

---

# Modellintegrierte Produkt- und Prozessentwicklung

---

Ilyas Mattmann

# Modellintegrierte Produkt- und Prozessentwicklung

Mit einem Geleitwort von Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Dr. h. c. Albert Albers

 Springer Vieweg

Ilyas Mattmann  
Darmstadt, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2017

D 17

ISBN 978-3-658-19408-6                      ISBN 978-3-658-19409-3 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-658-19409-3

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

*Für eure liebevolle und motivierende Unterstützung,  
gewidmet den besten Eltern auf der ganzen Welt, meinen Eltern:*

*Erich und Reinhilde*

## Geleitwort

Durch den Wandel der weltweiten Märkte hin zu Käufermärkten und einem Überangebot an Produktlösungen für nahezu alle Kundenbedürfnisse ist die *moderne Produktentwicklung* heute gekennzeichnet von einer hohen Dynamik und einer gleichzeitig extremen Fokussierung auf die Optimierung aller Lösungsstrukturen unter den Gesichtspunkten Funktionalität und ganz besonders Kosten und Entwicklungszeiten. Gleichzeitig ist ein Trend zu immer *komplexeren Produktlösungen* zu beobachten. Die Integration von Elektronik und Informatik in die maschinenbaulichen Lösungen hin zur Mechatronik, die heute die Grundlage des Maschinenbaus – und damit eigentlich jeden Maschinenbauproduktes – ist, führt zu einer Verknüpfung unterschiedlicher Fachdisziplinen, die ein *hoch komplexes System von Wechselwirkungen* während des Entwicklungsprozesses definiert. Wird nun noch die Entwicklung auf der *Produktionssystemseite* berücksichtigt, wo immer neue, leistungsfähigere Fertigungsverfahren neue Potenziale, auch gerade für die Produktentwicklung, ergeben, wird deutlich, dass ein moderner Produktentstehungsprozess nicht mehr mit den klassischen Vorgehensweisen abgebildet werden kann.

Wie unter anderem von ALBERS bereits vor zehn Jahren diskutiert, ist eine Parallelisierung und wechselseitige Verknüpfung der Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung hin zu einem *integrierten Ansatz*, ohne Zweifel notwendig. Auf diesem Forschungsgebiet sind verschiedene Forschungsgruppen aktiv. So konnten im Rahmen des *Münchener Vorgehensmodells* von LINDEMANN neue Konzepte der Zusammenarbeit und Modellierungsmöglichkeiten erforscht werden. GAUSEMEIER setzt hier mit dem *3-Zyklen-Modell* ebenfalls wichtige Impulse. Die *Karlsruher Schule für Produktentwicklung*, die ALBERS definiert hat, geht mit einem völlig neuen Ansatz an die Herausforderungen heran. Auf Basis des Konzeptes der Produktgenerationsentwicklung, die besagt, dass praktisch alle realen Produktentwicklungen sich auf Referenzprodukte oder Referenzlösungen beziehen, entstehen ganz neue Möglichkeiten der Modellierung auch sehr komplexer Produktentstehungsprozesse. Dabei ist hier der Fokus eindeutig auf die Definition generischer Aktivitäten gelegt, die es erlauben, den Produktentstehungsprozess jeweils individuell zu modellieren.

An der Technischen Universität Darmstadt wurde über viele Jahre in der Forschungsgruppe um BIRKHOFER ebenfalls systematisch an der Neudefinition von

Produktentstehungsmodellen und -prozessen gearbeitet. Ziel war es hier, die Integration von Produkt- und Prozessentwicklung voranzutreiben. Dabei kommt insbesondere dem Sonderforschungsbereich *SFB 666 „Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung – Entwicklung, Fertigung, Bewertung“* eine große Rolle zu, da in diesem SFB genau die Wechselwirkung von Prozess und Produkt Gegenstand der Forschung ist.

Die Konstruktions- und Entwicklungsmethodik für technische Systeme stellt eine entscheidende Grundlage dar, um in der Zukunft mit den hohen Anforderungen an Komplexität, Interdisziplinarität und auch Wettbewerbsfähigkeit umgehen zu können. Die Ansätze, die – zurückgehend auf die Arbeiten unter anderem von PAHL und BEITZ – erarbeitet wurden, waren eine wichtige Grundlage, können aber für die Zukunft nicht mehr ausreichen. Hier mit neuen Konzepten und neuen Möglichkeiten Ansätze zu formulieren, die den Herausforderungen der Zukunft gewachsen sind, stellt eine wichtige Aufgabe in der entwicklungsmethodischen Forschung dar. Hier leisten einige Forschungsgruppen, sowohl in Deutschland (LINDEMANN, GAUSEMEIER, ALBERS) als auch international, einen kontinuierlichen Beitrag. Trotzdem muss festgehalten werden, dass bisher noch keine praxisrelevanten, validen Lösungen vorliegen.

Im Umfeld dieser Herausforderungen ist auch die wissenschaftliche Arbeit von Herrn MATTMANN angeordnet. Hierbei gelingt es, die verschiedenen Sichtweisen von Produkt- und Prozessentwicklung in der Methodik der *Modellintegrierten Produkt- und Prozessentwicklung* zu integrieren. Das vorliegende Werk liefert einen sehr wertvollen Beitrag für die weitere wissenschaftliche Arbeit an Produktentwicklungsmodellen und -konzepten.

Karlsruhe

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

## Vorwort

Die Motivation für dieses Buch entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am *Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd)* der Technischen Universität Darmstadt und als Mitglied des *Sonderforschungsbereichs 666 „Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung – Entwicklung, Fertigung, Bewertung“*.

Mein Dank gilt *Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner* für die Übernahme der Erstberichterstattung und die inhaltlichen Diskussionen in der letzten Phase meiner Promotion. *Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers* danke ich ganz besonders für die Übernahme des Korreferats und die konstruktiven Fachgespräche auf den gemeinsam verbrachten internationalen Fachkonferenzen.

