

AutoUni – Schriftenreihe

AutoUni 

Martin Kumke

# Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen

---

# **AutoUni – Schriftenreihe**

Band 124

**Reihe herausgegeben von/Edited by**  
Volkswagen Aktiengesellschaft  
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen, fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

**Reihe herausgegeben von/Edited by**

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

---

Martin Kumke

# Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen

 Springer

Martin Kumke  
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2018

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe  
ISBN 978-3-658-22208-6                      ISBN 978-3-658-22209-3 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-22209-3>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer 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

# **Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Martin Kumke  
aus: Weener (Ems)

eingereicht am: 11. September 2017  
mündliche Prüfung am: 8. Februar 2018

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor  
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> . . . . .	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> . . . . .	<b>XV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> . . . . .	<b>XVII</b>
<b>Kurzfassung</b> . . . . .	<b>XIX</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>XXI</b>
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Motivation und Ausgangslage . . . . .	1
1.2 Wissenschaftliche Einordnung und Problemstellung . . . . .	2
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise . . . . .	3
<b>2 Grundlagen der additiven Fertigung</b> . . . . .	<b>7</b>
2.1 Einführung und Abgrenzung . . . . .	7
2.2 Prozesskette . . . . .	9
2.3 Verfahrensarten . . . . .	12
2.3.1 Übersicht . . . . .	12
2.3.2 Gegenüberstellung und Bewertung . . . . .	14
2.3.3 Bedeutung neuer Verfahren . . . . .	16
2.4 Potenziale und Anwendungsbeispiele . . . . .	17
2.5 Restriktionen . . . . .	22
2.6 Zusammenfassung . . . . .	23
<b>3 Methodisches Konstruieren im Kontext additiver Fertigungsverfahren</b> . . . . .	<b>25</b>
3.1 Grundlagen des methodischen Konstruierens . . . . .	25
3.1.1 Konstruktionsmethodik und Vorgehensmodelle . . . . .	25
3.1.2 Methoden und Hilfsmittel . . . . .	30
3.1.3 Design for X . . . . .	32
3.1.4 Fertigungs- und montagegerechtes Konstruieren . . . . .	34
3.2 Produktentwicklung in der Praxis am Beispiel der Automobilindustrie . . . . .	38
3.3 Konstruieren für additive Fertigungsverfahren (DfAM) . . . . .	42
3.3.1 DfAM im engeren Sinne . . . . .	44
3.3.2 DfAM im weiteren Sinne . . . . .	54
3.3.3 Rechnergestützte DfAM-Werkzeuge . . . . .	56
3.3.4 Diskussion und Gegenüberstellung der DfAM-Ansätze . . . . .	57
3.4 Zusammenfassung und Konkretisierung des Forschungsbedarfs . . . . .	59
3.4.1 Defizite bestehender DfAM-Ansätze . . . . .	60
3.4.2 Vorhaben im Rahmen dieser Arbeit . . . . .	61

<b>4</b>	<b>Konstruktive Potenziale additiver Fertigungsverfahren</b>	<b>63</b>
4.1	Konstruktive Freiheiten im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren	64
4.1.1	Konstruktionsregeln für konventionelle Fertigungsverfahren	64
4.1.2	Konstruktionsregeln für additive Fertigungsverfahren	67
4.1.3	Ableitung konstruktiver Potenziale	67
4.1.4	Analogien innerhalb der Konstruktionsregeln	71
4.2	Inhärente konstruktive Freiheiten additiver Fertigungsverfahren	73
4.3	Systematisierung	76
4.3.1	Zusammenfassung und Konkretisierung konstruktiver Freiheiten	76
4.3.2	Ableitung von Nutzenversprechen	80
4.4	Diskussion und Fazit	85
4.5	Zusammenfassung	86
<b>5</b>	<b>Angepasste Konstruktionsmethodik für additive Fertigungsverfahren</b>	<b>87</b>
5.1	Anforderungen und Ansatz	87
5.2	Vorgehensmodell und Prozessschritte	89
5.2.1	Phase I: Planen	91
5.2.2	Phase II: Konzipieren	91
5.2.3	Entscheidungsknoten	93
5.2.4	Phase III: Entwerfen und Ausarbeiten	94
5.2.5	Funktionsintegration	95
5.2.6	Iterationen und Flexibilität	95
5.3	Integration von Methoden und Hilfsmitteln	95
5.3.1	Konzept für die Integration	95
5.3.2	Integration allgemeiner Methoden und Hilfsmittel	97
5.3.3	Integration bestehender DfAM-Methoden und -Hilfsmittel	107
5.4	Anpassung und Entwicklung von Methoden und Hilfsmitteln	109
5.4.1	Hilfsmittel	109
5.4.2	Methoden	122
5.4.3	Methoden- und Hilfsmittelbaukasten	138
5.5	Nutzungskonzept	139
5.5.1	Anpassung des Vorgehensmodells	139
5.5.2	Anwendung der Methoden und Hilfsmittel	141
5.5.3	Ableitung kontextspezifischer Methodiken	142
5.6	Aktualisierung und Erweiterung	143
5.7	Zusammenfassung	144
<b>6</b>	<b>Umsetzung der Methodik als interaktives Kompendium</b>	<b>145</b>
6.1	Anforderungen aus der industriellen Praxis	145
6.2	Plattform und allgemeiner Aufbau	146
6.3	Inhalte des Konstruktionskompendiums	150
6.3.1	Prozesskette und Konstruktionsprozess	150
6.3.2	Konstruktionsregeln	153
6.3.3	Konstruktive Potenziale	156
6.3.4	Methoden und Hilfsmittel	158



6.3.5	Fallbeispiele . . . . .	161
6.3.6	Software . . . . .	162
6.4	Nutzung und Pflege . . . . .	163
6.5	Zusammenfassung . . . . .	163
<b>7</b>	<b>Validierung . . . . .</b>	<b>165</b>
7.1	Anwendungsbeispiel 1: Anpassungskonstruktion . . . . .	165
7.2	Anwendungsbeispiel 2: Neukonstruktion . . . . .	169
7.3	Evaluation des interaktiven Konstruktionskompendiums . . . . .	177
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtungen . . . . .</b>	<b>183</b>
8.1	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	183
8.1.1	Ergebnisse vor dem Hintergrund der Forschungsfragen . . . . .	183
8.1.2	Beitrag zur Theorie . . . . .	186
8.1.3	Beitrag zur Praxis . . . . .	186
8.1.4	Limitationen . . . . .	187
8.2	Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten . . . . .	188
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>191</b>
<b>A</b>	<b>Verfahren der additiven Fertigung . . . . .</b>	<b>223</b>
A.1	Polymerisation/Stereolithografie . . . . .	223
A.2	3D-Druckverfahren . . . . .	226
A.3	Extrusionsverfahren . . . . .	228
A.4	Sinter-/Schmelzverfahren im Pulverbett . . . . .	229
A.5	Directed Energy Deposition . . . . .	232
A.6	Spritzverfahren . . . . .	234
A.7	Schicht-Laminat-Verfahren . . . . .	235
<b>B</b>	<b>Konstruktionsregeln für konventionelle und additive Fertigungsverfahren . . . . .</b>	<b>237</b>
B.1	Typische Fertigungsverfahren in der Automobilindustrie . . . . .	237
B.1.1	Antrieb . . . . .	237
B.1.2	Karosserie . . . . .	237
B.1.3	Fahrwerk . . . . .	239
B.1.4	Interieur . . . . .	239
B.2	Konstruktionsregeln für ausgewählte konventionelle Verfahren . . . . .	241
B.2.1	Gießen . . . . .	241
B.2.2	Tiefziehen . . . . .	244
B.2.3	Widerstandspunktschweißen . . . . .	245
B.2.4	Fräsen . . . . .	246
B.3	Konstruktionsregeln für additive Fertigungsverfahren . . . . .	247

