



Lehrstuhl für Raumfahrttechnik
Technische Universität München

Prof. Prof. h.c. Dr. Dr. h.c.
Ulrich Walter



Masterarbeit
**Trade Off Bewertungsmethodik für Tool- und
Methodenentscheidungen zur Virtualisierung und
Modellbasierung in der Entwicklung**

RT-MA 2018/01

Autor:

Hannes Rosenow

Betreuer:

Daniel Pütz
Lehrstuhl für Raumfahrttechnik
Technische Universität München

Stephan Finkel, Principal
Sebastian Märkl, Senior Consultant
3DSE Management Consultants GmbH
Seidlstraße 18a, 80335 München



Danksagung

Mein Dank geht an meine Betreuer, die mir über die letzten Monate stets kompetent und hilfsbereit zur Seite standen. Dem gesamten Team der 3DSE möchte ich ebenfalls für die angenehme Zeit im Büro und darüber hinaus danken.

Insbesondere geht mein Dank an meine gesamte Familie, die mich während meines gesamten Studiums liebevoll unterstützt hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei Rebecca und Bene bedanken, im Besonderen für ihre Geduld und Unterstützung während der letzten Phase meines Studiums.

Zusammenfassung

Der zunehmende technologische Fortschritt in der Entwicklung ermöglicht heutigen Systemen einen deutlich größeren Funktionsumfang im Vergleich zu den früheren, klassischen technischen Produkten. Die Kombination mit weiteren Faktoren führt zu einer Verschiebung des Entwicklungsschwerpunkts weg von der reinen Produktentwicklung hin zur Entwicklung von ineinandergreifenden und hochvernetzten Gesamtsystemen.

Model-based Systems Engineering (MBSE) bietet eine Möglichkeit, diese ansteigende Systemkomplexität und Interdisziplinarität von Systemen mit Prozessen, Methoden und Tools effektiv zu beherrschen.

Im Kern der Arbeit wird deshalb untersucht, welche Anforderungen Unternehmen an MBSE-Tools für die Systemmodellierung erheben und nach welchen Kriterien sie ein geeignetes MBSE-Tool auswählen. Die der Untersuchung zugrundeliegende Hypothese lautet, dass mehrere, unterschiedliche Archetypen von Unternehmen bezüglich der Anforderungen an ein MBSE-Tool existieren. Ein Archetyp ist dabei definiert als die Kombination aus einem Satz von Eigenschaften (sogenannte Merkmalsausprägungen) von Unternehmen mit einem Satz von spezifischen Anforderungen an ein MBSE-Tool.

Die Mittel der Wahl sind eine Literaturrecherche und eine Interviewreihe mit Experten und Anwendern aus unterschiedlichen Branchen. Anhand der Literatur werden 19 Fallbeispiele analysiert. Die Interviews setzen sich aus offenen und geschlossenen Fragen bezüglich der Verbreitung und Anwendung von MBSE-Ansätzen im jeweiligen Unternehmen sowie der Wichtigkeit von Anforderungen an ein MBSE-Tool zusammen. Die Auswertungen geben zum einen Einblick in den aktuellen Anwendungsstand von MBSE und zeigen zum anderen die wichtigsten Anforderungen an MBSE-Tools auf. Alle ermittelten Anforderungen werden zudem auf mögliche statistische Zusammenhänge mit den Merkmalsausprägungen der Unternehmen untersucht, um die aufgestellte Hypothese zu testen. Die Hypothese lässt sich anhand der vorhandenen Daten nicht eindeutig bestätigen. Es zeigt sich jedoch, dass sich Unternehmen dennoch hinsichtlich ihrer Tool-Anforderungen unterscheiden.

Eine zusätzliche Aufgabe in dieser Arbeit ist, ausgewählte MBSE-Tools und -Methoden in der modellbasierten Entwicklung einander gegenüberzustellen und zu bewerten, wobei der Schwerpunkt dieser Evaluierung auf den Tools liegt.

Das Ziel der Arbeit ist es, durch Zusammenführen aller Ergebnisse aus der Untersuchung der Anforderungen an MBSE-Tools und der Ergebnisse aus der Untersuchung der MBSE-Tools ein Verfahren zur Selektion eines geeigneten Tools abzuleiten. Das Vorgehen umfasst ein Framework, welches die Anforderungen an die Tools mit den entsprechenden Features, Detail-Features und Tools selbst verknüpft. Als Ergebnis der vorliegenden Arbeit wird folglich eine Vorgehensweise zur Verfügung gestellt, die als umfassende Hilfestellung bei der Selektion eines anforderungsgerechten Tools dient.

Abstract

The increasing technological progress in the development allows today's systems a much larger possible range of functions compared to the earlier classical, technical products. The combination with other factors leads to a shift of the development focus away from the pure product development towards the development of interlocking and highly networked systems.

Model-based Systems Engineering (MBSE) provides an effective way to manage this increasing system complexity and interdisciplinarity of systems with appropriate processes, methods, and tools.

The core of the thesis therefore examines which requirements companies apply to MBSE tools for modeling their systems and which criteria they use to select a suitable MBSE tool. The underlying hypothesis is that there are several diverse kinds of archetypes related to the requirements for a MBSE tool. An archetype is defined as the combination of a set of characteristic values of companies with a set of specific requirements for a MBSE tool. The means of choice are a literature research and series of interviews with experts and users from different industries. Based on the literature, 19 case studies are analyzed. The interviews are composed of open and closed questions regarding the dissemination and application of MBSE approaches in each company and the importance of requirements for a MBSE tool. On the one hand, the evaluation provides insights into the current MBSE application status and, on the other hand, highlights the most important requirements for MBSE tools. All identified requirements are also examined for possible statistical correlations with the characteristics of the companies in order to test the established hypothesis. The hypothesis cannot be unambiguously confirmed based on the existing data. However, companies can still be differentiated as to their tool requirements.

An additional task in this work is to contrast and evaluate selected MBSE tools and methods in model-based development environment, with the focus of this evaluation being on the tools.

The goal of the work is to derive a method for selecting a suitable tool by merging all the results from the study of the requirements of MBSE tools and the results of the investigation of the MBSE tools. The procedure includes a framework that links the requirements of the tools with the corresponding features, detail features and tools themselves. As a result of the present work, a procedure is provided which serves as comprehensive assistance in the selection of a requirement-oriented tool.

Inhaltsangabe

1	EINLEITUNG	1
1.1	Motivation und Ausgangssituation	1
1.2	Ziele der Arbeit	2
1.3	Vorgehensweise	2
2	BEGRIFFSABGRENZUNGEN UND GRUNDLEGENDE DEFINITIONEN	4
2.1	Vom dokumentenzentrierten zum modellbasierten Systems Engineering	4
2.2	Definition von model-based Systems Engineering (MBSE)	5
2.3	Systeme und Systems-of-Systems	8
2.4	Systemlebenszyklus, Prozesse und Standards	9
2.4.1	Systemlebenszyklus	9
2.4.2	V-Modell	10
2.4.3	RFLP-Ansatz	10
2.4.4	ISO/IEC/IEEE 15288	11
2.4.5	AUTOSAR	11
2.4.6	Automotive SPICE	11
2.5	Modelle, Modellbildung und Systemmodell	12
2.6	Systemarchitektur und Systemdesign	13
2.7	Sichten und Standpunkte	14
2.8	Modellierungsmethoden	15
2.9	Modellierungstools	16
2.10	Modellierungssprachen	17
2.11	Relevante Standards zum Austausch von Dateien und Informationen	18
2.11.1	XML Metadata Interchange (XMI)	18
2.11.2	Open Services for Lifecycle Collaboration (OSLC)	19
2.11.3	Requirement Interchange Format (ReqIF)	19
2.11.4	Functional Mock-up Interface (FMI)	19
2.12	Beispielhafte Umsetzung von MBSE	19
3	ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN AN DEN MBSE-EINSATZ UND DEFINITION VON MBSE-ARCHETYPEN	21
3.1	Nutzen und Potentiale von MBSE	21
3.2	Grundsätzliche Erfolgsfaktoren und Anforderungen an den MBSE-Einsatz	22

3.3	Erfolgsfaktoren und Anforderungen in kleinen und mittelständischen Unternehmen	24
3.4	Definition von MBSE-Archetypen	25
4	LITERATURRECHERCHE ZU ANFORDERUNGEN AN MBSE-TOOLS UND ARCHETYPEN	26
4.1	Zusammenfassung der MBSE-Anwendungsbeispiele	26
4.1.1	Raumfahrt- und Satellitentechnik	26
4.1.2	Netzwerkzentrierte System-of-Systems	28
4.1.3	Automobilindustrie	29
4.1.4	Defense & Aerospace	33
4.1.5	Anlagen-, Sonder- und allgemeiner Maschinenbau	36
4.1.6	Konsumgüterindustrie	38
4.2	Ergebnisse der Literaturrecherche	39
4.3	Schlussfolgerungen aus der Literaturrecherche	40
5	EXPERTENINTERVIEWS ZU ANFORDERUNGEN AN MBSE-TOOLS UND ARCHETYPEN	42
5.1	Aufbau der Interviews	42
5.2	Angaben zur Durchführung der Interviews und zu den Teilnehmern	47
5.3	Angaben zur Auswertung der Interviews	50
5.4	Auswertung der offenen Interviews	50
5.4.1	Einschätzung bezüglich Archetypen	51
5.4.2	Leitfrage 1: Persönliche Definition von MBSE	51
5.4.3	Leitfrage 2: Grad der interdisziplinären Vernetzung und Zusammenarbeit von Entwicklungsteams	52
5.4.4	Leitfrage 3: Verbreitungs- und Bekanntheitsgrad von MBSE im Unternehmen	52
5.4.5	Leitfrage 4: Anwendung modellbasierter Entwicklung	53
5.4.6	Leitfrage 5: Einsatz von Modellierungstools	54
5.5	Identifikation neu hinzugekommener Anforderungen	55
5.6	Auswertung der Anforderungen (Nr. 1-49) aus dem Fragebogen	56
5.6.1	Auswertung der im Fragebogen gelisteten Anforderungen (Nr. 1-29)	56
5.6.2	Auswertung der im Fragebogen ergänzten Anforderungen (Nr. 30-49)	61
5.7	Auswertung der Top-Anforderungen (Nr. T1-39) aus den offenen Interviews	62
5.7.1	Top-Anforderungen nach Branchen	64
5.7.2	Top-Anforderungen nach Unternehmensgrößen	65
5.7.3	Top-Anforderungen nach Umsatz	66
5.7.4	Top-Anforderungen nach Verteilung der Standorte	66
5.7.5	Top-Anforderungen nach Entwicklungsanlass	67
5.7.6	Wichtigkeit von Top-Anforderungen nach Kombinationen aus zwei oder mehr Merkmalsausprägungen	67
5.7.7	Vergleich der Top-Anforderungen mit den Anforderungen aus der Literaturrecherche	69
5.8	Diskussion der Anforderungen und Archetypen	69

6	STAND DER TECHNIK VON AUSGEWÄHLTEN MBSE-TOOLS UND MBSE-METHODEN	71
6.1	MBSE-Tools und ihre Eigenschaften	73
6.1.1	Cameo Systems Modeler von No Magic	73
6.1.2	Capella von PolarSys (Eclipse Working Group)	74
6.1.3	Enterprise Architect von Sparx Systems	74
6.1.4	Integrity Modeler von PTC	75
6.1.5	iQUAVIS von ISID Ltd	75
6.1.6	Rational Rhapsody von IBM Corporation	76
6.1.7	Visual Paradigm von Visual Paradigm International Ltd	76
6.2	Gegenüberstellung von Stärken und Schwächen der untersuchten MBSE-Tools	77
6.3	Zuordnung von Tool-Features zu Anforderungen	81
6.3.1	Mapping	81
6.3.2	Besonderheiten bei der Realisierung ausgewählter Anforderungen durch Features	84
6.4	MBSE-Methoden und ihre Eigenschaften	86
6.4.1	INCOSE Object-Oriented Systems Engineering Method (OOSEM)	86
6.4.2	IBM Rational Harmony for Systems Engineering	87
6.4.3	Weilkiens Systems Modeling Process (SYSMOD)	87
6.4.4	Vitech Model-Based System Engineering (MBSE) Methodology	87
6.4.5	ARChitecture And Design Integrated Approach (ARCADIA)	88
6.4.6	Bewertung und Relevanz der MBSE-Methoden	88
7	FRAMEWORK UND VORGEHENSWEISE ZUR SELEKTION EINES GEEIGNETEN MBSE-TOOLS	90
7.1	Definition von Quasi-Archetypen	90
7.2	Aufbau des Frameworks	91
7.3	Untersuchung von Anforderungen und Features	94
7.4	Tool-Rangfolge je Anforderung	95
7.5	Entscheidungsfindung und Toolauswahl	95
8	ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE	97
8.1	Zusammenfassung	97
8.2	Diskussion der wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen	97
8.3	Ausblick	100
A	LITERATUR	101
B	ANHANG	107
B.1	Notationsübersicht OMG Systems Modeling Language	107
B.2	Auswertungsmatrix der Literaturrecherche	109



B.3	Interview-Unterlagen	110
B.4	Ergebnisse aus der Interviewreihe	113
B.5	MBSE-Tools	123
B.6	Exemplarische Frameworks für die Quasi-Archetypen	126
B.7	Digitaler Anhang	128

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1–1:	Wesentliche Bestandteile und Aufbau der Arbeit	3
Abb. 2–1:	Gegenüberstellung von dokumentenzentriertem und modellbasiertem Systems Engineering	5
Abb. 2–2:	Systeme, Systemgrenzen, Schnittstellen und Systemumgebung	8
Abb. 2–3:	Generische Phasen im Systemlebenszyklus.....	9
Abb. 2–4:	Das V-Modell und seine Ebenen [7, S. 34].....	10
Abb. 2–5:	Einordnung des Systemmodells in die Entwicklungsumgebung (adaptiert von [8, S. 490]).....	13
Abb. 2–6:	Sichten, Diagramme und Modelle im MBSE	15
Abb. 2–7:	SysML-Taxonomie (adaptiert von [33])	18
Abb. 3–1:	Beispielhafte Roadmap zur Etablierung von (MB) SE (adaptiert von [6, S. 22]).....	22
Abb. 4–1:	Systemkontextmodelle in den Lebensphasen „Nutzung“ (links) und „Versuch“ [46, S. 17]	30
Abb. 4–2:	Graphisches, nicht-formales Diagramm des Bremsfahrzeugs (BFZ) [49, S. 321].....	32
Abb. 4–3:	Metamodell zur Verknüpfung von Spezifikationselementen und Anforderungen [50, S. 326]	33
Abb. 4–4:	Toolintegration in einer Modellierungs- und Simulationsumgebung [54, S. 157].....	37
Abb. 5–1:	Aufbau des Interview-Leitfadens	44
Abb. 5–2:	Branchenzugehörigkeiten der interviewten Unternehmen.....	49
Abb. 5–3:	Unternehmensgrößen der interviewten Unternehmen nach Beschäftigten	49
Abb. 5–4:	Anzahl der Beschäftigten der interviewten Unternehmen	50
Abb. 5–5:	Interviewergebnis zu „Einschätzung bezüglich Archetypen“	51
Abb. 5–6:	Interviewergebnis zu „Verbreitung und Bekanntheitsgrad von MBSE im Unternehmen“	52
Abb. 5–7:	Interviewergebnis zu „Verantwortung und Antreiber von MBSE im Unternehmen“	53
Abb. 5–8:	MBSE-Tools und häufigste Nennungen je Branche	54
Abb. 5–9:	Mittlere Wichtigkeiten der fünf wichtigsten und unwichtigsten Anforderungen des Fragebogens (Gesamtbetrachtung)	57
Abb. 5–10:	Ergänzte Anforderungen aus dem Fragebogen (häufigste und wichtigste)	61
Abb. 5–11:	Top-Anforderungen (häufigste)	62
Abb. 5–12:	Charakteristische (orange) und meistgenannte Top-Anforderungen nach Branchen	64
Abb. 5–13:	Charakteristische (orange) und meistgenannte Top-Anforderungen nach Unternehmensgrößen	65

Abb. 5–14:	Charakteristische (orange) und meistgenannte Top-Anforderungen nach Umsatz.....	66
Abb. 5–15:	Charakteristische (orange) und meistgenannte Top-Anforderungen nach Verteilung der Standorte.....	66
Abb. 5–16:	Charakteristische (orange) und meistgenannte Top-Anforderungen nach Entwicklungsanlass	67
Abb. 6–1:	Cameo Systems Modeler in einer modellbasierten Entwicklungsumgebung [60]	73
Abb. 6–2:	Aktivitäten in der ARCADIA-Methode [64, S. 3]	88
Abb. 7–1:	Aufbau eines individuellen Frameworks und Vorgehen zur Selektion eines geeigneten MBSE-Tools	90
Abb. 7–2:	Auflistung der sieben Quasi-Archetypen	91
Abb. 7–3:	Ausschnitt aus dem exemplarischen Framework für den Quasi-Archetyp 1	92
Abb. 7–4:	Skala für die individuelle Festlegung der Erfüllungswerte e der Features.....	94

Tabellenverzeichnis

Tab. 3–1:	Zusammenfassung der grundsätzlichen Erfolgsfaktoren und Anforderungen an die Einführung und Anwendung von MBSE.....	23
Tab. 3–2:	Zusammenfassung der speziellen Anforderungen von KMU an MBSE	24
Tab. 4–1:	Auswertung der Literaturrecherche nach Randbedingungen und Anforderungen	39
Tab. 5–1:	Merkmale und Merkmalsausprägungen zur Einordnung von interviewten Unternehmen	45
Tab. 5–2:	Teilnehmerstatistik aus den Interviews	48
Tab. 5–3:	Gemeinsame (gem.) wichtigste und unwichtigste Anforderungen (Anf.) innerhalb eines Unterscheidungsmerkmals	58
Tab. 6–1:	Überblick über MBSE-Tools und Tools im MBSE-Kontext	71
Tab. 6–2:	Überblick über die untersuchten MBSE-Tools.....	72
Tab. 6–3:	Gegenüberstellung ausgewählter Features der MBSE-Tools	78
Tab. 6–4:	Zuordnung von Features zu Anforderungen (Mapping)	82

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
ALM	Application Lifecycle Management
Anf.	Anforderung
API	Application Programming Interface
AUTOSAR	Automotive Open System Architecture
BPMN	Business Process Model and Notation
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer-aided Design
CONSENS	Conceptual Design Specification Technique for the Engineering of complex Systems
CSM	Cameo Systems Modeler
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DoD	Department of Defence
EA	Enterprise Architect
EFFBD	Enhanced Functional Flow Block Diagram
FAS	Functional Architecture for Systems
FMI	Functional Mock-up Interfaces
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems
GUI	Graphical User Interface
ICSM	Integrated Communications Systems Model
IDEF0	Integration Definition for Functional Modeling
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INCOSE	International Council on Systems Engineering
ISO	International Organization for Standardization
ISS	International Space Station
JPL	Jet Propulsion Laboratory
JSC	Johnson Space Center
k.A.	keine Aussage
KMU	kleine und mittelständische Unternehmen
KPI	Key Performance Indicator
MARTE	Modeling and Analysis of Real Time and Embedded systems
MBSE	model-based Systems Engineering



MOVE	Munich Orbital Verification Experiment
NAF	NATO Architecture Framework
NASA	National Aeronautics and Space Administration
Nr.	Nummer
OEM	Original Equipment Manufacturer
OMG	Object Management Group
OOSEM	Object-Oriented Systems Engineering Method
OPDs	Object Process Diagrams
OPL	Object Process Language
OPM	Object Process Methodology
OSLC	Open Services for Lifecycle Collaboration
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
PM	Projektmanagement
ReqIF	Requirement Interchange Format
S2TEP	Small Satellite Experience Platform
SAFER	Simplified Aid for Extra Vehicular Activity Rescue
SE	Systems Engineering
SEO	Systems Engineering Office
SoaML	Service oriented architecture Modeling Language
SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
SysML	Systems Modeling Language
SYSMOD	Systems Modeling Process
Tab.	Tabelle
UML	Unified Modeling Language
UPDM	Unified Profile for DoDAF/MODAF
V&V	Verifikation & Validierung
vgl.	vergleiche
XMI	XML Metadata Interchange
XML	Extensible Markup Language

1 Einleitung

1.1 Motivation und Ausgangssituation

Die traditionelle Produktentwicklung beschränkt sich im Wesentlichen auf das technische System, das aus technischen Elementen wie zum Beispiel einer zu entwickelnden Komponente oder Baugruppe besteht. Dieser Ansatz wird den gewachsenen Ansprüchen an ein Entwicklungsmanagement für viele heutige Anwendungsfälle nicht mehr gerecht. [1]

Ein konkretes Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der Fahrzeugentwicklung zeigt die Komplexitätszunahme von Systemen: Für die Fahrzeuge der Zukunft lautet die Mission, neben dem elektrischen Antriebsstrang auch die Kommunikation und Interaktion mit dem Fahrer und den Mitfahrern, mit elektronischen Endgeräten, der Infrastruktur und mit anderen Fahrzeugen weiterzuentwickeln. Dazu gehören unter anderem ein erweitertes Informationsmanagement mit multifunktionalen Bedienkonzepten, mobile Konnektivität mit webbasierten Services (zum Beispiel over-the-air Updates) oder ein kontaktloser Zugang zum Fahrzeug mittels intelligenter Geräte – die sogenannten Smart Devices (zum Beispiel Smart and Secure Automotive Key Systems). Die Herausforderung besteht demnach in diesem konkreten Fall in der rasant fortschreitenden Entwicklung von relativ einfachen, mechatronischen Systemen über komplexere, geschlossene Systeme zu verbundenen Systemen und schließlich zu einem ganzheitlichen Mobilitätsservice. [2]

Die mit dieser Entwicklung einhergehende Komplexitätszunahme für das Entwicklungsmanagement ist nicht nur auf die Automobilbranche beschränkt. Der rasante technische Fortschritt in der Informations- und Kommunikationstechnologie sowie die zunehmende Globalisierung der Märkte verschieben generell den Schwerpunkt von der Produktentwicklung hin zur Entwicklung von ineinandergreifenden und hochvernetzten Gesamtsystemen. [3] In diesen wächst die Anzahl an beteiligten Bauteilen, Funktionen und Interaktionen stetig und es entstehen sogenannte System-of-Systems. [4, S. 37] Darüber hinaus bedingen die sich dauernd ändernden Anforderungen aller beteiligten Stakeholder ein hohes Maß an Organisations- und Kommunikationsfähigkeiten während des gesamten Produktentstehungsprozesses. Zusätzlich lassen sich Trends hin zu längeren Produktlebenszyklen bei gleichzeitig kürzeren Technologiezyklen sowie zu funktions- und bereichsübergreifenden Entwicklungsteams und zu einer zunehmenden Funktionsdichte von Produkten erkennen. Gleichzeitig steigt die Anzahl der beteiligten Akteure, was in erheblichem Maße zu einer steigenden Zahl von verschiedenen Standpunkten bzw. Blickwinkeln, erforderlichen Fähigkeiten und Interessen führt. [1]

Die Kombination der beschriebenen Entwicklungsrichtungen führt zu einer stark wachsenden Systemkomplexität und Interdisziplinarität von Systemen sowie zu erweiterten Systemgrenzen. [3] Ein erfolgreiches und effizientes Management derartiger Systeme erfordert leistungsfähigere Methoden in der Produktentwicklung als bisher. [1] Eine Möglichkeit, diese Komplexitätszunahme zu beherrschen, bieten die Methoden und Ansätze aus dem Systems Engineering (SE). [4]

In einer Studie aus dem Jahr 2015 zu Herausforderungen und Lösungsansätzen von SE wurde beispielsweise die Wichtigkeit von SE auf einer Skala von 1 (unwichtig) bis

10 (essentiell für das Fortbestehen eines Unternehmens) mit durchschnittlich 7,6 eingestuft. Bis 2020 wird ein Anstieg auf 8,7 erwartet. [5] Zahlreiche empirische Analysen in anderen Studien belegen den positiven Effekt von SE auf die Projektarbeit und -ergebnisse. Dazu gehören beispielsweise eine bessere Planungsgenauigkeit und weniger Kostenüberschreitungen. Sich später auswirkende Effekte können eine höhere Produktqualität und damit geringere Kosten für die Qualitätskontrolle sein. [6, S. 7f.]

Im selben Maß, in dem die Komplexität von Systemen zunimmt, steigt somit auch die Bedeutung des SE.

SE hat sich in der Industrie jedoch noch nicht zu einem Standardvorgehen durchgesetzt – auch wenn in den Organisationen, die Interesse an SE zeigen, Konsens darüber besteht, dass durch den Systemansatz die meisten Herausforderungen, wie sie oben beschrieben wurden, gelöst werden können. [7, S. 166]

In diesem Zusammenhang hat sich eine modellbasierte Realisierung der Aktivitäten aus dem SE entwickelt.

1.2 Ziele der Arbeit

Für die Umsetzung des modellbasierten SE stehen den Anwendern umfassende Möglichkeiten zur Verfügung. Dazu gehören Prozesse, Methoden und Softwaretools, die die Modellierung unterstützen. Es stellt sich folglich die Frage, wodurch die verschiedenen Bedarfe der Anwender am besten erfüllt werden können. Die vorliegende Arbeit hat den Anspruch, Anforderungen an die Umsetzung eines modellbasierten SE-Ansatzes zu identifizieren und zu gewichten und darüber hinaus bei der Auswahl eines geeigneten Tools Hilfestellung zu leisten. Dafür werden insbesondere Methoden und Softwaretools zur Modellierung untersucht, wobei der Schwerpunkt der Arbeit auf der Betrachtung der Tools liegt. Die zentrale Forschungsfrage besteht darin, wie und nach welchen Anforderungen ein Modellierungstool zur zielgerichteten Unterstützung in einer modellbasierten Entwicklung eines Unternehmens bewertet und ausgewählt werden kann.

Es gehört jedoch nicht zum Umfang dieser Arbeit, jedes einzelne Softwaretool, das eine modellbasierte Entwicklung unterstützen kann, im Detail vorzustellen oder deren Bedienung zu erklären. Die Arbeit gibt lediglich einen Überblick über die am weitesten verbreiteten Werkzeuge und charakterisiert diese anhand von definierten Kriterien.

Die Arbeit erhebt vielmehr den Anspruch, eine Toolbewertung und -auswahl bereit zu stellen, die gänzlich unabhängig von Softwareherstellern ist und durch keine kommerziellen Interessen von industriellen Anbietern beeinflusst ist.

1.3 Vorgehensweise

Die Arbeit gliedert sich im Wesentlichen in sechs Teile.

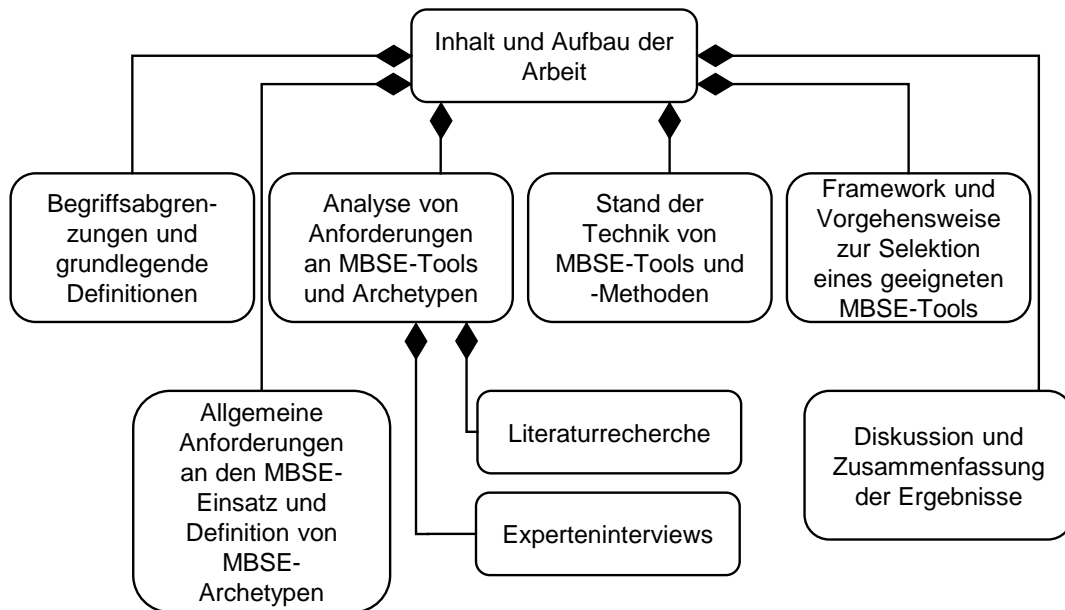


Abb. 1–1: Wesentliche Bestandteile und Aufbau der Arbeit

Nach dem Erläutern der Ausgangssituation und Aufgabenstellung zu Beginn werden, wie in Abb. 1–1 gezeigt, die wichtigsten Begriffe der modellbasierten SE-Herangehensweise für die Verwendung in dieser Arbeit definiert. Nach der Beschreibung grundsätzlicher Bedarfe an einen MBSE-Einsatz wird in Kapitel 3 der Begriff der Archetypen von Unternehmen für die Unterscheidung von Unternehmen bezüglich ihrer Anforderungen an die Modellierungstools eingeführt.

Die Kapitel 4 und 5 untersuchen die Existenz der Archetypen anhand von Anwendungsbeispielen aus der Literatur sowie durch Interviews mit Experten und Anwendern. Im Rahmen eines Fragebogens und einer offenen Interviewreihe werden neben den Archetypen auch die wichtigsten Anforderungen für die Selektion eines solchen Tools ermittelt.

Das darauffolgende Kapitel 6 gibt einen Überblick über ausgewählte auf dem Markt erhältliche Modellierungstools und Methoden hinsichtlich relevanter Charakteristika.

Kapitel 7 stellt eine Vorgehensweise für die Selektion eines geeigneten Modellierungstools bereit.

Abschließend werden alle Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und diskutiert.

2 Begriffsabgrenzungen und grundlegende Definitionen

2.1 Vom dokumentenzentrierten zum modellbasierten Systems Engineering

Die gegenwärtige Tendenz zur zunehmenden Automatisierung und Digitalisierung von Maschinen führt von den klassischen, rein mechanischen Systemen zu komplexen mechatronischen oder cybertronischen Systemen und System-of-Systems, deren Elemente vermehrt miteinander interagieren und kommunizieren. [1] Wie eingangs erwähnt, führt eine Vielzahl an weiteren Gründen zu dieser stark ansteigenden Systemkomplexität sowie Interdisziplinarität von Systemen, was wiederum die Systemgrenzen erweitert.

SE kann maßgeblich dazu beitragen, die entstehenden Herausforderungen zu lösen. Das Grundprinzip des SE beruht auf dem Systemansatz und findet bereits breite Anerkennung bei der Entwicklung und dem Management von Großprojekten. [4] Die Begriffsbestimmung sowie die konkrete Anwendung sind hingegen von großer Vielfalt geprägt. Die Definition im Systems Engineering Handbook des International Council on Systems Engineering (INCOSE) lautet:

„Systems engineering is an interdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems. It focuses on defining customer needs and required functionality early in the development cycle, documenting requirements, and then proceeding with design synthesis and system validation while considering the complete problem: operations, cost and schedule, performance, training and support, test, manufacturing, and disposal.“ [7, S. 11]

SE ist ein interdisziplinärer Ansatz, der ein ganzes Paket von unterschiedlichsten Anforderungen effizient in ein erfolgreiches System transformiert. Durch den Systemansatz wird eine ganzheitliche Betrachtung der Problemstellung sichergestellt. [7] INCOSE fasst SE mit dem folgenden Leitsatz zusammen:

„SE is a perspective, a process, and a profession ...“ [7, S. 11]

Beim Management von Projekten mit dem klassischen Ansatz des SE stehen in der Regel dokumentenzentrierte Arbeitsweisen und -ergebnisse im Vordergrund. Anforderungsspezifikationen, Pflichten- und Lastenhefte, Zeichnungen und Planungsunterlagen werden in gedruckter oder elektronischer Dokumentenform erstellt. Ingenieure generieren eine disjunkte Menge an Textdokumenten, bevor sie innerhalb des Unternehmens unter Anwendern ausgetauscht oder an Zulieferer und Kunden verteilt werden. Das zu entwickelnde System folgt der Dokumentation. Der Projektfortschritt leitet sich direkt aus dem Arbeitsfortschritt der Dokumente ab. Dieser Ansatz ist zwar stringent, besitzt aber fundamentale Einschränkungen. Dadurch, dass Informationen über nicht zusammenhängende Dokumente hinweg verteilt sind, kann die Nachvollziehbarkeit von Änderungen nicht sichergestellt werden und es besteht das Risiko von Inkonsistenzen. Der mangelnde Synchronisationsgrad zwischen Anforderungen und Design auf Systemebene sowie zwischen Hard- und Softwaredesign auf Elementebene ist ein weiterer Nachteil, der schließlich zu

Ineffizienzen und potentiellen Qualitätsproblemen führen kann. Fehleranalyse und Nacharbeit führen oftmals zu erheblichen Kosten. [8, S. 15-21]

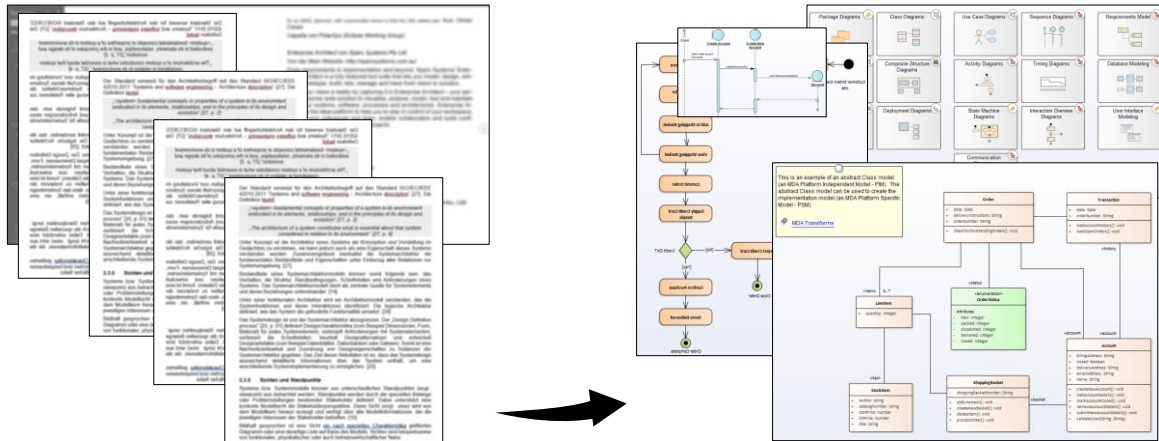


Abb. 2–1: Gegenüberstellung von dokumentenzentriertem und modellbasiertem Systems Engineering

Um dem entgegen zu wirken, bedarf es einer Transformation weg von Dokumenten (Abb. 2–1, links) hin zur Generierung und Kontrolle eines zusammenhängenden, ganzheitlichen Modells. Ein Modell als zentrales Element der Entwicklung schließt jedoch die Existenz textueller Dokumente nicht komplett aus, wie das Zitat von T. Weilkiens unterstreicht:

„Die Dokumente sollen nicht verschwinden. Nur sind sie nicht mehr die Quelle der Informationen, sondern eine Sicht auf das Modell, beispielsweise automatisch erzeugt von einem Modellierungswerkzeug.“ [9, Kapitel 1.1]

2.2 Definition von model-based Systems Engineering (MBSE)

Das model-based Systems Engineering (MBSE) beschreibt einen Ansatz, der eine bestimmte Möglichkeit darstellt, den Grundgedanken des SE auf modellbasierte Art und Weise formalisiert umzusetzen. Der Ursprung von MBSE geht im Wesentlichen auf die amerikanische Verteidigungs- und Raumfahrtindustrie zurück. Zu den Vorreitern bei der Anwendung gehören die Bell Labs in den 1940er, das U.S. Department of Defence in den 1950er und die NASA (National Aeronautics and Space Administration) in den 1960er Jahren. [10] Eine eindeutige Begriffsdefinition variiert jedoch in Literatur und Praxis, sodass das Verständnis unter Experten und Anwendern abweicht.

Maßgebend für das Verständnis von MBSE in dieser Arbeit sind die folgenden Definitionen von INCOSE und vom Jet Propulsion Laboratory (JPL) der NASA.

Die INCOSE Definition entstammt der INCOSE Systems Engineering Vision 2020 [11, S. 15] aus dem Jahr 2007 und findet sich unverändert im INCOSE Systems Engineering Handbook [7, S. 189] von 2015 wieder:

„[Model-based Systems Engineering (MBSE) is] the formalized application of modeling to support system requirements, design, analysis, verification, and

validation activities beginning in the conceptual design phase and continuing throughout development and later life cycle phases.”

MBSE ist nach INCOSE die formalisierte Modellierung, die förderlich für sämtliche Aktivitäten bei der Anforderungserhebung sowie Systemdesign, -analyse, -verifikation und -validierung ist. Die Modellierung beginnt bereits in der konzeptionellen Designphase und zieht sich durch die Entwicklungsphasen bis in spätere Lebenszyklusphasen. [11] Unter diesen formalisierten Prozess des Modellierens fallen Modellierungsprinzipien, -methoden, -sprachen und -tools. [10]

INCOSE beschreibt MBSE in [11] des Weiteren als Teil eines Langzeittrends hin zu modellbasierten Vorgehensweisen, die in verschiedenen Ingenieurdisziplinen Einzug halten, und erwartet zukünftig eine vollständige Integration in die Praktiken von SE.

P.A. Jansma und R. Jones vom JPL nennen in ihrer MBSE Definition aus dem Jahr 2006 mit den Modellen eines Systems konkret die Ergebnisse von MBSE-Aktivitäten (im Gegensatz zu INCOSE) und geben das Ziel an, dadurch das Systemverhalten simulieren zu können. Allerdings treffen sie keine Aussagen darüber, in welchen Phasen einer Entwicklung die Modelle zur Unterstützung herangezogen werden.

„Model-based systems engineering (MBSE) is the application of scientific and engineering efforts to transform an operational need into a description of system performance parameters and a system configuration by creating executable, explicit representations (model) of a system in order to predict, simulate and explain the resultant behavior of the system from the structure.” [12, S. 5]¹

MBSE ist demnach die Umwandlung eines operativen Bedarfs in die Beschreibung von Leistungsparametern des Lösungssystems und in eine Systemkonfiguration. Diese Transformation geschieht durch die Erzeugung von ausführbaren, eindeutigen Systemrepräsentationen in Form von Modellen mit dem Ziel, das resultierende Systemverhalten ausgehend von der Systemstruktur vorherzusagen, zu simulieren und zu erklären. [12]

Simultane Begriffserklärungen oder auch davon abgeleitete Definitionen mit anderen Schwerpunkten sind in der Literatur beispielsweise in [10], [14], und [15] zu finden.

Unter Einbezug der beiden als maßgebend genannten Definitionen sind in dieser Arbeit die folgenden Aspekte unter dem Begriff MBSE zu verstehen:

- MBSE unterstützt Anforderungserhebung, Systemdesign, -analyse, -verifikation und -validierung.

¹ Zum Ursprung dieser Definition: In der Veröffentlichung von P.A. Jansma und R. Jones [12] werden für diese Definition die folgenden Quellen genannt: (1) „A. W. Wymore, Model-Based Systems Engineering, CRC Press, LLC, 1993“ und (2) „Vitech Corporation Website, Business Solutions, Systems Engineering, <http://www.vtcorp.com/mbse.html>“. In Quelle (1) befindet sich der Wortlaut der Definition weder exakt noch sinngemäß. Die Website aus (2) ist nicht mehr aufrufbar.

Die aufgeführte Definition stimmt in ihrem ersten Abschnitt jedoch mit folgender Definition aus dem Standard MIL-STD-499 „System Engineering Management“ [13, S. 11] überein: „System Engineering is the application of scientific and engineering efforts to (a) transform an operational need into a description of system performance parameters and a system configuration through the use of an iterative process of definition, synthesis, analysis, design, test and evaluation; (b) ...“

- Der Einsatz von MBSE geschieht phasenübergreifend und bereits ab den frühen Entwicklungsphasen.
- MBSE ist eine formalisierte Anwendung der Modellierung, bei der ausführbare, eindeutige Modelle als Repräsentationen des Systems entstehen.
- MBSE transformiert einen Bedarf in Systemleistungsparameter und Systemkonfiguration.
- MBSE verfolgt das Ziel, das Systemverhalten vorherzusagen, zu simulieren und zu erklären.

Das durch den gesamten Produktlebenszyklus konsistente und kohärente Systemmodell (vgl. Abb. 2–5 in Abschnitt 2.5) ist der wesentliche Bestandteil des modellbasierten Ansatzes. Die Systemmodellierung basiert dabei auf der Anwendung von geeigneten formalen Modellen auf die entsprechende Problemzone. [10] MBSE erweitert somit die Fähigkeit, Produktspezifikationen und -anforderungen inhaltlich zu erfassen, zu analysieren, zu verteilen und zu administrieren. [7, S. 189]

Die drei Hauptpfeiler von MBSE sind nach L. Delligatti [16, Kapitel 1.2], Mitglied bei INCOSE und MBSE-Experte am Johnson Space Center der NASA, die Folgenden:

Eine Modellierungssprache definiert die Art von Elementen sowie ihre Beziehungen zueinander (vgl. Abschnitt 2.10).

Eine Modellierungsmethode gibt den Umfang sowie die Absicht der Modellierung vor und befähigt somit ein Entwicklungsteam, das Modell konsistent und mit demselben Ziel zu generieren (vgl. Abschnitt 2.8).

Der dritte Pfeiler ist das Modellierungstool, das sich nach den Vorschriften der Modellierungssprachen verhält (vgl. Abschnitt 2.9).

Zu einer eindeutigen Abgrenzung des Begriffs MBSE gehören abschließend auch diejenigen Aspekte, die MBSE *nicht* leisten kann:

- MBSE ersetzt die Sorgfalt bei Entwurf und Aufbau eines funktionierenden Systems ebenso wenig, wie die notwendige Gründlichkeit bei der Ausarbeitung der Systemspezifikationen. [16]
- Die Systems Modeling Language (SysML, vgl. Abschnitt 2.10) ist lediglich eine mögliche Modellierungssprache, die bei der Anwendung von MBSE angewendet wird.
- MBSE unterscheidet sich vom Produktlebenszyklusmanagement (PLM). Die jeweils damit verbundenen Ansätze und Methodiken stehen aber nicht im Konflikt zueinander. MBSE stellt die Prozesse und Techniken bereit, „um disziplinübergreifende Artefakte zu erstellen und zu speichern. PLM [...] verwaltet diese Artefakte (Versions- und Konfigurationsmanagement) und auch ihre Verweise in andere Datenstrukturen.“ [17, S. 312]
- MBSE ersetzt nicht das Projektmanagement (PM). Es bestehen im Grundsatz gemeinsame Kompetenzen, die Methoden setzen aber an unterschiedlichen Punkten an. Der modellbasierte Systemansatz und PM ergänzen sich und ermöglichen so ein ganzheitliches Entwicklungsmanagement. [18]

Es gilt zu beachten, dass in der Praxis das eine oder einzig gültige MBSE Konzept nicht existiert. Jedes Unternehmen bzw. jeder Anwender muss sich eine adäquate Umsetzung für die vorherrschenden unternehmens-, projekt- und systemspezifischen Randbedingungen erarbeiten.

