

# Wertschöpfungskette der additiven Fertigung

## Entwicklung einer KMU-spezifischen Wertschöpfungskette für additiv gefertigte Endbauteile aus Metall

Tim Niklas Mai, Martin Brylowski, Ayman Nagi und Wolfgang Kersten, Technische Universität Hamburg

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen durch das schichtweise Auftragsprinzip die wirtschaftliche Herstellung komplexer Bauteile in geringen Stückzahlen und gewinnen in der Industrie zunehmend an Bedeutung. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) profitieren von dem hohen Individualisierungspotenzial und können neue Geschäftsmodelle erschließen. Dem flächendeckenden Einsatz additiver Verfahren stehen allerdings hohe Fertigungskosten und technologische Herausforderungen gegenüber. Die Forschung konzentriert sich derzeit auf die singuläre Optimierung einzelner Prozessschritte der additiven Fertigung und bietet für KMU keine ausreichende Hilfestellung. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich der vorliegende Beitrag mit der Entwicklung einer verfahrensübergreifenden Wertschöpfungskette der additiven Fertigung für KMU. Auf Basis einer systematischen Analyse wissenschaftlicher Literatur wurden relevante Fertigungsverfahren untersucht und eine verfahrensübergreifende Wertschöpfungskette abgeleitet. Die Ergebnisse wurden durch leitfadengestützte Experteninterviews verifiziert und zentrale Forschungs- und Entwicklungsbedarfe hergeleitet.

Die additive Fertigung hat sich in den letzten drei Jahrzehnten zu einer der weltweit bedeutendsten Herstellungstechnologien entwickelt und eine regelrechte Revolution der industriellen Fertigung bewirkt [1, 2]. Die in Medien und Öffentlichkeit oftmals unter dem einprägsamen Begriff *3D-Druck* bezeichnete Technologie unterscheidet sich fundamental zu allen bisher bekannten konventionellen Fertigungsverfahren: Die gewünschte Produktgeometrie wird nicht durch das Abtragen oder Verformen vorhandenen Materials erreicht, sondern sukzessive durch wiederholtes Generieren und Aneinanderfügen kleiner Volumenelemente, bis das dreidimensionale Bauteil die angestrebte Form erreicht hat [3, 4]. So erlaubt die werkzeuglose Produktion unmittelbar aus einer digitalen Datei die stückzahlunabhängige Fertigung hochkomplexer kundenindividueller Bauteile und bietet das Potenzial, die Durchlaufzeit und Komplexität der gesamten Wertschöpfungskette zu reduzieren [5-7].

Dem gegenüber stehen gegenwärtig hohe Fertigungszeiten und -kosten der wenig integrierten Herstellungsanlagen sowie diverse technologische Herausforderungen, die sowohl in einer geringen Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität als auch in kostenintensiven und arbeitsaufwendigen Nachbearbeitungsschritten münden. Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die additive Fertigung zum jetzigen Zeitpunkt primär in Nischenmärkten wettbewerbsfähig ist und nur zögerlich zur Herstellung von Endprodukten industrieweit Anwendung findet [1, 2, 8-10].

Zur übergreifenden Optimierung der Prozesse und Erschließung der Potenziale einer umfangreichen Industrialisierung bedarf es umfassender Untersuchungen der gesamten additiven Wertschöpfungskette. Ziel des Beitrags ist daher die Entwicklung einer verfahrensübergreifenden Wertschöpfungskette der additiven Fertigung von Endbauteilen aus Metall bei KMU der

### Additive Manufacturing Value Chain – Development of an SME-Specific Value Chain of Additively Manufactured Final Metal Parts

Additive manufacturing processes are becoming increasingly important in industry and enable the cost-effective production of complex components in small quantities. Small and medium-sized enterprises (SMEs) in particular can benefit from the high customization potential enabling the development of new business models. However, the widespread use of additive processes faces high production costs and technological challenges. Meanwhile, scientific research focuses on the optimization of individual process steps of additive manufacturing and does not offer sufficient support for SMEs. Therefore, this paper deals with the development of a cross-process value chain of additive manufacturing for SMEs. Based on a systematic analysis of scientific literature, relevant additive manufacturing processes were investigated, and a cross-process value chain was derived. The results were verified by expert interviews and central research and development requirements were extracted.

#### Keywords:

additive manufacturing, 3D printing, value chain, SME, industry 4.0

Tim Niklas Mai, M. Sc. war Masterand am Institut für Logistik und Unternehmensführung an der Technischen Universität Hamburg und arbeitet jetzt in einer Unternehmensberatung.

Martin Brylowski, M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Logistik und Unternehmensführung an der Technischen Universität Hamburg.

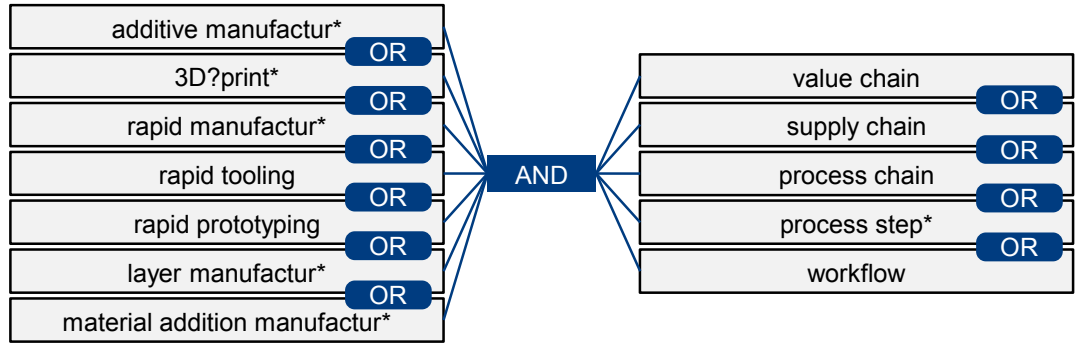
Ayman Nagi, M. Sc. MBA ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Logistik und Unternehmensführung an der Technischen Universität Hamburg.

Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten leitet das Institut für Logistik und Unternehmensführung an der Technischen Universität Hamburg.

logu@tuhh.de  
www.logu.tuhh.de



Bild 1: Suchbegriffe der systematischen Literaturrecherche.



produzierenden Industrie und auf deren Grundlage Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für den erfolgreichen Einsatz additiver Fertigungsverfahren in KMU zu gegeben.

### Methodisches Vorgehen

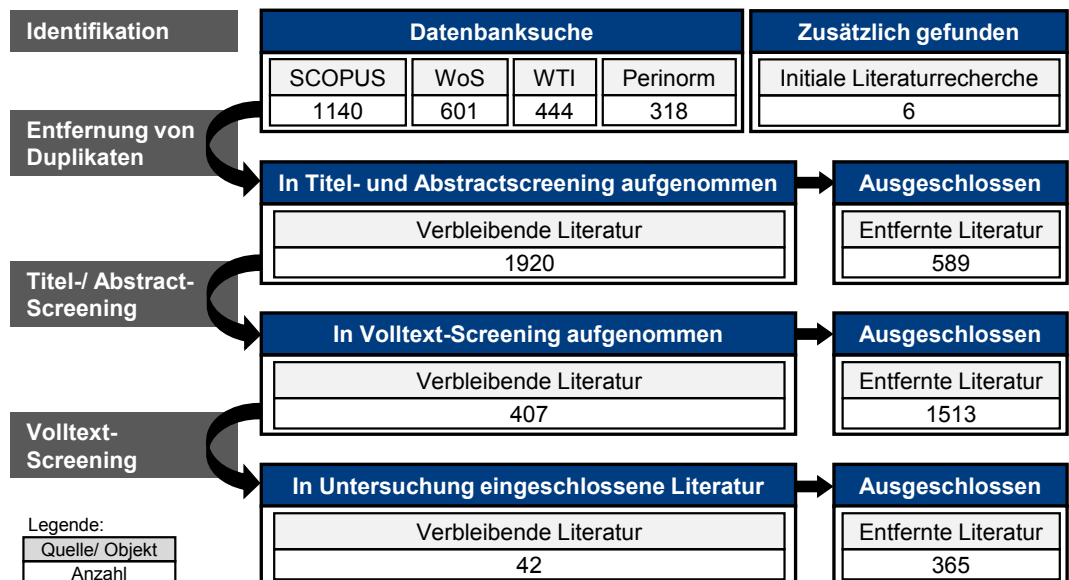
Zur Bearbeitung der Problemstellung wurde ein zweistufiges Forschungsdesign erarbeitet. In der ersten Stufe wurde eine systematische Literaturrecherche (SLR) in Anlehnung an [11] und [12] durchgeführt, welche den Stand der Forschung umfassend abbilden konnte. In der zweiten Stufe wurden die zuvor generierten Ergebnisse mithilfe von leitfadengestützten Experteninterviews angereichert und verifiziert.

Als Datenbasis für die Literaturrecherche wurden im ersten Schritt vier interdisziplinäre Datenbanken ausgewählt („Scopus“, „Web of Science“, „WTI Frankfurt“ und „Perinorm“). Durch die Verwendung der wissenschaftlichen Datenbanken „Scopus“ und „Web of Science“ werden sowohl betriebswirtschaftliche als auch ingenieur- und naturwissenschaftliche, peer-reviewte Publikationen in den Literaturbestand einbezogen. Um die Weite des Suchfelds auszuweiten, wurde ergänzend die Datenbank „WTI

Frankfurt“ mit einem Fokus auf technisch-wissenschaftliche Beiträge herangezogen. Die Datenbank „Perinorm“ enthält nationale, europäische und internationale Normen und findet vor dem Hintergrund der zunehmenden Standardisierung und Normierung in der additiven Fertigung Berücksichtigung. Zur Durchführung der SLR wurden auf Basis intensiver Vorrecherchen relevanten Suchbegriffe definiert und mithilfe von booleschen Operatoren („OR“ und „AND“) zu einem Suchstring verknüpft (Bild 1).

Dieser Suchstring wurde, angepasst an der jeweiligen Syntax, auf alle vier Datenbanken angewandt und ergab nach der Entfernung von Duplikaten eine kumulierte Anzahl von 1920 Ergebnissen. Zur Prüfung und Eingrenzung der Ergebnisse hinsichtlich ihrer formalen und inhaltlichen Eignung für die Zielsetzungen dieses Beitrages wurden Selektionskriterien definiert und stufenweise angewandt. So wurden die Ergebnisse in einem Titel- und Abstract-Screening sowie nachfolgendem Volltext-Screening schrittweise reduziert und 42 verbleibende Beiträge als relevant eingestuft. Das detaillierte Vorgehen der systematischen Literaturrecherche ist in Bild 2 beschrieben.

