

# Graph-based optimization for manufacturability of bifurcated sheet metal parts

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

genehmigte  
Dissertation

vorgelegt von

**Katharina Albrecht, M.Sc.**

aus Heilbad Heiligenstadt

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche  
Tag der Einreichung: 31. 03. 2017  
Tag der mündlichen Prüfung: 19. 07. 2017

Darmstadt 2017

D17



Forschungsberichte aus dem Fachgebiet  
Datenverarbeitung in der Konstruktion

Band 58

**Katharina Albrecht**

**Graph-based optimization for manufacturability  
of bifurcated sheet metal parts**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5547-4

ISSN 1435-1129

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

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

Life is growth. If we stop growing, technically and spiritually,  
we are as good as dead.

*Morihei Ueshiba*



---

# Vorwort des Herausgebers

Die moderne Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) bietet vielfältige Innovations- und Leistungspotenziale, die im Entstehungsprozess neuer Produkte auszuschöpfen sind. Dies setzt jedoch voraus, dass die wissenschaftlichen Grundlagen zum Einsatz der modernen IKT in der Produktentstehung vorliegen und neue Methoden wissenschaftlich abgesichert sind. Darüber hinaus stellen die wissenschaftliche Durchdringung und die Bereitstellung wissenschaftlicher Forschungsergebnisse eine abgestimmte Kooperation zwischen Forschung und Industrie dar.

Vor diesem Hintergrund informiert diese Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Fachgebiets Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) des Fachbereichs Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt.

Ziel dieser Forschungsarbeiten ist die wissenschaftliche Durchdringung innovativer, interdisziplinärer und integrierter Produktentwicklungsprozesse und darauf aufbauend die Konzeption neuer Methoden für die Entwicklung und Konstruktion von Produkten sowie für die Zusammenarbeit in virtuellen Produktentwicklungsprozessen.

Eine Kategorie innovativer Produkte stellen die integral verzweigten Blechbauteile dar. Sie werden durch die neuen Fertigungsverfahren Spaltprofilieren und Spaltbiegen hergestellt. Im Sonderforschungsbereich 666 - "Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung - Entwicklung, Fertigung und Bewertung" werden zu deren Entwicklung Lösungen erforscht, die auf dem Ansatz eines durchgängigen digitalen Produktentstehungsprozesses beruhen.

Hierzu hat Frau Albrecht im Rahmen ihrer Dissertation Graphen-basierte Algorithmen entwickelt, welche auf dem im SFB 666 entwickelten prozess-integrierenden Informationsmodell und dessen Partialmodellen basieren. Eingegliedert in den Algorithmen-basierten Produktentstehungsprozess, werden die topologisch optimierten Blechprofile hinsichtlich ihrer Fertigbarkeit durch die formalisierten Konstruktions- und Fertigungsrichtlinien optimiert und angepasst. Dazu werden die Methoden der Graphentheorie angewandt und mit Hilfe der SFB 666 verwendeten neutralen Datenstrukturen zur durchgängigen Nutzung aufbereitet. Somit leistet Frau Albrecht einen wichtigen Beitrag zur durchgängigen Produktentwicklung von verzweigten Blechbauteilen.

Darmstadt, September 2017

Reiner Anderl

---

# Vorwort des Autors

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) an der Technischen Universität Darmstadt entstanden. Sie ist das Ergebnis einer kontinuierlichen fachlichen Auseinandersetzung mit Kollegen und den Anforderungen des Sonderforschungsbereichs 666 - Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung, in dem ich seit 2014 tätig war.

Ich danke meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl für die Betreuung meiner Dissertation. Sein entgegengebrachtes Vertrauen und der mir gestattete wissenschaftliche Freiraum stellen die Grundlage für die Erstellung und das Gelingen meiner Dissertation dar.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche, Leiter des Instituts für Produktionstechnik und Umformmaschinen, möchte ich für die Übernahme des Korreferats danken. Als Sprecher des SFB 666 hat er wichtige Impulse zur Motivation meiner Dissertation gegeben.

