

## Reihe 1

Konstruktions-  
technik/  
Maschinen-  
elemente

Nr. 441

M.Sc. Michael Roos,  
Markttheidenfeld

## Ein Beitrag zur einheitlichen Modellierung und durchgängigen Nutzung fertigungstechnologischen Wissens im Produktentwicklungsprozess

Berichte aus dem Fachgebiet  
Produktentwicklung und  
Maschinenelemente  
der TU Darmstadt  
(Prof. Dr. h.c. Dr. h.c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer)

**pmd**   
produktentwicklung  
maschinenelemente



# Ein Beitrag zur einheitlichen Modellierung und durchgängigen Nutzung fertigungstechnologischen Wissens im Produktentwicklungsprozess

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Michael Roos, M.Sc.

aus Marktheidenfeld

Berichterstatter: Prof. Dr. h. c. Dr. h. c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche  
Tag der Einreichung: 28.06.2017  
Tag der mündlichen Prüfung: 24.10.2017

Darmstadt 2018

D17



# Fortschritt-Berichte VDI

## Reihe 1

Konstruktionstechnik/  
Maschinenelemente

M.Sc. Michael Roos,  
Marktheidenfeld

## Nr. 441

Ein Beitrag zur einheitlichen Modellierung und durchgängigen Nutzung fertigungstechnologischen Wissens im Produktentwicklungsprozess

Berichte aus dem Fachgebiet  
Produktentwicklung und  
Maschinenelemente  
der TU Darmstadt  
(Prof. Dr. h.c. Dr. h.c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer)

*pmd*   
produktentwicklung  
maschinenelemente

Roos, Michael

## **Ein Beitrag zur einheitlichen Modellierung und durchgängigen Nutzung fertigungstechnologischen Wissens im Produktentwicklungsprozess**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 441 . Düsseldorf: VDI Verlag 2018 .

178 Seiten, 100 Bilder, 21 Tabellen.

ISBN 978-3-18-344101-3, ISSN 0178-949X,

€ 67,00/VDI-Mitgliederpreis € 60,30.

**Für die Dokumentation:** Produktentwicklung – Methodik – Fertigungsintegration – Design Pattern Matrix – Produkteigenschaften – Verfahrensprinzip

Im Fokus dieses Buches steht die Systematisierung einer fertigungsintegrierenden Produktentwicklung. Dies betrifft in erster Linie die möglichst umfassende Ausschöpfung noch ungenutzter Möglichkeiten spezifischer Fertigungstechnologien im Hinblick auf neuartige fertigungsintegrierende Produktlösungen. Auf Basis einer einheitlichen Modellierung von Verfahrensprinzipien kann fertigungstechnologisches Wissen bereits während der frühen Entwicklungsphasen umfassend antizipiert werden. Durch geeignete Werkzeuge, wie der Design Pattern Matrix, wird der Produktentwickler bei der Erarbeitung fertigungsintegrierender Produktlösungen gezielt unterstützt.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

Technische Universität Darmstadt, Dissertation 2018

D 17

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-949X

ISBN 978-3-18-344101-3

## Vorwort

Die Entwicklung von Produkten und die gleichzeitige intensive Auseinandersetzung mit geeigneten Fertigungsprozessen ist eine Herausforderung, der sich bereits viele namhafte Ingenieure gestellt haben. Als einer der herausragenden Namen ist auch Henry Ford (1863-1947) zu nennen. Er erkannte die Relevanz einer aufeinander abgestimmten Produktentwicklung und Fertigung ohne die er Produkte wie das „Modell T“ kaum hätte erfolgreich umsetzen können. Doch auch er bemerkte einst: „Es gibt mehr Leute, die kapitulieren, als solche, die scheitern.“ [Henry Ford] Ganz im Sinne dieser Aussage ist auch diese Dissertation nicht nur das Resultat jahrelanger Forschung zum Thema einer fertigungsintegrierenden Produktentwicklung, sondern vielmehr auch das Ergebnis eines ständigen Ringens mit Hürden, Rückschlägen und den eigenen Bedenken. Aus diesem Grund waren vor allem die Impulse aus unzähligen Gesprächen und Diskussionen von großer Bedeutung für den Fortschritt meiner Arbeit. Den betreffenden Personen möchte ich an dieser Stelle meinen ganz persönlichen Dank aussprechen.

In erster Linie gilt mein Dank meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. h. c. Dr. h. c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer. Er hat das erste Referat dieser Arbeit mit großem Engagement übernommen, obwohl er die aktive Leitung des Fachgebiets Produktentwicklung und Maschinenelemente der Technischen Universität Darmstadt (pmd) bereits seit einigen Jahren an seine Nachfolger abgegeben hat. Seine Ideen und Anmerkungen aber auch seine Kritik lieferten mir stets äußerst wertvolle Denkanstöße. Gerne blicke ich auf unsere gemeinsamen Gespräche zurück. Darüber hinaus bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche. Nicht nur als Korreferent dieser Arbeit hat er mich maßgeblich unterstützt. Auch als Sprecher des Sonderforschungsbereichs 666 und zwischenzeitlicher Leiter des Fachgebiets pmd hat er meine Forschung über die letzten Jahre stetig begleitet und vorangetrieben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Sebastian Gramlich, dessen Vorarbeiten und Ideen das Fundament darstellen, auf dem ich diese Arbeit aufbauen konnte. Seine Denkansätze haben mich und die Inhalte dieser Arbeit stark geprägt. Seiner strukturierten Arbeitsweise gilt auch heute noch meine größte Anerkennung. In gleichem Zuge möchte ich auch Herrn Christian Wagner danken, der mir über die vergangenen Jahre hinweg einer der scharfsinnigsten Diskussionspartner war, aber ebenso auch eine der wichtigsten Stützen während