2.3 Systeme und Systems-of-Systems

Nach der ISO/IEC/IEEE 15288:2015 (vgl. 2.4.4) besteht ein System aus einer Kombination von interagierenden Elementen, um ein oder mehrere gesetzte Ziele zu erreichen. Systeme sind von Menschen geschaffen und dienen dem Zweck, Produkte oder Dienstleistungen in einer definierten Umgebung für Anwender und andere Stakeholder bereit zu stellen. [19, S. 11]

INCOSE erweitert diese Beschreibung: Ein System ist das Zusammenspiel von Elementen, Subsystemen oder anderen Anordnungen, die einen festgelegten Zweck erfüllen. Zu diesen Elementen gehören Produkte (Hardware, Software, Firmware), Prozesse, Personen, Informationen, Verfahren, Einrichtungen, Dienste und weitere unterstützende Elemente. [7, S. 5]

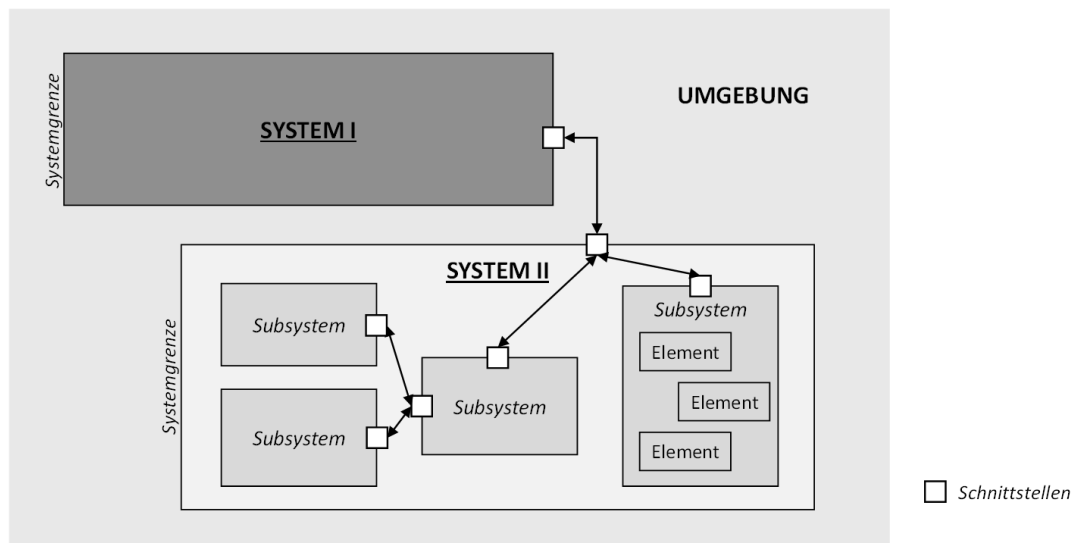


Abb. 2–2: Systeme, Systemgrenzen, Schnittstellen und Systemumgebung

Das System ist folglich die Ausarbeitung des Grundgedankens eines zweckmäßigen Ganzen, das aus sich gegenseitig beeinflussenden Elementen besteht. Typische Charakteristika sind seine Struktur, die Systemhierarchie, die Systemgrenze und die über Schnittstellen stattfindende Wechselwirkung mit seiner Umgebung oder von Systemelementen untereinander. [7, S. 6] Die Abb. 2–2 veranschaulicht diese Eigenschaften.

Die Systemstruktur ist definiert als die Menge aller Systemkomponenten (Subsysteme, Systemelemente) und der Beziehungen und Interaktionen zwischen diesen Komponenten. [20, S. 15]

Das Verhalten eines Systems ist die „Menge der zeitlich aufeinanderfolgenden Zustände eines Systems“ [20, S. 16] und kann als statisch (Systemeigenschaften sind

unveränderlich über die Zeit) oder dynamisch oder einer Kombination aus beidem beschrieben werden.

Ein System-of-Systems beschreibt ein System, dessen Elemente wiederum Systeme sind. Durch die Interaktion der Systeme werden in der Regel Ergebnisse erreicht, die das einzelne System nicht erbringen kann. Zu den Eigenschaften eines System-of-Systems gehören unabhängig geleitete und betriebene Einzelsysteme, geographische Verteilung und emergentes Verhalten. [7, S. 8]

Ein konventionelles Kraftfahrzeug ist nach dieser Definition kein System-of-Systems. Durch das Zusammenspiel der Einzelsysteme, zu denen beispielhaft der Antriebsstrang und die Karosserie gehören, wird zwar ein höheres Resultat erreicht als von einem alleine, jedoch können diese Einzelsysteme nicht sinnvoll unabhängig voneinander betrieben werden.

Betrachtet man hingegen ein luftunterstütztes Bodenüberwachungssystem im Militärbereich, so spricht man von einem System-of-Systems. Hierbei interagieren verschiedene, unabhängige Systeme, wie beispielsweise Bodenstationen, Aufklärungsdrohnen, Flugzeuge und Satelliten. Erst durch die sinnvolle Interaktion aller Komponenten entsteht das emergente Verhalten.

2.4 Systemlebenszyklus, Prozesse und Standards

2.4.1 Systemlebenszyklus

Jedes System durchschreitet bestimmte Lebenszyklusphasen, die von unterschiedlichen Aktivitäten geprägt sind. Das Lebenszyklusmodell gibt Rahmenbedingungen vor, damit das System seine Funktionalität über alle Phasen hinweg erfüllt, und definiert Beginn und Ende von Prozessaktivitäten in den entsprechenden Lebenszyklusphasen.

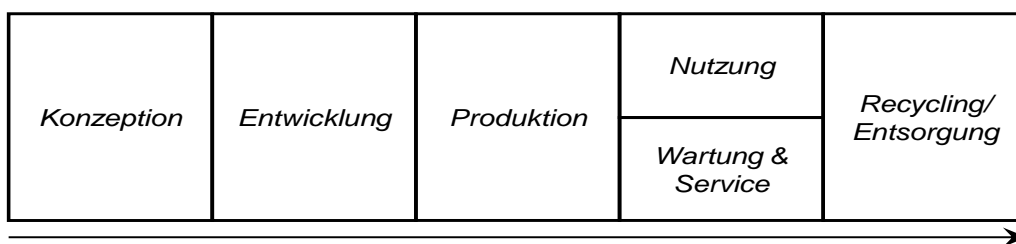


Abb. 2–3: Generische Phasen im Systemlebenszyklus

Zu diesen Phasen gehören Konzeption, Entwicklung, Produktion, Nutzung, Wartung und Service sowie Recycling oder Entsorgung (Abb. 2–3). Obwohl die Phasen in Abb. 2–3 im Wesentlichen aufeinanderfolgend, nicht überlappend und als unabhängig voneinander dargestellt sind, können in der Realität jeweilige Prozessaktivitäten voneinander abhängen, sich zeitlich überschneiden oder zeitgleich ablaufen. Beim Durchlaufen des Lebenszyklus sind Iterationen und Rekursionen möglich. [7, S. 28f.] Die Phasen und deren beinhalteten Aktivitäten können sich je nach Anwendungsfall unterscheiden.

2.4.2 V-Modell

Eine Möglichkeit, die SE-Aktivitäten während den Lebenszyklusphasen zu visualisieren, bietet das V-Modell. Der Schwerpunkt des Modells liegt in den ersten beiden Phasen der Konzeption und Entwicklung (vgl. Abb. 2–3). In nachfolgender Darstellung in Abb. 2–4 nehmen die Zeit und der Systemreifegrad von links nach rechts zu. Der Detaillierungsgrad der Prozesse nimmt von der oberen Systemebene beginnend nach unten hin mit der Zuspitzung des V zu. Der linke Schenkel beinhaltet Aktivitäten der Architekturdekomposition und -definition. Nach der Implementierung auf Elementebene (vgl. „lower level system element development/ realization“) folgen im rechten Schenkel die Architekturintegration und -verifikation bis hin zur erfolgreichen Systemrealisierung. Neben dem V-Modell existieren weitere Lebenszyklusmodelle, wie zum Beispiel das Wasserfall- oder das Spiralmodell. [7]

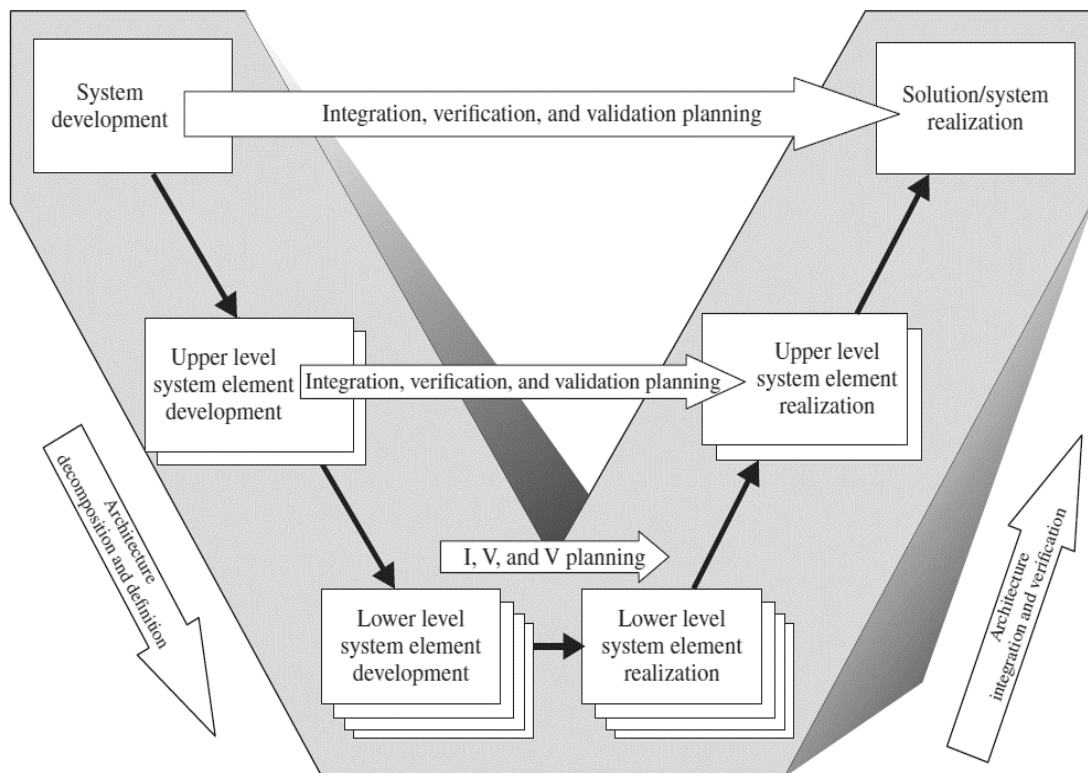


Abb. 2–4: Das V-Modell und seine Ebenen [7, S. 34]

2.4.3 RFLP-Ansatz

Der RFLP-Ansatz präzisiert und standardisiert den linken, absteigenden Schenkel im V-Modell (vgl. Abb. 2–4). Er beschreibt die Dekomposition der Systemarchitektur (vgl. Abschnitt 2.6) ausgehend von der Anforderungsanalyse bis zur Ebene der Elementspezifikation. Das Akronym RFLP steht dabei für Requirements (Anforderungsmodell), Functional (Funktionsmodell), Logical (Logisches Modell) und Physical (Physikalisches Modell). Der Ursprung dieses Ansatzes liegt in verschiedenen Forschungsprojekten zur disziplinenübergreifenden und modellbasierten Systementwicklung. Die 3D Experience Platform des Toolherstellers Dassault Systèmes und speziell CATIA V6 Systems dienten als Basiswerkzeug für die Einführung und Evaluierung des RFLP-Ansatzes. Durch eine Verknüpfung der RFLP-

Partialmodelle lassen sich die Zusammenhänge zwischen Anforderungen und ihren entsprechend abgeleiteten Funktionen und logischen Modellelementen nachvollziehen und nachverfolgen. [21]

2.4.4 ISO/IEC/IEEE 15288

In Bezug auf Zielsetzung und Ausrichtung ist der Standard ISO/IEC/IEEE 15288:2015 „Systems and software engineering - System life cycle processes“ [19] dem V-Modell ähnlich. Er gibt ein Rahmenwerk an Prozessen vor, die den gesamten Lebenszyklus von Systemen erfassen. Eine Unterscheidung von Systemumfang, Anwendungsbereichen oder Systemkomplexität wird nicht vorgenommen. Der Standard identifiziert vier Prozessgruppen, die die SE-Aktivitäten begleiten:

- Agreement Processes
(zum Beispiel Akquise und Angebot)
- Organizational Project-Enabling Processes
(zum Beispiel Portfolio- und Qualitätsmanagement)
- Technical Management Processes
(zum Beispiel Projektplanung und Risikomanagement)
- Technical Processes
(zum Beispiel Architektur- und Designdefinition, Verifikation und Validierung)

Für Anwendungen mit einem geringeren Umfang, wie es beispielsweise in kleineren und mittelständischen Unternehmen vorkommt, existiert die Standardreihe ISO/IEC 29110 „Systems and software engineering - Lifecycle profiles for Very Small Entities (VSEs)“ [22] als modifizierte Version des Standards ISO/IEC/IEEE 15288:2015. Dieser Standard ist anwendbar auf ganze Unternehmen oder nur auf Teilorganisationen oder Projekte. Der Standard setzt die Prozessschwerpunkte im Projektmanagement sowie in der Systemdefinition und -entwicklung und kann je nach Bedarf um Inhalte des ISO/IEC/IEEE 15288:2015 ergänzt werden.

2.4.5 AUTOSAR

Die Standardisierungsinitiative AUTOSAR (Automotive Open System Architecture) geht zurück auf führende Automobilhersteller und Zulieferer. Ziel der Initiative ist es, eine offene und standardisierte Referenzarchitektur für Software in Steuergeräten zu schaffen, um somit die Austauschbarkeit von Elektronikkomponenten zu verbessern. Die AUTOSAR Methodik beschreibt die verschiedenen Phasen vom Systementwurf bis hin zur -implementierung und stellt dabei die Arbeitsergebnisse in Abhängigkeiten zueinander. Das wichtigste Arbeitsergebnis sind die sogenannten AUTOSAR XML-Dateien (Extensible Markup Language). Einige Modellierungstools können diese XML-Dateien in ihre Modelle importieren oder Informationen aus einem Modell in Form einer AUTOSAR XML-Datei exportieren. [23]

2.4.6 Automotive SPICE

Die Standardreihe ISO/IEC 15504 beinhaltet ein Modell zur Prozessbewertung, welches unter dem Namen SPICE (Software Process Improvement and Capability Determination) bekannt ist. Automotive SPICE ist der von dieser Reihe abgeleitete,

branchenspezifische Standard. Das darin enthaltene Verfahren bewertet den Reifegrad und die Leistungsfähigkeit der Softwareentwicklungsprozesse in der Automobilindustrie und zielt auf eine Verbesserung dieser Prozesse auf Projekt- und Organisationsebene ab. Das Modell besteht aus zwei Dimensionen: Prozessdimension und Reifegraddimension. Der Prozessreifegrad wird auf unterschiedlichen Stufen von Level 0 bis 5 beschrieben. In der Prozessdimension sind alle Prozesse aus der Standardreihe ISO/IEC 15504 gelistet. Sie werden um die Prozesse ergänzt, die im Rahmen von Automotive SPICE angepasst oder zusätzlich eingeführt wurden. [24]

2.5 Modelle, Modellbildung und Systemmodell

Wie bereits beim vorangegangenen Begriff des Systems existieren viele Definitionen für das Modell. Grundsätzlich ist ein Modell eine Abstraktion, also eine vereinfachte Abbildung, von kompletten oder auch nur ausgewählten Teilen von Systemen, Instanzen oder Prozessen. [7, S. 181]

Ein Modell hat im Wesentlichen drei Kriterien zu erfüllen. Es bildet ein reales Objekt oder Phänomen ab, es enthält nur die wichtigsten Eigenschaften der abgebildeten Realität aus einer bestimmten Sicht heraus und es kann das Original für einen bestimmten Zweck ersetzen. Weitere Merkmale sind die Zuverlässigkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit. [10]

Die Modellbildung nach dem MBSE-Ansatz ist in keinem Falle mit der (reinen) Erstellung von CAD-Modellen (computer-aided design) oder Simulationsmodellen gleichzusetzen.

Vielmehr legt die Modellbildung eine formalisierte Darstellung für Modelle fest, um Struktur und Verhalten des Systems so detailliert wie nötig und so abstrakt wie möglich zu beschreiben. [20, S. 32]

Je nach Wissensstand des Betrachters ist bei der Modellierung ein entsprechender Abstraktionsgrad notwendig. Wie nachfolgender Aphorismus von G. Box aus dem Jahr 1987 verdeutlicht, bildet ein Modell auch nie die ganze Realität ab:

„Remember that all models are wrong; the practical question is how wrong do they have to be to not be useful.“ [25, S. 74]

Das Systemmodell ist das Hauptartefakt von MBSE und beinhaltet domänenübergreifende Informationen des Gesamtsystems. Es besteht aus miteinander verknüpften Komponenten, die die Anforderungen, die Struktur sowie das Verhalten des Systems strukturiert beschreiben. Zusammen mit Simulations-, Analyse- und Hardwaremodellen entsteht dadurch eine kohärente Entwicklungsumgebung. [10] Durch die Spezifikation aller Beziehungen der relevanten Systemkomponenten untereinander sind Änderungen und ihre Auswirkungen leichter festzustellen und nachzuverfolgen. Die Einordnung des Systemmodells in eine Entwicklungsumgebung zeigt Abb. 2–5.

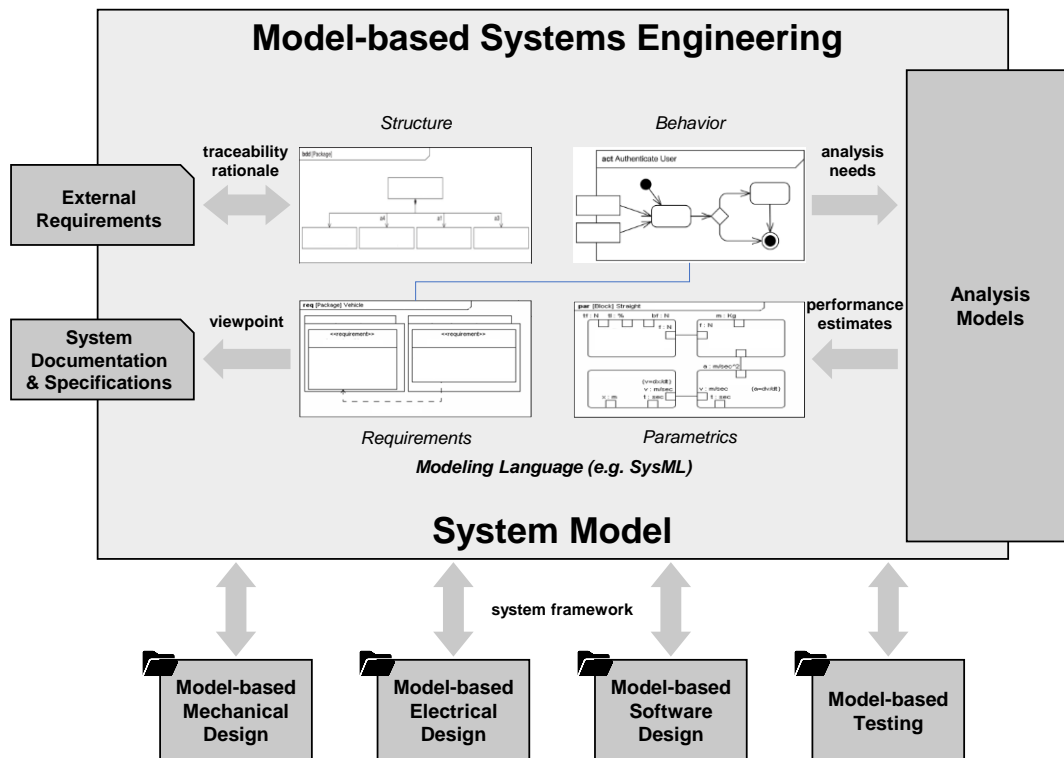


Abb. 2–5: Einordnung des Systemmodells in die Entwicklungsumgebung (adaptiert von [8, S. 490])

Das Systemmodell dient als Rahmenwerk für andere Modelle und Entwicklungsgegenstände, wie beispielsweise mechanische Designmodelle oder Test- und Verifikationsmodelle. Das Systemmodell umfasst Schnittstellen zu externen Randbedingungen sowie zur Dokumentation und Systemspezifikation. Analysemodelle erhalten die im Systemmodell identifizierten Analysebedarfe und geben das zu erwartende Verhalten zurück. Die jeweilige Umsetzung des spezifischen MBSE-Ansatzes legt dabei Modellumfang und -integrität fest und bestimmt die Beziehung zu anderen Artefakten des Systementwicklungsprozesses. [8, S. 489ff.]

2.6 Systemarchitektur und Systemdesign

Im Standard ISO/IEC/IEEE 15288:2015 sind der „Architecture Definition process“ [19, S. 57] ebenso wie der „Design Definition process“ [19, S. 61] Bestandteile der technischen Prozesse (vgl. 2.4.4). Wesentliche Arbeitsergebnisse des Architekturdefinitionsprozesses sind beispielsweise:

- Kontext, Grenzen und externe Schnittstellen des Systems
- Systemelemente, ihre Schnittstellen und ihre Beziehungen untereinander
- Allokation der Systemanforderungen und Belange von Stakeholdern auf Entitäten der Architektur und Systemelemente
- Abgleich der Architektur mit Anforderungen und Designcharakteristika
- Grundprinzipien für das Systemdesign

Der Standard verweist für den Architekturbegriff auf den Standard ISO/IEC/IEEE 42010:2011 „Systems and software engineering – Architecture description“ [26]. Die Definition lautet dort:

„<system> fundamental concepts or properties of a system in its environment embodied in its elements, relationships, and in the principles of its design and evolution” [26, S. 2]

„The architecture of a system constitutes what is essential about that system considered in relation to its environment.” [26, S. 4]

Unter Konzept ist die Architektur eines Systems als Konzeption und Vorstellung im Gedächtnis zu verstehen, sie kann jedoch auch als eine Eigenschaft dieses Systems verstanden werden. Zusammengefasst beinhaltet die Systemarchitektur die fundamentalen Bestandteile und Eigenschaften unter Einbezug aller Relationen zur Systemumgebung. [26]

Bestandteile eines Systemarchitekturmodells können somit folgende sein: das Verhalten, die Struktur, Randbedingungen, Schnittstellen und Anforderungen eines Systems. Das Systemarchitekturmodell dient als zentrale Quelle für Systemelemente und deren Beziehungen untereinander. [27]

Unter einer funktionalen Architektur wird ein Architekturmodell verstanden, das die Systemfunktionen und deren Interaktionen identifiziert. Die logische Architektur definiert, wie das System die geforderte Funktionalität umsetzt. [28]

Das Systemdesign ist von der Systemarchitektur abzugrenzen. Der „Design Definition process“ [19, S. 61] definiert Designcharakteristika (zum Beispiel Dimensionen, Form, Material) für jedes Systemelement, verknüpft Anforderungen mit den definierten Systemelementen, verfeinert die Schnittstellen, beurteilt Designalternativen und entwickelt Designartefakte (zum Beispiel Datenblätter, Datenbanken oder Dateien). Somit ist eine Nachvollziehbarkeit und Zuordnung von Designeigenschaften zu Instanzen der Systemarchitektur gegeben. Das Ziel dieser Aktivitäten ist es, dass das Systemdesign ausreichend detaillierte Informationen über das System enthält, um eine anschließende Systemimplementierung zu ermöglichen. [19]

2.7 Sichten und Standpunkte

Systeme bzw. Systemmodelle können von unterschiedlichen Standpunkten (engl.: viewpoint) aus betrachtet werden. Standpunkte werden durch die speziellen Belange oder Problemstellungen bestimmter Stakeholder definiert. Dabei unterstützt eine konkrete Modellsicht die Stakeholderperspektive. Diese Sicht (engl.: view) wird aus dem Modellkern heraus erzeugt und verfügt über alle Modellinformationen, die die jeweiligen Interessen der Stakeholder betreffen. [8, S. 80]

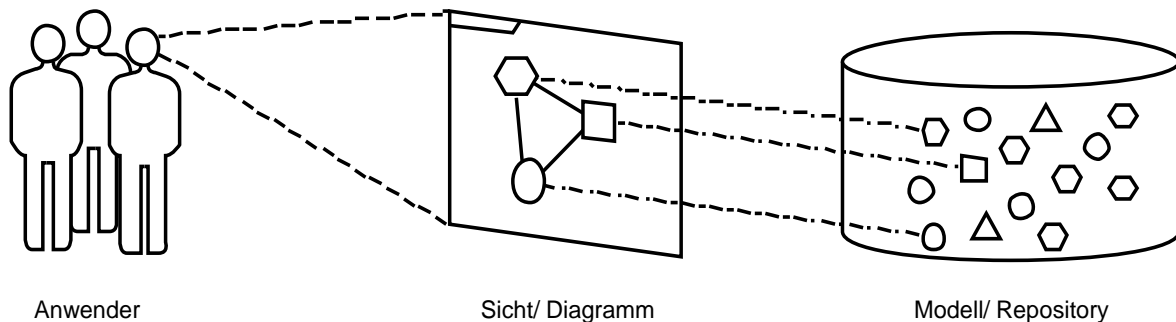


Abb. 2–6: Sichten, Diagramme und Modelle im MBSE

Bildhaft gesprochen ist eine Sicht ein nach speziellen Charakteristika gefiltertes Diagramm oder eine derartige Liste auf Basis des Modells (Abb. 2–6). Sichten sind beispielsweise von funktionaler, physikalischer, statischer, dynamischer oder auch betriebswirtschaftlicher Natur. Aktivitäts- oder Sequenzdiagramme der SysML (vgl. Abb. 2–7 in Abschnitt 2.10) stellen ebenfalls Beispiele für Sichten dar - in diesem Fall dynamische Sichten, die das Auftreten und die zeitliche Abfolge von Verhalten und Ereignissen beschreiben.

2.8 Modellierungsmethoden

Die Begriffe Methode, Methodik und Methodologie werden in der deutsch- und englischsprachigen Literatur unterschiedlich, simultan oder abwechselnd verwendet.

Eine Methodik ist im Allgemeinen definiert als die Anwendung von zusammenhängenden Prozessen, Methoden und Tools auf eine bestimmte Art von Problemen in einer definierten Umgebung. Unter einer MBSE-Methodik ist die Sammlung von zugehörigen Prozessen, Methoden und Tools zu verstehen, die die Umsetzung des Systemansatzes in einem modellbasierten Kontext unterstützt. Ein Prozess ist die logische Abfolge von Aufgaben, die ausgeführt werden, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Ein Prozess definiert, „WAS“ zu tun ist, ohne darauf einzugehen „WIE“. Eine Methode spezifiziert die Arbeitsweisen und Verfahren, um Aufgaben innerhalb des Prozesses auszuführen. Eine Methode definiert also das „WIE“ einer Tätigkeit. In diesem Zusammenhang ermöglichen und unterstützen Tools das „WAS“ und das „WIE“. [29]

Im Englischen umfasst das Wort „methodology“ sowohl die Methodik als auch die Methodologie. Der deutsche Begriff Methodologie beschreibt vorrangig die Theorie bzw. Lehre der wissenschaftlichen Methoden und hat in dieser Arbeit keine Bedeutung. [30]

Aufgrund der im Deutschen eng verwandten Begrifflichkeiten Methode, Methodik und Methodologie bedarf es in der Theorie einer klaren Abgrenzung. Die Erfahrung aus der Praxis zeigt jedoch, dass diese Unterscheidung im Arbeitsumfeld weitestgehend irrelevant ist; selbiges gilt auch in der vorliegenden Arbeit.

In dieser Arbeit wird unter eine MBSE-Methode bzw. MBSE-Methodik die Unterstützung spezifischer Prozesse und das Zusammenspiel mit entsprechenden Tools verstanden, um die Umsetzung des Systemansatzes in einem modellbasierten Entwicklungskontext zu realisieren. Prozesse geben dabei vor, was zu tun ist, und die

Methode beschreibt, wie – auf welche Art und Weise – die Aktivitäten auszuführen sind. Die Methode macht Vorgaben bezüglich der Gestaltung des Modells. Darüber hinaus dient die Methode als Leitfaden, der sicherstellt, dass alle Beteiligten demselben zweckgebundenen Ziel zuarbeiten und dass Konsistenz und Umfang des Systemmodells gewahrt werden. Tools wirken dabei unterstützend mit.

Zu den MBSE-Methoden gehören beispielsweise:

- INCOSE Object-Oriented Systems Engineering Method (OOSEM)
- IBM Rational Harmony for Systems Engineering
- Weilkiens Systems Modeling Process (SYSMOD)
- Vitech Model-Based System Engineering (MBSE) Methodology
- ARChitecture And Design Integrated Approach (ARCADIA)

2.9 Modellierungstools

Modellierungstools spielen eine wichtige Rolle in einer Entwicklungsumgebung. Dazu gehören beispielsweise Modellierungstools für Systeme, ingenieurtechnische Analyse- und Testtools sowie Organisations- und Projektmanagementtools. Der Fokus liegt nachfolgend auf den IT-gestützten, digitalen Systemmodellierungstools. Dabei werden die Begriffe MBSE-Tool, Modellierungstool oder Modellierungswerkzeug simultan verwendet, sind jedoch von den Modellierungssprachen (vgl. Abschnitt 2.10) abzugrenzen.

In dieser Arbeit wird unter einem MBSE-Tool folgendes verstanden:

Ein MBSE-Tool verhält sich nach den Vorschriften von einer oder mehreren Modellierungssprachen und ist eine mögliche, anbieterseitige Umsetzung der jeweiligen Sprachenausprägung. Es befähigt und unterstützt den Anwender zur Generierung eines guten Modells in dieser Sprache. Das MBSE-Tool dient somit zur Modellierung, Visualisierung und Beschreibung eines komplexen Systems und seiner Eigenschaften. Mit einem Modellierungstool wird ein Satz an Systemelementen sowie deren Beziehungen untereinander generiert. In verschiedenen, vom Tool bereitgestellten Diagrammtypen sind definierte Sichten (vgl. Abschnitt 2.7) auf das zugrundeliegende Modell möglich. Die Tools besitzen außerdem die besondere Eigenschaft der unmittelbaren Konsistenz, sodass bei der Modifizierung eines Modellelements alle anderen Elemente und Diagramme, die mit diesem verknüpft sind, automatisch aktualisiert werden. [16, Kapitel 1.2] Deshalb werden nur IT-gestützte, digitale Tools in Betracht gezogen.

Zu den MBSE-Modellierungstools gehören beispielsweise:

- IBM Rational Rhapsody
- No Magic Cameo Systems Modeler
- Sparx Systems Enterprise Architect
- PTC Integrity Modeler
- Capella (PolarSys)

Es existieren zwei methodische Ansätze, die das Zusammenspiel von MBSE-Tools mit anderen relevanten Tools in der Werkzeugumgebung einer durchgängig modellbasierten Entwicklung beschreiben: föderiertes und integriertes MBSE.

Der föderierte Ansatz beschreibt die modellbasierte Verknüpfung verschiedener spezifischer Autorenwerkzeuge durch entsprechende Schnittstellen und Austauschformate. Dadurch ist sichergestellt, dass für jedes Entwicklungsvorhaben und für jede Teilaufgabe des MBSE die dafür geeignetste Software zum Einsatz kommt. Häufig bedeutet dies auch, dass die im Unternehmen bestehende Toolkette nicht umfassend verändert wird. Eine Föderationsplattform verwaltet und verknüpft die einzelnen Modelle. Der Nachteil dieser kollaborativen Toollandschaft ist jedoch die Schnittstellenkomplexität und die technische Verknüpfung der verschiedenen Tools. Ein Beispiel für den föderierten Ansatz ist die Verwendung der Werkzeuge ModelCenter (Phoenix Integration), SimulationX (ESI ITI GmbH), CATIA V5 (Dassault Systèmes) und Cameo Systems Modeler (No Magic). [31]

Bei dem integrierten Werkzeugansatz stammen alle Tools für die verschiedenen Anwendungsfälle des MBSE von einem einzigen Hersteller. Das heißt, alle Modelle werden im Datenmodell dieses Herstellers abgelegt und die oben genannte Schnittstellenkomplexität und Toolmigration entfällt. Dadurch ist die Durchgängigkeit der Modelle gewährleistet. Dafür begibt sich das Unternehmen in eine gewisse Abhängigkeit von einem einzigen Hersteller und läuft Gefahr, für bestimmte Teilaufgaben nicht auf das optimale Werkzeug zurückgreifen zu können. Mögliche Lösungen bieten hier die Hersteller Dassault Systèmes mit der 3D Experience Platform oder Siemens. [31]

2.10 Modellierungssprachen

Ein Modellierungstool basiert auf mindestens einer graphischen, bildhaften oder textuellen Modellierungssprache. Jede Sprache umfasst Semantik (Definition und Bedeutung von Symbolen und Zeichen) und Syntax (Vorgaben zur Verknüpfung der Symbole und Zeichen). [10] Wie bereits in Abschnitt 2.2 genannt, gehört die Modellierungssprache zu den Hauptpfeilern des MBSE und ist in der Regel unabhängig von einer bestimmten Modellierungsmethodik.

Zu den in den letzten Jahrzehnten hauptsächlich genutzten Modellierungssprachen im Anwendungsbereich des SE gehören Enhanced Functional Flow Block Diagrams (EFFBD) und Integration Definition for Functional Modeling (IDEF0). Aus diesen Ansätzen der funktionalen Zerlegung heraus haben sich neue, objektbasierte Sprachen entwickelt. Basierend auf der Softwaremodellierungssprache UML (Unified Modeling Language) erarbeiteten die Object Management Group (OMG) und INCOSE im Jahr 2007 eine UML-Erweiterung für SE: die Modellierungssprache Systems Modeling Language (SysML). [10]

SysML ist eine graphische Modellierungssprache und unterstützt die Anforderungsspezifikation, die Analyse, das Design sowie die Verifikation komplexer Systeme. SysML bedient sich bei der Modellierung der verschiedenen Aspekte eines Systems von neun Diagrammtypen, die wiederum in vier Kategorien, die sogenannten SysML Hauptpfeiler, gegliedert sind. Diese Hauptpfeiler stehen für die verschiedenen Modellierungsaspekte und stimmen mit den Hauptsichtweisen der Stakeholder überein: die Systemanforderungen, die Systemstruktur, das Systemverhalten und die parametrischen Beziehungen. [10] SysML wurde außerdem im internationalen Standard ISO/IEC 19514:2017 als allgemeine Modellierungssprache für SE spezifiziert. [32]

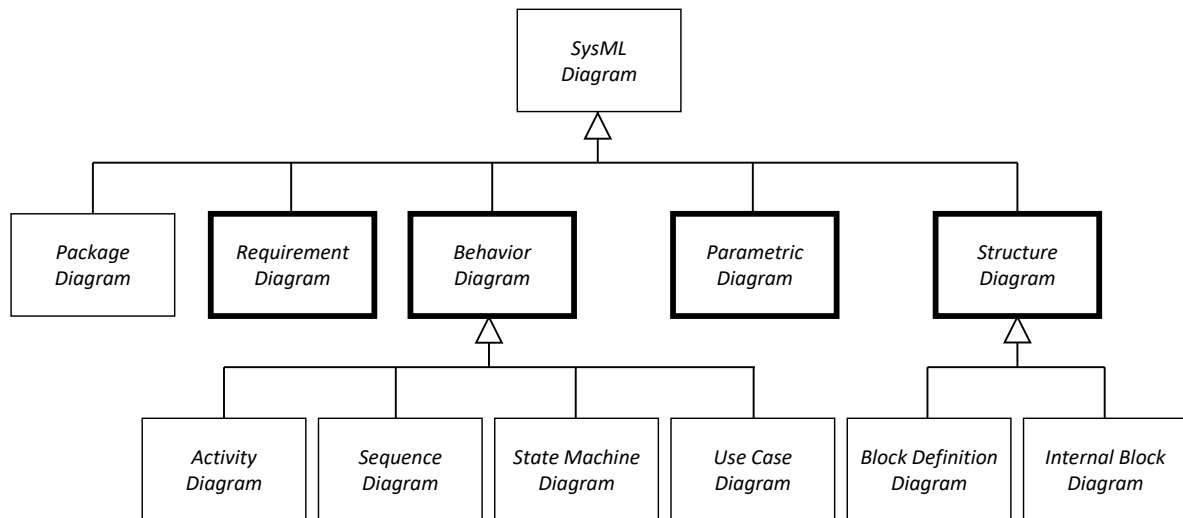


Abb. 2–7: SysML-Taxonomie (adaptiert von [33])

Abb. 2–7 zeigt die Diagrammtypen der SysML inklusive der dick umrandeten Hauptpfeiler. Eine von der OMG bereitgestellte Notationsübersicht befindet sich im Anhang B.1. Nach mehr als zehn Jahren Anwendung der SysML verkündete die OMG die nächste Generation „OMG SysML v2“. Im Dezember 2017 wurden die Anforderungen für die zweite Version endgültig definiert und in einer Ausschreibung veröffentlicht. Darin sind beispielsweise zusätzliche Möglichkeiten wie ein Modellaustauschformat oder eine formale Semantik vorgesehen. [32]

Neben UML und SysML existieren weitere graphische und textuelle Modellierungssprachen im Kontext von MBSE, wie beispielsweise UPDM (Unified Profile for DoDAF/MODAF), BPMN (Business Process Model and Notation), MARTE (Modeling and Analysis of Real Time and Embedded systems) und SoaML (Service oriented architecture Modeling Language). [16, Kapitel 1.2.1] Neben den genannten Sprachen gehört die Object Process Language (OPL) zusammen mit den Object Process Diagrams (OPDs) zu der von Dov Dori entwickelten Object Process Methodology (OPM). [10]

2.11 Relevante Standards zum Austausch von Dateien und Informationen

Für den Fall, dass sich ein MBSE-Tool in eine Toollandschaft integrieren muss und somit mit anderen Tools interagiert oder dass erzeugte Modelle mit Stakeholdern ausgetauscht werden sollen, existieren unterschiedliche, standardisierte Datenaustauschmechanismen. Wichtige Austauschformate werden im Folgenden vorgestellt.

2.11.1 XML Metadata Interchange (XMI)

XMI steht für Extensible Markup Language (XML) Metadata Interchange. XMI ist ein Standardformat für den Austausch von UML- und SysML-Modellen oder ausgewählten Teilmodellen zwischen Tools, die konform mit UML oder SysML sind. Beispielsweise werden so Anforderungen eines Anforderungsmanagementtools importiert oder

exportiert oder Zusicherungsdiagramme und zugehörige Informationen mit domänenspezifischen Analysetools ausgetauscht. [33, Kapitel 18.3.2]

Die Modellierungssoftware Enterprise Architect (Sparx Systems) bietet beispielsweise den Import sowie Export von Modellelementen oder Gruppen von Modellelementen, sogenannten Packages, in Form von XML an. Dies ermöglicht den Datenaustausch zwischen verschiedenen UML-Packages, von Enterprise Architect zu Enterprise Architect oder mit anderen Tools, die XML unterstützen. Diese Funktion beinhaltet beispielsweise auch die Möglichkeit, Modelle aus Rational Rhapsody (IBM) oder MagicDraw (No Magic) einzulesen. [34]

2.11.2 Open Services for Lifecycle Collaboration (OSLC)

OSLC ist eine offene Initiative, die Spezifikationen für die Interaktion zwischen Tools erarbeitet. Diese Spezifikationen unterstützen die Zusammenarbeit von unabhängigen Tools aus dem Software- oder Produktlebenszyklus und die gemeinsame Nutzung von Daten des Softwarelebenszyklus. Unterschiedliche Arbeitsgruppen innerhalb der OSLC-Initiative untersuchen für bestimmte Szenarien die Integration von Werkzeugen aus Kategorien wie dem Änderungs-, Test-, Anforderungs- oder Konfigurationsmanagement und definieren ein gemeingültiges Vokabular für die entsprechenden Lebenszyklusartefakte, die diese Szenarien zu unterstützen. Dabei ist es nicht das Ziel von OSLC, das Verhalten oder die Leistungsfähigkeit eines spezifischen Werkzeugs aus den genannten Kategorien zu modifizieren oder zu standardisieren. [35]

2.11.3 Requirement Interchange Format (ReqIF)

Das Datenaustauschformat ReqIF wird für den Austausch von Anforderungen über eine Werkzeug- und Unternehmensgrenze hinaus, beispielsweise zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer, verwendet. Die Entstehung von ReqIF beruht auf einer Initiative von Automobilherstellern, deren Ziel es war, den Austausch von Anforderungen zwischen Automobilherstellern und Zulieferern zu fördern. [9, Kapitel 1.4]

2.11.4 Functional Mock-up Interface (FMI)

Die Daimler AG war der Ausgangspunkt für die Entwicklung des Functional Mock-up Interfaces (FMI) mit dem Ziel, den standardisierten Austausch von Simulationsmodellen zwischen Automobilherstellern und ihren Zulieferern zu verbessern. Heute ist FMI ein werkzeugunabhängiger Standard, der sowohl den Modellaustausch als auch die Co-Simulation dynamischer Modelle ermöglicht. FMI nutzt hierbei eine Kombination aus XML-Dateien und kompiliertem C-Code. Der Anwendungsbereich geht über die Automobilbranche hinaus. [36]

2.12 Beispielhafte Umsetzung von MBSE

Abschließend trägt ein kurzes Beispiel aus [16, Kapitel 1.1] zum Begriffsverständnis bei und beantwortet anschaulich die Frage: „Was ist MBSE?“

Ein Systemarchitekt beschließt innerhalb der Systemhierarchie die Separierung eines beliebigen Systembausteins, nachfolgend Block genannt, in zwei einzelne Blöcke für eine spezifischere inhaltliche Unterscheidung. Daraufhin benennt er den ursprünglichen Block um. Diese Änderung erfordert nun nachfolgend weitreichende Aktivitäten, um die Konsistenz und Vollständigkeit aller Daten zu bewahren: der Systemarchitekt muss alle Dokumente, Tabellen, Diagramme und sonstigen Elemente, die auf den veränderten Block referenzieren, identifizieren und die Modifikation in alle Artefakte einpflegen.

