

Industrialisierung der additiven Fertigung

Horst Wildemann, Wolfgang Kersten

Horst Wildemann, Wolfgang Kersten

Industrialisierung der additiven Fertigung

Copyright by TCW Transfer-Centrum für Produktions-Logistik
und Technologie-Management GmbH & Co. KG

1. Auflage 2023

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie:

Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Wildemann, Horst; Kersten, Wolfgang:
Industrialisierung der additiven Fertigung

1. Auflage

München: TCW Transfer-Centrum für Produktions-Logistik
und Technologie-Management GmbH & Co. KG, 2023

ISBN: 978-3-947730-33-9

Verlag:

TCW Transfer-Centrum für Produktions-Logistik und Technologie-
Management GmbH & Co. KG, München

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Alle
Rechte, auch die der Übersetzung in fremde Sprachen, sind dem Verlag
vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form, auch nicht zum Zwecke der Unterrichtsgestal-
tung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet
werden.

Vorwort

3D-Druck oder additive Fertigung wird in wissenschaftlichen Artikeln, Konferenzen und auch in Zeitungen als potenzialträchtige neue Technologie angesehen. In der Entwicklung hat die additive Fertigung einen Hype erlebt. Die Möglichkeiten mit den neuen Fertigungsverfahren schienen unbegrenzt. Mittlerweile ist der Hype von der Realität eingeholt worden. Die aufwendigen Verfahren müssen sich wirtschaftlich und technisch beweisen. Zahlreiche Anwender haben die Möglichkeiten der additiven Fertigung im eigenen Unternehmen implementiert und werden jetzt mit der wirtschaftlichen Anwendung konfrontiert.

In der aktuellen Diskussion spiegelt sich eine neue Herausforderung wider, insbesondere für die Fertigung metallischer Bauteile mittels additiver Fertigung: die Industrialisierung der additiven Fertigung. Die Herausforderungen der additiven Fertigung resultieren insbesondere aus dem Bedarf der Reproduzierbarkeit der additiven Produktion, der Senkung der wiederkehrenden Produktionskosten und aus der Forderung einer stärkeren Skalierbarkeit der Verfahren. Es existieren zahlreiche Ansätze entlang der additiven Prozesskette, die eine Verbesserung der Technologieposition versprechen.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Bewertung von Ansätzen zur Industrialisierung der additiven Fertigung und die Bewertung der einhergehenden Verbesserungen. Die Industrialisierung kann nicht losgelöst für einzelne Prozessabschnitte erfolgen. Vielmehr muss die Bewertung unter Berücksichtigung aller relevanten Schritte der gesamten Prozesskette und der Interdependenzen zwischen den einzelnen Industrialisierungsansätzen erfolgen.

Aufgrund der Komplexität in der additiven Wertschöpfungskette wurde ein IT-Tool entwickelt. Mit Hilfe dessen ist es möglich, die

additive Prozesskette zu simulieren. Anhand eines simulierten Fertigungsablaufes kann die Durchlaufzeit und Auslastung einer vorhandenen oder geplanten Produktionsstätte abgebildet werden. Über Variablen kann die Kapazität in den einzelnen Prozessabschnitten der additiven Wertschöpfungskette variiert und dem Bedarf des jeweiligen Nutzers angepasst werden. Die Wirkung einer Industrialisierungsstufe wird über Variablen abgebildet, die es den Nutzern ermöglichen, selbstständig unterschiedliche Industrialisierungsstufen auszuwählen und die Wirkung der Industrialisierung zu determinieren. Mit Hilfe des IT-Tools kann der Nutzer bestimmen, welches Industrialisierungsniveau für den jeweiligen Einsatzzweck geeignet ist und welche Wirtschaftlichkeitspotenziale sich daraus ergeben.