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Aufbau der Arbeit . . . . .	4
Abbildung 2.1:	Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 . . . . .	9
Abbildung 2.2:	Prozesskette der additiven Fertigung . . . . .	10
Abbildung 2.3:	Klassifikation additiver Fertigungsverfahren . . . . .	13
Abbildung 2.4:	Prinzip des additiven Fertigungs durch Laser-Strahlschmelzen . . . . .	14
Abbildung 2.5:	Ableitung von Potenzialen aus den Eigenschaften additiver Fertigungsverfahren . . . . .	18
Abbildung 2.6:	Einfluss der Stückzahl auf die Stückkosten in Abhängigkeit vom Fertigungsverfahren . . . . .	19
Abbildung 2.7:	Anwendungsbeispiele additiver Fertigungsverfahren mit unterschiedlichen Nutzenversprechen . . . . .	21
Abbildung 3.1:	Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 . . . . .	27
Abbildung 3.2:	Zuordnung der Konstruktionsarten zu den Konstruktionsphasen . . . . .	29
Abbildung 3.3:	Realer Ablauf einer Neukonstruktion . . . . .	29
Abbildung 3.4:	Aspekte des Design for X . . . . .	33
Abbildung 3.5:	Einordnung der Begriffe Grundregeln, Prinzipien, Richtlinien und Regeln . . . . .	34
Abbildung 3.6:	Einordnung und typische Arbeitsschritte des DFMA . . . . .	35
Abbildung 3.7:	DFA-Softwarewerkzeug von Boothroyd Dewhurst Inc. . . . .	38
Abbildung 3.8:	Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie . . . . .	39
Abbildung 3.9:	Klassifikation bestehender DfAM-Ansätze . . . . .	43
Abbildung 3.10:	Übersicht über die DfAM-Ansätze im engeren Sinne . . . . .	44
Abbildung 3.11:	Inhalte der DfAM-Konstruktionsmerkmale-Datenbank . . . . .	48
Abbildung 3.12:	DfAM-Vorgehensmodell des EU-Projekts „SASAM“ . . . . .	53
Abbildung 4.1:	Einordnung und Konkretisierung der konstruktiven Potenziale additiver Fertigungsverfahren . . . . .	63
Abbildung 4.2:	Auftreten von Hinterschnitten bei Gussbauteilen in Abhängigkeit von der Auszugsrichtung . . . . .	72
Abbildung 4.3:	Auftreten von Stützstrukturen bei AM-Bauteilen in Abhängigkeit von der Bauteilorientierung . . . . .	73
Abbildung 4.4:	Volumenelementgenaue Festlegung des Bauteils bei additiver Fertigung . . . . .	74
Abbildung 4.5:	Beispiele für konstruktive Freiheiten additiver Fertigungsverfahren . . . . .	75
Abbildung 4.6:	Konstruktive Freiheiten im Bereich Formkomplexität . . . . .	77
Abbildung 4.7:	Konstruktive Freiheiten im Bereich hierarchische Komplexität . . . . .	79
Abbildung 4.8:	Konstruktive Freiheiten im Bereich Materialkomplexität . . . . .	79

Abbildung 4.9:	Konstruktive Freiheiten im Bereich funktionale Komplexität/ Funktionsintegration . . . . .	79
Abbildung 4.10:	Matrix zur Verknüpfung von Freiheiten und Nutzenversprechen . . .	81
Abbildung 4.11:	Systematik der konstruktiven Potenziale additiver Fertigungsverfahren	82
Abbildung 4.12:	Verknüpfungen zum Nutzenversprechen Montagekostenreduktion als Auszug aus der Potenzialsystematik . . . . .	84
Abbildung 4.13:	Einfluss der Komplexität auf die Kosten in Abhängigkeit vom Fertigungsverfahren . . . . .	85
Abbildung 5.1:	Grundkonzept und Bestandteile des DfAM-Rahmenwerks . . . . .	88
Abbildung 5.2:	Allgemeine Vorgehensweise zur Lösungsfindung mit Unterscheidung zwischen „Design with X“ und „Design for X“ . . .	90
Abbildung 5.3:	DfAM-Vorgehensmodell . . . . .	92
Abbildung 5.4:	Konzept für die Integration von Methoden und Hilfsmitteln in das Rahmenwerk . . . . .	96
Abbildung 5.5:	Schritte zur Vorauswahl allgemeiner Konstruktionsmethoden . . . .	98
Abbildung 5.6:	Checkliste für das AM-gerechte Konzipieren . . . . .	110
Abbildung 5.7:	Checkliste für das AM-gerechte Gestalten . . . . .	111
Abbildung 5.8:	Struktur und Inhalte des allgemeinen Konstruktionsregelkatalogs . .	112
Abbildung 5.9:	Musterseite „Kritische Winkel bei Stützstrukturen“ aus dem allgemeinen Konstruktionsregelkatalog . . . . .	113
Abbildung 5.10:	Checkliste: Die 10 wichtigsten AM-Konstruktionsregeln . . . . .	114
Abbildung 5.11:	Ausschnitt aus der Benutzeroberfläche der interaktiven Potenzialsystematik . . . . .	116
Abbildung 5.12:	Verknüpfung der interaktiven Potenzialsystematik mit Anschauungsmodellen und Fallbeispieldatenbank als zusätzliche Komponenten . . . . .	116
Abbildung 5.13:	Interaktives digitales 3D-Anschauungsmodell . . . . .	117
Abbildung 5.14:	Toolbox mit physischen 3D-Anschauungsmodellen . . . . .	118
Abbildung 5.15:	Semantische Struktur der Fallbeispieldatenbank . . . . .	119
Abbildung 5.16:	Schematische Benutzeroberfläche der Fallbeispieldatenbank . . . .	119
Abbildung 5.17:	Auszug aus dem Katalog der konstruktiven AM-Freiheiten im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren . . . . .	120
Abbildung 5.18:	Exemplarisches Moodboard zur Inspiration im DfAM-Lösungsfindungsprozess . . . . .	121
Abbildung 5.19:	Aufbau und Inhalte der standardisierten Methodensteckbriefe . . . .	123
Abbildung 5.20:	Methodensteckbrief: Recherche und Analyse bestehender Lösungen	124
Abbildung 5.21:	Methodensteckbrief: Kreativitätsmethoden . . . . .	125
Abbildung 5.22:	Walt-Disney-Methode mit zusätzlichen DfAM-Hilfsmitteln . . . . .	126
Abbildung 5.23:	Methodensteckbrief: Bionik- und TRIZ-basierte Inventionmethodik	127
Abbildung 5.24:	Methodensteckbrief: Strategie der einteiligen Maschine . . . . .	129
Abbildung 5.25:	Methodensteckbrief: Produktarchitekturgestaltung . . . . .	130
Abbildung 5.26:	Methodensteckbrief: Vorgehen beim Einsatz der Topologieoptimierung . . . . .	131

