

Bauteil­auswahl für die industrielle additive Fertigung

Eine empirisch begründete Typologisierung wirtschaftlich einsetzbarer Bauteiltypen unter Berücksichtigung der Total Cost of Ownership

**Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (Dr. rer. pol.)

genehmigte Dissertation

von

Michael Patrick Schöppe

aus

Meerbusch

2023

1. Gutachter: Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten
Institut für Logistik und Unternehmensführung
Technische Universität Hamburg

2. Gutachter: Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Horst Wildemann
Forschungsinstitut Unternehmensführung, Logistik und Produktion
Technische Universität München

Tag der mündlichen Prüfung: 01.08.2023

Michael Patrick Schöppe

Bauteil­auswahl für die industrielle additive Fertigung

Eine empirisch begründete Typologisierung wirtschaftlich einsetzbarer Bauteil­typen unter Berücksichtigung der Total Cost of Ownership

Copyright by TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG

1. Auflage 2023

Michael Patrick Schöppe

Bauteil­auswahl für die industrielle additive Fertigung

Eine empirisch begründete Typologisierung wirtschaftlich einsetzbarer Bauteil­typen unter Berücksichtigung der Total Cost of Ownership

München: TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG

ISBN: 978-3-947730-39-1

Bibliographische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind online abrufbar

Verlag:

TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG, München

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

Zusammenfassung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit unterstützt die Bauteilauswahl für die industrielle additive Fertigung durch die empirisch begründete Typologisierung wirtschaftlich einsetzbarer Bauteiltypen. Das erarbeitete Modell berücksichtigt hierbei die Total Cost of Ownership. Aus der Vielzahl möglicher Einflussfaktoren ergibt sich für Anwender eine hohe Komplexität in der Bauteilauswahl für die additive Fertigung. Diese Arbeit greift mit der Typologisierung das Problem dieser vielzähligen Vorteile und Herausforderungen auf und bietet eine Strukturierung zu berücksichtigender Kostenveränderungen und Technologievorteile in der Bauteilauswahl. Die Untersuchung geeigneter Bauteiltypen für den Einsatz der additiven Fertigung erfolgt dabei aus wirtschaftlicher Perspektive unter Berücksichtigung realisierbarer Kosteneinsparungen und Wertsteigerungen. Die Typologisierung verbindet hierbei theoretische und praktische Erkenntnisse aus Literatur, Fallbeispielen, Experteninterviews und einer Online-Umfrage.

Die Typologisierung als Teil der empirischen Analyse verbindet die Beschreibung von Bauteiltypen anhand von Charakterisierungsmerkmalen mit den Auslegungsmöglichkeiten des Anwenders, deren wirtschaftliche Bedeutung durch Gestaltungsvariablen bewertet wird. Die untersuchten, 24 Charakterisierungsmerkmale verdichten sich in der Untersuchung zu den Dimensionen der Integrationskomplexität, der Produkt- und Prozesskomplexität, der realisierbaren, direkten Kostenvorteile der additiven Fertigung sowie dem Umfang der Kosten- und Werterfassung im Unternehmen. Die Gestaltungsvariablen bilden für die acht identifizierten Bauteiltypen zu berücksichtigende Vorteile und indirekte Effekte der additiven Fertigung ab. Die Erfolgswirkung der Veränderung der Gestaltungsvariablen wird anhand einer Korrelationsanalyse ermittelt, aus deren Ergebnissen sich Handlungsempfehlungen für die Bauteilauswahl für die additive Fertigung ableiten. Die Handlungsempfehlungen basieren auf einer quantitativen empirischen Analyse in Form von Hypothesentests und zusätzlich auf einer Korrelationsanalyse zur Identifizierung von Abhängigkeiten. So schafft die vorgestellte Arbeit ein differenziertes Bild, in welchen Anwendungsfällen die Nutzung prozesseseitiger Vorteile der additiven Fertigung oder die Änderung des Bauteildesigns für die additive Fertigung einen besonderen wirtschaftlichen Nutzen zeigen können. Die Ergebnisse der Untersuchung ermöglichen es Nutzern des Modells somit, die Bauteilauswahl an den Stärken eines Unternehmens auszurichten.

