

Justus Siebrecht

Modellbasierte Konfiguration
zur Validierung
kundenindividueller
und funktional
integraler Produkte im
Angebotsprozess

**"Modellbasierte Konfiguration zur Validierung
kundenindividueller und funktional integraler Produkte im
Angebotsprozess"**

*"Model-Based Configuration for the Validation of Customised and
Functionally Integral Products in the Quotation Process"*

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

vorgelegt von
Justus Siebrecht

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves
Tag der mündlichen Prüfung: 31. Mai 2022

Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik

Band 33

Justus Siebrecht

**Modellbasierte Konfiguration zur Validierung
kundenindividueller und funktional integraler
Produkte im Angebotsprozess**

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

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 978-3-8440-8764-2

ISSN 1438-4930

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus (ikt), das gemeinsam mit dem Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung (IME) in das Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung (iMSE) an der RWTH Aachen zusammengeführt wurde.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing Jörg Feldhusen, damaliger Leiter des Instituts für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus und ehemaliger Dekan der Fakultät für Maschinenwesen, bin ich zu großem Dank verpflichtet. Ich bedanke mich für seine Vorlesungen, die den Grundstein für diese Arbeit und meine berufliche Karriere gelegt haben. Ebenfalls bedanke ich mich für das von ihm entgegengebrachte Vertrauen, seine fachliche Betreuung, angeregte Diskussionen, kritische Fragen und schlussendlich für die Möglichkeit zur Promotion.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves danke ich für die Übernahme des Korreferats. Ein weiterer Dank gilt Herrn. Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus möchte ich allen ehemaligen und aktiven Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts danken. Die gemeinsamen Herausforderungen und Erfahrungen aus unterschiedlichen Forschungsprojekten und der Lehre möchte ich keinesfalls missen. Das kollegiale Arbeitsklima, die konstruktiven Diskussionen und die gemeinsame Zeit auch außerhalb des Instituts bleiben mir in lebhafter Erinnerung. Ebenfalls gilt mein Dank allen Industrie- und Projektpartnern für die interessanten Einblicke und den Austausch.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs möchte ich für die Führung des iMSE und das Vertrauen danken. Auch während Zeiten der Veränderung traf mein Forschungsthema bei ihm auf offene Ohren und konnte sich stets weiterentwickeln.

Schlussendlich gilt mein Dank meinen Eltern, meiner Freundin, Freunden und Studienkollegen. Meinen Eltern für ihre uneingeschränkte Unterstützung und die Freiräume im Studium. Meiner Freundin für ihre unendliche Geduld und den manchmal notwendigen Ansporn in schwierigen Phasen. Meinen Freunden und Studienkollegen für die Stunden der Abwechslung.

Zusammenfassung / Summary

In der vorliegenden Arbeit wird eine Vorgehensweise zur modellbasierten Formalisierung von Entwicklungswissen für die Konfiguration von Produktstrukturen im Angebotsprozess vorgestellt. Hergeleitet wird die Notwendigkeit dieser Vorgehensweise aus der Analyse vorhandener Variantenmanagementansätze und den Eigenschaften funktional integraler, kundenindividueller Produkte. Der zugrundeliegende Lösungsansatz basiert auf der konsequenten Anwendung der Systemtheorie und der modellbasierten Systementwicklung. Dies ist durch die Dekomposition der Bauteilebene der Produktstruktur realisiert, wodurch abstrakte Produktbestandteile entstehen, die das Entwicklungswissen des Unternehmens darstellen. Die entwickelte Struktur ähnelt Referenzproduktstrukturen und ermöglicht die Wiederverwendung des Wissens trotz Kundenindividualität auf der Bauteilebene. Ebenfalls ermöglicht diese Subsystembildung die Verwendung von bekannten Konfigurationsmethoden. Durch den Ansatz der modellbasierten Systementwicklung (MBSE) wird Entwicklungswissen unterschiedlicher Fachabteilungen integriert, sodass eine frühzeitige technische und wirtschaftliche Validierung im Angebotsprozess erfolgen kann. Anhand eines Anwendungsbeispiels wird die modellbasierte Wissensbasis aufgebaut und exemplarisch für eine kundenindividuelle Produktkonfiguration angewendet.

