



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Carsten Schaede

**Gestaltungsmodell und Planungsmethode
für die Produktindividualisierung
in der spanenden Fertigung**

**Schriftenreihe des PTW
„Innovation Fertigungstechnik“**

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

PTW
TU DARMSTADT

Gestaltungsmodell und Planungsmethode für die Produktindividualisierung in der spanenden Fertigung

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Carsten Thomas Schaede, M. Sc.

aus Siegen

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche
Tag der Einreichung:	31.01.2021
Tag der mündlichen Prüfung:	11.05.2021

Darmstadt 2021

D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Carsten Schaede

**Gestaltungsmodell und Planungsmethode für die
Produktindividualisierung in der spanenden Fertigung**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8467-2

ISSN 1864-2179

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 • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die Anpassung von Produkten an die Anforderungen von Kunden ist im Maschinen- und Anlagenbau gelebte Praxis, um die jeweils sehr individuellen Problemstellungen der Kunden zu lösen. Neben der Forderung nach Individualität sind kurze Lieferzeiten und niedrige Kosten weitere Faktoren wenn es darum geht, einen Auftrag zu gewinnen. Die Individualisierung von Produkten kann durch den Austausch standardisierter Module und Baugruppen auf der Basis eines Produkt-Baukastens erfolgen. Darüber hinaus ist jedoch häufig eine Anpassung der Geometrie spanend gefertigter Komponenten notwendig. Diese Anpassung auf Komponentenebene erfordert i.d.R. ein auftragsindividuelles Durchlaufen aller Stufen der Auftragsabwicklung von der Anpassungs-entwicklung über die Zerspanung bis in die Montage, was Durchlaufzeiten und Kosten erhöht.

In der vorliegenden Dissertation wird ein Lösungsweg aufgezeigt, um individualisierte Komponenten mit dem Aufwand standardisierter Serienprodukte fertigen zu können. Dazu werden die in der Praxis bestehenden Barrieren bei der Anpassung spanend gefertigter Komponenten erhoben und darauf aufbauend ein Gestaltungsmodell für die Produktindividualisierung in der spanenden Fertigung entwickelt. Der entwickelte Lösungsansatz beinhaltet die Definition eines geschlossenen Produktlösungsraums für kundenindividuelle Anpassungen, den durchgängigen Einsatz der parametrischen Beschreibung der Varianz sowie die Automatisierung auftragsindividueller Prozesse der Auftragsabwicklung. Aufbauend auf diesem Gestaltungsmodell wird in der vorliegenden Dissertation eine Planungsmethode entwickelt, die den methodischen Lösungsweg für die Implementierung in einem bestehenden Produktionsumfeld und bei bestehender Produktvielfalt darlegt.

Die Anwendbarkeit des Gestaltungsmodells und der Planungsmethode wurde in mehreren industriellen Anwendungen bestätigt. Damit zeigt die Dissertation einen systematischen und praxisrelevanten Weg auf, wie in Kombination aus schlanker Produktion und durchgängiger, digitaler Auftragsabwicklung die individualisierte Produktion in Stückzahl 1 gelingen kann. Sie leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit im Maschinen- und Anlagenbau.

Darmstadt, im Januar 2022

Professor Dr.-Ing. Joachim Metternich

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt. Zunächst danke ich Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich für die Betreuung dieser Arbeit und die damit verbundenen umfangreichen und vielfältigen Diskussionen zur schlanken Produktion in Stückzahl Eins, die die Erstellung dieser Arbeit sehr unterstützten und im Ergebnis schärften. Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferats und das konstruktive Interesse an dieser Arbeit.

Großen Einfluss auf das Gelingen meiner Dissertation hatten die Partner aus der Industrie, die es mir ermöglichten Produktionsforschung am Ort der Wertschöpfung zu betreiben. Mein besonderer Dank gilt Stefan Munsch und Jörg Martin von der Munsch Chemiepumpen GmbH, die mir von der Themenfindung bis zur Fertigstellung dieser Arbeit mit Rat und Tat zur Seite standen und so unter anderem die frühzeitige und umfangreiche Industrialisierung des entwickelten Lösungswegs möglich machten. Auch den vielen weiteren Industriepartnern des PTW und der Prozesslernfabrik CiP danke ich für ihr vielseitiges Engagement. Besonders erwähnen möchte ich Philipp Trunk, Tobias Doll, Maximilian Politschek, Wolfgang Törnig und Michael Leiterholt.