Das erstellte Modell unterstützt den Vergleich additiver und konventioneller Fertigungsverfahren, da die Komplexität der Bewertungsaufgabe reduziert wird. Durch die Bildung klassifikatorischer Typen ermöglicht das Modell ein empirisch begründetes Vorgehen in der Bauteilauswahl. Es werden zudem Grundlagen zur Bewertung der technischen Eignung von Bauteilen, der Auswahl des geeigneten additiven Fertigungsverfahrens und der detaillierten Kostenbetrachtung des individuellen Anwendungsfalls vorgestellt. Zusätzlich werden relevante Kosten- und Werttreiber je Bauteiltyp identifiziert, die eine Bewertung der Eignung eines Bauteils für die additive Fertigung und eine detaillierte Kostenbetrachtung unterstützen.

Geleitwort

Die additive Fertigung wird sowohl in wissenschaftlichen Veröffentlichungen als auch in der Praxis als potenzialträchtige neue Technologie angesehen. Zahlreiche Unternehmen haben bereits Erfahrungen mit der additiven Fertigung gesammelt. In diesem Kontext stellt sich jedoch stets die Frage nach den wirtschaftlich geeigneten Einsatzfeldern dieser Technologie. Aufgrund der Technologieeigenschaften kann die additive Fertigung als eine revolutionäre Produktionstechnologie bezeichnet werden, für die bestehende Ansätze für den Vergleich von Fertigungsverfahren nur eingeschränkt einsetzbar sind. Insbesondere vor dem Hintergrund der Herausforderungen der additiven Fertigung, wie dem Bedarf nach Steigerung der Reproduzierbarkeit sowie nach Senkung der hohen wiederkehrenden Produktionskosten und gleichzeitig häufig geringen Stückzahlen bedarf es eines zielgerichteten Vorgehens für die Identifikation von wirtschaftlich geeigneten Bauteilen für die additive Fertigung.

Die Überlegungen von Herrn Schöppe greifen diese Problemstellung auf, indem ein Modell für den Verfahrensvergleich geschaffen wird, das sowohl die technologischen Eigenschaften als auch die ökonomischen Möglichkeiten der additiven Fertigung berücksichtigt und so den individuellen Anforderungen eines Unternehmens Rechnung tragen kann. Mit Hilfe des Modells können Bauteile anhand von Einflussgrößen bewertet und ausgewählt werden.

Herrn Schöppe gelingt es, das Spannungsfeld der Vorteile der additiven Fertigung im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren und die Herausforderungen für den Einsatz der Technologie vor dem Hintergrund der wirtschaftlichen Bewertung der Einsatzmöglichkeiten systematisch zu erarbeiten und Gestaltungsempfehlungen für den Technologieeinsatz zu identifizieren. Mit der konzipierten Vorgehensweise steht ein umfassendes und empirisch begründetes Lösungskonzept für die organisatorische Gestaltung der Bauteilauswahl für die industrielle additive Fertigung zur Verfügung. Die Arbeit zeichnet sich durch eine hohe theoretische Durchdringung bei gleichzeitig hohem Praxisbezug aus.

Das Buch, dem eine Dissertation an der Technischen Universität Hamburg zugrunde liegt, ist für Leser aus Wissenschaft und Unternehmenspraxis zu empfehlen, die sich mit der additiven Fertigung beschäftigen.