Bild 2: Vorgehen in der systematischen Literaturrecherche.



In der zweiten Stufe des Forschungsdesigns wurde der aktuelle Stand der Praxis zur Anreicherung und Verifizierung der Wertschöpfungskette im Rahmen von leitfadengestützten Experteninterviews nach [13] erhoben. Hierfür sind insgesamt acht Experten in acht verschiedenen Unternehmen befragt worden. Die Interviews dauerten zwischen 26 und 64 Minuten (der Durchschnitt liegt bei 41 Minuten) und wurden anschließend nach wissenschaftlichen Vorgaben transkribiert. Für ein umfassendes Verständnis der Wertschöpfungskette schließt die Untersuchung neben Interviews mit Führungskräften in KMU ebenfalls zwei Interviews mit Experten aus Unternehmensberatungen ein, wodurch wertvolle unternehmens- und branchenübergreifende Einblicke aus Beratungsprojekten gewonnen wurden. Die Zusammensetzung des Samples ist Bild 3 zu entnehmen.

Die Wertschöpfungskette wird in Anlehnung an das prozessorientierte Modell nach Porter [14] entwickelt. Neben den Vorteilen der einfachen Systematisierung und Analyse von Prozessschritten eignet sich dieses ebenfalls als gestaltungsbezogenes Instrument [15] und unterstützt somit im Forschungsprozess die Untersuchung von Interdependenzen zwischen Wertaktivitäten sowie nachfolgend deren Optimierung [2, 16]. Die untersuchten KMU lassen sich innerhalb eines Wertsystems zwischen den vor- und nachgelagerten Wertketten (Lieferanten- und Vertriebskanalwertketten) einbetten [17]. Wie sich aus der Literaturrecherche ableiten lässt, betrachtet die Forschung die vorgelagerten Wertaktivitäten bisher nur in geringem Umfang. Daher werden in der vorliegenden Untersuchung neben der Wertschöpfungskette des produzierenden Unternehmens zusätzlich die vorgelagerte Werkstoffherstellung (speziell: Pulverherstellung) als essenzieller Bestandteil der Wertschöpfungsaktivitäten untersucht und deren Auswirkungen auf die Prozessleistung und Qualität der Endbauteile dargestellt [18, 19].

### Eingrenzung der additiven Fertigungsverfahren

Die Leistungsfähigkeit der additiven Fertigung zur Herstellung von Endbauteilen ist in Forschung und Praxis bereits vielfach bestätigt worden [18, 20, 21] [Interview 1-8]. Im Gegensatz zur Prototypenfertigung ist die additive Herstellung von Endbauteilen [3, 4] allerdings noch nicht vollständig ausgereift [8, 22]. Im Zuge des Markteintritts namhafter Maschinenhersteller und die Kommerzialisierung neuer sowie Weiterentwicklung bestehender Verfahren steigt zugleich die Verfahrensvielfalt stetig [2]. Im Metallbereich lassen sich mittlerweile

| #               | Kernrolle im Ökosystem additive Fertigung      | Position im Unternehmen   | Kompetenzen in der additiven Wertschöpfungskette |    |      |
|-----------------|--|---------------------------|--|----|------|
|                 |  |                           | Pre  | In | Post |
| 1               | Produzierendes KMU                             | Geschäftsführer           | ●  | ●  | ●    |
| 2               | Produzierendes KMU                             | Leiter Produktion         | ●  | ●  | ◐    |
| 3               | Produzierendes KMU                             | Geschäftsführer           | ◐  | ●  | ●    |
| 4               | Spezialisierte Beratung für additive Fertigung | Geschäftsführer           | ●  | ●  | ●    |
| 5               | Produzierendes KMU                             | Leiter Additive Fertigung | ●  | ●  | ◐    |
| 6               | Produzierendes KMU                             | Forschung & Entwicklung   | ◐  | ●  | ◐    |
| 7               | Produzierendes KMU                             | Leiter Additive Fertigung | ●  | ●  | ●    |
| 8               | Strategieberatung                              | Strategieberater          | ●  | ●  | ●    |
| Nicht vorhanden |  | Teilweise vorhanden ◐     | Vollumfänglich vorhanden ●                       |    |      |

18 additive Fertigungsverfahren differenzieren [23]. Für die Ableitung einer verfahrensübergreifend gültigen Wertschöpfungskette bedarf es daher zunächst einer Untersuchung und Eingrenzung der additiven Fertigungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für die hier betrachtete Herstellung von Endbauteilen.

Als technologisch fortschrittlichste Verfahrensklasse ist die Eignung pulverbettbasierter Verfahren in Forschung und Praxis unbestritten [4, 9, 24-27] [Interview 1-8]. Das hier einzuordnende selektive Laserstrahlschmelzen zeichnet sich insbesondere durch die erzielbaren Genauigkeiten und Oberflächengüten in Verbindung mit hohen Festigkeitswerten aus [4, 28]. Diese für KMU besonders bedeutenden Faktoren gehen allerdings mit geringen Aufbauraten und entsprechend hohen Fertigungskosten einher [29] [Interview 1-3, 5]. Das ebenfalls pulverbettbasierte Elektronenstrahlschmelzen verfügt über vergleichbare Eigenschaften. Neben einer verringerten Werkstoffauswahl [Interview 3] erzielt das Verfahren aber aufgrund der höherer Strahlleistung auch größere Aufbauraten bei entsprechend geringeren Oberflächengüten [19, 30]. Für die binderbasierten Verfahren wie bspw. das Binderjetting [31] oder die Materialextusion [29] prognostiziert die Forschung trotz weitgehender Verzugsproblematiken im Sinterprozess große Kosten- und Geschwindigkeitsvorteile bis hin zu einer wirtschaftlichen Massenproduktion [29]. Die vielfach betonten Effizienzvorteile [9, 29, 31], konnten – Stand jetzt – in den befragten KMU aufgrund der geringen Bauteilqualitäten aber noch nicht umgesetzt werden [Interview 1-8].