Diese Herangehensweise ist zeitaufwendig und fehlerträchtig. Vertippt sich der Architekt oder übersieht ein betroffenes Artefakt, so führt dies zu großen Problemen im weiteren Entwicklungsprozess. Es kommt zu Inkonsistenzen und verzögerten Folgeprozessen. Der beschriebene Fall ist ein häufig auftretendes Problem bei der Anwendung des dokumentbasierten Systems Engineering Ansatzes.

Ein Systemarchitekt in einer modellbasierten Entwicklungsumgebung beschließt ebenfalls die Umbenennung eines überarbeiteten Blocks, um dessen Zweck genauer definieren zu können. Die Umsetzung dieser Modifikation geschieht nun konträr zum ersten Szenario: der Architekt lokalisiert den betreffenden Block innerhalb der Systemmodellhierarchie und fügt dort den neuen Namen einmalig ein. Das Modellierungswerkzeug verbreitet automatisch die Änderung innerhalb des Systemmodells in allen Artefakten. Vollständigkeit und Konsistenz sind gewahrt.

3 Allgemeine Anforderungen an den MBSE-Einsatz und Definition von MBSE-Archetypen

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen, welche grundsätzlichen Bedarfe von Anwendern an eine modellbasierte Entwicklung gestellt werden und insbesondere welche Anforderungen die Modellierungswerkzeuge erfüllen müssen.

Im Abschnitt 3.1 wird zunächst darauf eingegangen, welche vorteilhafte Eigenschaften eine MBSE-Anwendung mit sich bringt. Im darauffolgenden Abschnitt werden die Erfolgsfaktoren erläutert, die generell bei der Implementierung und Anwendung von MBSE in einem Unternehmen zu beachten sind. Aus diesen Faktoren leiten sich allgemeine Anforderungen an die Anwendung von MBSE ab (Abschnitte 3.2 und 3.3).

Der darauffolgende Abschnitt 3.4 ist von Bedeutung, weil hier die Definition von sogenannten Archetypen stattfindet und die Basis für deren Untersuchung gelegt wird.

3.1 Nutzen und Potentiale von MBSE

Anhand der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Charakteristika von MBSE, alle zu einer Systemspezifikation gehörenden Informationen besser erfassen, analysieren und verteilen zu können, leiten sich mehrere Vorteile ab. Zum essentiellen Nutzen der Anwendung von MBSE bei der Entwicklung komplexer Systeme gehören:

- Erleichtertes Komplexitätsmanagement durch die Generierung eines Systemmodells, das von verschiedenen Sichten aus betrachtet werden kann und in dem die Änderungen nachverfolgt werden können. [7, S. 13-16]
- Verbesserte Kontrolle der Komplexität aufgrund der Möglichkeit, Leistungskennzahlen (engl.: key performance indicators (KPIs)) aus dem Systemmodell automatisch zu erzeugen. [14]
- Erhöhte Konsistenz und Nachvollziehbarkeit aller technischen Informationen und Ergebnisse von Entwicklungsaktivitäten durch ein widerspruchsfreies Systemmodell. [7, S. 189]
- Verbesserte Wissenserfassung und nachhaltigeres Wissensmanagement durch formalisierte Versionierung, Management und Pflege technischer Daten; folglich frühzeitige Verifizierung von Informationen. [11]
- Erhöhte Wiederverwendbarkeit von Wissen und Lösungselementen durch die standardisierte Wissenserfassung. [7, S. 189]
- Tieferes Verständnis und verbesserte Kommunikation unter allen an der Entwicklung beteiligten Stakeholdern durch leicht zugängliche Informationen im Systemmodell, durch eine einheitliche Notation und durch die Visualisierungsmöglichkeiten abstrakter Systembeziehungen. [14]

Zusammenfassend hat der anforderungsgerechte Einsatz von MBSE-Tools und -Methoden das Potential zu einer höheren Projekt- und Unternehmensperformance, die sich unter anderem in Form von verbesserten Projektergebnissen, weniger Änderungsmaßnahmen und der damit einhergehenden Kostensenkung bei verbesserter Produktqualität abzeichnet. MBSE kann demzufolge die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens deutlich steigern.

3.2 Grundsätzliche Erfolgsfaktoren und Anforderungen an den MBSE-Einsatz

Die erfolgreiche Implementierung von MBSE im Unternehmen basiert auf vielschichtigen Faktoren, aus denen sich grundsätzliche Anforderungen an die Einführung und Anwendung von MBSE-Tools und -Methoden ableiten.

Um den Nutzen und die Potentiale aus Abschnitt 3.1 realisieren zu können, gilt es die folgenden Erfolgsfaktoren und Anforderungen zu beachten.

Eine maßgebliche Voraussetzung ist die ausreichende Mitarbeitermotivation, denn der Faktor Mensch spielt bei der Einführung von MBSE eine entscheidende Rolle. Zu Beginn bedarf es eines grundsätzlichen Umdenkens aller Mitarbeiter, um das Gefühl einer Dringlichkeit zu erzeugen und eine neue Mentalität zu erschaffen. Durch die richtige Kommunikation, Mitnahme und Motivation der späteren Anwender kann die Einführung und Umsetzung von MBSE gelingen. Dazu tragen zum einen Engagement und Verbindlichkeit auf der Führungsebene und zum anderen die frühzeitige Einbindung aller Stakeholder positiv bei. Vor der praktischen MBSE-Anwendung ist vor allem auch für eine entsprechende Qualifizierung und ein einheitliches Methoden- und Prozessverständnis unter den Mitarbeitern zu sorgen. [37]

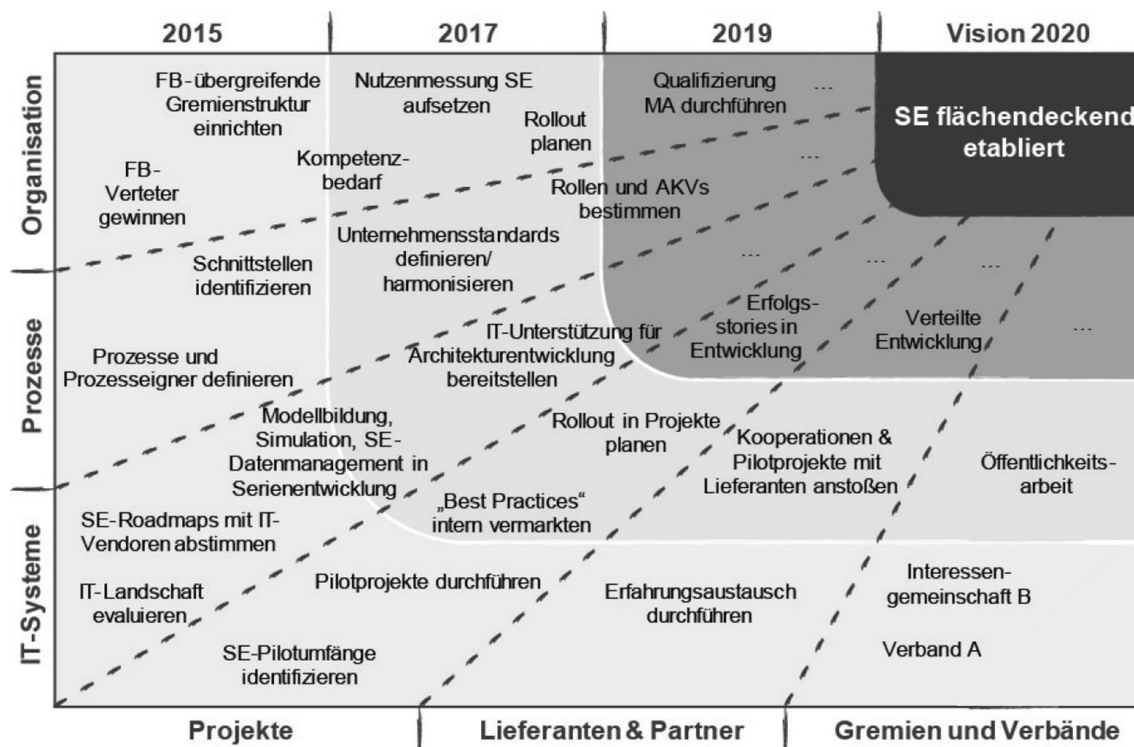


Abb. 3–1: Beispielhafte Roadmap zur Etablierung von (MB) SE (adaptiert von [6, S. 22])

Zur erfolgreichen Einführung von MBSE trägt außerdem ein adäquates Veränderungsmanagement bei. Hierzu gehören eine zu Beginn eingeführte, einheitliche Definition der Begriffe SE und MBSE sowie die schrittweise Etablierung der neuen Prozessaktivitäten. Es empfiehlt sich, konkrete Pilotprojekte für die unternehmensspezifische Anpassung der SE- und MBSE-Vorgehensweisen auszuwählen. [6] Zur Kontrolle und Einordnung abgeschlossener und anstehender Änderungen kann eine Roadmap hilfreich sein. Die Roadmap, wie sie beispielhaft in

Abb. 3–1 gezeigt ist, gibt Aspekte einer Änderungsstrategie in verschiedenen Gestaltungsfeldern über die Zeit wieder. [6]

Eine weitere Anforderung ist die Wirtschaftlichkeit. Laut einer Studie mit MBSE-Experten zählt der Initialaufwand mit zu den größten Hindernissen bei der Einführung von MBSE. [38, S. 31f.] Noch bevor sich der eigentliche Nutzen des (modellbasierten) Systemansatzes zeigt, müssen hohe Investitionen getätigt werden. Dazu gehören unter anderem die Umschulung der Mitarbeiter sowie die Lizenzierung und Implementierung von MBSE-Softwaretools und deren Vernetzung in die im Unternehmen existierende Entwicklungsumgebung. [38]

Die zentrale Verantwortung der Einführung von SE und MBSE gehört ebenfalls zu den Erfolgsfaktoren. C. Knop *et al.* [37] schlagen hierfür die Installierung eines Systems Engineering Office (SEO) vor. Das SEO ist als zentrale Stabsstelle auf höchster Managementebene angesiedelt und signalisiert somit seine Bedeutung und Verbindlichkeit. Es übernimmt Verantwortung für die technischen Prozesse, Rollen und Methoden sowie für Kommunikation, Wissensmanagement und Qualifizierung der Anwender. [37]

Das Verhältnis zwischen dem sofort sichtbaren hohen Initialaufwand und dem später resultierenden Nutzen kann insbesondere auf Managementebene schnell auf Ablehnung stoßen. Wird der Nutzen einer Änderung aber quantifizierbar, so steigt die allgemeine Akzeptanz. Für die Messung dieses Nutzens stehen entsprechende Leistungskennzahlen (KPIs) zur Verfügung. Die Kennzahlen werden auf Unternehmens-, Prozess- und Projektebene erhoben. Dazu gehören beispielsweise: Durchlaufzeit von Entwicklungsprojekten, Time to Market, Fehlerhäufigkeit, Qualitätskosten, Projektanzahl mit Kosten- oder Terminüberschreitung. [6]

Eine durchgängige und abgestimmte Prozesslandschaft ermöglicht die Synchronisierung der Aktivitäten und Schnittstellen bei der Produkt- bzw. Systementwicklung. Es erweist sich meist als vorteilhaft, bei der Abstimmung und Modellierung der Prozesse auf Standards zurückzugreifen und diese an die eigenen Anforderungen anzupassen. [37] Der Standard ISO/IEC/IEEE 15288:2015 beinhaltet beispielsweise Richtlinien für die Generierung und Verknüpfung von Kernprozessen zur Synchronisation von Entwicklungsaktivitäten (vgl. 2.4.4).

Abschließend fasst die Tab. 3–1 die beschriebenen Erfolgsfaktoren und Anforderungen zusammen.

Tab. 3–1: Zusammenfassung der grundsätzlichen Erfolgsfaktoren und Anforderungen an die Einführung und Anwendung von MBSE

Erfolgsfaktor	Anforderung an Einführung und Anwendung von MBSE
„Erfolgsfaktor Mensch“	Frühzeitig für Motivation und Kompetenz aller Stakeholder sorgen.
Geeignetes Veränderungsmanagement	Neue Prozessaktivitäten frühzeitig ankündigen und stufenweise etablieren. Anhand von Pilotprojekten deren Umsetzbarkeit aufzeigen und Änderungen in einer Roadmap visualisieren.
Wirtschaftlichkeit	Hohen Initialaufwand koordinieren und kontrollieren und eine intelligente Wahl bezüglich der Methoden und Software treffen.
Zentrale Verantwortlichkeit	Verantwortung aller SE bzw. MBSE Belange in einer zentralen Stabsstelle bündeln und organisieren.
Quantifizierbarer Nutzen	Den Nutzen kontinuierlich durch Leistungskennzahlen (KPIs) quantifizierbar machen.

Anpassung der Prozesslandschaft	Standards für eine durchgängige Prozesslandschaft einhalten.
---------------------------------	--

3.3 Erfolgsfaktoren und Anforderungen in kleinen und mittelständischen Unternehmen

In kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) gelten im Vergleich zu größeren Unternehmen teilweise abweichende Anforderungen. KMUs sind Organisationen mit einer geringen Mitarbeiterzahl, oftmals weniger als 50. Sie wirken jedoch ungeachtet ihrer Größe entscheidend am Erfolg von großen Unternehmenssystemen und System-of-Systems mit. [7, S. 179] In der Regel existieren keine eigenen Abteilungen, die die Einführung und Kontrolle von neuen Prozessen verantworten. Vielmehr ist das Mitwirken eines möglichst großen Personenkreises erforderlich. [39] Darüber hinaus gibt es meist keine übergreifende Infrastruktur und die wenigen Mitarbeiter üben im Unternehmen mehrere verschiedene Rollen aus. [7, S. 179]

Die besonderen Herausforderungen in KMUs werden anhand der von V. Huckriede *et al.* [39] beschriebenen Ist-Situation von KMUs des Anlagen- und Sondermaschinenbaus deutlich. Kundenanforderungen sind meist kurz und unpräzise. Trotzdem fordern Kunden ein erstes Konzept bereits in der Angebotsphase. Wiederverwendbare (Teil-) Lösungen sparen hierbei Kosten und Zeit, sind jedoch nicht für alle kundenspezifischen, hochkomplexen Systeme einsetzbar. In Verbindung mit dem Zeitdruck erschwert die Systemkomplexität die Erfassung aller Zusammenhänge zwischen Anforderungen, Funktionen und Kosten. Zusätzlich stellt die Bewertung und Nachvollziehbarkeit von Änderungen ein großes Problem dar. [39]

Abgeleitet vom Standard ISO/IEC/IEEE 15288:2015 definiert die Standardreihe ISO/IEC 29110 weitere Charakteristika von KMUs sowie spezifische Konzepte für Lebenszyklusprozesse, Prozessverbesserung und Standardisierung (vgl. 2.4.4).

Tab. 3–2 fasst die Erfolgsfaktoren und Anforderungen von KMU an die Implementierung und den Einsatz von MBSE zusammen.

Tab. 3–2: Zusammenfassung der speziellen Anforderungen von KMU an MBSE

Erfolgsfaktor	Spezielle Anforderung von KMU an MBSE
Anforderungserfassung	Kundenanforderungen sollen möglichst verständlich und präzise erfasst werden. [39]
Zusammenhang zwischen Anforderungen, Funktionen und Lösungselementen	Anforderungen sollen mit Funktionen bzw. Lösungselementen verknüpft sein, um eine Erfüllung der Anforderungen prüfen zu können. [39]
Änderungsmanagement	Änderungen und deren Auswirkungen sollen nachvollziehbar erfasst werden. [39]
Internes und externes Kommunikationsmedium	Verständliche Modelle sollen positiv zur internen, disziplinenübergreifenden Kommunikation beitragen. Für den besseren Austausch mit Kunden oder Lieferanten sollen einfache Modelle mit begrenztem Informationsgehalt generierbar sein. [39]
Skalierbarkeit der MBSE Prozesse, Methoden und Tools	Der Einsatz von MBSE soll pragmatisch und anforderungsgerecht sein. Deshalb sollten Inhalt und Umfang der jeweiligen MBSE-Anwendung an die Entwicklungsaktivitäten anpassbar sein. Der Modellierungsaufwand darf nicht unverhältnismäßig groß sein. [40]

Verwendung einer geeigneten Modellierungssprache	Die Syntax soll intuitiv anwendbar und leicht verständlich sein. Die Modellierungssprache soll semi-formale Arbeitsweisen unterstützen und durch eine repräsentative und ansprechende Visualisierung das Verständnis des Modells fördern. Der Formalisierungsgrad sollte gering bis mittel gehalten werden. [40]
Standardreihe ISO/IEC 29110	Die Prozesse dieses Standards können als Richtlinie gelten, sollen aber sinnvoll angepasst und nach Bedarf um die Prozesse des Standards ISO/IEC/IEEE 15288:2015 erweitert werden. [22]

3.4 Definition von MBSE-Archetypen

Um die Grundlagen dafür zu schaffen, wie ein geeignetes Modellierungstool von einem Unternehmen ausgewählt werden kann, wird der Begriff der Archetypen von Unternehmen eingeführt.

Der Ausgangspunkt für Archetypen sind nachfolgende zwei Kriterien:

- Randbedingungen in der Produktentwicklung eines Unternehmens anhand von Unterscheidungsmerkmalen und entsprechenden Merkmalsausprägungen (Unterscheidungsmerkmale sind zum Beispiel: Unternehmensgröße, Branche, Größe und lokale Verteilung der Entwicklungsteams, Domänenschwerpunkt der Systeme, ...)
- Anforderungen an MBSE-Tools (zum Beispiel: Wiederverwendung von Modellen, Vergabe von Lese- und Schreibrechten, Austausch von Informationen mit Kunden oder Zulieferern, ...)

Anhand dieser Parameter werden sogenannte Archetypen von Unternehmen definiert:

Ein Archetyp von Unternehmen ist definiert als die Kombination von einem Satz von Merkmalsausprägungen von Unternehmen mit einem Satz von spezifischen Anforderungen an ein MBSE-Tool.

Die aufgestellte Hypothese lautet:

„Es existieren mehrere, unterschiedliche Archetypen bezüglich der Anforderungen an ein MBSE-Tool.“

Die Hypothese impliziert, dass sich Unternehmen in Bezug auf ihre wichtigsten Anforderungen an MBSE-Tools unterscheiden und dass es mehrere, kombinierte Merkmalsausprägungen gibt, anhand derer sich die Unternehmen gruppieren lassen. Ein Beispiel für eine derartige Kombination wäre: „Große Unternehmen mit überwiegender Auftragsentwicklung und international verteilten Entwicklungsteams erheben als wichtigste Anforderungen an ein MBSE-Tool, dass es ein geeignetes Variantenmanagement bietet, aus Modellen textuelle Dokumente exportiert und die Sprache SysML unterstützt.“

Das Ziel ist es, Abhängigkeiten und Gemeinsamkeiten zwischen den beiden untersuchten Parametern zu identifizieren und zu überprüfen, ob sich daraus mögliche Archetypen von Unternehmen ableiten lassen und die aufgestellte Hypothese bestätigt werden kann.

4 Literaturrecherche zu Anforderungen an MBSE-Tools und Archetypen

Basierend auf der vorangegangenen Definition von Archetypen liegen der Literaturrecherche folgende Ziel- und Fragestellungen zugrunde:

- Welche generellen Anforderungen werden an MBSE-Tools gestellt?
- Besteht ein Zusammenhang zwischen den Randbedingungen in einem Unternehmen und den Anforderungen an ein MBSE-Tool?
- Unterscheiden sich Unternehmen bzw. Anwendungsbeispiele hinsichtlich ihrer konkreten Anforderungen an ein MBSE-Tool?
- Existieren die Archetypen von Unternehmen und falls ja, anhand welcher Kriterien oder Unterscheidungsmerkmale lassen sie sich unterscheiden?

Aus der Literatur werden nachfolgend 19 Anwendungsfälle von MBSE in der Industrie zusammengefasst und analysiert. Unter den Literaturbeispielen befinden sich zum Teil auch Beiträge, die unabhängig von einem konkreten Unternehmen die Anforderungen einer bestimmten Branche an den Einsatz von MBSE und Modellierungstools formulieren. Bei der Eingrenzung der Recherche wurde darauf geachtet, ein möglichst breites Spektrum an Branchen abzudecken.

4.1 Zusammenfassung der MBSE-Anwendungsbeispiele

In diesem Abschnitt werden die Anwendungsbeispiele aus der Literatur jeweils in Form einer Kurzfassung vorgestellt, um somit einen Einblick zu geben, wo und wie MBSE bereits eingesetzt wurde und welche Erfolgsfaktoren identifiziert wurden. Die jeweilige Zusammenfassung eines Beispiels versucht sich auf die wesentlichen Rahmenbedingungen und die Anforderungen an MBSE (vgl. Archetypen in Abschnitt 3.4) zu konzentrieren. Im Abschnitt 4.2 sind in Tab. 4–1 alle identifizierten Anforderungen übersichtlich dargestellt.

Die untersuchten Anwendungsgebiete waren die Raumfahrt- und Satellitentechnik, netzwerkzentrierte System-of-Systems, die Automobilindustrie, Defense & Aerospace, der Anlagen-, Sonder- und allgemeine Maschinenbau und Konsumgüter.

4.1.1 Raumfahrt- und Satellitentechnik

Raumfahrtsysteme erfordern aufgrund ihrer hohen Kosten und der physischen Sendung in den Weltraum eine extrem hohe Zuverlässigkeit. Schwerpunkte der Entwicklung liegen daher in den Bereichen Validierung und Verifikation, Test und Integration von hochentwickelten und verlässlichen Systemen. [7, S. 169]

Die nachfolgenden Beispiele aus dieser von niedrigen Stückzahlen geprägten Branche weisen nur sehr wenige, gemeinsame Anforderungen an MBSE auf. Vielmehr reichen die genannten Aspekte von der Wiederverwendung von Modellen über die Bedeutung des Systemmodells bis hin zur Modellierung der Aktivitäten in der Anforderungs- und Systemverifikation und -validierung. Herausforderungen bzw. Hürden für die Einführung und Anwendung werden in einem Beispiel genannt. In einem Einzelfall wurde bereits eine eigene Software zur Umsetzung von MBSE entwickelt.

4.1.1.1 Implementing Model Based System Engineering for the Whole Lifecycle of a Spacecraft [41]

In der Regel sind Satelliten und ihre Elemente speziell entwickelte Einzelanfertigungen, was deren Wiederverwendung erschwert. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt daher unter dem Projektnamen S2TEP (Small Satellite Experience Platform) eine wiederverwendbare Kleinsatelliten-Plattform. Ergebnisse der Satellitenbusentwicklung sollen wiederverwendbar und skalierbar sein, um auch in anderen Missionen eingesetzt werden zu können.

In diesem Projekt wird MBSE phasenübergreifend in Form der vom DLR entwickelten MBSE-Datenbank namens Virtual Satellite in den gesamten Lebenszyklus von S2TEP eingeführt. Eine entsprechende Input/ Output Funktionalität ist notwendig, mithilfe der die Prozessstakeholder verschiedene Informationen – von Konfigurationsdaten bis CAD-Dateien – aus dem Systemmodell herausziehen und bearbeiten und ihre Ergebnisse dorthin zurückführen. Der Vorteil besteht darin, dass dadurch Informationen zugänglich, konsistent und wiederholt verwendbar sind. Eine weitere Anforderung besteht in der Erweiterbarkeit und Anpassbarkeit des Systemmodells. Es muss beispielsweise möglich sein, die Prozesse sowie das Datenmodell an sich ändernde oder neue Anforderungen anzupassen.

4.1.1.2 Using the 'Model-based Systems Engineering' Technique for Multidisciplinary System Development: Satellitenentwicklung und Bus-Systeme am Beispiel des Satelliten MOVE [42]

Die Entwicklung von Satelliten ist stark kundengetrieben. Die Anforderungsanalyse stützt sich maßgeblich auf den Einsatzzweck des Kunden und wird für einen oder ein paar wenige Satelliten durchgeführt. Es sind nur wenige Zulieferer involviert und der Bedarf für Produktvariationen ist sehr gering.

Im Rahmen des studentischen Projekts MOVE (Munich Orbital Verification Experiment) an der Technischen Universität München wird der komplette Entwicklungsprozess für einen kleinen Satelliten durchgeführt. C. Eckl *et al.* [42] nennen für das Entwicklungsprojekt folgende wesentlichen Erfolgsfaktoren und Anforderungen an den MBSE-Einsatz:

- Ableitung von Anforderungen anhand von Anwendungsfällen
- ein Überblick gebendes Systemmodell früh im Entwicklungsstadium
- handhabbare Verknüpfung zwischen Systemmodell und Entwicklungsmodellen (z.B. CAD-Modelle)
- ein alleinig variantenbildendes, strukturelles Instanzenmodell

Das Systemmodell sollte darüber hinaus den allgemeinen Kontext, das Verhalten und die Struktur der verbundenen Elemente beinhalten. Dadurch wird die Abstimmung von globalen Sichten auf das System ermöglicht.

4.1.1.3 Effort to Accelerate MBSE Adoption and Usage at JSC [43]

Das Johnson Space Center (JSC), eine Forschungs- und Entwicklungseinrichtung der NASA, wendet seit 2009 Ansätze des MBSE mit SysML bei verschiedenen Projekten an. Für die Einführung und ganzheitlich verbreitete Anwendung von MBSE im JSC wurden drei zentrale Herausforderungen identifiziert. Die erste Hürde ist die Trägheit

in einer Organisation, deren Entwicklungsansatz in der Regel eher konservativ ist. Neue Modellierungssoftware zu erlernen, der Zeitaufwand der Modellierung und der Einsatz der neuen Modelle bedeuten zusätzliche Kosten und Aufwendungen, die die zweite Hürde darstellen. Die letzte zentrale Herausforderung besteht darin, einen Anfang mit einer neuen Methode zu machen. Selbst bei gegebener Bereitschaft für deren Einsatz existiert kein allgemein gültiger Strategie- und Zeitplan (vgl. Abb. 3–1).

JSC hat ein Regelwerk mit Methode, Richtlinien, Artefakten und Referenzmodellen für die Unterstützung der MBSE Projekte entwickelt. Die Bibliothek mit wiederverwendbaren Referenzmodellen beschleunigt in neuen Projekten die Modellierung. Während jeder Modellierung werden die als wiederverwendbar eingestuft Modelle in Form von Referenzmodellen in der Bibliothek abgelegt.

Darüber hinaus hat JSC eine Software zur Unterstützung der Modellierung entwickelt. Das Toolset besteht aus modellextrahierenden Tools und modellbildenden Tools. Erstere werden dazu eingesetzt, Informationen aus dem Systemmodell zu exportieren. Dazu gehören Stücklisten, Befehlsdatensätze, Telemetriedaten oder Anforderungen. Mit modellbildenden Tools werden Informationen in das Systemmodell importiert. Als Quellen dienen beispielsweise Excel-Tabellen oder zweidimensionale Zeichnungen.

4.1.1.4 Integrating MBSE into Ongoing Projects: Requirements Validation and Test Planning for the ISS SAFER [44]

Das Sicherheitsmodul SAFER (Simplified Aid for Extra Vehicular Activity Rescue) wird von jedem Astronauten getragen, der Einsätze außerhalb der Raumstation ISS (International Space Station) ausführt. SAFER ist die letzte Sicherheitsmaßnahme, damit ein Astronaut nicht von der ISS getrennt wird. Während des Weiterentwicklungsprojektes „ISS SAFER“ wurde MBSE selektiv für die Validierung von Anforderungen und die Planung von Test und Verifikation angewendet.

Aufgrund von Überarbeitungen an der Avionikstruktur, von zusätzlichen Funktionen bei Wartungen im Orbit und aufgrund von erweiterten Zertifizierungsansprüchen für laufende Systeme auf der ISS mussten die ursprünglichen Grundanforderungen erweitert werden. Um die neue Anforderungsbasis validieren zu können, wurden die Systemarchitektur, die Schnittstellen und die Systemfunktionen modelliert. Die Gegenüberstellung von Anforderungen und Systemelementen führte zu einer Identifikation und Korrektur von vielen, offensichtlich fehlenden Verknüpfungen.

Durch den Einsatz von MBSE konnten die Aktivitäten bei der Systemverifikation und -validierung sowie bei der Systemabnahme modelliert werden und die Komplexität bei der Anforderungserhebung sicher beherrscht werden. MBSE ermöglichte außerdem die automatisierte Erstellung von Vorgehensplänen für Analysen und Verifikationstests und deren Dokumentation.

4.1.2 Netzwerkzentrierte System-of-Systems

In diesem einen speziellen Bereich von MBSE-Anwendungen werden Petri-Netze eingesetzt, um die Systemarchitektur zu simulieren und anschließend zu validieren.

4.1.2.1 Modeling and simulation of net centric system of systems using systems modeling language and colored Petri-nets [45]

Das Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) ist ein weltweites Erdbeobachtungssystem und zählt zu den netzwerkzentrierten Systemen von hoher Komplexität, die durch viele Schnittstellen und Interaktionen der Systemelemente untereinander charakterisiert sind.

Um dessen Struktur und Verhalten zu verstehen, wurde GEOSS mithilfe eines objektorientierten Entwicklungsansatzes modelliert und simuliert. Der Fokus der Modellierung lag auf der Systemarchitektur, die mithilfe der SysML erzeugt wurde. Entsprechende Blockdiagramme (vgl. Abb. 2–7 in 2.10) wurden nach ihrer Erstellung in farbige Petri-Netze konvertiert, um ein ausführbares Modell zu generieren. Die Petri-Netze dienen anschließend der Simulation und Validierung der Systemarchitektur. Stellte sich in der Simulation des ausführbaren Modells heraus, dass das geforderte Systemverhalten nicht hergestellt werden konnte, so war das Architekturmodell zu modifizieren. Nach der Modifikation folgten iterativ die Schritte Konvertierung, Simulation und Validierung, bis alle Anforderungen erfüllt waren.

4.1.3 Automobilindustrie

Die Automobilindustrie ist gekennzeichnet durch ein hohes Produktionsvolumen mit einer großen Vielfalt an Produkten. In dieser stark kostengetriebenen Branche spielen Kosteneinsparungen und Wiederverwendbarkeit von Bauteilen eine besondere Rolle. Zu den Komplexitätstreibern gehören unter anderem die zunehmende Anzahl an Fahrzeugfunktionen, steigende Sicherheitsanforderungen, vermehrte Beschränkungen durch Umwelt und Gesetzgebung und zunehmende Trends zur Elektromobilität und zum autonomen Fahren. [7, S. 165]

Von besonderer Bedeutung sind aufgrund der Nennungen in mehreren Beispielen die Anforderungen Varianten- und Instanzenmanagement, Modellierung der Systemanforderungen und der Schnittstellen innerhalb des Systems oder über die Systemgrenzen hinweg sowie die Simulation und Absicherung des Systemverhaltens. In den sechs Automobilbeispielen gilt jedoch wie bereits in der Raumfahrttechnik auch ein breites Spektrum an Anforderungen, welche jeweils nur in einem bestimmten Anwendungsfall genannt werden. In einem Beispiel wird die Gültigkeit der allgemeinen Anforderung einer homogenen Toolandschaft kontrovers diskutiert und eine Empfehlung gegeben, welche Anforderung einfach zu realisieren wäre. Ebenfalls in nur einem Beispiel findet ein reduzierter MBSE-Ansatz Verwendung, da die MBSE-Kenntnisse der Ingenieure gering war und der Aufwand niedrig gehalten werden sollte.

4.1.3.1 Using the 'Model-based Systems Engineering' Technique for Multidisciplinary System Development: Fahrzeugtechnik und Bus-Systeme [42]

Ein strukturelles Systemmodell in der Automobilindustrie beinhaltet oftmals viele mögliche Elemente, die theoretisch im Fahrzeug verbaut werden können. Man spricht von einem „150%-Systemmodell“, von dem einzelne Instanzen, also Fahrzeugvarianten, abgeleitet werden. Die große Variantenvielfalt ist den unterschiedlichen Kundenwünschen geschuldet. Daraus resultiert die Forderung nach hoch flexiblen Bauteilen, was unter anderem durch entsprechende Bus-Systeme gewährleistet werden kann. Ohne eine zentrale Steuerung, wie sie beispielsweise bei

Satelliten existiert, besteht die Herausforderung darin, alle Kommunikationswege sowie möglichen Signal-Schnittstellen zwischen den Systemkomponenten zu kennen. Somit ist die Verhaltensbeschreibung, zum Beispiel in Form von Zustands- und Aktivitätsmodellen (vgl. Abb. 2–7 in 2.10), von besonderer Wichtigkeit. Nach C. Eckl *et al.* [42] ist das Systemmodell selbst bereits ein großer Erfolgsfaktor, da es das Auffinden von Komponenten, die von Änderungen der Schnittstellen betroffen sind, die Validierung von bestimmten Bauteilkombinationen sowie die Dokumentation des Entwicklungsprozesses ermöglicht.

4.1.3.2 Prinzipien, Anwendung, Beispiele, Erfahrung und Nutzen aus Praxissicht: MBSE beim Automobilzulieferer GKN Driveline [46]

GKN Driveline ist ein global tätiger Systemanbieter im Automobilbereich und entwickelt Fahrzeugkomponenten für den Antriebsbereich. Zu den erwarteten Vorteilen der MBSE-Einführung in die Entwicklung gehören die Qualitätsverbesserung der Produkte sowie die frühzeitige Absicherung der Systemintegration in das Gesamtfahrzeug. Die frühzeitige Definition von Systemkontext und Systemgrenzen ist dabei von besonderer Bedeutung. Insbesondere wird dadurch von Beginn der Entwicklungsphase an das Gesamtsystem mit all seinen Wechselwirkungen überblickt und effektiv diskutiert.

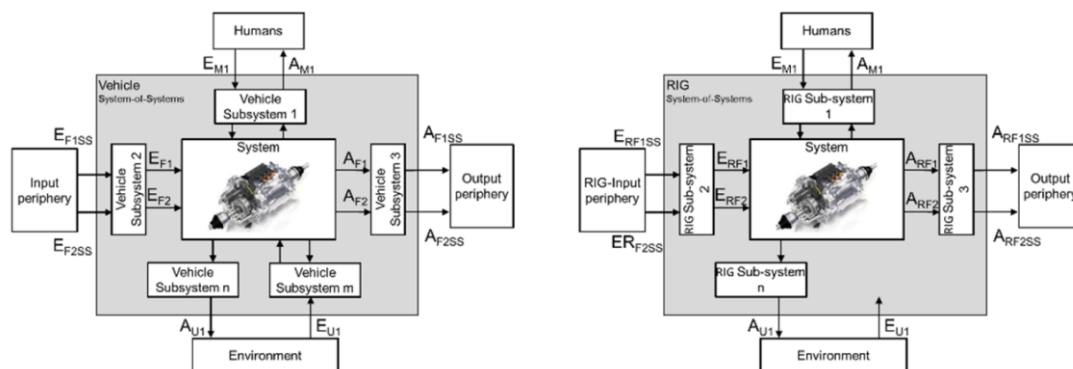


Abb. 4–1: Systemkontextmodelle in den Lebensphasen „Nutzung“ (links) und „Versuch“ [46, S. 17]

Um den gesamten Produktlebenszyklus zu berücksichtigen, werden bei GKN für die jeweiligen Lebensphasen eigene Systemkontexte mit unterschiedlichen Sichten (vgl. 2.7) modelliert. Abb. 4–1 zeigt beispielhaft den modellierten Systemkontext für die Phasen der Nutzung und der Prüfstandsversuche. Bei der Erstellung der Systemarchitektur wird das System im Systemkontext zunächst als Blackbox-Modell betrachtet, um den Fokus auf die Schnittstellen zu betroffenen Umgebungselementen zu lenken. GKN leitet aus dem Blackbox-Modell die logische Systemarchitektur ab, einschließlich aller für die Hauptfunktionen relevanten Teilfunktionen.

4.1.3.3 Modellbasierte Entwicklung bei Automobil-OEMs und Zulieferern [47]

Aus technischer Sicht liegt der Schwerpunkt der Automobil-OEMs (Original Equipment Manufacturer) in der Auswahl der zugelieferten Fahrzeugkomponenten und in deren Integration in das Gesamtfahrzeug. Aus diesem Grund sind die frühen Entwicklungsphasen in Form des Anforderungsmanagements sowie die späten Phasen der Systemintegration inklusive Test und Absicherung besonders wichtig. Basierend auf den gegebenen Anforderungen entwickeln die Zulieferer Subsysteme

und agieren in den „mittleren“ Entwicklungsphasen. Dazu gehören Systemdesign, Umsetzung und Bauteiltests. Eine gemeinsame Anforderung von OEM und Zulieferer an eine modellbasierte Entwicklungsumgebung ist daher oftmals die Verwendung einer homogenen Toollandschaft. Dies wiederum führt zu verschiedenen Konflikten. Eine gemeinsame Datenbank ermöglicht zum einen die unternehmensübergreifende Wiederverwendung von Prozessartefakten, andererseits gefährdet sie die Bewahrung des geistigen Eigentums des jeweiligen Unternehmens. Darüber hinaus arbeiten OEMs mit vielen in der Regel konkurrierenden Zulieferern zusammen und umgekehrt. Deshalb ist es für beide Parteien nicht möglich, die eigene Toolumgebung immer komplett an die des Entwicklungspartners anzupassen.

Die beschriebenen Herausforderungen bei der Zusammenarbeit von OEMs und Zulieferern erfordern somit einen MBSE-Ansatz, der die Konflikte mit beidseitigem Nutzen lösen kann. M. Broy *et al.* [47] schlagen statt einer stringent homogenen Toollandschaft eine dezentrale Lösung mit ausgereifter Zugangskontrolle vor. Statt der Anpassung der verschiedenen Entwicklungssoftware wird vorgeschlagen, in einem ersten Schritt die innerbetrieblichen Entwicklungstools zu homogenisieren und erst dann Software der Entwicklungspartner einzubeziehen.

4.1.3.4 Einsatz von MBSE in der Automobilindustrie [48]

Zu Beginn der Fahrzeugentwicklung sind alle Stakeholder, zu denen neben dem Fahrzeugkäufer auch die an der Entwicklung beteiligten Ingenieure gehören, zu identifizieren, zu analysieren und zu modellieren. Aus möglichen Anwendungsfällen werden anschließend die Anforderungen an das System hergeleitet und modelliert. Basierend auf den bisherigen Schritten leiten sich Systemarchitektur und -verhalten ab. Im Zuge dessen müssen oftmals Varianten einer Komponente ausgelegt und bewertet werden. Als Grundlage für die Bewertung werden die Ergebnisse von (numerischer) Simulation und Auslegungsrechnungen herangezogen. Nach der Festlegung von Struktur und Verhalten ergibt sich abschließend ein deskriptives SysML-Systemmodell, aus dem sich einzelne Instanzen, also konkrete Systeme, ableiten.

In [48] werden verschiedene Ansätze zur Verknüpfung der numerischen Simulation mit dem domänenübergreifenden Systemmodell beschrieben. Voraussetzung für die Simulation der Systemfunktionen mit externen Simulationstools ist die Erweiterung des deskriptiven Systemmodells um eine „Simulations-Ansicht“. In dieser Sicht werden die für die numerische Simulation benötigten Attribute, Parameter und mathematische Funktionen bereitgestellt.

Zu den weiteren Erfolgsfaktoren gehören ein gemeinsames Systemverständnis für die domänenübergreifende Modellierung, Simulation und Absicherung sowie die eindeutige Schnittstellenbeschreibung innerhalb des Systems.

4.1.3.5 Skalierter Einsatz von MBSE bei einer Produktentwicklung in der Landtechnik [49]

In diesem Anwendungsfall geht es um ein Projekt eines führenden OEMs aus der Landtechnik. Die Vorgaben des Auftraggebers für die Entwicklung eines Bremsfahrzeugs waren unter anderem ein geringer Modellierungsaufwand, pragmatisches Vorgehen und ein positives Nutzen-Aufwand-Verhältnis. Es galt

außerdem zu berücksichtigen, dass in der Entwicklungsabteilung kaum Kenntnisse in den Bereichen MBSE oder SysML vorhanden waren. Diese Rahmenbedingungen führten zu einem skalierten und reduzierten MBSE-Ansatz, der unter anderem den Verzicht auf bestimmte SysML-Diagrammarten bedeutete.

Im angepassten MBSE-Prozess wurden aus dem Lastenheft modellbasiert Anforderungen abgeleitet. Im nächsten Schritt wurden Systemkontext und potentielle Schnittstellen des Systems zur Umgebung definiert. Die Softwarearchitektur für die Steuerung des Fahrzeugs gehörte in diesem Fall ebenfalls zum Strukturmodell. Die Modellierung des Systemverhaltens beschränkte sich auf die Kernfunktionen.

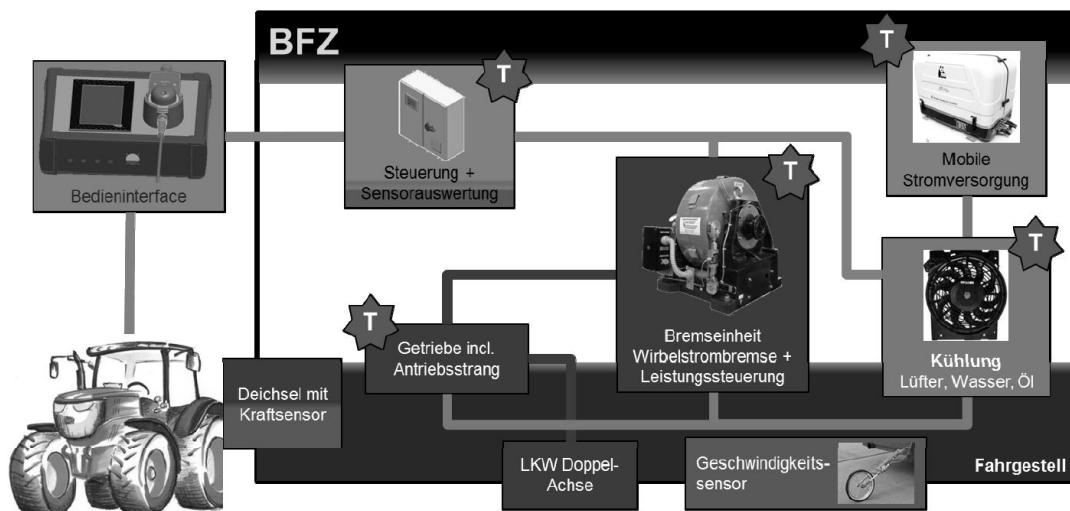


Abb. 4–2: Graphisches, nicht-formales Diagramm des Bremsfahrzeugs (BFZ) [49, S. 321]

Nach Projektabschluss gab es Kritik an den SysML-Diagrammen. Die Darstellungsweise sei für eine übergeordnete Betrachtung – beispielsweise die des Endkunden oder Managements – zu abstrakt. Zu einem leichteren Verständnis sowie besseren Gesamtüberblick diene auf dieser Ebene die graphische Übersicht mit bildhaften Objekten. Abb. 4–2 zeigt diese Art der nicht-formalen Modellierung.