Hamburg, im September 2023

München, im September 2023

Wolfgang Kersten

Horst Wildemann

Danksagung

Die Idee für die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit an der Technischen Universität München. Die Dissertation ist das Ergebnis eines kontinuierlichen Lernprozesses, der durch konstruktive Diskussionen und hilfreiche Anregungen über einen Zeitraum von mehreren Jahren ermöglicht wurde und für den ich mich herzlich bedanke. Insbesondere bedanke ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten, und bei meinem Mentor, Herrn Univ.-Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Horst Wildemann, für die Ermöglichung und Förderung meiner Promotion während allen Schritten. Bedanken möchte ich mich auch für das Vertrauen und die große Freiheit, die mir von ihm in der Gestaltung und Ausarbeitung der vorliegenden Dissertation entgegen gebracht wurde. Der Förderung und Unterstützung war ich mir zu jedem Zeitpunkt gewiss und werde diese fortan in bester Erinnerung halten. Die außerordentliche fachliche Expertise und das unerschöpfliche Engagement von Herrn Univ.-Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten sowie von Univ.-Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Horst Wildemann waren mir dabei stets ein Vorbild. Zusätzlichen Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Horst Wildemann für die Übernahme des Zweitgutachtens und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Claus Emmelmann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Allen beteiligten Experten aus der Unternehmenspraxis, derzeitigen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen, die mir in vielen Diskussionen wertvolle Anregungen gegeben haben, danke ich sehr herzlich. Besonders bedanken möchte ich mich für die kollegiale Zusammenarbeit bei Dr. Ayman Nagi, Marc Stunz, Adrian Markgraf, Dr. Alexander Brunn, Dr. Christopher Hellmann, Dr. Stefan Zetzmann, Sebastian Berndt, Enno Buddelmann, Justus Bunk, Dr. Sebastian Eckert, Jürgen Hamann, Jan-Hauke Helmts, Sebastian Junker, Florian Kirschner, Dr. Alexander Knaus, Paul Kompalik, Benedict Langer, Manuel Lutz, Myriam Lutz, Paul Menold, Thorsten Mittelstrass, Philipp Möller, Christian Müller, Süleyman Sandikci, Lukas Schild, Maximilian Schnaubelt, Dominic Schober, Karl Schwarzenbilder, Dr. Benjamin Ströbele, Stefan Söllner, Sven Stegmann, Niklas Stepanek, Carl-André von Wiedersperg, Ulrich von Waldow, Christoph Wenig, Dr. Thomas Winter, Kai Wright und Patrick Zimmermann. Bedanken möchte ich mich außerdem bei Anja Meister, Stephanie Richter, Ulrike Hovestadt-Nover, Heidi Seitz und Sabine Seil, die stets den Überblick bewahrten und mich unterstützten. Für die zuverlässige Beschaffung von Literatur danke ich insbesondere Sarah Kipp und auch dem Supportteam. Für die Unterstützung in IT-Fragen gilt mein Dank Franz Alt und Michael Wirtz.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meiner gesamten Familie, meinen engen Freunden und meiner Partnerin bedanken, die mich all die Jahre meiner Ausbildung unterstützt und an mich geglaubt haben, auch und insbesondere in anstrengenden Zeiten, und mir stets aufmunternde Worte, Verständnis, ein offenes Ohr und auch eine Menge Geduld entgegenbrachten. Nicht zuletzt gilt mein Dank auch meinem verstorbenen Vater, der mich bereits in frühen Jahren prägte und so auf den eingeschlagenen Pfad führte. Ihnen allen widme ich dieses Buch.

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis.....	I
II	Formelzeichen und Abkürzungen.....	V
III	Abbildungsverzeichnis.....	VII
1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung und Motivation.....	2
1.2	Stand der Forschung und Literatur.....	6
1.2.1	Verfahrensvergleich auf Basis der Fertigungskosten.....	10
1.2.2	Multikriterieller und heuristischer Verfahrensvergleich.....	12
1.2.3	Verfahrensvergleich mit Rücksicht auf Lebenszykluseffekte.....	16
1.3	Zielsetzung.....	21
1.4	Struktur der Arbeit.....	23
2	Theoretischer Bezugsrahmen.....	26
2.1	Technologiemanagement.....	26
2.2	Wirtschaftlicher Vergleich von Fertigungsverfahren.....	30
2.3	Prozesskostenrechnung zum wirtschaftlichen Verfahrensvergleich.....	38
2.3.1	Grundlagen der Kostenrechnung für die Prozesskostenrechnung.....	39
2.3.2	Ziele und Vorgehen der Prozesskostenrechnung.....	45
2.3.3	Total-Cost-of-Ownership.....	51
2.4	Zu vergleichende Fertigungsverfahren.....	57
2.4.1	Prozessablauf der additiven Fertigung.....	59
2.4.2	Prozesskette der konventionellen Fertigung.....	68
2.5	Direkte und indirekte Effekte der additiven Fertigung.....	80
2.5.1	Potenziale der additiven Fertigung.....	81
2.5.2	Veränderung des Produktionsprozesses durch additive Fertigung.....	82
2.5.3	Veränderung des Produkts durch additive Fertigung.....	86
2.5.4	Veränderung im organisatorischen Ablauf durch additive Fertigung.....	89
2.5.5	Kostenpotenziale und Mehrpreisfähigkeit durch additive Fertigung.....	93