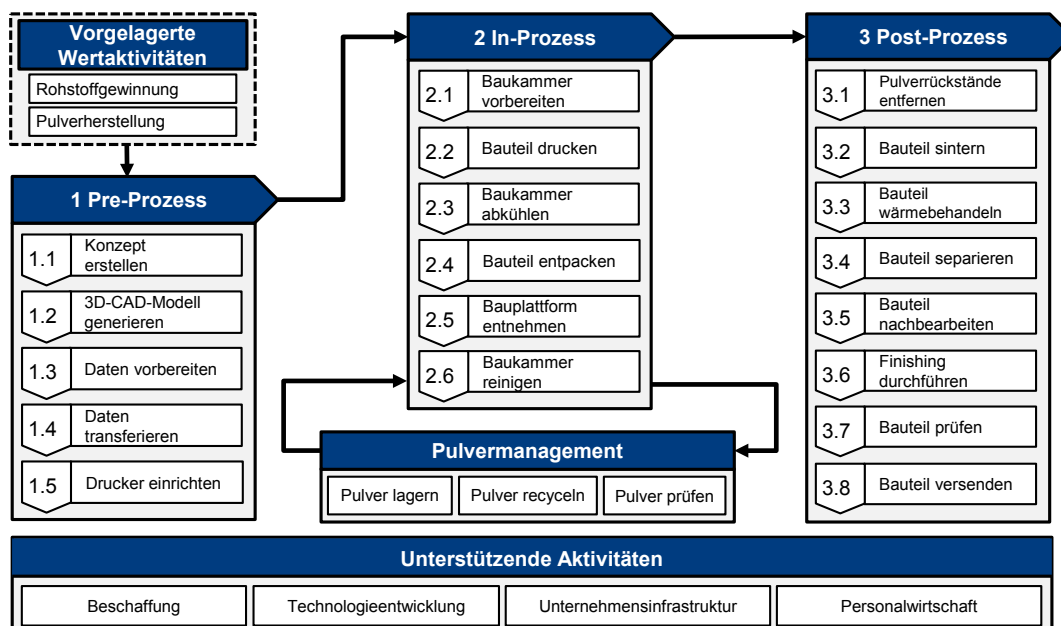
Neben den in KMU etablierten pulverbettbasierten Verfahren sind daher ebenfalls die in der Entwicklung befindlichen und potenziell reichen binderbasierten Verfahren in die weitere Untersuchung eingeschlossen.

**Bild 3: Expertenauswahl der Praxiserhebung.**

#### Literatur

- [1] Almeida, H.; Vasco, J.: Expectations of Additive Manufacturing for the Decade 2020–2030. In: H. A. Almeida und J. C. Vasco (Hrsg): Progress in Digital and Physical Manufacturing. Cham 2003.
- [2] Wildemann, H.: 3D-Metalldruck. Wertschöpfungskette - Teileaushilf - Industrialisierung - Wirtschaftlichkeit - Einführungsstrategien, 1. Auflage. München 2019.
- [3] Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion, 5. Auflage. München 2016.
- [4] Grund, M.: Implementierung von schichtadditiven Fertigungsverfahren - mit Fallbeispielen aus der Luftfahrtindustrie und Medizintechnik. Springer Berlin Heidelberg 2015.
- [5] Witt, E.; Anton, C.: Additive Fertigung. Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen. Halle (Saale) 2020.
- [6] Auth, C.; Arndt, A.; Anderl, R.: Development of a Concept for a Holistic Knowledge-Based Additive Manufacturing over the Entire Lifecycle. In: P. Chiabert, A. Bouras, F. Noël und J. Rios (Hrsg): Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0. Cham 2018.
- [7] Kunovjaneck, M.; Reiner, G.: How will the Diffusion of Additive Manufacturing Impact the Raw Material Supply Chain Process? In: International Journal of Production Research 58 (2020) 5, S. 1540–1554.
- [8] Polenz, S.; Oettel, M.; Lopez, E.; Leyens, C.: Hybride Prozesskette aus Gießen und additiver Fertigung. In: Lightweight Design 12 (2019) 1, S. 58–63.
- [9] Durach, C. F.; Kurpjuweit, S.; Wagner, S. M.: The Impact of Additive Manufacturing on Supply Chains. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 47 (2017) 10, S. 954–971.
- [10] Schmidt, M.; Merklein, M.; Bourell, D.; Dimitrov, D.; Hausotte, T.; Wegener, K.; Overmeyer, L.; Vollertsen, F.; Levy, G. N.: Laser Based Additive Manufacturing in Industry and Academia. In: CIRP Annals 66 (2017) 2, S. 561–583.