Darüber hinaus danke ich *Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche* für die angenehme Zusammenarbeit mit konstruktiven und stets motivierenden Diskussionen während der Vakanz des Fachgebiets, seit Beginn meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter von April 2014 bis März 2016. *Herrn Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl*, *Herrn Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer* und *Herrn Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea* gilt mein besonderer Dank für ihre sofortige Bereitschaft den Vor-/Beisitz bei meiner Doktorprüfung zu übernehmen. *Herrn Dr.-Ing. Nikola Bursac* und *Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Nicolas Reiß* sei ebenfalls für die kritische Durchsicht dieses Manuskripts gedankt.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet danke ich für die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit. Hierbei sei vor allem den Mitgliedern meines Forschungsbereichs im Sheet Metal Design gedankt: *Herrn Michael Roos, M.Sc.* und *Herrn Christian Wagner, M.Sc.* Insbesondere gilt mein Dank *Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Sebastian Gramlich* für die stetig fördernde und reflektierende Sichtweise auf die Forschungsaktivitäten mit einer klaren konstruktionswissenschaftlichen Vision. *Herrn Dr.-Ing. Hermann Kloberdanz* danke ich für die fachlich kritisch-reflektierenden Diskussionen während meiner Promotionszeit.

*Frau Dipl.-Päd. Diana Seyfarth* danke ich für die einzigartige Möglichkeit, meine professionellen Lehrkompetenzen im *Zertifikat Hochschullehre* mit neuen Impulsen für die Lehre weiterzuentwickeln.

Darüber hinaus gilt meine besondere Wertschätzung allen Studierenden, die ich auf ihrem Weg zu ihren Bachelor- und Masterabschlüssen sowie in ihrem Studium im Rahmen meiner Lehrtätigkeiten in den Lehrveranstaltungen *Angewandte Produktentwicklung*, *Produktinnovation*, *Maschinenelemente* und *Mechatronik II* und im *Product Design Project* begleiten durfte. Gleiches gilt für die Studierenden, die

mich im Rahmen ihrer Tätigkeiten als studentische Hilfskräfte stetig unterstützten und neue Impulse für dieses Buch gaben.

Ebenso gilt mein wertschätzender Dank all meinen Freunden, mit denen ich eine wunderschöne Zeit an den Ufern des Rheins und in der Rhein-Main-Region verbringen durfte. Ihr seid die besten Freunde, die man sich nur wünschen kann!

Von Herzen danke ich meinen Eltern, *Erich* und *Reinhilde*. Ihr habt mir jederzeit zur Seite gestanden und mich bei meinen Vorhaben motivierend und liebevoll unterstützt. Aus tiefstem Herzen, vielen Dank. Ich bin unendlich stolz, dass ihr meine Eltern seid!

Heidesheim am Rhein

Ilyas Mattmann



## Kurzfassung

Technische Produkte müssen eine Vielzahl von *Anforderungen* erfüllen. Zwischen den Anforderungen und der Lösungsfindung und -konkretisierung bestehen vielfältige, wechselseitige und *komplexe Beziehungen*. Darüber hinaus werden neue Fertigungsverfahren zur stofflichen Realisierung des entwickelten Produkts verwendet. Dies führt zu einer steigenden *Komplexität* des technischen Produkts, der technischen Prozesse und des Entwicklungsprozesses.

Erst die Kenntnis über die genauen Relationen zwischen den Produkteigenschaften bildet die Grundlage für eine erfolgreiche Entwicklung, um neue und innovative Produkte im Funktions- und Prozesszusammenhang zielgerichtet anhand der zugrundeliegenden Anforderungen zu entwickeln. Jedoch ist die *Anforderungsmodellierung* sehr heterogen und inkonsistent im Vergleich zu Produkt- und Prozessmodellen ausgeprägt.

Dieses Buch baut auf der eigenschaftsbasierten Modellierung technischer Produkte und technischer Prozesse sowie der Modellierung von Anforderungen und Entwicklungsprozessen auf. Es erweitert die bestehenden Erkenntnisse der Eigenschaftstheorie und stimmt die Anforderungsmodellierung und -terminologie mit der eigenschaftsbasierten Produkt- und Prozesskonkretisierung ab. Die konsistente Modellierung von Anforderungen, technischen Produkten und Prozessen bildet die Grundlage für die wissenschaftlich fundierte Erarbeitung der Methodik der *Modellintegrierten Produkt- und Prozessentwicklung (MiP<sup>2</sup>)*.

Die *Methodik* der MiP<sup>2</sup> beinhaltet die zentralen Modellräume zur kontinuierlichen Berücksichtigung und Fortschreibung von Anforderungen bei der eigenschaftsbasierten Entwicklung technischer Produkte im Funktions- und Prozesszusammenhang. Die MiP<sup>2</sup> fokussiert durch die gleichwertige Transformation von Produkt- und Prozessanforderungen in Soll-Eigenschaften nicht nur die *Produktfunktion* bei der Entwicklung eines technischen Produkts, sondern auch die *technischen Prozesse* im gesamten Produktlebenslauf.

Aufbauend auf der Modelltheorie werden *Synthese- und Analyseaktivitäten* der MiP<sup>2</sup> aufgeführt. Diesen liegt eine systematische *Transformation* von Anforderungen in Soll-Eigenschaften, das sogenannte *Anforderungsmapping*, zugrunde. Das Anforderungsmapping ermöglicht den gezielten Aufbau der Eigenschaftsrelationen. Abhängige Produkteigenschaften werden in unabhängige Gestalteigenschaften des zu entwickelnden technischen Produkts überführt. Die unabhängigen Gestalteigenschaften können vom Entwickler direkt festgelegt und beeinflusst werden. Die Modelltheorie vereint die unterschiedlichen Aspekte und Potenziale eines markt- und technologiegetriebenen Entwicklungsansatzes.

