. 164–166]. Die zunehmende Bedeutung der additiven Fertigungsverfahren in der Zukunft wird durch zahlreiche Analysen verdeutlicht [MUNS21, S. 4; WOHL19, S. 341; KAJI18, S. 70–71; GRAN18, S. 8]. Exemplarisch geht das Strategieberatungsunternehmen Strategy& davon aus, dass sich das weltweite Marktvolumen der additiven Fertigung von 1,8 Milliarden Euro im Jahr 2015 auf 22,6 Milliarden Euro im Jahr 2030 vergrößern wird [PWCS18]. Dies entspricht einem durchschnittlichen Wachstum von jährlich 17,6%.

Der durch die genannten Kennzahlen und Randbedingungen beschriebene Bedeutungszugewinn der additiven Fertigung zeigt sich in einem immer breiteren Einsatz in der produzierenden Industrie. Um der weiteren Verbreitung und effizienten Integration der Fertigungstechnologien Vortrieb zu leisten, sind angepasste und neue Methoden erforderlich, wozu diese Arbeit einen Beitrag leisten soll.

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Initial Situation and Motivation

Anforderungen an Produkte steigen. Als Schlagworte sind Variantenvielfalt und Derivatisierung, Individualisierung, Komplexitätssteigerung und Funktionsintegration zu nennen. Variantenvielfalt entsteht durch an spezifische Anforderungen angepasste Produkte. Derivatisierung ist die Ableitung eines neuen Produkts von einem bestehenden. Hieraus ergibt sich eine steigende Variantenvielfalt. Die Personalisierung und bedürfnisspezifische Anpassung von Produkten werden mit dem Begriff Individualisierung zusammengefasst. Steigende Produktanforderungen ergeben sich zudem aus technischen Gründen – und führen zu Komplexitätssteigerung. Als Spezialfall der Komplexitätssteigerung ist die Funktionsintegration einzuordnen. Diese fortwährend aktuellen Herausforderungen adressiert – zusätzlich getrieben durch die COVID-19-Pandemie – die additive Fertigung als Kernelement von Digitalisierungsstrategien [ROHL21, S. 7].

Die produzierende Industrie stellt sich auf diese sich dynamisch ändernden Faktoren mit technologischen, organisatorischen und strategischen Maßnahmen ein. Strategisch sind

dies Maßnahmen zur Ausrichtung und Anpassung von ausgewählten Geschäftsmodellen, versorgten Absatzmärkten sowie angebotenen Produkt- und Dienstleistungsportfolios. Organisatorisch können die Verteilung und inhaltliche Zuordnung von Beschäftigten bestimmt werden, genauso wie die Gestaltung von Prozessabläufen in den verschiedenen Organisationseinheiten eines Unternehmens. Technologisch müssen Unternehmen produktseitig und fertigungsseitig wettbewerbsfähige Lösungen anbieten – beide bedingen sich gegenseitig. Aus einer marktgetriebenen Perspektive (»market pull«, engl.), respektive der Kundenwünsche, ergeben sich die oben genannten Schlagworte. Auch die anbietergetriebene Perspektive (»market push«, engl.) führt zu diesen Schlagworten. Dabei fällt der Technologieführerschaft [PORT98, S. 128] und der damit verbundenen Perspektive, innovative Produkte anbieten zu können, eine bedeutende Rolle zu. Erlaubt ein Unternehmen Erforschung, Entwicklung von und Investitionen in Fertigungsmittel, können aus fertigungstechnischen Möglichkeiten innovative Produkte entstehen, die sich wiederum mit den oben genannten Schlagworten zusammenfassen lassen. Für die Produkt- und Fertigungsperspektive lässt sich in diesem Fall der Begriff *technology push* (engl.) gebrauchen. Mit den beschriebenen technologischen Maßnahmen ist ein Absetzen von Wettbewerbern möglich, ohne an einem Preiskampf teilzunehmen und über Kostenführerschaft eine Preisführerschaft zu realisieren. Der Ansatz der Technologieführerschaft wird besonders in entwickelten Ländern, die typischerweise Hochlohnländer sind, verfolgt [STAT21b; BREC11, S. 33].