**Bild 4: Verfahrensübergreifende Wertschöpfungskette der additiven Fertigung in KMU.**



### Entwicklung der verfahrensübergreifenden Wertschöpfungskette

Nach intensiver Auswertung der identifizierten Literatur sowie der durchgeführten Experteninterviews lässt sich auf Grundlage der im vorherigen Absatz eingeschlossenen Technologien eine verfahrensübergreifende Wertschöpfungskette für die additive Fertigung in KMU ableiten. Diese gliedert sich auf der obersten Betrachtungsebene in vorgelagerte Wertaktivitäten zur Rohstoffherstellung und im Unternehmen selbst in den Pre-, In- und Post-Prozess sowie das Pulvermanagement. Bild 4 zeigt die erstellte Wertschöpfungskette, die sich bei zunehmender Granularität in 22 Teilprozesse ausdetaillieren lässt.

Der Pre-Prozess beinhaltet alle Wertaktivitäten, die vor dem eigentlichen Druckprozess durchgeführt werden. Diese sind primär digitaler Natur und betreffen neben der Erstellung eines digitalen Schichtmodells u. a. auch den in der Forschung breit diskutierten Ansatz der Optimierung unter mehrfacher Zielsetzung. Hierbei werden neben einer alleinigen lastbezogenen Topologieoptimierung [26, 27] auch die Anforderungen der Post-Prozesse sowie produktions- und kostenorientierte Aspekte in die Optimierung mit einbezogen [32, 33]. Weitergehende Untergliederungen und das Aufzeigen der Interdependenzen einzelner Wertaktivitäten sollen exemplarisch anhand der Datenvorbereitung in 1.3 verdeutlicht werden. So wirkt sich die hier durchzuführende Bauteilpositionierung und -orientierung neben der Bauraumauslastung auch bereits auf die Maßhaltigkeit und mechanischen Bauteileigenschaften aus und bestimmt darüber hinaus in großen Teilen die Durchlaufzeit

sowie Produktionskosten [2, 10, 32]. Die Datenvorbereitung hat daher bereits signifikante wirtschaftliche, ökologische und materialwissenschaftliche Implikationen auf den weiteren Fertigungsprozess [10, 34].

Der In-Prozess bezeichnet daraufhin den eigentlichen Druckvorgang und schichtweisen Aufbau des Produkts auf der Anlage. Er fungiert somit zur Umsetzung der im Pre-Prozess definierten Fertigungsoperationen [3, 24, 27, 35].

Der Post-Prozess umfasst anschließend die verfahrensbedingt nötigen Nachbearbeitungsschritte, die auf einem breiten Spektrum an konventionellen Fertigungstechnologien [36] basieren und nach dem gegenwärtigen Entwicklungsstand bei allen additiven Fertigungsverfahren in unterschiedlicher Ausprägung erforderlich sind. Die unmittelbare Nutzung der gedruckten Bauteile ist neben verfahrensspezifischen Besonderheiten, wie z. B. der Verwendung von Supportstrukturen, insbesondere aufgrund der ungenügenden Maßhaltigkeit und im Vergleich zur subtraktiven Fertigung schlechteren Oberflächenqualität, nicht möglich [10, 24, 37]. Forschung und Praxis zeichnen hier ein zeitintensives, hochgradig manuelles Bild des Post-Prozesses, der wiederum primär physisch abläuft und die Kosten des eigentlichen Druckvorgangs weit überschreiten kann [3, 25].

Hauptaufgabe des Pulvermanagements ist es, den für den In-Prozess benötigten Massenrohstoff als primären materiellen Produktionsfaktor in der geforderten Spezifikation bereitzustellen [18, 19, 38]. Dies kann zeitlich unabhängig vom Druckprozess erfolgen und wird als Kreislauf um den In-Prozess abgebildet [2, 25, 28].

[11] Fink, Arlene (2014): Conducting research literature reviews - From the Internet to Paper, 4. Auflage. Los Angeles 2014.

[12] Tranfield, D.; Denyer, D.; Smart, P.: Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. In: British Journal of Management 14 (2003) 3, S. 207–222.

[13] Gläser, J.; Laudel, G.: Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrument rekonstruierender Untersuchungen, 4. Auflage. Wiesbaden 2010.

[14] Porter, M. E.: Wettbewerbsvorteile (Competitive advantage). Spitzenleistungen erreichen und behaupten, 1. Auflage. Frankfurt a. M. (1989).

[15] Töpfer, A.: Betriebswirtschaftslehre. Anwendungs- und prozessorientierte Grundlagen, 2. Auflage. Berlin Heidelberg 2007.

[16] Oehlich, M.: Betriebswirtschaftslehre. Eine Einführung am Businessplan-Prozess, 2. Auflage. München 2010.

[17] Porter, M. E.: Wettbewerbsstrategie (Competitive strategy). Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten, 10. Auflage. Frankfurt a. M. 1999.

[18] Thornton, A.; Saad, J.; Clayton, J.: Measuring the critical attributes of AM powders. In: Metal Powder Report 74 (2019) 6, S. 314–319.

[19] Dawes, J.; Bowerman, R.; Trepleton, R.: Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. In: Johnson Matthey Technology Review 59 (2015) 3, S. 243–256.

[20] Jimo, A.; Braziotis, C.; Rogers, H.; Pawar, K.: Traditional vs Additive Manufacturing Supply Chain Configurations: A Comparative Case Study. In: Procedia Manufacturing 39 (2019) 1, S. 765–774.

