

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

Alexander Jacob

**Hochiterative Technologieplanung**  
Rekursive Optimierung produkt- und  
fertigungsbezogener Freiheitsgrade  
am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 246



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

Alexander Jacob

**Hochiterative Technologieplanung**  
Rekursive Optimierung produkt- und fertigungs-  
bezogener Freiheitsgrade am Beispiel  
der hybrid-additiven Fertigung

Band 246



**Hochiterative Technologieplanung**  
Rekursive Optimierung produkt- und fertigungs-  
bezogener Freiheitsgrade am Beispiel  
der hybrid-additiven Fertigung

Zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

**Dissertation**

von

Alexander Jacob, M. Sc.

aus Mosbach

Tag der mündlichen Prüfung: 10.06.2021

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich

### **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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8163-3  
ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren  
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 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 wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. 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**

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Unterstützern und Helfern, die zum Entstehen dieser Arbeit ihren Teil beigetragen haben, bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meiner Doktormutter Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza, einerseits für den großen Freiraum bei der Ausarbeitung eines spannenden Themas und andererseits für die vielen Diskussionen und Gespräche, die diese Arbeit immer einen Schritt weitergebracht haben. Zusätzlich danke ich Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich für die Übernahme des Ko-Referats und das Interesse an meiner Arbeit. Außerdem bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen für die Übernahme des Vorsitzes meiner Doktorprüfung.

Darüber hinaus danke ich allen Kollegen am wbk Institut für Produktionstechnik, mit denen man jederzeit interessante private und fachliche Gespräche führen kann. Bei Magnus Kandler und Lukas Weiser bedanke ich mich insbesondere für die Korrektur dieser Arbeit. Ebenso bedanken möchte ich mich bei den Studenten, die als Abschlussarbeiter oder wissenschaftliche Hilfskräfte zu dem Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben und den Unternehmenspartnern, die die Anwendungsfälle in dieser Arbeit erst ermöglicht haben.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Familie. Liebe Schwester, ohne dich wäre die Motivation für diese Arbeit nicht so groß gewesen. Mein fortwährender Dank gilt der unbegrenzten Unterstützung meiner Eltern, ohne die es nicht möglich gewesen wäre, eine solche Ausbildung und Arbeit abzuschließen. Lorena, mein Dank für deine bedingungslose Unterstützung und das Lachen zu jeder Zeit ist grenzenlos.

Karlsruhe, 20.06.2021

Alexander Jacob



## **Abstract**

Product development should not only create the optimal product for the customer but also take into account the most efficient production of this product. This becomes a complex task, which cannot be grasped holistically for a company, especially if the product technology is highly innovative, but also in the case of a high variety of new manufacturing technologies, such as additive manufacturing processes. If, in addition, the manufacturing technology capabilities provide new degrees of freedom for product development, integrated optimization of product and production technology becomes particularly advantageous. This is the case in context of additive manufacturing processes.

In this thesis a product model as well as a manufacturing technology model are developed, which can be used repeatedly to represent arbitrary products and manufacturing technologies. These models serve as input for the planning and evaluation of possible alternative manufacturing technology chains for the production of a specified product. The optimal technology chain is identified by applying a multi-criteria decision procedure. The technology chain and the corresponding product are used as a starting point for a recursive optimization. Unfulfilled product requirements and the corresponding capabilities of the technologies are identified. These are then adapted step by step, as far as the degrees of freedom in product design and technology allow, and new technology chains are created. This process is iteratively repeated with a modified product model and a modified production technology model, so that a tree structure is created to display the results of all iterations.

Three different products are used to demonstrate this methodology: A turbine blade with cooling channels, a gear with grid inlay and a sun gear with internal lubrication channels. For each product several optimizations are depicted and a sensitivity analysis of selected product parameters is conducted.