In diesem Sinne möchte ich Thiago Weber Martins, Anna Walter, Thea Göllner, Daniela Bratzke, Michael Roos und Christian Wagner, sowie allen weiteren Mitglieder des SFB 666 für die tolle interdisziplinäre Zusammenarbeit, den Zusammenhalt und die vielen konstruktiven Gespräche danken. Ich möchte mich bei meinen Kollegen am Fachgebiet bedanken, die dafür gesorgt haben, dass es nie langweilig wurde. Besonderer Dank geht dabei an Maximilian Zocholl, Thiago Weber Martins, Oleg Anokhin, Stefan Kugler, Thomas Trinkel und Gong Wang, für viele Tage des gemeinsamen Espresso trinkens, der fordernden und kreativen Gespräche und vor Allem einer durchweg angenehmen Atmosphäre. Ohne die Unterstützung der Administratoren David Fischer und Christian Roth wäre nichts gelaufen.

Den Ehemaligen Diana Völz, Pamela Stöcker, André Sprenger und Susanne Sprenger möchte ich besonders für die Unterstützung in meiner Anfangszeit danken.

Für die fachgebietsseitige Durchsicht meiner Dissertation möchte ich Maximilian Zocholl, Oleg Anokhin, Yübo Wang und Simon Frisch danken. Astrid Wolff, Florian Benz, Sebastian Linke, Patrick Kocurek, Jonathan Deutsch und Martin Smuda verdanke ich besonders den Feinschliff.

Ich bedanke mich bei meiner Mutter, Oma und Opa, die mich schon früh für das Ingenieurwesen begeistert, mich jahrelang in meinen Vorhaben unterstützt und mir immer vertraut haben.

Martin Smuda, Takeo und Musashi bin ich für ihre mentale Unterstützung und Motivation besonders während der Schreibphase dankbar. Meinen Freunden Barbara Sander, Sebastian Thieme, Martin Dilba, Dorothea Leonhäuser, Marco Göbel, Mercedes von Kulesa und Ulrike Rauschelbach, danke ich, dass wir uns nicht aus den Augen verloren haben, auch wenn die Zeit knapp war. Insbesondere Patricia Haas danke ich vielmals für die vielen Trainingsstunden, die mir geholfen haben auch mal abzuschalten und Kraft zu tanken.

Darmstadt, September 2017

Katharina Albrecht

---

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Process of sheet metal profiles development . . . . .	2
1.2	Benefits of algorithm-based optimization . . . . .	3
1.3	How this dissertation is structured . . . . .	5
<b>2</b>	<b>State of the Art</b>	<b>7</b>
2.1	The product creation process of the CRC 666 . . . . .	8
2.1.1	Manufacturing technologies at CRC 666 . . . . .	8
2.1.2	Product and process parameters . . . . .	10
2.1.3	Graph representation of bifurcated sheet metal . . .	10
2.1.4	Algorithm-based product development process . . .	12
2.2	Mathematical optimization . . . . .	15
2.2.1	Introduction into topology optimization . . . . .	15
2.2.2	Topology optimization of bifurcated sheet metal profiles	16
2.3	Approaches in semi-automated product development . . . .	18
2.4	Product development process . . . . .	21
2.4.1	Integrated product development . . . . .	22
2.4.2	Design phase of product development . . . . .	24
2.4.3	Design for Manufacturing . . . . .	29
2.5	Manufacturing technologies in sheet metal processing . . . .	30
2.5.1	Bending and roll forming . . . . .	31
2.5.2	Design guidelines . . . . .	32
2.5.3	Technical feasibility . . . . .	33
2.6	Information modeling . . . . .	33
2.6.1	Object-oriented modeling . . . . .	34
2.6.2	Process modeling . . . . .	35
2.7	Graph theory . . . . .	36

