

Dominik Morar

Additive Manufacturing (AM)

Entwicklung eines
Informationsversorgungskonzepts
zur Unterstützung des
AM-Produktentstehungsprozesses

MOREMEDIA



Springer Gabler

Additive Manufacturing (AM)

Dominik Morar

Additive Manufacturing (AM)

Entwicklung eines
Informationsversorgungskonzepts
zur Unterstützung des
AM-Produktentstehungsprozesses

Dominik Morar
Neuhausen, Deutschland

D 93 (Dissertation, Universität Stuttgart, 2021)

ISBN 978-3-658-37152-4 ISBN 978-3-658-37153-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-37153-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Marija Kojic

Springer Gabler ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Additive Manufacturing (AM) – populär häufig auch als 3D-Druck bezeichnet – unterscheidet sich grundlegend von anderen etablierten Fertigungstechnologien. Im Gegensatz zu materialabtragenden, subtraktiven Vorgehensweisen oder materialumformenden Methoden werden bei additiven Verfahren Produkte durch das meist schichtweise Aneinanderfügen von Volumenelementen erstellt. Aufgrund dieser Besonderheit bietet AM innovative produkt- und produktionsbezogene Anwendungspotenziale, die sich durch Konstruktionsfreiheiten, Produktindividualisierungen und weitreichenden Möglichkeiten der Produktionskooperation in Form von Wertschöpfungsnetzwerken in der Produktentstehung auszeichnen.

Diesem Themenbereich ist die Arbeit von Herrn Morar gewidmet. Im Mittelpunkt seiner Dissertationsschrift steht die Entwicklung und Evaluation eines bedarfsgerechten Informationsversorgungskonzepts in arbeitsteiligen AM-Produktentstehungsprozessen (AM-PEP). Hierbei fokussiert der Verfasser die relevanten Komponenten der AM-Kooperation (inkl. AM-Wissensaufbau) und setzt sie in seinem aus digitalem Produktmodell, Funktionsmodell, Rollenkonzept und Geschäftsprozessstruktur umfassenden Gesamtmodell um.

Der Autor hat sich engagiert den Herausforderungen des innovativen Anwendungsbereichs gestellt und das Themengebiet umfassend bearbeitet. Die stringente Herangehensweise, die breite theoretische und empirische Fundierung, die Konzeptentwicklung sowie die prototypische Implementierung und Evaluation zeichnen die Arbeit aus. Mit dem von Herrn Morar entwickelten fachlichen Informationsversorgungskonzept werden somit ohne Frage neue Akzente im Bereich

der technischen und organisatorischen Gestaltung AM-gestützter Produktentstehungsprozesse gesetzt, die zu wissenschaftlichen und praxisbezogenen wertvollen Diskussionen/Auseinandersetzungen führen.

Stuttgart
im Dezember 2021

Prof. Dr. Hans-Georg Kemper

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Lehrstuhl für ABWL und Wirtschaftsinformatik 1 des Betriebswirtschaftlichen Instituts der Universität Stuttgart.

Mein Dank gilt allen, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben. Zuvorderst ist dies mein Doktorvater, Prof. Dr. Hans-Georg Kemper. Erst seine Unterstützung und das vertrauensvolle Gewähren akademischer Freiräume haben es mir erlaubt, dieses Forschungsthema nach meinen Vorstellungen zu gestalten. Gleichfalls gilt mein Dank Prof. Dr. Heiner Lasi. Er trug maßgeblich dazu bei mich für die Forschung in der Wirtschaftsinformatik sowie für die Thematik Additive Manufacturing zu begeistern und begleitete diese Arbeit durchgängig. Darüber hinaus danke ich Prof. Dr. Georg Herzwurm für die Übernahme des Zweitgutachtens und Prof. Dr. Burkhard Pedell für die Wahrnehmung des Prüfungsvorsitzes.

Ebenfalls gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für viele hilfreiche Anregungen und wertvolle wissenschaftliche Auseinandersetzungen. Hervorzuheben ist hier Dr. Michelle Moisa. Unsere gemeinsamen Forschungsaktivitäten und Diskussionen bildeten den fruchtbaren Boden dieser Arbeit. Mein Dank gilt auch den wissenschaftlichen Hilfskräften des Lehrstuhls für die unterschiedlichsten unterstützenden Tätigkeiten.

Außerordentlich dankbar bin ich meiner Familie: meinen Eltern für die hervorragenden Chancen, und ganz besonders meiner wundervollen Ehefrau Nathalie, meiner Tochter Charlotte und meinem Sohn Leonel. Diese Arbeit konnte nur

aufgrund eurer Rücksichtnahme, Geduld und Unterstützung entstehen. Ich bin überglücklich, Euch an meiner Seite zu haben.

Stuttgart
im Dezember 2021

Dominik Morar

Zusammenfassung

Die Fertigungstechnologie Additive Manufacturing (AM) erfreut sich zunehmender Beliebtheit und steigender Verbreitung in der produzierenden Industrie. Ein Grund hierfür sind produktbezogene Anwendungspotenziale, die durch hohe Konstruktionsfreiheiten und tiefgreifende Produktindividualisierung möglich werden. Darüber hinaus eröffnet AM weitreichende Möglichkeiten, die die Kollaboration in der Produktentstehung betreffen. So eignet sich AM zur orts- und zeitunabhängigen Produktion in Wertschöpfungsnetzwerken. Hierfür ausschlaggebend ist der hohe Digitalisierungsgrad im Produktentstehungsprozess. Folglich wird AM auch als eine Schlüsseltechnologie der digitalen Transformation produzierender Unternehmen verstanden.

Für Unternehmen, die AM diesem Verständnis nach zielführend einsetzen wollen, sind der Wissensaufbau und die Kollaboration in AM-Wertschöpfungsnetzwerken entscheidend. Hierbei kommt der Nutzung der Resource Information eine zentrale Rolle zu. Das Ziel der Arbeit ist die Konzeption einer bedarfsgerechten Informationsversorgung für den Entstehungsprozess von AM-Produkten durch eine angemessene Integration von Informationssystemen.