Anwendungsbeispiele aus dem Sonderforschungsbereich 666 (SFB 666) zeigen die Potenziale der MiP<sup>2</sup> am Beispiel einer *algorithmensbasierten und produktionsintegrierenden Entwicklungsmethodik* auf. Die Produktbeispiele werden in der Modellintegrierten Produkt- und Prozessentwicklung gleichwertig im Funktions- und Prozesszusammenhang entwickelt. Zudem verdeutlicht der algorithmensbasierte Entwicklungsansatz, wie die formale Aufbereitung und Strukturierung der Entwicklungsaufgabe aufgrund von Soll-Eigenschaften zur algorithmensbasierten Lösungsgenerierung mithilfe von mathematischen Optimierungsverfahren genutzt werden kann.

# Inhaltsverzeichnis

Geleitwort .....	VII
Vorwort.....	IX
Kurzfassung .....	XI
Abbildungsverzeichnis.....	XIX
Tabellenverzeichnis .....	XXVII
Abkürzungsverzeichnis.....	XXIX
Formelverzeichnis.....	XXXI

## **1 Einleitung..... 1**

1.1 Motivation.....	1
1.2 Makroskopische Zielsetzung.....	5
1.3 Einordnung in die Forschungsaktivitäten des SFB 666 .....	7
1.4 Struktureller Aufbau .....	8

## **2 Stand der Forschung..... 11**

2.1 Fertigungstechnologische Grundlagen des Spaltprofilierens und Spaltbiegens .....	11
2.1.1 Konventionelle Blechprodukte .....	11
2.1.2 Blechbauteile mit verzweigten Strukturen .....	12
2.1.3 Fertigung verzweigter Blechstrukturen durch Spaltprofilieren und -biegen .....	14
2.1.4 Fertigungsverfahreninduzierte Eigenschaften spaltprofilierter Blechprodukte .....	16
2.1.5 Zwischenfazit.....	17
2.2 Produkt- und Prozessinnovationen.....	17
2.2.1 Innovationsbegriff.....	17
2.2.2 Market Pull und Technology Push.....	20
2.2.3 Zwischenfazit.....	21
2.3 Grundlagen zu Modellen und Methoden.....	22
2.3.1 Modelle.....	22
2.3.2 Methode und Methodik.....	26
2.3.3 Zwischenfazit.....	26
2.4 Modellierung technischer Systeme und Produkte .....	27
2.4.1 Systembegriff.....	27
2.4.2 Technische Systeme.....	32

2.4.3	Technische Produkte.....	33
2.4.4	Zwischenfazit.....	34
2.5	Eigenschaftsbasierte Beschreibung und Modellierung technischer Systeme und Produkte .....	35
2.5.1	Klassifizierung von Eigenschaften .....	35
2.5.2	Abbildung von Eigenschaftsrelationen .....	42
2.5.3	Soll-, Nenn- und Ist-Eigenschaften.....	44
2.5.4	Zwischenfazit.....	45
2.6	Anforderungen .....	47
2.6.1	Anforderungsquellen .....	47
2.6.2	Anforderungsarten .....	48
2.6.3	Klassifizierung von Anforderungen.....	56
2.6.4	Anforderungsdekomposition .....	62
2.6.5	Anforderungsdokumentation .....	63
2.6.6	Zielkonflikte .....	66
2.6.7	Standardisierte Anforderungscluster.....	67
2.6.8	Zwischenfazit.....	69
2.7	Produktmodellierung.....	70
2.7.1	Hierarchisches Produktmodell.....	70
2.7.2	Pyramidenmodell.....	72
2.7.3	Contact & Channel-Ansatz (C&C <sup>2</sup> -A).....	77
2.7.4	Eigenschaftsbasierte Modellierung der Produktkonkretisierung.....	80
2.7.5	Zwischenfazit.....	82
2.8	Prozessmodellierung.....	83
2.8.1	Technische Prozesse .....	84
2.8.2	Modellierung mit PETRI-Netzen .....	84
2.8.3	Prozessmodell nach HUBKA.....	86
2.8.4	Zustandsmodell nach BIRKHOFER.....	87
2.8.5	Erweitertes Prozessmodell nach HEIDEMANN.....	87
2.8.6	Realisierung von technischen Prozessen durch Verfahren .....	91
2.8.7	Zwischenfazit.....	92
2.9	Modellierung des Produktlebenslaufs und -zyklus .....	93
2.9.1	Prozessketten des Produktlebenslaufs.....	93
2.9.2	Prozessketten des Produktlebenszyklus.....	95
2.9.3	Produkt-, Prozess- und Technologiereifegrad.....	96
2.9.4	Zwischenfazit.....	97
2.10	Modellierung von Problemlösungs- und Entwicklungsprozessen .....	98
2.10.1	Grundlagen des Problemlösens.....	98
2.10.2	Systematisierung von Modellen des Entwicklungsprozesses .....	102

