

Konfigurationsgestützte Modularisierung von variantenreichen Investitionsgütern

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Felix Johannes van der Beek

Berichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Günther Schuh
Tag der mündlichen Prüfung:	10. Februar 2017

Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik

Band 23

Felix Johannes van der Beek

**Konfigurationsgestützte Modularisierung
von variantenreichen Investitionsgütern**

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2017)

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 978-3-8440-5198-8

ISSN 1438-4930

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus an der RWTH Aachen (ikt).

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen für die Möglichkeit am ikt promovieren zu können und die vielen intensiven Diskussionen. Für die erfahrene Förderung im Rahmen der gemeinsamen Zeit bin ich außerordentlich dankbar. Außerdem danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Günther Schuh für die Übernahme des Koreferates und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs, als neuen Institutsleiter, für das geschenkte Vertrauen im zurückliegenden Jahr.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ikt möchte ich für die konstruktive Arbeitsatmosphäre und die vielfache Unterstützung zur Projektrealisierung danken. Insbesondere bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Kevin Schmitz für unsere langjährige Freundschaft und die erfolgreiche gemeinsame Zeit am ikt. Dank gilt ebenso den studentischen Hilfskräften, die mich in Projekten unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt meiner gesamten Familie. Meinen Eltern Dorothee und August sowie meinem Bruder Matthias, die mich immer uneingeschränkt unterstützen.

Meiner Freundin Sophie danke ich von ganzem Herzen. Sie hat mich bei der Anfertigung dieser Arbeit immer unterstützt und motiviert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	2
2	Grundlagen und Definitionen	3
2.1	Produktplanung	3
2.2	Produktentwicklung	4
2.3	Kostenfestlegung in der frühen Entstehungsphase	7
2.3.1	Simultaneous Engineering	8
2.3.2	Produktarchitektur	11
2.3.3	Modularisierung einer Produktarchitektur	12
2.3.4	Plattformkonzept	15
2.3.5	Modul	16
2.4	Entwicklung von Systemen gegenüber Einzelprodukten	19
2.4.1	Computer – ein modulares Produktkonzept	19
2.4.2	Komplexität in der Systementwicklung	20
2.4.3	Standards zur Komplexitätsbeherrschung	21
2.5	Vorteile der Standardisierung	26
2.6	Stammdaten im Unternehmen	27
3	Stand der Forschung und Technik	29
3.1	Design Structure Matrix zur Produktstrukturierung	30
3.2	Domain Mapping Matrix	30
3.3	Multiple-Domain Matrix	31
3.4	DSM-Einsatz nach Browning	32
3.5	Modular-Function-Deployment nach Erixon	34
3.6	VMEA – Variant Mode and Effects Analysis nach Cesear	36
3.7	Software zur Produktmodularisierung	37
3.7.1	MOFLEPS	37
3.7.2	Complexity Manager	38
3.7.3	METUS	39
3.8	Gegenüberstellung und Bewertung der Methoden	41
3.9	Data Mining Methoden in der Produktentwicklung	41

3.10	Kennzahlen zur Bewertung einer modularen Produktstruktur	43
3.10.1	Kennwerte zur Baukastengüte – Standardisierungsgrad	44
3.10.2	Kennwert zur Baukastengröße – Komponentenanzahl	45
3.10.3	Kennwert zur Standardisierung – Teilewiederverwendung	45
3.11	Überwachung der Zielgrößenentwicklung – Data-Warehouse	45
4	Herausforderungen bei der Produktmodularisierung	47
4.1	Modulare Organisationsformen	47
4.2	Konfiguration des zukünftigen Produktprogramms	48
4.3	Konfigurationsmanagement	50
4.4	Argumente für die Produktmodularisierung	51
4.5	Wissensdefizite und mangelhafte Zieltransparenz	52
5	Anforderungen an eine Modularisierungsmethodik	55
5.1	Zielgruppe	56
5.2	Datengrundlage - Projektbasis	57
5.3	Ergebnis der Methode	57
6	Methodik zur konfigurationsgestützten Produktmodularisierung	61
6.1	Marktorientierte Konfigurationsplanung	65
6.2	Kombinatorische Konfigurationsanalyse	73
6.3	Technische Risikoanalyse	75
6.4	Festlegung der Produktarchitektur	77
6.4.1	Entwicklung der Funktions- und Produktstruktur	77
6.4.2	Moduldefinition	81
6.5	Modulvalidierung	82
6.5.1	Plattformdefinition und -optimierung	86
6.5.2	Schnittstellendefinition	89
6.6	Standards in einem modularen Produkt	90
6.6.1	Komponentenstandards	90
6.6.2	Standardisierte Gestaltungskonzepte	94
6.6.3	Standarddefinition	94
6.6.4	Organisatorische und informative Standards	96
6.7	Modulentwicklung und -konstruktion	99
7	Validierung der Methodik	103
7.1	Modularisierung eines Serviceterminals	103
7.2	Komponentenstandardisierung nach Ausführungsparametern	108
8	Kritische Betrachtung der Arbeit	113