Abbildung 5.27: Methodensteckbrief: Methodisch unterstützter Einsatz mesoskopischer Strukturen . . . . .	132
Abbildung 5.28: Methodensteckbrief: Allgemeine Methoden für das Gestalten . . . .	134
Abbildung 5.29: Methodensteckbrief: Identifikation und Auswahl geeigneter Bauteile/Anwendungen . . . . .	137
Abbildung 5.30: Beispiele für die Anwendung des DfAM-Vorgehensmodells . . . . .	140
Abbildung 5.31: Ableitung einer kontextspezifischen Methodik aus dem DfAM-Rahmenwerk . . . . .	142
Abbildung 5.32: Aktualisierung der Konstruktionsmethodik auf Basis neuer DfAM-Forschungsergebnisse . . . . .	143
Abbildung 5.33: Aktualisierung der Konstruktionsmethodik auf Basis neuer AM-Verfahren . . . . .	144
Abbildung 6.1: Startseite des allgemeinen 3D-Druck-Wikis . . . . .	147
Abbildung 6.2: Semantisches Netz der Datenbank im 3D-Druck-Wiki . . . . .	148
Abbildung 6.3: Exemplarischer Verfahrenssteckbrief im 3D-Druck-Wiki . . . . .	149
Abbildung 6.4: Navigationsleiste des Konstruktionskompodiums im 3D-Druck-Wiki . . . . .	150
Abbildung 6.5: Allgemeine Hinweise im Konstruktionskompodium zum AM-spezifischen Konstruieren und seiner Einordnung in die AM-Prozesskette . . . . .	151
Abbildung 6.6: Darstellung des DfAM-Vorgehensmodells im Konstruktionskompodium . . . . .	152
Abbildung 6.7: Beschreibung der Prozessschritte des DfAM-Vorgehensmodells im Konstruktionskompodium . . . . .	152
Abbildung 6.8: Hinweise im Konstruktionskompodium zur aufgabenspezifischen Anpassung des Vorgehensmodells . . . . .	153
Abbildung 6.9: Startseite des Konstruktionsregelkatalogs im Konstruktionskompodium . . . . .	154
Abbildung 6.10: Exemplarische Wikiseite des Konstruktionsregelkatalogs im Konstruktionskompodium . . . . .	155
Abbildung 6.11: Übersichtsseite zu den konstruktiven Potenzialen im Konstruktionskompodium . . . . .	156
Abbildung 6.12: Einführung in die interaktive Potenzialsystematik im Konstruktionskompodium . . . . .	157
Abbildung 6.13: Katalog der konstruktiven Freiheiten im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren im Konstruktionskompodium . . . . .	157
Abbildung 6.14: Methoden/Hilfsmittel-Übersicht im Konstruktionskompodium . . .	159
Abbildung 6.15: Exemplarischer Methodensteckbrief im Konstruktionskompodium	160
Abbildung 6.16: Fallbeispielübersicht im Konstruktionskompodium . . . . .	161
Abbildung 6.17: Übersicht über DfAM-Software im Konstruktionskompodium . . .	162
Abbildung 7.1: Anwendung der DfAM-Konstruktionsmethodik für die Anpassungskonstruktion eines Leichtbau-Technologiedemonstrators	166

Abbildung 7.2:	Radträger als Serienbauteil . . . . .	167
Abbildung 7.3:	Topologieoptimierung des Radträgers ohne Fertigungsrestriktionen .	168
Abbildung 7.4:	CAD-Konstruktion und Simulation des LBM-optimierten Radträgers	168
Abbildung 7.5:	LBM-gefertigtes Radträger-Demonstratorbauteil mit spanend bearbeiteten Funktionsflächen . . . . .	169
Abbildung 7.6:	Anwendung der DfAM-Konstruktionsmethodik für die Neukonstruktion eines multifunktionalen Interieurbauteils . . . . .	170
Abbildung 7.7:	Exemplarische Ergebnisse des Ideenworkshops zu den AM-Potenzialen im Interieur . . . . .	171
Abbildung 7.8:	Feedback der Teilnehmer des Ideenworkshops zu DfAM-Hilfsmitteln . . . . .	171
Abbildung 7.9:	Exemplarische Skizzen aus dem DfAM-Konzeptworkshop . . . . .	173
Abbildung 7.10:	Expertenbewertung der Qualität der konzeptionellen Lösungen . . .	173
Abbildung 7.11:	Feedback der Teilnehmer des Konzeptworkshops zu DfAM-Hilfsmitteln . . . . .	174
Abbildung 7.12:	Feedback der Teilnehmer des Konzeptworkshops zur Menge des bereitgestellten AM-Wissens . . . . .	175
Abbildung 7.13:	Konstruktionsstand einer exemplarischen Komponente der multifunktionalen Mittelkonsole . . . . .	176
Abbildung 7.14:	Hintergrundinformationen der Teilnehmer an der Befragung zum Konstruktionskompendium . . . . .	177
Abbildung 7.15:	Bewertung von Struktur und Inhalten der einzelnen Bestandteile des Konstruktionskompendiums . . . . .	178
Abbildung 7.16:	Bewertung zur Nutzung des Konstruktionskompendiums . . . . .	179
Abbildung 7.17:	Bewertung der Berücksichtigung spezifischer Fachbereichsinteressen im Konstruktionskompendium . . . . .	180
Abbildung 7.18:	Weiterempfehlung und Gesamtbewertung des Konstruktionskompendiums . . . . .	180
Abbildung A.1:	Prinzip des additiven Fertigungs durch Stereolithografie mit dem Laser-Scanner-Verfahren . . . . .	224
Abbildung A.2:	Prinzip des additiven Fertigungs durch Stereolithografie mit dem Druckkopf-Lampe-Verfahren (Poly-Jet Modeling) . . . . .	225
Abbildung A.3:	Prinzip des additiven Fertigungs durch 3D Printing (Binder Jetting) .	227
Abbildung A.4:	Prinzip des additiven Fertigungs durch Fused Layer Modeling . . . .	228
Abbildung A.5:	Prinzip des additiven Fertigungs durch Laser-Sintern/ Laser-Strahlschmelzen . . . . .	230
Abbildung A.6:	Prinzip des additiven Fertigungs durch Directed Energy Deposition .	232
Abbildung A.7:	Prinzip des additiven Fertigungs durch Kaltgasspritzen . . . . .	234
Abbildung A.8:	Prinzip des additiven Fertigungs durch Schicht-Laminat-Verfahren . .	236