2.10.3	Phasen- und aktivitätenbasierte Entwicklungsmodelle .....	105
2.10.4	Problem- und lösungsorientierte Entwicklungsmodelle .....	109
2.10.5	Integrierte Entwicklungsmodelle .....	126
2.10.6	Zwischenfazit.....	150
<b>3</b>	<b>Forschungsbedarf und Zielsetzung .....</b>	<b>151</b>
3.1	Fazit zum Stand der Forschung und Forschungsdefizite.....	151
3.2	Forschungsfragen .....	156
3.3	Zielsetzung.....	157
<b>4</b>	<b>Terminologie des Anforderungsbegriffs .....</b>	<b>161</b>
4.1	Ableiten von Eigenschaften aus Anforderungen.....	162
4.2	Äquivalenz von Anforderungen und Eigenschaften .....	164
4.3	Prozessualer Bezug von Anforderungen .....	167
4.4	System- und Produktbeschreibung durch Anforderungen .....	167
4.5	Zusammenfassung.....	169
<b>5</b>	<b>Durchgängige Modellierung von Anforderungen und Eigenschaften im Produktlebenslauf .....</b>	<b>171</b>
5.1	Modellierungszweck .....	172
5.2	Durchgängige Modellierung des Produktlebenslaufs.....	172
5.3	Modellierung technischer Produkte im Prozesszusammenhang .....	174
5.3.1	Eigenschaftsbasierte Beschreibung der Konkretisierung technischer Prozesse .....	174
5.3.2	Anforderungen aus den technischen Prozessen des Produktlebenslaufs.....	182
5.4	Modellierung technischer Produkte im Funktionszusammenhang....	185
5.4.1	Eigenschaftsbasierte Beschreibung der Konkretisierung technischer Produkte.....	185
5.4.2	Anforderungen an das technische Produkt.....	190
5.5	Modellierung von nicht-wertschöpfenden Prozessen im Produktlebenszyklus .....	193
5.6	Eigenschaftsrelationen .....	194
5.7	Unterschiede zwischen Anforderungen und Soll-Eigenschaften .....	196
5.8	Zusammenhänge zwischen Anforderungs-, Produkt- und Prozessmodellierung .....	202
5.8.1	Funktions- und prozessrelevante Lösungselemente.....	203
5.8.2	Gegenüberstellung der Anforderungsarten .....	204

5.8.3	Auswirkungen von Produkt- und Prozessanforderungen auf Eigenschaften .....	207
5.9	Anwendung der Modelltheorie zur Entwicklung einer multifunktionalen Linearführung .....	208
5.9.1	Prozessanforderungen der multifunktionalen Linearführung .....	209
5.9.2	Produktanforderungen der multifunktionalen Linearführung .....	211
5.10	Zusammenfassung .....	212
<b>6</b>	<b>Methodik der Modellintegrierten Produkt- und Prozessentwicklung .....</b>	<b>215</b>
6.1	Zweck der Modellierung .....	216
6.1.1	Paradigmenwechsel .....	217
6.1.2	Elementare Grundhypothesen .....	220
6.2	Modellräume der MiP <sup>2</sup> .....	225
6.3	Lösungsräume .....	229
6.3.1	Produktlösungsraum .....	230
6.3.2	Prozesslösungsraum .....	233
6.4	Eigenschaftsräume .....	236
6.4.1	Eigenschaftsraum im Funktionszusammenhang .....	237
6.4.2	Eigenschaftsraum im Prozesszusammenhang .....	238
6.5	Anforderungsraum .....	239
6.5.1	Zeitliche Dimension .....	243
6.5.2	Horizontale Dimension .....	244
6.5.3	Vertikale Dimension .....	245
6.5.4	Anforderungscluster .....	247
6.6	Projektionsebenen .....	249
6.7	Zielsystem .....	253
6.8	Transformationssystem .....	255
6.9	Zusammenfassung .....	256
<b>7</b>	<b>Entwicklungsaktivitäten der MiP<sup>2</sup> .....</b>	<b>257</b>
7.1	Problemlösungsprozess der MiP <sup>2</sup> .....	257
7.2	Anforderungsbasierte Entwicklungsaktivitäten .....	260
7.2.1	Anforderungserfassung .....	260
7.2.2	Anforderungsdetaillierung .....	262
7.2.3	Anforderungstransformation .....	266
7.2.4	Anforderungsdefinition .....	272

7.2.5	Beziehungen zwischen Anforderungen und Soll-Eigenschaften .....	272
7.3	Eigenschaftsbasierte Analyse- und Syntheseaktivitäten .....	273
7.3.1	Konkretisieren und Abstrahieren .....	275
7.3.2	Dekomponieren und Kombinieren.....	276
7.3.3	Variieren und Zusammenfügen.....	277
7.3.4	Lösungsanalyse und -synthese im Funktionszusammenhang.....	277
7.3.5	Lösungsanalyse und -synthese im Prozesszusammenhang....	279
7.4	Integration von funktions- und prozessrelevanten Lösungselementen.....	283
7.5	Dekomposition in der Lösungskonkretisierung .....	284
7.6	Kontinuierliche Verifikation .....	285
7.7	Potenziale für algorithmenbasierte Entwicklungsprozesse .....	285
7.8	Zusammenfassung.....	286
<b>8</b>	<b>Anforderungs- und Lösungsmodellierung der MiP<sup>2</sup> mit SysML.....</b>	<b>287</b>
8.1	Zweck der Modellierung.....	287
8.2	Vorteile von SysML.....	287
8.3	Modellierung der Anforderungsstruktur mit SysML .....	288
8.4	Modellierung von funktions- und prozessrelevanten Lösungselementen mit SysML.....	292
8.5	Modellierung von Soll-Eigenschaften und Soll-Größen .....	293
8.6	Zusammenfassung.....	294
<b>9</b>	<b>Anwendung und Diskussion der Ergebnisse.....</b>	<b>295</b>
9.1	Entwicklung eines multifunktionalen Informationsständers .....	296
9.1.1	Produktidee .....	296
9.1.2	Analyse von Referenzprodukten.....	296
9.1.3	Anforderungserfassung.....	297
9.1.4	Anforderungstransformation.....	298
9.1.5	Konkretisierung im Funktionszusammenhang.....	300
9.1.6	Konkretisierung im Prozesszusammenhang .....	302
9.1.7	Algorithmusbasierte Optimierung des Sockels.....	302
9.2	Entwicklung eines multifunktionalen Linearsystems.....	304
9.2.1	Produktidee .....	304
9.2.2	Anforderungserfassung.....	305
9.2.3	Transformation in funktions- und prozessrelevante Soll-Eigenschaften und Soll-Größen .....	307