4.1.3.6 MBSE und Requirements Engineering als verknüpfte Methoden der Hybridantriebsentwicklung: MBSE bei der AVL GmbH [50]

Die AVL GmbH ist unter anderem in der Entwicklung hybrider Antriebsstränge tätig und sieht sich somit den Herausforderungen der Systementwicklung in der Automobilindustrie gegenübergestellt. Zentrale Elemente in der Entwicklung von AVL sind die Systemspezifikationen im Sinne der System- und Schnittstellenbeschreibung und die Anforderungsdefinition auf verschiedenen Systemlevels. Dabei gilt es, die Nachvollziehbarkeit von Informationen und deren Quellen domänenübergreifend zu gewährleisten, um Entwicklungsentscheidungen und -änderungen fundiert begründen zu können.

Die wesentlichen Erfolgsfaktoren des modellbasierten Entwicklungsansatzes bei AVL sind die Vermeidung von Redundanzen und Inkonsistenzen durch die einheitliche Informationsquelle in Form von nur einem Systemmodell, die Vernetzung von Teilsystemen im Gesamtsystem und dadurch erkannte Abhängigkeiten von

Teilsystemen sowie die durchgängige Bewertung von Änderungen in Subsystemen auf das Gesamtsystem.

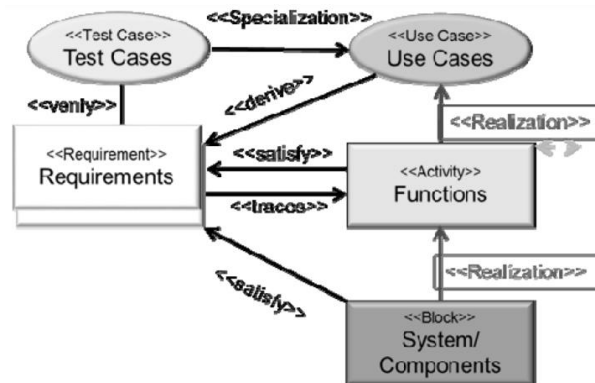


Abb. 4–3: Metamodell zur Verknüpfung von Spezifikationselementen und Anforderungen [50, S. 326]

Als Schlüsselmaßnahme für einen effektiven Modellierungsansatz nennt AVL die Integration des Anforderungsmanagements (engl.: Requirements Engineering) in die modellbasierte Systementwicklung und hierbei insbesondere in die Prozesse der Systemspezifikation. In einem sogenannten Metamodell in Abb. 4–3 werden Zusammenhänge zwischen den Spezifikationselementen (z.B. Anwendungsfälle, Funktionen, Komponenten) und den Anforderungen hergestellt. Dadurch werden offene Verknüpfungen frühzeitig erkannt.

Für den Einsatz von MBSE bei AVL gelten folgende Anforderungen:

- Spezifikations- und Anforderungsartefakte sollen auf verschiedenen Abstraktionslevels detailliert werden können.
- Kundenziele und Rahmenbedingungen sollen durch den Systems Engineer bereitgestellt werden. Das Anforderungsmanagement soll diese dann in eine Datenbank einpflegen und verwalten.
- Systemspezifikationen oder Anforderungsdokumente sollen für den internen oder externen Gebrauch automatisiert erzeugt werden können.
- Eine Software-Schnittstelle soll für den Datenaustausch und für die Synchronisation zwischen dem Tool des Anforderungsmanagements und dem Systemmodellierungstool hergestellt werden.

4.1.4 Defense & Aerospace

Der Ursprung von SE liegt in den Systemen aus der Verteidigungs- und Luftfahrtindustrie des 20. Jahrhunderts. Derartige Systeme sind komplexe technische Systeme mit sehr vielen Stakeholdern und eng getakteten Entwicklungszeitplänen. Weitere Charakteristika sind der Einsatz der Systeme unter widrigen Bedingungen sowie lange Systemlebenszyklen. Die meisten derartigen Systeme weisen eine hohe Interaktion mit ihren unmittelbaren Nutzern auf, sodass die Integration einer effektiven Mensch-System-Schnittstelle besonders wichtig ist. [7, S. 167]

In den untersuchten Beispielen werden im Vergleich zu anderen Branchen überwiegend verschiedene Anforderungen an den MBSE-Einsatz und seine Tools genannt. In einem Fall wird sogar sehr konkret darauf eingegangen, dass das

Modellierungstool den Austausch von XML-Dateien unterstützen soll. Wie bereits in anderen Branchen wurden auch in Defense & Aerospace das Variantenmanagement, das Systemmodell und die Wiederverwendung von Modellen gefordert. Neu hingegen war, dass MBSE für die Vergleichsstudie zweier unterschiedlicher Systeme verwendet wird und dass Anwendungsszenarien modelliert werden.

4.1.4.1 Introducing MBSE by using Systems Engineering Principles: Einführung von MBSE bei Saab AB [51]

Saab AB entwickelt unter anderem Luftfahrtsysteme für die militärische Verteidigung und Zivile Sicherheit. Es handelt sich hierbei um hochkomplexe Systeme, in denen das wichtigste Systemelement der Mensch selbst darstellt. Der treibende Faktor für die Einführung von MBSE waren Schwierigkeiten bei der Beschreibung und Dokumentation von Systemarchitektur und -design bei Saab Electronic Defence Systems. In den vorhandenen Entwicklungsstrukturen waren Inkonsistenzen ein großes Problem. Es kam beispielsweise vor, dass Dokumente zur Systembeschreibung eine Mischung aus Anforderungen und mechanischen Daten enthielten. Mit der Einführung von MBSE erhoffte sich Saab AB den Übergang von der dokumentenzentrierten zur modellbasierten Entwicklung und alle damit verbundenen Vorteile (vgl. Abschnitt 3.1).

Die Einführung von MBSE stand mehrmals vor dem Scheitern und musste wiederholt neu gestartet werden. Bezogen auf den Einsatz von MBSE resultierten diese Anforderungen:

- Beibehaltung von lesbaren Dokumenten: Text und Diagramme sind ein essentieller Bestandteil der modellbasierten Systemdefinition.
- Trennung der verschiedenen Informationsarten: Anforderungen, Architektur, Design und Umsetzung sollten nicht vermischt werden.
- Berücksichtigung der Bedarfe der Informationsempfänger des Modells.
- Bereitstellung von Versions- bzw. Änderungsmanagement und Variantenmanagement.

4.1.4.2 Insights from Large Scale Model Based Systems Engineering at Boeing [27]

Zulieferer von Boeing sind global verteilt und unterscheiden sich hinsichtlich Software, Dateiformaten und Freigabezeitplänen. MBSE stellt für die Koordination aller Aktivitäten mit Zulieferern ein geeignetes Koordinations- und Datenmanagement bereit. Die Abstimmung der Anforderungen und die Schnittstellendefinition gelingen hierbei durch eine Systemmodellierung besser als durch Dokumente. Bei Boeing hat neben der Anforderungsqualität die frühe Fehlerdetektion einen sehr großen Effekt auf die Risikoreduzierung bezüglich Kosten und Zeit.

Grundvoraussetzung für die Handhabung der globalen Zuliefererbasis und der Kosten- und Zeitplanrisiken sind bei Boeing große, umfassende Systemarchitekturmodelle. In einem Architekturmodell werden Anforderungen und Funktionen mit ihren zugehörigen Systemelementen verknüpft. Das bedeutet, die Anwendbarkeit der Teilsystemlösungen wird ständig kontrolliert und Fehler werden frühzeitig bemerkt, noch bevor sie in das Gesamtdesign einfließen können. Durch die Modellierung

werden außerdem Ausfälle bei Flugstabilitätstests reduziert, da zum einen ein höherer Reifegrad der Flugmodelle erreicht wird und zum anderen viele Fehler bereits bei der Modellierung der Systemmodelle detektiert werden.

R. Malone *et al.* [27] von Boeing gewinnen aus dem Einsatz von MBSE unterschiedliche Erkenntnisse. Mit zunehmender Modellreife ist es für den Anwender nicht mehr möglich, die kompletten Strukturen in Diagrammen oder Visualisierungen zu verstehen. Spezifische Sichten des Systemarchitekturmodells helfen, nur die jeweils relevanten Informationen darzustellen. Für die Wiederverwendbarkeit von Komponenten in neuen Flugzeugtypen werden außerdem Input/ Output Mechanismen benötigt, mit denen Informationen oder Komponenten aus alten Systemmodellen in neue Systemmodelle importiert bzw. exportiert werden können. Ein weiterer Aspekt ist die Veröffentlichung des digitalen Netzwerkmodells als XML-Datei (vgl. 2.11.1), jeweils verknüpft mit einer zugehörigen Bauteilnummer. Anhand der XML-Datei können viele Zulieferer ihre Software direkt konfigurieren.

4.1.4.3 Application of Model-Based Systems Engineering to compare legacy and future forces in Mine Warfare missions [52]

Die Abwehr von Seeminen stellt eine extreme Herausforderung für das durchführende Personal der Minenaufklärungsoperationen dar. Ein neuer Ansatz der U.S. Navy sieht vor, unbemannte Apparaturen zur Entschärfung von Minen von einem Schiff von außerhalb des Minenfeldes zu steuern.

Bei der Durchführung der Vergleichsstudie zwischen neuer und alter Minenjagd wurde MBSE angewendet. Nach Untersuchung der Prozessinputs (zum Beispiel Stakeholderziele) wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt, um das Problem zu definieren und übergeordnete operative Konzepte und Szenarien zu entwickeln. Daraus leiteten sich in der Funktionsanalyse die funktionalen Architekturen ab. Die physikalische Synthese erstellte daraus ausführbare, digitale Modelle. Anschließend wurden alle Lösungskonfigurationen anhand von Modellierung und Simulation bezüglich Leistungsfähigkeit, Kosten und Risiken untersucht.

Jede Konfiguration der Missionsszenarien wurde mit ihren spezifischen Parametern, Aktivitäten und Komponenten als eigenes Modell abgebildet. Die Untersuchungen ergaben, dass alle Konfigurationen des neuen Minenjagdsystems bezüglich ihrer Wirksamkeit sowie der Durchführungs- und Systemerhaltungskosten besser als das ursprünglich verwendete System abschnitten.

4.1.4.4 Lessons learned from the Joint Tactical Radio System [53]

In den späten 1990er Jahren hatte das US-amerikanische Militär über 25 verschiedene Radiosysteme im Einsatz, die von verschiedenen Herstellern stammten. Ziel des Programms „Joint Tactical Radio System“ war deshalb eine neue Produktfamilie von Radiosystemen mit einer einheitlichen Architektur. Aus vielschichtigen Gründen, darunter der mangelhafte Einsatz von SE, endete das Programm zunächst ergebnislos. Kurz darauf wurde ein neues Projekt namens Integrated Communications Systems Model (ICSM) gestartet. Das wesentliche Resultat war eine Referenzarchitektur für Kommunikationssysteme. Ein Modellierungstool diente dabei der funktionalen Architektur, dem operationalen Verhalten und der Dekomposition des Systems in Subsysteme.

Grundlage für den modellbasierten Ansatz war ein SysML-Modell, das eine übergeordnete Sicht auf die generellen Architekturelemente eines Kommunikationssystems gab. Essenziell war dabei die funktionale Dekomposition, mit der alle Elemente funktionalen oder logischen Gruppen zugeordnet wurden. Das Ergebnis war ein Abhängigkeitsnetzwerk, das die Schnittstellenanforderungen innerhalb des Systems verdeutlichte. Neben der funktionalen Sicht galt es auch die operativen Anwendungsfälle und -szenarien mithilfe von Aktivitäts- und Sequenzdiagrammen zu erfassen. Der Systems Engineer konnte schrittweise durch alle Szenarien navigieren, um Fehler aufzudecken und Aktivitäten zu optimieren.

Im ICSM-Projekt wurden drei Erfolgsfaktoren identifiziert. Erstens, es existierte ein einziges Referenzmodell als Grundlage für das Systemdesign. Zweitens, das Modell diente als einzige Informationsquelle für die Generierung von Anforderungsdokumenten, Designspezifikationen und weiteren Dokumenten. Drittens, geographisch verteilten Entwicklerteams wurde unabhängig von Zeit und Ort der Zugriff auf das Modell und dessen Entwicklungsstatus ermöglicht.

4.1.5 Anlagen-, Sonder- und allgemeiner Maschinenbau

Anhand einer durchgeführten Umfrage unter Entwicklungsexperten ist der Verbreitungsgrad und Einsatz von MBSE im Anlagenbau im Branchenvergleich relativ gering. Aufgrund der individuellen Anpassung der Lösungssysteme an die speziellen Kundenanforderungen und aufgrund der niedrigen Losgrößen existieren nur selten wiederverwendbare (Teil-) Systemlösungen. Komplexe Anlagen sind oftmals für nur genau eine Umgebung konzipiert. Der Einführungsaufwand einer vernetzten MBSE-Toollandschaft sowie deren Einsatz in den verschiedenen Entwicklungsphasen übersteigt meist den klassischen Entwicklungsaufwand. [38]

Auch in dieser Branche sind es überwiegend Anforderungen, die nur in einem Beispiel genannt werden. Auffällig ist, dass hier zum ersten Mal die Integration des Tools in die Unternehmens-Toolkette gefordert wird und dass zum ersten Mal eine MBSE-Methode genannt wird.

4.1.5.1 Prinzipien, Anwendung, Beispiele, Erfahrung und Nutzen aus Praxisicht: MBSE in der Textilmaschinenfabrik Karl Mayer [46]

Die Firma Karl Mayer ist ein global agierender Marktführer im Textilmaschinenbau. Zum versprochenen Nutzen von MBSE gehören unter anderem die frühzeitige Zusammenarbeit verschiedener Fachdisziplinen der Entwicklung sowie die virtuelle Absicherung vor der eigentlichen Produktionsphase. Außerdem können durch MBSE neue Kundenfunktionen bereits am virtuellen Prototypen getestet und bewertet werden und weisen dann bei der Implementierung in die reale Produktwelt einen höheren Reifegrad auf.

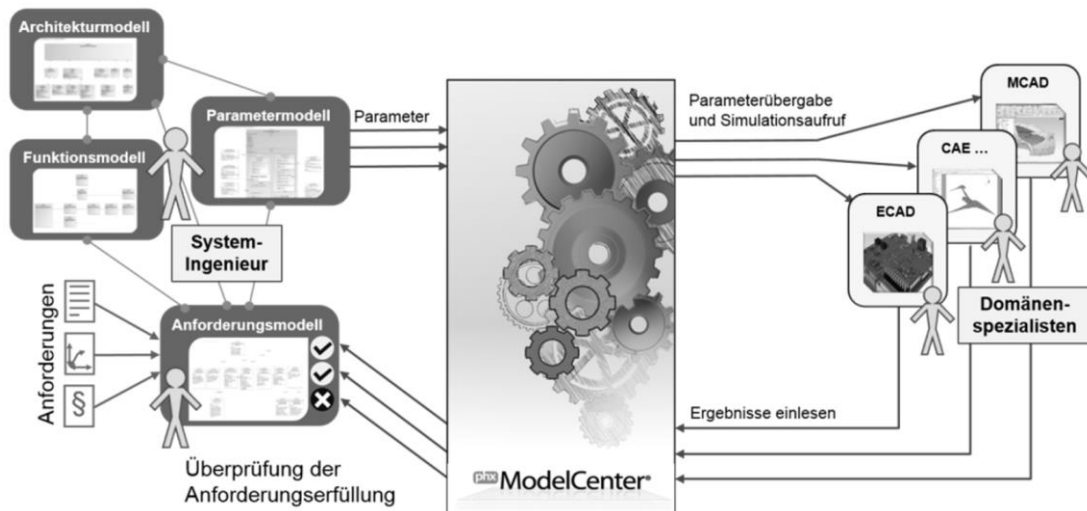


Abb. 4–4: Toolintegration in einer Modellierungs- und Simulationsumgebung [54, S. 157]

Die virtuelle Absicherung von Produkteigenschaften erfordert die Untersuchung mehrerer Systemzustände. Karl Mayer löst diese Herausforderung durch die Verknüpfung von Modellierungs- und Simulationstools mithilfe der Entwicklungsplattform ModelCenter, die ein Gesamtsystemmodell erstellt. Die Abb. 4–4 zeigt die Vernetzung der einzelnen Modelle. Parameter werden aus dem Systemmodell an die Simulationsumgebung übermittelt und die Simulationsergebnisse werden mit den Anforderungsmodellen verglichen. Automatisierte Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen im frühen Entwicklungsprozess sind somit möglich. Durch die iterative Modellierung und Simulation von Teilsystemen wird das Konzept, das die Anforderungen am besten erfüllt, entwickelt und gleichzeitig optimiert.

Von hoher Priorität ist daher die Integration von MBSE-Tools in den Entwicklungsprozess und die Synchronisation aller Modelle. Daraus resultiert die Anforderung an eindeutige Architekturen und Notationen mit ganzheitlicher, widerspruchsfreier Systembeschreibung.

4.1.5.2 Systems Engineering im Maschinen- und Anlagenbau verstehen, anwenden und beherrschen [39]

Zu den allgemeinen Rahmenbedingungen bei der Entwicklung kundenspezifischer Anlagen in KMUs gehören unter anderem die sehr geringen Stückzahlen und die hohe Produktkomplexität durch das Zusammenspiel mechanischer und elektronischer Systeme. Als Beispielunternehmen betrachten V. Huckriede *et al.* [39] die Firma Remmert, ein Spezialist für Blechbearbeitung. Zu den Erfolgsfaktoren für den Einsatz von MBSE gehört beispielsweise die Erstellung einer Wirkstruktur als eine Sicht auf die Architektur mit der Methode CONSENS (CONceptual design Specification technique for the ENGINEering of complex Systems), die bei Remmert das Systemverständnis deutlich verbessert. Die informationstechnischen oder mechanischen Sichten auf das Architekturmodell sind ebenfalls wichtig. Der Verhaltensmodellierung wird im Gegensatz zur Systemarchitektur vorerst eine untergeordnete Bedeutung zugeschrieben. Remmert plant zukünftig mit MBSE-Tools die Schnittstellen sowie Eingangs- und Ausgangsgrößen bestehender Komponenten

so zu modellieren, dass sie bei der Entwicklung neuer Systeme wiederverwendet werden können.

4.1.5.3 Usage of Free Sketches in MBSE [55]

Zwischen den mentalen Modellen der Ingenieure und den graphischen Modellierungssprachen für Systeme (wie zum Beispiel SysML) herrscht meist ein großer Unterschied. Insbesondere im Bereich der Mechanik, wo Skizzen und dreidimensionale CAD-Modelle gebräuchlich sind, ist der Umgang mit den Diagrammen der Modellierungssprache schwierig oder sogar hinderlich.

Für den MBSE-Einsatz im klassischen Maschinenbau mit von Mechanik beherrschten Systemen gilt demnach die spezifische Anforderung, freie Skizzen (zweidimensionale Illustrationen und Visualisierungen mit technischem Inhalt) in die formalen Diagramme und Modelle des MBSE integrieren zu können.

4.1.6 Konsumgüterindustrie

4.1.6.1 Prinzipien, Anwendung, Beispiele, Erfahrung und Nutzen aus Praxisicht: MBSE beim Hausgerätehersteller Miele [46]

Moderne Hausgeräte ersetzen die klassischen, autarken Haushaltsgeräte immer mehr und entwickeln sich zunehmend zu vernetzten Systemen. Aufgrund der ermöglichten Kommunikation der Systeme untereinander nimmt der Funktionsumfang der Software sowie die Komplexität der Betriebszustände stark zu. Ein Schwerpunkt bei der Anwendung von MBSE bei Miele ist das Anforderungsmanagement. Es gilt, alle Anforderungen aller Stakeholder und Domänen zu erfassen, zu dokumentieren und nachzuverfolgen. Das Unternehmen setzt modellbasierte Methoden für die Anforderungsspezifikation ein, wie zum Beispiel die Systemkontext-Analyse. MBSE ermöglicht bei Miele die Dekomposition des Gesamtsystems von der funktionalen bis hin zur logischen Architektur. Vorteilhaft ist außerdem der gezielte Einsatz einer virtuellen, modellbasierten Absicherung der Funktionen im frühen Entwicklungsprozess, der die Prototypenanzahl und die Entwicklungszeit reduziert.

4.2 Ergebnisse der Literaturrecherche

Tab. 4–1: Auswertung der Literaturrecherche nach Randbedingungen und Anforderungen

Randbedingung oder Anforderung		Anzahl	Anwendungsbeispiel
Randbedingungen	Branche		
	Raumfahrt- und Satellitentechnik	4	[41][42][43][44]
	Automotive	6	[42][46][47][48][49][50]
	Defense & Aerospace	4	[51][27][52][53]
	Anlagen-/ Sonder-/ Allg. Maschinenbau	3	[46][39][55]
	Konsumgüter/ Haushaltsgeräte	1	[46]
	keiner Branche zuordenbar	1	[45]
	Produktionsvolumen		
	hohes Produktionsvolumen	1	[47]
	(sehr) geringes Produktionsvolumen	2	[42][39]
	Entwicklungsanlass		
	Einzelanfertigungen	1	[41]
	kundenspezifische Entwicklung	3	[41][42][39]
	Stakeholder		
	wenige Zulieferer involviert	1	[42]
	global verteilte, heterogene und viele Stakeholder (intern und extern)	3	[45][47][27]
Vielfalt und Varianten			
hohe Produktvielfalt/ Variantenvielfalt	1	[42]	
geringer Bedarf für Produktvariationen	1	[42]	
konservatives Unternehmen (innovationsträge, geringe Bereitschaft für Änderungen)	1	[43]	
geringe Kenntnisse zu MBSE oder SysML vorhanden	1	[49]	
Systemeigenenschaft			
System ist System-of-Systems	2	[45][46]	
Schwerpunkt mechatronische Systeme	1	[39]	
Schwerpunkt mechanische Systeme	1	[55]	
Software (z.B. Steuerungs-SW) Teil des Systems	3	[49][46][46]	
Anforderungen	Systemmodell erweitern und anpassen (z.B. an neue Anforderungen)	2	[44][52]
	Use Cases modellieren und Anforderungen ableiten	2	[42][48]
	Anforderungen modellieren	6	[44][48][49][50][27][46]
	Integration des Anforderungsmanagements in die modellbasierte Systementwicklung	2	[50][46]
	Architekturen (funktionale, logische und physikalische) modellieren	4	[46][52][53][46]
	Systemverhalten und -struktur beinhalten/ modellieren	6	[42][42][48][49][53][39]
	Verknüpfung von Anforderungen, Funktionen und Systemelementen modellieren (phasenübergreifende) Datenbank	5	[44][50][27][52][46]
	Zugangskontrolle/ -berechtigungen für Modelle/ innerhalb einer Datenbank	2	[41][50]
	Erstellen/ Ableiten von Dokumenten	5	[44][42][50][51][53]
	Von Änderungen betroffene Systemelemente finden/ bewerten	2	[42][50]
	Import/ Export Mechanismus für Systemmodell (Stücklisten, Anforderungen, Excel, XML, ...)	3	[41][43][27]
	Systemmodell auf Fehler/ fehlende Verknüpfungen prüfen	4	[44][50][27][39]
	Systemkontext und Systemgrenzen modellieren	3	[42][46][49]
	Modellierung auf verschiedenen Abstraktionslevels	2	[50][53]
	Schnittstellen zwischen Systemelementen oder zur Systemumgebung modellieren	8	[42][46][48][49][50][27][53][39]
	Sichten auf das System generieren können	5	[42][46][27][53][39]
	Simulation von verschiedenen Szenarien (Parametervariation, Sensitivitätsanalysen)	2	[52][46]
	Vergleich und Validierung (Auslegung/ Bewertung) von bestimmten Bauteilkombinationen/ Komponentenvarianten	2	[42][52]
	Testen/ Absichern der Integration des Systems in Gesamtsystem (z.B. Zulieferer und OEM)	3	[46][50][27]
	virtuelle, modellbasierte Absicherung vor der Produktionsphase (Testen/ Absichern)	7	[45][42][46][50][52][46][46]
	Gemeinsames Systemverständnis und interdisziplinäre Zusammenarbeit verbessern	5	[42][48][27][46][39]
	Instanzenmodell für Bildung/ Ableitung von Instanzen	2	[42][48]
	Toolintegration: Verknüpfung zwischen Systemmodell und disziplinspezif. Entwicklungsmodellen	2	[42][46]
	Wiederverwendung von Dateien, Modellen oder Informationen	4	[41][43][27][39]

Die Matrix in Tab. 4–1 fasst die Untersuchungsergebnisse der betrachteten Beispiele aus Abschnitt 4.1 zusammen. Die erste zeilenweise Gruppierung beschreibt die genannten Randbedingungen im Unternehmen oder in der Branche. Darunter sind ebenfalls zeilenweise die genannten Anforderungen an die allgemeine Anwendung von MBSE und an den Einsatz von MBSE-Tools aufgeführt. Die beiden rechten Spalten geben an, wie oft und in welchem Anwendungsbeispiel die jeweilige Randbedingung bzw. Anforderung genannt wurde. Der Übersichtlichkeit halber sind Anforderungen, die nur einmal genannt wurden, nicht aufgeführt. Anhang B.1 stellt die vollständige Matrix bereit.

4.3 Schlussfolgerungen aus der Literaturrecherche

Die in der Literatur genannten Gründe für die Einführung von MBSE und der damit versprochene Nutzen stimmen häufig mit den in Abschnitt 3.1 aufgeführten Potentialen überein und können weitestgehend bestätigt werden.

Die in Abschnitt 3.2 genannten, grundlegenden Anforderungen an den Einsatz von MBSE werden in den untersuchten Anwendungsbeispielen nur vereinzelt genannt. Dahingegen stimmen die am häufigsten genannten Anforderungen der Beispiele teilweise mit den Anforderungen von KMU aus Abschnitt 3.3 überein (vgl. Tab. 3–2). Dazu gehört, Systemanforderungen präzise zu erfassen bzw. zu modellieren, die Verknüpfung von Anforderungen, Funktionen und Systemelementen zu modellieren und Modelle als Artefakte des MBSE für die Kommunikation und Zusammenarbeit zu verwenden. Prozesslandschaften oder eine Konformität zu Standards (vgl. Tab. 3–1 und Tab. 3–2) werden in den untersuchten Beispielen nicht gefordert. Dies lässt jedoch keine Rückschlüsse darauf ziehen, ob die in Abschnitt 3.2 genannten grundlegenden Anforderungen für die Anwendungsbeispiele entweder als selbstverständlich – und somit als nicht erwähnenswert – gelten, oder ob ihnen keine Relevanz zugeschrieben wird.

In 42% der 19 Fälle besteht der Bedarf, Schnittstellen zwischen Systemkomponenten oder Schnittstellen zur Systemumgebung zu modellieren. Diese Anforderung ist die am häufigsten genannte. 62,5% dieser Nennungen kommen aus der Automobilbranche. Diese Anforderung wird zudem in 83% der Automobilbeispiele und in 50% der Beispiele aus dem Bereich Defense & Aerospace beschrieben.

37% der Anwendungsbeispiele sehen einen Bedarf darin, das System virtuell und modellbasiert absichern zu können.

Die Anforderungen oder die Systemstruktur und das -verhalten modellieren zu können, nennen 32% der Autoren.

Alle weiteren Anforderungen werden nur in weniger als einem Drittel der Fälle genannt.

Branchentypische Tendenzen weisen nur die Automobilindustrie und der Maschinenbau auf. In der erstgenannten Branche sind sechs Beispiele vertreten, wovon fünf die Modellierung von Schnittstellen angeben. Das heißt, die Schnittstellenmodellierung spielt im Vergleich zu anderen Anforderungen die wichtigste Rolle. Jeweils dreimal wird genannt, Anforderungen sowie Systemverhalten und -struktur zu modellieren oder modellbasiert das System zu testen. Im Maschinenbau fordern zwei von drei Autoren das Systemverständnis und die interdisziplinäre Zusammenarbeit durch Modelle zu verbessern und zu unterstützen. Aufgrund der relativ kleinen Stichprobe von sechs bzw. drei Anwendungsfällen der beiden Branchen ist hier jedoch nur von Tendenzen anstatt von signifikanten Zusammenhängen zu sprechen.

Bei nur sieben von insgesamt 41 Anforderungen gibt es relevante Überschneidungen zu anderen Anwendungsbeispielen. Eine relevante Überschneidung bedeutet, dass eine Anforderung in mindestens fünf unterschiedlichen Anwendungen vorkam. Der Maximalwert für eine Anforderung lag bei acht unterschiedlichen Anwendungsbeispielen.

Circa 65% aller Anforderungen werden nur ein- oder zweimal genannt, was auf die Existenz eines sehr breiten Spektrums an Anforderungen hindeutet.

In keinem Fall wird eine Abstufung bezüglich der Relevanz oder Wichtigkeit von verschiedenen Anforderungen vorgenommen. Die Wichtigkeit ausgehend von der Anzahl der Nennungen einer Anforderung abzuleiten, lässt der niedrige Stichprobenumfang nicht zu. Eine Rangordnung verschiedener Anforderungen ist nicht möglich.

Gleichzeitig können keine Indikatoren identifiziert werden, die darauf hindeuteten, dass die in einem Anwendungsfall als relevant angesehenen Anforderungen in einem anderen Anwendungsfall nicht relevant wären.

Die Beschreibung aller recherchierten Beispiele ist tendenziell oberflächlich und allgemein, ohne im Detail spezifische Angaben zu Unternehmensmerkmalen oder Anforderungen an die Modellierung von Systemen zu machen. Oftmals wird eher auf den erwarteten Nutzen durch den Einsatz von MBSE oder auf die Anforderungen an die Einführung von MBSE eingegangen, anstatt auf konkrete Anforderungen an die Systemmodellierung mit MBSE-Tools.

In keinem der vorliegenden Fälle wird ein alle Domänen betreffender und über alle Phasen des System- oder Produktlebenszyklus angewandter Einsatz von MBSE identifiziert.

Aufgrund der erkennbaren Tendenz, dass die Literaturrecherche nicht zur zielführenden Ableitung von aussagekräftigen Schlüssen beiträgt, wurde die Literaturrecherche abgebrochen. Die Hypothese bezüglich der Archetypen von Unternehmen kann damit nicht beurteilt werden.

5 Experteninterviews zu Anforderungen an MBSE-Tools und Archetypen

Die Ausgangssituation stellt die vorangegangene Literaturrecherche dar, deren Ziel es war, Abhängigkeiten zwischen den Randbedingungen in einem Unternehmen und den für das Unternehmen wichtigen Anforderungen an ein MBSE-Tool herauszufinden. Die wichtigste Schlussfolgerung aus der durchgeführten Analyse ist, dass sich allein anhand der Literaturrecherche keine Archetypen von Unternehmen ableiten lassen. Für die Bewertung der unterschiedlichen Anforderungen an ein MBSE-Tool wird folglich die präzise Einschätzung von Anwendern und Experten aus unterschiedlichen Branchen als sinnvoll und notwendig angesehen.

Eine Interviewreihe mit MBSE-Experten soll nachfolgend die Fragen beantworten, welche Anforderungen an ein MBSE-Tool am wichtigsten sind, welche MBSE-Tools zum Einsatz kommen und ob die in Abschnitt 3.4 definierten und bereits in der Literatur untersuchten Archetypen von Unternehmen existieren.

5.1 Aufbau der Interviews

Die Interviewreihe orientiert sich an einem Leitfaden, bestehend aus den Leitfragen (offene Fragen) und dem Fragebogen (geschlossene Fragen). Ein vollständiges Interview enthält dadurch sowohl einen qualitativen als auch einen quantitativen Anteil.

Für jedes Interview wurde eine Dauer von 45 oder 60 Minuten – in Abhängigkeit des vom Teilnehmer verfügbaren Zeitrahmens – festgelegt. Die Expertengespräche wurden entweder telefonisch oder persönlich durchgeführt. Nur in wenigen Ausnahmefällen führten Teilnehmer aus zeitlichen Gründen das gesamte Interview schriftlich aus. Da manche Unternehmen außerhalb von Deutschland ansässig sind, liegt im Anhang B.3 auch eine englischsprachige Version der Dokumente vor.

Nachfolgende Abb. 5–1 zeigt den dreiteiligen Aufbau des Leitfadens inklusive der sechs Leitfragen. Der Fragebogen mit den 29 gelisteten Anforderungen befindet sich im Anhang B.3.

Jedes Interview ist folgendermaßen strukturiert:

- Einleitung
- Teil I: Vorstellung der Arbeit
- Teil II: Leitfragen (offene Fragen)
- Teil III: Fragebogen (geschlossene Fragen)
- Gesprächsabschluss



Lehrstuhl für Raumfahrttechnik
Technische Universität München



Hannes Rosenow, Masterand

INTERVIEW – LEITFADEN

Name	Unternehmen	Position	Branche

Datum	Dauer		Art der Durchführung		
	Geplant		Tel.	Pers.	Offline
	Tatsächlich		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Einleitung	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Informationen über Ablauf und Aufbau des Interviews ▪ Hinweis: Alle Antworten werden anonym behandelt, Namen und Firmen werden nicht in der Arbeit veröffentlicht. ▪ Funktion und Haupttätigkeiten des Teilnehmers: _____

I	Kurz-Vorstellung der Masterarbeit
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Betreuung durch TUM Lehrstuhl für Raumfahrttechnik und 3DSE Management Consultants ▪ Untersuchte Fragestellungen und Ziele der Arbeit ▪ Ziel und Umfang der Literaturrecherche: Welche Anwendungsbeispiele gibt es in den verschiedenen Branchen? Welche Randbedingungen in der Entwicklung werden genannt und welche Anforderungen an MBSE Tools werden genannt? Gibt es Gemeinsamkeiten oder Abhängigkeiten, sodass sich Archetypen ableiten lassen? ▪ Resultat Literaturrecherche: Ableitung/ Bewertung von Archetypen nicht möglich ▪ Wie lautet Ihre Einschätzung zur Existenz und zu möglichen Unterscheidungskriterien von Archetypen: _____ ▪ Umfang der Interviewreihe: Untersuchung von Randbedingungen und Anforderungen an Modellierungstools in verschiedenen Branchen ▪ Stand der Technik: MBSE-Modellierungstools

II	Leitfragen (offene Fragen)
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ MBSE-Begriffsverständnis: Wie würden Sie MBSE in einem Satz definieren? <ul style="list-style-type: none"> ➢ Was wird in Ihrem Unternehmen unter MBSE verstanden? Existiert eine unternehmensweite Definition? ▪ Organisation der Entwicklung: Wie eng arbeiten die Entwicklungsteams unterschiedlicher Domänen (Hardware, Software, E/E, ...) zusammen?

	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sind sie digital vernetzt, findet ein synchronisierter Datenaustausch statt? Arbeiten sie als isolierte Teams oder als kollaboratives Netzwerk? Verändert sich das während der Phasen der Produktentstehung? ▪ MBSE-Bekanntheitsgrad: Wie hoch sind Verbreitung und Bekanntheitsgrad von MBSE in Ihrem Unternehmen? ➤ Wie hoch sind Akzeptanz und Bereitschaft der Mitarbeiter bei der Einführung bzw. Verbreitung von MBSE? Was ist das Ziel der Geschäftsführung in Bezug auf MBSE? Wer treibt und verantwortet das Thema MBSE? ▪ Modellierungsniveau: Wo wird bereits modelliert bzw. modellbasiert entwickelt ➤ In welchen Domänen und in welchen Phasen der Produktentstehung? Auf welchem Level wird modelliert (System- vs. Elementebene)? Gibt es eine Verknüpfung der Domänenmodelle untereinander oder zum Systemmodell? ▪ Einsatz von MBSE-Tools: Werden bereits bestimmte MBSE-Tools verwendet? ➤ Welche Tools sind das und wozu werden sie verwendet? ▪ Anforderungen an ein MBSE-Modellierungstool: Was sind Ihre wichtigsten Anforderungen an ein MBSE-Modellierungstool?
III	Fragebogen (geschlossene Fragen)
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einschätzungen bezüglich der Anforderungen an MBSE-Tools: Wie hoch schätzen Sie die Wichtigkeit der folgenden Anforderungen bei der Selektion eines MBSE-Tools ein? ▪ Separates Template
	Gesprächsabschluss
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Weitere Anmerkungen zum Thema MBSE-Modellierungstools: _____ ▪ Zusenden der Interviewergebnisse nach Abschluss der Arbeit

Abb. 5–1: Aufbau des Interview-Leitfadens

Zu Beginn wird der Teilnehmer über den allgemeinen Ablauf des Interviews informiert sowie über die Wahrung der Anonymität seiner Aussagen. Namen von Teilnehmern oder Organisationen werden nicht veröffentlicht. Es wird ebenfalls darauf hingewiesen, dass Teil III auch separat, also unabhängig vom Interview, bearbeitet werden kann – diese Möglichkeit nahmen viele Teilnehmer an. Die Teilnehmer informieren eingangs über ihre eigenen Funktionen und Haupttätigkeiten. Dies ermöglicht die Einordnung in verschiedene Personengruppen (vgl. Abschnitt 5.2).

Bei der Einführung in die untersuchte Thematik (Teil I) wird auch abgefragt, wie die Einschätzung des Interviewpartners zur Existenz von Archetypen und deren möglichen Unterscheidungskriterien lautet (vgl. Abschnitt 3.4).

Teil II behandelt die sechs (offenen) Leitfragen (Abb. 5–1). Die erste Leitfrage zielt auf das persönliche Begriffsverständnis von MBSE ab und wie der Begriff im Unternehmen verstanden wird. Dadurch soll bei stark abweichenden Meinungen ein einheitliches Verständnis für die nachfolgenden Leitfragen geschaffen werden sowie die Grundlage für die spätere Auswertung bezüglich potentieller Zusammenhänge zu den Anforderungen an ein Tool. In den nächsten Fragen werden die Randbedingungen in der Produktentwicklung des Unternehmens sowie der Verbreitungs- und Bekanntheitsgrad von MBSE abgefragt, um daraus eine Vorstellung über den aktuellen Stand von MBSE in Unternehmen zu bekommen. Die vierte Leitfrage zielt auf das vorherrschende Modellierungsniveau und die Art des Modellierungseinsatzes ab. Unter dem Begriff Modellierung wird dabei eine modellbasierte Entwicklung von Systemen verstanden, bei der deren gesamte Dynamik und Statik oder auch nur Teile davon mithilfe von verschiedenen Artefakten (zum Beispiel Aktivitäts- und Sequenzdiagramme, Funktionsstruktur oder Systemarchitektur) dargestellt werden, um die Relationen der Systemelemente untereinander abzubilden. Abschließend nennen die Interviewpartner die im Unternehmen verwendeten MBSE-Tools und wozu sie eingesetzt werden. Diese Antworten unterstützen die Entscheidungsfindung über die zu untersuchenden Tools in Kapitel 6. In der sechsten Leitfrage wird jeder Teilnehmer gebeten, die für ihn wichtigsten Anforderungen an ein MBSE-Tool zu formulieren, um ein Gesamtbild zeichnen zu können, welche Anforderungen als besonders relevant angesehen werden.

Die ersten fünf Leitfragen werden alle mit dem grundlegenden Ziel gestellt, die Randbedingungen im Unternehmen im Sinne von Merkmalen abzufragen, um bei der Auswertung mögliche Abhängigkeiten zwischen einer bestimmten Merkmalsausprägung und der Wichtigkeit von Anforderungen zu untersuchen.

In Interviews mit wissenschaftlich-theoretischen MBSE-Experten (vgl. Personengruppen in Abschnitt 5.2) weichen die Leitfragen leicht von den eben beschriebenen ab. Die Fragen sind in dem Fall von einer eher generischen Natur, um beispielsweise zusätzliche MBSE-Anwendungsfälle oder weitere Experten zu identifizieren. Es wird jedoch auch die Einschätzung zu den Archetypen sowie zu den wichtigsten Anforderungen an ein MBSE-Tool abgefragt (vgl. Anhang B.3).

In Teil III geht es um den Fragebogen (Anhang B.3). Die Fragestellung lautet: „Wie hoch schätzen Sie die Wichtigkeit der folgenden Anforderungen bei der Selektion eines MBSE-Tools ein?“ Der Teilnehmer bewertet die Wichtigkeit auf einer Skala von 1 (unwichtig) bis 4 (sehr wichtig). Neben den 29 aufgelisteten Anforderungen, die basierend auf der vorherigen Literaturrecherche formuliert wurden, gibt es auch ein Freifeld für die Ergänzung individueller Anforderungen.

Tab. 5–1: Merkmale und Merkmalsausprägungen zur Einordnung von interviewten Unternehmen

Branche	
Defense & Aerospace	<i>Defense, Aerospace, Space, Security</i>
Anlagen-/ Sonder-/ Maschinenbau	
Automobil	
Bahnindustrie/ Schienenverkehr	
Medizintechnik	
Nutzfahrzeuge	<i>Nutzfahrzeug-, Landmaschinenbau</i>

Kraftwerkstechnik	
Mischkonzern	
Keine/ Forschungseinrichtung	<i>Unternehmensberater, Toolanbieter, wissenschaftliche Mitarbeiter, andere</i>
Unternehmensgröße	
klein	<i>< 1.000 Beschäftigte</i>
mittel	<i>≥ 1.000</i>
groß	<i>≥ 40.000</i>
sehr groß	<i>≥ 100.000</i>
Umsatz	
relativ niedrig	<i>< 2 Milliarden €/ Jahr</i>
mittel	<i>≥ 2</i>
relativ hoch	<i>≥ 10</i>
sehr hoch	<i>≥ 50</i>
Verteilung der Standorte	
international verteilt	<i>mind. zwei Entwicklungsstandorte in verschiedenen Ländern</i>
national verteilt	<i>alle Standorte im selben Land</i>
zentriert	<i>ein Standort für die Entwicklung</i>
Entwicklungsanlass (überwiegend)	
„Kundenspezifische Auftragsentwicklung“	<i>überwiegend order-dependent</i>
„Katalogware“	<i>überwiegend order-independent, z.B. anhand von Markt- oder Kundenanalysen</i>
Forschungsaufträge	
gemischt	<i>order-dependent und -independent</i>

Jedes befragte Unternehmen wurde außerdem anhand von fünf Merkmalen und entsprechenden Merkmalsausprägungen charakterisiert (Tab. 5–1). Diese Angaben führen zu den Merkmalen (Beispiel: Branche) und Merkmalsausprägungen (Beispiel: Nutzfahrzeuge), die Teil der Definition für Archetypen von Unternehmen sind.