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Gegenüberstellung additiver Fertigungsverfahren . . . . .	15
Tabelle 3.1	Kategorisierung von Design Theory and Methodology . . . . .	26
Tabelle 3.2	Auszug aus der Konstruktionsmethodensammlung . . . . .	31
Tabelle 3.3	Regeln für das montagegerechte Konstruieren von Baugruppen . . . . .	36
Tabelle 3.4	Regeln für das gussgerechte Konstruieren (Auswahl) . . . . .	37
Tabelle 3.5	Übersicht über Quellen für AM-Konstruktionsregeln . . . . .	45
Tabelle 3.6	Exemplarische Konstruktionsregeln für das LBM-Verfahren . . . . .	46
Tabelle 3.7	Allgemeine Gestaltungshinweise für die Nutzung konstruktiver AM-Potenziale . . . . .	47
Tabelle 3.8	Gegenüberstellung bestehender Ansätze des DfAM im engeren Sinne . .	58
Tabelle 3.9	Übersicht über die Bearbeitung der Forschungsdefizite im Verlauf der Arbeit . . . . .	62
Tabelle 4.1	Gegenüberstellung verschiedener Gussverfahren hinsichtlich Restriktionen und der Fertigungsmöglichkeit von Hinterschnitten . . . .	65
Tabelle 4.2	Ableitung konstruktiver Freiheiten aus den Restriktionen des Gießens .	68
Tabelle 4.3	Ableitung konstruktiver Freiheiten aus den Restriktionen des Tiefziehens/Widerstandspunktschweißens . . . . .	69
Tabelle 4.4	Ableitung konstruktiver Freiheiten aus den Restriktionen des FräSENS . .	69
Tabelle 4.5	Beispiele für konstruktive Freiheiten additiver Fertigungsverfahren im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren . . . . .	70
Tabelle 4.6	Minimal herstellbare Wandstärke in Abhängigkeit von Gussverfahren und Werkstoff im Vergleich zu LBM . . . . .	71
Tabelle 5.1	Ableitung zentraler Merkmale des DfAM-Vorgehensmodells auf Basis AM-spezifischer Besonderheiten . . . . .	90
Tabelle 5.2	Bewertung von Methoden zur Analyse . . . . .	100
Tabelle 5.3	Bewertung von Methoden zur Funktionsorientierung . . . . .	101
Tabelle 5.4	Bewertung von intuitiven Methoden zur Lösungsfindung . . . . .	102
Tabelle 5.5	Bewertung von Methoden zur Lösungsfindung durch Analogiebetrachtung	103
Tabelle 5.6	Bewertung von diskursiven Methoden zur Lösungsfindung . . . . .	104
Tabelle 5.7	Bewertung von Methoden für das Gestalten . . . . .	105
Tabelle 5.8	Bewertung von Methoden zur Funktionsintegration . . . . .	106
Tabelle 5.9	Bewertung von Methoden zur Bewertung und Auswahl . . . . .	108
Tabelle 5.10	Übersicht über die Integration bestehender DfAM-Ansätze ins Rahmenwerk . . . . .	109
Tabelle 5.11	AM-spezifische Kriterien zur Bewertung und Auswahl . . . . .	122
Tabelle 5.12	Gestaltungsprinzipien im Leichtbau mit Beispielen . . . . .	135
Tabelle 5.13	Methoden- und Hilfsmittelbaukasten für DfAM . . . . .	138

Tabelle 6.1	Vergleich möglicher Plattformen zur Umsetzung des Kompendiums . . .	147
Tabelle 7.1	Teamzusammenstellung für den DfAM-Konzeptworkshop . . . . .	172
Tabelle B.1	Typische Fertigungsverfahren für Antriebsbauteile . . . . .	238
Tabelle B.2	Typische Fertigungsverfahren für Karosseriebauteile . . . . .	239
Tabelle B.3	Typische Fertigungsverfahren für Fahrwerkbauteile . . . . .	240
Tabelle B.4	Typische Fertigungsverfahren für Interieurbauteile . . . . .	240

# Abkürzungsverzeichnis

3DP	3D Printing
AFS	Allgemeine Funktionsstruktur
AM	Additive Manufacturing
AMT	Additive Manufacturing Technology
CAD	Computer-Aided Design
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
CNC	Computerized Numerical Control
CS	Cold Spray (Kaltgasspritzen)
DED	Directed Energy Deposition
DFA	Design for Assembly
DfAM	Design for Additive Manufacturing
DFM	Design for Manufacturing
DFMA	Design for Manufacturing and Assembly
DfX	Design for X
DLP	Digital Light Processing
DMD	Direct Metal Deposition
EBDM	Electron Beam Direct Manufacturing
EBF <sup>3</sup>	Electron Beam Freeform Fabrication
EBM	Electron Beam Melting (Elektronenstrahlschmelzen)
EOP	End of Production
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFF	Fused Filament Fabrication
FGM	Functionally Graded Material
FLM	Fused Layer Modeling/Manufacturing
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis (Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse)
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
LA	Laserauftragschweißen
LBM	Laser Beam Melting (Laser-Strahlschmelzen)
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LLM	Layer Laminate Manufacturing (Schicht-Laminat-Verfahren)



LOM	Laminated Object Manufacturing
LS	Laser-Sintern
MJF	Multi-Jet Fusion
MJM	Multi-Jet Modeling
MPA	Metall-Pulver-Auftrag
NVH	Noise Vibration Harshness
PBF	Powder Bed Fusion (Pulverbettsschmelzen)
PEP	Produktentstehungsprozess
PJM	Poly-Jet Modeling
PUR	Polyurethan
QFD	Quality Function Deployment
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
SL	Stereolithografie
SLA	StereoLithography Apparatus
SLM	Selective Laser Melting (Selektives Laserschmelzen)
SLS	Selective Laser Sintering (Selektives Lasersintern)
SMS	Selective Mask Sintering (Selektives Maskensintern)
SOP	Start of Production
STL	Surface Tesselation Language, Standard Triangulation Language, Standard Tesselation Language
TRIZ	Theorie des erfinderischen Problemlösens
UV	Ultraviolett

## Kurzfassung

Additive Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing, AM) eignen sich durch aktuelle technologische Fortschritte zunehmend auch für die Herstellung von Werkzeugen und Endprodukten. Im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren eröffnen sie insbesondere neue Freiheiten in der Konstruktion, die beispielsweise zur Optimierung hinsichtlich Leichtbau, Effizienz und Funktionsintegration eingesetzt werden können. Zum Ausschöpfen der konstruktiven Potenziale ist ein Umdenken in der Bauteil- und Baugruppengestaltung erforderlich. Im jungen Forschungsfeld „Design for Additive Manufacturing“ (DfAM) liegen erste Methoden und Hilfsmittel für das AM-gerechte Konstruieren vor, die unter anderem in Konstruktionsregelsammlungen und Ansätzen zur Nutzung der konstruktiven Freiheiten bestehen. Diese wurden jedoch weitgehend isoliert voneinander entwickelt, waren nicht in eine Gesamtmethodik integriert, förderten selten die simultane Berücksichtigung mehrerer Freiheiten und waren kaum für die praktische Konstruktionsarbeit aufbereitet, sodass Konstrukteure bei der Entwicklung innovativer AM-Produkte bislang unzureichend unterstützt wurden.