Das Forschungsprojekt wurde in enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern durchgeführt. Für die produktiven und aufschlussreichen Diskussionen, Anregungen und Workshops bedanken wir uns bei allen Experten aus Forschung und Praxis:

AUDI AG, BMW Group, Rudolf GmbH, Knauf Gips KG, Möhlenhoff GmbH, Knorr-Bremse AG, Oerlikon AG, MT Aerospace AG, Richemont Northern Europe GmbH, Aconity3D GmbH, OTTO FUCHS KG, TÜV SÜD Product Service GmbH, Trovus Tech GmbH, pro-beam GmbH & Co. KGaA, EOS GmbH Electro Optical Systems, enter2net.com AG, 3D-BO, TOP Mehrwert-Logistik GmbH & Co. KG, LMI - Laser Melting Innovations GmbH & Co. KG, Schubert & Salzer Feinguß Lobenstein GmbH, FKM Sintertechnik GmbH, AM-Entrepreneurship consulting, Premium Aerotec GmbH, ELMESS Thermosystemtechnik GmbH & Co. KG, Fraunhofer Gesellschaft e.V., Matthies Druckguss GmbH & Co. KG, Teccon Consulting & Engineering GmbH, Felasto PUR GmbH & Co. KG, pro3D GmbH, Robert Hofmann GmbH, Replique - A Venture of

Chemovator GmbH, Mecklenburger Metallguss GmbH, FEHR-MANN GmbH, Rolf Lenk Werkzeug- und Maschinenbau GmbH.

Unser Dank gilt auch unseren Mitarbeitern Herrn Michael Schöppe M.Sc., Paul Menold M.Sc., Herrn Christoph Wenig M.Sc., Herrn Ayman Nagi M.Sc., MBA, Herrn Felix Krol M.Sc., Herrn Martin Brylowski, M.Sc., Herrn Lukas Tartler B.Sc., Herrn Tim-Niklas Mai, M.Sc., Herrn Sahel Sargand, M.Sc. und Herrn Anton Kölbel, B.Sc. für die Forschungsarbeit und für die Erstellung des Berichts.

Das Forschungsprojekt wurde unter der Vorhabenummer 21551N von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert. Für die produktive Zusammenarbeit mit der Forschungsgemeinschaft bedanken wir uns vielmals.

München, im September 2022

Hamburg, im September 2022

Horst Wildemann

Wolfgang Kersten

Gender-Hinweis

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Inhaltsverzeichnis

0	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	8
1	Einleitung.....	13
1.1	Problemstellung.....	18
1.2	Literaturanalyse.....	24
1.3	Vorgehen im Forschungsprojekt.....	31
2	Die Entwicklung der additiven Fertigung.....	35
2.1	Historische Entwicklung.....	40
2.2	Charakterisierung industrieller additiver Fertigungsverfahren	55
2.3	Das Ökosystem für die additive Fertigung.....	65
2.4	Marktentwicklung.....	71
2.5	Künstliche Intelligenz in der additiven Fertigung.....	79
3	Wertstromanalyse der additiven Fertigung.....	99
3.1	Die verfahrensübergreifende additive Wertschöpfungskette	100
3.2	Wertstromebenen der Wertschöpfungskette.....	122
3.3	Typologisierung der Werkschöpfungskette additiv gefertigter Metallbauteile.....	132
4	Marktanalyse und Branchentrends der additiven Fertigung.....	143
4.1	Materialien.....	144
4.2	Verfahren.....	152
4.3	Dienstleistungen.....	156
4.4	Produkte.....	168

4.5 Industrielle Anwendungsbereiche	173
4.6 Fallstudien.....	179
4.7 Zusammenfassung der Marktentwicklungen.....	196
5 Modell zur Bewertung von Industrialisierungsansätzen .	199
5.1 Modellbeschreibung.....	203
5.2 Nutzenbeitrag der Industrialisierungsansätze.....	279
5.3 Quantitative Wirtschaftlichkeitsbewertung der Industrialisierung	292
6 IT-Tool zur Bewertung von Industrialisierungsansätzen.	317
6.1 Beschreibung des IT-Tools.....	317
6.2 Validierung des IT-Tools.....	325
6.3 Nutzen des IT-Tools	330
7 Handlungsfelder zur Industrialisierung der additiven Fertigung.....	333
Literaturverzeichnis.....	339
Abbildungsverzeichnis.....	385
Abkürzungsverzeichnis	390
Stichwortverzeichnis.....	391
Anhang	395
Die Autoren.....	401