Meinen Kollegen und Freunden der Forschungsgruppe CiP und des Support-Teams des PTW danke ich für die tolle Zusammenarbeit, die unter anderem die Freiräume zum Arbeiten an dieser Dissertation eröffnete. Insbesondere bedanken möchte ich mich bei Christoph Schwarz, Stefan Seifermann, Jörg Böllhoff, Joscha Kaiser, Maximilian Meister, Lukas Hartmann, Tobias Meudt, Rupert Glass, Alexander Busse, Nickolas Frick, Lukas Longard, Judith Enke, Michael Kutzen und Christian Baier für Zusammenhalt, konstruktive Diskussionen, ehrliches Feedback und viele einzigartige Erinnerungen an die gemeinsame Zeit am PTW. Stellvertretend für die vielen Studierenden, die durch wissenschaftliche Arbeiten sowie als Hiwis zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben oder mir bei den vielfältigen Aufgaben am Institut den Rücken freihielten, danke ich Joel Diehl, Maciek Walasek, Jens Amend, Karsten Hickler, Moritz Hahn, Ansgar Thilman und Philipp Jansen für Ihren Einsatz.

In dankbarer Erinnerung halte ich Michael Buchauer, der mich als Werkstudent bei der Habasit GmbH persönlich forderte und förderte und mich bereits früh für das Themenfeld der individualisierten Produktion begeisterte. Ulrike Schaeede und Charles O'Reilly danke ich dafür, dass sie mich für eine Promotion motivierten und mir unzählige sehr wertvolle Impulse bei der Erstellung dieser Arbeit gaben. Meiner Schwester Margrit, meinem Bruder Hendrik und meinen Eltern Angelika und Jochen danke ich für ihre bedingungslose und leidenschaftliche Unterstützung bei allen meinen Vorhaben und ihre vielseitigen Beiträge zu dieser Arbeit.

Mein größter Dank gilt meiner Partnerin Maria, die meine Promotion von der ersten Idee an unterstützte, unzählige Fachdiskussionen zur geometrischen Modellierung mit mir führte, mich in Schaffenskrisen zum Durchhalten motivierte und schließlich die Fertigstellung der Arbeit mit viel Geduld und Verzicht ermöglichte.

*„Wer die Varianz von Produkt und Prozess systematisiert,
kann Stückzahl eins wie in Serie fertigen“*

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis-----	I
Abbildungsverzeichnis-----	VII
Tabellenverzeichnis-----	IX
Abkürzungen-----	XI
1 Einleitung-----	1
1.1 Ausgangssituation der Produktindividualisierung-----	1
1.2 Problemstellung im Maschinen- und Anlagenbau-----	4
1.3 Zielstellung und Lösungsansatz der Arbeit-----	7
1.4 Aufbau der Arbeit-----	8
2 Stand des Wissens und der Technik-----	11
2.1 Produktindividualisierung und Variantenmanagement-----	11
2.1.1 Mass Customization, Produktindividualisierung und Personalisierung-----	12
2.1.2 Varianten- und Komplexitätsmanagement-----	13
2.1.3 Kommunalität-----	15
2.1.4 Modularität-----	16
2.1.5 Produktstrukturen definierter Komponenten-----	17
2.1.6 Produktstrukturen für die Produktadaption-----	18
2.1.7 Vorbereitungsgrad und Auftrags Eindringungspunkt im Wertstrom-----	21
2.1.8 Zwischenfazit zum Themengebiet Produktindividualisierung-----	24
2.2 Entwicklung individualisierbarer Produkte-----	25
2.2.1 Modelle der anforderungsbasierten Produktkonkretisierung-----	25
2.2.2 Modelle der fähigkeitsbasierten Produktentwicklung-----	28
2.2.3 Zwischenfazit zum Themengebiet Entwicklung individualisierbarer Produkte--	30
2.3 Datenverarbeitung in Konstruktion und Auftragsabwicklung-----	30
2.3.1 Daten, Information und Wissen-----	31
2.3.2 Produktmodellierung-----	31
2.3.3 Computer Aided Design-----	31
2.3.4 Produktlösungsraum-----	36
2.3.5 Produktkonfiguration-----	36
2.3.6 Zwischenfazit zum Themengebiet Datenverarbeitung-----	38
2.4 Produktions- und Fertigungstechnik-----	39
2.4.1 Spanende Fertigung mit definierter Schneide-----	39
2.4.2 Steuerung von Werkzeugmaschinen-----	41