Die Branchenzugehörigkeit und die Größe eines Unternehmens gehören zu den naheliegendsten Kriterien, die Unternehmen zu unterscheiden. Unter der Annahme, dass die inhaltlichen und organisatorischen Schwerpunkte einer Produktentwicklung in den verschiedenen Industriesektoren variieren, führen verschiedene Branchen zu potentiell unterschiedlichen Anforderungen an den MBSE-Einsatz. Mischkonzerne werden in die gleichnamige Merkmalsausprägung eingeordnet sowie denjenigen Branchen zugeordnet, für die der Interviewpartner verantwortlich oder tätig ist.

Die Anzahl der insgesamt Beschäftigten hat einen wahrscheinlichen Einfluss auf die Anzahl der Ingenieure, die mit dem Modellierungstool arbeiten – was wiederum bestimmte Eigenschaften eines Tools wie zum Beispiel Kollaborationsmöglichkeiten oder Zugriffsrechte erfordert. Für die Einteilungskriterien „Beschäftigtenzahl“ dieses Merkmals wurde nach der Durchführung der Interviews zunächst untersucht, ob sich ab bestimmten Beschäftigtenzahlen spezifische Zusammenhänge mit anderen Merkmalsausprägungen oder mit der Bewertung der Anforderungen ergaben. Dies war aber nicht der Fall. Daher ist die Abstufung nach Beschäftigtenzahlen so gewählt, dass

in jedem Unternehmensgrößenbereich ungefähr gleich viele Unternehmen vertreten sind, um eine spätere Vergleichbarkeit und Aussagekraft bei der Auswertung zu gewährleisten.

Zudem wird eine Unterscheidung der Unternehmen nach dem Merkmal des erzielten Jahresumsatzes als sinnvoll erachtet. Es wird ein Zusammenhang zu den Kosten vermutet, die ein Unternehmen bereit oder fähig ist, für ein Modellierungstool zu tragen (zum Beispiel in Form von Lizenz-, Schulungs-, Support- oder Upgradekosten).

Über wie viele Standorte verteilt die Produktentwicklung eines Unternehmens tätig ist, hat ebenfalls eine potentielle Auswirkung auf die Art einer toolgestützten Zusammenarbeit in der Entwicklung. Diesem Merkmal obliegt unter anderem die Vermutung, dass der Koordinierungsaufwand und die Ansprüche an die Kommunikation untereinander umso höher sind, je mehr Teams an unterschiedlichen Orten zusammenarbeiten.

Das fünfte Unterscheidungsmerkmal ist der überwiegende Entwicklungsanlass eines Unternehmens. Hierbei wird beispielsweise ein Zusammenhang mit der Wichtigkeit der Wiederverwendung von Daten vermutet, wenn Unternehmen überwiegend in Serie produzieren. Die Ausprägung „gemischt“ bedeutet, dass der überwiegende Anteil der Entwicklung weder auf auftragsspezifischen („kundenspezifische Auftragsentwicklung“) noch auf auftragsunabhängigen („Katalogware“) Projekten basiert.

5.2 Angaben zur Durchführung der Interviews und zu den Teilnehmern

Drei Personengruppen kommen für die Interviewreihe in Frage: wissenschaftlich-theoretische MBSE-Experten, MBSE-Experten aus der industriellen Praxis und MBSE-Anwender aus der industriellen Praxis. Das Wissen über die grundlegenden Ansätze des SE und MBSE ist allen Personengruppen gemein. Die erste Gruppe zeichnet sich dadurch aus, dass das Thema MBSE oder ein Teilaspekt davon zum Umfang ihres wissenschaftlichen Forschungsgebiets oder Erfahrungsschatzes gehören. In dieser Arbeit zählen zu dieser Gruppe zusätzlich noch Unternehmensberater, die im Bereich MBSE tätig sind und beispielsweise Schulungen geben, und Toolanbieter.

MBSE-Experten aus der industriellen Praxis besitzen in ihrer Organisation eine (überwiegend) übergeordnete, strategische oder leitende Funktion und verantworten dabei MBSE-Themen oder Teilaspekte davon. Typische Bezeichnungen lauten „Senior Systems Engineering Method Manager“, „Lead System Architect“ oder „Lead Systems Engineer“.

Alle Personen, die auf einen Erfahrungsschatz aus der Nutzung von MBSE-Tools zurückgreifen können und/ oder aktiv diese Tools verwenden, gehören zur dritten Gruppe der MBSE-Anwender.

Als Teilnehmer werden alle Personen bezeichnet, die persönlich, telefonisch oder schriftlich am Interview teilgenommen haben und/ oder den ausgefüllten Fragebogen zurückgesandt haben.

Für die Auswahl der Experten und Anwender kamen für dieses Interview mehrere Quellen in Frage. Ein Großteil der Teilnehmer hat bereits einen relevanten Beitrag bei einer Konferenz veröffentlicht. Die Autoren waren beispielsweise Teilnehmer am Tag

des Systems Engineerings, am INCOSE International Symposium, an INCOSE Chapter Meetings oder waren an Forschungsprojekten zum Thema MBSE beteiligt. Oftmals verwiesen Interviewpartner auch auf weitere Experten oder Anwender in anderen Organisationen. Das Netzwerk der 3DSE Management Consultants GmbH diente ebenfalls als wertvolle Quelle für Kontakte. Die Mehrheit der Teilnehmer wurde individuell angeschrieben und gebeten, an der Interviewreihe über MBSE und Modellierung in ihrem Unternehmen teilzunehmen. Personen aus dem Netzwerk von 3DSE Management Consultants GmbH wurden persönlich kontaktiert. Insgesamt wurden 73 Personen aus 54 für relevant erachteten Unternehmen oder Forschungseinrichtungen identifiziert und kontaktiert.

Tab. 5–2: Teilnehmerstatistik aus den Interviews

Teilnehmer an der Interviewreihe	45
Wissenschaftlich-theoretische MBSE-Experten	8
MBSE-Experten aus der industriellen Praxis	22
MBSE-Anwender aus der industriellen Praxis	15
Geführte Interviews	31
offen-spezifisch	25
offen-allgemein	6
Teilgenommene Organisationen	30
Unternehmen aus der Industrie mit MBSE-Ansätzen	23
Forschungseinrichtungen/ Beratungen/ Toolhersteller	7
Ausgefüllte Fragebögen	31

Die Tab. 5–2 gibt einen Überblick, wie viele Interviews geführt worden sind und wer daran teilgenommen hat. Es kam mehrmals vor, dass mehr als eine Person desselben Unternehmens an einem Interview teilgenommen hat. Ebenso kam es vor, dass nur der Fragebogen bearbeitet wurde, dass ein Interview ohne den Fragebogen durchgeführt wurde oder dass ein Teilnehmer des Interviews den Fragebogen an seine Mitarbeiter zur Bearbeitung weitergeleitet hat.

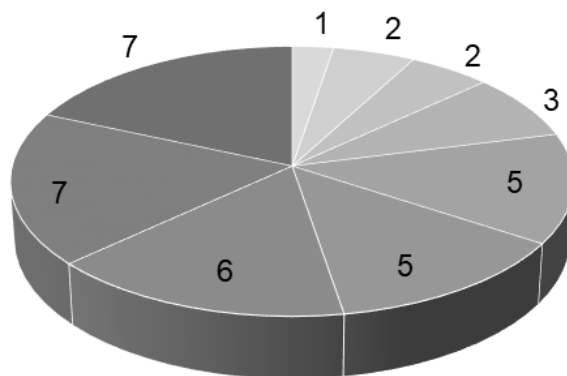
In Summe haben 45 Experten und Anwender aus 30 unterschiedlichen Organisationen an der Interviewreihe teilgenommen. Die Differenz erklärt sich unter anderem dadurch, dass in einem Interview vier Experten desselben Unternehmens vertreten waren, und dass in einem anderen Unternehmen ein Abteilungsleiter den Fragebogen an sechs seiner Mitarbeiter verteilt hat. Unter den 31 geführten Interviews befinden sich 25 als „offen-spezifisch“ betitelte Interviews mit Vertretern aus der industriellen Praxis und sechs als „offen-allgemein“ betitelte Interviews mit wissenschaftlich-theoretischen Experten. Insgesamt kamen 31 ausgefüllte Fragebögen zurück. Circa die Hälfte aller Teilnehmer war in ihrem Unternehmen in einem (überwiegend) übergeordneten, strategischen Funktions- und Tätigkeitsbereich beschäftigt und gehört somit der Gruppe der sogenannten MBSE-Experten aus der industriellen Praxis an.

Allgemeine Aussagen, die sich aus den Randbedingungen der befragten Unternehmen ableiten lassen, sind:

- Zwei von den insgesamt vier kleinen Unternehmen sind aus dem Anlagen-/ Sonder-/ Maschinenbau. Kleine Unternehmen zeichnen sich durch relativ

geringen Umsatz aus. Die insgesamt einzigen beiden „zentriert ansässigen“ Unternehmen sind kleine Unternehmen.

- Die mittelgroßen Unternehmen (insgesamt 5) sind in fast allen Branchen vertreten und erzielen dort einen relativ geringen oder mittleren Umsatz. In drei der fünf Fälle handelt es sich um kundenspezifische Auftragsentwicklung.
- Die großen Unternehmen (insgesamt 7) sind über fast alle Branchen hinweg verteilt und zeichnen sich durch einen mittleren bis relativ hohen Umsatz aus.
- Die sehr großen Unternehmen (insgesamt 6) generieren einen relativ hohen bis hohen Umsatz und entwickeln überwiegend nach kundenspezifischen Aufträgen. Sie sind ebenfalls über fast alle Branchen hinweg verteilt.



- Medizintechnik
- Nutzfahrzeuge
- Kraftwerkstechnik
- Mischkonzern
- Anlagen-/ Sonder-/ Maschinenbau
- Bahnindustrie/ Schienenverkehr
- Defense & Aerospace
- Automobil
- Keine

Abb. 5–2: Branchenzugehörigkeiten der interviewten Unternehmen

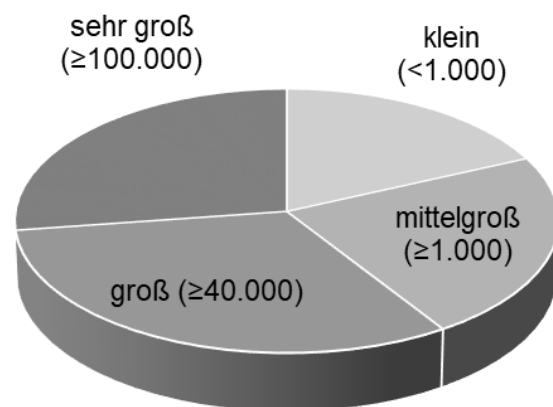


Abb. 5–3: Unternehmensgrößen der interviewten Unternehmen nach Beschäftigten

Die 30 Organisationen sind in unterschiedlichen Branchen tätig (Abb. 5–2, mit Mehrfachnennungen) und von unterschiedlicher Größe.

Bei der Darstellung der Unternehmensgröße anhand der Beschäftigtenzahl in Abb. 5–3 und Abb. 5–4 (unten) sind die Forschungseinrichtungen, Unternehmensberatungen und Toolhersteller nicht mitberücksichtigt, weil diese befragten Organisationen die MBSE-Tools nicht operativ zur Entwicklung komplexer Systeme einsetzen. In Abb. 5–4 sind 22 statt 23 Unternehmen aufgeführt, weil für ein Unternehmen keine Beschäftigtenzahlen veröffentlicht waren.

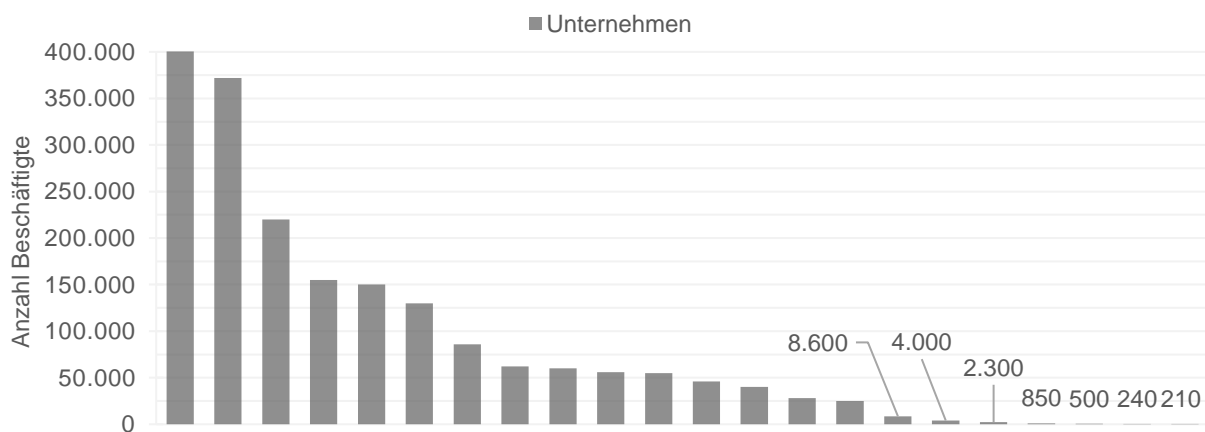


Abb. 5-4: Anzahl der Beschäftigten der interviewten Unternehmen

Nach Durchführung der Interviews zeigt sich, dass sich das Unterscheidungsmerkmal „Verteilung der Standorte“ weniger für eine Unterscheidung der Unternehmen eignet, da alle bis auf zwei Unternehmen international verteilte Entwicklungsstandorte betreiben.

5.3 Angaben zur Auswertung der Interviews

Bei der Auswertung ist analog zur Durchführung zwischen offenen Leitfragen während der Interviews und geschlossenen Fragen im Fragebogen zu unterscheiden. Die Untersuchung der im Fragebogen ergänzten Anforderungen und der im Interview genannten Top-Anforderungen findet separat zu den gelisteten Anforderungen aus dem Fragebogen statt. Abschließend erfolgt ein Vergleich mit den in der Literaturrecherche analysierten Anforderungen und eine Diskussion der Auswertungen.

Die Mittelwerte der einzelnen Werte x_i (mit $x_i = 1, \dots, 4$ und $i = 1, \dots, n$) als Maß für die Wichtigkeit einer Anforderung entsprechen dem arithmetischen Mittel \bar{x} . [56] Die Anzahl der Bewertungen einer Anforderung ist n .

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5-1)$$

Die (empirische) Standardabweichung s gibt eine gute Näherung für die mittlere Abweichung eines Werts vom arithmetischen Mittel \bar{x} an. [56] Die Einheit von s entspricht der des Mittelwerts.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5-2)$$

5.4 Auswertung der offenen Interviews

Zunächst werden die Antworten auf die Fragen des offenen Interviews untersucht (Teil II in Abb. 5-1). Während eines Interviews wurden auch Aussagen getroffen, die nicht konkret einer Leitfrage zugeordnet werden können und dennoch einen interessanten Beitrag zur Arbeit leisten. Sie sind in Anhang B.4 aufgeführt. Die letzte offene Leitfrage nach den wichtigsten Tool-Anforderungen wird separat in Abschnitt 5.7 ausgewertet.

5.4.1 Einschätzung bezüglich Archetypen

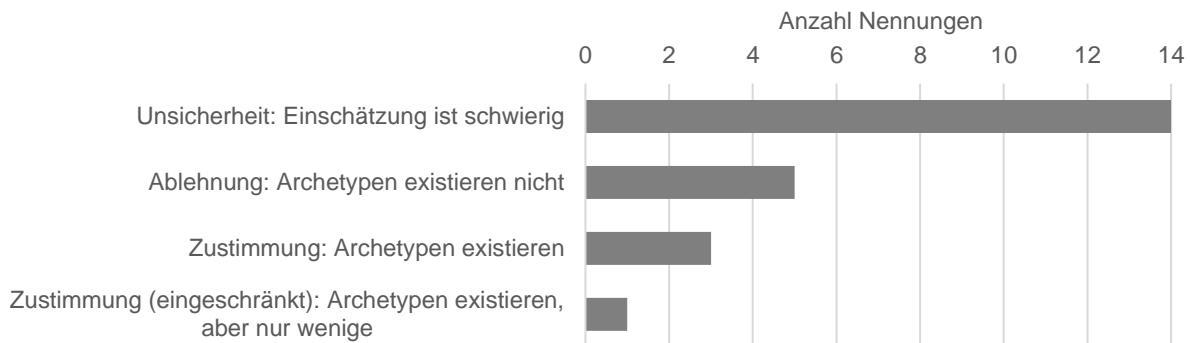


Abb. 5–5: Interviewergebnis zu „Einschätzung bezüglich Archetypen“

23 der 31 interviewten Teilnehmer beantworteten die Frage nach der Existenz von Archetypen (Abb. 5–5, ohne Mehrfachnennungen). Eine deutliche Mehrheit empfand die Beurteilung der Hypothese, dass sich Unternehmen in Bezug auf den Einsatz von MBSE überhaupt in Archetypen einteilen lassen, als schwierig oder lehnte die Hypothese ab. Es folgte die gezielte Nachfrage nach dem wesentlichen Merkmal, worin sich Unternehmen in Bezug auf ihre Anforderungen an MBSE-Tools unterscheiden könnten. Viermal wurde die Vermutung geäußert, dass es sich dabei nicht um das Unterscheidungsmerkmal Branche handelt. Am häufigsten nannten Experten und Anwender den Entwicklungsschwerpunkt (beispielsweise mechanik-, elektronik-, mechatronik- oder softwarelastige Produkte) eines Unternehmens als ein mögliches Merkmal.

5.4.2 Leitfrage 1: Persönliche Definition von MBSE

Die von den Teilnehmern formulierten Definitionen waren vielschichtig. In Summe wurden in den 26 formulierten Definitionen 12 unterschiedliche Themenaspekte angesprochen. Dabei wurde die Modellierung des Systems (22 Nennungen) am häufigsten genannt, danach folgten die Verknüpfung verschiedener Entwicklungsdomänen (9), die Generierung eines besseren Verständnisses von komplexen Systemen (8) und die Umsetzung und Unterstützung von Aktivitäten aus dem Systems Engineering (7). Die vollständige Auflistung aller Antworten ist im Anhang B.4 abgedruckt.

Die Begriffe Modellierung oder Modelle stellten 17-mal einen zentralen Aspekt der Definition von MBSE dar. Das Verständnis darüber ging jedoch auch in unterschiedliche Richtungen. Zweimal wurde das digitale, IT-gestützte Modell hervorgehoben. In zwei anderen Definitionen wurde betont, dass ein digitales Modell keinen inhärenten Teil von MBSE darstelle:

*„Bei der Anwendung von MBSE steht das digitale Modell ... im Vordergrund.“
[Teilnehmer Nr. 8]*

„[Im MBSE] sind ein Softwaretool und ein digitales Modell nicht zwingend notwendig ...“ [Teilnehmer Nr. 44]

In zwei Definitionen wurde auch unterstrichen, dass es sich bei Modellen nicht nur um SysML-Modelle handeln sollte, sondern dass auch beispielsweise Excel-Tabellen oder MATLAB-Modelle zu den Modellen eines MBSE-Ansatzes gehören.

Die unterschiedliche Auffassung über die Art der Modelle hat keine signifikanten Auswirkungen auf die Bewertung der Anforderungen. Bis auf die Modellarten widersprechen sich die Definitionen untereinander nicht grundsätzlich.

In 14 von 25 Organisationen existierte zum Zeitpunkt der Befragung noch keine intern festgelegte, einheitliche Definition des Begriffs MBSE.

5.4.3 Leitfrage 2: Grad der interdisziplinären Vernetzung und Zusammenarbeit von Entwicklungsteams

Die zweite Leitfrage untersucht den Grad der interdisziplinären Vernetzung und Zusammenarbeit von Teams oder Abteilungen in der Produktentwicklung. In neun von 18 Unternehmen fand bereits eine enge Zusammenarbeit zwischen den Disziplinen statt. Den synchronisierten Datenaustausch, der Systemänderungen automatisiert über alle Schnittstellen übernimmt, gab es dabei jedoch nur bei zwei der Unternehmen. Ein Drittel dieser neun Unternehmen merkte an, dass sich der Grad der Zusammenarbeit im Verlauf des Produktentstehungsprozesses ändert. Ebenfalls neun Teilnehmer gaben an, dass die Zusammenarbeit stark abhängig von der Größe der beteiligten Teams, vom betrachteten Geschäftsbereich oder von der Komplexität des entwickelten Systems oder Projekts ist.

5.4.4 Leitfrage 3: Verbreitungs- und Bekanntheitsgrad von MBSE im Unternehmen

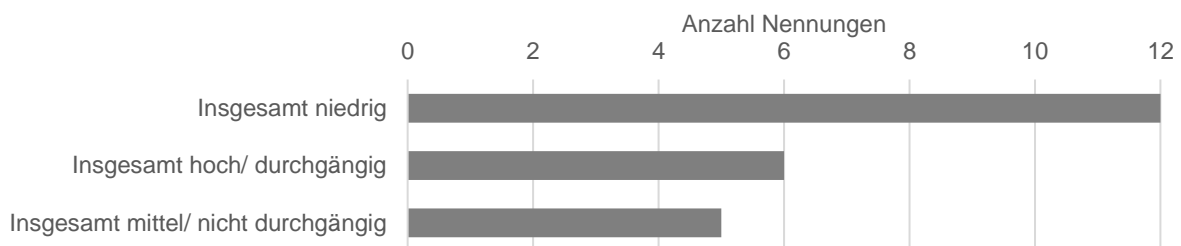


Abb. 5–6: Interviewergebnis zu „Verbreitung und Bekanntheitsgrad von MBSE im Unternehmen“

Wie Abb. 5–6 (ohne Mehrfachnennungen) zeigt, waren die Verbreitung und der Bekanntheitsgrad in etwa der Hälfte aller befragten Unternehmen insgesamt niedrig. Beispielhaft für einen insgesamt mittleren Bekanntheitsgrad gab ein Teilnehmer die Abschätzung ab, dass 50% der Beschäftigten die wesentlichen Ansätze des MBSE kennen.

Von den sechs Unternehmen mit hohem MBSE-Bekanntheitsgrad wurde jedoch auch dreimal angemerkt, dass das tatsächliche Begriffsverständnis unabhängig vom Bekanntheitsgrad innerhalb des Unternehmens stark variiert – auch wenn in fünf dieser sechs Unternehmen bereits definierte Rollen für SE oder MBSE etabliert sind. Drei dieser sechs Unternehmen sind aus der Automobilbranche, zwei aus dem Bereich Defense & Aerospace. Es stellt sich jedoch kein direkter Zusammenhang zwischen hohem Bekanntheitsgrad und einer bestimmten Branche heraus. So wurde beispielsweise die Bekanntheit in Unternehmen der Automobilbranche zweimal als

hoch, zweimal als mittel und dreimal als niedrig angegeben. Allerdings war der Begriff in vier von fünf Anlagen-/ Sonder-/ Maschinenbauunternehmen kaum bekannt.

In den sehr großen Unternehmen gab es keine Tendenz bezüglich des Verbreitungs- und Bekanntheitsgrads (dreimal „hoch“, einmal „mittel“, dreimal „niedrig“), in den kleinen Unternehmen war der Verbreitungs- und Bekanntheitsgrad in drei von vier Fällen gering. In zehn Unternehmen fanden unabhängig von der Größe bereits Schulungen zu SE oder MBSE statt – fünf davon wiesen einen (noch) niedrigen Bekanntheitsgrad von MBSE auf.

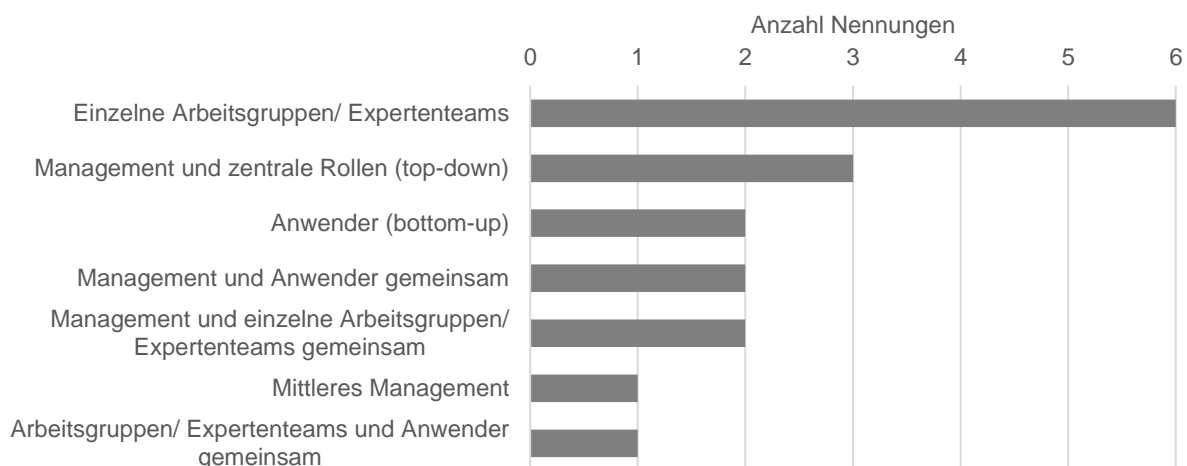


Abb. 5–7: Interviewergebnis zu „Verantwortung und Antreiber von MBSE im Unternehmen“

Wer bzw. welche Organisationseinheit die Einführung und die Verbreitung von MBSE hauptsächlich vorantreibt und verantwortet, wurde unterschiedlich bewertet (Abb. 5–7, ohne Mehrfachnennungen). Wie die Abbildung zeigt, konnten sich Antrieb und Verantwortung auch auf verschiedene Gruppen aufteilen.

Erkennbare Zusammenhänge zu Unternehmensmerkmalen gibt es keine. Neun Teilnehmer gaben zusätzlich an, dass es ein Ziel des Managements sei, MBSE-Methoden oder -Tools in Zukunft einzuführen, während hingegen bei zwei Unternehmen das Thema MBSE derzeit zurückgestellt ist.

5.4.5 Leitfrage 4: Anwendung modellbasierter Entwicklung

Mit Abstand am häufigsten entwickelten Unternehmen modellbasiert in der Softwareentwicklung (12 Nennungen), gefolgt von Elektrik/ Elektronik (4). Weitere Angaben der 24 Teilnehmer zum Einsatzzweck der Modellierung lauteten: Anforderungen (3), Plattformentwicklung (3), funktionale und logische Architektur (3), Prozess-/ Methodenentwicklung (2). Die Modellierung fand beinahe ausschließlich auf Systemebene, also auf einer Ebene mit hohem Abstraktionsgrad, statt. Die Verknüpfung zwischen einem MBSE-Modellierungstool und einer domänenspezifischen Software existierte nur in zwei Fällen – OSLC diene beispielsweise als Austauschformat (vgl. 2.11.2). Fünf Teilnehmer gaben an, die Modelle auch für die Dokumentation und Kommunikation zu nutzen.

5.4.6 Leitfrage 5: Einsatz von Modellierungstools

Nachfolgende Abb. 5–8 (mit Mehrfachnennungen) zeigt die sechs am häufigsten genannten MBSE-Tools und setzt sie mit den Branchen in Verbindung. Eine vollständige Übersicht mit allen genannten Tools befindet sich im Anhang B.4.

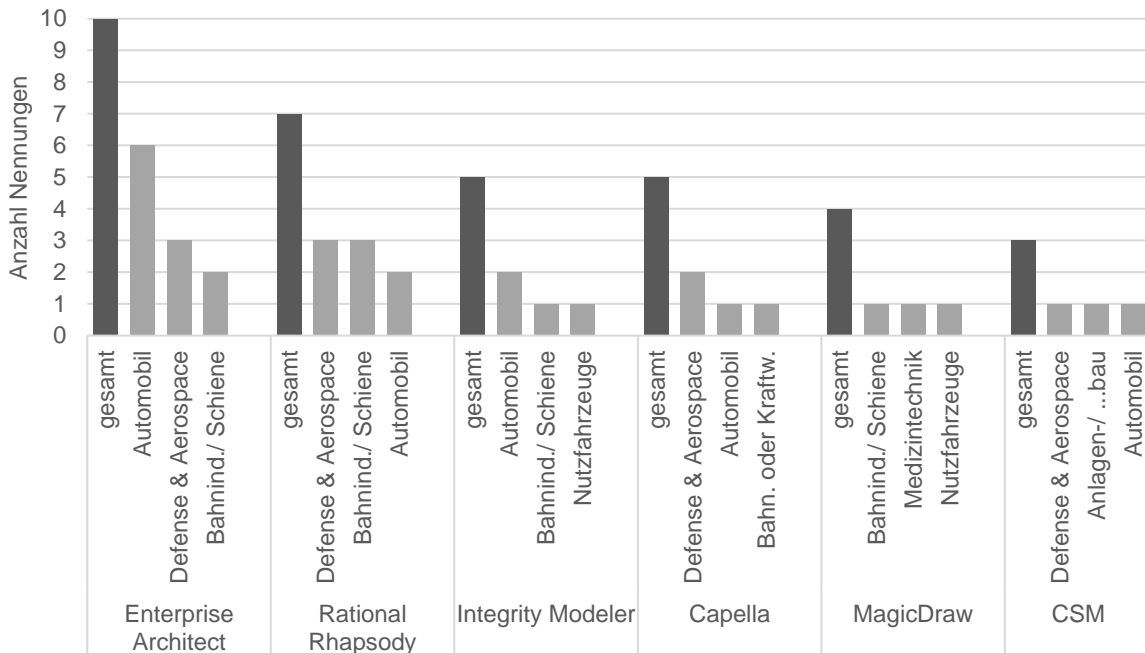


Abb. 5–8: MBSE-Tools und häufigste Nennungen je Branche

Zählt man MagicDraw und Cameo Systems Modeler (CSM) zusammen, denn beide werden von No Magic angeboten und CSM ist eine Weiterentwicklung von MagicDraw, so kommt die Lösung von No Magic wie Rational Rhapsody auf 7 Nennungen und belegt den gemeinsamen Rang 2 hinter Enterprise Architect von Sparx Systems. Unter den am häufigsten erwähnten Werkzeugen ist Capella die einzige Open Source Software. Der Mittelwert der genannten Tools pro Unternehmen beträgt 2,2 – die durchschnittliche Anzahl an Toolnennungen streut bei einer Standardabweichung von 1,2 jedoch auch relativ stark.

Enterprise Architect wird (im Vergleich zu anderen Branchen) am häufigsten in der Automobilbranche eingesetzt und wie PTC Integrity Modeler oder Capella vermehrt in den Unternehmen mit kundenspezifischer Auftragsentwicklung. Gleichzeitig stellt sich heraus, dass alle untersuchten Automobilunternehmen Enterprise Architect verwenden. Rational Rhapsody wird überwiegend in großen bis sehr großen Organisationen mit hohem oder sehr hohem Umsatz verwendet – es besteht kein deutlicher Zusammenhang zu der Branche oder dem Entwicklungsanlass. Die beiden Werkzeuglösungen von No Magic befinden sich in beinahe allen Branchen, ohne dass signifikante Zusammenhänge zu einem anderen Unterscheidungsmerkmal aus Tab. 5–1 bestehen.

Die Unternehmensgröße spielt bei der genannten Häufigkeit eines Tools nur bedingt eine Rolle. Mittelgroße Unternehmen nutzten in vier von fünf Fällen Enterprise Architect. Bei den sechs sehr großen Unternehmen, die zugleich alle einen relativ

hohen bis sehr hohen Umsatz generieren, ist auffällig, dass dreimal Enterprise Architect und Rational Rhapsody parallel zum Einsatz kommen.

Innerhalb der Umsatzgruppen werden keine Abhängigkeiten zu bestimmten Tools hergestellt.

In Unternehmen mit der Ausprägung kundenspezifische Auftragsentwicklung des Unterscheidungsmerkmals Entwicklungsanlass kam in sieben von zehn Fällen Enterprise Architect zum Einsatz, gefolgt von IBM und Capella und PTC (jeweils 3 Nennungen).

Zu den weiteren genannten Werkzeugen gehören:

- LemonTree von LieberLieber (1 Nennung)
- Papyrus von Eclipse Foundation (1)
- CONSENS vom Heinz-Nixdorf-Institut (1)
- iQuavis von ISID Ltd (1)
- yEd von yWorks (1)

LemonTree, CONSENS und yEd fallen in dieser Arbeit nicht unter die Definition eines MBSE-Tools (vgl. 2.9 und Kapitel 6).

Als Hürden für die Einführung und den Einsatz von Modellierungswerkzeugen wurden am häufigsten (zehnmal) die Tools selbst genannt, zweimal die als zu komplex empfundene Modellierungssprache SysML, zweimal die fehlende Bereitschaft im Unternehmen und einmal die Kunden eines Unternehmens, die weiterhin Dokumente statt Modelle verlangen. Die Gründe für die Tools selbst als Hindernis waren vielschichtig und lauteten beispielsweise: zu hohe Komplexität, zu geringe Benutzerfreundlichkeit, mangelhafte Toolintegration, zu geringe Leistungsfähigkeit oder fehlende mittelstandstaugliche Lizenzkostenmodelle.

5.5 Identifikation neu hinzugekommener Anforderungen

Nach Abschluss der Interviews wurden alle hinzugekommenen Anforderungen, die inhaltlich übereinstimmen, unter einer präzisen Anforderung (sogenannte Cluster) zusammengefasst. Das Ziel war es, möglichst viele Cluster zu bilden, ohne dabei die Anforderung zu allgemeingültig zu formulieren. Konnten zwei oder mehr ergänzte Anforderungen demselben Cluster zugeordnet werden, so zählen die Antworten nur als eine neu hinzugekommene Anforderung. Eine Übersicht aller im Fragebogen ergänzten Anforderungen sowie aller im Interview genannten Top-Anforderungen befindet sich im Anhang B.4. Sie zeigt neben den gebildeten Clustern auch eine Zuordnung zwischen Top-Anforderungen und entsprechenden Anforderungen aus dem Fragebogen.

17 der 31 Teilnehmer ergänzten im Rahmen des Fragebogens jeweils durchschnittlich 2,4 Anforderungen an ein Modellierungstool, die nicht bereits in den gelisteten 29 Anforderungen enthalten waren. Bei der Frage nach den Top-Anforderungen im Interview gaben 25 Teilnehmer durchschnittlich 3,0 neue Anforderungen an. Das bedeutet, dass im Fragebogen 55% und innerhalb des offenen Frageteils 81% der Teilnehmer *neue* Anforderungen identifizierten.

In Summe resultierten aus dem Fragebogen 20 neue Anforderungen und aus den offenen Interviews 26. Die Vereinigung beider ergibt insgesamt 28 zusätzliche, unterschiedliche Anforderungen.

Insgesamt haben 38 der 45 Experten und Anwender entweder im offenen Interview oder in Form des Fragebogens oder in beiden Interviewteilen Anforderungen formuliert bzw. bewertet. Es ergeben sich in Summe 57 unterschiedliche Anforderungen an ein MBSE-Werkzeug (vgl. Anhang B.4).

5.6 Auswertung der Anforderungen (Nr. 1-49) aus dem Fragebogen

Im Folgenden werden die Anforderungen an ein MBSE-Modellierungstool untersucht. Diese Auswertung basiert auf der Anforderungsliste des Fragebogens (geschlossene Fragen) und auf den dort im Freifeld von den Teilnehmern ergänzten Anforderungen.

Die Anforderungen im Fragebogen wurden jeweils mit einem Wert (von 1 für „unwichtig“ bis 4 für „sehr wichtig“) für ihre Wichtigkeit bewertet und erhielten durchschnittlich deutlich mehr Bewertungen als die im offenen Interview genannten Top-Anforderungen (vgl. Abschnitt 5.7). Das Zusammenführen aller Anforderungen sowie das Bilden einer Gesamtrangfolge ist deshalb nicht möglich. Die Interpretation und Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 5.8.

Für die Auswertung sind folgende Punkte zu beachten:

- Wenn Anforderungen im Fragebogen vom Teilnehmer ergänzt wurden und gleichzeitig einer schon im Fragebogen gelisteten Anforderung entsprachen, geht der Wert nur einfach in die Bewertung ein. Wurde dieselbe Anforderung mit unterschiedlichen Wichtigkeitswerten eingestuft, so wird der Mittelwert gebildet.
- Für den Fall, dass eine Anforderung von mehreren Teilnehmern desselben Unternehmens mehrfach bewertet wurde, so geht deren durchschnittliche Wert für die Wichtigkeit einmal in alle Auswertungen ein, in denen die Zusammenhänge zwischen den Anforderungen und den Unterscheidungsmerkmalen der Tab. 5–1 untersucht werden. Für die Gesamtauswertung, wie oft eine Anforderung insgesamt mit einem bestimmten Wert einging, zählen alle Antworten einzeln.
- Konnte innerhalb des Fragebogens keine Einschätzung getroffen werden, so bekam die Anforderung den Wert 0 für „keine Aussage“ zugewiesen. Der Wert 0 geht nicht in die Berechnung der mittleren Wichtigkeit ein.
- Anforderungen, die im offenen Interview als „weitere“ oder „allgemeine“ betitelt wurden und nicht einer schon im Fragebogen gelisteten Anforderung entsprachen, werden wie ergänzte Fragen mit einer Wichtigkeit von 3 behandelt. Sie galten für den Teilnehmer nicht als eindeutige Top-Anforderung (Wichtigkeit von 4), aber dennoch als so wichtig, dass sie im Rahmen des offenen Interviews genannt wurden.

5.6.1 Auswertung der im Fragebogen gelisteten Anforderungen (Nr. 1-29)

Zunächst erfolgt die Auswertung der Antworten zu den 29 im Fragebogen gelisteten Anforderungen an MBSE-Tools, wie sie in Anhang B.3 gezeigt sind.

Die Teilnehmer gaben im Kopf des Fragebogens ihre überwiegend genutzten MBSE-Tools an. Acht Teilnehmer füllten dieses Feld (zum Teil aus Geheimhaltungsgründen) nicht aus. Enterprise Architect und Integrity Modeler kamen in sechs Unternehmen zum Einsatz, gefolgt von Cameo Systems Modeler und Capella (je drei). Diese Häufigkeiten decken sich nur teilweise mit den Nennungen aus den offenen Leitfragen (vgl. 5.4.6). Enterprise Architect wird aber in beiden Interviewteilen als häufigste Antwort angegeben.

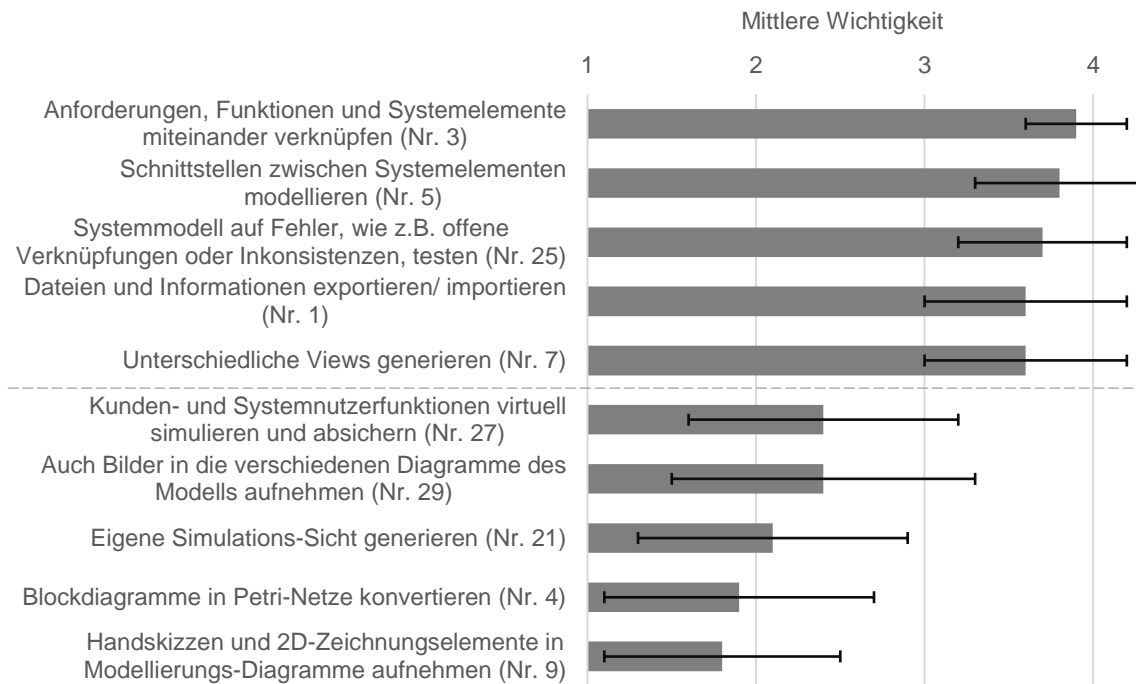


Abb. 5–9: Mittlere Wichtigkeiten der fünf wichtigsten und unwichtigsten Anforderungen des Fragebogens (Gesamtbetrachtung)

Abb. 5–9 zeigt die Mittelwerte \bar{x} der Wichtigkeit der jeweils fünf wichtigsten und unwichtigsten Anforderungen mit ihrer jeweiligen Standardabweichung s .

Die insgesamt wichtigste Anforderung (Nr. 3) weist die geringste Streuung s um den Mittelwert auf. Die durchschnittlich als am unwichtigsten bewertete Anforderung (Nr. 9) hat mit 0,7 die kleinste Standardabweichung unter den fünf unwichtigsten Anforderungen.

Blockdiagramme in Petri-Netze konvertieren (Nr. 4) und Kunden- und Systemnutzerfunktionen virtuell simulieren und absichern (Nr. 27) wird am häufigsten mit „keine Aussage (k.A.)“ bewertet (je dreimal von 31 Bewertungen). Diese Anforderungen scheinen sehr spezifisch in ihrer Anwendung zu sein.

Nach dieser vorangegangenen Gesamtbetrachtung der Anforderungen im Fragebogen werden nun die Anforderungen mit Blick auf die Merkmalsausprägungen der Unternehmen aus Tab. 5–1 einzeln untersucht.