The methodology creates the possibility in the context of technology planning to identify a new, economically and technically optimal technology chain on the basis of highly iterative product and manufacturing technology adaptations.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Formelverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1 Thematische Grundlagen	6
2.1.1 Produktentstehung und Technologiemanagement	6
2.1.2 Produktentwicklung und -modularisierung	12
2.1.3 Additive Fertigung	17
2.2 Methodische Grundlagen	27
2.2.1 Objektorientierte Modellierung	27
2.2.2 Multikriterielle Entscheidungsunterstützung	29
2.2.3 Unsicherheitsmodellierung	36
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>41</b>
3.1 Technologie- und Prozessplanung	42
3.2 Fertigungsgerechte Produktentwicklung	48
3.3 Forschungsdefizit	51
<b>4 Eigener Ansatz</b>	<b>54</b>
4.1 Das Parametermodell	56
4.2 Produktmodell	58
4.2.1 Modellierung von Produkt und Modulen	58
4.2.2 Produktmodulinterdependenzen	61
4.3 Fertigungstechnologiemodell	62
4.3.1 Modellierung von Technologien	62

4.3.2	Fertigungstechnologieinterdependenzen	71
4.4	Entwicklung und Bewertung von Technologieketten	71
4.4.1	Zuordnung möglicher Technologien pro Produktmodul	72
4.4.2	Generieren von Technologieketten	76
4.4.3	Multikriterielle Bewertung von Technologieketten	79
4.5	Optimierung durch Produkt- und Fertigungstechnologieanpassung	82
4.5.1	Definition von Optimierungskriterien	82
4.5.2	Identifizieren kritischer Parameterlücken in der Technologie-Produktmodul-Zuordnung	83
4.5.3	Rekursive Iteration mit angepassten Produkt- und Technologieparametern	87
4.5.4	Sensitivitätsanalysen produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade	92
<b>5</b>	<b>Exemplarische Anwendung</b>	<b>94</b>
5.1	Vorstellung des Softwareprototyps	94
5.2	Die Gasturbinenschaufel	100
5.3	Das Zahnrad mit Hohlstrukturen	113
5.4	Das Sonnenrad mit Schmierkanälen	122
<b>6</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>136</b>
6.1	Diskussion	136
6.2	Ausblick	138
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>139</b>
	<b>Liste eigener Publikationen</b>	<b>142</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>144</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>I</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
	<b>Anhang</b>	<b>IX</b>
	Anhang A: Rekursive Optimierung in Pseudo Code	IX
	Anhang B1: Moduldatenbank der Gasturbinenschaufel	X
	Anhang B2: Technologiedatenbank der Gasturbinenschaufel	XII
	Anhang B3: TRM der Gasturbinenschaufel	LXXIV

---

Anhang B4: Optimierungsüberblick der Gasturbinenschaufel	LXXVI
Anhang B5: Herstellkosten aller Technologieketten der Gasturbinenschaufel aus Iteration 0TD_0MD	LXXVII
Anhang C1: Moduldatenbank des Zahnrad mit Hohlstrukturen	LXXVIII
Anhang C2: Technologiedatenbank des Zahnrad mit Hohlstrukturen	LXXXI
Anhang C3: TRM des Zahnrad mit Hohlstrukturen	CI
Anhang C4: Optimierungsüberblick des Zahnrad (Hohlstrukturen)	CI
Anhang C5: Herstellkosten aller Technologieketten des Zahnrad aus Iteration 0TD_0MD	CII
Anhang D1: Moduldatenbank des Sonnenrad mit Schmierkanälen	CIII
Anhang D2: Technologiedatenbank des Sonnenrad mit Schmierkanälen	CVII
Anhang D3: TRM des Sonnenrad mit Schmierkanälen	CXVI
Anhang D4: Optimierungsüberblick des Sonnenrad mit Schmierkanälen	CXVII
Anhang D5: Herstellkosten aller Technologieketten des Sonnenrad aus Iteration 0TD_0MD	CXX