9	Zusammenfassung und Ausblick	115
9.1	Zusammenfassung	115
9.2	Ausblick	116
10	Literaturverzeichnis	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Produktentstehungsprozess (Feldhusen 2013)	3
Abbildung 2: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (VDI 2221)	5
Abbildung 3: Bestandteile einer Prinziplösung (in Anlehnung an Feldhusen 2013)	6
Abbildung 4: Kostenverantwortung nach Unternehmensbereichen (Ehrlenspiel 2013).....	7
Abbildung 5: Entwicklungsmethoden (in Anlehnung an Komorek 1998).....	9
Abbildung 6: Parallelisierung der Konstruktionsaufgaben (Feldhusen 2015).....	10
Abbildung 7: Produktarchitektur nach Göpfert (1998).....	12
Abbildung 8: Modularität in Produktarchitekturen (Göpfert 1998)	13
Abbildung 9: Kombinierte Plattform und Modulnutzung (in Anlehnung an Hüttenrauch 2008)	14
Abbildung 10: Produktbaukasten-Ebenen (in Anlehnung an Koller 1998 und Feldhusen 2013) ...	15
Abbildung 11: Produktstrukturen im Vergleich (in Anlehnung an Volkswagen 2016)	16
Abbildung 12: Großserienmodul Lichtschalter in drei Varianten	17
Abbildung 13: Module und deren Varianten	18
Abbildung 14: Modularer Aufbau eines Personal-Computer (Plyojump 2015)	19
Abbildung 15: Beschreibungsgrößen der Komplexität (Patzak 1982).....	20
Abbildung 16: Stufen der Komplexität (Ulrich 1991)	21
Abbildung 17: Anforderungskontext eines Produktes (in Anlehnung an Kopenhagen 2014)	22
Abbildung 18: Kalkulation von Produktvarianten und wirtschaftliche Folgen (Jeschke 1997)	24
Abbildung 19: Standardisierungsgrad gegenüber dem Zusatzaufwand eines Auftrages	25
Abbildung 20: Design Structure Matrix (links) und Abhängigkeitsvisualisierung (rechts)	30
Abbildung 21: Domain Mapping Matrix – Verknüpfung von Matrizen	31
Abbildung 22: Multi-Domain Matrix	32
Abbildung 23: DSM – Typen und Anwendungen nach Browning (1999)	32
Abbildung 24: Architektur DSM (Pimmler 1994)	33
Abbildung 25: Architektur DSM nach Gruppierung (Pimmler 1994).....	34
Abbildung 26: Module Indication Matrix (MIM) eines Staubsaugers (Erixon 1999)	35
Abbildung 27: VMEA Ablaufdiagramm (in Anlehnung an Cesear 1991)	36
Abbildung 28: Matrix Darstellung (links) und Grafendarstellung (rechts) (Lindemann 2006).....	37
Abbildung 29: Merkmalbaum (Schuh 2013)	38