2.4.3	Arbeitsvorbereitung für die spanende Fertigung	43
2.4.4	Erstellung von NC-Programmen	43
2.4.5	Vorgehensweisen der NC-Programmierung	45
2.4.6	Parametrische CNC-Programmierung	46
2.4.7	Zwischenfazit zum Themengebiet Fertigungstechnik	47
2.5	Produktionsorganisation im Kontext der variantenreichen Produktion	48
2.5.1	Lean Production	48
2.5.2	Quick Response Manufacturing	48
2.5.3	Fertigungssegmentierung, Fraktale Fabrik und Business Process Reengineering	49
2.5.4	Computer Integrated Manufacturing	50
2.5.5	Industrie 4.0	51
2.5.6	Zwischenfazit zum Themengebiet Produktionsorganisation	52
2.6	Fazit zum Stand des Wissens und der Technik	52
3	Zielsetzung, Forschungskonzeption und Anwendungsbereich	55
3.1	Zielsetzung der Arbeit	55
3.1.1	Forschungsziele	55
3.1.2	Zielgrößen der Auftragsabwicklung	57
3.2	Lösungsansatz und Gestaltungshypothesen	59
3.3	Forschungskonzeption und Forschungsprozess	61
3.4	Definition des Anwendungsbereichs der Arbeit	63
4	Untersuchung der Produktindividualisierung	67
4.1	Untersuchung der Individualisierung monolithischer Komponenten	67
4.1.1	Bildung einer Morphologie der geometrischen Adaptionen	68
4.1.2	Realisierbarkeit der Adaptionen	70
4.1.3	Erhebung individualisierter Komponentengruppen in der industriellen Praxis	71
4.1.4	Bildung von Stufen der geometrischen Adaption	71
4.1.5	Eignung der Lösungsraumdefinition für die Produktindividualisierung	74
4.2	Untersuchung der Auftragsabwicklung individualisierter Komponenten	76
4.2.1	Identifikation von Leitfragen	76
4.2.2	Entwicklung einer Darstellungsform für Prozessketten	77
4.2.3	Aufnahme der Auftragsabwicklungsprozesse individualisierter Komponenten	79
4.2.4	Erfassung von Komplikationen der individualisierten Fertigung	80
4.2.5	Identifikation der Barrieren der Produktindividualisierung	80
4.2.6	Formulierung der Gestaltungsdimensionen	84
4.3	Zwischenfazit zur Untersuchung der Produktindividualisierung	84

5	Gestaltungsmodell für die Produktindividualisierung-----	87
5.1	Konzeption des Gestaltungsmodells -----	87
5.2	Formulierung der Gestaltungsprinzipien des Gestaltungsmodells -----	90
5.2.1	Gestaltungsdimension 1: System der Auftragsabwicklung-----	90
5.2.2	Gestaltungsdimension 2: Produktlösungsraum und Kommunalität -----	93
5.2.3	Gestaltungsdimension 3: Informationssystem -----	96
5.2.4	Gestaltungsdimension 4: Prozessfolge-----	99
5.2.5	Gestaltungsdimension 5: Prozessgestaltung -----	103
5.3	Zwischenfazit zum Gestaltungsmodell für die Produktindividualisierung-----	107
6	Konzeption der Planungsmethode-----	109
6.1	Ermittlung inhaltlicher und formaler Anforderungen -----	109
6.1.1	Inhaltliche Anforderungen-----	109
6.1.2	Formale Anforderungen-----	111
6.2	Konzeption des Methodengerüsts -----	112
6.2.1	Initiierung der Methodenanwendung (Phase 1) -----	112
6.2.2	Konzeption der Prozesskette (Phase 2) -----	113
6.2.3	Synthese des Produktlösungsraums (Phase 3)-----	114
6.2.4	Detaillierung des Produktlösungsraums (Phase 4)-----	115
6.2.5	Planung des lösungsraumumfassenden Fertigungsprozesses (Phase 5) -----	115
6.3	Zwischenfazit zur Konzeption der Planungsmethode -----	115
7	Ausgestaltung der Planungsmethode -----	117
7.1	Initiierung der Methodenanwendung (Phase 1) -----	117
7.1.1	Gegenüberstellung von Ausgangssituation und strategischer Zielsetzung -----	117
7.1.2	Überprüfung der Anwendbarkeit eines geschlossenen Produktlösungsraums--	118
7.2	Konzeption der Prozesskette (Phase 2)-----	118
7.2.1	Schritt 1) Situationsanalyse der Auftragsabwicklung -----	119
7.2.2	Schritt 2) Zielformulierung -----	120
7.2.3	Schritt 3) Synthese von Gestaltungsalternativen der Prozesskette -----	120
7.2.4	Schritt 4) Beurteilung und Auswahl der Gestaltungsalternativen -----	123
7.2.5	Zwischenfazit zur Konzeption der Prozesskette-----	123
7.3	Synthese des Produktlösungsraums (Phase 3)-----	124
7.3.1	Schritt 1) Identifikation geometrischer Grundtypen -----	128
7.3.2	Schritt 2) Aufnahme und Analyse der Funktions-Merkmal-Zuordnung-----	128
7.3.3	Schritt 3) Zuordnung der Funktionen zu den kundenseitigen Anforderungen--	130
7.3.4	Schritt 4) Überarbeitung der Funktions-Merkmal-Matrix -----	130
7.3.5	Schritt 5) Überarbeitung der veränderbaren D-Merkmal-Grundformen-----	133
7.3.6	Schritt 6) Skizzieren des Entwurfs der Komponentengruppe -----	134

