

Johannes Kößler

Modellbasierte Daten- und
Informationsflussunterstützung –
Ein Beitrag zur Integration von
MBSE in bestehende
Entwicklungsprozesse

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
Institut für Technische Produktentwicklung

Modellbasierte Daten- und Informationsflussunterstützung - Ein Beitrag zur Integration von MBSE in bestehende Entwicklungsprozesse

Johannes Köbler M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Gutachter der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler
Universität Paderborn

Die Dissertation wurde am 28.09.2020 bei der Universität der Bundeswehr München
eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 08.04.2021
angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 23.04.2021 statt.

Produktentwicklung

Johannes Kößler

**Modellbasierte Daten- und
Informationsflussunterstützung –
Ein Beitrag zur Integration von MBSE
in bestehende Entwicklungsprozesse**

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: München, Univ. der Bundeswehr, Neubiberg, Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8068-1

ISSN 1866-1742

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 Mitarbeiter am Institut für Technische Produktentwicklung der Universität der Bundeswehr in München. Das Gelingen dieser Arbeit wurde erst durch die Unterstützung zahlreicher Personen ermöglicht, bei denen ich mich an dieser Stelle sehr herzlich bedanken möchte.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold, Leiterin des Instituts für Technische Produktentwicklung der Universität der Bundeswehr in München, die mich durch ihre stets hervorragende und engagierte Betreuung sowie mit vielen Diskussionen und Denkanstößen unterstützte. Diese Begleitung meiner wissenschaftlichen Arbeit hat maßgeblich zu deren erfolgreichem Abschluss beigetragen.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler, Leiterin des Lehrstuhls für Produktentstehung am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn, für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Daneben gilt mein Dank den Mitarbeitern des Instituts für Technische Produktentwicklung. Ihre Unterstützung und die sehr gute Zusammenarbeit waren eine wesentliche Säule meiner Arbeit. Besonders bedanken möchte ich mich hier bei Herrn Dr.-Ing. Jochen Reitmeier, Herrn Dr.-Ing. Thierry Sop Njindam, Herrn Dr.-Ing. Jakob Weber und Herrn Dipl.-Ing. Julian Schönwald.

Sehr große Dankbarkeit empfinde ich gegenüber meiner Familie und meinen Freunden für den Zuspruch zu Beginn meiner Arbeit und auch für das Verständnis während der gesamten Promotionszeit. Dies gilt insbesondere für Herrn Dr.-Ing. Georg F. Gruber und Herrn Dr. Stefan Wunderlich.

Mein wichtigster Dank gilt meiner Frau Sabine Kößler, die mir während der gesamten Promotionszeit zur Seite stand und diese Arbeit erst ermöglichte, sowie meinen Eltern Susanne und Gerhard Kößler, die mir zu jedem Zeitpunkt uneingeschränkte Unterstützung entgegenbrachten. Ihnen und meinen Kindern Sophie und Jakob ist diese Arbeit gewidmet.

Rosenheim, im Mai 2021

Johannes Kößler

Kurzfassung

Die Entwicklung technischer Produkte steht vor der Herausforderung, die Interessen einer steigenden Anzahl von Stakeholdern zu berücksichtigen. Zusätzlich entwickeln sich die Produkte von klassischen realen, oft mechatronischen Systemen, hin zu cyberphysikalischen Produkten, die sich im Laufe ihrer Lebenszyklen in ihrer Zusammensetzung verändern können. Während der Entwicklung dieser Produkte ist die Steuerung der Daten- und Informationsflüsse eine der großen Herausforderungen, um sicherzustellen, dass konkurrenzfähige und zukunftsichere Produkte entstehen können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine Möglichkeit untersucht, um die Steuerung dieser Daten- und Informationsflüsse mit Hilfe des Model-based Systems Engineering zu unterstützen. Dazu wird zunächst ein Einblick in den aktuellen Stand der Forschung und der Technik gegeben. Damit wird aufgezeigt, welchen Unterschied es zwischen der aktuellen Forschung und der Wahrnehmung einzelner Entwickler im industriellen Umfeld gibt. Aus dieser Abweichung wird der Handlungsbedarf zur Integration des Model-based Systems Engineering in bestehende Entwicklungsprozesse abgeleitet. Der Fokus liegt dabei auf der Unterstützung der Daten- und Informationsflüsse von konkreten Entwicklern innerhalb des Entwicklungsprozesses unter der Verwendung von Systemmodellen im Sinne des MBSE.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist die Vorgehensweise der Modellbasierten Daten- und Informationsflussunterstützung, die das Model-based Systems Engineering für einzelne Entwickler nutzbar macht. Dabei wird unterschieden zwischen Daten und Informationen, die innerhalb einer Fachdomäne oder außerhalb davon benötigt werden. Diese Unterscheidung bildet den Kern der Vorgehensweise, da dadurch eine Abgrenzung zwischen fachspezifischen Domänenmodellen und domänenübergreifenden Systemmodellen, im Sinne des Model-based Systems Engineering, festgelegt wird. Ein weiteres Merkmal dieser Vorgehensweise ist die Verwendung der Systemmodelle im Rahmen eines Mikrozyklus. Dabei ist das Ziel, die Systemmodelle nicht als ein zentrales Modell mit sehr langer Laufzeit zu betrachten, sondern nur als ein Teilmodell, um eine konkrete Aufgabe zu erfüllen. Damit werden die formalen Anforderungen an die Erstellung des Systemmodells reduziert und der Aufwand für die Integration in einen bestehenden Entwicklungsprozess verringert. Der Nutzen für den adressierten Entwickler wird dadurch kurzfristiger erkennbar.