2.7.1	The graph representation . . . . .	37
2.7.2	Cycles and cycle manipulation . . . . .	40
2.8	Topology and geometry during product development . . . . .	44
2.8.1	Integrated product model . . . . .	44
2.8.2	Product representation . . . . .	45
2.8.3	Solid modeling . . . . .	46
2.9	Conclusion and potentials . . . . .	48
<b>3</b>	<b>Specification of Optimization Requirements</b>	<b>51</b>
3.1	Demand for action . . . . .	51
3.2	Target definition . . . . .	52
3.3	Use case of the CRC 666 . . . . .	52
3.4	Requirements . . . . .	56
3.4.1	Information model requirements . . . . .	57
3.4.2	Manufacturing-oriented optimization requirements . . . . .	59
3.4.3	Organizational integration requirements . . . . .	61
3.5	Summary of requirements . . . . .	63
3.6	Conclusion . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Concept of Manufacturing-Oriented Optimization</b>	<b>67</b>
4.1	Concept overview . . . . .	68
4.2	Information model . . . . .	70
4.2.1	Partial model technology parameter . . . . .	73
4.2.2	Partial model design guideline . . . . .	75
4.2.3	Partial model product property . . . . .	76
4.2.4	Optimization objective definition via partial models . . . . .	77
4.3	Graph extraction . . . . .	81
4.3.1	Process of extraction . . . . .	82
4.3.2	Graph definition . . . . .	89
4.3.3	Data interchange format . . . . .	90
4.4	Graph-based optimization . . . . .	91
4.4.1	Preliminary steps . . . . .	92
4.4.2	Edge reduction . . . . .	95
4.4.3	Edge contraction . . . . .	97
4.4.4	Cycle reduction . . . . .	99
4.5	Further refinement . . . . .	105
4.5.1	Angle adjustment . . . . .	106
4.5.2	Reverse edge contraction . . . . .	107
4.5.3	Solution consistency . . . . .	108

4.5.4	Integration of manufacturing technologies . . . . .	109
4.6	Conclusion . . . . .	113
<b>5</b>	<b>Implementation</b>	<b>115</b>
5.1	System structure . . . . .	115
5.1.1	Choice of structure elements . . . . .	116
5.1.2	Smart graphical user interface . . . . .	117
5.1.3	Data model . . . . .	118
5.2	Graph extraction implementation . . . . .	119
5.3	Optimization process implementation . . . . .	120
5.3.1	Edge reduction . . . . .	121
5.3.2	Edge contraction . . . . .	122
5.3.3	Cycle detection and storage . . . . .	123
5.3.4	Cycle reduction . . . . .	125
5.4	Further refinement implementation . . . . .	126
5.5	Conclusion . . . . .	127
<b>6</b>	<b>Validation</b>	<b>129</b>
6.1	Demonstrator facade cleaner . . . . .	130
6.2	Validation of optimization results . . . . .	132
6.2.1	Graph extraction . . . . .	132
6.2.2	Initial graph . . . . .	134
6.2.3	Edge reduction . . . . .	134
6.2.4	Edge contraction . . . . .	136
6.2.5	Cycle reduction . . . . .	137
6.2.6	Manufacturability . . . . .	142
6.2.7	Comparison of results . . . . .	143
6.2.8	Manual adaption vs. MAORI . . . . .	144
6.3	Possible manufacturing sequence . . . . .	145
6.4	Requirements fulfillment . . . . .	147
6.5	Critical View . . . . .	150
6.6	Conclusion . . . . .	151
<b>7</b>	<b>Future Work</b>	<b>153</b>
<b>8</b>	<b>Summary</b>	<b>155</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>157</b>
<b>A</b>	<b>Manufacturing Information</b>	<b>179</b>

<b>B XML Documents</b>	<b>185</b>
<b>C Code</b>	<b>191</b>
<b>D Finite Element Method (FEM) Simulation Results</b>	<b>195</b>