





**Ein modellbasierter Ansatz zur risikoorientierten  
Entwicklung innovativer Produkte**

**Dissertation**

zur  
Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur

der  
Fakultät für Maschinenbau  
der Ruhr-Universität Bochum

von

**Marc Neumann**  
aus Bochum

Bochum 2016

Dissertation eingereicht am: 31. August 2016  
Tag der mündlichen Prüfung: 27. September 2016

Erste Referentin: Prof. Dr.-Ing. Beate Bender  
Zweite Referentin: Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold

Produktentwicklung

**Marc Neumann**

**Ein modellbasierter Ansatz zur risikoorientierten  
Entwicklung innovativer Produkte**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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.: Bochum, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5064-6

ISSN 1866-1742

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

*Für meine Familie*



## VORWORT DES AUTORS

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung (LPE), ehemals Lehrstuhl für Maschinenelemente und Konstruktionslehre (LMK), der Ruhr-Universität Bochum. Dieser Satz, der in dieser oder ähnlicher Form in nahezu allen Dissertationen zu finden ist, mag für den Leser vielleicht nüchtern klingen. Für mich persönlich jedoch beinhaltet er zahlreiche Emotionen und Erinnerungen. Nicht nur, dass er zum Ausdruck bringt, dass das Projekt Doktorarbeit einen offensichtlich erfolgreichen Abschluss gefunden hat. Er markiert ebenso das Ende einer Lebensphase, die in vielerlei Hinsicht prägend für mich war. Das Vorwort zu dieser Arbeit möchte ich daher nutzen, mich bei den Menschen zu bedanken, ohne die mein Tun praktisch folgenlos geblieben wäre.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Beate Bender, Inhaberin des LPE seit Juli 2013 und geschäftsführende Direktorin des Instituts Product and Service Engineering, für die konstruktive Unterstützung und die unkomplizierte Betreuung meiner Arbeit. Meinen Dank aussprechen möchte ich ihr an dieser Stelle ebenso für das mir entgegengebrachte Vertrauen in meine Arbeit als Oberingenieur, die mir zugesprochenen Gestaltungsräume am Lehrstuhl sowie die stets angenehme und fruchtbringende Zusammenarbeit.

Frau Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold, Leiterin des Instituts für Technische Produktentwicklung (ITPE) der Universität der Bundeswehr in München, danke ich für das Interesse an meinem Forschungsthema, die wertvollen Anregungen und Denkipulse sowie die Übernahme des Ko-referats. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich herzlich Herrn Prof. Dr. phil. Joachim Zülch, Leiter des Lehrstuhls für Industrial Sales Engineering (ISE) der Ruhr-Universität Bochum.

Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Witzel, Leiter der Forschergruppe Biomechanik, für die zahlreichen Hinweise und Anregungen bei unseren Doktorandenseminaren sowie die motivierenden Worte gerade in der Endphase der Promotion.

Zu ganz speziellem Dank verpflichtet, bin ich unserem ehemaligen Lehrstuhlleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ewald G. Welp, der viel zu früh und unerwartet verstorben ist. Der durch ihn geprägten fachlichen Ausrichtung des Lehrstuhls, seinem besonderen Engagement für Studierende und nicht zuletzt seiner Überzeugungsarbeit ist es geschuldet, dass ich mich bei der Suche nach einer Promotionsstelle für den LMK/LPE entschieden habe.

Dass die Arbeiten am Lehrstuhl nach dem Tod von Herrn Prof. Dr.-Ing. Ewald G. Welp nahezu uneingeschränkt fortgeführt werden konnten, ist der Verdienst von Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Tim Sadek, der hervorragende Arbeit als kommissarischer Lehrstuhlleiter geleistet hat. Sein verantwortungsbewusstes Handeln uns Doktoranden gegenüber und sein stets versierter Rat haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Einem besonderen Menschen gebührt besonderer Dank. In diesem Sinne danke ich Herrn Dr.-Ing. Patrick Labenda in seiner Funktion als Mentor, Kollege, kommissarischer Lehrstuhlleiter, Diskussionspartner, Ratgeber, Lektor, doch allem voran als Freund, auf den in jeder Situation

und Lebenslage Verlass ist. So sehr ich bedauere, dass sich unsere beruflichen Wege inzwischen getrennt haben, freue ich mich umso mehr über die vielen gemeinsamen Reisen, die uns bereits in diverse Ecken der Welt geführt haben.