Das in der Arbeit entwickelte Informationsversorgungskonzept (Artefakt) basiert auf einer zweistufigen Empirie zur Anforderungserhebung. Die erste Stufe bildet eine quantitative Exploration unter AM-Anwendern, die in der zweiten Stufe qualitativ im Rahmen einer vergleichenden Fallstudie vertieft wird. Den Kern des Artefakts bildet das digitale AM-Produktmodell, das eine AM-gerechte Struktur für den Informationsaustausch im AM-Produktentstehungsprozess bildet. Weitere Bestandteile sind ein Rollenkonzept, das AM-spezifische Akteure berücksichtigt sowie eine hierarchische Funktionsstruktur für die Bereitstellung des digitalen AM-Produktmodells. Die vereinende Konzeptkomponente stellen modellierte Abläufe des AM-Produktentstehungsprozesses dar.

Die Evaluation des Artefakts erfolgt ebenfalls zweistufig. Auf Basis eines horizontalen Prototyps werden Abläufe des Konzepts demonstriert und die Relevanz mit unabhängigen AM-Anwendern evaluiert. Die technische Umsetzbarkeit zentraler Konzeptkomponenten wird mithilfe eines vertikalen Prototyps partiell implementiert.

Abstract

The diffusion of Additive Manufacturing (AM) grows steadily in terms of industrial application. This trend could be ascribed to product-focused potentials that result from AM inherent freedom of design and individualization. Furthermore, AM enables opportunities for collaboration in the whole product creation process. For instance, AM is predestinated to manufacture components in value networks independently of location and time. The role of data in the product creation process, e. g. design data, is crucial for this characteristic. Accordingly, AM is seen as an enabler for the digital transformation of manufacturing companies.

Companies that apply AM as an enabler of digital transformation face the obstacles of gaining knowledge and establishing collaboration within value networks. In these terms, using information resources efficiently and effectively is key to success. Therefore, the objective of this research is to deliver a concept for an adequate information supply within the AM product creation process by the integration of information systems.

The research artefact, a concept for information exchange, is based on a two-tier empirical requirements analysis which is conducted as follows: A quantitative exploration of AM practitioners leads to high-level requirements that gains more detail with a subsequent comparative case study. The major component of the artefact is the digital AM product model which provides an adequate structure for information exchange in the context of AM. Additional concept components are a role concept for AM-specific stakeholders and a function structure for the provisioning of the digital AM product model. The enfolding component of the concept is process models of the AM product creation process.