In die wichtigsten Anforderungen je Merkmalsausprägung gehen die Anforderungen mit dem höchsten Mittelwert der Wichtigkeit ein. In die Gruppe der unwichtigsten Anforderungen gehen diejenigen mit dem niedrigsten Mittelwert ein – bis auf Anforderungen mit einem Durchschnittswert von größer gleich 2,5, denn eine

durchschnittliche Wichtigkeit größer als 2,5 kann bereits als wichtige Anforderung interpretiert werden (der Wichtigkeitswert 3 bedeutet „wichtig“). Im Normalfall werden die jeweils fünf wichtigsten bzw. unwichtigsten Anforderungen innerhalb einer Merkmalsausprägung untersucht. Falls mehrere Anforderungen denselben Mittelwert und dieselbe Standardabweichung innerhalb einer Merkmalsausprägung haben, so zählen sie alle zu den dort wichtigsten bzw. unwichtigsten. Folglich können auch mehr oder weniger als fünf wichtigste bzw. unwichtigste Anforderungen je Merkmalsausprägung vorkommen. Die Gesamtauswertungen für jedes Unterscheidungsmerkmal und seine Ausprägungen befinden sich im Anhang B.4.

Tab. 5–3: Gemeinsame (gem.) wichtigste und unwichtigste Anforderungen (Anf.) innerhalb eines Unterscheidungsmerkmals

Unterscheidungsmerkmal	gem. wichtigste Anf.	gem. unwichtigste Anf.
Branche	Nr. 3, 5, 7, 25	Nr. 4, 9, 21
Unternehmensgröße	Nr. 3, 5, 7, 25	Nr. 4, 9
Umsatz	Nr. 3, 5, 7, 25	Nr. 4, 9
Verteilung der Standorte	Nr. 3, 5, 25	Nr. 9, 21
Entwicklungsanlass	Nr. 1, 3, 5, 6, 7, 25	Nr. 4, 9
Gesamtbetrachtung (vgl. Abb. 5–9)	Nr. 1, 3, 5, 7, 25	Nr. 4, 9, 21, 26, 27

Die Tab. 5–3 zeigt die Anforderungen mit den jeweils häufigsten Überschneidungen bei den je fünf wichtigsten und unwichtigsten Anforderungen innerhalb eines Unterscheidungsmerkmals. Zum Vergleich sind auch die Anforderungen der Gesamtbewertung aus Abb. 5–9 aufgeführt. In die Spalten der gemeinsamen wichtigsten und unwichtigsten Anforderung gehen diejenigen Anforderungen ein, die entweder in allen Merkmalsausprägungen eines Unterscheidungsmerkmals unter den wichtigsten oder unwichtigsten Anforderungen vorkamen oder in allen bis auf maximal einer. Es wurde darauf geachtet, dass der Mittelwert der Wichtigkeit dieser einen Anforderung dann nicht konträr zu den mittleren Wichtigkeiten dieser Anforderung bei den übrigen Merkmalsausprägungen ist.

Die Übersicht sagt beispielsweise aus, dass sich die Branchen untereinander in Bezug auf ihre wichtigsten und unwichtigsten Anforderungen nicht signifikant unterscheiden, sondern dass sie sogar (branchenübergreifend) ein gemeinsames Set von überdurchschnittlich wichtigen oder unwichtigen Anforderungen besitzen (vgl. 5.6.1.1).

In Tab. 5–3 wird gleichzeitig deutlich, dass alle als überdurchschnittlich wichtig bzw. unwichtig bewerteten Anforderungen innerhalb eines Unterscheidungsmerkmals eine Teilmenge der jeweils wichtigsten bzw. unwichtigsten Anforderungen aus der Gesamtbewertung (unterste Zeile) sind – mit Ausnahme von Anforderung Nr. 6 beim Entwicklungsanlass, welche in der Gesamtbewertung aber auch noch eine mittlere Wichtigkeit von 3,4 erhält.

Wird die Spalte der gemeinsamen wichtigsten Anforderungen innerhalb der Unterscheidungsmerkmale betrachtet, zeigen sich folgende Besonderheiten:

In jedem Unterscheidungsmerkmal eines Unternehmens sind folgende Anforderungen unter den allen Merkmalsausprägungen gemeinsam wichtigsten Anforderungen:

- Nr. 3 Anforderungen, Funktionen & Systemelemente miteinander verknüpfen
- Nr. 5 Schnittstellen zwischen Systemelementen modellieren
- Nr. 7 Unterschiedliche Sichten generieren
- Nr. 25 Systemmodell auf Fehler testen

Die einzige Ausnahme ist Anforderung Nr. 7 in der Verteilung der Standorte. Nr. 7 hat dort in ihren beiden Merkmalsausprägungen eine durchschnittliche Wichtigkeit von 3,8 und 3,0 und gehört mit diesen Werten nicht zu den gemeinsamen wichtigsten Anforderungen – sie ist aber dennoch aufgrund der Wichtigkeitswerte auch in diesem Unterscheidungsmerkmal eine mindestens wichtige Anforderung.

Außerdem gehören der Export/ Import von Dateien und Informationen (Nr. 1) und die Modellierung von Systemkontext und -grenze (Nr. 6) nur bei den Merkmalsausprägungen des Entwicklungsanlasses ebenfalls zu den gemeinsam wichtigsten Anforderungen. In allen anderen Merkmalsausprägungen betragen die durchschnittlichen Wichtigkeiten für diese beiden Anforderungen mindestens 3,0 und sind somit auch mindestens wichtige Anforderungen.

Wird die Spalte der gemeinsamen unwichtigsten Anforderungen innerhalb der Unterscheidungsmerkmale betrachtet, zeigen sich folgende Besonderheiten:

In jedem Unterscheidungsmerkmal eines Unternehmens sind folgende Anforderungen unter den allen Merkmalsausprägungen gemeinsam unwichtigsten Anforderungen:

- Nr. 4 Blockdiagramme in Petri-Netze konvertieren
- Nr. 9 Handskizzen und 2D-Zeichnungselemente in Diagramme aufnehmen

Nur in der Verteilung der Standorte ist die Anforderung Nr. 4 nicht unter den gemeinsam unwichtigsten. Die mittleren Wichtigkeiten dieser Anforderung betragen dort in den Merkmalsausprägungen 1,7 („international verteilt“) und 2,5 („zentriert“).

Die Anforderung Nr. 21 befindet sich zudem nur innerhalb der Branchen und der Standortverteilungen unter den gemeinsam unwichtigsten. In allen anderen Merkmalsausprägungen wird diese Anforderung aber auch weder als wichtig noch als sehr wichtig eingestuft – mit Ausnahme der mittelgroßen Unternehmen (vgl. 5.6.1.2).

Die Standardabweichungen der jeweils am wichtigsten eingestuftten Anforderungen sind innerhalb jedes Unterscheidungsmerkmals niedriger als bei den unwichtigen. Das bedeutet, die Teilnehmer sind sich insgesamt betrachtet bei den tendenziell wichtigen Anforderungen eher einig als bei der Bewertung der unwichtigeren Anforderungen.

Weder unter den als durchschnittlich am höchsten noch unter den am niedrigsten bewerteten Anforderungen ist eine Tendenz dahingehend zu erkennen, dass innerhalb der Merkmalsausprägungen desselben Unterscheidungsmerkmals jeweils ein unterschiedliches Anforderungsset als wichtig bzw. unwichtig angesehen wird. Die einzelnen Unternehmen lassen sich also nicht grundsätzlich von anderen Unternehmen unterscheiden. Die einzige Auffälligkeit ergibt sich innerhalb der Unternehmensgrößen, bei denen insbesondere mittelgroße Unternehmen bestimmte Anforderungen konträr bewerten (vgl. 5.6.1.2).

Kombinationen aus mehreren Merkmalsausprägungen aus verschiedenen Unterscheidungsmerkmalen führen ebenfalls zu keinen erkennbaren

Zusammenhängen mit einem bestimmten Set an besonders wichtigen oder unwichtigen Anforderungen.

5.6.1.1 Besonderheiten innerhalb des Unterscheidungsmerkmals Branche

In der Medizintechnik und der Kraftwerkstechnik haben nur jeweils ein Teilnehmer den Fragebogen beantwortet, weshalb eine Verallgemeinerung oder eine Ableitung von Tendenzen aus diesen beiden Fällen nicht möglich ist. Die als „keine“ betitelte Branche wird ebenfalls nicht mit einbezogen.

Auffällig ist, dass Anforderungen, Funktionen und Systemelemente miteinander verknüpfen (Nr. 3) in jeder Branche mit dem höchsten Mittelwert von 4,0 bewertet wird, nur in Defense & Aerospace mit 3,8 (hierin erhielt nur die Anforderung Nr. 25 eine höhere mittlere Wichtigkeit von 4,0).

Die Ableitung von Instanzen aus dem Systemmodell (Nr. 18) kommt sowohl in den wichtigsten als auch in den unwichtigsten Anforderungen von Branchen vor: Während sie in der Nutzfahrzeugtechnik mit einer hohen durchschnittlichen Wichtigkeit von 3,5 bewertet wird, wird sie im Anlagen-/ Sonder-/ Maschinenbau mit durchschnittlich 2,5 bewertet. Da jedoch beide Wertungen auch eine Standardabweichung von 0,7 aufweisen, ist dies kein signifikanter Widerspruch.

5.6.1.2 Besonderheiten innerhalb des Unterscheidungsmerkmals Unternehmensgröße

Während die Datenbankverknüpfung (Nr. 11) bei den sehr großen Unternehmen zu den durchschnittlich wichtigsten Anforderungen zählt ($\bar{x} = 3,8$), bewerten sie die kleinen Unternehmen mit einer durchschnittlichen Wichtigkeit von 1,7.

Für die mittelgroßen Unternehmen zeigen sich mehrere Besonderheiten. Die Erstellung einer Simulations-Sicht (Nr. 21, $\bar{x} = 3,0$), die Simulation von Systemzuständen durch Parametervariationen (Nr. 26, $\bar{x} = 3,0$) und die virtuelle Simulation von Nutzerfunktionen (Nr. 27, $\bar{x} = 3,8$) werden von den mittelgroßen Unternehmen als durchschnittlich wichtig bis sehr wichtig bewertet. Bei den drei anderen Unternehmensgrößen (klein, groß, sehr groß) zählen sie jedoch jeweils zu den weniger wichtigen oder unwichtigen Anforderungen.

Das bedeutet, Unternehmen unterscheiden sich anhand ihrer Beschäftigtenanzahl bezüglich der Wichtigkeit der Anforderungen Nr. 11, 21, 26 und 27. Übergreifende Abhängigkeiten zwischen einem Satz von den durchschnittlich wichtigsten bzw. unwichtigsten Anforderungen und einer bestimmten Unternehmensgröße stellen sich insgesamt aber nicht heraus, da jeweils auch ein Set von vier gemeinsam wichtigen und zwei gemeinsam unwichtigen Anforderungen existiert (vgl. Tab. 5–3).

5.6.1.3 Besonderheiten innerhalb des Unterscheidungsmerkmals Verteilung der Standorte

Bei der Untersuchung der Wichtigkeit von Anforderungen nach dem Unterscheidungsmerkmal Verteilung der Standorte ist zu berücksichtigen, dass nur zwei der befragten Unternehmen an nur einem Standort („zentriert“) ihre Produkte entwickeln und die restlichen an international verteilten Standorten. Eine Abhängigkeit

zwischen der Wichtigkeit von Anforderungen und der Verteilung der Unternehmensstandorte lässt sich anhand der vorhandenen Daten nicht nachweisen.

5.6.1.4 Besonderheiten innerhalb des Unterscheidungsmerkmals Entwicklungsanlass

In diese Auswertung wird die Merkmalsausprägung der Forschungsaufträge nicht mit einbezogen, da der Fall der Entwicklung rein nach Forschungsaufträgen nur einmal auftrat. Es zeigen sich jedoch auch keine Abhängigkeiten zwischen dem Entwicklungsanlass „kundenspezifische Auftragsentwicklung“, „Katalogware“ oder „gemischt“ und einer bestimmten Kombination an besonders wichtigen oder unwichtigen Anforderungen.

5.6.2 Auswertung der im Fragebogen ergänzten Anforderungen (Nr. 30-49)

Die Anzahl der Bewertungen für eine im Fragebogen gelistete Anforderung ist naturgemäß deutlich höher als die einer ergänzten, weshalb die statistische Auswertung der ergänzten Anforderungen hier separat erfolgt. Wie bereits eingangs des Kapitels erwähnt, wurden von den Teilnehmern im Freifeld des Fragebogens insgesamt 20 Anforderungen ergänzt.

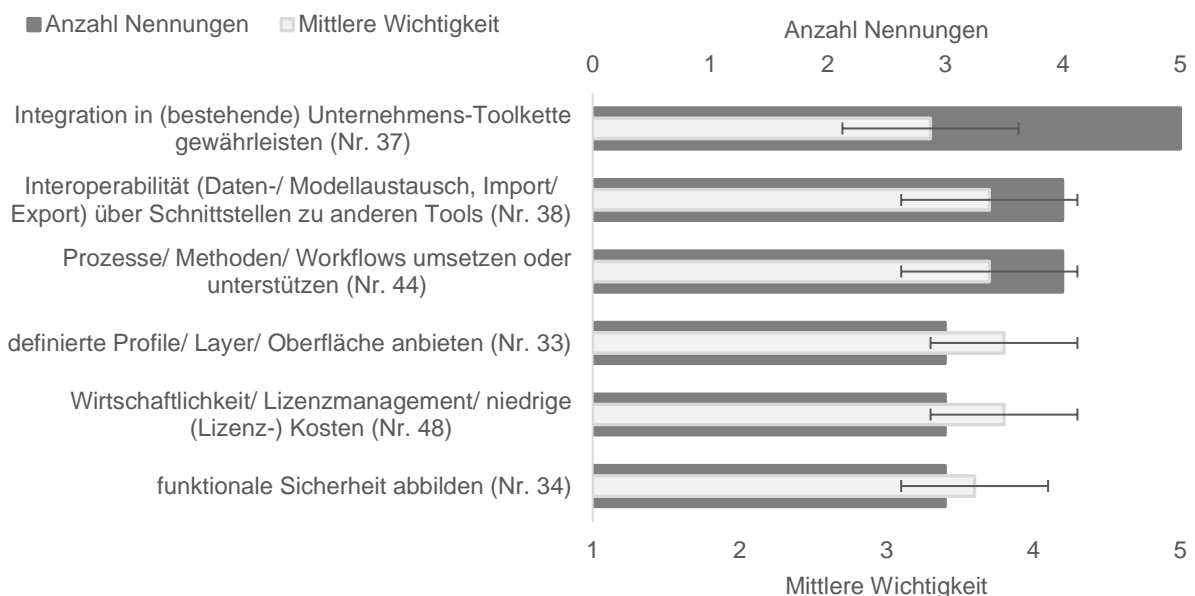


Abb. 5–10: Ergänzte Anforderungen aus dem Fragebogen (häufigste und wichtigste)

Abb. 5–10 zeigt die ergänzten Anforderungen sortiert nach ihren häufigsten Nennungen. Zusätzlich sind die jeweilige mittlere Wichtigkeit und Standardabweichung angegeben. Alle ergänzten Anforderungen sind im Anhang B.4 aufgelistet.

Die Interoperabilität von Tools (Nr. 38) und die Integration eines Tools in eine bestehende Unternehmens-Toolkette (Nr. 37) stehen in einem Zusammenhang, sind aber nicht gleichbedeutend. Erst durch den Austausch von Daten oder Informationen ist ein Tool in der Lage, mit anderen Werkzeugen effizient zu kommunizieren und sich in die bestehende Softwareumgebung zu integrieren. Auf der anderen Seite beinhaltet die Interoperabilität von Tools aber auch den Austausch von Daten und Informationen

mit gleichartigen Werkzeugen von anderen Unternehmen – so zum Beispiel den Modellaustausch zwischen OEM und Zulieferern, die ein gleiches oder unterschiedliches MBSE-Werkzeug für die Systemmodellierung verwenden. Die beiden Anforderungen wurden oftmals auch beide im selben Interview genannt. Aus diesen Gründen sind sie einzeln aufgeführt.

Der niedrigste Mittelwert einer Wichtigkeit unter allen ergänzten Anforderungen beträgt 3,0. Teilnehmer ergänzten folglich nur wichtige Anforderungen.

Die Auswertung ergibt keine Zusammenhänge zwischen einer beliebigen Merkmalsausprägung und einem bestimmten Satz von ergänzten Anforderungen. Die einzige Auffälligkeit ist, dass drei der fünf Unternehmen mit relativ hohem Umsatz und vier der fünf Unternehmen mit kundenspezifischer Auftragsentwicklung die Toolintegration (Nr. 37) nannten.

5.7 Auswertung der Top-Anforderungen (Nr. T1-39) aus den offenen Interviews

Die offene Frage nach den wichtigsten Anforderungen an ein MBSE-Modellierungstool (den sogenannten Top-Anforderungen, vgl. Abb. 5–1) zielt darauf ab, welche Anforderungen die Teilnehmer an ein Tool stellen. Da diese Antworten nicht vorformuliert waren, lässt sich daraus schließen, dass diese Anforderungen den Interviewteilnehmern besonders wichtig waren.

Die Auswertung teilt sich auf in eine Gesamtbetrachtung (Abb. 5–11), eine Auswertung nach einzelnen Unterscheidungsmerkmalen eines Unternehmens (5.7.1 bis 5.7.5) und eine Auswertung nach Kombinationen von Merkmalsausprägungen (5.7.6).

In offenen Interviews mit mehreren Vertretern einer Organisation gingen Mehrfachnennungen derselben Top-Anforderung nur einfach ein. 26 Teilnehmer formulierten ihre wichtigsten Anforderungen an ein MBSE-Tool. Im Durchschnitt wurden von einem Teilnehmer vier Top-Anforderungen (mit $s = 1,6$) genannt – die maximale Anzahl lag bei acht. Daraus haben sich insgesamt 39 Top-Anforderungen herausgebildet (vgl. Anhang B.4).

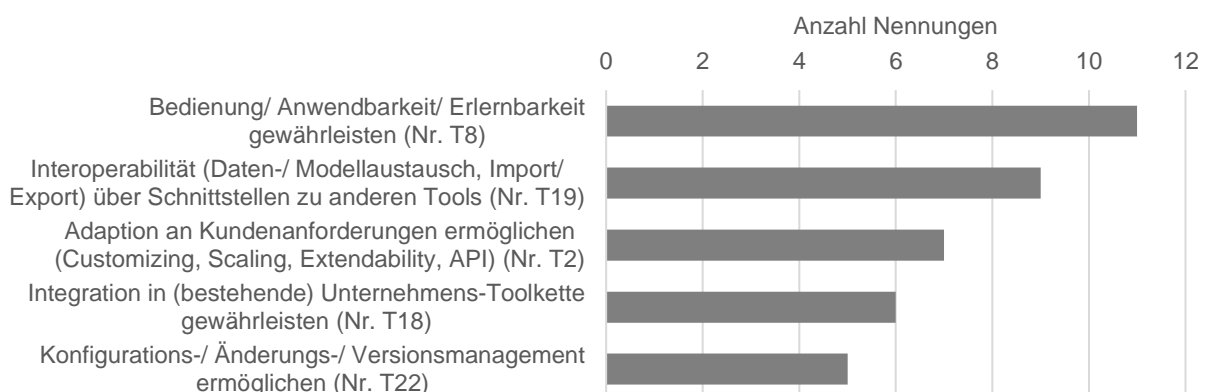


Abb. 5–11: Top-Anforderungen (häufigste)

Eine Anforderung wurde im Durchschnitt 2,6-mal genannt. Die Spreizung zwischen maximal 11 Nennungen und mindestens einer Nennung war relativ groß. 25 der 39 Top-Anforderungen wurden nur von einem oder zwei Teilnehmern genannt. Das

bedeutet, die Antworten sind insgesamt vielfältig. Da im offenen Frageteil keine Gewichtung von 1 bis 4 stattfand, wird die Rangfolge der Top-Anforderungen anhand der Nennungen erstellt (Abb. 5–11).

Wie bereits bei den ergänzten Anforderungen des Fragebogens in Abb. 5–10 sind die Interoperabilität von Tools und die Integration eines Tools in eine Toolkette getrennt voneinander aufgeführt.

Der Vergleich von jeweils wichtigsten Anforderungen, die im Fragebogen gelistet sind, und den im Interview meistgenannten Top-Anforderungen ist nicht möglich. Alle fünf meistgenannten Top-Anforderungen aus Abb. 5–11 sind neu hinzugekommene Anforderungen. Sie wurden jedoch alle auch im Freifeld des Fragebogens genannt bzw. ergänzt.

Analog zur Auswertung des Fragebogens hat nur jeweils ein Teilnehmer der Medizintechnik und Kraftwerkstechnik Top-Anforderungen formuliert. Die als „keine“ betitelte Branche wird für die Auswertung nach Unterscheidungsmerkmalen ebenfalls nicht mit einbezogen, da diese Experten nicht repräsentativ für eine Branche sind. Es verbleiben sechs unterschiedliche Merkmalsausprägungen des Unterscheidungsmerkmals Branche.

Die Gesamtauswertungen je Unterscheidungsmerkmal befinden sich im Anhang B.4. Folgende zwei Kriterien müssen für eine Top-Anforderung erfüllt sein, damit sie in die Auswertung der meistgenannten Top-Anforderungen eingeht: (1) Erst wenn eine Top-Anforderungen von mehr als einem der Interviewpartner innerhalb der betrachteten Merkmalsausprägung genannt wurde, zählt diese Top-Anforderung zu den fünf häufigsten Top-Anforderungen innerhalb dieser Merkmalsausprägung. Eine Anforderung, die beispielsweise innerhalb der Automobilbranche von nur einem der sechs Interviewpartner genannt wurde, fällt somit aufgrund ihrer niedrigen Repräsentativität nicht unter die darin häufigsten Top-Anforderungen. (2) Eine nur einmal genannte Top-Anforderung innerhalb einer Merkmalsausprägung, aus der nur zwei Interviewpartner befragt wurden, zählt mit in deren häufigste Top-Anforderungen, wenn sonst nicht schon fünf verschiedene, zweimal genannte Top-Anforderungen die häufigsten Top-Anforderungen definieren. Die Anforderungen Nr. T1, 15 und 25 sind hierfür ein konkretes Beispiel in der Nutzfahrzeugbranche (vgl. Abb. 5–12).

Wenn mehrere Top-Anforderungen, die die zwei beschriebenen Kriterien erfüllen, innerhalb einer Merkmalsausprägung gleich oft genannt wurden, sodass keine Rangfolge festgelegt werden kann, so gehen sie alle in die Auswertung ein. Exemplarisch hierfür sind die sieben meistgenannten Anforderungen aus Unternehmen mit kundenspezifischer Auftragsentwicklung (vgl. Abb. 5–16).

Für die nachfolgende Auswertung der Top-Anforderungen nach einzelnen Unterscheidungsmerkmalen wird der Begriff der charakteristischen Top-Anforderung eingeführt:

Eine charakteristische Top-Anforderung beschreibt eine Top-Anforderung, die sich ausschließlich innerhalb einer einzigen Merkmalsausprägung eines Unterscheidungsmerkmals unter den in diesem Unterscheidungsmerkmal meistgenannten Top-Anforderungen befindet.

Zum Beispiel ist die Anforderung Nr. T2 in Abb. 5–12 (orange gekennzeichnet) eine charakteristische Top-Anforderung für die Branche Defense & Aerospace.

Die fünf meistgenannten Top-Anforderungen in der vorangegangenen Abb. 5–11 sind alle auch charakteristische Top-Anforderungen. Die einzige Ausnahme ist die Integration des MBSE-Tools in eine bestehen Toolkette (Nr. T18), die in keiner Auswertung charakteristisch ist. Eine Erklärung könnte sein, dass diese Anforderung vermehrt von Experten ohne Branchenzugehörigkeit genannt wurde.

Die charakteristischen Top-Anforderungen für eine bestimmte Merkmalsausprägung (vgl. nachfolgende Auswertung) sind überwiegend neu hinzugekommene Top-Anforderungen. Diese Tatsache erklärt, dass die Untersuchung der im Fragebogen gelisteten Anforderungen zu keinen merkmaltypischen Sets von Anforderungen führte. Die einzige Ausnahme bilden die sehr großen Unternehmen: Alle charakteristischen Top-Anforderungen entsprechen auch Anforderungen des Fragebogens. Allerdings befinden sich nur zwei davon unter den wichtigsten (im Fragebogen bewerteten) Anforderungen der sehr großen Unternehmen und diese zwei sind gleichzeitig in mindestens zwei anderen Merkmalsausprägungen der Unternehmensgröße unter den wichtigsten Top-Anforderungen. Deshalb tritt der Zusammenhang zwischen den wichtigsten Anforderungen und dieser Merkmalsausprägung bei der Auswertung in 5.6 nicht auf.

Im Folgenden werden die meistgenannten und die charakteristischen Top-Anforderungen nach den einzelnen Unterscheidungsmerkmalen ausgewertet (5.7.1 bis 5.7.5). Diese Auswertung verfolgt das Ziel, Unterschiede oder Gemeinsamkeiten zwischen den Merkmalsausprägungen eines Merkmals in Bezug auf ihre merkmaltypischen, wichtigsten Anforderungen an ein MBSE-Tool zu finden. Es zeigt sich, dass in jedem Unterscheidungsmerkmal charakteristische Top-Anforderungen existieren, durch die sich Unternehmen unterscheiden.

5.7.1 Top-Anforderungen nach Branchen

Merkmalsausprägungen des Merkmals "Branche"							
Anzahl Interview-Teilnehmer		6	4	6	4	2	2
Top-Anforderung		Defense & Aerospace	Anlagen-/...bau	Automobil	Bahnind.	Nutzfahrz.	Mischkonzern
T2	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)	3					
T4	Anforderungsmanagement integrieren oder verknüpfen	2			2		1
T8	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten	2	2		4	1	2
T17	Integration & Test durchführen	2					
T19	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/ Export) über Schnittstellen zu anderen Tools	3	2	3			
T39	Wirtschaftlichkeit/ Lizenzmanagement/ niedrige (Lizenz-) Kosten		2				
T22	Konfigurations-/ Änderungs-/ Versionsmanagement ermöglichen			3			
T26	Prozesse/ Methoden/ Workflows umsetzen oder unterstützen			3			1
T10	Definierte Profile/ Layer/ Oberflächen anbieten			2			
T32	Unterschiedliche Zugriffsrechte für Dateien und Informationen			2			
T14	Funktionale Sicherheit abbilden				2	1	
T37	Verknüpfung und Synchronisation von Systemmodell mit Entwicklungsmodell(en)						1
T25	Modelviewer bieten					1	
T1	Varianten/ Instanzen aus Systemmodell ableiten und Variantenmanagement					1	
T15	Holistischen, homogenen Toolansatz bieten					1	
T21	Kommunikation unterstützen						1

Abb. 5–12: Charakteristische (orange) und meistgenannte Top-Anforderungen nach Branchen

Alle charakteristischen (orange gekennzeichnet) sowie meistgenannten Top-Anforderungen je Merkmalsausprägung sind unter Angabe der Anzahl an Nennungen in Abb. 5–12 zusammengefasst. Drei der fünf Teilnehmer aus der Automobilbranche nannten beispielsweise die Top-Anforderung Nr. T19.

In jeder Branche bis auf in der Automobilindustrie wurde Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleistet (Nr. T8) von mindestens der Hälfte der jeweiligen Interviewpartner genannt. Diese Top-Anforderung wurde von allen vier Teilnehmern aus der Branche Bahnindustrie/ Schienenverkehr sowie von beiden Mischkonzernen formuliert. In 50% der Branchen zählten das Anforderungsmanagement (Nr. T4) und die Interoperabilität (Nr. T19) zu den meistgenannten Top-Anforderungen.

Wie Abb. 5–12 zeigt, existiert für jede Branche außer für Bahnindustrie/ Schienenverkehr eine oder mehrere charakteristische Top-Anforderungen, durch die sie sich von den anderen Branchen unterscheiden.

5.7.2 Top-Anforderungen nach Unternehmensgrößen

Merkmalsausprägungen des Merkmals "Unternehmensgröße"					
Anzahl Interview-Teilnehmer		4	5	6	6
Top-Anforderung		klein	mittel	groß	sehr groß
T22	Konfigurations-/ Änderungs-/ Versionsmanagement ermöglichen	2			
T39	Wirtschaftlichkeit/ Lizenzmanagement/ niedrige (Lizenz-) Kosten	2			
T1	Varianten/ Instanzen aus Systemmodell ableiten und Variantenmanagement		2		
T4	Anforderungsmanagement integrieren oder verknüpfen		2		2
T19	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/ Export) über Schnittstellen zu anderen Tools		4		4
T29	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen		2		
T2	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)			3	
T8	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten			4	
T14	Funktionale Sicherheit abbilden			2	
T26	Prozesse/ Methoden/ Workflows umsetzen oder unterstützen			2	
T12	Elemente wiederverwenden				2
T27	Referenzmodelle in Bibliotheken archivieren				2
T36	Anforderungen, Funktionen und Systemelementen verknüpfen				2
T33	Unterschiedliche Sichten generieren				2

Abb. 5–13: Charakteristische (orange) und meistgenannte Top-Anforderungen nach Unternehmensgrößen

Sowohl in den mittelgroßen als auch in den sehr großen Unternehmen zählen das Anforderungsmanagement (Nr. T4) und die Interoperabilität (Nr. T19) zu den meistgenannten Anforderungen (Abb. 5–13).

Bis auf diese zwei Top-Anforderungen (Nr. T4 und T19) gelten alle meistgenannten Top-Anforderungen innerhalb dieser Auswertung für genau eine Unternehmensgröße. Es ergibt sich jeweils ein Set von zwei bzw. vier charakteristischen Top-Anforderungen, durch die sich die Unternehmen aufgrund ihrer Größe voneinander unterscheiden.

5.7.3 Top-Anforderungen nach Umsatz

Merkmalsausprägungen des Merkmals "Umsatz"					
Anzahl Interview-Teilnehmer		6	5	6	3
Top-Anforderung		relativ niedrig	mittel	relativ hoch	sehr hoch
T8	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten	2	3	2	
T19	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/ Export) über Schnittstellen zu anderen Tools	2	2	2	2
T22	Konfigurations-/ Änderungs-/ Versionsmanagement ermöglichen	3			
T29	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen	2			
T39	Wirtschaftlichkeit/ Lizenzmanagement/ niedrige (Lizenz-) Kosten	2	2		
T2	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)		2	2	
T33	Unterschiedliche Sichten generieren			2	
T26	Prozesse/ Methoden/ Workflows umsetzen oder unterstützen			2	
T4	Anforderungsmanagement integrieren oder verknüpfen				2

Abb. 5–14: Charakteristische (orange) und meistgenannte Top-Anforderungen nach Umsatz

Innerhalb der Umsatzgruppen in Abb. 5–14 sind die Interoperabilität (Nr. T19) in jeder und die Bedienbarkeit, Anwendbarkeit und Erlernbarkeit (Nr. T8) in drei der vier Merkmalsausprägungen unter den meistgenannten Top-Anforderungen. Die Top-Anforderung Nr. T8 wurde nur von einem der Unternehmen mit sehr hohem Umsatz genannt und scheint innerhalb dieser Merkmalsausprägung weniger wichtig zu sein.

Es existieren Top-Anforderungen, die in mehreren Merkmalsausprägungen als wichtig gelten. Für drei der vier Merkmalsausprägungen gibt es jedoch charakteristische Top-Anforderungen: Unternehmen mit relativ niedrigem, relativ hohem und sehr hohem Umsatz unterscheiden sich bezüglich ihrer charakteristischen Top-Anforderungen an ein MBSE-Tool.

5.7.4 Top-Anforderungen nach Verteilung der Standorte

Merkmalsausprägungen des Merkmals "Verteilung der Standorte"			
Anzahl Interview-Teilnehmer		2	19
Top-Anforderung		zentriert	international verteilt
T1	Varianten/ Instanzen aus Systemmodell ableiten und Variantenmanagement	1	
T3	Anforderungen modellieren	1	
T10	Definierte Profile/ Layer/ Oberflächen anbieten	1	
T16	Innovationen fördern	1	
T20	Kollaboration/ Multi-User Fähigkeit	1	5
T22	Konfigurations-/ Änderungs-/ Versionsmanagement ermöglichen		4
T4	Anforderungsmanagement integrieren oder verknüpfen		4
T8	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten		8
T19	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/ Export) über Schnittstellen zu anderen Tools		8

Abb. 5–15: Charakteristische (orange) und meistgenannte Top-Anforderungen nach Verteilung der Standorte

Es gibt jeweils vier charakteristische Top-Anforderungen, durch die sich die Unternehmen aufgrund ihrer Standortverteilung voneinander unterscheiden (Abb. 5–15).

Bei der Verteilung der Standorte ist jedoch zu beachten, dass nur zwei „zentrierte“ Unternehmen im Interview ihre wichtigsten Anforderungen benannten und 19 international verteilte.

5.7.5 Top-Anforderungen nach Entwicklungsanlass

Bei der Merkmalsausprägung „Katalogware“ haben vier verschiedene Interviewpartner insgesamt 11 unterschiedliche Top-Anforderungen genannt. Dabei wurde jede dieser 11 Anforderungen nur einmal genannt. Eine Selektion von den meistgenannten, wichtigsten Anforderungen ist nicht möglich. Die Repräsentativität ist zudem mit nur je einer Nennung nicht gegeben.

Merkmalsausprägungen des Merkmals "Entwicklungsanlass"		
Anzahl Interview-Teilnehmer	11	6
Top-Anforderung	kundenspezifische Auftragsentwicklung	gemischt
T2 Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)	4	
T8 Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten	4	3
T10 Definierte Profile/ Layer/ Oberflächen anbieten	2	
T12 Elemente wiederverwenden	2	
T19 Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/ Export) über Schnittstellen zu anderen Tools	5	
T27 Referenzmodelle in Bibliotheken archivieren	2	
T32 Unterschiedliche Zugriffsrechte für Dateien und Informationen erteilen	2	
T4 Anforderungsmanagement integrieren oder verknüpfen		2
T26 Konfigurations-/ Änderungs-/ Versionsmanagement ermöglichen		2
T39 Wirtschaftlichkeit/ Lizenzmanagement/ niedrige (Lizenz-) Kosten		2

Abb. 5–16: Charakteristische (orange) und meistgenannte Top-Anforderungen nach Entwicklungsanlass

Die Forderung nach der Bedienbarkeit (Nr. T8) befindet sich sowohl bei den Unternehmen mit kundenspezifischer Auftragsentwicklung als auch bei der Merkmalsausprägung „gemischt“ unter den meistgenannten (Abb. 5–16).

In beiden Merkmalsausprägungen existiert jedoch ein Set von sechs bzw. drei charakteristischen Top-Anforderungen, anhand derer sie sich voneinander unterscheiden.

5.7.6 Wichtigkeit von Top-Anforderungen nach Kombinationen aus zwei oder mehr Merkmalsausprägungen

Nachfolgend werden alle theoretisch möglichen und gleichzeitig sinnvollen Kombinationen an Merkmalsausprägungen auf ihre gemeinsamen Top-Anforderungen hin untersucht. Damit ein Ergebnis als relevant gilt, muss diese Kombination aus mindestens zwei Merkmalsausprägungen bestehen und es muss mindestens zwei entsprechende Interviewteilnehmer geben. Eine übereinstimmende Top-Anforderung muss mindestens zweimal innerhalb dieser Kombination genannt worden sein und dabei gleichzeitig von mehr als der Hälfte der Teilnehmer (aus dieser Kombination). Das bedeutet beispielsweise: Eine oder mehrere Top-Anforderungen, die jeweils von zwei der vier Teilnehmer, die aus dem Bereich Defense & Aerospace kommen und deren sehr große Unternehmen sehr hohen Umsatz generieren, genannt wurde, gilt

als nicht repräsentativ für dieses Set von Merkmalsausprägungen, auch wenn diese Top-Anforderung(en) von zwei Teilnehmern genannt wurden. Wäre eine dieser Top-Anforderungen von drei statt zwei Teilnehmern genannt worden, so würde sie als Ergebnis zählen. Es wird dadurch eine Mindestgrenze eingeführt, die die Repräsentativität und die Aussagekraft eines Ergebnisses sicherstellt.

Das Resultat der Untersuchung aller Kombinationen von Merkmalsausprägungen zeigt:

Zwei von drei sehr großen Unternehmen aus dem Defense & Aerospace, die sich durch international verteilte Standorte und kundenspezifische Auftragsentwicklung charakterisieren, formulierten folgende Top-Anforderungen:

- Nr. T2 Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)
- Nr. T19 Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/ Export) über Schnittstellen zu anderen Tools

Zwei von zwei kleinen Unternehmen aus dem Anlagen-/ Sonder-/ Maschinenbau, die sich durch relativ niedrigen Umsatz und „gemischten“ Entwicklungsanlass charakterisieren, formulierten folgende Top-Anforderung:

- Nr. T39 Wirtschaftlichkeit/ Lizenzmanagement/ niedrige (Lizenz-) Kosten

Zwei von zwei sehr großen Automobilunternehmen mit international verteilten Standorten formulierten folgende Top-Anforderung:

- Nr. T19 Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/ Export) über Schnittstellen zu anderen Tools

Folgende Sets von Merkmalsausprägungen forderten die Bedienbarkeit, Anwendbarkeit und Erlernbarkeit (Nr. T8):

- Zwei von zwei großen Unternehmen aus dem Sektor Bahnindustrie/ Schienenverkehr mit international verteilten Standorten
- Zwei von zwei Unternehmen aus dem Sektor Bahnindustrie/ Schienenverkehr, die sich durch mittelgroßen Umsatz, international verteilte Standorte und kundenspezifische Auftragsentwicklung charakterisieren
- Zwei von zwei Unternehmen aus dem Sektor Bahnindustrie/ Schienenverkehr mit international verteilten Standorten und „gemischtem“ Entwicklungsanlass
- Zwei von zwei Mischkonzerne mit international verteilten Standorten und „gemischtem“ Entwicklungsanlass

Bei dieser Auswertung gilt es zu beachten, dass bis auf den ersten Fall immer nur *eine* übereinstimmende Top-Anforderung für ein Set von Merkmalsausprägungen zutrifft. Von einem Set von Top-Anforderung kann also in der Regel nicht gesprochen werden. Gleichzeitig begründet sich jedes der als relevant identifizierten Sets von Merkmalsausprägungen nur auf den Aussagen von zwei oder drei Interviewteilnehmern.

Diese Ergebnisse entsprechen nicht der strengen Definition von Archetypen von Unternehmen. Die Hypothese, dass Archetypen existieren, kann nicht bestätigt werden.

5.7.7 Vergleich der Top-Anforderungen mit den Anforderungen aus der Literaturrecherche

Insgesamt stimmen 23 der 41 Anforderungen aus der Literaturrecherche (vgl. Tab. 4–1 in 0) mit 21 der 39 im Interview genannten Anforderungen überein. Das bedeutet auf der einen Seite, dass 18 der in der Literatur genannten Anforderungen für die Interviewteilnehmer nicht zu den für sie wichtigsten gehörten. Auf der anderen Seite sind unter den 39 Top-Anforderungen ebenfalls 18 Anforderungen, die nicht in der Literatur genannt wurden.

Die Teilnehmer der offenen Interviews bestätigten folglich die Anforderungen aus der Recherche etwa zur Hälfte und formulierten gleichzeitig noch 18 zusätzliche, wichtige Anforderungen.

5.8 Diskussion der Anforderungen und Archetypen

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Ergebnisse der vorangegangenen Auswertungen gesondert diskutiert.

Im offenen Interview stellt sich heraus, dass unabhängig vom MBSE-Bekanntheitsgrad das tatsächlich vorhandene Begriffs- und Methodenverständnis von MBSE in den Unternehmen unterschiedlich ausgeprägt ist (vgl. 5.4.4). Das könnte erklären, dass sich die jeweiligen Begriffsdefinitionen der Teilnehmer in 5.4.2 relativ stark voneinander unterscheiden, und ein Indiz dafür sein, dass noch nicht sehr viele industrielle Anwendungsbeispiele (vgl. Kapitel 4) veröffentlicht wurden.

Aus den Antworten aus den offenen Interviews ergibt sich eine Tendenz, dass ein Zusammenhang zwischen der Verwendung von bestimmten MBSE-Tools und den Unterscheidungsmerkmalen Branche, Unternehmensgröße und Entwicklungsanlass besteht (vgl. 5.4.6).

Sowohl in den Fragebögen als auch in den offenen Interviews kommt eine hohe Anzahl an neuen Anforderungen an MBSE-Tools hinzu, die noch nicht im Fragebogen gelistet sind. Dies unterstützt die Entscheidung, die Untersuchung der Anforderungen nicht nur basierend auf einer Literaturrecherche, sondern zusätzlich durch die Befragung von Experten und Anwendern durchzuführen. Eine Untersuchung rein anhand des Fragebogens hätte nur circa die Hälfte der insgesamt 57 Anforderungen abgedeckt.

Bei der insgesamt wichtigsten und unwichtigsten Anforderung aus dem Fragebogen (vgl. 5.6.1) liegt jeweils die geringste Standardabweichung vor. Das deutet darauf hin, dass die Teilnehmer sich bezüglich dieser Anforderungen relativ einig sind. Die Standardabweichungen innerhalb der Auswertung des Fragebogens zeigen allgemein: Die Einschätzung der Teilnehmer ist am konträrsten, wenn es um die virtuelle Simulation und Absicherung von Kunden- und Systemnutzerfunktionen geht (größte Standardabweichung). Die Teilnehmer sind sich bei den wichtigen Anforderungen eher einig (niedrigere Standardabweichungen) als bei der Bewertung der unwichtigeren Anforderungen (höhere Standardabweichungen).

Die insgesamt 14 wichtigsten Anforderungen an ein MBSE-Werkzeug aus dem Fragebogen (Abb. 5–9), den dort ergänzten (Abb. 5–10) und den Top-Anforderungen der Interviews (Abb. 5–11) lauten (ohne Rangfolge oder Gewichtung):

- Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API) (Nr. 49, T2)
- Anforderungen, Funktionen und Systemelemente miteinander verknüpfen (Nr. 3, T36)
- Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten (Nr. 31, T8)
- Dateien und Informationen exportieren/ importieren (Nr. 1, T13)
- definierte Profile/ Layer/ Oberfläche anbieten (Nr. 33, T10)
- funktionale Sicherheit abbilden (Nr. 34, T14)
- Integration in (bestehende) Unternehmens-Toolkette gewährleisten (Nr. 37, T18)
- Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/ Export) über Schnittstellen zu anderen Tools (Nr. 38, T19)
- Konfigurations-/ Änderungs-/ Versionsmanagement ermöglichen (Nr. 40, T22)
- Prozesse/ Methoden/ Workflows umsetzen oder unterstützen (Nr. 44, T26)
- Schnittstellen zwischen Systemelementen modellieren (Nr. 5)
- Systemmodell auf Fehler, wie z.B. offene Verknüpfungen oder Inkonsistenzen, testen (Nr. 25)
- Unterschiedliche Sichten generieren (Nr. 7, T33)
- Wirtschaftlichkeit/ Lizenzmanagement/ niedrige (Lizenz-) Kosten (Nr. 48, T39)

Die Integration in die bestehende Toolkette (Nr. 37, T18) und die Interoperabilität zu anderen Tools (Nr. 38, T19) befinden sich sowohl bei den Top-Anforderungen als auch bei den ergänzten Anforderungen unter den meistgenannten und wichtigsten.