Die Zeit am Lehrstuhl wäre für mich nicht dieselbe gewesen, hätte ich nicht mit Menschen zusammengearbeitet, die stets für eine angenehme Arbeitsatmosphäre gesorgt haben und die mir inzwischen zu wahren Freunden geworden sind. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle unser altes Mechatronik-Team, zu dem neben Herrn Dr.-Ing. Patrick Labenda und meiner Person die Herren Dr.-Ing. Thomas Predki, Leif Heckes und Moritz Sporbeck gehört haben. Die tolle Zusammenarbeit hat sich tief in mein Bewusstsein eingebrannt und wird mir stets als positive Erfahrung aus den gemeinsamen Lehrstuhljahren in Erinnerung bleiben.

Namentlich nicht unerwähnt lassen möchte ich Herrn Michael Herzog, der mir als kompetenter Sparring-Partner bei manchem kniffligen Problem mit Scharfsinn, Kreativität und weitreichendem Fachwissen bereitwillig zur Seite gestanden hat. Ebenso danke ich Herrn Moritz Sporbeck für die unzähligen Diskussionen, die wir zum Thema meiner Arbeit geführt haben und die mir stets sehr geholfen haben. Es ist genau diese Art der Diskussionskultur und Hilfsbereitschaft, die ich an unserem Lehrstuhl zu schätzen weiß und die ich als einzigartig erachte. Herrn Dr. rer. nat. Rainer Gößling danke ich für die vielen philosophisch angehauchten Diskussionen über den höheren Sinn der Promotion und das Leben im Allgemeinen, die stets für erheiternde Abwechslung gesorgt haben. Für die Unterstützung in organisatorischen Angelegenheiten des Lehrstuhls danke ich herzlich Frau Hildegard Wenks und Frau Silvana Beier aus dem Sekretariat sowie Frau Hannah Fassbender für die Korrektur meiner Arbeit. Den Herren Gerd Kühlback und Olav Neuhaus aus der Werkstatt gilt mein Dank für ihren unermüdlichen Einsatz bei der Anfertigung unserer Robotersysteme, die mir als Praxisbeispiel für diese Arbeit gedient haben.

All den anderen Kollegen, die ich an dieser Stelle nicht alle namentlich erwähnen kann, möchte ich sagen, dass es mir eine Freude ist, die ersten Berufsjahre in einem so tollen Team erfahren zu dürfen, dass sich trotz all unserer mannigfaltigen Charaktere und fachlichen Neigungen oder aber gerade auf Grund dieser heterogenen Zusammensetzung so gut ergänzt.

Den größten Dank schulde ich meiner Familie, die mich auf dem Weg der Promotion begleitet hat und mir in jeder Phase der Promotion den nötigen Rückhalt gegeben hat. Meinen Eltern kann ich nicht genug für die fortwährende Unterstützung danken, die zunächst mein Studium und schließlich die Promotion überhaupt erst möglich gemacht haben. Meiner Frau Annika danke ich von ganzem Herzen für ihr Verständnis, die liebevolle Unterstützung und so manchen bedingungslosen Verzicht während der Anfertigung dieser Arbeit und dafür, dass es sie in meinem Leben gibt. Die größte Entbehrung aber musste wohl mein Sohn Ole auf sich nehmen, der in seinen jungen Lebensjahren manches Wochenende auf seinen Vater verzichten musste. Nur die Tatsache, dass wir uns charakterlich so sehr ähneln, gibt mir Gewissheit, dass er in einigen Jahren mein Handeln verstehen wird. Dafür danke ich ihm schon heute.