Eventually, the evaluation of the artefact contains two steps. Firstly, the relevance of the concept is evaluated with AM practitioners based on a horizontal prototype. Secondly, the technical feasibility is demonstrated based on a vertical prototype which partially instantiates the research artefact.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | Einführung | 1 |
| 1.1 | Motivation und Problemstellung | 1 |
| 1.2 | Analyse bestehender Ansätze zur Informationsversorgung im AM-Produktentstehungsprozess | 6 |
| 1.2.1 | Stand der Forschung | 6 |
| 1.2.2 | Einordnung identifizierter Forschungsergebnisse | 13 |
| 1.2.3 | Ableitung der Forschungslücke | 15 |
| 1.3 | Zielsetzung und Forschungsfrage | 17 |
| 1.4 | Forschungsdesign und Gang der Arbeit | 18 |
| 2 | Die Informationsversorgung im Kontext von Additive Manufacturing | 23 |
| 2.1 | Die Fertigungstechnologie Additive Manufacturing | 25 |
| 2.1.1 | Einordnung des Begriffs <i>Additive Manufacturing</i> | 25 |
| 2.1.2 | Potenziale und Restriktionen beim AM-Einsatz | 29 |
| 2.1.2.1 | Zugrunde liegende AM-Hebel | 30 |
| 2.1.2.2 | Abgeleitete AM-Nutzenaspekte | 34 |
| 2.1.2.3 | AM-Restriktionen | 36 |
| 2.2 | Der AM-Produktentstehungsprozess | 37 |
| 2.2.1 | AM-Produktentwicklung | 40 |
| 2.2.1.1 | Produktplanung – Erhebung von Kundenanforderungen | 40 |
| 2.2.1.2 | Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung – Konstruktion von AM-Komponenten | 43 |
| 2.2.2 | AM-Vorbereitung | 47 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.2.2.1 | Pre-Processing – Vorbereitung des AM-Fertigungsjobs | 48 |
| 2.2.2.2 | Vorbereitung des Fabrikators | 50 |
| 2.2.3 | AM-Fertigung | 50 |
| 2.2.3.1 | Processing – Additiver Fertigungsdurchlauf eines Fertigungsjobs | 51 |
| 2.2.3.2 | Post-Processing – Nachbearbeitung der Komponenten | 53 |
| 2.3 | Kundenintegration im AM-Produktentstehungsprozess | 54 |
| 2.3.1 | Intensität und Interaktionspunkte bei der Kundenindividualisierung | 54 |
| 2.3.2 | Rollen des B2B-Kunden | 56 |
| 2.3.2.1 | Der Kunde als Co-Designer | 57 |
| 2.3.2.2 | Der Kunde als Co-Producer | 57 |
| 2.4 | Informationssysteme im AM-Produktentstehungsprozess | 58 |
| 2.4.1 | Integrationsansätze in der Informationsverarbeitung | 61 |
| 2.4.1.1 | Integrationsgegenstände | 61 |
| 2.4.1.2 | Integrationsrichtung und Integrationsreichweite | 62 |
| 2.4.1.3 | Integrationskonzepte in der AM-Produktentstehung | 64 |
| 2.4.2 | Digitale Prozesskette im Additive Manufacturing | 69 |
| 2.4.2.1 | CAX-Systeme | 70 |
| 2.4.2.2 | CAX-nahe Anwendungssysteme | 73 |
| 2.4.2.3 | Produktionsplanung und Produktionssteuerung | 74 |
| 2.4.3 | Grundlagen digitaler Produktmodelle | 75 |
| 2.4.3.1 | Das digitale Produktmodell im Produktlebenszyklus | 79 |
| 2.4.3.2 | Virtuelle und physische Objekte im AM-Produktentstehungsprozess | 80 |
| 3 | Der AM-Produktentstehungsprozess in der Praxis – Methodik und Ergebnisse | 85 |
| 3.1 | Quantitative Exploration des Themenfeldes | 88 |
| 3.1.1 | Rahmenbedingungen der Online-Studie | 90 |
| 3.1.2 | Charakterisierung der Stichprobe | 92 |
| 3.1.3 | Annahmengeleitete explorative Analysen | 98 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.1.3.1 | Analyse der Aussagen zur Kundenintegration | 101 |
| 3.1.3.2 | Analyse bezüglich des digitalen Produktmodells für AM-Produkte | 102 |
| 3.1.3.3 | Analyse bezüglich des Informationsaustauschs zwischen AM-Produktentwicklung und AM-Fertigung | 105 |
| 3.1.4 | Konzeptanforderungsfelder – Erkenntnisse der quantitativen Exploration | 107 |
| 3.2 | Qualitative Vertiefung der Konzeptanforderungsfelder | 110 |
| 3.2.1 | Fallkontrastierung für die qualitative Vertiefung | 111 |
| 3.2.2 | Beschreibung der empirischen Fälle | 114 |
| 3.2.2.1 | Empirischer Fall C1 zum Cluster <i>RM im Aufbau</i> | 115 |
| 3.2.2.2 | Empirischer Fall C2 zum Cluster <i>Innovative AM-Produktentwicklung</i> | 116 |
| 3.2.2.3 | Empirischer Fall C3 zum Cluster <i>Produktion on Demand</i> | 117 |
| 3.2.2.4 | Empirischer Fall C4 zum Cluster <i>AM-basierte Kundenintegration</i> | 119 |
| 3.2.3 | Cross-Case-Synthese <i>Dezentrale AM-Fertigung kleiner und mittlerer Losgrößen</i> | 121 |
| 3.2.3.1 | Leichtbaukomponente <i>AM-Bracket</i> | 121 |
| 3.2.3.2 | Konzeptanforderungen der Kollaboration und Kundenintegration | 124 |
| 3.2.3.3 | Konzeptanforderungen der AM-Produktentwicklung | 133 |
| 3.2.3.4 | Konzeptanforderungen der AM-Fertigung | 141 |
| 3.2.3.5 | Konzeptanforderungen des AM-bezogenen Informationsaustauschs | 149 |
| 3.3 | Kritische Würdigung und zusammenfassende Darstellung der Konzeptanforderungen | 155 |
| 4 | Entwurf eines Informationsversorgungskonzepts für den AM-Produktentstehungsprozess | 161 |
| 4.1 | Entwicklung des digitalen AM-Produktmodells | 164 |
| 4.1.1 | Charakterisierende Bestandteile der AM-Komponente | 167 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.1.1.1 | Kundenanforderungen, AM-Komponenteneigenschaften und AM-Konstruktion | 169 |
| 4.1.1.2 | AM-Fertigungsparameter, AM-Prozesseigenschaften und Produktionsarchetyp | 171 |
| 4.1.2 | Instanziierende Bestandteile einer AM-Komponente | 177 |
| 4.1.3 | Abhängigkeiten zu bestehenden Informationssystemen | 181 |
| 4.2 | Entwicklung des Rollenkonzepts | 183 |
| 4.2.1 | Akteure und deren Rollen | 184 |
| 4.2.1.1 | Akteur B2B-Kunde: Rollen | 185 |
| 4.2.1.2 | Akteur AM-Produktentwickler: Rollen | 186 |
| 4.2.1.3 | Akteur AM-Fertigungsexperte: Rollen | 187 |
| 4.2.1.4 | Administrativen Akteure: Rollen | 189 |
| 4.2.2 | Verantwortlichkeiten nach Rollen | 189 |
| 4.3 | Entwicklung des Funktionsmodells | 190 |
| 4.3.1 | Funktionszweig zur Entwicklung des digitalen AM-Produktmodells | 192 |
| 4.3.2 | Funktionszweig zur Fertigung des digitalen AM-Produktmodells | 195 |
| 4.3.3 | Funktionszweig zum AM-Knowhow | 196 |
| 4.3.4 | Funktionszweig zum Management der AM-Komponentenqualität | 198 |
| 4.4 | Entwicklung des Geschäftsprozessmodells | 199 |
| 4.4.1 | Anwendungsfall <i>AM-Komponente entwickeln</i> | 200 |
| 4.4.1.1 | Teilprozess <i>Kundenanforderungen erheben und spezifizieren</i> | 202 |
| 4.4.1.2 | Teilprozess <i>Digitales AM-Produktmodell entwickeln</i> | 206 |
| 4.4.1.3 | Teilprozessübergreifende Rücksprünge | 212 |
| 4.4.2 | Anwendungsfall <i>AM-Komponente fertigen</i> | 213 |
| 4.4.2.1 | Teilprozess <i>Produktionsarchetypen auswählen</i> | 215 |
| 4.4.2.2 | Teilprozess <i>AM-Fertigung durchlaufen</i> | 220 |
| 4.5 | Reflexion der Konstruktion des Fachkonzepts | 225 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 5 | Evaluation des Fachkonzepts | 229 |
| 5.1 | Beschreibung der Prototypen | 231 |
| 5.1.1 | Beschreibung des horizontalen Prototyps | 233 |
| 5.1.1.1 | Evaluationsszenario <i>Digitales</i> <i>AM-Produktmodell zusammenführen</i> | 236 |
| 5.1.1.2 | Evaluationsszenario <i>Digitales</i> <i>AM-Produktmodell zur AM-Fertigung</i> <i>vorbereiten</i> | 236 |
| 5.1.1.3 | Evaluationsszenario <i>Vorschläge der</i> <i>AM-Fertigung zu Produktionsarchetyp</i> <i>erfassen</i> | 238 |
| 5.1.2 | Beschreibung des vertikalen Prototyps | 239 |
| 5.1.2.1 | Begründung der Auswahl der Softwarewerkzeuge | 239 |
| 5.1.2.2 | Struktur des digitalen AM-Produktmodells | 242 |
| 5.1.2.3 | Entwickeln des digitalen AM-Produktmodells | 243 |
| 5.1.2.4 | Auswahl von Produktionsarchetypen und Export instanzierter digitaler AM-Produktmodelle | 244 |
| 5.2 | Kriterien und Ergebnisse der Evaluation der Relevanz des Fachkonzepts | 246 |
| 5.2.1 | Kriterien zur Evaluation der Relevanz des Fachkonzepts | 247 |
| 5.2.2 | Ergebnisse der Evaluation der Relevanz des Fachkonzepts | 248 |
| 5.2.2.1 | Tauglichkeit des Fachkonzepts | 249 |
| 5.2.2.2 | Einsatzpotenziale des Fachkonzepts | 250 |
| 5.2.2.3 | Angemessenheit des Fachkonzepts | 251 |
| 5.3 | Ergebnisse der Evaluation der technischen Umsetzbarkeit | 253 |
| 5.4 | Abschließende Bewertung der Evaluation | 254 |
| 6 | Fazit und Diskussion | 257 |
| 6.1 | Kritische Würdigung | 258 |
| 6.2 | Implikationen für Unternehmen | 259 |
| 6.3 | Perspektiven für die Forschung | 261 |
| | Literaturverzeichnis | 265 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------|---|
| 3MF | 3D Manufacturing Format |
| A | Annahme |
| AM | Additive Manufacturing |
| AMF | Additive Manufacturing File Format |
| AM-PEP | Additive-Manufacturing-Produktentstehungsprozess |
| AS | Anwendungssystem |
| B2B | Business-to-Business |
| CAD | Computer-Aided Design |
| CAM | Computer-Aided Manufacturing |
| CAPP | Computer-Aided Process Planning |
| CAQ | Computer-Aided Quality Management |
| CAs | Computer-Aided <i>everything</i> |
| CIM | Computer-Integrated Manufacturing |
| CNC | Computerised Numerical Control (siehe auch NC) |
| D | Durchführung (Verantwortlichkeitsmatrix) |
| df. | Freiheitsgrade (engl: degrees of freedom) |
| DfAM | Design for Additive Manufacturing |
| ERP | Enterprise Resource Planning |
| F | Fertigung (Einordnung identifizierter IS-Konzepte) |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| FPT | Fertigungsparameter – Typ (UML Diagramme) |
| GE | Geometrie (UML Diagramme) |
| GUI | Graphic User Interface |
| H# | Standardisiertes Toleranzmaß nach ISO 286 (bspw. H7 oder H11) |
| H. v. | Herstellung von |
| I | Informationsanspruch (Verantwortlichkeitsmatrix) |