Die technologische Führung bei der Fertigungstechnologie und bei den angebotenen Produkten ist folglich ein bedeutender Faktor für langfristigen Erfolg im Wettbewerb [BOOS17, S. 41; KORN16; BREC11, S. 59]. Unternehmen erlangen diese technologische Führung bei der Fertigungstechnologie z. B. durch kontinuierliche Prozessparameteroptimierungen (z. B. Verringerung der Oberflächenrauheit oder Reduzierung des Verschleißes beim Einsatz geometrisch optimierter Fräswerkzeuge [GRGU19, S. 906–907; UHLM16, S. 217]), durch das Erweitern von Prozessgrenzen (z. B. Einsatz von Feinstkorngraphit als Elektrodenwerkstoff in der Senkfunkenerosion, der zu verringertem Elektrodenverschleiß führt [KLOC07, S. 78]) oder den Einsatz in der eigenen Fertigung bisher nicht eingesetzter Technologien. Hierzu zählt die sich zunehmend verbreitende additive Fertigung. Im Kontext der Weiterentwicklung von Fertigungsalternativen hat die additive Fertigung einen signifikanten Einfluss auf die zukünftige Ausgestaltung von Geschäftsmodellen für die Produktion. SAVOLAINEN ET AL. gehen dabei von einem inkrementellen, sich schrittweise entwickelnden, weniger von einem disruptiven Einfluss auf die produzierende Industrie aus [SAVO20, S. 11]. Eine Prozessoptimierung gelingt hier nicht durch die Weiterentwicklung eines bestehenden Verfahrens. Ein Beispiel dafür ist die Frästechnologie, innerhalb derer sich durch erhöhte Drehzahlen und Vorschubgeschwindigkeiten die Verfahrensvariante Hochgeschwindigkeitsfräsen (HSC, engl.: High-Speed Cutting) entwickelt hat. Die inkrementelle Entwicklung der additiven Fertigung, die dennoch oft als disruptiv beschrieben wird [SAVO20, S. 1; KARA18, S. 3; ARCA17, S. 1], ergibt sich aus der diametral unterschiedlichen Ausgestaltung der Technologiegruppe im Vergleich zu historisch eingesetzten Fertigungstechnologien – additiv versus subtraktiv.

Additive Fertigungstechnologien sind besonders geeignet, den Herausforderungen der Variantenvielfalt und Derivatisierung, Individualisierung, Komplexitätssteigerung und Funktionsintegration zu begegnen. Eine geringere Kosten-Stückzahlabhängigkeit von additiven Fertigungstechnologien [HINK13, S. 15] im Vergleich zu subtraktiven Fertigungstechnologien und der typischerweise schichtweise Aufbau von Bauteilen aus einem Halbzeug, welches vollständig unabhängig von der zu erzeugenden Bauteilgeometrie ist, ermöglichen die holistische Begegnung der vorgenannten Herausforderungen durch diese Technologiegruppe. Als ein Beispiel für Komplexitätssteigerung ist die Fähigkeit, geschlossene, innenlie-

gende Strukturen zu erzeugen, zu nennen. Ein Beispiel für Funktionsintegration ist die Fähigkeit, relativ zueinander bewegliche Elemente in einem monolithisch aufgebauten Bauteil zu realisieren.

Neben diesen für die additive Fertigung spezifischen Eigenschaften und Fähigkeiten, die den disruptiv wahrgenommenen Charakter der Technologiegruppe unterstreichen, bergen die Fertigungstechnologien jedoch ebenso spezifische Herausforderungen: Oberflächeneigenschaften reichen qualitativ nicht an die mit den meisten subtraktiven Technologien erzielbaren Eigenschaften heran, gleiches gilt für das Erreichen von Maßtoleranzen. Eine weitere Besonderheit ist das regelmäßige Vorhandensein von Stützstrukturen [GIBS21, S. 165–166]. Diese Strukturen dienen ausschließlich dem Ermöglichen oder Verbessern des additiven Bauprozesses und sind für die eigentliche Bauteilstruktur bzw. -funktion überflüssig oder gar nachteilig und müssen entfernt werden. Diese Eigenschaften erfordern bei maschinenbaulichen Bauteilen im Regelfall eine Weiterbearbeitung. Durch die Anwendung subtraktiver Fertigungstechnologien können Oberflächeneigenschaften und Maßtoleranzen im Anschluss an den additiven Aufbauprozess eingestellt und Stützstrukturen entfernt werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, das additive Fertigungssystem gemeinsam mit subtraktiven Fertigungstechnologien in eine Prozesskette zu integrieren. Um einen verbesserten Output der gesamten Prozesskette zu erzielen, ist es obligatorisch, die an der Prozesskette beteiligten Fertigungstechnologien effizient aufeinander abzustimmen. Dies gilt bereits in der Planungsphase. Additive Fertigungsprozesse können oft nicht unterbrochen werden, was spontane Reaktionen auf Kundenaufträge einschränkt, zudem ist die Maschinenzuordnung eines Bauauftrags in der Regel fix [STIT20, S. 16]. Auch aus ökonomischer Perspektive ist eine Abstimmung notwendig: Die Herstellkosten eines auf der additiven Fertigung beruhenden Bauteils ergeben sich bis zu 64 % aus der Weiterbearbeitung. Bei Pulverbettverfahren liegt dieser Wert bei 41 %. [SIMP20]