0 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Industrialisierung repräsentiert den nächsten großen Entwicklungsschritt in der additiven Fertigung. Sie ist eine notwendige Bedingung für eine breite Anwendung. Mit ihr können Produktivitätspotenziale additiver Fertigungsverfahren gehoben und in der Industrie umgesetzt werden. Die bereits mehrere Jahrzehnte andauernde Entwicklung des 3D-Drucks ist geprägt von Hoch- und Tiefphasen, in denen die Verfahren teils einen Hype und teils ein Tal der Ernüchterung erlebt haben. Dennoch findet sich eine steigende Zahl an Anwendungsfällen, die das Potenzial der additiven Fertigung und die Gleichwertigkeit der Produkte im Vergleich zur konventionellen Produktion beweisen. In der Anwendung stößt die Technologie dennoch immer wieder auf Hürden, wenn Unternehmen versuchen Anwendungsfälle im eigenen Produktportfolio aufzutun.

Die Technologie der additiven Fertigung ist noch nicht ausgereift. Kurze Innovationszyklen fördern ein volatiles Marktumfeld und Anlagen gelten teilweise bereits nach nur drei Jahren als technisch überholt. Auch wenn die mehrere Jahrzehnte lange Geschichte des 3D-Drucks die Erwartung weckt, dass ein Ende der Entwicklung der Produktionstechnologie erreicht sein sollte, übersteigt der Zeitraum keineswegs die Entwicklungszeiten der heute als etabliert angesehenen Technologien. Hinzu kommt, dass unter dem Begriff der additiven Fertigung nicht ein einzelnes Fertigungsverfahren, sondern eine ganze Gruppe von Verfahren subsumiert wird, die nach dem Wirkprinzip des schichtweisen Aufbaus arbeiten.

Einige additive Verfahren stehen noch ganz am Beginn ihrer Entwicklung, wurden erst vor wenigen Jahren vorgestellt und verspre-

chen weitere Produktivitätssprünge. Gleichzeitig findet kontinuierlich eine inkrementelle Verbesserung der am Markt verfügbaren Verfahren statt, die die Industrialisierung unterstützt.

Herausforderungen in der Industrialisierung der additiven Fertigung ergeben sich entlang der gesamten Prozesskette, dem Design der Bauteile, der Vorbereitung der Baujobs, aber auch bei Maschinenwechseln, Nacharbeit und Qualitätssicherungsprozessen. Hier gilt es, Prozesslücken zu schließen und einen reibungslosen Ablauf in der gesamten Wertschöpfungskette sicherzustellen. Auch besteht ein enges Zusammenspiel zwischen den in jedem Wertschöpfungsschritt eingesetzten Technologien.

Um den wirtschaftlichen Beitrag der Industrialisierung der additiven Fertigung bewerten zu können, war es zunächst notwendig, eine exemplarische Prozesskette für den 3D-Druck metallischer Bauteile abzuleiten und bestehende Ansätze den Wertschöpfungskettenabschnitten zuzuordnen. Angefangen bei einfachen Ansätzen wie der Überprüfung, ob Baumaterial vorhanden ist, reichen die identifizierten Industrialisierungsansätze hin bis zu ausgeklügelten Ansätzen der Künstlichen Intelligenz, die automatisierte Prozessabläufe mit einer höheren Flexibilität erlauben.