Diese beiden Anforderungen werden deshalb als die insgesamt wichtigsten Anforderungen bewertet.

Die Hypothese, dass mehrere Archetypen bezüglich der Anforderungen an ein MBSE-Tool existieren (vgl. Abschnitt 3.4), kann in dieser Arbeit weder bestätigt noch verworfen werden. Weder die Auswertungen der Fragebögen noch die offenen Interviews verweisen auf einen deutlichen Zusammenhang zwischen einem Set von Merkmalsausprägungen und einem Set von Tool-Anforderungen. Die Auswertung der Top-Anforderungen deutet auf die tendenziell mögliche Existenz von Archetypen hin. Diese bestehen in der Regel aber aus einem Set von Merkmalsausprägungen und nur einer gemeinsamen wichtigsten Anforderung, weshalb sie nicht exakt der Definition der Archetypen entsprechen.

6 Stand der Technik von ausgewählten MBSE-Tools und MBSE-Methoden

Die Charakterisierung der untersuchten MBSE-Tools erfolgt in diesem Kapitel. Nachfolgende Abschnitte sind von unterschiedlichen Blickwinkeln aus beschrieben. In Abschnitt 6.1 wird eine Zusammenfassung je MBSE-Tool anhand der Angaben der Anbieter gegeben. In Abschnitt 6.2 werden die Tool-Features der verschiedenen Anbieter gelistet, was den Vergleich mit anderen untersuchten Tools aus der Sicht eines einzelnen Tools erlaubt. Abschnitt 6.3 stellt aus Sicht der Anforderungen dar, welches Feature eines Tools die jeweilige Anforderung umsetzt. Abschließend werden ausgewählte MBSE-Methoden vorgestellt. Nach diesem Kapitel stehen alle notwendigen Informationen für die Erarbeitung einer Vorgehensweise zur Selektion eines geeigneten MBSE-Tools bereit.

Tab. 6–1: Überblick über MBSE-Tools und Tools im MBSE-Kontext

Toolbezeichnung	Anbieter	MBSE-Tool	Kontext
Astah	Change Vision Inc.	x	
Cameo Systems Modeler	No Magic Inc.	x	
Capella	PolarSys (Eclipse Working Group)	x	
CORE	Vitech Corporation	x	
Enterprise Architect	Sparx Systems Pty Ltd	x	
GENESYS	Vitech Corporation	x	
Integrity Modeler	PTC	x	
iQUAVIS	ISID Ltd	x	
MagicDraw	No Magic Inc.	x	
Modelio	Modeliosoft	x	
Papyrus	PolarSys (Eclipse Working Group)	x	
Rational Rhapsody	IBM Corporation	x	
SOX	EnCo Software GmbH	x	
UModel	Altova	x	
Visual Paradigm	Visual Paradigm International Ltd.	x	
XLDyn	XLDyn LLC	x	
CATIA V6 3D Experience	Dassault Systemes		x
Jazz	IBM Corporation		x
MATLAB/Simulink	MathWorks		x
ModelCenter MBSEpak	Phoenix Integration		x
Model.CONNECT	AVL List GmbH		x
OpenModelica	OpenModelica		x
ParaMagic	Intercax LLC		x
Polarion ALM	Siemens		x
PREEvision	Vector Informatik GmbH		x
pure::variants	pure-systems GmbH		x
Rational DOORS	IBM Corporation		x
Syndeia	Intercax LLC		x

TeamCenter	Siemens		x
Visio	Microsoft		x
yEd	yWorks		x








In Tab. 6–1 wird zunächst ein Überblick an Software gegeben, die im Rahmen von Expertengesprächen oder in der untersuchten Literatur genannt wurde. Die Voraussetzungen für die Einordnung einer Software in die Spalte der MBSE-Tools werden in Abschnitt 2.9 diskutiert. Die wesentlichen Aspekte sind: Ein MBSE-Tool...

- ...verhält sich nach Vorschriften einer oder mehrerer Modellierungssprachen.
- ...befähigt und unterstützt den Anwender bei der Generierung von Modellen in dieser Sprache.
- ...bildet die Systemelemente und ihre Beziehungen untereinander ab.
- ...ermöglicht durch Diagrammtypen unterschiedliche Sichten auf ein Modell.

MBSE-Tools sollen darüber hinaus branchen- und domänenübergreifend einsetzbar sein. Aus diesem Grund zählt PREEvision hier nicht zu den MBSE-Tools. PREEvision ist ein Modellierungswerkzeug für die Entwicklung von Elektrik-/ Elektronik-Architekturen in der Fahrzeugentwicklung und ist Teil der AUTOSAR-Werkzeugkette für AUTOSAR-Steuergeräte (vgl. 2.4.5). [57] Die beiden Lösungen von No Magic werden nachfolgend nur noch unter der Software Cameo Systems Modeler behandelt, die die MagicDraw-Lösung zusammen mit der SysML-Erweiterung und dem Cameo Simulation Toolkit ist. [58]

Unter die Kategorie „Kontext“ fallen in Tab. 6–1 alle Tools, die eigenständig in einer modellbasierten Entwicklung bei der Umsetzung von SE-Prozessaktivitäten eingesetzt werden können und/ oder mit den MBSE-Tools interagieren, aber in ihrem Kern nicht der Erstellung von ganzheitlichen Systemmodellen dienen. Die Software IBM Rational DOORS, ein klassisches Tool aus dem Anforderungsmanagement, gehört beispielsweise zu dieser Kategorie. Zu fast jeder gelisteten Software existiert eine Vielzahl an Softwareerweiterungen, die unterschiedlich als Add-On, Add-In oder Plug-In betitelt werden und aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht aufgeführt sind.

Tab. 6–2: Überblick über die untersuchten MBSE-Tools

Toolbezeichnung	Anbieter	
Cameo Systems Modeler	No Magic	
Capella	PolarSys (Eclipse Working Group)	
Enterprise Architect	Sparx Systems	
Integrity Modeler	PTC	
iQUAVIS	ISID Ltd	
Rational Rhapsody	IBM Corporation	
Visual Paradigm	Visual Paradigm International	

Die in dieser Arbeit untersuchten MBSE-Tools sind in Tab. 6–2 aufgeführt. Die Auswahl basiert auf der Anzahl an Nennungen in der Interviewreihe sowie auf Hinweisen der MBSE-Experten über etablierte und am weitesten verbreitete Modellierungssoftware.

6.1 MBSE-Tools und ihre Eigenschaften

Nachfolgend wird jedes Tool auf Basis der vom Anbieter bereitgestellten Informationen beschrieben. Zusätzlich werden Branchenbeispiele genannt, wo das Tool eingesetzt wird, sowie Einschätzungen der interviewten Experten gegeben, um dem Leser nach diesem Abschnitt eine erste Einordnung aller Tools zu ermöglichen.

6.1.1 Cameo Systems Modeler von No Magic

Cameo Systems Modeler (CSM) ist eines der Kernprodukte von No Magic und unterstützt alle SysML-Diagramme. [59, S. 7]



Abb. 6–1: Cameo Systems Modeler in einer modellbasierten Entwicklungsumgebung [60]

Der Anbieter beschreibt CSM als eine plattformübergreifende und kollaborative MBSE-Umgebung, wie Abb. 6–1 verdeutlicht. [60] Die möglichen Editionen sind die *Architect Edition* inklusive MagicDraw Architect und einer SysML-Erweiterung sowie die *Enterprise Edition*, die zusätzlich das Cameo Simulation Toolkit beinhaltet. [58]

Um den Übergang zum modellbasierten Systems Engineering (vgl. Abschnitt 2.1) zu vereinfachen, entwickelte No Magic mit SysML-Lite eine vereinfachte Version der SysML, die nur sechs der neun SysML-Diagramme (vgl. Abb. 2–7) beinhaltet. CSM ist

mit SysML-Lite vorkonfiguriert und kann zur vollfunktionalen Version mit dem kompletten SysML- und UML-Umfang erweitert werden. [61]

Die von No Magic publizierten Anwendungsbeispiele stammen aus dem Gesundheitssektor, dem Transportwesen, der Luft- und Raumfahrt und der Kriegsmarine. [62] Aus der Literaturrecherche und den Experten-Interviews resultieren unter anderem weitere Beispiele aus der Landtechnik, dem Sondermaschinenbau, der Getriebeentwicklung oder der Verhaltensmodellierung in der Luftfahrt.

Aus dem Interview mit einem Anwender aus der Getriebeentwicklung geht hervor, dass CSM viele Features, eine intuitive Modellierung und Bedienung durch eine anpassbare GUI (graphical user interface) sowie modellinterne Simulationen und Schnittstellen zu anderen Entwicklungstools bereitstellt. Auf der anderen Seite machen die vielen Features das Tool unübersichtlich und führen zu einem hohen Aufwand bei der Einarbeitung und Modellierung. Gegenüber PTC Integrity Modeler (vgl. 6.1.4) können Anforderungen sehr einfach aus Microsoft Excel und anderen Programmen als ReqIF-Datei (vgl. 2.11.3) importiert werden. [Teilnehmer Nr. 31]

6.1.2 Capella von PolarSys (Eclipse Working Group)

Der Ursprung von Capella liegt im Unternehmen Thales. 2014 wurde die Software als Teil von PolarSys, einer Arbeitsgruppe der Eclipse Foundation, zu einer Open Source Software. [Teilnehmer Nr. 40]

Capella bietet mit der hinterlegten Methode ARCADIA eine methodische Anleitung und Modellierung für System-, Software- und Hardwarearchitekten. [63] Die Modellierungssprache ARCADIA Domain Specific Modeling Language (DSML) hat viele Gemeinsamkeiten mit den Standards UML, SysML und NAF (NATO Architecture Framework). [64]

Neben Thales verwenden Unternehmen wie beispielsweise ArianeGroup (Luft- und Raumfahrt), Framatome (Energietechnik) und Continental Automotive (Automobil) das Tool Capella mit ARCADIA. [63]

Zu den Alleinstellungsmerkmalen von Capella gehören laut eines Experten aus der Luft- und Raumfahrt die freie Verfügbarkeit und die Hinterlegung eines Prozesses bzw. einer Methode durch ARCADIA. [Teilnehmer Nr. 1] Capella deckt jedoch nicht die komplette Software-Domäne (z.B. Code-Generierung) ab. Des Weiteren verwendet Capella eine eigene Modellierungssprache, die sich an der SysML orientiert, aber weniger komplex ist. [Teilnehmer Nr. 40]

6.1.3 Enterprise Architect von Sparx Systems

Enterprise Architect ist ein UML-basiertes MBSE-Tool für Analyse, Design, Visualisierung und Management im Bereich der System- und Softwareentwicklung. Der gesamte Entwicklungs- und Lebenszyklus eines Systems wird abgedeckt – beginnend bei der Anforderungserhebung, weiter durch die Phasen der Modellierung, Implementierung und des Testens bis hin zum Systemeinsatz und zur Wartung. Die *Ultimate Edition* und die *Systems Engineering Edition* unterstützen auch SysML, die parametrische Modellsimulation und die Generierung von ausführbarem Code. [65]

Die vom Hersteller veröffentlichten Referenzen gehen von einer Versicherungsgesellschaft über die Modularisierung im Anlagenbau bis hin zur Kommunikationsunterstützung in einer Telekommunikationsfirma. [66]

Einschätzungen und teilweise konträre Erfahrungswerte aus den Interviews lauteten:

- Enterprise Architect hat kein Metamodell im Hintergrund und ist eher eine Datenbank mit „Visio-Malerei“. [Teilnehmer Nr. 31]
- Enterprise Architect ist preiswert und besitzt einen niedrigen Formalisierungsgrad. Die Verknüpfung mit IBM Rational DOORS funktioniert nicht zufriedenstellend. [Teilnehmer Nr. 14]
- Enterprise Architect ist für KMU zu mächtig und zu teuer. [Teilnehmer Nr. 30]
- Enterprise Architect ist sehr komplex und hat eine weniger intuitive Bedienung. [Teilnehmer Nr. 19]

Das Tool-Review auf SysML.Tools² ordnet die Verknüpfung mit Software des Anforderungsmanagements als unterdurchschnittlich ein. [67]

6.1.4 Integrity Modeler von PTC

Integrity Modeler ist ein graphisches Werkzeug für Systems und Software Engineering und gehört zu den PLM-Werkzeugen von PTC. Integrity Modeler unterstützt UML und SysML und erfüllt die ISO 26550/IEC „Software and systems engineering - Reference model for product line engineering and management“. [68]

Unternehmen, die die Integrity-Lösung verwenden, sind zum Beispiel Alstom Transport, AVL, GKN Driveline, Barco, Ingersoll Rand oder Schneider Electric. [69]

In der Interviewreihe hat ein Teilnehmer einige Nachteile des Integrity Modelers gegenüber CSM von No Magic hervorgehoben. Die Simulationen können nicht direkt im Tool ausgeführt werden. Die Schnittstelle zu MATLAB/Simulink ist kompliziert. Außerdem können keine Anforderungen aus Microsoft Excel importiert werden. [Teilnehmer Nr. 31] Andere Teilnehmer bewerten Integrity Modeler als umfangreicher und schwerer zu bedienen als Enterprise Architect. Das Variantenmanagement und ein starkes Metamodell werden als Vorteil empfunden. Ein Teilnehmer bemängelt außerdem die Anbindung zum PTC Lifecycle Manager (Anforderungsmanagement) und empfiehlt die Verknüpfung zu IBM Rational DOORS. [Teilnehmer Nr. 27]

6.1.5 iQUAVIS von ISID Ltd

iQUAVIS ist ein Visualisierungstool und eine Methodik für die Systemmodellierung des japanischen Anbieters ISID, das die MBSE-Modellierung, das Projektmanagement und das Qualitäts- und Risikomanagement miteinander kombiniert. [70]

Der Software liegt keine spezifische Modellierungssprache zugrunde. Anwendern wird ermöglicht, ihre präferierte Sprache zu verwenden. iQUAVIS verfügt über mehrere Modellierungsmöglichkeiten (Requirement Tree, Entity Tree, Function Block Diagram,

² Auf der Plattform SysML.Tools geben Experten und Anwender Informationen und Rezensionen über SysML-Werkzeuge. Inhaltlich verantwortlich ist die PivotPoint Technology Corporation. [67]

u.a.), die den neun SysML-Diagrammen zuordenbar sind. Der Nutzer definiert dafür jedoch eigene operative Regeln. [71]

Informationen zu iQUAVIS stützen sich zu großen Teilen auf dem direkten Kontakt mit dem Anbieter, da sich die englische Website noch im Aufbau befindet und eine Auflistung aller Funktionen noch nicht zur Verfügung gestellt wird. [71]

Im Rahmen einer Untersuchung von MBSE-Werkzeugen durch Fraunhofer IEM wird iQUAVIS mit anderen Modellierungstools für KMU verglichen. iQUAVIS ist in den untersuchten Dimensionen Anpassbarkeit und Prozessunterstützung besser als die vergleichbaren SysML-Editoren. Das Tool entspricht dadurch in vielen Teilen den definierten Anforderungen von KMU (vgl. Abschnitt 3.3). Weitere Vorteile neben einer intuitiven Bedienung sind die automatische Generierung von Gantt-Diagrammen, Matrizen und Tabellen. Schnittstellen zur Integration mit Software aus PDM (Product Data Management) oder PLM fehlen jedoch. [40] Ein kleines Unternehmen des Maschinenbaus aus der Interviewreihe hat das Tool bereits verwendet, hat es momentan jedoch nicht mehr im Einsatz. [Teilnehmer Nr. 19]

Laut Anbieter ist das Tool bei vielen namhaften Unternehmen in Japan im Einsatz. [72] Die allgemeine Verbreitung scheint in Deutschland gering zu sein. Anhand der Untersuchung des Fraunhofer IEM lässt sich aber (für die Zukunft) ein mögliches Einsatzfeld für KMU ableiten.

6.1.6 Rational Rhapsody von IBM Corporation

Die Rational Rhapsody Familie ist ein Modellierungswerkzeug für System- und Softwareentwickler mit dem Ursprung in der Modellierung von eingebetteten Systemen. [73]

Die Basisedition ist *Architect for Systems Engineers*. Darauf aufbauend unterstützt *Designer for Systems Engineers* die Simulation und Validierung des Systemverhaltens. Die *Architect for Software* Edition ermöglicht die Generierung von C, C++, C# und Java Code-Gerüst. Die *Developer* Edition enthält zusätzlich die Code-Generierung für Architektur und Verhalten. (Webbasierte) Team-Kollaborationen werden mit der Edition *Design Manager* umgesetzt. [74]

Das Portal SysML.Tools empfiehlt Rational Rhapsody *Designer* sowohl für grundlegende als auch für fortschrittliche Simulationen. [67] Zwei Teilnehmer aus den Experten-Interviews empfinden, dass Rhapsody schwieriger als Enterprise Architect zu bedienen sei. [Teilnehmer Nr. 4, 8]

6.1.7 Visual Paradigm von Visual Paradigm International Ltd

Visual Paradigm ist ein MBSE-Tool für die Unternehmensarchitektur, das Projektmanagement und die Softwareentwicklung. Visual Paradigm ermöglicht agile Softwareentwicklung mit vollautomatischen Prozessen für die Pflege des Product Backlogs. [75]

Zu den Anwendern zählen neben Universitäten viele Unternehmen unterschiedlichster Größe, wie beispielsweise Apple, Intel, Nokia und Toyota. [76]

SysML.Tools bewertet Visual Paradigm als empfehlenswert in der agilen SysML-Modellierung und als weniger geeignet für Simulationen. [67]

6.2 Gegenüberstellung von Stärken und Schwächen der untersuchten MBSE-Tools

Für einen Vergleich der MBSE-Tools untereinander werden die Features eines jeden Tools untersucht und Stärken sowie Schwächen im Vergleich zu anderen Tools ermittelt. Als Quelle dienen die Websites der Anbieter, Benutzerhandbücher und der direkte Kontakt zum Anbieter sowie vom Anbieter angebotene Foren. Eine Zusammenfassung der Literatur, die für die Recherche der Features herangezogen wurde, findet sich im Anhang B.5 wieder.

Die Matrix in nachstehender Tab. 6–3 zeigt eine Auswahl an den für wichtig erachteten Features. Die vollständige Übersicht aller recherchierten Features befindet sich im Anhang B.7. Die mit * gekennzeichneten Einträge bedeuten, dass für die Nutzung oder Umsetzung dieses Features eine Erweiterung zum MBSE-Tool notwendig ist. Erweiterungen können beispielsweise kostenfreie Zusatzprogramme desselben Herstellers sein, die nicht im Umfang einer gewählten Edition enthalten sind, oder eigenständige Software von Drittanbietern. Innerhalb der Betrachtung eines MBSE-Tools wird nicht zwischen den verschiedenen Editionen unterschieden.

Aus Sicht der in Tab. 6–3 gezeigten Tool-Features leiten sich folgende Besonderheiten bezüglich bestimmter Features ab:

- Alle MBSE-Tools sind konform mit UML und SysML, allerdings nicht in jeder Edition und nicht in den Tools Capella und iQUAVIS. Alle SysML-konformen Tools bieten Features für die Simulation von Systemverhalten oder Zusicherungsdiagrammen an.
- Jedes MBSE-Tool ermöglicht den Import und Export von Dateien und Informationen. Die unterstützten Dateiformate unterscheiden sich jedoch.
- Alle untersuchten MBSE-Tools bis auf iQUAVIS bieten verschiedene Möglichkeiten, erstellte Modelle auf Fehler oder offene Verknüpfungen zu überprüfen.
- Prozesse und Methoden sind nur bei Capella und iQUAVIS eng mit den Modellierungstools selbst verknüpft bzw. inhärenter Bestandteil des MBSE-Ansatzes dieser Anbieter.
- Alle untersuchten MBSE-Tools bieten Möglichkeiten, die Auswirkungen von Änderungen auf betroffene Systemkomponenten bzw. Modelle zu zeigen oder zu analysieren – allerdings auf unterschiedliche Art und Weise.

Tab. 6–3: Gegenüberstellung ausgewählter Features der MBSE-Tools

	aktuellste Version Editionen	Cameo Systems Modeler	Capella	Enterprise Architect	Integrity Modeler	iQUAVIS	Rational Rhapsody	Visual Paradigm
	18.5 SP3 Enterprise Edition, Architect Edition	1.2.0	13.5 Ultimate, Systems Engineering, Business & Software, Engineering, Corporate, Professional, Desktop	8.4		8.3.0 Architect for/ Designer for Systems Engineers, Developer, Architect for Software, Design Manager	15.0 Enterprise, Professional, Standard, Modeler	
Feature/ Eigenschaft								
Modellierungssprache								
		x		x	x		x	x
		x		x	x		x	x
12	ARCADIA DSML		x					
13	BPMN	x		x				x
17	UPDM (DoDAF, MODAF)	x			x		x*	
19	Entwicklung von DSML wird unterstützt						x	
19	keine spezifische Modellierungssprache, eigene operative Regeln aufstellen					x		
Repository								
27	Repository: wird unterstützt/ angeboten	x*		x	x		x	x
26	Repository: modifizierbar			x				
26	Repository: eigenes erstellbar			x	x			
Code-Generierung								
49	Code-Generierung wird unterstützt	x		x	x	nein	x	x
53	Funktion für Code-Debugging	x		x				
53	C/C++/C#	x		x	x		x	x
53	Java	x		x	x		x	x
54	Python			x				x
54	Ada			x			x	
61	Entwicklung eines eigenen Code-Generators möglich		x					
Wiederverwendung/ Bibliotheken								
65	Wiederverwendung von Modellelementen wird unterstützt		x	x	x*	x	x*	x
66	Bibliotheken werden unterstützt		x	x	x*	geplant		
445	Software-Erweiterung <i>pure:variants</i> für Wiederverwendung	x	x	x	x		x	
Simulation								
72	Möglichkeiten der Simulation gegeben	x		x	x		x	x
44	Verknüpfung mit Simulationssoftware	x	x	x	x	x	x	
74	Simulation eines User Interfaces	x						
77	SysML Parametric Model Simulation	x		x*				
78	Simulation von Systemverhalten (Activity, Sequence, State)	x		x	x		x	
80	Simulation von Geschäftsprozessen (BPMN)			x				x
79	Update von Simulationsvariablen in Echt-Zeit			x				
85	Software-Erweiterung: ParaMagic	x			x			
85	Software-Erweiterung: MATLAB/Simulink	x		x*	x		x	
450	Software-Erweiterung: Integrity Modeler SySim				x			
86	Software-Erweiterung: 1D Simulationstools mit Modelica- Sprache					x		
91	Agile Systems Engineering (Sprint Board, User Stories)							x
Import/ Export								
100	Import/ Export: Excel, CSV	x	x	x	x		x	x
101	Import: ReqIF	x	x	x*	x*	geplant	x	
104	Export: HTML	x	x	x	x		x	x
105	Export: Bilder (z.B. bitmap, jpeg, png, emf, ...)	x	x	x	x		x	x
Import/ Export XML/ XMI								
110	Import/ Export: XML	x		x	x	x	x	x
112	XMI Austausch wird unterstützt	x	prototype	x	x		x	x
Dokumentationsmanagement								
115	Text (RTF, MS Word, ...)	x	x	x	x		x	x
118	HTML	x	x	x	x		x	x
120	Vorlagen für Report/ Dokumentation	x			x			x
123	automatische Report-/ Dokumenterzeugung				x			
124	Synchronisation von Dokument und Modell							x
125	Diagramme in Dokumente integrieren							x
Interoperabilität								
127	IBM Rational DOORS	x*		x	x		x	
136	Integrity Lifecycle Manager				x			
445	JAMA			x				
133	MATLAB/Simulink	x		x*	x		x	
143	ParaMagic	x			x			
144	OpenModelica					x		
445	ModelCenter (MBSEpak)	x					x	
450	Integrity Modeler SySim				x			
128	IBM Rational Software Architect (RSA), IBM Rational Software Modeler (RSM)	x*						x
137	PTC Windchill	x*			x			
140	Siemens PLM Teamcenter	x*		x				
145	IBM Rational Rhapsody Design Manager						x	
142	<i>pure:variants</i>	x	x	x	x		x	
132	IBM Rational Rhapsody	x*						
134	Vitech CORE	x*						
135	Petri-Netze	x*						
138	PTC Creo (CAD)				x			
139	PTC Mathcad				x			
130	Syndeia (Intercax) AddOn für CAD, PLM, Simulation, ALM, Reqs Mgmt	x					x	
141	Capella ermöglicht die Integration/Interoperabilität mit Entwicklungstools von Drittanbietern		x					

	Cameo Systems Modeler	Capella	Enterprise Architect	Integrity Modeler	iQUAVIS	Rational Rhapsody	Visual Paradigm
Feature/ Eigenschaft							
148	Integration in Toolkette						
149	OSLC	<i>prototype</i>	<i>prototype</i>	x	x	x	
112	Import/Export XML konform	x		x	x	x	x
152	ganzheitlicher Ansatz (laut Hersteller)		x	x		x	
154	Produktlinienengineering/ Variantenmgmt.						
155	wird unterstützt	x*	x*	x*	x,x*	x*	
156	ISO 26550 konform (Orthogonal Variability Modeling (OVM) for model-based Product Line Mgmt.)			x			
155	Variantenmodellierung mit 150%-Modellen			x			
162	Sichten (Views/ Viewpoints)						
164	werden unterstützt (in untersch. Ausprägung)	x	x	x	x	x	x
163	Zachman Framework	x*		x			x
172	Model Viewer/ Modellanzeigemöglichkeit	x		x		<i>nein</i>	x
177	Profile/ Rollen/ Layer						
178	Profile oder Rollen (vordefiniert/ individuell)	x		x	x	x	
179	domänenspezifische Profile		x	x		x	
186	Rückverfolgbarkeit/ Traceability (Analysemöglichkeiten)	x	x	x	x	x	x
199	Standardkonformität (neben SysML, UML, ...)						
199	AUTOSAR		x			x	
200	ISO 26262: Road vehicles – Functional safety		x	x*		x	
201	ISO 26550: Software and systems engineering - Reference model for product line engineering and management			x			
202	ISO/IEC/IEEE 42010: Systems and software engineering - Architecture description		x				
447	IEEE 1220: Application and management of the systems engineering process / ISO 24748-4: Systems engineering planning		x				
220	Konfigurations/ Versionsmanagement (z.B. Baselines, diff&merge, Revisionen)		x	x		x	x
230	Modellüberprüfung/ Model Checking	x	x	x	<i>nein</i>	x	x
237	Kollaborationen/ Multi-User Fähigkeit	x	x	x	x	x,x*	x
256	Anforderungen modellieren und organisieren						
257	Anforderungsdiagramm/ -modell	x	x	x	x	x	x
258	Requirements Mgmt (Import, Export, Synchronize, Validate, Trace, Analyse, ...)	x		x	x	x	x
259	Verknüpfung mit Anforderungssoftware	x*		x		x	
277	Designalternativen vergleichen			x	x		
279	Verknüpfung Anforderungen, Funktionen, Systemelemente						
280	wird unterstützt	x	x	x	x	x	x
452	SysML: <satisfy>, <allocate>, ...	x		x	x	x	x
289	Verknüpfungen visualisieren (Visual Map)						x
293	Dekomposition/ Aufgliederung/ Breakdown						
37	inhärente Eigenschaft von SysML/ UML (bbd, ibd, system hierarchy, composition, ...)	x		x		x	x
294	wird unterstützt	x	x		x		x
300	Abhängigkeiten/ Modellbeziehungen						
30	inhärente Eigenschaft von SysML/ UML (satisfy, allocate, interface modeling in ibd, Ports, ...)	x		x	x	x	x
301	Mechanismen für Strukturen und ihre Beziehungen (relation map, dependency report, ...)	x	x	x			
317	Bilder in Diagramme integrieren	x		x		x	
321	Reverse Engineering	x*	x	x	x	x	x
323	Prozesse/ Methoden						
331	Erweiterungssoftware für Prozesse (z.B. für ISO15288)				x*		
332	Methode hinterlegt (z.B. ARCADIA)		x		x		
333	Open Group Architecture Framework (TOGAF®)	x		x			x
334	Rational Harmony for Systems Engineers					x*	
335	Just-in-Time Process						x
336	SYSMOD und FAS	x*					
359	Anpassungsmöglichkeiten für die Modellierung						
360	(offene) API	x				x	x
362	API für die Entwicklung von Standpunkten		x				
363	Modellierungssprache erstellen oder modifizieren		x		x		x
364	neue Modellelemente oder -verbindungen erstellen (UML-Notation erweitern)		x				
365	Diagramm-Stereotypen ändern			x			
367	operative Modellierungsregeln erstellen				x		
377	Funktionale Sicherheit						
376	wird unterstützt	x*		x	x*	x	
378	Safety and Reliability Analysis (FMEA, FMECA, DRBFM, ...)	x			x		
381	unterstützt ISO 26262: Road vehicles – Functional safety		x	x*		x	
382	Auswirkung von Änderungen						
385	Impact Analysen (verschiedener Art)	x	x	x	x	x	x
395	Betriebssysteme						
396	Mac OS	x	x	x			x
397	Windows	x	x	x	x	x	x
398	Linux	x	x	x		x	x
399	Lizenzkosten/ Lizenzmanagement						
400	Floating-Lizenzen	x		x		x	x
403	Individuelle Kosten/ auf Anfrage	x			x	x	
404	High-end Version (Floating)			809 €		> \$1660	\$2599
405	High-end Version (Standard)			665 €		> \$739	\$1999
406	Low-end Version (Floating)			319 €			\$129
407	Low-end Version (Standard)			129 €			\$99
408	Open Source		x				

Anhand der Gegenüberstellung der Features können nun die wesentlichen Stärken, Schwächen oder Alleinstellungsmerkmale vom Standpunkt eines MBSE-Tools aus gegenüber den anderen untersuchten Tools ermittelt werden.

Für die Wiederverwendung von Modellen ist in CSM eine Softwareerweiterung notwendig. CSM kann mit vielen anderen Entwicklungstools integriert werden und unterstützt den Austauschstandard XMI. OSLC wird jedoch bisher nur in einer Beta-Version unterstützt. CSM ist im Vergleich zu den anderen Tools mit weniger Standards konform, ein Plug-In ermöglicht jedoch die Integration von Methoden aus SYSMOD (vgl. Abschnitt 2.8) und FAS (Functional Architecture for Systems).

Capella stützt sich nicht auf Modellierungssprachen wie UML oder SysML, sondern besitzt eine eigene Sprache, die sich zwar an den genannten orientiert, aber laut Aussage eines Experten weniger komplex ist. [Teilnehmer Nr. 40] Capella bietet keine direkte Möglichkeit, Code zu generieren. Software für Systemsimulationen kann verknüpft werden. Die Unterstützung von OSLC und XMI ist prototypenhaft umgesetzt. Der Grad an Interoperabilität mit anderen Entwicklungstools ist relativ gering. Aspekte der funktionalen Sicherheit werden in Capella nicht abgebildet. Zu den Alleinstellungsmerkmalen und zugleich größten Vorteilen gehört, dass die Methode ARCADIA implementiert ist und dass Capella eine Open Source Software ist.

Enterprise Architect unterstützt ein sehr umfangreiches Spektrum an Code-Generierung. Die Möglichkeiten für Simulationen sind gegeben, zum Teil aber nur mit Erweiterungen umsetzbar. Für den Austausch von Anforderungen im Format ReqIF bedarf es ebenfalls einer Erweiterung. Enterprise Architect ermöglicht den Austausch mit OSLC und XMI. Die Interoperabilität mit anderen Entwicklungstools ist weniger umfangreich als bei CSM. Enterprise Architect weist Konformität zu AUTOSAR und dem Standard ISO 26262 auf, woraus sich Nutzungsmöglichkeiten für Unternehmen der Automobilbranche ergeben. Floating-Lizenzen für die Premiumedition sind günstiger als die entsprechenden Editionen von Rational Rhapsody und Visual Paradigm.

PTC Integrity Modeler unterstützt alle gängigen Modellierungssprachen bis auf BPMN. Bei der Code-Generierung bietet das Tool weniger Funktionen als Enterprise Architect und CSM. PTC bietet auch Simulationssoftware an, die verknüpft werden kann. Eine Anbindung zu ParaMagic und MATLAB/Simulink ist zusätzlich gegeben. Das Format ReqIF wird mittels Softwareerweiterung unterstützt, OSLC und XMI werden standardmäßig unterstützt. Integrity Modeler bietet vergleichsweise umfangreiche Möglichkeiten für die Produktlinienentwicklung und Variantenmodellierung.

iQUAVIS bietet mit seiner eigenen Modellierungssprache Elemente, die der SysML ähneln. Funktionen für Code-Generierung, Produktlinienmanagement, Variantenmodellierung oder Modellüberprüfung werden nicht angeboten. Simulationmöglichkeiten sind eingeschränkt (nur durch eine Erweiterung) gegeben. OSLC, XMI und andere Standards werden nicht unterstützt, in iQUAVIS ist aber eine Modellierungsmethodik hinterlegt. Außerdem werden Aspekte der funktionalen Sicherheit wie beispielsweise Sicherheits- und Verlässlichkeitsanalysen unterstützt. Lizenzkosten sind für den europäischen Markt noch nicht veröffentlicht. Der Nachweis für die momentane Praxistauglichkeit und Anwendung ist demzufolge limitiert.

Rational Rhapsody ist konform mit UML, SysML und mit einer Erweiterung auch mit UPDM. Der Import und Export wichtiger Formate wird neben den Austauschstandards

OSLC und XMI unterstützt. Rational Rhapsody bietet Code-Generierung für die meisten Programmiersprachen, hat jedoch keine Möglichkeit der reinen Modellanzeige (Model Viewer). Die Interoperabilität ist mit mehr Tools gegeben als bei Enterprise Architect, im Vergleich mit CSM oder Integrity Modeler jedoch beschränkt. Rational Rhapsody unterstützt AUTOSAR und den Standard ISO 26262. Die herstellereigene Methode Rational Harmony kann mithilfe einer Erweiterung integriert werden.

Visual Paradigm unterstützt UML, SysML und BPMN und die Code-Generierung für die meisten Programmiersprachen. Eine Interoperabilität mit anderen Entwicklungstools ist nur geringfügig gegeben. Standards, funktionale Sicherheit, OSLC oder Variantenmodellierung werden nicht unterstützt, dafür der Import und Export von XMI. Die Simulation für Geschäftsprozesse (BPMN) ist möglich, allerdings gibt es keine Verknüpfungen zu Simulationssoftware von Drittanbietern. Visual Paradigm bietet als einziges der untersuchten Tools Ansätze aus dem agilen Systems Engineering.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die fünf MBSE-Tools CSM, Enterprise Architect, Integrity Modeler, Rational Rhapsody und Visual Paradigm kaum mit Capella oder iQUAVIS zu vergleichen sind. Capella hat als Open Source Software keinen Anbieter im Hintergrund, der in Konkurrenz mit anderen großen Anbietern steht und dem andere Mittel für beispielsweise die Weiterentwicklung des Tools und für den Kundensupport zur Verfügung stehen. Bewertung und Vergleich von iQUAVIS sind insofern schwierig, da die meisten Informationen über die Funktionalität nur über den direkten Kontakt mit dem Hersteller recherchierbar sind. Diese beiden MBSE-Tools besitzen einen geringeren Funktionsumfang als die fünf erstgenannten Tools, haben aber auch spezifische Vorteile.

Insgesamt betrachtet decken die untersuchten Tools einen großen Funktionsumfang ab. Die Überschneidung an gemeinsamen Features ist relativ groß, sie unterscheiden sich jedoch in bestimmten Anwendungsfeldern (vgl. Tab. 6–3).

6.3 Zuordnung von Tool-Features zu Anforderungen

In diesem Abschnitt wird aus Sicht der 57 Anforderungen (vgl. Abschnitt 5.8 und Anhang B.4) dargestellt, welche Features der MBSE-Tools diese Anforderungen umsetzen. Wie 6.3.2 im Detail zeigt, ist es auch möglich, dass eine Anforderung durch mehrere Features realisiert wird.

6.3.1 Mapping

Durch ein sogenanntes Mapping werden Tool-Features zu Anforderungen zugeordnet. Das Mapping dient später als Grundlage für die Selektion eines geeigneten Tools.

Tab. 6–4: Zuordnung von Features zu Anforderungen (Mapping)

Anforderung		Cameo Systems Modeler	Capella	Enterprise Architect	Integrity Modeler	iQUAVIS	Rational Rhapsody	Visual Paradigm
		Feature/ Eigenschaft						
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren			96				
		100	100	100	100		100	100
		101	101	101*	101*		101	
								102
		104	104	104	104		104	104
		105	105	105	105		105	105
		110		110	110	110	110	110
								111
		112		112	112		112	112
		115	115	115	115		115	115
		117						
		118	118	118	118		118	118
		2	Änderungen und Anpassungen am vorhandenen Systemmodell vornehmen und nachverfolgen	187	187	187	187	
258				258	258		258	258
				221	221		221	221
3	Anforderungen, Funktionen und Systemelemente miteinander verknüpfen	280	280	280	280	280	280	280
		452		452	452		452	452
		301		301	301		301	301
			302					
4	Blockdiagramme in Petri-Netze konvertieren	135*						
5	Schnittstellen zwischen Systemelementen modellieren		20					
		21		21	21		21	21
		22		22	22		22	22
7	unterschiedliche Sichten generieren	163*		163				163
		164	164	164	164		164	164
		163*		163				163
8	System auf verschiedenen Detail- und Abstraktionslevels anzeigen	164	164	164	164		164	164
		293	293	293	293	293	293	293
		37		37	37		37	37
			38					
			39*					
9	Handskizzen und 2D-Zeichnungselemente in Modellierungs-Diagramme aufnehmen	443*						
13	entwickelte Elemente und Informationen für neue Systeme wiederverwenden		65	65	65*	65	65*	65
					67			
		448*	448*	448*	448*		448*	
15	Use Cases modellieren und daraus Anforderungen ableiten	42	42	42	42		42	42
						272		
								276
								303
16	Software aus dem Anforderungsmanagement (z.B. DOORS) integrieren oder verknüpfen	127*		127	127		127	
					136			
		258		258	258		258	258
17	Systemmodell mit domänenspezifischen Entwicklungsmodellen (z.B. CAD-Modell oder Simulationsmodell) verknüpfen und synchronisieren		147					
		130*					130*	
					138			
					139			
						141		
		446*					446*	
133		133*	133		133			
143			143					
18	aus einem Systemmodell einzelne Instanzen ableiten (i.S.v. Varianten des Systems)					144		
		142*	142*	142*	142*		142*	
					155			
					156			
20	automat. Vorgehenspläne für Test und Verifikation des Systems erstellen durch Simulationen das Systemverhalten testen und absichern							
		72		72	72		72	72
		78		78	78		78	
		449*	449*	449*	449*	449*	449*	
		83*			83*			
		85*		85*	85*		85*	
						86*		
		130*					130*	
					450*			
		446*					446*	
21	Simulations-Sicht generieren		167					
22	Bauteilkombinationen und Lösungsalternativen testen und absichern				278	278		
23	Auswirkung von Änderungen auf das System aufzeigen						274*	
25	Systemmodell auf Fehler, wie z.B. offene Verknüpfungen/ Inkonsistenzen, testen	385	385	385	385	385	385	
26	verschiedene Systemzustände durch Parametervariationen simulieren	231	231	231	231		231	231
		72		72	72		72	
		449*	449*	449*	449*	449*	449*	
		77						
				79				
		83*			83*			
		85*		85*	85*		85*	
						86*		
		130*					130*	
		446*					446*	

Anforderung		Camoo	Capella	Enterprise	Integrity	iQUAVIS	Rational	Visual	
		Systems Modeler		Architect	Modeler		Rhapsody	Paradigm	
		Feature/ Eigenschaft							
28	reduzierbarer und anpassbarer Umfang und Aufwand der Modellierung	316			316				
29	Bilder in die verschiedenen Diagramme des Modells aufnehmen	318		318			318		
T2	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)						183		
		205	205	205	205			205	
		360					360	360	
			362						363
				363		363			
				364					
					366				
						367			
						369			
							370		
T6	basierend auf Text statt Diagrammen arbeiten								
T8	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten	205	205	205	205			205	
		316			316				
		425	425	425	425	425	425	425	
		359	359	359	359	359	359	359	
		395	395	395	395	395	395	395	
		12							
T9	Code-Generierung	49		49	49		49	49	
		50		50	50		50	50	
		51		51	51		51	51	
				52					
				53					
				54				54	
					55				
					56		56		
		59		59					
				60*					
						63			
T10	definierte Profile/ Layer/ Oberfläche anbieten	178		178	178	178	178		
				179	179		179		
					180				
					181				
						182			
							183		
					184				
T14	funktionale Sicherheit abbilden (FMEA, CAN-Bus, AUTOSAR, FTA, ...)	378*		378	378*	378	378		
		379				379			
T15	holistischen, homogenen Toolansatz bieten			381	381*		381		
T16	Innovationen fördern			153	153		153		
T18	Integration in (best.) Unt.-Toolkette gewährleisten	126*	126*	126*	126*	126*	126*	126*	
		149		149	149		149		
		112		112	112		112	112	
T19	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/Export) über Schnittstellen zu anderen Tools (z.B. XML, OSLC)	126*	126*	126*	126*	126*	126*	126*	
		149		149	149		149		
		112		112	112		112	112	
		110		110	110	110	110	110	
		101	101*	101*		101			
T20	Kollaboration/ Multi-User Fähigkeit	238	238	238	238	238	238		
T21	Kommunikation unterstützen							313	
								314	
T22	Konfigurations-/ Änderungs-/ Versionsmanagement ermöglichen (z.B. Baselines)			221	221		221	221	
T23	Model Review unterstützen	231	231	231	231		231	231	
T25	Model Viewer/ Modellanzeigemöglichkeit anbieten	173		173	173			173	
T26	Prozesse/ Methoden/ Workflows umsetzen oder unterstützen	329	329	329	329*	329	329	329	
T28	sehr komplexes Systemverhalten abbilden								
T29	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen	4		4	4		4	4	
		7		7	7		7	7	
		14		14				14	
		17		17*	17		17*		
				199			199		
				200	200*		200		
					201				
				202					
				447					
					330*				
				333	333			333	
							334*		
				336**					
T34	V&V unterstützen	453		453	453		453	453	
			372	372	372*		372		
							373		
		261							
T39	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige (Lizenz-) Kosten	400		400	400		400	400	
		401							
		403			403	403	403		
				404			404	404	
				405			405	405	
				406				406	
				407				407	
				408	408	408			
				424	424	424		424	424
				409					

Die Tab. 6–4 stellt den Anforderungen diejenigen Features der untersuchten Tools gegenüber, die sie erfüllen. Die Tabelle zeigt eine Auswahl an für wichtig erachteten Anforderungen, das gesamte Mapping befindet sich in Anhang B.5. Ein Eintrag steht jeweils für das Feature, mit dem ein Tool die Anforderung umsetzt. Features werden in Tab. 6–3 oder der vollständigen Feature-Liste im Anhang B.7 anhand ihrer Nummer identifiziert. Die mit * gekennzeichneten Nummern bedeuten, dass für das Feature eine Erweiterung notwendig ist.