Abgeschlossen wird die Arbeit durch eine theoretische Überprüfung, wie die vorgeschlagene Vorgehensweise in bestehende Ansätze integriert werden kann. Dabei werden sowohl Makroprozesse als auch Mikrozyklen berücksichtigt. Es wird zudem ein Vorschlag unterbreitet, wie der Nutzen der Vorgehensweise in der Industrie überprüft werden kann.

Abstract

The development of technical products faces the challenge of taking into account the interests of an increasing number of stakeholders. In addition, products are evolving from classical real, often mechatronic systems to cyberphysical products, which can change their composition within their life cycles. During the development of these products, controlling the flow of data and information is one of the major challenges to ensure that competitive and future-proof products can be created.

In the context of this thesis a possibility is therefore investigated to support the control of these data and information flows by means of Model-based Systems Engineering. For this purpose, an insight into the current state of research and technology is given first. This will show the difference between current research and the perception of individual developers in the industrial environment. The need for action to integrate Model-based Systems Engineering into existing development processes is derived from this difference. The focus here is on supporting the data and information flows of concrete developers within the development process using system models in the sense of MBSE.

The result of this work is the approach of model-based data and information flow support, which makes model-based systems engineering usable for individual developers. A distinction is made between data and information that is required within a subject domain or outside it. This differentiation is the core of the approach, as it defines a demarcation between domain-specific domain models and cross-domain system models, in the sense of Model-based Systems Engineering. A further characteristic of this approach is the use of the system models within the framework of a microcycle. The aim is not to consider the system models as a central model with a very long runtime, but only as a partial model to fulfil a concrete task. This reduces the formal requirements for the creation of the system model and the effort for the integration into an existing development process. The benefit for the addressed developer is thus quickly recognisable.

The work is concluded by a theoretical review of how the proposed approach can be integrated into existing approaches. Both macro-processes and micro-cycles are considered. In addition, a proposal will be made as to how the benefit of the approach can be verified in industry.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Forschung und Technik.....	4
2.1	Entwicklungsprozesse	4
2.1.1	Mechatronische Systeme	9
2.1.2	Cyber Physikalische Systeme	10
2.1.3	V-Modell nach der VDI-Richtlinie 2206.....	11
2.1.4	Characteristic-property-Modelling (CPM)/Property-Driven-Development (PDD).....	19
2.1.5	SPALTEN Problemlösungsmethode in der Produktentwicklung	22
2.1.6	Zusammenfassung der Entwicklungsprozesse.....	24
2.2	Integrierte und Virtuelle Produktentwicklung	25
2.2.1	Daten, Information, Wissen	25
2.2.2	Integrierte Produktentwicklung.....	29
2.2.3	Virtuelle Produktentwicklung	31
2.2.4	Produktdatenmanagement, Produkt-Lifecycle-Management und System Life-Cycle Management	34
2.3	Modellbildung und Simulation.....	36
2.3.1	Ein Modell.....	37
2.3.2	Modellarten	37
2.3.3	Vorgehen in der Modellbildung	40
2.4	Systems Engineering.....	42
2.5	Model-based Systems Engineering	50
2.5.1	Zielsetzung MBSE.....	50
2.5.2	MBSE nach DELLIGATTI.....	51