Als Maß für die Wirtschaftlichkeit und den Vergleich der Industrialisierungsansätze der additiven Fertigung schlagen wir den Ansatz Levelized Cost of Additive Manufacturing vor. Die Spezialisierung auf einen Anwendungsfall ermöglicht die Verringerung der Investitionen durch die Konzentration auf ein ganzheitliches Produktionskonzept. Die ganzheitliche Industrialisierung der additiven Wertschöpfungskette ist notwendig, um einen ausreichenden Reifegrad der Fertigung zu ermöglichen. Hierzu müssen alle Wertschöpfungsstufen auf ein ausreichendes Industrialisierungsniveau gehoben werden.

Der Forschungsbericht enthält diese Lösungsvorschläge. Als Eingangsgrößen des Modells wurden zunächst Industrialisierungsansätze entlang der additiven Prozesskette erfasst. Ausgehend von einer Abstraktion der durch die Industrialisierung beeinflussten Parameter konnte eine Simulation des Fertigungsablaufs durchgeführt werden. Die Analyse liefert Aussagen über den wirtschaftlichen Beitrag der Industrialisierung der additiven Fertigung unter Berücksichtigung der Interdependenzen der Industrialisierungsansätze.

Die Digitalisierung ist entscheidend für die erfolgreiche Industrialisierung der additiven Fertigung. Notwendig ist eine durchgängige Nutzung eines digitalen Zwillings, mit dem das 1:1-Abbild des realen Produktes durch den gesamten Prozess geführt werden kann. Medienbrüche und Datenverluste an einzelnen Wertschöpfungsstufen sind zu vermeiden. Diese treten vor allem bei der Überführung des Datenmodells in ein durch die additiven Fertigungsanlagen lesbares Format und bei der Übergabe der Bauteile und des digitalen Modells an die Nachbearbeitungsprozesse auf. Eine ausreichende Datenbasis und Prozesswissen erlauben die Simulation der Prozesseigenschaften und die vollständige, digitale Planung des Produktionsablaufs. Die Umfeldbedingungen können im virtuellen Raum berücksichtigt werden, um die Risiken in der realen Welt zu reduzieren.

Eine zunehmende Automatisierung trägt zur wirtschaftlichen Gestaltung von Prozessen und Produkten bei. In Hinblick auf die gesamte, additive Prozesskette besteht insbesondere ein Bedarf zur Automatisierung von Nebenprozessen im Pre- und Postprocessing.

Dem Kleinseriencharakter der additiven Fertigung bis hin zur Produktion in Losgröße eins kann durch die Flexibilität von Industrie 4.0-Methoden erfolgreich begegnet werden. Einen wesentlichen Beitrag in der Nacharbeit können auch kollaborierende Roboter leisten,

die die Maschinenbediener unterstützen oder durch einfaches Anlernen eine wirtschaftliche Alternative zur rein manuellen Bearbeitung darstellen. Insgesamt versetzen die Industrialisierungsansätze KMU in die Lage, die eigenen Fertigungsprozesse zu optimieren. Gleichzeitig verringert der Aufbau einer einheitlichen Wissensbasis das Informations- und Qualifikationsdefizit der Unternehmen und ermöglicht so eine ausgeglichene Wettbewerbsstruktur (vgl. Illgner et al. 2018).

Für produzierende KMU ergibt sich die Möglichkeit eines Benchmarkings mit anderen Akteuren im Bereich der additiven Fertigungsprozesse. Ein Leitfaden zu Industrialisierungsansätzen für die additive Fertigung wurde erstellt. Jeder Industrialisierungsansatz wurde entsprechend seiner Wirkung und Interdependenzen auf andere Wertschöpfungskettenabschnitte der additiven Fertigung hin bewertet. Das entwickelte IT-Tool bietet KMU durch die Simulation des Fertigungsablaufs unter Berücksichtigung unterschiedlicher Industrialisierungsstufen die Identifikation notwendiger Handlungsfelder.