| | |
|----------------|--|
| ID | Identifikator |
| IGES | Initial Graphics Exchange Specification |
| IIoT | Industrial Internet of Things |
| IS | Informationssystem |
| JQ3 | VHB-JourQual 3 |
| JT | Jupiter Tessellation |
| K# | Kavität (nummeriert, exemplarische Leichtbaukomponente) |
| KA | Konzeptanforderung |
| KdA | Kundenanforderung (UML Diagramme) |
| KE | (AM-)Komponenteneigenschaft (UML Diagramme) |
| KT | AM-Komponente – Typ (UML Diagramme) |
| M | Mitwirken (Verantwortlichkeitsmatrix) |
| MES | Manufacturing Execution System |
| NC | Numerical Control (siehe auch CNC) |
| PA | Produktionsarchetyp (UML-Diagramme) |
| PDM | Produktdatenmanagement |
| PE | Produktentwicklung |
| PEEK | Polyetheretherketon |
| PEP | Produktentstehungsprozess |
| PLC | Produktlebenszyklus (engl. Product Lifecycle) |
| PLM | Produktlebenszyklusmanagement (engl. Product Lifecycle Management) |
| PM | Produktmodell |
| PPS | Produktionsplanung und –steuerung |
| R | Rotationsfunktion |
| R _a | mittlerer Rauwert |
| RAMI | Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 |
| Req. | Requirement |
| RM | Rapid Manufacturing |
| RP | Rapid Prototyping |
| RT | Rapid Tooling |
| SLC | Stereolithographie Contour |
| STEP | Standard for the Exchange of Product Model Data |
| STL | Surface Tessellation Language |
| SysML | Systems Modeling Language |
| TF | Teilfrage |