2.5.3	Modellierungsmethoden	53
2.5.3.1	SYSMOD – Vorgehensweisen nach WEILKIENS	53
2.5.3.2	CONSENS	54
2.5.3.3	Harmony SE	54
2.5.3.4	Object-Oriented Systems Engineering Method (Oosem).....	55
2.5.4	Modellierungsframeworks	55
2.5.5	Sprachen	56
2.5.5.1	Unified Modeling Language (UML)	58
2.5.5.2	Systems Modeling Language (SysML)	59
2.5.6	Tools.....	61
2.5.7	Weiterentwicklung und Konkretisierung von MBSE	63
2.5.7.1	mecPro ²	63
2.5.7.2	Rahmenwerk zu Integration des MBSE in die Produktentstehung.....	65
2.5.7.3	Weitere Anwendungsfälle	66
2.5.8	Zusammenfassung	68
2.6	Vorstudie zur praktischen Relevanz von MBSE.....	69
2.6.1	Ergebnisse der Vorstudie	70
2.6.2	Zusammenfassung und Interpretation der Umfrageergebnisse	78
3	Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfs.....	81
3.1	Defizite des Stands von Forschung und Technik.....	81
3.2	Ableitung des Handlungsbedarfs.....	82
4	Bestandteile der Modellbasierten Daten- und Informationsflussunterstützung.....	84
4.1	Übersicht.....	84
4.2	Baustein I: Definition der Ziele der MBSE Integration	86
4.2.1	Allgemeine Beschreibung des Bausteins I	86
4.2.2	Konkrete Zielbeschreibung zur Integration von Systemmodellen	88
4.3	Baustein II: Definition der betroffenen Phasen im Produktentwicklungsprozess (PEP)	89
4.3.1	Allgemeine Beschreibung des Bausteins.....	89
4.3.2	Konkrete Phasenbeschreibung des Produktentwicklungsprozess zur Unterstützung mit Systemmodellen	90

4.4	Baustein III: Definition der betroffenen Domänen und Abteilungen	91
4.4.1	Allgemeine Beschreibung des Bausteins.....	91
4.4.2	Konkrete Auswahl der betroffenen Domänen und Abteilungen	93
4.5	Baustein IV: Definition der betroffenen Stakeholder.....	94
4.5.1	Allgemeine Beschreibung des Bausteins.....	94
4.5.2	Konkrete Auswahl der betroffenen Stakeholder.....	95
4.6	Baustein V: Definition der benötigten Daten und Informationen.....	96
4.6.1	Allgemeine Beschreibung des Bausteins.....	97
4.6.2	Konkrete Auswahl der benötigten Daten und Informationen.....	98
4.7	Beschreibung des Gesamtkonzepts	101
4.8	Zusammenfassung	102
5	Überprüfung der Integrierbarkeit des Ansatzes in Entwicklungsprozesse	104
5.1	Diskussion der Nachvollziehbarkeit und Richtigkeit des Ansatzes.....	104
5.1.1	Integration des Ansatzes in Prozess nach der VDI 2206	104
5.1.2	Integration des Ansatzes in die Prozessschritte des CPM/PDD.....	105
5.1.3	Integration in das Framework for Conceptual Design of Space Mechanisms ..	107
5.1.4	F-B-S method: Modelling of Requirement-Based Effect Chains of Mechatronic Systems in Conceptual Stage.....	109
5.2	Diskussion der Modellbasierten Daten- und Informationsflussunterstützung im Vergleich zu existierenden Vorgehensweisen	111
5.3	Vorschlag zur Validierung der Anwendbarkeit und Implementierung.....	112
5.3.1	Ziele der Integration von MBSE	113
5.3.2	Phasen zur Anwendung von Systemmodellen.....	113
5.3.3	Beteiligte Domänen und Abteilungen	114
5.3.4	Identifikation beteiligter Personen	116
5.3.5	Benötigte Daten & Informationen.....	117
5.4	Zusammenfassung der Bewertung	118
6	Zusammenfassung und Ausblick	119

7	Anhang.....	122
7.1	Fragenkatalog der Vorstudie	122
7.1.1	Allgemeine Fragen zum Unternehmen und zur Entwicklung	122
7.1.2	Fragen zum Einsatz von Systems Engineering.....	122
7.1.3	Fragen zum Einsatz von Model-based Systems Engineering.....	122
7.2	Ergebnisdaten der Vorstudie	123
8	Literaturverzeichnis.....	129