Mit dem IT-Tool kann anhand eines simulierten Fertigungsablaufes, unter Einbezug von festgelegten Fertigungsaufträgen die Durchlaufzeit und Auslastung einer vorhandenen oder geplanten Produktionsstätte abgebildet werden. Mittels Variablen lässt sich die Kapazität in den einzelnen Prozessabschnitten der additiven Wertschöpfungskette variieren und dem Bedarf des jeweiligen Nutzers anpassen. Die Wirkung der Industrialisierung wird über Variablen abgebildet, die es den Nutzern ermöglicht, selbstständig unterschiedliche Industrialisierungsstufen des entwickelten Modells auszuwählen und so die Wirkung der Industrialisierung im unternehmensspezifischen Kontext abzubilden. Mit den in der Simulation hinterlegten Messgrößen kann der Nutzer definieren, welches Industrialisierungsniveau für ihn am

besten geeignet ist und welche Wirtschaftlichkeitspotenziale sich aus den einzelnen Maßnahmen ergeben.

Das IT-Tool ist unter folgendem Link abrufbar:

<https://cloud.anylogic.com/model/3030d1b7-4a0b-46f0-8f73-f652c6a244f4?mode=SETTINGS>

1 Einleitung

Die additive Fertigung befähigt Nutzer, komplexe Bauteildesigns und kundenindividuelle Produkte zu erstellen. Die bisherigen Anwendungen wurden stark von den Branchen der Luft- und Raumfahrt und der Medizintechnik getrieben. Mittlerweile finden sich Anwendungsbeispiele in der Automobilbranche und sind dort auch außerhalb des Premiumsegments für Kunden verfügbar. Trotz vieler Erfolgsbeispiele bestehen noch zahlreiche Hürden für den 3D-Druck. Anwender versuchen, den 3D-Druck als Substitutionstechnologie für bestehende Fertigungsverfahren einzusetzen und sehen sich mit höheren, wiederkehrenden Kosten als für die konventionelle Fertigung konfrontiert. Ein auf die Vorteile des 3D-Drucks abgestimmtes Geschäftsmodell, das auf den Kundennutzen und die Designfreiheiten der Verfahren fokussiert, ist ebenso notwendig wie die Nutzung der zunehmenden Möglichkeiten zur Verbesserung der 3D-Druckverfahren sowie der vor- und nachgelagerten Prozessschritte. Additive Fertigungsverfahren haben mit der rasanten Entwicklung der dieser Verfahrensgruppe zuzuordnenden Technologien eine Revolution in der produzierenden Industrie initiiert (vgl. Jasiuk et al. 2018).

Die Verfahren nutzen, wie in Abbildung 1-1 illustriert, ein digitales Modell sowie formloses Material, um ein Bauteil durch den schicht- bzw. linienförmigen Auftrag von Ausgangsmaterial zu erstellen (DIN EN ISO 52900).

Der Einsatzzweck der additiven Fertigung wird wie in Abbildung 1-2 in drei Bereiche unterteilt: das Rapid Prototyping, bei dem Funktionsmodelle für Entwicklungsprozesse erstellt werden, das Rapid Tooling, bei dem Werkzeuge gefertigt werden, sowie das Rapid Manufacturing, das die Fertigung von Endprodukten bezeichnet (vgl. Gebhardt 2016a; Richter und Wischmann 2016b).