[21] Alkahtani, M.; Abidi, M. H.: Supply Chain in The Era of Additive Manufacturing. In: Garza-Reyes, A. (Hrsg.): International Conference on Industrial Engineering and Operations management. Pilsen 2019.

[22] Verboeket, V.; Krikke, H.: The Disruptive Impact of Additive Manufacturing on Supply Chains: A Literature Study, Conceptual Framework and Research Agenda. In: Computers in Industry 111 (2019) 1, S. 91–107.

[23] Munsch, M.; Schmidt-Lehr, M.; Wysocki, E.: Additive Manufacturing - New Metal Technologies, 6. Auflage. Hamburg 2020.

[24] Yusuf, S. M.; Cutler, S.; Gao, N.: Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry. In: Metals 9 (2019) 12, S. 1286.

[25] Denkena, B.; Dittrich, M.-A.; Henning, S.; Lindecker, P.: Investigations on a Standardized Process Chain and Support Structure related Rework Procedures of SLM Manufactured Components. In: 18th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry (2018), S. 50–57.



Die sekundären Wertaktivitäten Beschaffung, Technologieentwicklung, Unternehmensinfrastruktur und Personalwirtschaft unterstützen und koordinieren die vier Prozesse [3, 19, 27, 29, 39].

### Verifikation der Wertschöpfungskette

Durch die Experteninterviews konnte die entwickelte Wertschöpfungskette abschließend verifiziert und weitere KMU-spezifische Besonderheiten identifiziert werden [Interview 1-8]. Zwei Drittel der befragten KMU führen die in Bild 4 aufgezeigten Wertaktivitäten primär unternehmensintern durch. Einzelne Prozessschritte werden bauteil- und kundenabhängig allerdings auch fremdvergeben [Interview 1-3, 5-7]. Dies betrifft insbesondere hochkomplexe Verfahren des Post-Prozesses wie z. B. Wärmebehandlungsverfahren zur Porositätsreduzierung oder speziellen Verfahren der Bauteilprüfung. Die Hauptursache liegt meist in der Vielfältigkeit und Komplexität der Prozessschritte und den damit einhergehenden hohen Investitionsbedarfen in Humankapital und Maschinen. KMU lagern diese Schritte aufgrund ihrer geringen Ressourcenausstattung daher oft an spezialisierte externe Dritte aus und halten hierfür keine internen Kapazitäten vor [Interview 1-3, 5-7].

### Ableitung von Forschungs- und Entwicklungsbedarfen für den erfolgreichen Einsatz additiver Fertigungsverfahren in KMU

Der Forschungsprozess gab einen umfangreichen Überblick über die Barrieren von KMU beim Einsatz additiver Verfahren. Die Herausforderungen wurden nach dem MTO-Ansatz von Strohm und Ulich [40] in die Klassen Mensch, Technik

| Problemstellung  | Empfehlung  | Auswirkung auf KMU   |
|--|---|--|
| <b>Handlungsfeld: Pre-Prozess</b>  |   |  |
| Komplexe Software mit geringer Nutzerfreundlichkeit  | Intuitive Software-Lösungen nach dem Vorbild konventioneller Fertigungsverfahren  | <input type="checkbox"/> Mitarbeiter können auf vorhandenes Erfahrungswissen zurückgreifen<br><input type="checkbox"/> Vereinfachte Anwendung ohne Umschulung<br><input type="checkbox"/> Weniger Kontroll- und Personalaufwand  |
| Eigenspannungen führen zu manuellem Post-Prozess und langen Durchlaufzeiten                                      | Weiterentwicklung der Simulation wärmeinduzierter Verzüge im In-Prozess   | <input type="checkbox"/> Verzugsoptimierte Konstruktion<br><input type="checkbox"/> Geringerer Bedarf an fremdvergebenen Wärmebehandlungsschritten, geringere Durchlaufzeiten<br><input type="checkbox"/> Reduzierter Personalaufwand im Post-Prozess  |
| Rechenaufwand der Simulationen führt zu Inflexibilität   | Cloudbasierte Lösungen  | <input type="checkbox"/> Hohe Rechenleistungen erlauben schnellen und flexiblen Einsatz der Simulationen<br><input type="checkbox"/> Moderate Kosten trotz unregelmäßigen Bedarfs  |
| <b>Handlungsfeld: Werkstoffe und Zertifizierung</b>  |   |  |
| Geringe Werkstoffauswahl zu hohen Kosten, Optimierung nur hinsichtlich Verarbeitbarkeit                          | Intensivierung der Werkstoffentwicklung und gleichzeitige Zertifizierung der Werkstoffe   | <input type="checkbox"/> Erhöhung der Einsatz- und Konstruktionsmöglichkeiten<br><input type="checkbox"/> Ermöglicht werkstoffunabhängige Zertifizierung der Wertschöpfungskette   |
| Nicht standardisierter und intransparenter Markt für Pulverwerkstoffe, oftmals singuläre Optimierungen           | Materialdatenbank für additive Fertigung, Analyse der Interaktion Pulvermorphologie - Maschinenparameter - Bauteilqualität über Mustererkennung | <input type="checkbox"/> Intensiver Erfahrungsaustausch zw. Akteuren<br><input type="checkbox"/> Wissensaufbau beim Zusammenhang Pulverbeschaffenheit – Maschineneinstellung - Bauteilqualität<br><input type="checkbox"/> Werkstoffindividuelle, verbesserte Simulationen<br><input type="checkbox"/> Reduzierter Nachbearbeitungsaufwand und optimierte Reproduzierbarkeit |
| Prophylaktische Entsorgung von Restpulver  | Definition von Limits/ Standards für Pulverqualität   | <input type="checkbox"/> Ressourcenschonendere Produktion<br><input type="checkbox"/> Glaubhaftere Darstellung des ressourcenschonenden Images additiver Fertigung   |
| Einführung von Standards herausfordernd für KMU  | Verbindliche Vorgaben von staatlicher Seite   | <input type="checkbox"/> Mindestmaß an Gleichheit/ konstante Basis<br><input type="checkbox"/> Unterstützung der Zertifizierungsbestrebungen   |
| <b>Handlungsfeld: Vernetzung der KMU und kundenseitige Wissensdefizite</b>                                       |   |  |
| Informationsnachteil gegenüber Anlagenherstellern, kostenintensive Updates                                       | Vernetzung der KMU durch Kooperationen, brancheninternes Benchmarking   | <input type="checkbox"/> Strukturierterer Informationsaustausch über Anlagen-Updates und Entwicklungsbedarfe<br><input type="checkbox"/> Fundiertere Kaufentscheidung, gewinnmaximierender Einsatz der begrenzten Ressourcen   |
| Kundenseitige Defizite hinsichtlich Potentiale und additiver Fertigungsprozess, tradierte Konstruktionsdenkweise | Proaktive Initiierung von Weiterbildungsmaßnahmen für Kunden im Rahmen der Kooperationen  | <input type="checkbox"/> Vollumfängliches Ausnutzen der Potentiale<br><input type="checkbox"/> Reduzierter Entwicklungsaufwand und Kommunikationsaufwand mit Kunden im Pre-Prozess<br><input type="checkbox"/> Erschließung neuer Umsatzquellen durch Kontaktherstellung und Bindung von Neukunden   |