## KURZFASSUNG

Die Entwicklung innovativer Produkte ist in besonderer Weise durch Unsicherheiten charakterisiert, die als Ursache für Projektrisiken verstanden werden müssen. Diese sind zum einen auf den mit Neuartigkeit der Entwicklungsaufgabe inhärent verbundenen Wissensmangel zurückzuführen, zum anderen einem Definitionsdefizit geschuldet, das verstärkt mit Parallelisierung von Entwicklungstätigkeiten in verteilten Entwicklungsprozessen auftritt. Im Sinne der Systemtheorie bilden Innovationsprojekte somit komplexe, dynamische Systeme.

In dieser Arbeit wird ein methodischer Entwicklungsansatz vorgestellt, der die Problematik von Unsicherheiten in Innovationsprojekten aufgreift und damit einen Beitrag leistet, Risiken zu minimieren oder vielmehr proaktiv zu manipulieren. Der Autor distanziert sich hierbei bewusst vom Terminus Risikomanagement, das häufig losgelöst vom eigentlichen Entwicklungsvorgehen als reine Managementaufgabe verstanden wird. Stattdessen wird mit der *risikoorientierten Entwicklung innovativer Produkte* ein ganzheitlich ausgerichteter Ansatz gefordert, der Risiko als explizite Entscheidungsgröße im Entwicklungsprozess vorsieht und damit eine eigene Entwicklungsphilosophie begründet.

Ausgehend von einer grundlegenden Betrachtung zur Entwicklung innovativer Produkte, einer systemtheoretischen Einordnung von Innovationsprojekten sowie einer tiefergehenden Auseinandersetzung mit Unsicherheiten und Risiken im Kontext der Produktentwicklung werden Anknüpfungspunkte zum Systems Engineering aufgezeigt. Auf Grundlage der so gewonnenen Erkenntnisse wird im Anschluss eine Analyse des Stands der Forschung vorgenommen, die maßgeblich ein Forschungsdefizit in der Absenz geeigneter Modellierungsansätze aufzeigt, mit Hilfe derer komplexe Risikosituationen detailliert erfasst und ganzheitlich in allen drei Zieldimensionen bewertet werden können.

Ein entsprechender Modellierungsansatz wird in der vorliegenden Arbeit mit dem Ziel entwickelt, den Entscheidungsprozess bei Unsicherheit zu objektivieren. Zu diesem Zweck integriert der Ansatz kohärente Partialmodelle der Produktentwicklung mit Modellen aus dem Bereich des Risikomanagements und verknüpft diese innerhalb einer Multiple-Domain Matrix. Auf Basis der in den Partialmodellen der Produktentwicklung enthaltenen Strukturinformationen über Ziel-, Sach- und Handlungssystem lassen sich mit Hilfe des Ansatzes beliebig detaillierte Ereignisbäume verschiedener Handlungsalternativen abbilden und quantitativ gegeneinander vergleichen. Eine Entscheidung über das weitere Vorgehen wird schließlich auf Basis einer kumulierten Risikokennzahl getroffen.

Unterstützt wird das Vorgehen durch einen *modifizierten Risikomanagementprozess*, der als wiederkehrende Mikro-Logik den Entscheidungsprozess steuert sowie den *risikoorientierten Entwicklungsprozess*, der als übergeordnete Makro-Logik den Rahmenprozess der Entwicklung definiert.