| | |
|-----|---|
| UML | Unified Modeling Language |
| V | Verantwortung (Verantwortlichkeitsmatrix) |
| WZ | Wirtschaftszweig(e) |
| XMI | XML Metadata Interchange |
| XML | Extensible Markup Language |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------------|---|----|
| Abbildung 1.1 | Einordnung der Handlungsfelder AM-Wissensaufbau und AM-Kollaboration | 5 |
| Abbildung 1.2 | Suchprozess der Literaturrecherche | 8 |
| Abbildung 1.3 | Bezugsrahmen | 19 |
| Abbildung 1.4 | Gang der Arbeit | 21 |
| Abbildung 2.1 | Struktur des Grundlagenkapitels | 24 |
| Abbildung 2.2 | Einordnung von Additive Manufacturing | 26 |
| Abbildung 2.3 | Schema von AM-Eigenschaften, AM-Hebeln und AM-Nutzenaspekten | 29 |
| Abbildung 2.4 | AM-Produktentstehungsprozess im Produktlebenszyklus | 39 |
| Abbildung 2.5 | Hierarchische Ableitung von Produkteigenschaften | 45 |
| Abbildung 2.6 | Ebenen des <i>Design for Additive Manufacturing</i> (DfAM) | 46 |
| Abbildung 2.7 | AM-Fertigungsjob im Pre-Processing | 49 |
| Abbildung 2.8 | Schematischer Ablauf der generativen Fertigung eines Bauteils am Beispiel Laserstrahlschmelzen | 52 |
| Abbildung 2.9 | Intensität und Interaktionspunkte bei der Kundenindividualisierung | 56 |
| Abbildung 2.10 | Struktur eines Informationssystems | 60 |
| Abbildung 2.11 | IS-Integration im Fokus des AM-Produktentstehungsprozess | 63 |
| Abbildung 2.12 | Einordnung der Konzepte Digitale Fabrik und Smart Factory im AM-PEP | 69 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| Abbildung 2.13 | Idealtypische Anwendungssystemlandschaft im AM-PEP | 70 |
| Abbildung 2.14 | Das digitale AM-Produktmodell und dessen Partialmodelle | 76 |
| Abbildung 2.15 | Typ und Instanz im AM-PEP | 80 |
| Abbildung 2.16 | Virtuelle und physische Objekte im AM-PEP | 81 |
| Abbildung 3.1 | Einordnung des quantitativ-qualitativen Vertiefungsmodells im Vorgehen dieser Arbeit | 87 |
| Abbildung 3.2 | Bezugsrahmen der quantitativen Exploration | 89 |
| Abbildung 3.3 | Einordnung der Branchenverteilung | 93 |
| Abbildung 3.4 | Einordnung nach Unternehmensgröße | 94 |
| Abbildung 3.5 | Erfahrungswissen der Befragten in Produktlebenszyklusphasen | 95 |
| Abbildung 3.6 | Herausforderungen beim AM-Einsatz | 96 |
| Abbildung 3.7 | AM-Hintergrund nach AM-Anwendungsgebiet | 97 |
| Abbildung 3.8 | Auswertung zu Aussagen zur Kundenintegration (A-1, A-2 und A-3) | 102 |
| Abbildung 3.9 | Auswertung zur Rolle der Bauteilgeometrie | 104 |
| Abbildung 3.10 | Auswertung zu AM-Fertigungsparametern | 105 |
| Abbildung 3.11 | Auswertung der produktionsseitigen Aussagen | 106 |
| Abbildung 3.12 | Erkenntnisfortschritt im Kontext der Problemstellung | 111 |
| Abbildung 3.13 | Cluster der quantitativen Exploration | 113 |
| Abbildung 3.14 | Struktur der Cross-Case-Synthese zur Anforderungsableitung | 122 |
| Abbildung 3.15 | Topologieoptimierte AM-Leichtbaukomponente <i>AM-Bracket</i> | 124 |
| Abbildung 3.16 | Auszug der durch den B2B-Kunden vorgegebenen Geometrien des AM-Brackets | 131 |
| Abbildung 3.17 | Beispielanwendung zur systemgestützten Konstruktion des AM-Brackets durch Topologie-Optimierung | 138 |
| Abbildung 3.18 | Beispielhafte Anordnung eines AM-Fertigungsjobs ohne Stützstrukturen | 143 |
| Abbildung 3.19 | Unterschiedliche AM-Fertigungsparameter derselben AM-Komponente, Kavität KI jeweils grün bzw. per Pfeil hervorgehoben | 145 |
| Abbildung 3.20 | AM-Bracket in tessellierter Form | 150 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| Abbildung 4.1 | Verortung des Fachkonzepts im zugrunde liegenden Forschungsdesign | 161 |
| Abbildung 4.2 | Bestandteile des Fachkonzepts | 163 |
| Abbildung 4.3 | Übersicht des digitalen AM-Produktmodells | 165 |
| Abbildung 4.4 | Charakterisierende Elemente des digitalen AM-Produktmodells aus Sicht der AM-Produktentwicklung | 168 |
| Abbildung 4.5 | Spezialisierung der Klasse <i>AM-Fertigungsparameter – Typ</i> für AM-Pulverbettverfahren | 173 |
| Abbildung 4.6 | Beispielhafte Darstellung von AM-Fertigungsparametern im Datenmodell | 176 |
| Abbildung 4.7 | Instanz einer AM-Komponente im digitalen AM-Produktmodell | 179 |
| Abbildung 4.8 | Schnittstellen zu bestehenden Informationssystemen im AM-PEP | 181 |
| Abbildung 4.9 | Rollen und Akteure im AM-PEP | 185 |
| Abbildung 4.10 | Übersicht des hierarchischen Funktionsmodells | 191 |
| Abbildung 4.11 | Funktionszweig zur Entwicklung eines digitalen AM-Produktmodells | 192 |
| Abbildung 4.12 | Funktionszweig zur Fertigung eines digitalen AM-Produktmodells | 195 |
| Abbildung 4.13 | Funktionszweig zur Generierung und zum Schutz von AM-Knowhow | 197 |
| Abbildung 4.14 | Funktionszweig zum Management der AM-Komponentenqualität | 199 |
| Abbildung 4.15 | Abfolge der primären Anwendungsfälle | 201 |
| Abbildung 4.16 | Anwendungsfalldiagramm <i>AM-Komponente entwickeln</i> | 203 |
| Abbildung 4.17 | Teilprozess <i>Kundenanforderung erheben und spezifizieren</i> | 205 |
| Abbildung 4.18 | Teilprozess <i>Digitales AM-Produktmodell entwickeln</i> | 207 |
| Abbildung 4.19 | Aktivität <i>AM-Komponente konzipieren und konstruieren</i> | 208 |
| Abbildung 4.20 | Aktivität <i>Produktionsarchetypen erstellen und zuweisen</i> | 211 |
| Abbildung 4.21 | Use-Case-Diagramm zur AM-Fertigungsplanung | 214 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| Abbildung 4.22 | Abhängigkeiten des betrachteten Teilprozesses zur übergeordneten Fertigungsplanung | 216 |
| Abbildung 4.23 | Teilprozess <i>Produktionsarchetypen auswählen</i> | 218 |
| Abbildung 4.24 | Beispiel für geeignete Produktionsarchetypen | 219 |
| Abbildung 4.25 | Teilprozess <i>AM-Fertigung durchlaufen</i> | 222 |
| Abbildung 4.26 | Aktivität <i>AM-Fertigungserfahrung sammeln</i> | 224 |
| Abbildung 4.27 | Informationsversorgungskonzept für den AM-PEP | 226 |
| Abbildung 4.28 | Zuordnung der Konzeptanforderungen zu Fachkonzeptbestandteilen | 228 |
| Abbildung 5.1 | Die Evaluation im zugrunde liegenden Forschungsdesign | 230 |
| Abbildung 5.2 | Verortung der Prototypen im Fachkonzept | 232 |
| Abbildung 5.3 | Einstiegsseite und Struktur des horizontalen Prototyps | 235 |
| Abbildung 5.4 | AM-Fertigungsvorbereitung des AM-Brackets | 237 |
| Abbildung 5.5 | AM-Fertigungserfahrung erfassen (Einstiegsseite und Nutzerdialog) | 238 |
| Abbildung 5.6 | Verortung des vertikalen Prototyps im Fachkonzepts | 240 |
| Abbildung 5.7 | Eingrenzung der AS-Klassen für den vertikalen Prototyp | 241 |
| Abbildung 5.8 | Exemplarisches digitales AM-Produktmodell (Ausschnitt) zum AM-Bracket im vertikalen Prototyp | 243 |
| Abbildung 5.9 | Erstellen von Produktionsarchetypen im vertikalen Prototyp | 244 |
| Abbildung 5.10 | Schematische Darstellung des Exports von AM-Fertigungsparametern | 245 |
| Abbildung 5.11 | Zusammenfassung der Evaluation (Ziel, Methode, Ergebnis) | 255 |
| Abbildung 6.1 | Fachkonzept und praxisnaher AM-PEP-Anwendungssystemlandschaft | 261 |
| Abbildung 6.2 | Das Fachkonzept vor dem Hintergrund plattformorientierter Strukturen | 263 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tabelle 1.1 | Identifizierte Forschungsansätze der Literaturanalyse mit AM-Bezug | 9 |
| Tabelle 1.2 | Gegenüberstellung identifizierter IS-Konzepte | 14 |
| Tabelle 2.1 | Anforderungsarten und deren Fokus hinsichtlich der AM-Hebel | 42 |
| Tabelle 2.2 | Integrationskonzepte aus dem Fertigungskontext | 64 |
| Tabelle 2.3 | Etablierte Integrationskonzepte im Kontext der Produktentstehung | 66 |
| Tabelle 2.4 | Partialmodelle von Produktmodellen | 77 |
| Tabelle 3.1 | Inhaltliche Struktur des Online-Fragebogens | 91 |
| Tabelle 3.2 | Aufteilung des Samples zur quantitativen Auswertung ... | 98 |
| Tabelle 3.3 | Ausgangsassumtionen der quantitativen Exploration | 99 |
| Tabelle 3.4 | Übersicht der Befragungen | 120 |
| Tabelle 3.5 | Identifizierte Akteure und Aufgaben | 127 |
| Tabelle 3.6 | Exemplarische Kundenanforderungsliste für die AM-Komponente <i>AM-Bracket</i> | 129 |
| Tabelle 3.7 | AM-Fertigungsparameter für pulverbasierte AM-Verfahren | 136 |
| Tabelle 3.8 | Qualitätssicherungsverfahren in der Praxis (Empirie) ... | 154 |
| Tabelle 3.9 | Detaillierung des Konzeptanforderungsfelds Kollaboration und Kundenintegration | 157 |
| Tabelle 3.10 | Detaillierung des Konzeptanforderungsfelds AM-Produktentwicklung | 158 |
| Tabelle 3.11 | Detaillierung des Konzeptanforderungsfelds AM-Fertigung | 159 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tabelle 3.12 | Detaillierung des Konzeptanforderungsfelds AM-Informationsaustausch | 160 |
| Tabelle 4.1 | Wiederkehrende Attribute | 166 |
| Tabelle 4.2 | Exemplarische Eigenschaftskategorien | 170 |
| Tabelle 4.3 | Exemplarische Unterteilung von Kompatibilitätsgraden | 175 |
| Tabelle 4.4 | Verantwortlichkeitsmatrix der AM-spezifischen Rollen | 190 |
| Tabelle 4.5 | Funktionen in der Entwicklung eines digitalen AM-Produktmodells | 193 |
| Tabelle 5.1 | Evaluationsszenarien im horizontalen Prototyp | 234 |
| Tabelle 5.2 | Evaluationspartner des horizontalen Prototyps | 247 |