Unternehmen, die die Einführung einer für sie neuen Fertigungstechnologie planen, können auf eine Vielzahl an Methoden zurückgreifen [HEES15; NAU12; MORY04; WANG00; MYIN94]. Diese erlauben eine ökonomische und technologische Beurteilung, Auswahl und Integration von neuen Technologien. Ebenso stehen vielfältige Methoden zur Entwicklung, Ausgestaltung und Determination von Fertigungsprozessketten, also die Verknüpfung mehrerer Fertigungstechnologien zur Verfügung [REY20; WEGE16; MORY04; JURK04; SCHM03; EICH03; TROM01; FALL00]. Die beschriebenen spezifischen Eigenschaften von additiver Fertigung erfordern jedoch eine spezifische Herangehensweise zur Integration dieser Technologien in Fertigungsprozessketten. Daraus ergeben sich Ziel und Nutzen dieser Arbeit.

1.2 Zielsetzung

Objective

Das *übergeordnete Ziel* dieser Arbeit ist es, die produzierende Industrie zu befähigen, neue Fertigungstechnologien, explizit additive Fertigungstechnologien, einzusetzen. Dabei liegt der Fokus auf dem methodisch fundierten Einfügen einer neuen bzw. weiteren Fertigungstechnologie in Fertigungsprozessketten, nicht auf der technischen Qualifikation von Verfahren und Prozessen. Grundsätzlich stehen dazu bereits Ansätze zur Verfügung, die oft nur bedingt in der praktischen Anwendung verankert sind. Diese gilt es auf ihre Eignung für den Spezialfall additive Fertigung zu untersuchen und vorhandene Lücken durch Modifikationen und Erweiterungen zu schließen.

Konkretes Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik, die es produzierenden Industrieunternehmen erlaubt, auf wissenschaftlicher Basis additive Fertigungstechnologien in

ihre bestehenden Fertigungsumgebungen zu integrieren. Vorhandene Fertigungsmittel und vorhandenes Fertigungswissen werden als maßgebliche Randbedingungen der Methodik affiliert. Ebenso wird die Notwendigkeit, additiv hergestellte Bauteile einer Weiterbearbeitung zu unterziehen, inkludiert, um Design- und Funktionsanforderungen erfüllen zu können. Die Methodik soll dem praktischen Einsatz standhalten und sich dazu auf Anforderungen aus der Praxis stützen. Wissenschaftlich-objektive Kriterien sollen die Anwendung der Methodik in einem generischen Umfeld ermöglichen und rein erfahrungsbasierte Lösungen aus der Praxis ablösen.

Als Forschungshypothese nach KUBICEK [KUBI77, S. 25] lässt sich der Betrachtungsbereich wie folgt beschreiben:

Mit einer quantitativen Methodik zur Abstimmung vorhandener Prozessschritte für die Weiterbearbeitung additiv gefertigter Bauteile ist die anforderungsgerechte Integration additiver Fertigungstechnologien in bestehende Prozessketten möglich.

Eine weitere Konkretisierung des Erkenntnisdefizits ergibt sich nach Abschluss von Abschnitt 3.6 mit der Formulierung detaillierender Forschungsfragen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Structure of Thesis

Zum Verständnis des Aufbaus der Arbeit wird dieser nachfolgend beschrieben (Abbildung 1-1). Der Aufbau der Forschungsarbeit lehnt sich an die Ausführungen von ULRICH zur Managementforschung an [ULRI76] [ULRI01a].

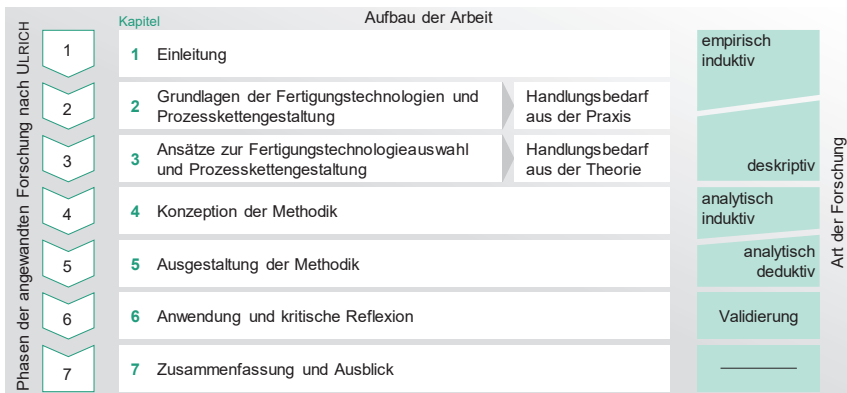


Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit, Phasen der Forschung nach ULRICH [ULRI01a, S. 194–197]