und Organisation gegliedert und weisen in allen Klassen auf einen noch nicht vollumfänglich erfolgreichen und reifen Einsatz additiver Technologien hin. In der Klasse „Mensch“ stellen insbesondere das mangelnde Erfahrungswissen und die Softwarelösungen sowie die Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten die KMU vor große Herausforderungen. In der technischen Klasse dominieren anlagenspezifische Probleme hinsichtlich der Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit des In-Prozesses sowie damit einhergehend der Bedarf an manuellen Nachbearbeitungsschritten im Post-Prozess. In der Klasse „Organisation“ wurden als Herausforderungen die tradierten Konstruktionsdenkweisen der Kunden in Kombination mit fehlendem Wissen

**Bild 5: Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für den erfolgreichen Einsatz von additiven Fertigungsverfahren in KMU.**

- [26] López, E.; Tradowsky, U.; Brückner, F.; Leyens, C.: Additive Herstellung topologieoptimierter Großbauteile. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 120 (2018) 1, S. 56–61.
- [27] Gibson, J.; Rosen, D.; Stucker, B.: Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York 2015.
- [28] Möhrle, M.: Gestaltung von Fabrikstrukturen für die additive Fertigung. Berlin Heidelberg 2018.
- [29] Rane, K.; Strano, M.: A Comprehensive Review of Extrusion-based Additive Manufacturing Processes for Rapid Production of Metallic and Ceramic Parts. In: Advances in Manufacturing 7 (2019) 2, S. 155–173.
- [30] Norm DIN EN ISO/ASTM 52911-1: Additive Fertigung-Konstruktion-Teil1: Laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen. Berlin 2019.
- [31] Huang, S. H.; Liu, P.; Mokasdar, A.; Hou, L.: Additive Manufacturing and its Societal Impact: a Literature Review. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 67 (2013) 5-8, S. 1191–1203.
- [32] Rudolph, J.-P.: Cloudbasierte Potentialschließung in der additiven Fertigung. Berlin Heidelberg 2018.
- [33] Rohde, J.; Lindemann, C. F.; Jahnke, U.; Kruse, A.; Koch, R.: Technology Integration into Existing Companies. In: D. L. Bourell, J. J. Beaman, R. H. Crawford, S. Fish und C. C. Seepersad (Hrsg.): 29th Annual International Solid Freeform Fabrication. Texas 2018.
- [34] Shah, S.; Mattiuzza, S.: Adoption of Additive Manufacturing Approaches: The Case of Manufacturing SMEs. In: G. Baltes und M. König (Hrsg.): 24th International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/IEEE ITMC). Stuttgart 2018.
- [35] VDI-Richtlinie VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin 2014.
- [36] Norm DIN 8580: Fertigungsverfahren-Begriffe, Einteilung. Berlin 2003.
- [37] Simoni, F.; Huxol, A.; Villmer, F.-J.: Approach Towards Surface Improvement in Additively Manufactured Tools. In: 13th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems IMS 52 (2019) 10, S. 254–259.
- [38] VDI-Richtlinie VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren – Strahlschmelzen metallischer Bauteile – Charakterisierung von Pulverwerkstoffen. Berlin 2018.
- [39] Belkadi, F.; Vidal, L. M.; Bernard, A.; Pei, E.; Sanfilippo, E. M.: Towards an Unified Additive Manufacturing Product-Process Model for Digital Chain Management Purpose. In: 28th CIRP Design Conference (2018), S. 428–433.
- [40] Strohm, O.; Ulich, E.: Unternehmen arbeitspsychologisch bewerten. Ein Mehr-Ebenen-Ansatz unter besonderer Berücksichtigung von Mensch, Technik und Organisation. Zürich 1997.