In dieser Arbeit werden die konstruktiven Freiheiten der additiven Fertigung im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren abgeleitet, hinsichtlich ihres konkreten Mehrwerts analysiert und gesamtheitlich klassifiziert. Darauf aufbauend wird eine an additive Fertigungsverfahren angepasste Konstruktionsmethodik entwickelt, die erstmals auf einem gesamtmethodischen Vorgehensmodell analog zu klassischen Ansätzen wie VDI-Richtlinie 2221 basiert. In dieses Rahmenwerk werden sowohl bestehende als auch neu entwickelte Methoden und Hilfsmittel integriert. Im Gegensatz zu bestehenden Forschungsarbeiten werden zahlreiche Konstruktionsarten, Anwendererfahrungen, Systemgrenzen und Konstruktionsziele berücksichtigt. Die angepasste Konstruktionsmethodik ermöglicht dadurch die systematische Ausnutzung der konstruktiven Möglichkeiten additiver Fertigungsverfahren. Alle Bestandteile der Methodik werden in Form eines interaktiven, Wiki-basierten Konstruktionskompendiums in die industrielle Praxis transferiert. Durch Beispielanwendungen und Zielgruppenbefragungen werden die praktische Einsetzbarkeit und der Mehrwert sowohl der Methodik als auch der interaktiven Umsetzung demonstriert.

## Abstract

Due to current technological progress, additive manufacturing (AM) is increasingly suitable for producing tools and end-use products. Compared to other manufacturing technologies, it particularly offers new degrees of freedom in engineering design, which can, for example, be used for lightweight design, increased efficiency, and functional integration. Exploiting these potentials requires rethinking the design of parts and assemblies. For this purpose, the young research field “Design for Additive Manufacturing” (DfAM) has put forth some first methods and tools which include, amongst others, design rule collections and approaches for leveraging new degrees of freedom. However, these methods and tools were developed independently of each other, were not integrated into an overall methodology, did hardly foster the simultaneous consideration of more than one design potential, and did not focus explicitly on practical applicability. Design engineers were thus not sufficiently supported in developing innovative AM products.

In this thesis, additive manufacturing design potentials are derived from a comparison to other manufacturing processes, analyzed in terms of their benefits, and thoroughly classified. Based on this, a design methodology tailored to additive manufacturing is developed. For the first time, a generic methodological procedure model similar to well-established approaches such as guideline VDI 2221 serves as the basis. Existing as well as new methods and tools are then integrated into this framework. In contrast to previous research, multiple types of design problems, user expertise, system boundaries, and design goals are taken into account. The adapted design methodology thereby allows the systematic exploitation of additive manufacturing design potentials. All components of the methodology are transferred to industrial practice by means of an interactive, wiki-based design compendium. Practical applicability and additional benefit both of the methodology and the interactive implementation are demonstrated through example applications and target group surveys.



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Ausgangslage

Die additive Fertigung wird als disruptive Technologie deklariert, die sowohl einzelne Produkte und Geschäftsmodelle als auch ganze Branchen im Sinne einer industriellen Revolution nachhaltig verändern kann [Ber12; Man13b; Pil15; Vil14]. In der Vergangenheit wurden ihre Möglichkeiten anhand verschiedenster Bauteile demonstriert. Hierzu gehörten zum einen komplexe Serienanwendungen wie hochbelastete metallische Komponenten aus der Luft- und Raumfahrt oder patientenindividuelle Dentalimplantate und Prothesen [Guo13]. Zum anderen wurden weitere Potenziale der Technologie aufgezeigt, indem sie beispielsweise auf die Fertigung kompletter Fahrzeuge, Häuser oder Organe übertragen wurde [Kes15; Man13a; Mol17].

Hohe Erwartungen an die additive Fertigung werden von der aktuellen Marktentwicklung gefördert: Analysten rechnen von 2017 bis 2023 mit einem durchschnittlichen jährlichen Marktwachstum von 25,8 %, sodass der Gesamtwert von ca. 5 Milliarden US-Dollar im Jahr 2015 auf voraussichtlich ca. 33 Milliarden US-Dollar im Jahr 2023 wachsen wird [Mar17]. Zusätzlich zur wissenschaftlich fundierten Untersuchung der Möglichkeiten additiver Fertigungsverfahren haben in den vergangenen Jahren auch populärwissenschaftliche Medien zu einem Hype um die Technologie beigetragen [ED13; For13; The12]

Tatsächlich handelt es sich bei der additiven Fertigung (engl. „Additive Manufacturing“, AM), die umgangssprachlich auch als „3D-Druck“ bezeichnet wird, um einen Oberbegriff, unter dem eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren subsumiert wird. Die ersten wurden bereits in den 1980er-Jahren kommerzialisiert und für die Herstellung von Prototypenbauteilen im industriellen Produktentwicklungsprozess eingesetzt. Die Gemeinsamkeit aller additiven Fertigungsverfahren besteht in ihrem Grundprinzip: Bauteile werden durch Hinzufragen von Material Schicht für Schicht aufgebaut, ohne dass hierfür eine Form oder andere produktspezifische Vorbereitungen nötig sind, weshalb die Verfahren auch als „werkzeuglos“ bezeichnet werden. Es gibt unzählige Verfahrensvarianten, bei denen beispielsweise flüssiges Harz gezielt belichtet und ausgehärtet wird, Metallpulver durch einen Laser aufgeschmolzen wird oder Kunststoffdrähte strangweise neben- und übereinander abgelegt werden, wodurch sukzessive die gewünschte Bauteilgeometrie entsteht [Geb13; Gib15].

Im industriellen Kontext bietet das Additive Manufacturing mehrere Vorteile gegenüber anderen Fertigungsverfahren. Zuerst können kleine Stückzahlen wirtschaftlich und verhältnismäßig schnell hergestellt werden, da weder Investitionen noch Erstellungszeiten für Werkzeuge anfallen. Dadurch lassen sich weitere Potenziale realisieren, z. B. die kundenindividuelle Anpassung von Produkten und eine Reduktion von Lagerbeständen durch eine bedarfsgerechtere Produktion. Dieser Vorteil begründet den frühen Einsatz im sogenannten „Rapid Prototyping“; aufgrund höherer Fertigungsgenauigkeiten und verbesserter Material-

eigenschaften wird er zunehmend auf die Herstellung von Betriebsmitteln und Endprodukten übertragen [Geb13; Gib15].