9.2.4	Konkretisierung im Funktions- und Prozesszusammenhang	309
9.2.5	Algorithmenbasierte Optimierung des multifunktionalen Linearsystems .....	310
9.3	Fazit zur Anwendung der MiP <sup>2</sup> .....	312
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>315</b>
10.1	Zusammenfassung .....	315
10.2	Nutzen für die Konstruktionswissenschaft.....	317
10.3	Wissenschaftliche Innovation .....	319
10.4	Ausblick .....	322
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>325</b>
<b>12</b>	<b>Eigene Veröffentlichungen.....</b>	<b>345</b>
<b>13</b>	<b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>	<b>347</b>
<b>14</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>349</b>
A	Methodik der MiP <sup>2</sup> .....	349
B	Glossar .....	350
C	Terminologische Definitionen des Anforderungsbegriffs.....	355
D	Qualitätsmerkmale für Anforderungen .....	368
E	Essenzielle Qualitätsmerkmale für Anforderungen im Kontext der MiP <sup>2</sup> .....	375



# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b>	Spannungsfelder produzierender Unternehmen .....	2
<b>Abbildung 2:</b>	Paradoxon der Konstruktion .....	4
<b>Abbildung 3:</b>	Struktureller Aufbau – Teil I.....	8
<b>Abbildung 4:</b>	Struktureller Aufbau – Teil II .....	9
<b>Abbildung 5:</b>	Struktureller Aufbau – Teil III.....	10
<b>Abbildung 6:</b>	Produktspektrum verzweigter Blechprodukte des SFB 666.....	13
<b>Abbildung 7:</b>	Verfahrensprinzip des Spaltprofilierens und -biegens .....	14
<b>Abbildung 8:</b>	Verfahrensinduzierte Eigenschaften von spaltprofilierten Produkten.....	16
<b>Abbildung 9:</b>	Prozessintegriert mechanisch gefügte Zahnstange.....	18
<b>Abbildung 10:</b>	Technology Push und Market Pull im ABELL-Schema.....	20
<b>Abbildung 11:</b>	Mechanische Modellbildung eines Blechs mit Bohrung.....	23
<b>Abbildung 12:</b>	Allgemeiner Aufbau von Systemen .....	28
<b>Abbildung 13:</b>	Systemkonzepte .....	30
<b>Abbildung 14:</b>	Systemtypen im Kontext der Systemkomplexität .....	31
<b>Abbildung 15:</b>	Eigenschaftsklassen .....	36
<b>Abbildung 16:</b>	Unterschiedliche Merkmale .....	37
<b>Abbildung 17:</b>	Eigenschaftsmodellierung eines Blechprodukts.....	42
<b>Abbildung 18:</b>	Eigenschaftsnetzwerk und Eigenschaftsrelationen in der DSM.....	43
<b>Abbildung 19:</b>	Zusammenhang zwischen Modellen und Produkteigenschaften .....	45
<b>Abbildung 20:</b>	Makroskopische Beschreibung eines Hohlkammerprofils durch Eigenschaften.....	46
<b>Abbildung 21:</b>	Kontinuumsmechanische Beschreibung der Materialeigenschaften.....	46

---

<b>Abbildung 22:</b> Quellen für Anforderungen.....	47
<b>Abbildung 23:</b> Anforderungsarten in der Softwareentwicklung.....	49
<b>Abbildung 24:</b> Zusammenhang zwischen Anforderungen und Lösungen.....	52
<b>Abbildung 25:</b> Technisch-wirtschaftliche und organisatorische Anforderungen.....	53
<b>Abbildung 26:</b> Funktionale, eigenschaftliche und lösungsbehaftete Anforderungen.....	54
<b>Abbildung 27:</b> KANO-Modell der Kundenzufriedenheit.....	58
<b>Abbildung 28:</b> Anforderungsgliederung.....	59
<b>Abbildung 29:</b> Dekomposition von Anforderungen.....	62
<b>Abbildung 30:</b> Anforderungszyklen bei der Dekomposition.....	62
<b>Abbildung 31:</b> Untergliederung von Anforderungen.....	63
<b>Abbildung 32:</b> Funktionale Anforderungsschablonen.....	65
<b>Abbildung 33:</b> Standardisierte Anforderungserfassung.....	67
<b>Abbildung 34:</b> Instanz eines objektorientierten Anforderungsclusters.....	67
<b>Abbildung 35:</b> Hierarchisches Produktmodell.....	71
<b>Abbildung 36:</b> Pyramidenmodell.....	72
<b>Abbildung 37:</b> Funktionsmodellierung.....	74
<b>Abbildung 38:</b> Modellierung der Ritzel-Zahnstange-Paarung mit dem C&C <sup>2</sup> -A.....	79
<b>Abbildung 39:</b> Produktmodelleigenschaften.....	80
<b>Abbildung 40:</b> Zeitdiskrete PETRI-Modellierung für Schweißprozesse.....	85
<b>Abbildung 41:</b> Modell technischer Prozesse (TP-Modell).....	86
<b>Abbildung 42:</b> Zielhandlungen im Zustandsmodell.....	87
<b>Abbildung 43:</b> Prozessmodell.....	88
<b>Abbildung 44:</b> Realisierung des Umformprozesses durch Verfahren und Verfahrensprinzip.....	92
<b>Abbildung 45:</b> Prozesskette des Produktlebenslaufs.....	93
<b>Abbildung 46:</b> Nutzungsteilphasen.....	94