meiner Arbeit. Darüber hinaus gebührt auch den übrigen Kollegen des Fachgebiets pmd mein Dank für die stets kollegiale Zusammenarbeit und die vielen fachlichen Gespräche die wir gemeinsam geführt haben.

Zudem möchte ich Herrn Jannik Reichwein, Herrn Victor Listmann, Herrn Matthias Schaschek, Frau Heike Gute, Herrn Daniel Dieter und Herrn Martin Gowik danken, die mich insbesondere während der finalen Phase meines Forschungsvorhabens intensiv unterstützt haben. Ich habe sie allesamt über die gemeinsamen Jahre hinweg sehr schätzen gelernt.

Zuletzt gilt mein Dank auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), deren Förderung es mir ermöglicht hat, mich konsequent mit den fachlichen Schwerpunkten meiner Arbeit zu befassen.

Roßdorf, 10.01.2018

Michael Roos



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Bedeutung der Fertigung für die Entwicklung von Produkten .....	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit.....	6
1.3	Aufbau der Arbeit.....	7
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung .....</b>	<b>8</b>
2.1	Fertigungstechnologisches Wissen.....	8
2.2	Dokumentationsformen für fertigungstechnologisches Wissen im Rahmen der Produktentwicklung .....	12
2.3	Methoden und Werkzeuge zur Aufarbeitung und Nutzung von fertigungstechnologischem Wissen in der Produktentwicklung .....	14
2.4	Modellbasierte Methodiken zur Berücksichtigung der Fertigung im Kontext der Produktentwicklung .....	17
2.4.1	Modellierung technischer Produkte .....	17
2.4.2	Modellierung technischer Prozesse .....	27
2.4.3	Modellierung des Produktlebenslaufs .....	37
2.4.4	Integrale Ansätze zur Berücksichtigung der Fertigung während der Produktentwicklung .....	38
2.5	Generelles Bereitstellen und Nutzen von Wissen durch Wissensmanagementsysteme .....	42
2.6	Fazit – Defizite hinsichtlich der systematischen Entwicklung fertigungsintegrierender Produktlösungen .....	44
<b>3</b>	<b>Idee einer fertigungsintegrierenden Entwicklungsmethodik.....</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>Standardisierung fertigungstechnologischen Wissens für die Produktentwicklung .....</b>	<b>47</b>
4.1	Verfahren und fertigungstechnologisches Wissen .....	47
4.2	Konkretisierungsebenen der Prozessmodellierung.....	50
4.2.1	Modellierung von Prozessen auf Basis der Zustandsänderung.....	50
4.2.2	Modellierung von Verfahren auf Basis physikalischer Effekte ...	54
4.2.3	Modellierung von Verfahren auf Basis des Verfahrensprinzips ..	56
4.3	Vorgehen zum Konkretisieren technischer Produkte im Kontext des Einsatzprozesses und der Produktfunktion .....	67
4.4	Fazit – Abbildung fertigungstechnologischen Wissens .....	74

<b>5</b>	<b>Ansatz zum Entwickeln fertigungsintegrierender Produktlösungen .....</b>	<b>75</b>
5.1	Idee – Modellübergreifende Verarbeitung fertigungstechnologischen Produkt-Wissens .....	75
5.2	Antizipieren technischer Prozesse – Kernelement einer fertigungsintegrierenden Entwicklungsmethodik .....	77
5.2.1	Grundgedanke des Antizipierens technischer Prozesse .....	77
5.2.2	Antizipieren von Fertigungsprozessen .....	80
5.3	Vorgehensmodell zum Entwickeln fertigungsintegrierender Produktlösungen.....	83
5.4	Fertigungsintegrierende Entwicklungsmethodik.....	85
5.5	Design Pattern Matrix – Werkzeug zur Entwicklung fertigungsintegrierender Produktlösungen .....	88
5.5.1	Fertigungsintegrierende Design Patterns .....	88
5.5.2	Erarbeiten von Design Patterns – Design Pattern Matrix.....	90
5.5.3	Process Integrated Design Guidelines .....	95
5.6	Fazit – Modellbasierte Entwicklungsmethodik.....	97
<b>6</b>	<b>Evaluierung der fertigungsintegrierenden Entwicklungsmethodik .....</b>	<b>99</b>
6.1	Beispiel innenhochdruckumgeformter Fahrradrahmen .....	99
6.1.1	Antizipieren des Innenhochdruckumformens .....	101
6.1.2	Aufbereiten der Ergebnisse aus dem Antizipieren .....	102
6.1.3	Ergreifen projektspezifischer Maßnahmen .....	109
6.2	Mehrfaches Antizipieren am Beispiel spaltprofilierter Deckenschienen .....	111
6.2.1	Antizipieren des Fügens von Schnappverbindungen .....	113
6.2.2	Aufbereiten der Ergebnisse aus dem Antizipieren .....	115
6.2.3	Ergreifen projektspezifischer Maßnahmen .....	116
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>121</b>
<b>Anhang A – Design Pattern Matrix und Punktbewertung für das Beispiel innenhochdruckumgeformter Fahrradrahmen.....</b>		
		<b>123</b>
<b>Anhang B – Beispiele für die Anwendung des VP-Modells .....</b>		
		<b>129</b>
<b>Anhang C – Process Integrated Design Guidelines.....</b>		
		<b>135</b>