Veranschaulicht wird die Anwendung des Ansatzes anhand eines Praxisbeispiels.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVATION UND ZIELSETZUNG .....	1
1.2	AUFBAU DER ARBEIT.....	6
<b>2</b>	<b>BEGRIFFSKLÄRUNG UND GRUNDLAGEN.....</b>	<b>7</b>
2.1	INNOVATION ALS ERGEBNIS SYSTEMATISCHEN INNOVIERENS .....	7
2.1.1	<i>Innovation</i> .....	7
2.1.2	<i>Neuproduktentwicklung im Kontext von Innovationsprozess und Innovationsmanagement</i> .....	10
2.2	KOMPLEXITÄT VON INNOVATIONSPROJEKTEN .....	16
2.2.1	<i>Systemdenken im Kontext der Produktentwicklung</i> .....	16
2.2.2	<i>Entwicklung innovativer Produkte im Verständnis eines komplexen Systems</i> .....	20
2.3	UNSIKERHEIT UND RISIKO IM KONTEXT VON INNOVATION .....	27
2.3.1	<i>Unsicherheit</i> .....	28
2.3.2	<i>Risiko</i> .....	32
2.4	SYSTEMS ENGINEERING, RISIKOMANAGEMENT UND RISIKOORIENTIERTE ENTWICKLUNG INNOVATIVER PRODUKTE .....	36
2.4.1	<i>Systems Engineering</i> .....	36
2.4.2	<i>Risikomanagement und risikoorientierte Produktentwicklung</i> .....	40
2.5	KONKRETISIERUNG DER PROBLEMSTELLUNG ANHAND EINES PRAXISBEISPIELS .....	43
2.5.1	<i>Analyse eines Praxisbeispiels aus der mobilen Robotik</i> .....	43
2.5.2	<i>Analyse ausgewählter Risikoszenarien innerhalb des Praxisbeispiels</i> .....	49
2.5.3	<i>Fazit zum Praxisbeispiel und Konkretisierung des Handlungsbedarfs</i> .....	54
<b>3</b>	<b>STAND DER FORSCHUNG.....</b>	<b>57</b>
3.1	ALLGEMEINE ENTWICKLUNGSMETHODIKEN UND VORGEHENSMODELLE DER PRODUKTENTWICKLUNG .....	57
3.1.1	<i>VDI-Richtlinie 2221</i> .....	57
3.1.2	<i>VDI-Richtlinie 2206</i> .....	58
3.1.3	<i>Münchener Vorgehensmodell (MVM) nach LINDEMANN</i> .....	60
3.1.4	<i>3-Zyklen-Modell der Produktentstehung nach GAUSEMEIER</i> .....	61
3.1.5	<i>Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) nach ALBERS</i> .....	62
3.1.6	<i>3-Ebenen-Vorgehensmodell nach BENDER</i> .....	63
3.1.7	<i>Spiralmodell</i> .....	64
3.1.8	<i>Adaptive Produktentwicklung nach LÉVÁRDY</i> .....	65
3.1.9	<i>Experimentelle Produktentwicklung nach THOMKE</i> .....	66
3.1.10	<i>Rapid Prototyping in der Produktentwicklung nach MACHT</i> .....	67
3.1.11	<i>Entwicklung radikaler Innovationen unter Unsicherheit nach LORENZ</i> .....	68
3.1.12	<i>Fazit zum Themenkomplex „allgemeine Entwicklungsmethodiken“</i> .....	69
3.2	SPEZIELLE RISIKOMANAGEMENTANSÄTZE DER PRODUKTENTWICKLUNG.....	70
3.2.1	<i>Standardwerk zum proaktiven Risikomanagement nach SMITH und MERRITT</i> .....	70
3.2.2	<i>Risikomanagement für komplexe Projekte nach LÜHRIG</i> .....	72
3.2.3	<i>Risikomanagement in der Entwicklung komplexer Serienprodukte nach WISSLER</i> .....	73
3.2.4	<i>Risikomanagement nach MENSCH</i> .....	74
3.2.5	<i>Prozessorientiertes Risikomanagement zur Handhabung von Produktrisiken nach DAHMEN</i> ..	75
3.2.6	<i>Anwendungsorientiertes Risikomanagement nach GRUNDMANN</i> .....	76
3.2.7	<i>UMEA nach ENGELHARDT</i> .....	77
3.2.8	<i>Projektrobustheit nach GERICKE</i> .....	78
3.2.9	<i>Fazit zum Themenkomplex “Risikomanagement in der Produktentwicklung”</i> .....	78