1.1 Motivation und Problemstellung

Additive Manufacturing (AM) wird oft als disruptive Technologie¹ wahrgenommen, die dazu imstande ist, die bisherige Art und Weise, wie Produkte² entwickelt und hergestellt werden, grundlegend zu verändern. Die stark zunehmende nationale und internationale Bedeutung von AM für die Industrie unterstreicht diese Dynamik.³ Im Kern dieser Betrachtung steht zuvorderst die Technologie selbst, die dadurch gekennzeichnet ist, geometrische Formen in additiver Weise herzustellen. Dem liegt eine gewisse Faszination inne, da im Gegensatz zum

¹ *Disruptive Technologien* sind Innovationen, die zur Verdrängung etablierter Technologien führen, indem sie neue Absatzmärkte schaffen, die sukzessive bestehende Absatzmärkte verdrängen (vgl. Christensen, C. M. und Overdorf, M. (2000), S. 72). AM wird von diversen Autoren als eine solche Technologie dargestellt (vgl. D'Aveni, R. (2015), Hämäläinen, M. und Ojala, A. (2015) sowie Petrick, I. J. und Simpson, T. W. (2013)).

² In dieser Arbeit wird unter dem Begriff *Produkt* (auch: Zweck- oder Hauptprodukt) der zielgerichtete Output eines industriellen Produktionsprozesses verstanden. Darunter fallen Zwischenprodukte (hier auch: Halbfabrikate) und Endprodukte (vgl. Zahn, E. und Schmid, U. (1996), S. 113). Neben dem hier zugrunde liegenden substanziellen Produktbegriff, der materielle Produkte umfasst, existiert auch ein weiter gefasstes Verständnis, das immaterielle und materielle Bestandteile beinhaltet (vgl. Corsten, H. und Gössinger, R. (2016), S. 169). Der Produktbegriff wird in Abschnitt 2.1.1 detailliert abgegrenzt.

³ Bis 2030 wird angenommen, dass AM ein globales Marktvolumen von 22,6 Mrd. Euro aufweist (vgl. Strategy& (2018), URL siehe Literaturverzeichnis).