---

<b>Abbildung 47:</b> Modell des Produktlebenszyklus .....	95
<b>Abbildung 48:</b> Barrieren zwischen Problem und Lösung .....	99
<b>Abbildung 49:</b> TRIZ-Problemlösungsprozess.....	100
<b>Abbildung 50:</b> Problemlösungszyklus .....	101
<b>Abbildung 51:</b> Häufigkeit elementarer Arbeitsschritte beim Problemlösen ...	103
<b>Abbildung 52:</b> Klassifizierung von Entwicklungsmodellen .....	105
<b>Abbildung 53:</b> Hauptarbeitsschritte beim Planen und Konstruieren.....	106
<b>Abbildung 54:</b> Generelles Vorgehensmodell nach VDI-RICHTLINIE 2221 .....	107
<b>Abbildung 55:</b> VENN-Diagramm der Teilmengen im Konstruktionsprozess ..	108
<b>Abbildung 56:</b> Analyse- und Synthesemodell im CPM.....	110
<b>Abbildung 57:</b> Lösungsmuster und -elemente .....	111
<b>Abbildung 58:</b> Domänen im Axiomatic Design.....	113
<b>Abbildung 59:</b> Dekompositionsprozess im Axiomatic Design .....	115
<b>Abbildung 60:</b> Function-Behaviour-Structure-Modell.....	117
<b>Abbildung 61:</b> Modellraum des Konstruierens .....	118
<b>Abbildung 62:</b> Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM).....	120
<b>Abbildung 63:</b> Münchner Vorgehensmodell (MVM) .....	122
<b>Abbildung 64:</b> Twin-Peaks-Modell.....	125
<b>Abbildung 65:</b> Makrozyklus des V-Modells für Entwicklungs-/ Konstruktionsprozesse .....	127
<b>Abbildung 66:</b> Link-Modell .....	129
<b>Abbildung 67:</b> Modell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung (GPPE) .....	130
<b>Abbildung 68:</b> ZHO-Modell .....	131
<b>Abbildung 69:</b> Erweitertes ZHO-Modell .....	131
<b>Abbildung 70:</b> iPeM – Integriertes Produktentstehungsmodell .....	132
<b>Abbildung 71:</b> Strukturierung des Zielmodells.....	133

---

<b>Abbildung 72:</b> iPeM – Integriertes Produktentstehungsmodell im Kontext der PGE .....	138
<b>Abbildung 73:</b> Ziele, Richtlinien, Merkmale und Eigenschaften in DfX-Ansätzen .....	141
<b>Abbildung 74:</b> 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung .....	144
<b>Abbildung 75:</b> Eigenschaftsmapping .....	145
<b>Abbildung 76:</b> Integrierte algorithmenbasierte Produkt- und Prozessentwicklung .....	147
<b>Abbildung 77:</b> Inhaltlicher Aufbau des Forschungsvorgehens .....	160
<b>Abbildung 78:</b> Zweck von Anforderungen im Entwicklungsprozess .....	170
<b>Abbildung 79:</b> Aktive/passive Rolle des technischen Produkts im Produktlebenslauf .....	173
<b>Abbildung 80:</b> Modellierung technischer Prozesse.....	175
<b>Abbildung 81:</b> Generische Prozessmodellierung eines Schweißprozesses .....	175
<b>Abbildung 82:</b> Technischer Prozess mit Gestaltelementen.....	176
<b>Abbildung 83:</b> Verfahrensprinzip des Spaltprofilierens.....	178
<b>Abbildung 84:</b> Wirk-/Prozessgrößen in der eigenschaftsbasierten Prozessmodellierung .....	179
<b>Abbildung 85:</b> Eigenschaftsbasierte Modellierung eines Umformprozesses..	180
<b>Abbildung 86:</b> Eigenschaftsbasierte Modellierung von Prozessketten .....	181
<b>Abbildung 87:</b> Verfahrenskette eines spaltprofilierten Blechprodukts .....	181
<b>Abbildung 88:</b> Anforderungen aus dem Fertigungsprozess .....	185
<b>Abbildung 89:</b> Modellierung der Produktfunktion .....	186
<b>Abbildung 90:</b> Allgemeine Funktionsstruktur .....	187
<b>Abbildung 91:</b> Modellierung von Wirkelementen .....	188
<b>Abbildung 92:</b> Funktionale Produktmodellierung im Kontext des Einsatzprozesses .....	189
<b>Abbildung 93:</b> Anforderungen an ein spaltprofiliertes Mehrkammerprofil ....	191
<b>Abbildung 94:</b> Eigenschaftsrelationen mit Produktmodelleigenschaften .....	195

<b>Abbildung 95:</b> Soll-Eigenschaften als zentrale Grundlage im Entwicklungsprozess.....	197
<b>Abbildung 96:</b> Extensive Eigenschaften .....	199
<b>Abbildung 97:</b> Zusammenhänge zwischen Anforderungen und Soll-Eigenschaften.....	201
<b>Abbildung 98:</b> Zusammenhänge von Anforderungs-, Produkt- und Prozessmodellierung .....	202
<b>Abbildung 99:</b> Gegenüberstellung der Anforderungsarten .....	206
<b>Abbildung 100:</b> Auswirkungen der Anforderungsarten auf Produkt(modell-)eigenschaften.....	207
<b>Abbildung 101:</b> Produkt- und Prozessanforderungen für Spaltprofilieren und -biegen .....	208
<b>Abbildung 102:</b> Multifunktionale Linearführung mit integrierter Brems-/Haltefunktion.....	209
<b>Abbildung 103:</b> Prozessanforderungen aus dem Einsatzprozess der Linearführung.....	210
<b>Abbildung 104:</b> Produktanforderungen der multifunktionalen Linearführung .....	211
<b>Abbildung 105:</b> Herausforderungen im Entwicklungsprozess .....	220
<b>Abbildung 106:</b> Methodik der Modellintegrierten Produkt- und Prozessentwicklung .....	225
<b>Abbildung 107:</b> Entwicklung des technischen Produkts im Funktionszusammenhang .....	227
<b>Abbildung 108:</b> Entwicklung des technischen Produkts im Prozesszusammenhang .....	229
<b>Abbildung 109:</b> Produkt- und Prozesslösungsraum der MiP <sup>2</sup> .....	230
<b>Abbildung 110:</b> Modellierung des Lösungsraums im Funktionszusammenhang .....	232
<b>Abbildung 111:</b> Modellierung des Lösungsraums im Prozesszusammenhang .....	235
<b>Abbildung 112:</b> Eigenschaftsräume der MiP <sup>2</sup> .....	236