7.3.7	Schritt 7) Analyse des Fähigkeitsraums der Fertigung-----	134
7.3.8	Schritt 8) Abgleich des Fähigkeitsraums der Fertigung mit dem technischen Produktlösungsraum-----	135
7.3.9	Schritt 9) Technischen Lösungsraum und Fähigkeitsraum der Fertigung in Überdeckung bringen (Matching)-----	137
7.3.10	Zwischenfazit zur Synthese des Produktlösungsraums -----	138
7.4	Detaillierung des Produktlösungsraums (Phase 4)-----	138
7.4.1	Schritt 1) Erstellung des Konfigurationsmodells-----	138
7.4.2	Schritt 2) Erstellung einer Parametertabelle zur Steuerung des CAD-Modells -	140
7.4.3	Schritt 3) Erstellung des parametrischen, tabellengesteuerten CAD-Modells---	142
7.4.4	Schritt 4) Erstellung der Parametrik -----	143
7.4.5	Zwischenfazit zur Detaillierung des Produktlösungsraums -----	144
7.5	Planung des lösungsraumumfassenden Fertigungsprozesses (Phase 5)-----	144
7.5.1	Schritt 1) Bestimmung des Ausgangsteils-----	145
7.5.2	Schritt 2) Erstellung des einheitlichen Prozessplans -----	146
7.5.3	Schritt 3) Identifikation einer einheitlichen Bearbeitungsfolge-----	146
7.5.4	Schritt 4) Erstellung des Programmablaufplans für das CNC-Hauptprogramm	148
7.5.5	Schritt 5) Bildung von Operationsfolgen je D-Merkmal-Grundform-----	149
7.5.6	Schritt 6) Formalisierung der Werkzeugzuweisung -----	150
7.5.7	Schritt 7) Erstellung von Programmablaufplänen der CNC-Unterprogramme--	151
7.5.8	Zwischenfazit zur Planung des lösungsraumumfassenden Fertigungsprozesses	152
7.6	Detaillierte Gesamtdarstellung der Planungsmethode -----	152
8	Anwendung und Bewertung -----	155
8.1	Anwendung des Gestaltungsmodells -----	155
8.1.1	Anwendung im Labor (Anwendungsfall 1)-----	155
8.1.2	Anwendung des Gestaltungsmodells in Anwendungsfall 2 (Fallgeber A)-----	159
8.2	Bewertung des Gestaltungsmodells-----	161
8.2.1	Verbesserung in den Zieldimensionen Zeit, Qualität und Kosten-----	161
8.2.2	Gestaltungshypothesen-----	163
8.2.3	Zwischenfazit zur Anwendung und Bewertung des Gestaltungsmodells -----	163
8.3	Anwendung der Planungsmethode-----	164
8.3.1	Anwendung der Planungsmethode in Anwendungsfall 3 (Fallgeber A) -----	164
8.3.2	Anwendung der Planungsmethode in Anwendungsfall 4 (Fallgeber B) -----	169
8.3.3	Anwendung der Planungsmethode in Anwendungsfall 5 (Fallgeber C) -----	170
8.4	Bewertung der Planungsmethode -----	171
8.4.1	Erfüllung inhaltlicher Anforderungen an die Planungsmethode-----	171
8.4.2	Erfüllung formaler Anforderungen an die Planungsmethode -----	172
8.5	Zwischenfazit zu Anwendung und Bewertung-----	173

9 Zusammenfassung und Ausblick -----	175
9.1 Zusammenfassung -----	175
9.2 Ausblick -----	177
Literaturverzeichnis -----	179
Anhang -----	191
A.1: Konturen und Konturflächen an Fräs- und Drehbauteilen-----	191
A.2 Darstellung der Auftragsabwicklung einer individualisierten Komponente-----	192
A.3 Erläuterung der identifizierten Komplikationen der Produktindividualisierung in der spanenden Fertigung -----	193
A.4 Verdeutlichung der Wirkweise des Gestaltungsmodells für Produktindividualisierung in der spanenden Fertigung anhand einer Prozesskette -----	199
A.5 Teilvorgehen zur Automatisierung von Prozessen: -----	202
Lebenslauf des Autors -----	203