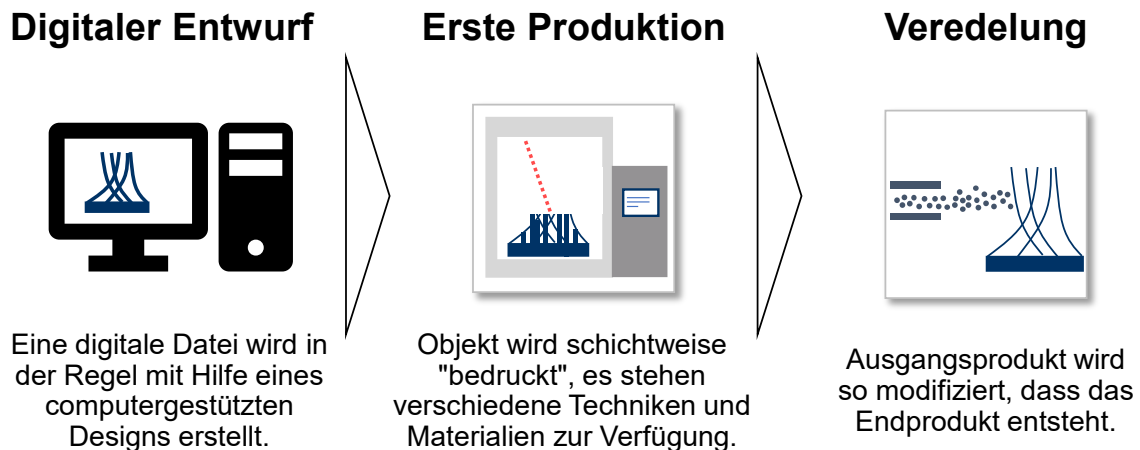


Abbildung 1-1: Funktionsprinzip der additiven Fertigung, entnommen aus Wildemann (2022)

Vorreiter in der Anwendung des Rapid Manufacturing sind die Industriebereiche der Luft- und Raumfahrt, der Medizintechnik sowie der Automobilindustrie (vgl. Wildemann 2018a; Wohlers 2019).

Der Einsatz additiv gefertigter Bauteile in sicherheitsrelevanten Bereichen wie Flugzeugtriebwerken beweist, dass derart hergestellte Bauteile die technologischen Anforderungen von sicherheitskritischen Serienbauteilen erfüllen können (vgl. Küpper et al. 2017b; Scheffels 2018a).

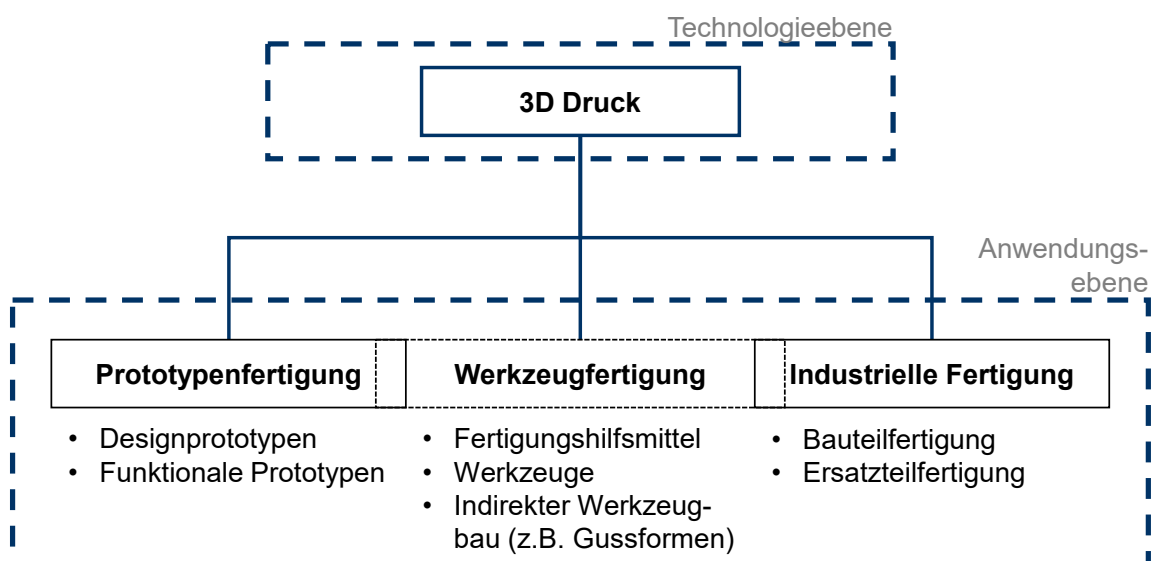


Abbildung 1-2: Anwendungsbereiche der additiven Fertigung, entnommen aus Wildemann (2022)