Als weiteren wesentlichen Vorteil bieten additive Fertigungsverfahren neue Gestaltungsfreiheiten in der Konstruktion. Theoretisch können alle vom Konstrukteur erdachten Geometrien unmittelbar gefertigt werden – ähnlich wie beim 2D-Laserdruck, bei dem die Komplexität einer zu druckenden Zeichnung keine Rolle spielt [Bal13]. Dies steht in deutlichem Gegensatz zu anderen Fertigungsverfahren, bei denen zahlreiche Restriktionen des fertigungsgerechten Konstruierens beachtet werden müssen, die die herstellbare Formenvielfalt einschränken: Gussbauteile müssen nach dem Gießvorgang hinterschnittfrei aus ihrer Form entnehmbar sein, Bleche lassen sich nur begrenzt umformen, Bohrungen können nicht ihre Richtung ändern bzw. um die Ecke verlaufen. Additive Fertigungsverfahren ermöglichen dagegen weitgehend, Material ausschließlich dort zu platzieren, wo es aus funktionaler Sicht benötigt wird. Durch den gezielten Einsatz dieser konstruktiven Freiheiten können optimierte Produkte realisiert werden [Gao15].

Trotz seiner konstruktiven Potenziale hat das Additive Manufacturing sich noch nicht als anerkannte Alternative im industriellen Fertigungsverfahrenportfolio etabliert. Die Mehrheit der Konstrukteure kennt die Möglichkeiten und Grenzen klassischer Produktionsverfahren und beherrscht das fertigungsgerechte Konstruieren für diese Verfahren. Kenntnisse zu additiven Fertigungstechnologien und ihren Einsatzmöglichkeiten sind dagegen deutlich weniger verbreitet. Die fehlende Expertise im Konstruieren für additive Fertigungsverfahren ist ein wesentliches Hindernis für ihre flächendeckende Anwendung [Hua15]. Nicht zuletzt sind sie vielfach nach wie vor als reine Prototypenverfahren stigmatisiert und fristen daher insbesondere für einsatzfertige Produkte ein Nischendasein [Pet11].

## 1.2 Wissenschaftliche Einordnung und Problemstellung

Zur Berücksichtigung der Besonderheiten additiver Fertigungsverfahren in der Konstruktion hat sich das Forschungsfeld *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) herausgebildet. Darin werden zum einen die konstruktiven Besonderheiten untersucht und häufig anhand von Beispielanwendungen veranschaulicht. Zum anderen werden Vorgehensweisen, Methoden und Hilfsmittel entwickelt, die Konstrukteure beim nötigen Umdenkprozess für additive Fertigungsverfahren unterstützen sollen. Gegenüber der Forschung zur technologischen Weiterentwicklung der additiven Fertigungsverfahren selbst ist die DfAM-Forschung jedoch deutlich jünger und stand bis vor kurzem weniger im Fokus, sodass die Konstruktionsmethodik der rasanten Weiterentwicklung der Verfahrenstechnik bislang nicht standhalten konnte.

Obwohl in der additiven Fertigung häufig das Paradigma vorherrscht, alles sei problemlos herstellbar, gibt es auch hier konstruktive Grenzen, deren Untersuchung die DfAM-Forschung bislang dominierte. Schwerpunkt ist die Ermittlung von Konstruktionsregeln, z. B. für minimal herstellbare Wanddicken [Ada15a]. Darüber hinaus werden im DfAM zur Ausschöpfung

der konstruktiven Freiheiten beispielsweise allgemeine Richtlinien bereitgestellt oder angepasste Kreativitätsmethoden erarbeitet [Bec05; Lav15]. In einigen Ansätzen werden beide Elemente miteinander kombiniert, z. B. zur Topologieoptimierung [Lea14].

Im Design for Additive Manufacturing fehlt jedoch bislang eine detaillierte Untersuchung zu der ganz grundlegenden Fragestellung, welche konstruktiven Potenziale die additive Fertigung im Vergleich zu anderen Verfahren tatsächlich bietet. DfAM-Ansätze wurden außerdem weitgehend isoliert voneinander entwickelt und sind kaum durch geeignete Schnittstellen miteinander verbunden. Die Zersplitterung der Forschungslandschaft ist auch dadurch begründet, dass Autoren die allgemeine Konstruktionsmethodik nach Pahl/Beitz, VDI-Richtlinie 2221 und ähnlichen etablierten generischen – und somit gleichermaßen fertigungsverfahrensunabhängigen – Modellen bislang weder als natürliche gemeinsame Basis zugrunde legen noch eine Einordnung ihrer Ansätze in die typischen Phasen des Konstruktionsprozesses vornehmen. Sie lassen häufig auch allgemeine Methoden und Hilfsmittel des Konstruierens unberücksichtigt, obwohl viele davon beispielsweise das kreative Öffnen des Lösungsraums zur Nutzung neugewonnener Freiheiten fördern können. Der geringe Bezug zur allgemeinen Konstruktionsmethodik führt auch dazu, dass DfAM-Ansätze häufig nur ein einziges Konstruktionsziel fokussieren (z. B. Leichtbau), sodass das Erzielen innovativer Lösungen durch Ausschöpfen mehrerer konstruktiver Potenziale erschwert wird. Nicht zuletzt bleibt offen, wie der Transfer der neuen Methoden und Hilfsmittel in die industrielle Anwendung gelingen soll. Konsequenz der beschriebenen Defizite ist, dass die konstruktiven Potenziale der additiven Fertigung in der Ingenieurspraxis mindestens teilweise ungenutzt bleiben.

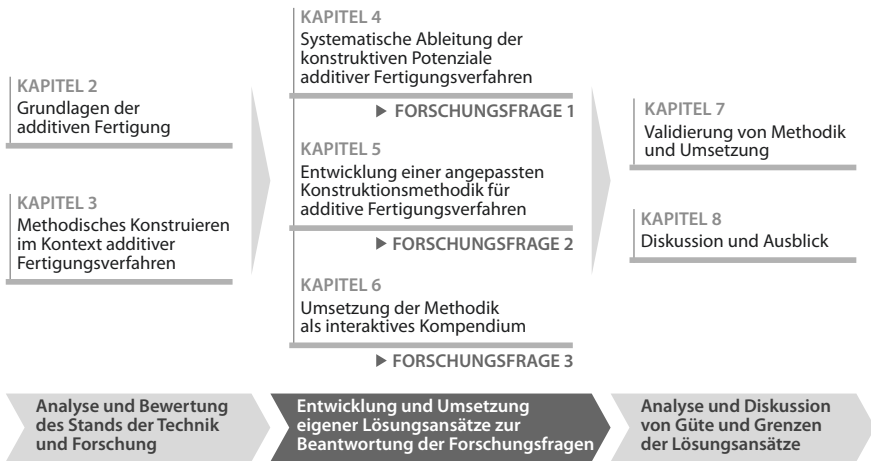
### 1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Aufbauend auf dem beschriebenen Forschungsdefizit ist das Ziel dieser Arbeit, eine an die Besonderheiten additiver Fertigungsverfahren angepasste und praktisch anwendbare Konstruktionsmethodik zu erarbeiten, um die Ausnutzung der konstruktiven Potenziale bestmöglich zu unterstützen. Konkret soll ein Beitrag zur Beantwortung folgender Forschungsfragen geleistet werden:

1. Worin bestehen die konstruktiven Potenziale additiver Fertigungsverfahren im Einzelnen?
2. Inwiefern ist der Konstruktionsprozess an die Eigenschaften additiver Fertigungsverfahren anzupassen? Welche Vorgehensweisen, Methoden und Hilfsmittel können Konstrukteure bei ihrer Arbeit unterstützen?
3. Auf welche Weise kann die Methodik zum Konstruieren für additive Fertigungsverfahren interessierten Anwendern in der Praxis zur Verfügung gestellt werden?