Die Phasen der angewandten Forschung nach ULRICH sind wie folgt definiert; zugeordnet sind die jeweils mit den Phasen befassten Kapitel [ULRI01a, S. 195]:

1. Erfassung und Typisierung praxisrelevanter Probleme (Kapitel 1, 2)
2. Erfassung und Interpretation problemrelevanter Theorien und Hypothesen empirischer Grundlagenwissenschaften (Kapitel 2, 3)
3. Erfassung und Typisierung problemrelevanter Verfahren der Formalwissenschaften (Kapitel 3)

4. Erfassung und Untersuchung des relevanten Anwendungszusammenhangs (Kapitel 2, 3, 4)
5. Ableitung von Beurteilungskriterien und Gestaltungsmodellen (Kapitel 4, 5)
6. Prüfung der Regeln und Modelle im Anwendungszusammenhang (Kapitel 6)
7. Beratung der Praxis (Kapitel 6, 7)

In der Einleitung als *erstem Kapitel* wird das Thema dieser Arbeit motiviert und grundlegend in den aktuellen wissenschaftlich-industriellen Kontext eingeordnet. Außerdem wird die Zielsetzung beschrieben und die Struktur der Arbeit erläutert.

Das *zweite Kapitel* umfasst den Grundlagenteil. Hierin wird der Stand der Technik untersucht und aufgearbeitet, der Betrachtungsbereich wird umrahmt. Der Stand der Technik bezieht sich auf eine Übersicht der additiven Fertigungsverfahren und deren aktuelle Leistungsfähigkeit im industriellen Einsatz. Außerdem werden relevante Weiterbearbeitungstechnologien, die allesamt subtraktiven Fertigungstechnologien zuzuordnen sind, umrissen. Als weiterer Bestandteil wird die Generierung und Ausgestaltung von Fertigungsprozessketten in das Technologiemanagement eingeordnet.

In *Kapitel 3* werden die Übersicht der Methoden zur Generierung und Ausgestaltung von Fertigungsprozessketten vertieft. Damit wird die wissenschaftliche Perspektive einbezogen. Die Vertiefung geht mit einer kritischen Auseinandersetzung und fundierten Bewertung der verfügbaren Methoden einher. Damit wird die objektivierte Auswahl von Ansätzen als Basis der weiteren Bearbeitung in den Folgekapiteln ermöglicht. Leerstellen in den Methoden können aufgedeckt und durch die vorliegende Arbeit so geschlossen werden.

Im *vierten Kapitel* wird aufbauend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 2 und 3 die Methodik konzipiert. Das Konzept bezieht vorhandene Methoden zur Prozesskettengenerierung und -ausgestaltung ein, integriert eine Fertigungsmittelbewertung sowie -auswahl und ergänzt die maßgeblichen Anforderungen der additiven Fertigung hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf subtraktive Fertigungstechnologien.

Die in erster Näherung zusammengefügtten Fragmente werden in *Kapitel 5* ausgestaltet. Dazu zählen das Modifizieren einzelner Methoden und das Etablieren von Schnittstellen, um eine holistische und vollständig ineinandergreifende Methodik zu entwickeln. Die Unterkapitel befassen sich mit den zu berücksichtigenden Bauteilen, den verfügbaren Fertigungsmitteln, der Fertigungsprozesskettengestaltung und deren anschließender Bewertung und Selektion.

Im nachfolgenden *Kapitel 6* wird die erarbeitete Methodik durch drei Praxisanwendungen validiert. Die Methodik wird schrittweise durchlaufen, wobei konkrete Anwendungsfälle aus Industrieunternehmen die Basis darstellen. Die Ergebnisse der Validierung werden abschließend einer kritischen Reflexion unterzogen.

Das *siebte Kapitel* schließt die Arbeit ab. Die erarbeiteten wissenschaftlichen Erkenntnisse werden gemeinsam mit den Ergebnissen der praktischen Nutzung der Methodik zusammengefasst. Weiterer Forschungsbedarf an den sich aus dieser Arbeit ergebenden neuen Ansätzen wird im Ausblick adressiert.