

Forschungsberichte aus dem  
**wbk** Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Robin Kopf

**Kostenorientierte Planung von  
Fertigungsfolgen additiver Technologien**

Band 214



Forschungsberichte aus dem  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Robin Kopf

## **Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien**

Band 214



## **Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien**

Zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften**

der Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

**Dissertation**

von

Robin Kopf

aus Ostfildern

Tag der mündlichen Prüfung: 29.03.2018

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer

**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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5937-3

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort des Herausgebers**

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze



## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Betreuung meiner Dissertation als Hauptreferentin. Für das entgegengebrachte Vertrauen, die berufliche Förderung und das persönliche Engagement möchte ich mich herzlichst bedanken. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Schulenberg für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei Prof. Milan Brandt möchte ich mich für die Unterstützung und wissenschaftliche Diskussion während meines Forschungsaufenthalts am Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT) herzlich bedanken, dem Karlsruhe House of Young Scientists (KHYS) danke ich für die Förderung dieses Aufenthalts.

Allen Kolleginnen und Kollegen am wbk, insbesondere im Bereich Produktionssysteme, danke ich für das freundschaftliche und einzigartige Arbeitsumfeld. Die gemeinsamen Projekte und Aktivitäten im und außerhalb des Arbeitsalltages bleiben für mich stets in bester Erinnerung. Besonders bedanken möchte ich mich an dieser Stelle bei Jens Bürgin und Johannes Fisel für das Korrekturlesen und die wertvollen Anmerkungen und Diskussionen. Großer Dank und höchster Respekt gilt den vielen Studierenden, die durch ihren unermüdlichen Einsatz und wertschöpfende Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinen Eltern und meiner Schwester danke ich von Herzen für die bedingungslose Unterstützung und die guten Ratschläge entlang meines Lebensweges.

Der allerhöchste Dank gilt meiner Frau Kathrin, die mir trotz ständiger Entbehrung mit unerschöpflichem Verständnis den nötigen Rückhalt gab und so diese Arbeit erst ermöglichte.

Karlsruhe, im Januar 2018  
Robin Kopf



## **Abstract**

Using new production technologies can be a major advantage for companies. In order to keep pace with the competition, they are forced to replace existing production technologies with new, more efficient ones. For applications in series production, the additive manufacturing technology Laser Beam Melting (LBM) represents a new production technology. Companies are currently challenged with the task of deciding on the application of LBM in serial production and planning cost-optimized process chains. In such early planning phases of a new production technology, however, the data basis is characterized by a high degree of uncertainty, because many correlations have not yet been described, equipment is changing quickly and the products to be manufactured are still being developed. In this dynamic environment, the evaluation of technology and the planning of production sequences represent a challenge.

Existing approaches assume that a specific product is involved in the planning process. Planning is carried out either based on a technology selection for individual products or on a reference technology chain that is already known for a similar product. So far, using a reference technology chain, only equipment available on the market will then be considered. A possible further development of the equipment is not considered. In addition, there is no cost model available for the LBM process chain that allows a cost determination on the basis of component characteristics and considers the complete production sequence.

For this reason, this work aims at a methodology for cost-oriented planning of additive production technologies, such as the LBM process, which takes account of uncertainty in the planning environment.

The developed methodology of this work is divided into five planning steps. (1) After the so far known requirements of product and production have been defined, (2) a generic cost model is presented. This enables the calculation of process costs based on component and equipment parameters. (3) As a result, cost-causing production steps are identified on the base of a reference process chain and planning alternatives are created. This is done by identifying alternative existing technologies or equipment and developing possible future equipment. The influences of the equipment parameters, such as laser power and number of lasers, on the costs become clear. (4) Subsequently, forecasts are made on the development of equipment parameters. This enables the

developed planning alternatives to be evaluated in comparison with the expected development of the technology and the target costs. (5) Finally, the results are interpreted and the preferred planning alternative is selected. For this purpose, the probability of fulfilling the required manufacturing costs in series production at different points in time is determined. Ultimately, the preferred planning alternative and the point in time can be chosen to meet series requirements.