This thesis presents a procedure for the model-based formalisation of development knowledge for the configuration of product structures in the quotation process. The necessity of this approach is derived from the analysis of existing variant management approaches and the characteristics of functionally integral, customised products. The underlying solution is based on the consistent application of the system theory and model-based systems engineering. This is realised in the decomposition of the component level of product structures, resulting in abstract product components that represent the company's development knowledge. The developed structure resembles reference product structures and enables the reuse of knowledge despite customer individuality at the component level. Likewise, this level enables the use of known configuration methods. The approach of model-based systems engineering (MBSE) integrates development knowledge from different departments so that a technical and economic validation can take place at an early stage in the quotation process. The model-based knowledge base is built up on the basis of an application example and applied exemplarily for a customer-specific product configuration.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen und Definitionen	5
2.1	Technische Systeme	6
2.1.1	Dekomposition, Eigenschaften und Emergenz	8
2.1.2	Unklarheiten in der Gestaltung Technischer Systeme	10
2.2	Produktentstehung	13
2.2.1	Entwicklungs- und Konstruktionsprozess	13
2.2.2	Anforderungsermittlung und -management	17
2.2.3	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	21
2.2.4	Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	22
2.2.5	Gliedern in realisierbare Module	23
2.2.6	Produktdokumentation	25
2.2.7	Wissenmanagement	27
2.3	Ursachen und Auswirkungen der Variantenvielfalt	28
2.3.1	Ursachen für Variantenvielfalt	28
2.3.2	Auswirkung der Variantenvielfalt	29
2.3.3	Kosteneffekte durch Variantenvielfalt	29
3	Problemstellung	35
4	Stand der Forschung und Technik	37
4.1	Rationalisierung	37
4.1.1	Entwicklungsmethoden und -grundsätze	38
4.1.2	Methode des integrierten Wissensmanagements zur Rationalisierung	41
4.1.3	Pattern-basierte Entwicklungsmethodik	42
4.2	Variantenmanagement	43
4.2.1	Ausrichtungen im Variantenmanagement	43
4.2.2	Differenzierung anhand des Kundeneinflusses im PEP	45
4.3	Lösungsansätze und Methoden im Variantenmanagement	50
4.3.1	Quality Function Deployment	52
4.3.2	Variant Mode and Effect Analysis	53
4.3.3	Modularisierung	53
4.3.4	Referenzproduktstruktur und Referenzvariante	55
4.3.5	Konfigurations- und Verträglichkeitsmatrizen	58
4.4	MBSE	59

4.4.1	Unterschiede der dokumenten- und modellbasierten Entwicklung	60
4.4.2	Anwendung von MBSE	61
4.4.3	SysML	62
4.5	Modellierungsmethoden im MBSE	65
4.6	Kritische Betrachtung des Stands der Forschung und Technik	72
5	Handlungsbedarf und Zielsetzung	75
5.1	Handlungsbedarf	75
5.2	Zielsetzung	76
6	Modellbasierte Konfiguration kundenindividueller, funktional integraler Produktstrukturen	79
6.1	Entwicklung der Grundstruktur zur Modellierung des Wissensmodells	82
6.1.1	Strukturelle Dekomposition der Bauteilebene	83
6.1.2	Integration der Funktionsstruktur in die Dekomposition	84
6.1.3	Konkretisierung und Varianten	85
6.1.4	Kontextabhängige Anwendung und Konkretisierung	86
6.1.5	Kontextabhängige Verwendung von Varianten	87
6.2	Formalisierung und Konsolidierung der gesammelten Wissensbestandteile	88
6.3	Ergänzung von Rationalisierungsansätzen	94
6.3.1	Integration von Konfigurations- und Verträglichkeitswissen	94
6.3.2	Integration wiederkehrender Anforderungen	96
6.4	Erweiterung um Entwicklungsaufwand und -kosten	97
7	Exemplarische Implementierung der modellbasierten Wissensbasis und Anwendungsfall	101
7.1	Modellierungsumgebung und Wissensbasis für ein Beispielprodukt	101
7.2	Anwendung der Wissensbasis zur Entwicklung einer kundenspezifischen Struktur	103
7.3	Simulation der kundenspezifischen Struktur	111
7.4	Umsetzung in vorhandenen IT-Systemen	114
8	Fazit und Ausblick	117
8.1	Fazit	117
8.2	Ausblick	118
9	Literaturverzeichnis	119
A	Ergänzungen zu den Kosteneffekten	129
B	Modellierte Wissensbasis	131
B.1	Modellierte Komponenten	131
B.1.1	Allgemeine Beschreibung eines technischen Bauteils	131
B.1.2	Bolzen	132
B.1.3	Buchse	138
B.1.4	Lasche	141
B.2	Halbzeuge und Werkstoffe	145

B.3	Konstruktionselemente	147
B.4	Fertigungsschritte und Maschinen	151
B.5	Baugruppen	157
B.5.1	Kettenglieder	157
B.5.2	Kettenelement	159
B.6	Produktkosten	162
B.7	Ergänzungen zur Wissensbasis um den Spezialfall <i>Anwendung A</i>	164
C	Ergänzungen zur Validierung der kundenindividuellen Struktur	167