---

<b>Abbildung 113:</b> Anforderungsraum für technische Produkte und technische Prozesse .....	240
<b>Abbildung 114:</b> Detaillierung von Anforderungen.....	245
<b>Abbildung 115:</b> Dekomposition von Anforderungen .....	245
<b>Abbildung 116:</b> Anforderungscluster .....	247
<b>Abbildung 117:</b> Projektionsebene.....	250
<b>Abbildung 118:</b> Beziehungen zwischen Anforderungen und Produkteigenschaften .....	251
<b>Abbildung 119:</b> Dynamisches Zielsystem der MiP <sup>2</sup> .....	254
<b>Abbildung 120:</b> Dimensionen im Problemlösungsprozess der MiP <sup>2</sup> .....	257
<b>Abbildung 121:</b> Entwicklungsaktivitäten der MiP <sup>2</sup> .....	258
<b>Abbildung 122:</b> Anforderungserfassungsprozess der MiP <sup>2</sup> .....	261
<b>Abbildung 123:</b> Anforderungserfassung für das Anwendungsbeispiel .....	262
<b>Abbildung 124:</b> Detaillierungsprozess von Anforderungen im Anforderungsraum.....	263
<b>Abbildung 125:</b> Aufbau der Anforderungsmapping-Matrix (AMM) .....	268
<b>Abbildung 126:</b> Anforderungsmapping-Matrix für ein Mehrkammerprofil ...	271
<b>Abbildung 127:</b> Funktionale und prozessuale Konkretisierung technischer Produkte .....	275
<b>Abbildung 128:</b> Analyse- und Syntheseaktivitäten der MiP <sup>2</sup> im Funktionszusammenhang .....	278
<b>Abbildung 129:</b> Analyse- und Syntheseaktivitäten der MiP <sup>2</sup> im Prozesszusammenhang .....	280
<b>Abbildung 130:</b> Prozessanforderungen durch Antizipieren des Einsatzprozesses .....	281
<b>Abbildung 131:</b> Technisches Produkt als Operator im Einsatzprozess .....	282
<b>Abbildung 132:</b> Anforderungs-Block und Anforderungs-Diagramm.....	289
<b>Abbildung 133:</b> Anforderungshierarchie .....	290
<b>Abbildung 134:</b> Ableiten von Anforderungen .....	290
<b>Abbildung 135:</b> Verfeinern von Anforderungen.....	291

---

<b>Abbildung 136:</b> Erfüllen von Anforderungen.....	291
<b>Abbildung 137:</b> Zusammenhang zwischen Testfällen und Anforderungen....	291
<b>Abbildung 138:</b> Wiederverwenden von Anforderungen.....	292
<b>Abbildung 139:</b> Modellierung von funktions- und prozessrelevanten Lösungselementen .....	293
<b>Abbildung 140:</b> Anforderungen, Soll-Eigenschaften und Lösungselemente mit SysML .....	293
<b>Abbildung 141:</b> Typische Bauformen von Informationsständern.....	297
<b>Abbildung 142:</b> Produktfunktion des multifunktionalen Informationsständers .....	301
<b>Abbildung 143:</b> Ausschnittsweise Darstellung der Anforderungsstruktur .....	302
<b>Abbildung 144:</b> Multimedialer Informationsständer .....	303
<b>Abbildung 145:</b> Produktidee eines multifunktionalen Linearsystems .....	305
<b>Abbildung 146:</b> Variation von Struktureigenschaften des Linearsystems .....	309
<b>Abbildung 147:</b> Diskrete und nichtlineare Topologie- und Geometrieoptimierung.....	311
<b>Abbildung 148:</b> Realisiertes multifunktionales Linearsystem mit Antriebsfunktion.....	312
<b>Abbildung 149:</b> Methodik der MiP <sup>2</sup> .....	349

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Elementare Anforderungstypen .....	60
<b>Tabelle 2:</b> Templates für verschiedene Anforderungstypen .....	64
<b>Tabelle 3:</b> Exemplarische Anforderungsliste.....	66
<b>Tabelle 4:</b> Unabhängige Modellstruktur- und Modellelementmerkmale.....	81
<b>Tabelle 5:</b> Abhängige Modellstruktur- und Modellelementmerkmale.....	82
<b>Tabelle 6:</b> Gegenüberstellung der Anforderungsarten.....	205
<b>Tabelle 7:</b> Ursachen für die Versionierung von Anforderungen.....	244
<b>Tabelle 8:</b> Soll-Eigenschaften und Soll-Größen .....	253
<b>Tabelle 9:</b> Entwicklungsaktivitäten der MiP <sup>2</sup> im TOTE-Schema .....	260
<b>Tabelle 10:</b> Ausschnitt aus der Anforderungsliste des Mehrkammerprofils....	270
<b>Tabelle 11:</b> Beziehungen zwischen Anforderungen, Randbedingungen und Soll-Eigenschaften.....	272
<b>Tabelle 12:</b> Anforderungen/Soll-Eigenschaften des Informationsständers.....	298
<b>Tabelle 13:</b> Auszugweise Darstellung von Anforderungen und Soll-Eigenschaften.....	308
<b>Tabelle 14:</b> Glossar.....	350
<b>Tabelle 15:</b> Terminologische Definitionen des Anforderungsbegriffs.....	355
<b>Tabelle 16:</b> Qualitätsmerkmale für Anforderungen.....	368
<b>Tabelle 17:</b> Qualitätsmerkmale für Anforderungen im Kontext der MiP <sup>2</sup> .....	375