Um das Ziel zu erreichen und die einzelnen Forschungsfragen zu beantworten, werden der in Abbildung 1.1 dargestellte Aufbau und die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise verwendet.

Zur Einordnung und Bewertung des Stands der Technik werden in Kapitel 2 zunächst die Grundlagen der additiven Fertigung vorgestellt. Hierdurch soll ein Verständnis für die



**Abbildung 1.1:** Aufbau der Arbeit

Prozesskette und die Charakteristika der verschiedenen Technologien geschaffen werden, nicht zuletzt um abschätzen zu können, inwiefern Potenziale und Restriktionen über alle additiven Verfahren verallgemeinerbar sind, und um gegebenenfalls bestimmte Verfahren im weiteren Verlauf der Arbeit zu fokussieren.

Anschließend werden in Kapitel 3 die Grundzüge der klassischen allgemeinen Konstruktionsmethodik vorgestellt, in die der Stand der Forschung im Konstruieren für additive Fertigungsverfahren eingeordnet wird. Durch eine umfassende Literaturlauswertung im Design for Additive Manufacturing werden der Forschungsbedarf und das Vorhaben im Rahmen dieser Arbeit konkretisiert. Stets werden hierbei auch Aspekte der praktischen Anwendbarkeit einzelner Ansätze in der industriellen Produktentwicklung berücksichtigt.

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 1 werden die konstruktiven Freiheiten additiver Fertigungsverfahren in Kapitel 4 aus ihren inhärenten Merkmalen sowie durch einen strukturierten Vergleich mit konventionellen Fertigungsverfahren ermittelt. Auf dieser Grundlage werden die Mehrwerte (Nutzenversprechen) für Produkte, Kunden und Unternehmen abgeleitet. Zusammen werden die Potenziale klassifiziert und in eine Systematik überführt, um Abhängigkeiten aufzuzeigen und die Grundlage für eine geeignete Konstruktionsmethodik zu schaffen.

In Kapitel 5 steht Forschungsfrage 2 im Fokus: Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird eine an die Besonderheiten additiver Fertigungsverfahren angepasste Konstruktionsmethodik erarbeitet, die sämtliche Konstruktionsphasen, -arten und -ziele sowie verschiedene Anwenderbedürfnisse abdeckt. In die Methodik werden Methoden und Hilfsmittel integriert, die aus allgemeinen und DfAM-spezifischen Ansätzen abgeleitet werden. Die Methodik wird durch ein Nutzungskonzept vervollständigt.

Zum Transfer der Ergebnisse gemäß Forschungsfrage 3 wird in Kapitel 6 ein Ansatz erarbeitet, der auf den Anforderungen aus der Praxis basiert. Das Konzept wird vollständig als sogenanntes Kompendium umgesetzt und für die industrielle Anwendung bereitgestellt.

Wenngleich die Eignung einer Methodik und ihrer praktischen Umsetzung kaum generisch nachweisbar ist, wird in Kapitel 7 eine teilweise Validierung der erarbeiteten Ansätze durchgeführt. Diese besteht zum einen in einer praktischen Anwendung der Methodik in verschiedenen Beispielprojekten, zum anderen in einer Akzeptanzuntersuchung des Kompendiums.

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse der Arbeit vor dem Hintergrund der Forschungsfragen zusammengefasst und kritisch hinsichtlich ihres Mehrwerts für Theorie und Praxis sowie ihrer Limitationen diskutiert. Auf dieser Basis wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.





## 2 Grundlagen der additiven Fertigung

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik additiver Fertigungsverfahren dargestellt. Nach einer kurzen Einführung (Abschnitt 2.1) und einer Beschreibung der additiven Prozesskette (Abschnitt 2.2) werden die verschiedenen Verfahrensarten erläutert und einander gegenübergestellt (Abschnitt 2.3). Anschließend werden Potenziale und Anwendungsbeispiele (Abschnitt 2.4) sowie aktuelle Restriktionen (Abschnitt 2.5) beschrieben.

### 2.1 Einführung und Abgrenzung

**Verfahrensprinzip und Begriffsdefinitionen** Additive Fertigung wird wie folgt definiert [AST12; Bal13; Geb13, 3 f., 24; Gib15, 2, 7 ff.; VDI14]:

**Definition 1:** *Additive Fertigungsverfahren* sind Fertigungsverfahren, bei denen das Bauteil – im Gegensatz zu subtraktiven Verfahren – durch Hinzufügen von Volumenelementen oder Schichten direkt aus digitalen 3D-Daten automatisiert aufgebaut wird oder auf einem bestehenden Werkstück weitere Volumenelemente aufgebaut werden. Wesentliches Merkmal aller Verfahren ist der Entfall produktspezifischer Werkzeuge und Vorbereitungen („werkzeuglose Fertigung“).

In Wissenschaft und Praxis ist im Zusammenhang mit additiven Fertigungsverfahren eine Vielzahl an Begriffen üblich, die jedoch nur in wenigen Fällen eindeutig definiert bzw. genormt sind und deren Verwendung daher uneinheitlich ist. Bereits für die Klasse der Fertigungsverfahren haben sich verschiedene Begriffe etabliert. Während im Englischen in ASTM-Standard F2792 Additive Manufacturing (AM) bzw. Additive Manufacturing Technologies (AMT) als Oberbegriffe genormt sind [AST12], werden im Deutschen insbesondere die Begriffe generative Fertigung/Fertigungsverfahren und additive Fertigung/Fertigungsverfahren verwendet. Während „generative Fertigung“ die deutschsprachige Literatur zunächst dominierte und auch in der zurückgezogenen VDI-Richtlinie 3404 verwendet wurde [VDI09a], setzt „additive Fertigung“ sich als direkte Übersetzung aus dem Englischen zunehmend durch und wird auch in der neuen VDI-Richtlinie 3405 verwendet [VDI14].

Weitere umfassende Bezeichnungen sind unter anderem (Additive) Layer Manufacturing, Rapid-Technologien/-Verfahren, Schichtbauverfahren, Automated Fabrication, (Solid) Freeform Fabrication und Layer-Based Manufacturing [Bey14; Bre13, 11 ff.; Geb13, 3, 12 f.; Gib15, 7 ff.; Zäh06, 9 ff.]. In dieser Arbeit werden als Oberbegriffe stets additive Fertigung/Fertigungsverfahren sowie synonym Additive Manufacturing mit AM als etablierte Abkürzung verwendet.