Abbildung 30: Reduktion der Variantenvielfalt anhand des Variantenbaumes (Schuh 1988).....	39
Abbildung 31: Die METUS-Raute (ID-Consult 2015).....	40
Abbildung 32: Methodenübersicht und Bewertung	41
Abbildung 33: Kontinuum von Daten und Informationen zu Wissen (Probst 2012).....	42
Abbildung 34: Data Mining Prozess (Runkler 2010).....	43
Abbildung 35: Organisationsformen in der F&E (in Anlehnung an Müller 2001)	47
Abbildung 36: Kosteneffekte der Produktkonfiguration (in Anlehnung an Hüllenkremer 2003)	48
Abbildung 37: Typische Probleme heutiger Produkte (Feldhusen 2013).....	49
Abbildung 38: Audi Online-Konfigurator (Audi 2015).....	50
Abbildung 39: Teilziele der Modularisierung nach Unternehmensbereichen (Junge 2005).....	53
Abbildung 40: Reduktion der Lösungsvielfalt durch marktorientierte Lösungsoptimierung	62
Abbildung 41: Hypothese - Reduktion der Vielfalt durch marktorientierte Lösungsoptimierung	64
Abbildung 42: Produktportfolio: Merkmale und Ausprägungen	65
Abbildung 43: Implizites Wissen in Auftragsstücklisten	67
Abbildung 44: Verknüpfung der Merkmalsausprägungen mit Materialnummern.....	68
Abbildung 45: Darstellung der Stückzahlverteilung auf einzelne Varianten	69
Abbildung 46: Darstellung der Varianz durch Farbgestaltung.....	70
Abbildung 47: Mögliche Visualisierung der Stückzahlenentwicklung eines Produktmerkmals	71
Abbildung 48: Abschätzung zukünftiger Relevanz einzelner Merkmalsausprägungen	72
Abbildung 49: Ausprägungskonfiguration von Altaufträgen	73
Abbildung 50: Realisierte Produktkonfigurationen und deren Absatzanteil.....	74
Abbildung 51: Risikomanagement in der Modularisierung (in Anlehnung an Müller 2001)	76
Abbildung 52: Architektur für hochvariante Produkte (in Anlehnung an Feldhusen 2015)	78
Abbildung 53: Rationalisierung einer Produktarchitektur	79
Abbildung 54: Produktarchitektur mit erster Strukturierungsebene.....	80
Abbildung 55: Modulkonfiguration mit Häufigkeiten der Merkmalsausprägungen	82
Abbildung 56: SOM – Clusterübersicht	83
Abbildung 57: SOM – Merkmalskarten (Component Planes) und Clusterübersicht (rechts)	84
Abbildung 58: SOM – Clustersegmente und -häufigkeit	85
Abbildung 59: Modulkonfigurationen mit Pfadrelevanz.....	86
Abbildung 60: Modulportfolio mit Entwicklungsprioritäten.....	88
Abbildung 61: Baukastensysteme (Schema) (in Anlehnung an Koller 1998).....	89

Abbildung 62: Komponentenvarianz mit Häufigkeitsverteilung	91
Abbildung 63: Variantenreduktion durch Standardisierung der Nenndurchmesser und -längen ...	93
Abbildung 64: Varianz eines Standards und Verwendungsmenge innerhalb eines Produktes	93
Abbildung 65: Konstruktionswissen in Katalogen organisieren.....	96
Abbildung 66: Merkmale eines Displaymoduls	99
Abbildung 67: konfigurationsgestützte Konstruktion variantenreicher Produkte.....	100
Abbildung 68: Variantengerechte Konstruktion eines Displaymoduls in drei Ausführungen.....	101
Abbildung 69: Entwurf Modulbaukasten durch Merkmalszuordnung	104
Abbildung 70: Modulvarianten bei 100 % Abdeckungsgrad.....	105
Abbildung 71: Konfigurationen von Modul 1 mit Nachfragehäufigkeit.....	106
Abbildung 72: Konfigurationen durch Modulkombination gegenüber der Variantenanzahl	107
Abbildung 73: Datenbankexport zur Komponentenstandardisierung von Schweißbolzen	108
Abbildung 74: wesentliche Gestaltparameter eines Schweißbolzen	109
Abbildung 75: Gesamtverwendungsmenge pro Komponente.....	109
Abbildung 76: Verwendungsnachweis in Aufträgen (insgesamt 583)	110
Abbildung 77: Ausgangssituation: Schweißbolzenverwendung innerhalb einer Produktfamilie ..	111
Abbildung 78: Rationalisiertes Spektrum an Schweißbolzen durch Substitution.....	111
Abbildung 79: Ergebnis der Komponentenstandardisierung.....	112