# Abkürzungsverzeichnis

A	Anforderung
A <sub>PLL</sub>	Anforderung aus den technischen Prozessen des Produktlebenslaufs
A <sub>PLZ</sub>	Anforderung aus den nicht-wertschöpfenden Prozessen des Produktlebenszyklus
A <sub>TP</sub>	Anforderung an das zu entwickelnde technische Produkt
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Customer
BF	Bereichsforderung
C&C <sup>2</sup> -A	Contact & Channel Approach (dt. Elementmodell Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen)
CA	Customer Attribute
CAX	Computer-Aided x
CMMI	Capability Maturity Model Integration
CPM	Characteristics Properties Modelling
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DfX	Design for X
DMM	Domain Mapping Matrix
DP	Design Parameter
DSM	Design Structure Matrix
EDO	Engineering Design Optimisation
FBS	Function Behaviour Structure
FF	Festforderung
FM	Funktionsmodell
FR	Functional Requirement
GPPE	Ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung
GV	Gestaltvariation
HiL	Hardware-in-the-Loop
HSL	High Strength Low Alloy (dt. hochfest, niedriglegiert)
I	Information
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IKIWISI	I Know It When I See It
INCOSE	International Council on Systems Engineering
iPeM	Integriertes Produktentstehungsmodell
LS	Leitstützstruktur
LZ	Lösungszustand
MDM	Multi-Domain-Mapping-Matrix
MiP <sup>2</sup>	Modellintegrierte Produkt- und Prozessentwicklung
MKM	Münchener Produktkonkretisierungsmodell

---

MVM	Münchener Vorgehensmodell
OMG	Object Management Group
PDD	Property Driven Development
PGE	Produktgenerationsentwicklung
PLL	Produktlebenslauf
PLZ	Produktlebenszyklus
PM	Prozessmodell
pmd	Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente
PMMM	Project Management Maturity Model
PV	Prinzipvariation (im Kontext der Produktgenerationsentwicklung)
PV	Process Variable (im Kontext des Axiomatic Designs)
R	Randbedingung
RE	Requirements Engineering
RM	Requirements Management
SFB	Sonderforschungsbereich
SiL	Software-in-the-Loop
SoS	Systems-of-Systems
SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
SRCS	Smart Requirement Configuration System
SUD	System Under Development (dt. zu entwickelndes System)
SysML	Systems Modeling Language
TF	Teilfunktion
TP	Technischer Prozess
TRL	Technology Readiness Level
TS	Teilsystem
UFG	ultrafine-grained (dt. ultrafeinkörnig)
UML	Unified Modeling Language
UUT	Unit Under Test (dt. zu testende Komponente)
ÜV	Übernahmevariation
VDD	Value Driven Development
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ViL	Vehicle-in-the-Loop
VP	Verfahrensprinzip
W	Wunsch
WFP	Wirkflächenpaar
WP	Wirkprinzip
XiL	X-in-the-Loop
Z	Zustand
ZF	Zielforderung

## Formelverzeichnis

$[...]_i$	Inkrementeller Index
$[...]_j$	Inkrementeller Index
$[...]_k$	Inkrementeller Index
$[...]_l$	Inkrementeller Index
$[...]_n$	Inkrementeller Index
$\alpha_{ij}$	Transformationskoeffizient
$\delta_{ij}$	KRONECKER-Delta
$[A]$	Design-Matrix
$[B]$	Design-Matrix
$\{DP\}$	Vektor der Design Parameters
$\{F\}$	Menge der Kanten
$\{FR\}$	Vektor der Functional Requirements
$\{P\}$	Menge der Plätze
$\{PV\}$	Vektor der Process Variables
$\{T\}$	Menge der Transitionen
<b>GS</b>	Menge von neu entwickelten Teilsystemen durch Gestaltvariation
<b>PS</b>	Menge von neu entwickelten Teilsystemen durch Prinzipvariation
<b>ÜS</b>	Menge von übernommenen Teilsystemen
$B$	Körper
$dv$	Volumenelement der Momentankonfiguration
$dV$	Volumenelement der Referenzkonfiguration
<b>F</b>	Deformationsgradient
$\mathcal{R}_R$	Referenzkonfiguration
$\mathcal{R}_t$	Momentankonfiguration
$x$	Materieller Punkt
$\hat{x}$	Bewegungsgleichung
$E$	Eigenschaft
$E$	E-Modul
$E_{el}$	Elektrische Energie
$E_{mech}$	Mechanische Energie
$F$	Kraft
$F(r, \varphi)$	AIRYSche Spannungsfunktion

---

$a$	Lochradius
$b$	Breite
$h$	Höhe
$l$	Länge
$p$	Platz
$\vec{p}$	Optimierungsvariable
$r$	Radius
$t$	Transition
$t$	Zeit
$v_{\text{Blech}}$	Vorschubgeschwindigkeit
$\vec{x}_{\text{soll}}$	Soll-Position
$y_{\text{ink}}$	Inkrementelle Stichtiefe
$\rho$	Dichte
$\sigma$	Spannungstensor
$\sigma$	Normalspannung
$\sigma_{\text{m}}$	Mittlere Normalspannung
$\sigma_{\text{r}}$	Radiale Spannungskomponente
$\sigma_{\varphi}$	Spannungskomponente am Umfang
$\tau$	Schubspannung
$\varphi$	Winkel
$\varphi$	Zielfunktion
$\varphi(\vec{p}^*)$	optimale Lösung