

**Wirtschaftliche und technische Bewertung additiv hergestellter Triebwerks-
komponenten für die Serienfertigung**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Wirtschaftswissenschaften

Dr. rer. pol.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Kfm. Mariusz Lakomicz

aus

Kwidzyn, Polen

Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. pol. Rainer Leisten

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt

Tag der mündlichen Prüfung: 28.10.2015

Berichte aus der Fertigungstechnik

Marius Lakomic

**Wirtschaftliche und technische Bewertung
additiv hergestellter Triebwerkskomponenten
für die Serienfertigung**

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4135-4

ISSN 0945-0769

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich ein paar persönliche Worte an die Personen richten, die mich während des Lebensabschnittes, der zur Erstellung meiner Doktorarbeit geführt hat, unterstützt und begleitet haben.

In erster Linie danke ich meinen beiden Doktorvätern Herrn Prof. Dr. Gerd Witt und Herrn Prof. Dr. Rainer Leisten. Ich bedanke mich für die hervorragende fachliche Betreuung, sowie für die vielen persönlichen Ratschläge und Hinweise, die über die Erstellung dieser Arbeit hinausgingen.

Meinen Vorgesetzten und Betreuern seitens MTU Aero Engines, Richard Maier, Thomas Dautl und Dr. Karl-Heinz Dusel danke ich für die Schaffung der Rahmenbedingungen zur Erstellung meiner Dissertation und den Einblick in die interessante Welt der Triebwerksindustrie.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Dr. Erwin Bayer für die unzähligen und langen abendlichen Diskussionen, die mir den nötigen Weitblick verschafften und den roten Faden für meine Arbeit aufzeigten.

Den Mitarbeitern vom Lehrstuhl für Fertigungstechnik und vom Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Operations Management danke ich für die Hilfsbereitschaft und die abwechslungsreiche Zeit auch außerhalb der Tätigkeit am Institut.

Großer Dank gebührt meinen Eltern, die mich stets mit ihrer ganzen Zuwendung und Hingabe von Beginn meiner schulischen und akademischen Laufbahn gefördert und unterstützt haben.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Lebensgefährtin Kathrin Jakob, die mich auch in schwierigen Situationen stets zu motivieren verstanden hat und mir den nötigen Rückhalt während dieser Zeit gab.

München, im Oktober 2015

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis VIII

Abbildungsverzeichnis X

Tabellenverzeichnis XIII

1 Einleitung 1

 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung 1

 1.2 Zielsetzung der Arbeit 4

 1.3 Vorgehensweise 5

2 Additive Fertigungsverfahren in der Triebwerksindustrie 6

 2.1 Besonderheiten Triebwerksindustrie 6

 2.1.1 Sicherheitsaspekte 8

 2.1.2 Stückzahlen 10

 2.1.3 Wirtschaftlichkeit 11

 2.2 Additive Fertigungsverfahren 13

 2.2.1 Verfahrensgrundlagen 13

 2.2.2 Begriffsdefinition 17

 2.2.3 Prozesskette 18

 2.3 Markt- und Technologiepotential 20

 2.3.1 Entwicklung Triebwerksmarkt 21

 2.3.2 Ausblick Anlagentechnologie 23

 2.3.3 Ressourcenorientierte Betrachtung 25

 2.4 Bauteilportfolio und Klassifizierung 26

 2.4.1 Fertigungshilfsmittel und Entwicklungshardware 27

 2.4.2 Substitution 28

 2.4.3 Neue Bauweisen 30

 2.5 Technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Markteinführung 34

 2.5.1 Reproduzierbarkeit und Prozessstabilität 36

 2.5.2 Maßhaltigkeit 38

 2.5.3 Oberflächen 39

 2.5.4 Materialeigenschaften 43

 2.5.5 Zulassungsfähigkeit Luftfahrt 44

 2.5.6 Auswahl geeigneter Nachbearbeitungsverfahren 46

 2.5.7 Wirtschaftlichkeit 48

 2.5.8 Wertschöpfungstiefe 49

 2.6 Phasen der Industrialisierung des Verfahrens 51

 2.6.1 Phase I: Markteinführung 52

Inhaltsverzeichnis

2.6.2	Phase II: Aufbau Serienfertigung	54
2.6.3	Phase III: Center of Excellence	54
3	Bewertungsansätze komplexer Bauteile und Prozessketten	56
3.1	Komplexitätsmanagement	56
3.2	Modelle zur Komplexitätsbewertung	59
3.2.1	Technologiebewertung und Innovationsrechnung	60
3.2.2	Kennzahlen in der Produktion	68
3.2.3	Prozesskettenbewertung.....	73
3.2.4	Bauteilkomplexität.....	79
3.2.5	Parametrische Bewertung	82
3.3	Gegenüberstellung und Auswahl der jeweiligen Modelle	84
3.4	Abgrenzung der Betrachtungsweise	87
3.4.1	Demonstrator	87
3.4.2	Vorrichtungen und Werkzeuge.....	90
3.4.3	Serie	91
4	Gegenüberstellung der konventionellen und der additiven Fertigung	92
4.1	Übersicht der messbaren Größen im additiven Umfeld	92
4.2	Auswertung von verfahrensspezifischen Faktoren	95
4.2.1	Aufbaurrate	95
4.2.2	Materialproduktivität.....	97
4.2.3	Anlagenlaufzeit	97
4.2.4	Ausschussrate	99
4.3	Bewertung von Prozesskette und Logistik	100
4.3.1	Wertschöpfungskette	100
4.3.2	Durchlaufzeit.....	101
4.3.3	Losgröße	102
4.3.4	Produktionsflexibilität	104
4.3.5	Qualitätssicherung	105
4.4	Bestandteile einer wirtschaftlichen Fertigung	106
4.4.1	Komplexitätskosten.....	106
4.4.2	Maschinenstundensatz	108
4.4.3	Baukosten.....	110
4.4.4	Finanzierung vs. Kauf	111
4.5	Bewertung von Bauteilmerkmalen	111
4.5.1	Bauteilkomplexität.....	111
4.5.2	Trade-Faktoren	114
4.5.3	Integration Baugruppen	115
4.5.4	Product-Lifecycle	115

4.6	Bewertung von weichen Faktoren.....	116
4.6.1	Unabhängigkeit Standort.....	116
4.6.2	Technologiebewertungsmatrix	117
4.6.3	Nachhaltigkeit	117
4.7	Bewertung für Repairverfahren.....	119
4.8	Einschränkungen bei additiven Fertigungsverfahren	120
5	Ableitung wirtschaftlicher und technischer Kennzahlen	122
5.1	Stufenweise Bewertung	122
5.2	Ableitung von Kennzahlen	124
5.2.1	Prüfung geometrischer Bauteilkomplexität	124
5.2.2	Kalkulation Fertigungskosten	124
5.2.3	Ermittlung Mehrwert.....	126
5.3	Gewichtung der einzelnen Bestandteile.....	129
5.4	Erstellung einer Bewertungsmatrix	130
6	Verifikation des Modells anhand von Beispielen.....	132
6.1	Verstelleitschaufel.....	133
6.2	Anbauteile	135
6.3	Bionischer Halter	137
6.4	Einspritzkopf.....	138
6.5	Interpretation und Kommentierung der Ergebnisse.....	140
7	Zusammenfassung und Ausblick	142
8	Anhänge	145
9	Literaturverzeichnis	149
10	Lebenslauf.....	165