über die Potenziale und einer infolge der schnellen Technologieentwicklung hohen Intransparenz am Markt identifiziert. KMU stehen vor mannigfaltigen, klassenübergreifenden Herausforderungen, die in gegenseitiger Abhängigkeit zueinanderstehen und in ihrer Gesamtheit den Einsatz additiver Technologien in KMU behindern.

Zur Überwindung der identifizierten Herausforderungen werden auf Grundlage der erstellten Wertschöpfungskette drei Handlungsfelder identifiziert und Empfehlungen für den erfolgreichen Einsatz additiver Fertigungsverfahren hergeleitet, die zu Teilen die Unterstützung Dritter, wie z.B. Forschungsinstitute, Beratungsunternehmen und IT-Dienstleister, voraussetzen. Diese werden in Bild 5 strukturiert visualisiert und den jeweiligen Problemstellungen und Auswirkungen für KMU zugeordnet. So sollten für den Pre-Prozess intuitive Software-Lösungen nach dem Vorbild konventioneller Fertigungsverfahren weiterentwickelt werden, sodass die Konstruktionsingenieure ohne intensiven Schulungsbedarf auf vorhandenes Erfahrungswissen zurückgreifen können. Ferner empfiehlt sich die Entwicklung von cloudbasierten Simulationen des Druckprozesses, sodass auf Basis der Prozesssimulation verzugsfreier konstruiert wird und infolgedessen der Bedarf an Wärmebehandlungs- und manuellen Nachbearbeitungsschritten sowie damit einhergehend die hohen Durchlaufzeiten reduziert werden. Im Handlungsfeld Werkstoffe sollte insbesondere die Entwicklung einer Materialdatenbank spezifisch für die additive Fertigung initiiert und über Mustererkennungen in den gesammelten Datenmengen die Interaktion zwischen Pulvermorphologie, Maschinenparameter und der Bauteilqualität besser verstanden und optimiert werden. Dies fördert den Wissensaustausch zwischen den beteiligten Akteuren, ermöglicht werkstoffindividuelle Prozesssimulationen und erhöht maßgeblich die Reproduzierbarkeit additiver Verfahren. Darüber hinaus empfiehlt sich die Definition von Untergrenzen der noch verarbeitbaren Pulverqualität, was die prophylaktische Entsorgung von Restpulver vermeidet und eine ressourcenschonendere Produktion ermöglicht. Um die begrenzten finanziellen Ressourcen der KMU gewinnmaximierend einzusetzen und den Informationsnachteil gegenüber großen Anlagenherstellern für additive Fertigung zu reduzieren, sollten sich die produzierenden KMU im Rahmen von Kooperationen vernetzen und so über einen strukturierten Informationsaustausch insbesondere fundiertere Kaufentscheidungen über bisher hochpreisige Anlagen-Updates mit ungewissem Nutzen zu treffen.

Darüber hinaus empfiehlt sich, im Rahmen der Kooperationen proaktiv Weiterbildungsmaßnahmen für bestehende und neue Kunden zu offerieren, um die Potenziale der additiven Fertigung vollumfänglich zu heben, neue Umsatzquellen zu erschließen und den Kommunikationsaufwand im Pre-Prozess zu reduzieren. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es für den erfolgreichen Einsatz additiver Technologien in KMU gesamtheitlicher Forschungs- und Entwicklungsansätze bedarf, welche die additiven Fertigungsmaschinen, die involvierten Personen sowie die Organisation und die zugrundeliegenden Prozessschritte in gleichem Maße beachten und so ganzheitlich die Wertschöpfungskette optimieren.

## Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde eine KMU-spezifische und verfahrensübergreifende Wertschöpfungskette der additiven Fertigung abgeleitet. Neben den etablierten pulverbettbasierten Verfahren sind ebenfalls die in der Entwicklung befindlichen und potenzialreichen binderbasierten Verfahren in der Wertschöpfungskette integriert. Diese setzt sich aus vier Prozessen zusammen und gliedert sich weiter in 22 Teilprozesse, welche durch Interdependenzen geprägt sind und Auswirkungen auf die Bauteilgüte und Prozessleistung haben. Mithilfe von Experteninterviews wurden die erzielten Ergebnisse verifiziert und abschließend Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für KMU abgeleitet. Essenzielle Faktoren zur ganzheitlichen Optimierung der Wertschöpfungskette sind der Einsatz cloudbasierter Simulationen des Druckprozesses, die Zertifizierung der Ausgangswerkstoffe und die Entwicklung von Materialdatenbanken für akteursübergreifende Kooperationen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die abgeleitete Wertschöpfungskette einen vielversprechenden Ansatz für die Entwicklung technologieübergreifender Industrialisierungsansätze bietet. Der verfahrensübergreifende Aufbau ermöglicht es, dass Abhängigkeiten von einzelnen additiven Fertigungsverfahren und damit die in Forschung und Praxis kritisierten singulären Optimierungen vermieden werden und so in zukünftigen Forschungsvorhaben die Potenziale einer Industrialisierung der gesamten Wertschöpfungskette voll ausgeschöpft werden.

Schlüsselwörter:

Additive Fertigung, 3D-Druck, Wertschöpfungskette, KMU, Industrie 4.0