3.3	MODELLE UND METHODEN ZUR UNTERSTÜTZUNG DES RISIKOMANAGEMENTS .....	79
3.3.1	<i>FMEA/IFMEA – Failure Mode and Effects Analysis/Integration Failure Mode and Effects Analysis</i> .....	80
3.3.2	<i>FTA und ETA – Fault-Tree-Analysis und Event-Tree-Analysis</i> .....	81
3.3.3	<i>DRBFM – Design Review based on Failure Modes</i> .....	82
3.3.4	<i>FFDM – Function Failure Design Method, RED – Risk in Early Design und FFIP – Functional Failure Identification and Propagation</i> .....	83
3.3.5	<i>CPM - Change Prediction Method</i> .....	84
3.3.6	<i>Änderungsanalyse auf Basis des Multilayer Network Models nach PASQUAL und DE WECK</i> .....	85
3.3.7	<i>CIRA – Change Impact and Risk Analysis</i> .....	86
3.3.8	<i>ISF/CSMA – Information Structure Framework/Change Management Support Approach nach AHMAD et al.</i> .....	87
3.3.9	<i>PERT/GERT – Program Evaluation and Review Technique/Graphical Evaluation and Review Technique</i> .....	88
3.3.10	<i>Risikomodellierung in verteilten Entwicklungsprozessen nach CARRASCOSA et al.</i> .....	90
3.3.11	<i>Risikoanalyse nach BROWNING und EPPINGER</i> .....	90
3.3.12	<i>Änderungsmanagement nach GÄRTNER</i> .....	91
3.3.13	<i>Fazit zum Themenkomplex „Modelle und Methoden des Risikomanagements“</i> .....	92
3.4	ABLEITUNG RELEVANTER FORSCHUNGSFRAGEN .....	94
<b>4</b>	<b>ENTWURF EINER MODELLBASIERTEN METHODIK FÜR DIE RISIKOORIENTIERTE ENTWICKLUNG INNO-VATIVER PRODUKTE</b> .....	<b>97</b>
4.1	ENTWICKLUNGSPHILOSOPHIE UND RAHMENWERK DER METHODIK .....	97
4.2	MODELLIERUNGSANSATZ FÜR DIE RISIKOORIENTIERTE ENTWICKLUNG INNOVATIVER PRODUKTE .....	100
4.2.1	<i>Modellaufbau und Repräsentationskonzept</i> .....	100
4.2.2	<i>Formalisierung des Modellierungsprinzips</i> .....	102
4.2.3	<i>Vorläufiges Resümee zum Modellierungsansatz</i> .....	114
4.2.4	<i>Konkretisierung des Modellbereichs Produktentwicklung</i> .....	115
4.2.5	<i>Konkretisierung des Modellbereichs Risikomanagement</i> .....	125
4.2.6	<i>Integration der Modellbereiche</i> .....	132
4.2.7	<i>Modellversionierung und Modellvariation</i> .....	133
4.3	MODIFIZIERTER RISIKOMANAGEMENTPROZESS – MIKROLOGIK DES VORGEHENS .....	134
4.3.1	<i>Schritt 1: Identifikation von Unsicherheiten</i> .....	136
4.3.2	<i>Schritt 2: Synthese von Handlungsoptionen</i> .....	139
4.3.3	<i>Schritt 3: Systematische Erfassung der indirekten Auswirkungen der Maßnahme</i> .....	141
4.3.4	<i>Schritt 4: Berechnung der Qualitäts-, Kosten- und Zeitriskoanteile</i> .....	143
4.3.5	<i>Schritt 5: Risikoorientierte Auswahl einer geeigneten Handlungsoption</i> .....	148
4.3.6	<i>Zusammenfassende Darstellung der Modellierungslogik</i> .....	149
4.4	RISIKOORIENTIERTER ENTWICKLUNGSPROZESS – MAKROLOGIK .....	149
<b>5</b>	<b>RESÜMEE UND AUSBLICK</b> .....	<b>153</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>159</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>173</b>
	<b>ANHANG: FRAGENKATALOG ZUR IDENTIFIKATION VON UNSICHERHEITEN</b> .....	<b>175</b>
	<b>VORVERÖFFENTLICHTE INHALTE MIT BEZUG ZUM FORSCHUNGSTHEMA</b> .....	<b>179</b>
	<b>VORVERÖFFENTLICHTE INHALTE MIT BEZUG ZUM PRAXISBEISPIEL</b> .....	<b>179</b>
	<b>LEBENS LAUF</b> .....	<b>181</b>