---

<b>Anhang D – Übersicht über die Arbeitsschritte der fertigungsintegrierenden Entwicklungsmethodik .....</b>	<b>139</b>
<b>Anhang E – Glossar.....</b>	<b>140</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>147</b>
<b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>	<b>164</b>
<b>Index .....</b>	<b>165</b>
<b>Lebenslauf.....</b>	<b>167</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AZ	Anfangszustand
Bsp.	Beispiel
CAD	Computer Aided Design
CPM	Characteristics-Properties Modelling
DfA	Design for Assembly
DfM	Design for Manufacture
DfMA	Design for Manufacture and Assembly
DIN	Deutsches Institut für Normung
DP	Design Pattern
DPM	Design Pattern Matrix
Eig	Eigenschaft
EZ	Endzustand
FE	Finite Element
Fkt	Funktion
GE	Gestaltelement
GPPE	Ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung
HSC	High Speed Cutting
IHU	Innenhochdruckumformen
PDD	Property-Driven-Development
PhEff	Physikalischer Effekt
PIDG	Process Integrated Design Guideline
PzEig	Prozesseigenschaft
Spabi	Spaltbiegen
Spapro	Spaltprofilieren
TF	Teilfunktion
UFG	Ultra Fine Grained
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VP	Verfahrensprinzip
Wapro	Walzprofilieren
WE	Wirkelement
WP	Wirkprinzip

## Kurzfassung

Unter dem Begriff des Design for Manufacture werden eine Vielzahl an Produktentwicklungsansätzen zusammengefasst, die den Entwickler vor allem im Hinblick auf das Sicherstellen der Herstellbarkeit technischer Produkte unterstützen. Es mangelt jedoch an Ansätzen, die die noch ungenutzten Möglichkeiten einer Fertigungstechnologie zur Realisierung oder Verbesserung des technischen Produkts aufzeigen. Diese ungenutzten Möglichkeiten können der Ausgangspunkt für neuartige fertigungsintegrierende Produktlösungen sein, die sich z. B. durch eine verbesserte Funktionserfüllung, einen erhöhten Leichtbaugrad oder auch eine erhöhte Lebensdauer auszeichnen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Grundstock für die Systematisierung einer fertigungsintegrierenden Produktentwicklung gelegt, mittels der die noch ungenutzten Möglichkeiten einer betrachteten Fertigungstechnologie systematisch erschlossen werden können. Dazu wird eine Methodik vorgestellt, die den Produktentwickler gezielt bei der Aufbereitung vorhandenen fertigungstechnologischen Wissens unterstützt. Durch die Modellierung technischer Prozesse mittels Eigenschaften kann fertigungstechnologisches Wissen einheitlich abgebildet und dokumentiert werden. Der Fokus der Modellierung richtet sich vor allem auf die Abbildung von Wirkzusammenhängen im Kontext eines gewählten Fertigungsverfahrens. Sie geben Aufschluss über das den Fertigungsprozessen zugrunde liegende Verfahrensprinzip. Das so abgebildete fertigungstechnologische Wissen wird im Rahmen eines frühzeitig im Produktentwicklungsprozess durchgeführten Antizipierens von Fertigungsprozessen umfassend analysiert. Aufeinander abgestimmte Produkt- und Prozessmodelle bilden darüber hinaus die Basis für die weitere Aufbereitung des fertigungstechnologischen Wissens mit Blick auf die Produktentwicklung. Die durch das Antizipieren erfassten Eigenschaften und Eigenschaftsrelationen dienen der anschließenden Erarbeitung fertigungsintegrierender Produktlösungen. Durch Zuhilfenahme geeigneter Werkzeuge, wie der Design Pattern Matrix, wird der Produktentwickler bei deren Erarbeitung gezielt unterstützt. Die Anwendung der vorgestellten Methodik anhand zweier Fallbeispiele verdeutlicht den Mehrwert, den die Fertigung für die Realisierung der betrachteten technischen Produkte bietet. Dieser Mehrwert zeigt sich an den Beispielen u. a. durch zusätzlich integrierte Funktionen, eine erhöhte Bauteilsteifigkeit oder eine Produktgestalt, die Einsatz- und Fügeprozessen gleichermaßen gerecht wird.