Ergänzende Information Die elektronische Version dieses Kapitels enthält Zusatzmaterial, auf das über folgenden Link zugegriffen werden kann https://doi.org/10.1007/978-3-658-37153-1_1.

subtraktiven, d. h. abtragenden, Vorgehen auf einer additiven Fertigungseinheit (auch: *Fabrikator*⁴) nahezu restriktionsfrei beliebige Geometrien Schicht für Schicht erzeugt werden können.⁵

Die additive Fertigungsweise führt zu produktbezogenen Anwendungspotenzialen, die sich durch die hohen Konstruktionsfreiheiten ergeben und zu leistungsfähigeren Produkten führen. Beispiele hierfür sind innenliegende Kühlstrukturen, filigrane Leichtbaustrukturen oder bewegliche Elemente (bspw. Gelenke), die nahezu ohne zusätzliche Fertigungsschritte herstellbar sind.⁶ Das Erkennen und Realisieren dieser produktbezogenen Anwendungspotenziale erfordert umfassendes AM-spezifisches Wissen, das durch zwei Schwerpunkte gekennzeichnet ist:⁷

- Konstruktionsbezogenes AM-Knowhow: Ausnutzen geometrischer Freiheiten zur kundenspezifischen Realisierung leistungsfähiger Produkte. Die Konstruktion filigraner Leichtbaustrukturen erfordert weitreichende Kenntnisse über die Zusammenhänge von benötigter Bauteilfunktion und möglichen konstruktiven Lösungsansätzen.
- Fertigungsbezogenes AM-Knowhow: Sicherstellung der benötigten Bauteilqualität⁸ durch Beherrschung der jungen AM-Fertigungsverfahren. Die Herstellung der hier exemplarisch angeführten Leichtbaustruktur erfordert fundierte Erfahrung über das eingesetzte AM-Verfahren und die Eigenschaften der Werkstoffe.

Für das AM-spezifische Wissen stellen diese beiden Schwerpunkte zwei Facetten dar: Dieses Wissen ist für Unternehmen kritischer Erfolgsfaktor bei der Entwicklung von Produkten, jedoch ist dessen Aufbau zugleich herausfordernd.⁹

⁴ Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Begriff *Fabrikator* (engl. *fabricator*, kurz für *autofabricator* oder *automated fabricator*) ist für AM-Fertigungseinheiten gebräuchlich (vgl. Gebhardt, A. (2016), S. 18 und Burns, M. (1993), S. 1).

⁵ Es lassen sich in Abhängigkeit der Erstellung von Geometrien grundsätzlich drei Klassen von Produktionsweisen unterscheiden. Neben *additiven* werden noch *subtraktive* und *formative* Fertigungsverfahren unterschieden. Zur detaillierten Unterscheidung der additiven Eigenschaft siehe auch Abschnitt 2.1.

⁶ Vgl. Kumke, M. (2018), S. 20.

⁷ Vgl. Arndt, A. u. a. (2018), S. 9 f., Kumke, M. (2018), S. 22 f., Caviezel, C. u. a. (2017), S. 116 f. und Klemp, E. und Pottebaum, J. (2015) S. 324 f.

⁸ Qualität wird definiert als „Grad, indem ein Satz inhärenter *Merkmale* eines *Objekts* Anforderungen erfüllt“ (DIN EN ISO 9000 (2015), S. 39, Hervorhebungen im Original).

⁹ Vgl. Caviezel, C. u. a. (2017), S. 117–126.

Neben der additiven Fertigungsweise trägt der hohe Digitalisierungsgrad ebenfalls maßgeblich zum disruptiven Charakter von AM bei.¹⁰ Das Prinzip „producing [...] directly from CAD data“¹¹ wird durch nachfolgend beschriebene AM-Eigenschaften deutlich,¹² die sich auf die Kollaboration im Produktentstehungsprozess¹³ auswirken:

- Individualisierung: Der hohe Stellenwert der digitalen Konstruktionsdaten bei AM ermöglicht die tiefgreifende geometrische Individualisierung von Bauteilen.¹⁴ Dieses Potenzial wird unter anderem in den internetbasierten Plattformen zur Individualisierung von 3D-Modellen und deren Herstellung deutlich.¹⁵
- Prozessintegration: AM ermöglicht eine rein modellbasierte digitale Prozesskette, die hohe Automatisierungspotenziale aufweist und die wesentlichen Fertigungsvorgaben bereits virtuell vorgibt. Dadurch lassen sich Kommunikationsbrüche zwischen Konstruktion und Fertigung vermeiden und kurze Produktentstehungszyklen realisieren.¹⁶
- Flexibilität: Digitale Konstruktionen können mit vergleichsweise geringem Aufwand gespeichert, kopiert und versendet werden. In der Folge erscheint AM prädestiniert für Anwendungsfälle, die auf örtliche und/oder zeitliche Flexibilität angewiesen sind, wie die Ersatzteilherstellung on Demand.¹⁷

Knowhow beschreibt praktisches und/oder technisches Fachwissen, das meist aufgrund von Erfahrungen implizit vorhanden ist (vgl. Kremer, H. (2015), S. 662 f. und Nonaka, I. (2007), S. 165 f.). Eine detaillierte Abgrenzung des Wissensbegriffs erfolgt in Kap. 2.

¹⁰ WITHERELL u. a. beschreiben AM als rein modellgetriebenen Fertigungsprozess (vgl. Witherell, P. u. a. (2016), S. 140).

¹¹ Gibson, I. u. a. (2015), S. 2. CAD steht für *Computer-Aided Design* (vgl. Abschnitt 2.4.2).

¹² Diese werden später auch *weiterführende AM-Eigenschaften* bezeichnet (vgl. Kumke, M. (2018), S. 17 f. und Baldinger, M. u. a. (2013), S. 12 f. sowie Abschnitt 2.1.2).

¹³ Der Produktentstehungsprozess beinhaltet die Phasen Produktentwicklung und Fertigung (vgl. Definition in Abschnitt 2.2).

¹⁴ Vgl. Baldinger, M. u. a. (2013), S. 12 f.

¹⁵ Vgl. Rayna, T. u. a. (2015), S. 94–100.

¹⁶ Vgl. Mohr, S. und Khan, O. (2015), S. 22 f. sowie Petrick, I. J. und Simpson, T. W. (2013), S. 14 f.). Aus theoretischer Sicht der Wirtschaftsinformatik kann AM auch als komplementierendes Element der Digitalisierung – vom Bit zum Atom – verstanden werden (vgl. Agarwal, R. und Tiwana, A. (2015), S. 474 f.).

¹⁷ Vgl. Bogers, M. u. a. (2016), S. 228–230, Ford, S. und Despeisse, M. (2016), S. 1574–1583 sowie Petrick, I. J. und Simpson, T. W. (2013), S. 13 f.