Abkürzungen

BPMN	Business Process Model and Notation
CAD	Computer-aided design
CFD	Computational fluid dynamics
CONSENS	Conceptual design Specification technique for the Engineering of mechatronic Systems
CPM	Characteristic-property-Modelling
DfX	Design for X
DoDAF	Department of Defense Architecture Framework
ERP	Enterprise-Ressource-Planning Systemen
FEM	Finite-Elemente-Methode
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INCOSE	International Council on Systems Engineering
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnologie
MBE	Model-based Engineering
MBSE	Model-based Systems Engineering
ModelicaML	Modelica Modeling Language
NAF	NATO Architecture Framework
OMG	Object Management Group
Oosem	Object-Oriented Systems Engineering Method
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PDD	Property-Driven-Development
PDM	Produkt Daten Management
PEP	Produktentwicklungsprozess
PLM	Produkt Lifecycle Management
SE	Systems Engineering
SoaML	Service oriented architecture Modeling Language
SYSMOD	The Systems Modeling Toolbox
SysML	Systems Modeling Language
SysLM	System Life-Cycle Management
TOTE	Test-Operate-Test-Execute
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wie wird mit dem Kunden kommuniziert?	123
Tabelle 2: Wie oft wird mit dem Kunden kommuniziert?	124
Tabelle 3: Welche Domänen sind beteiligt?	124
Tabelle 4: Wie wird zwischen den Domänen kommuniziert?	125
Tabelle 5: Wie oft wird unter den Domänen kommuniziert?	126
Tabelle 6: Wird Systems Engineering angewendet?	126
Tabelle 7: Wird Model-based Systems Engineering angewendet?	126
Tabelle 8: Welche Modellierungssprachen werden für die Systemmodelle verwendet?	127
Tabelle 9: Welche Ziele werden mit dem Einsatz von Systemmodellen verfolgt?	127
Tabelle 10: Konnte durch die Verwendung von Systemmodellen ein merklicher Unterschied zu vorher festgestellt werden?	128

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Problemlösungsprozess nach HABERFELLNER [36].....	7
Abbildung 2: V-Modell als Makrozyklus nach der VDI 2206 [102]	13
Abbildung 3: Problemlösungszyklus als Mikrozyklus nach HABERFELLNER [36]	17
Abbildung 4: Aktivitäten Analyse und Synthese nach WEBER [107].....	20
Abbildung 5: Komponenten eines Problems nach ALBERS [3]	22
Abbildung 6: SPALTEN-Methoden nach ALBERS [4].....	23
Abbildung 7: Informationspyramide nach PROBST [77]	26
Abbildung 8: Wissenstreppe nach NORTH [66]	28
Abbildung 9: Integrierte Produktentwicklung nach MEERKAMM [63]	30
Abbildung 10: Phasen der PDM- und PLM-Integration nach EIGNER [23].....	35
Abbildung 11: Unterscheidung von Black-Box und White-Box Modellen.....	38
Abbildung 12: Angepasstes Vorgehen der Modellkonzeptentwicklung nach BOSSEL [12]....	42
Abbildung 13: Aufgabenbereiche des SE nach WEILKIENS [110].....	45
Abbildung 14: Projektorganisation mit Systems Engineering nach WEILKIENS [110]	46
Abbildung 15: SE Komponenten nach HABERFELLNER [36]	47
Abbildung 16: Säulen von MBSE nach DELLIGATTI [16].....	52
Abbildung 17: SysML Taxonomie [67]	60
Abbildung 18: Die mecPro ² -Beschreibungssystematik nach EIGNER [22]	63
Abbildung 19: Rahmenwerk nach TSCHIRNER [99]	65
Abbildung 20: An der Entwicklung beteiligte Domänen	71
Abbildung 21: Häufigkeit der Kommunikation zwischen den Domänen.....	72
Abbildung 22: Häufigkeit der Kommunikation zum Kunden	72
Abbildung 23: Art der Kommunikation zwischen den Domänen	73
Abbildung 24: Art der Kommunikation zum Kunden	74
Abbildung 25: Einsatz von Systems Engineering	75
Abbildung 26: Einsatz von Model-based Systems Engineering.....	75
Abbildung 27: Ziele des Einsatzes von Systemmodellen	76
Abbildung 28: Vorteile beim Einsatz von Systemmodellen	77
Abbildung 29: Modellierungssprachen zur Erstellung von Systemmodellen	78
Abbildung 30: Bausteine der Anwendung von MBSE	84
Abbildung 31: Auswahl eines Ziels	87
Abbildung 32: Vereinfachte Phasen nach VDI 2206.....	89
Abbildung 33: Auswahl der betroffenen Abteilungen und Domänen	92
Abbildung 34: Auswahl der Stakeholder.....	95
Abbildung 35: Datenauswahl	97

Abbildung 36: Initiales Systemmodell zur Entwicklung	99
Abbildung 37: Detailliertes Systemmodell.....	100
Abbildung 38: Abfolge der einzelnen Bausteine	101
Abbildung 39: Vereinfachte Prozessschritte nach WEBER [107].....	106
Abbildung 40: Vorgeschlagenes Framework nach OMICIUOLO [71].....	108
Abbildung 41: Procedure of modelling an effect chain for resulting a functional requirement-based effect chain [14]	110