Ungeachtet aller wissenschaftlichen Definitionen löst der Begriff 3D-Drucken, der seinen Ursprung im MIT-Patent zum 3D Printing hat und somit eigentlich eine Verfahrensvariante bezeichnet, zunehmend alle anderen Begriffe ab und wird mindestens in der Praxis aufgrund seiner Anschaulichkeit als Sammelbegriff für additive Fertigung verwendet [Geb13, 3]. Da

nahezu alle additiven Technologien schichtweise arbeiten, handelt es sich jedoch genau genommen um 2,5-D-Verfahren [Ber13, 7].

**Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Rapid Manufacturing** Im Anfangsstadium ihrer Entwicklung wurden additive Fertigungsverfahren insbesondere zur Herstellung von Prototypenbauteilen angewendet. Da sie den bis dahin üblichen zeitaufwendigen Prozess zur Erstellung von Prototypen drastisch verkürzten – statt dem traditionellen manuellen Modellbau können Modelle automatisch direkt aus CAD-Daten generiert werden –, wird diese AM-Anwendung Rapid Prototyping genannt. Additive Fertigungsverfahren werden daher allgemein auch als Rapid-Technologien bezeichnet, wenngleich „schnell“ lediglich in Relation zum klassischen Prototypenbau unumstritten ist [Bre13, 12; Bur05, 74; Geb13, 309 ff.; Gib15, 2, 8 f.; Fel13d]. Gemäß dem jeweiligen Anwendungsfall wird insbesondere unterschieden zwischen Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing. Diese Begriffe werden folgendermaßen definiert:

**Definition 2:** *Rapid Prototyping (RP)* bezeichnet das Herstellen von Modellen/Prototypen durch additive Fertigungsverfahren. Prototypen sind Bauteile, die nicht als Endprodukte eingesetzt werden (können), sondern lediglich bestimmte zu evaluierende (z. B. optische oder geometrische) Eigenschaften eines in Entwicklung befindlichen Produkts besitzen und dadurch den Produktentstehungsprozess unterstützen [Bre13, 12; Geb13, 7 f., 309; Hop06, 1].

**Definition 3:** *Rapid Manufacturing (RM)* oder Direct Manufacturing bezeichnet die additive Fertigung von Endprodukten, die auch Ziel- oder Serienbauteile genannt werden. Endprodukte sind marktgängige Bauteile, die sämtliche in der Produktentwicklung festgelegte Eigenschaften aufweisen, z. B. hinsichtlich Werkstoff und Konstruktion [Bre13, 12; Geb13, 9 f., 421; Hop06, 1].

RP und RM können weiter untergliedert werden. Innerhalb des Prototypings wird unterschieden zwischen Design-/Konzeptmodellen, die vornehmlich zur Visualisierung und als Geometrieprototypen für Einbauuntersuchungen verwendet werden, und Funktionsprototypen, die bereits einige Funktionscharakteristika des späteren Serienbauteils zumindest für begrenzte Zeit erfüllen und somit zur Funktionsabsicherung zum Einsatz kommen [Geb13, 7 f.]. Eine noch detailliertere Einteilung der Modellklassen stellt beispielsweise VDI-Richtlinie 3404 zur Verfügung [VDI09a].

Eine Sonderrolle nimmt das Rapid Tooling ein, das teilweise auch als eigene Anwendungskategorie angesehen wird. Wird ein Werkzeug als Bauteil verstanden, kann es ebenfalls als Prototyp oder Serienprodukt vorliegen. Die Definition lautet daher:

**Definition 4:** *Rapid Tooling (RT)* bezeichnet das Herstellen von Werkzeugen, Werkzeugeinsätzen, Lehren und Formen durch additive Fertigungsverfahren. Handelt es sich um Prototypenwerkzeuge, zählen sie zum Prototyping (Prototype Tooling); stellen die Werkzeuge Endprodukte dar, werden sie dem Rapid Manufacturing zugeordnet (Direct Tooling) [Bre13, 12; Geb13, 10 f., 375 ff.].

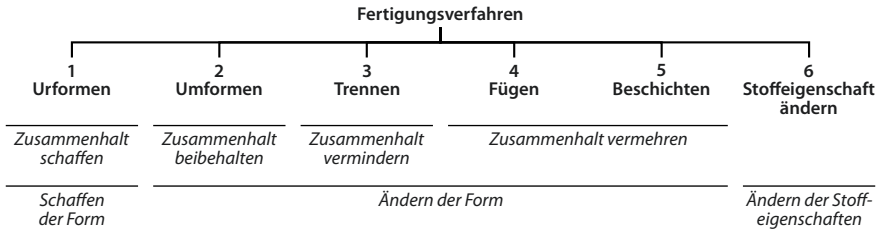


Abbildung 2.1: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [DIN03a]

Grundsätzlich können für RP, RT und RM dieselben additiven Technologien zum Einsatz kommen, solange die jeweils erforderlichen Bauteileigenschaften erreicht werden [Geb13, 421 ff.]. Näheres zur besonderen Eignung einzelner Verfahren für spezifische Anwendungen wird in Abschnitt 2.3 erläutert.

**Einordnung in die Gesamtheit der Fertigungsverfahren** Gemäß DIN 8580 werden Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen eingeteilt, die auf den wesentlichen Unterscheidungsmerkmalen der Verfahren basieren (Abbildung 2.1). Entweder wird die Form aus formlosem Stoff geschaffen (Hauptgruppe 1), oder die Form wird unter Beibehaltung, Verminderung oder Vermehrung des Zusammenhalts geändert (Hauptgruppen 2–5), oder die Stoffeigenschaften werden verändert (Hauptgruppe 6). Die Hauptgruppen werden weiter in Gruppen und Untergruppen unterteilt [DIN03a].

Eine eindeutige Einordnung additiver Verfahren in die Hauptgruppenordnung ist nicht möglich. In der Literatur werden sie größtenteils dem Urformen zugeordnet [Fri12, 106; Mei04, 11]. Dies ist für einige Verfahren korrekt, trifft aber nicht bei allen Verfahren zu. Vielmehr kommt häufig eine Kombination zum Einsatz, z. B. aus Fügen und Trennen. Andere Verfahren wiederum sind eindeutig dem Beschichten zuzuordnen [Geb13, 91]. Aufgrund dessen würden additive Fertigungsverfahren genau genommen eine Strukturierung der Fertigungsverfahren auf anderer Grundlage oder eine Erweiterung um eine zusätzliche Hauptgruppe erfordern. Alternativ kann die im Englischen gebräuchliche Unterscheidung zwischen subtraktiven, formativen und additiven Fertigungsverfahren verwendet werden [Geb13, 1].

## 2.2 Prozesskette

Trotz der Unterschiede, die zwischen den additiven Fertigungsverfahren bestehen, kann eine allgemeine Prozesskette aufgestellt werden, die für alle Verfahren ähnlich ist. Additive Fertigung läuft in folgenden Schritten ab, die in Abbildung 2.2 veranschaulicht sind [Chu15, 20–28; Geb13, 26–46; Gib15, 3–6, 43–52; VDI14; Zäh06, 14–31]:

1. *CAD-Daten-Erzeugung*: Wie beim Einsatz anderer Fertigungsverfahren werden zunächst 3D-CAD-Daten generiert. Hierzu können einerseits etablierte allgemeine oder AM-