Die Industrialisierung der additiven Fertigung leistet einen wesentlichen Beitrag dazu, dass nicht nur die bereits demonstrierte technologische, sondern auch die wirtschaftliche Machbarkeit einer additiven Serienfertigung weiter verbessert wird. Industrialisierung bezeichnet ursprünglich den Übergang von manuellen Prozessen hin zur Erzeugung von Gütern mit wachsendem Maschineneinsatz in großgewerblicher, arbeitsteiliger Produktionsorganisation (vgl. Klodt o.J.). Analog lässt sich die Industrialisierung der additiven Fertigung als die Automatisierung, Standardisierung und Modularisierung aller additiven Fertigungsprozesse einschließlich der Vor- und Nachbereitungsprozesse sowie der Versorgungsprozesse definieren, mit dem Ziel, eine für steigende Stückzahlen ausgelegte, stabile additive Produktion zu ermöglichen. Hierdurch sollen Produktivität und Störungsfreiheit des additiven Herstellungsprozesses sichergestellt werden, sodass eine Integration in eine Werkstatt-, Gruppen- oder Fließfertigung möglich wird. Die Industrialisierung der additiven Fertigung erschließt die Reproduzierbarkeit und somit Vergleichbarkeit der erstellten Bauteile (vgl. Zeyn 2017). Das Ziel des Forschungsprojektes lag in der Entwicklung eines Modells, das eine Bewertung und Auswahl von Industrialisierungsansätzen im Sinne von Verfahrens- und Technologieinnovationen oder Organisationsinnovationen ermöglicht (vgl. Vahs und Brem 2015). Die Innovationen zur Industrialisierung der additiven Fertigung werden in den einzelnen Wertschöpfungsabschnitten der Prozesskette der additiven Fertigung umgesetzt. Für die vorliegende Ausarbeitung erfolgte eine Fokussierung auf die Gruppe der metallbasierten additiven Verfahren. Hierzu wurden Industrialisierungsansätze entlang der additiven Wertschöpfungskette erarbeitet und hinsichtlich ihres Beitrags zur Optimierung des Wertstroms sowie der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von additiver Fertigung bewertet.

Die Industrialisierung der 3D-Druckverfahren verändert die potenziellen Anwendungsfelder, weg von der Prototypen-, Werkzeug- und Sonderbauteilfertigung, hin zu einer Serienfertigung in kleinen und mittleren Stückzahlen.

Die Lösungsansätze verbessern

- die Verfügbarkeit und Einsatzfähigkeit verschiedener Materialien,
- die aus dem Einsatz der additiven Fertigung resultierenden Herstellkosten,
- die Implementierungshürden der Verfahren,
- die Möglichkeiten der Qualitätssicherung additiv gefertigter Produkte und
- die Reproduzierbarkeit des additiven Fertigungsprozesses.

Einem weitläufigen Einsatz additiver Fertigungsverfahren für die Produktion von Endbauteilen stehen derzeit hohe variable Herstellkosten sowie Unsicherheiten in Bezug auf die Qualität von additiv gefertigten Bauteilen entgegen (vgl. Caviezel et al. 2017; Baumers et al. 2016). Für die Reduktion der Herstellkosten additiver Fertigungsverfahren ist der gesamte Wertschöpfungsprozess zu berücksichtigen, um indirekte Effekte wie verringerte Montagezeiten oder eine Funktionsintegration abzubilden und Optimierungspotenziale aufzudecken (vgl. Fiedler 2018). Eine rein technologische Optimierung des Druckprozesses selbst ist nicht ausreichend. Die Industrialisierung der additiven Fertigung über den gesamten Wertschöpfungsprozess verspricht, unabhängig von der verwendeten Technologie, die in Abbildung 1-3 gezeigte Reduktion der Kosten, bei gleichzeitiger Steigerung der Produktivität der Prozesse und der Qualität der Endprodukte (vgl. Möhrle 2018).