Diese drei AM-Eigenschaften finden sich auch in den Treibern der sogenannten *digitalen Transformation* industrieller Wertschöpfungsabläufe wieder:¹⁸ kürzere Entwicklungszyklen, zunehmende Produktindividualisierung, geforderte Flexibilität in Produktentwicklung und Produktion sowie Ressourceneffizienz.¹⁹

Aus diesem Grund wird AM als Schlüsseltechnologie der digitalen Transformation verstanden, die auf einer lebenszyklusübergreifenden Informationsverarbeitung interdisziplinärer Wertschöpfungspartner beruht.²⁰ Hierbei kennzeichnet die AM-Kollaboration während der Produktentstehung im Speziellen

- die Integration der B2B-Kunden, mit dem Ziel der Entwicklung kundenspezifischer (individueller) Produkte,²¹
- die gezielte Nutzung von AM-Ingenieurdienstleistungen (Engineering) diverser Disziplinen bei der Produktentwicklung und
- die flexible Einbindung von AM-Fertigungsdienstleistern, auch in dezentralen Produktionsstrukturen.²²

¹⁸ Die *digitale Transformation* bezeichnet im Allgemeinen den Wandel durch den Einsatz von Informationstechnologie in Gesellschaft und Unternehmen (vgl. Sachverständigenrat (2017), URL siehe Literaturverzeichnis, S. 31 f.). Zur kritischen Einordnung konkurrierender Begriffsverständnisse zur *Digitalisierung* vgl. Mertens, P. und Barbian, D. (2016).

¹⁹ Vgl. Lasi, H. u. a. (2014a), S. 239 f. und die detaillierten AM-Anwendungspotenziale in Abschnitt 2.1.2.

Einerseits profitieren AM-Anwendungspotenziale von durchgängig digitalisierten Abläufen. Andererseits stellt AM eine Einstiegstechnologie zur digitalen Transformation industrieller Abläufe dar (vgl. Caviezel, C. u. a. (2017), S. 129 f.).

²⁰ Die Veränderung von Wertschöpfungsstrukturen ist Kernelement der *Digitalen Transformation* (vgl. Lasi, H. u. a. (2014a), S. 239–241 und Kagermann, H. u. a. (2013), S. 18). Im Kontext deutscher Industrieunternehmen werden Lösungsansätze und -konzepte der *Digitalen Transformation* für produzierende Unternehmen auch unter dem Begriff der ursprünglichen Forschungsinitiative *Industrie 4.0* gesammelt.

²¹ B2B steht für *Business-to-Business* und bezeichnet in diesem Fall Beziehungen zwischen Unternehmen und betrieblichen Kunden in Abgrenzung zum Konsumenten oder weiteren Parteien. Ursprünglich wurde damit die Vermarktung von Industriegütern beschrieben (vgl. Backhaus, K. und Voeth, M. (2015), S. 19 f.). Inzwischen werden auch allgemeine Transaktions- und Kommunikationsbeziehungen zwischen Unternehmen so bezeichnet (vgl. Mertens, P. u. a. (2017), S. 77 f.). Eine Einordnung der Kundenintegration erfolgt in Abschnitt 2.3.

²² Hierunter fallen grundsätzlich auch Service-Provider, die AM in der Nutzungsphase eines Produkts (bspw. Ersatzteilgeschäft) einsetzen (vgl. Pfähler, K. u. a. (2019), S. 152 ff. und Fußnote 17).

In AM-Wertschöpfungsnetzwerken mit einem dominierenden produktverantwortenden Unternehmen kann dieses die Koordination in der Rolle des fokalen Unternehmens übernehmen.²³ Abbildung 1.1 setzt die beschriebenen Handlungsfelder AM-Wissensaufbau und AM-Kollaboration in Zusammenhang. Im Fokus steht dabei die Produktentstehung mit verschiedenen Wertschöpfungspartnern.

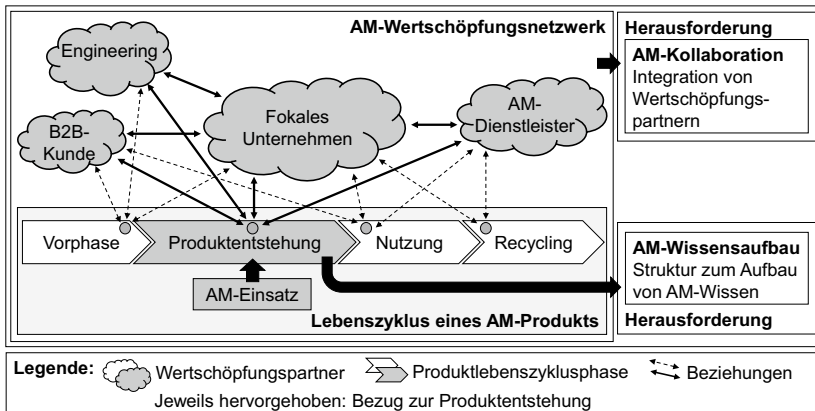


Abbildung 1.1 Einordnung der Handlungsfelder AM-Wissensaufbau und AM-Kollaboration²⁴

Allerdings ist eine phasenübergreifende Informationsverarbeitung für industrielle AM-Anwender keine Selbstverständlichkeit.²⁵ Sowohl beim AM-Wissensaufbau als auch bei der AM-Kollaboration kommt der adäquaten Versorgung mit Informationen eine hohe Bedeutung zu. Der AM-Wissensaufbau

²³ Ein *fokales Unternehmen* dominiert das Wertschöpfungsnetzwerk, bspw. bei der Koordination von Lieferantenbeziehungen. Alternativen hierzu bei eher gleichwertigen Partnern sind neutrale Koordinierungsinstanzen oder wechselnde Koordinierungsinstanzen (vgl. Bach, N. u. a. (2017), S. 336 f.).

²⁴ Eigene Darstellung in Anlehnung an Morar, D. und Kemper, H.-G. (2018), S. 55 und Lasi, H. u. a. (2014b), S. 5.

²⁵ Diverse Autoren unterschiedlicher Disziplinen sehen im Bereich AM-spezifischer integrierter Informationsverarbeitung großen Forschungsbedarf: Klemp, E. und Pottebaum, J. (2015), S. 330, Petrick, I. J. und Simpson, T. W. (2013), S. 14 sowie Mertens, P. und Barbian, D. (2015), S. 396. Vgl. hierzu auch Zeyn, H. (2017), S. 201.