The procedure is presented based on individual demonstrators as an example for large-scale production in the automotive industry using the LBM process. Furthermore, suitable LBM production sequences for low-cost series production are developed and their potential for cost savings is addressed. The methodology and the cost models are implemented in a software prototype providing a practical usability. The work thus contributes to cost-oriented planning with new technologies and supports the planning and evaluation tasks that companies face when evaluating the LBM process.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	3
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Technologieplanung	5
2.1.1 Grundlegende Begriffe	5
2.1.2 Einordnung in das Technologiemanagement	9
2.1.3 Aufgaben der Technologieplanung	11
2.2 Laser-Strahlschmelzen (LBM)	13
2.2.1 Einordnung	13
2.2.2 Prozessbeschreibung	14
2.3 Kostenrechnung	16
2.3.1 Einordnung in das Rechnungswesen	16
2.3.2 Bereiche der Kostenrechnung	17
2.3.3 Kostenrechnungssysteme	19
2.4 Grundlagen zur Beschreibung von Arbeitsabläufen	20
2.4.1 Beschreibung der Arbeitsabläufe	20
2.4.2 Vorgangsknoten-Netzplan	21
2.4.3 Zeitarten zur Prozessbeschreibung	22
2.4.4 Methoden zur Planzeitermittlung	23
2.5 Bewertung unter Unsicherheit	25
2.5.1 Modellierung des Risikos	26
2.5.2 Entscheidung unter Risiko	28

---

<b>3</b>	<b>Stand der Forschung</b>	<b>31</b>
3.1	Anforderungen an eine zu erarbeitende Methodik	31
3.2	Ansätze zur Bewertung und Planung neuer Produktionstechnologien	32
3.3	Ansätze zur Bewertung und Planung additiver Fertigungsverfahren	38
3.4	Ableitung des Forschungsdesiderats	43
<b>4</b>	<b>Methodik zur kostenorientierten Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien</b>	<b>45</b>
4.1	Anforderungen in den Einflussbereichen Bauteil und Produktion	47
4.1.1	Anforderungen des Bauteilportfolios	47
4.1.2	Anforderungen der Produktion	49
4.1.3	Beschreibung der Technologie- und Betriebsmittelfähigkeit	51
4.2	Modellierung der Fertigungsfolgen	53
4.2.1	Kostenmodell	54
4.2.2	Prozesszeitmodell	60
4.3	Entwicklung kostenoptimaler Planungsalternativen	70
4.3.1	Konzeption von Fertigungsfolgen mit existierenden Betriebsmitteln	71
4.3.2	Entwicklung zukünftiger Betriebsmittelkonzepte	78
4.4	Prognose der technologischen Leistungssteigerung	93
4.4.1	Datenerhebung zur Prognose der technologischen Leistungssteigerung	94
4.4.2	Modellierung der Prognosedaten und Modellfehler	95
4.4.3	Simulation und Darstellung der Zufallsexperimente	97
4.5	Interpretation und Auswahl der Ergebnisse	98
4.5.1	Interpretation der Technologieprognose unter Risiko	99
4.5.2	Sensitivitätsanalyse ungewisser Eingangsdaten	100
<b>5</b>	<b>Anwendung und prototypische Softwareimplementierung der Methodik</b>	<b>103</b>
5.1	Exemplarische Anwendung der Methodik zur kostenorientierten Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien	103

---

5.1.1	Anforderungen in den Einflussbereichen Bauteil und Produktion und Fähigkeiten der Technologie	103
5.1.2	Modellierung der Fertigungsfolgen	107
5.1.3	Entwicklung kostenoptimaler Planungsalternativen	112
5.1.4	Prognose der technologischen Leistungssteigerung	132
5.1.5	Interpretation und Auswahl der Ergebnisse	136
5.2	Prototypisches Softwaremodell	142
<b>6</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>145</b>
6.1	Diskussion	145
6.2	Ausblick	147
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>149</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>I</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XVI</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XXI</b>
	<b>Anhang</b>	<b>XXIII</b>
A1.	Modellierung der Beschichtungsdauer je Schicht	XXIII
A2.	Prozesszeiten beim Zerspanen von Funktionsflächen	XXVI
A3.	Zusammenhänge der LBM-Betriebsmittelkomponenten	XXVII
A4.	Optimale Betriebsmittelkonzepte in Abhängigkeit von den Bauteileigenschaften	XXVIII
A5.	Parameter der Regressionsfunktionen zur Bestimmung der Prozesszeiten	XXX
A6.	Parameter der analytischen Aufbauzeitberechnung	XXX
A7.	Parameter der analytischen Prozesszeitberechnung zum Pulver Sieben	XXXII
A8.	Parameter der Regressionsfunktionen zur Bestimmung der LBM-Betriebsmittelkonzepte	XXXII
A9.	Überblick betrachteter existierender LBM-Betriebsmittel	XXXIII
A10.	Eingangsgrößen des Kostenmodells	XXXIV
A11.	Fragebogen zur Prognose der Technologieparameter	XXXV

A12. Faktoren für die Technologieprognose	XXXVII
A13. Benutzeroberflächen des Softwareprototyps PlanAdd	XXXVIII