2.6	Herausforderungen für den Einsatz additiver Fertigung	97
2.7	Erkenntnisse aus dem theoretischen Bezugsrahmen	102
3	Empirische Analyse der Modellanforderungen	109
3.1	Forschungsdesign und empirischer Bezugsrahmen.....	110
3.2	Ermittlung der Haupteinflussgrößen in der Literatur	113
3.3	Ermittlung der Modellanforderungen anhand von Experteninterviews.....	116
3.4	Analyse der Modellanforderungen anhand von Fallstudien.....	126
3.4.1	Beschreibung der Fallstudien.....	126
3.4.2	Erkenntnisse der Fallstudienanalyse	129
3.4.3	Validierung der Relevanz der identifizierten Einflussgrößen anhand der Fallstudien	130
3.5	Vorgehen und Datenbasis der quantitativen empirischen Analysen	143
3.6	Zusammenfassung der Modellanforderungen	149
4	Modellbildung.....	151
4.1	Theoretische Grundlagen der Modellbildung	151
4.2	Theoretische Grundlagen der Typenbildung	155
4.3	Charakterisierung der Einflussgrößen	158
4.3.1	Kategorisierung des Betrachtungsobjekts	159
4.3.2	Integrationskomplexität.....	162
4.3.3	Produkt- und Prozesskomplexität	165
4.3.4	Realisierbare, direkte Kostenvorteile der additiven Fertigung	174
4.3.5	Umfang der Kosten- und Werterfassung zur Verfahrensauswahl.....	177
4.4	Quantitative empirische Analyse der Einflussgrößen	182
4.4.1	Faktorenanalyse	183
4.4.2	Clusteranalyse.....	188
4.4.3	Charakterisierung der Bauteiltypen des wirtschaftlichen Verfahrensvergleichs	194
4.4.4	Zusammenfassung der Typologisierung	209
4.5	Gestaltungsvariablen des Modells	212

4.5.1	Realisierung von Produktvorteilen durch die additive Fertigung.....	213
4.5.2	Realisierung von Prozessvorteilen durch die additive Fertigung	223
4.5.3	Interaktionsform mit dem Abnehmer des Bauteils.....	227
4.6	Erfolgsgrößen des Modells	229
5	Auswertung der Korrelationsanalysen.....	231
5.1	Korrelationsanalyse für Bauteiltyp 1: „Komplexes Bauteil“	232
5.2	Korrelationsanalyse für Bauteiltyp 2: „Entwicklungszeitkritisches Bauteil mit kurzer Prozesskette“	234
5.3	Korrelationsanalyse für Bauteiltyp 3: „Entwicklungszeitkritisches Bauteil mit geringen Belastungsanforderungen“	236
5.4	Korrelationsanalyse für Bauteiltyp 4: „Bauteil mit hohen Einmalkosten bei hohen Belastungsanforderungen“	238
5.5	Korrelationsanalyse für Bauteiltyp 5: „Privatkundenbauteil mit hohem Logistikaufwand“	241
5.6	Korrelationsanalyse für Bauteiltyp 6: „Bauteil mit hohen Stückzahlen“	242
5.7	Korrelationsanalyse für Bauteiltyp 7: „Bauteil mit langer Prozesskette“	245
5.8	Korrelationsanalyse für Bauteiltyp 8: „Bauteil mit hohen Einmalkosten bei kurzer Prozesskette“	246
5.9	Überprüfung der ermittelten Korrelationen	248
5.10	Zusammenfassung der empirischen Analyse	259
6	Gestaltungsempfehlungen für die Bauteilwahl.....	261
6.1	Gestaltungsempfehlungen für den Einsatz der additiven Fertigung zur Kostenreduzierung.....	262
6.2	Gestaltungsempfehlungen für den Einsatz der additiven Fertigung zur Wertsteigerung	271
6.3	Gestaltungsempfehlung für den Einsatz der additiven Fertigung zur Kosten- und Wertoptimierung.....	273
6.4	Übergreifende Gestaltungsempfehlungen.....	279
7	Zusammenfassung und Ausblick	282
IV	Anhang	288
V	Literaturverzeichnis.....	308