Den folgenden vier Anforderungen kann kein Feature zugeordnet werden:

- Nr. 19 automatisiert Vorgehenspläne für Test und Verifikation des Systems erstellen
- Nr. T6 basierend auf Text statt Diagrammen arbeiten
- Nr. T16 Innovationen fördern
- Nr. T28 sehr komplexes Systemverhalten abbilden

Diese vier Anforderungen zählten jedoch nicht zu den wichtigen und es wird folglich als unkritisch angesehen, dass sie nicht durch MBSE-Tools abgedeckt werden.

Schließt man das Tool iQUAVIS, bei dem die Informationsbeschaffung für die Features schwierig war, aus der Betrachtung aus, werden einzelne Anforderungen durch Tools mehrerer Anbieter realisiert - je einem Anbieter jedoch meistens durch mehrere, unterschiedliche Features. Somit decken die untersuchten MBSE-Tools zumindest theoretisch ein sehr breites Spektrum an Anforderungen ab. In welcher Qualität einzelne Features die Anforderungen in der Praxis umsetzen, kann in dieser Arbeit jedoch nicht bewertet werden.

6.3.2 Besonderheiten bei der Realisierung ausgewählter Anforderungen durch Features

Nachfolgende Beschreibung von Besonderheiten erfolgt nochmals vom Standpunkt der Anforderungen aus. Diese Zusatzinformationen heben im Detail hervor, wie Anforderungen durch ein oder mehrere Features erfüllt werden.

6.3.2.1 Modellverknüpfung und -synchronisation (Nr. 17), Toolkettenintegration (Nr. 37, T18) und Interoperabilität (Nr. 38, T19)

MBSE-Tools bieten unterschiedliche Möglichkeiten Modelle (im Sinne von Artefakten des MBSE) mit domänenspezifischen Entwicklungsmodellen zu verknüpfen oder zu synchronisieren. In der Regel ist aber eine Softwareerweiterung zum MBSE-Tool notwendig, die das MBSE-Tool mit anderer Software aus dem Entwicklungsprozess verknüpft. Dadurch werden Aspekte zweier weiterer Anforderungen erfüllt: Integration in eine Toolkette (Nr. T18) und Interoperabilität mit anderen Tools (Nr. T19).

XMI, der Standard zum Austausch von Informationen über Tools hinweg, wird von fünf der sieben untersuchten MBSE-Tools unterstützt, die OSLC-Spezifikation nur von drei Tools. Der Import von Anforderungen via ReqIF ist in fünf der sieben Tools möglich.

Nachfolgend sind die für relevant erachteten Realisierungsmöglichkeiten, wie Modelle aus MBSE-Tools mit domänenspezifischen Modellen verknüpft und synchronisiert werden können, beschrieben.

a) Syndeia (Intercax LLC)

Die Softwareplattform Syndeia führt Modelle und Daten unterschiedlicher Entwicklungsumgebungen zusammen. Dazu gehören MBSE-Tools, PLM-Systeme, CAD- und Simulations-Systeme, ALM-Systeme (Application Lifecycle Management) sowie Tools des Projekt- und Anforderungsmanagements oder Datenbanken. Syndeia basiert auf unterschiedlichen Standards zum Austausch von Dateien und Informationen (zum Beispiel STEP, OSLC, FMI). [77]

Syndeia ist als Erweiterung für MagicDraw, CSM und für Rational Rhapsody verfügbar und ermöglicht unter anderem die Interoperabilität mit Siemens Teamcenter, PTC Windchill (PLM), Siemens NX, PTC Creo (CAD), Jama, IBM Rational Doors Next Generation (Anforderungsmanagement), GitHub, JIRA (ALM), MATLAB/Simulink (Simulation) und Microsoft Excel. [77]

b) ModelCenter MBSE Pak (Phoenix Integration)

ModelCenter MBSE Pak erzeugt aus Zusicherungsdiagrammen der SysML, die in MagicDraw, CSM oder Rational Rhapsody erstellt wurden, ModelCenter-Modelle, welche anschließend in anderen domänenspezifischen Tools weiterverwendet, analysiert oder ausgeführt werden können. [78]

Das Anwendungsbeispiel bei Karl Mayer (vgl. Abb. 4–4 in 4.1.5) verdeutlicht die durch ModelCenter gegebenen Möglichkeiten. ModelCenter verknüpft dort die Software CSM, SimulationX und CATIA V5 miteinander.

c) ParaMagic (Intercax LLC)

ParaMagic ist eine Erweiterung für MagicDraw und CSM. Die Ausführung von Zwangsbedingungen (engl.: „executing constraint relationships“ [79]) in SysML-Zusicherungsdiagrammen ermöglicht die Simulation komplexer Systeme. Als mathematische Solver werden Mathematica und PlayerPro (Wolfram Research), OpenModelica und MATLAB Symbolic Math Toolbox (MathWorks) unterstützt. ParaMagic bindet ebenfalls bestehende Modelle aus MATLAB/Simulink und Mathematica in die Simulation ein. [79]

6.3.2.2 Anforderungen, Funktionen und Systemelemente verknüpfen (Nr. 3, T36)

Die Beziehungen *satisfy* oder *allocate* verbinden in SysML unterschiedliche Systemelemente, wodurch jedes Tool, das SysML verwendet, gleichzeitig diese Anforderung erfüllt. *satisfy* zeigt, welche Systemelemente bzw. Systemelementeigenschaften welche Anforderungen erfüllen. SysML-Anforderungsdiagramme stellen Zusammenhänge zwischen Anforderungen untereinander und von Anforderungen zu Systemelementen dar (vgl. Anhang B.1). Auch in den Werkzeugen, die nicht SysML-konform sind, gibt es entsprechende Verknüpfungsmöglichkeiten.

6.3.2.3 Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten (Nr. 31, T8)

Zwei Hersteller der untersuchten MBSE-Tools nennen die Möglichkeit, die Komplexität bei der Modellierung zu verringern (Funktion Nr. 316, vgl. Tab. 6–4). Für eine bessere Bedienbarkeit lassen sich in allen bis auf einem Tool die GUI nutzerspezifisch

anpassen. Außerdem bietet jeder Hersteller entsprechende (Online-) Schulungen, Anleitungen oder anderweitige Unterstützung bei der Erlernung des Programms.

6.3.2.4 (Lizenz-) Kosten (Nr. 48, T39)

Capella ist unter den untersuchten Tools die einzige Open Source Software. Die kommerziellen MBSE-Tools bieten mit Ausnahme von iQUAVIS eine Floating- und Standard-Lizenzierung an³. iQUAVIS konnte zum Zeitpunkt der Anfrage keine Angaben zu Kosten oder Lizenzarten für den europäischen Markt machen. [71] Die Tab. 6–3 verdeutlicht, dass die Preisspannen der Tools sowohl für Floating- als auch für Standard-Lizenzen weit auseinandergehen. Die Einschätzungen zweier Interview-Experten von Enterprise Architect als „preiswert“ und als „zu teuer“ (vgl. 6.1.3) zeigen, dass eine Bewertung der Lizenzkosten auch von subjektiver Natur ist. Tab. 6–3 ermöglicht jedoch relative Vergleiche der Lizenzkosten.

6.4 MBSE-Methoden und ihre Eigenschaften

Neben den Tools gehören die Methoden zu den Hauptpfeilern von MBSE. Wie die vorangegangenen Abschnitte dieses Kapitels gezeigt haben, können die Methoden in einem direkten Zusammenhang mit den Tools stehen – zum Beispiel Capella und ARCADIA. Die Methoden und ihre Eigenschaften können folglich eine Rolle bei der Selektion eines Tools spielen. Deshalb erfolgt in diesem Abschnitt eine Gegenüberstellung ausgewählter MBSE-Methoden.

6.4.1 INCOSE Object-Oriented Systems Engineering Method (OOSEM)

Die INCOSE Object-Oriented Systems Engineering Method (OOSEM) integriert einen top-down Ansatz mit einem modellbasierten Ansatz, wobei die SysML für Spezifikation, Analyse, Design und Verifikation von Systemen zum Einsatz kommt.

Die Entwicklungsaktivitäten von OOSEM sind konsistent zum V-Modell (vgl. 2.4.2) und lauten:

- Analyse der Bedarfe der Stakeholder
- Definition der Systemanforderungen
- Definition der logischen Architektur (logische Komponenten beinhalten die Systemfunktionalität)
- Synthese von möglichen, vorgesehenen Architekturen (Zuteilung von logischen Komponenten auf Hardware-, Software- oder Datenkomponenten)
- Optimierung und Bewertung von Alternativen
- Validierung und Verifizierung des Systems

Die Methode ist software- und anbieterneutral. Für OOSEM können alle Modellierungstools eingesetzt werden, die die SysML unterstützen. Hinter der Methode steht kein offizieller Anbieter, von dem die Methode sowie ein zugehöriger Service und Support erworben werden können. [29]

³ Floating-Lizenzen können innerhalb des (Firmen-) Netzwerks von unterschiedlichen Anwendern genutzt werden. [80]

6.4.2 IBM Rational Harmony for Systems Engineering

Die wichtigsten Ziele von Rational Harmony for Systems Engineering sind die Identifikation und Ableitung von geforderten Systemfunktionen (Anforderungsanalyse), die Identifikation von damit in Verbindung stehenden Systemmodi und -zuständen sowie die Zuordnung von identifizierten Systemfunktionen und Modi bzw. Zuständen auf eine Subsystemstruktur (Designsynthese inklusive Analyse und Festlegung der Systemarchitektur). Die Ziele unterliegen einem top-down Ansatz auf einer hohen Abstraktionsebene. Harmony basiert bei seiner Umsetzung auf SysML.

Die Methode wurde software- und anbieterneutral entwickelt. Eine Unterstützung erfährt die Methode durch das vom selben Anbieter stammende MBSE-Tool IBM Rational Rhapsody. [81]

6.4.3 Weilkiens Systems Modeling Process (SYSMOD)

SYSMOD beschreibt einen anwenderorientierten Ansatz für die Anforderungserhebung und die Systemarchitektur. Die Methode greift auf SysML zurück, kann aber auch mit jeder anderen Modellierungssprache genutzt werden.

Der SYSMOD-Architekturprozess beginnt mit der Analyse von Anwendungsfällen und dem Systemkontext, anhand der anschließend die logische Systemarchitektur und physische Produktarchitektur modelliert wird. Die Basisarchitektur erschließt sich aus den Systemzielen und der Systemidee und fließt wiederum in die Anforderungserhebung mit ein. Dieses Vorgehen wird als ein mögliches Vorgehen beschrieben, wobei aber auch andere Schrittfolgen denkbar sind. Ein wichtiges Prinzip von SYSMOD ist das sogenannte SYSMOD-Zickzackmuster, welches den sich auf mehreren Abstraktionsebenen wiederholenden Zusammenhang zwischen den Anforderungen und der Architektur beschreibt. [9, Kapitel 2.10.3]

SYSMOD ist unabhängig von einem Toolanbieter. Es gibt ein freies SYSMOD-Profil, das in MagicDraw und Enterprise Architect integriert werden kann. [9, Kapitel 5]

6.4.4 Vitech Model-Based System Engineering (MBSE) Methodology

Die Vitech MBSE-Methode wird von Vitech Corporation, der Anbieter der MBSE-Tools CORE und GENESYS, angeboten und unter dem Titel STRATA geführt. [82]

Die Methode basiert auf vier, hauptsächlich gleichzeitig ablaufenden SE-Aktivitäten, welche in einem gemeinsamen Repository für das Systemdesign verbunden sind. Die vier Aktivitäten werden durch sogenannte Domänen repräsentiert:

- Source Requirements Domain
- Behavior Domain
- V&V Domain
- Architecture Domain

In der Methode wird hervorgehoben, dass für die Verwaltung (inklusive Syntax und Semantik) der Modelle eine MBSE System Definition Language (SDL) notwendig ist (siehe [29, S. 32]). Es existiert kein MBSE-Tool, welches diese Methode direkt integriert. [29]

6.4.5 ARChitecture And Design Integrated Approach (ARCADIA)

ARCADIA ist eine standpunktorientierten MBSE-Methode, die zwischen 2005 und 2010 infolge eines iterativen Prozesses von operativ tätigen System-, Hardware- und Softwarearchitekten von Thales entwickelt wurde.

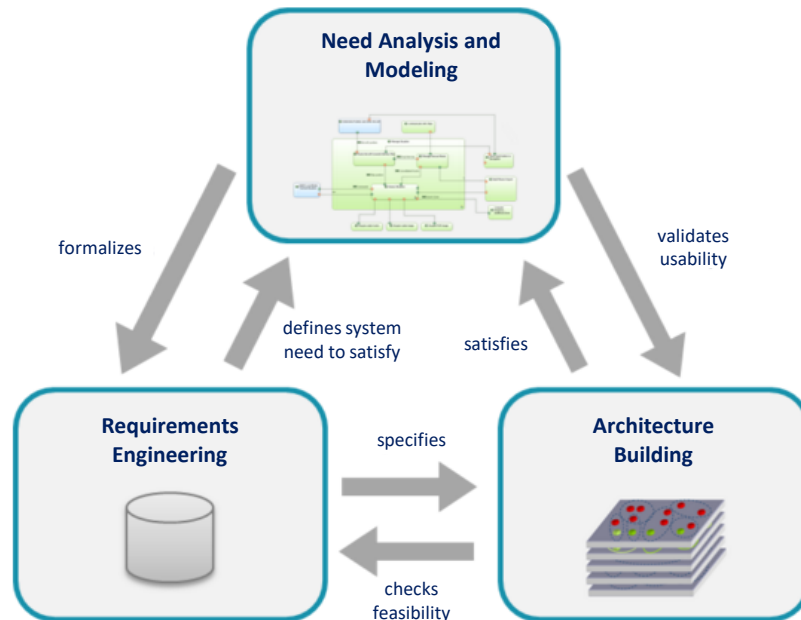


Abb. 6–2: Aktivitäten in der ARCADIA-Methode [64, S. 3]

Drei gleichwichtige und miteinander in Beziehung stehende Aktivitäten werden, wie in Abb. 6–2 veranschaulicht, empfohlen: Bedarfsanalyse und -modellierung, Erzeugung und Validierung der Architektur und Anforderungserhebung.

ARCADIA stellt neben der Methode selbst auch eine Modellierungssprache bereit, die ARCADIA DSML (vgl. 6.1.2). Eng verknüpft ist die Methode mit dem MBSE-Tool Capella. Der gesamte Ansatz ist Open Source und wird von PolarSys und Thales bereitgestellt, gewartet und unterstützt. [64]

6.4.6 Bewertung und Relevanz der MBSE-Methoden

Mit Ausnahme von ARCADIA sind die vorgestellten MBSE-Methoden software- und anbieterneutral. Es existieren jedoch Softwareerweiterungen für die Toolintegration der Methoden SYSMOD (MagicDraw, Enterprise Architect) und Rational Harmony (Rational Rhapsody). Das Tool iQUAVIS beinhaltet ebenfalls eine hinterlegte Methode.

J. Estefan [29] empfiehlt in seinem Basiswerk über MBSE-Methoden entweder gleichzeitig mit dem Evaluierungsprozess für eine MBSE-Methode oder kurz danach auch eine Studie und Bewertung für relevante MBSE-Tools durchzuführen, da die Tools in einem wichtigen Zusammenhang mit den Methoden stehen.

Die MBSE-Methoden spielen jedoch bei der Auswahl der MBSE-Tools eine untergeordnete Rolle.

Wie die Auswertung in Kapitel 5 zeigt, wurde die Unterstützung von Prozessen, Methoden und Workflows zwar genannt, die Anforderung stellt aber kein ausschlaggebendes Auswahlkriterium dar.



Ein Teilnehmer fügte im offenen Interview hinzu, dass die theoretisch gehaltenen, methodischen Vorgehensweisen, wie sie in der wissenschaftlichen Literatur zu finden sind, keine Rolle für die praktische Umsetzung von MBSE darstellen würden. [Teilnehmer Nr. 1]

7 Framework und Vorgehensweise zur Selektion eines geeigneten MBSE-Tools

In diesem Kapitel wird das Vorgehen bei der Selektion eines geeigneten MBSE-Tools beschrieben.

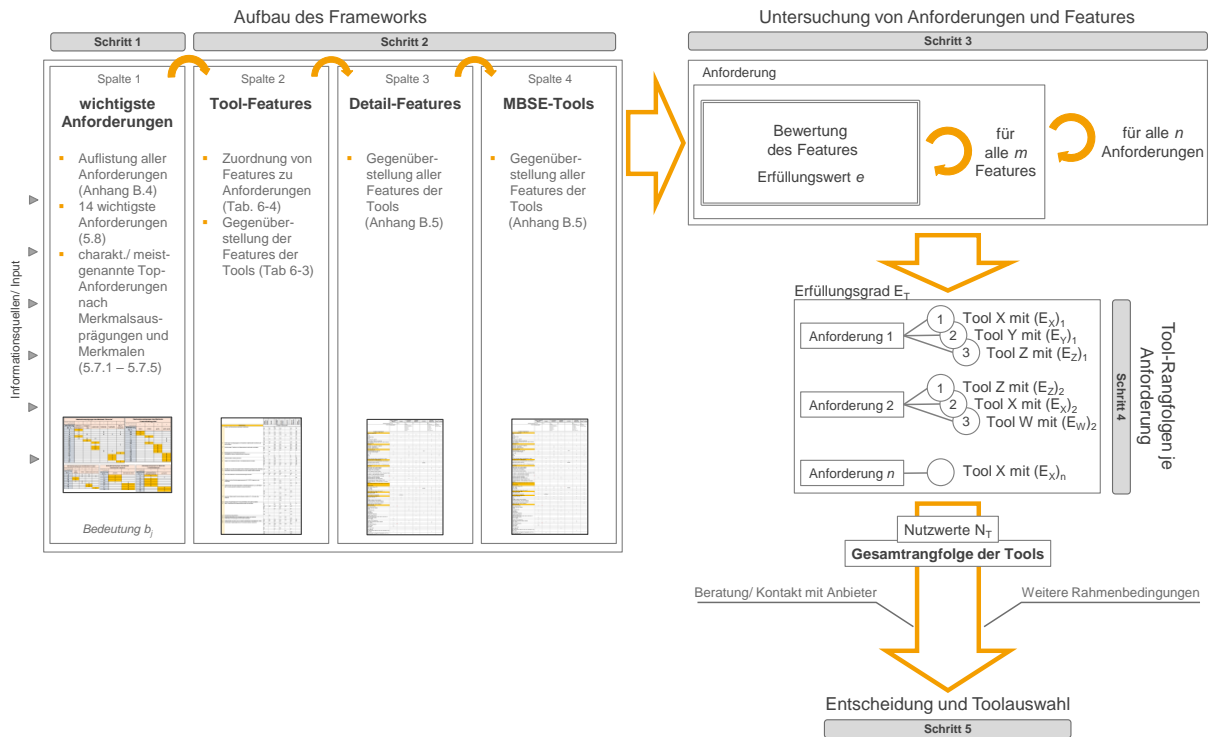


Abb. 7–1: Aufbau eines individuellen Frameworks und Vorgehen zur Selektion eines geeigneten MBSE-Tools

Abb. 7–1 zeigt den allgemeinen Aufbau eines individuellen Frameworks sowie die fünf abstrahierten Vorgehensschritte für die Selektion eines geeigneten MBSE-Tools. Die fünf Schritte lassen sich in vier übergeordnete Arbeitspakete einteilen und werden in den Abschnitten 7.2 bis 7.5 definiert.

Zusätzlich werden für jeden Vorgehensschritt konkrete Zahlenbeispiele gegeben.

7.1 Definition von Quasi-Archetypen

In 5.7.6 stellen sich gemeinsame Häufungspunkte zwischen Merkmalsausprägungen eines Unternehmens und einer bzw. zwei Anforderungen heraus. Wie bereits diskutiert, entsprechen diese Ergebnisse formal gesehen nicht der engen Begriffsdefinition eines Archetypen aus Abschnitt 3.4 – dennoch können sie für das Framework (Schritt 1 und 2, vgl. Abschnitt 7.2) eine maßgebliche Unterstützung bieten.

Unter diesem Blickwinkel werden die sieben resultierenden Kombinationen aus 5.7.6 als sogenannte Quasi-Archetypen von Unternehmen betrachtet:

(1) Als Quasi-Archetyp von Unternehmen werden Unternehmen bezeichnet, die einen Satz von Merkmalsausprägungen gemeinsam haben und eine

gemeinsame, wichtige Anforderung an ein MBSE-Tool stellen (anstelle von einem Satz von Merkmalsausprägungen).

(2) Unter den Begriff Quasi-Archetyp werden zum Beispiel auch die Archetypen eingeordnet, bei denen der Satz von Anforderungen nicht von allen befragten Unternehmen genannt wurde, die dem dazugehörigen Satz von Merkmalsausprägungen entsprechen.

Die nachfolgende Abb. 7–2 zeigt alle sieben Quasi-Archetypen mit ihren Merkmalsausprägungen und Anforderungen. Der Quasi-Archetyp 1 aus der Abbildung trifft auf den zweiten Teil der Definition zu und die Quasi-Archetypen 2 bis 7 auf den ersten Teil.

Quasi-Archetypen	Anforderung	Quasi-Archetypen	Anforderung
1 Defense & Aerospace, sehr großes Unternehmen, international verteilte Standorte, kundenspezifische Auftragsentwicklung	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API) T2	4 Bahnindustrie/ Schienenverkehr, international verteilte Standorte	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten T8
2 Anlagen-/ Sonder-/ Maschinenbau, kleines Unternehmen, relativ niedriger Umsatz, "gemischter" Entwicklungsanlass	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/ Export) über Schnittstellen zu anderen Tools T19	5 Bahnindustrie/ Schienenverkehr, mittelgroßer Umsatz, international verteilte Standorte, kundenspezif. Auftragsentwicklung	
3 Automobilbranche, sehr großes Unternehmen, international verteilte Standorte	Wirtschaftlichkeit/ Lizenzmanagement/ niedrige (Lizenz-) Kosten T39	6 Bahnindustrie/ Schienenverkehr, international verteilte Standorte, "gemischter" Entwicklungsanlass	
	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/ Export) über Schnittstellen zu anderen Tools T19	7 Mischkonzern, international verteilte Standorte, "gemischter" Entwicklungsanlass	

Abb. 7–2: Auflistung der sieben Quasi-Archetypen

Inwiefern die Quasi-Archetypen bei der Erstellung des Frameworks unterstützend mitwirken können, wird in Schritt 1 des Vorgehens deutlich.

Bei allen nachfolgenden, beispielhaften Ausführungen der einzelnen Vorgehensschritte entspricht ein exemplarisch betrachtetes Unternehmen dem Quasi-Archetyp 1 aus Abb. 7–2.

7.2 Aufbau des Frameworks

Vorab-Abgleich mit Quasi-Archetypen

Bevor der Betrachter mit Schritt 1 der Erstellung des Frameworks beginnt, ist zu prüfen, ob sein Unternehmen einem der Quasi-Archetypen aus Abschnitt 7.1 entspricht. Denn dann kann die Erstellung des Frameworks deutlich vereinfacht erfolgen. Für den Fall, dass die Merkmalsausprägungen des Unternehmens mit denen eines Quasi-Archetypen übereinstimmen, ist vom Betrachter zusätzlich zu entscheiden, ob seine wichtigsten Anforderungen mit den wichtigsten Anforderungen, die statistisch gesehen für den ausgewählten Quasi-Archetyp zutreffen (vgl. Anforderungsspalte in Abb. 7–2), übereinstimmen. Bei Übereinstimmung können die nachfolgend beschriebenen Schritte 1 und 2 für die Erstellung des Frameworks

Abb. 7–3 zeigt exemplarisch das Framework für die Anforderung Nr. T2 des Quasi-Archetypen 1. Die entsprechenden Inhalte für die Anforderung Nr. T19 sind dem Anhang B.6 zu entnehmen. In Abb. 7–3 sind zudem beispielhafte Werte für die Bedeutung b der Anforderung Nr. T2 (links unten, vgl. auch Schritt 1), Erfüllungswerte e der Features (Spalte 2 rechts, vgl. Schritt 3) und Erfüllungsgrade E_T der Tools (Spalte 4, vgl. Schritt 4) eingetragen, welche nachfolgend erklärt sind.

Falls das Unternehmen des Betrachters nicht unter einen der wenigen Quasi-Archetypen aus Abb. 7–2 fällt, was aufgrund der vielfältigen Unterschiede von Unternehmen untereinander statistisch gesehen wahrscheinlicher ist, muss das Framework, wie nachfolgend beschrieben, in zwei Schritten individuell aufgebaut werden.

Schritt 1

Der Betrachter wählt die Anforderungen aus, die für den ihn vorliegenden Einsatzzweck eines MBSE-Tools am wichtigsten sind. Die vorangegangenen Kapitel sowie der Anhang dieser Arbeit dienen als Grundlage für mögliche bzw. statistisch wahrscheinlich wichtige Anforderungen. Die Auflistung aller 57 in den Interviews und Fragebögen identifizierten Anforderungen an MBSE-Tools (Anhang B.4) ist hierbei der Ausgangspunkt und unterstützt den Betrachter bei der Auswahl der für ihn relevanten Anforderungen. Eine mögliche Vorgehensweise ist, sich auf die 14 wichtigsten identifizierten Tool-Anforderungen aus Abschnitt 5.8 zu konzentrieren, anstatt alle gelisteten Anforderungen zu untersuchen. Eine weitere Entscheidungshilfe stellen die Abb. 5–12 bis Abb. 5–16 in Abschnitt 5.7 dar. Die Abbildungen zeigen für jede Merkmalsausprägung die charakteristischen und meistgenannten Top-Anforderungen, die in den Interviews von Experten genannt wurden. Dadurch wird dem Betrachter ein Überblick gegeben, welche Anforderungen von Unternehmen, die einer Merkmalsausprägung des eigenen Unternehmens entsprechen, am häufigsten als Top-Anforderung genannt wurden. Der Betrachter kann dadurch auf Erfahrungen anderer Experten und Anwender zurückgreifen, die insbesondere aus derselben Branche sind. Anhand der beschriebenen Quellen werden folglich die wichtigsten Anforderungen an das MBSE-Tool erarbeitet und am Ende in die erste Spalte des individuellen Frameworks aus Abb. 7–1 übertragen.

Der Betrachter vergibt anschließend in derselben Spalte für die Bedeutung b jeder Anforderung die Werte 1 (vergleichsweise niedrig), 2 (mittlere Bedeutung) oder 3 (vergleichsweise hoch). Dadurch kann zwischen den wichtigsten Anforderungen dieser Spalte nochmals differenziert werden. Mit diesen Gewichtungsfaktoren kann die spätere Gesamtrangfolge der Tools für Schritt 5 gebildet werden.

Der Betrachter des Beispiel-Unternehmens in Abb. 7–3 lässt der Anforderung Nr. T2 eine vergleichsweise hohe Bedeutung innerhalb seiner wichtigsten Anforderungen zukommen und vergibt daher den Wert 3.

Schritt 2

Im nächsten Schritt gilt es, die Features und Eigenschaften der MBSE-Tools zu identifizieren, mit denen die ausgewählten Anforderungen aus Schritt 1 erfüllt werden können. In erster Linie gibt die Zuordnungsmatrix in Tab. 6–4 (und Anhang B.5) die dazu notwendigen Informationen. Die Zuordnung der Nummern zu den entsprechenden Features erfolgt abschließend in der Feature-Liste aus Tab. 6–3 (und

Anhang B.5). Bietet ein MBSE-Tool für ein bestimmtes Feature genauere Informationen oder Möglichkeiten, so können die Detail-Features ebenfalls der Tab. 6–3 (und Anhang B.5) entnommen werden. Die Features und Detail-Features füllen die Spalten 2 und 3 des individuellen Frameworks (Abb. 7–1).

Die entsprechenden Tools werden dabei in Spalte 4 eingetragen. Da die Tools, wie in Abb. 7–3 beispielhaft gezeigt, die Sortierung bzw. Reihenfolge der Features vorgeben, wiederholen sich die Features, die von den verschiedenen Tools angeboten werden, bei der Auflistung in Spalte 2. Ein Vorteil dieser Darstellung ist, dass nach Abschließen dieses Schritts auch direkt visuell ersichtlich wird, welche Tools wie viele und welche relevanten Features anbieten.

Das Ergebnis dieses Schrittes ist eine Auflistung der relevanten Features in Verknüpfung mit den entsprechenden Anforderungen aus dem ersten Schritt und mit der Zuordnung der MBSE-Tools, die diese Features bzw. Detail-Features bieten.

7.3 Untersuchung von Anforderungen und Features

Nachdem das Framework mit Anforderungen, Features, Detail-Features und Toolzuordnung (vgl. Abb. 7–3) in den ersten beiden Schritten aufgebaut wurde, folgen die Analysen von Anforderungen und Features in Vorbereitung auf die abschließende Toolauswahl.

Schritt 3

Es folgt eine nähere Betrachtung der ersten Anforderung aus Spalte 1 des erarbeiteten Frameworks als Vorbereitung für Schritt 4.

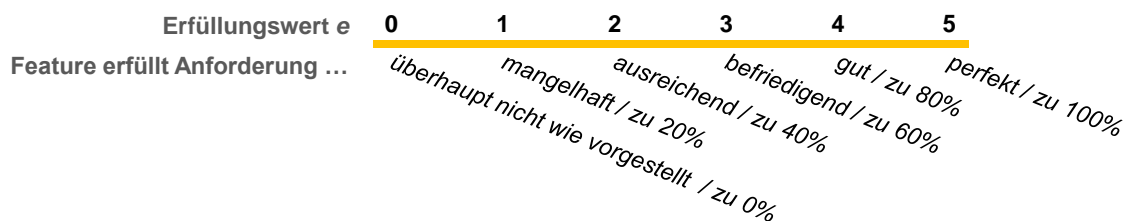


Abb. 7–4: Skala für die individuelle Festlegung der Erfüllungswerte e der Features

Der Betrachter bewertet bei jedem Feature eines bestimmten Tools auf einer Skala von 0 bis 5, wie gut das jeweilige Feature die entsprechende Anforderung basierend auf der individuellen Einschätzung des Betrachters erfüllt (Erfüllungswert e , Abb. 7–4). Die Spalte der Detail-Features liefert zusätzliche Informationen, wie ein Tool die Anforderung im Detail umsetzt, und dient somit als Hilfestellung bei der Festlegung der Erfüllungswerte.

Diese Gewichtung der Features ist notwendig, weil Anwender unterschiedliche Vorstellungen oder Präferenzen haben können, welche Features ein Tool zur Erfüllung ihrer Anforderung besitzen kann, soll oder muss.

Die Erfüllungswerte der Features werden, wie in Abb. 7–3 beispielhaft gezeigt, in Spalte 2 neben jedes Feature eingetragen.

Der beschriebene Schritt wird für alle gewählten n Anforderungen aus Schritt 1 wiederholt.

7.4 Tool-Rangfolge je Anforderung

Nachdem alle Anforderungen und Features bewertet wurden, kann nun für jedes Tool ein Erfüllungsgrad E_T pro Anforderung berechnet werden (vgl. Spalte 4 in Abb. 7–1 und Abb. 7–3).

Schritt 4

Der Erfüllungsgrad bezieht sich auf eine Anforderung und sagt aus, wie gut das Tool mit seinen entsprechenden Features die gewählte Anforderung nach Einschätzung des Betrachters erfüllt. E_T berechnet sich durch den Quotienten aus tatsächlicher Bewertung und dem maximal erreichbaren Wert:

$$E_T = \frac{\sum_{i=1}^m e_i}{m \cdot 5} \quad (7-1)$$

Der Erfüllungsgrad E_T kann Werte von mindestens 0 und maximal 1 annehmen. e_i entspricht dem Erfüllungswert des Features i mit $e_i = 0 \dots 5$ und $i = 1 \dots m$ (vgl. Abb. 7–4). Hierbei steht m für die Anzahl an Features, die das Tool zur Realisierung der Anforderung bietet.

Mit der Definition des Erfüllungsgrades wird gewährleistet, dass eine spezifische Tool-Rangfolge (je Anforderung) aufgestellt werden kann und zwar unabhängig davon, mit wie vielen Features ein Tool eine Anforderung realisiert. Das Tool mit dem höchsten Erfüllungsgrad erhält den Rang 1 und erfüllt die betrachtete Anforderung am besten.

Das Vorgehen wird für alle Anforderungen aus Spalte 1 wiederholt. Am Ende des Vorgehens liegt dem Betrachter für jede für ihn wichtige Anforderung aus dem Framework eine anhand des Erfüllungsgrades gewichtete Rangfolge von mehreren MBSE-Tools vor, die die jeweiligen Anforderungen am besten erfüllen.

Der Erfüllungsgrad dient im weiteren Verlauf zusammen mit dem Wert für die Bedeutung einer Anforderung (vgl. Schritt 1) der Bildung der Gesamtrangfolge der Tools (vgl. Schritt 5).

Im Beispiel-Framework in Abb. 7–3 sind die Erfüllungsgrade in das Feld des jeweiligen Tools (Spalte 4) eingetragen. Hier kommt Capella mit $E_T = 0,9$ auf Rang 1 und erfüllt somit die Anforderung Nr. T2 am besten.

7.5 Entscheidungsfindung und Toolauswahl

Basierend auf den vorherigen Schritten kann nun eine finale Toolentscheidung herbeigeführt werden.

Schritt 5

Es erfolgt zunächst die Berechnung von sogenannten Nutzwerten N_T eines jeden Tools, um die Gesamtrangfolge der Tools aufstellen zu können.

Der Nutzwert N_T eines Tools ist definiert als:

$$N_T = \sum_{j=1}^n b_j \cdot (E_T)_j \quad (7-2)$$

Der Index T steht für das betrachtete Tool. Die Bedeutung einer Anforderung ist b_j mit $b_j = 1, 2$ oder 3 (vgl. Schritt 1). Die Anforderungen aus der Framework-Spalte 1

entsprechen hierbei den Indizes j bis n . Der Erfüllungsgrad E_T eines Tools T bezieht sich auf die Anforderung j und berechnet sich nach Gleichung (7-1) aus Schritt 4.

Für die Gesamtrangfolge der Tools gilt: Ein höherer Nutzwert N_T eines Tools bedeutet eine bessere Eignung des Tools für die Erfüllung aller gewählten Anforderungen und somit einen höheren Rang.

Für den Quasi-Archetyp 1 aus Abb. 7-3 gelten zwei wichtigste Anforderungen ($n = 2$). Die Bedeutung der ersten Anforderung Nr. T2 ist $b_1 = 3$ und für Nr. T19 wird beispielhaft $b_2 = 1$ angenommen. Um nun den Nutzwert für das Tool Cameo Systems Modeler (CSM) zu berechnen, werden die Erfüllungsgrade E_T dieses Tools für beide Anforderungen herangezogen. Wie bereits beschrieben, ist der Erfüllungsgrad von CSM für die Anforderung Nr. T2 gleich $(E_T)_1 = 0,7$ und für Nr. T19 sei $(E_T)_2 = 0,9$.

Somit ergibt sich nach (7-2) für CSM ein Nutzwert von $N_T = 3 \cdot 0,7 + 1 \cdot 0,9 = 3$. Analog lassen sich die Nutzwerte für die anderen MBSE-Tools berechnen und eine Gesamtrangfolge der Tools bilden.

Für den Fall, dass mehrere Tools denselben Nutzwert aufweisen sollten, so wird durch die Erfüllungsgrade der Tools und durch die Bedeutungswerte der Anforderungen ersichtlich, wie sich die individuelle Gewichtung und Bewertung des Betrachters auf die Gesamtrangfolge auswirken kann und wo eventuelle Kompromisse in Form von einer neuen Gewichtung gefunden werden können, um tatsächlich zu unterschiedlichen Nutzwerten der Tools zu gelangen. Ergibt sich final dennoch keine eindeutige Rangfolge, so wird dem Entscheider zumindest eine Empfehlung und engere Auswahl der in Frage kommenden Tools gegeben, die in diesem Fall dann die Anforderungen gleich gut erfüllen.

In die Toolentscheidung fließen außerdem weitere Rahmenbedingungen ein, auf die der Betrachter keinen oder nur geringen Einfluss hat. Dazu gehören beispielsweise bereits vorhandene Entwicklungstools, zu denen in jedem Fall eine Verknüpfung ermöglicht sein muss, oder ein begrenztes Budget. Für die finale Entscheidungsfindung empfiehlt sich zudem die Kontaktaufnahme mit dem jeweiligen Anbieter der in Frage kommenden Tools, um sich zu den Features und Möglichkeiten eingehend beraten zu lassen und sich ein individuelles Angebot (zum Beispiel bezüglich Lizenzmodell, Wartung und Schulung) einzuholen.

8 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

8.1 Zusammenfassung

Die Hypothese, dass sich Unternehmen anhand ihrer Eigenschaften, den sogenannten Merkmalsausprägungen, bezüglich ihrer Anforderungen an MBSE-Tools unterscheiden lassen, war die Grundannahme für die Untersuchung der Anforderungen an MBSE-Tools (vgl. Archetypen in Kapitel 3). Zunächst wurden dazu in Kapitel 4 industrielle Anwendungsbeispiele in der Literatur recherchiert und analysiert. Aufgrund der relativ niedrigen Verbreitung von MBSE in der Literatur und der damit verbundenen geringen Verwertbarkeit der sich daraus ergebenden Informationen wurde anschließend eine Interviewreihe mit insgesamt 45 MBSE-Experten und Anwendern aus unterschiedlichen Branchen durchgeführt. Die wesentlichen Ziele der Interviews waren die Bewertung der oben genannten Hypothese und die Ableitung der wichtigsten Anforderungen an MBSE-Tools. Aus der Auswertung der Interviews gingen neben den insgesamt wichtigsten Anforderungen auch die statistisch gesehen wichtigsten Anforderungen je Merkmalsausprägung eines Unternehmens hervor. Die Archetypen konnten so, wie definiert wurden, jedoch nicht bestätigt werden.

Mit dem Ziel, den identifizierten Anforderungen nun Features zuordnen zu können, wurden im darauffolgendem Kapitel 6 MBSE-Tools untersucht und einander gegenübergestellt.

Anhand der bis dahin erarbeiteten Ergebnisse und gewonnenen Informationen wurde anschließend in Kapitel 7 ein Vorgehen für die Selektion eines MBSE-Tool abgeleitet. Das Vorgehen beschreibt fünf Schritte inklusive eines Frameworks und gibt dem Betrachter eine Empfehlung, welches Tool für ihn basierend auf seinen Gewichtungen und Bewertungen für die Anforderungen und Features am besten geeignet ist.

8.2 Diskussion der wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In der Literatur findet der Betrachter ein sehr breites Spektrum von Anforderungen an MBSE. So wurden beispielsweise circa 65% der 41 ermittelten Anforderungen nur ein- oder zweimal genannt. Anhand der untersuchten Beispiele aus der Literatur lässt sich die Existenz von Archetypen von Unternehmen demnach weder bestätigen, noch ablehnen. Mögliche Gründe sind die noch relativ geringe Verbreitung von MBSE und damit auch die geringe Menge an recherchierbaren Informationen zu MBSE-Anwendungen. Darüber hinaus ist die Beschreibung aller recherchierten Beispiele tendenziell oberflächlich und allgemein gehalten, ohne konkrete auf Anforderungen an die Systemmodellierung mit MBSE-Tools einzugehen.

Im offenen Interview gaben 61% der Teilnehmer an, dass eine Einschätzung zu Archetypen von Unternehmen schwierig sei. Die Definition von MBSE fällt den meisten Teilnehmern ebenfalls schwer, was möglicherweise im Zusammenhang mit dem Verbreitungs- und Bekanntheitsgrad von MBSE steht. Dieser war bei 52% der Befragten innerhalb ihres eigenen Unternehmens gering. Im Maschinenbau und in kleinen Unternehmen ist MBSE vergleichsweise weniger bekannt als in anderen,

allerdings sind die MBSE-Ansätze auch in keiner Branche der interviewten Teilnehmer auffällig stark verbreitet.

Die Unternehmen verwenden in der Regel mehr als ein MBSE-Tool. Die am häufigsten eingesetzten Tools sind Enterprise Architect und Rational Rhapsody. Die meistgenannte Hürde für die Einführung und den Einsatz eines MBSE-Werkzeugs ist jedoch das Werkzeug selbst. Genannte Gründe sind beispielsweise die Komplexität, die geringe Benutzerfreundlichkeit, die mangelhafte Toolintegration oder eine zu geringe Leistungsfähigkeit.

Die fünf meistgenannten Top-Anforderungen aus den Interviews sind:

- Bedienbarkeit/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit
- Interoperabilität eines MBSE-Tools mit anderen Tools
- Mögliche Adaption des Tools an eigene, spezifische Anforderungen
- Integration des MBSE-Tools in eine bestehende (Unternehmens-) Toolkette
- Management von Konfigurationen, Änderungen oder Versionen

Vereint man die Auswertungen der Fragebögen, den darin ergänzten Anforderungen und den genannten Top-Anforderungen aus den offenen Interviews, so resultieren daraus die 14 insgesamt wichtigsten Anforderungen. Die Integration in die bestehende Toolkette und die Interoperabilität zu anderen Tools befinden sich sowohl bei den Top-Anforderungen als auch bei den ergänzten Anforderungen unter den meistgenannten und wichtigsten. Diese beiden Anforderungen werden deshalb als die insgesamt wichtigsten Anforderungen angesehen.

Werden die meistgenannten Top-Anforderungen jeweils innerhalb eines Unterscheidungsmerkmals eines Unternehmens ausgewertet, so ergibt sich innerhalb eines jeden Unterscheidungsmerkmals für jede Merkmalsausprägung mindestens eine charakteristische Top-Anforderungen, durch die sich die Unternehmen innerhalb des betrachteten Merkmals voneinander unterscheiden – mit Ausnahme der Bahnindustrie/ Schienenverkehr und der Unternehmen mit mittlerem Umsatz.

Die Untersuchung der Top-Anforderungen in Bezug auf Archetypen ergibt folgendes: Von einer Kombination eines Sets von Merkmalsausprägungen mit einem Set von Anforderungen kann aufgrund der einen, gemeinsamen Top-Anforderung nicht gesprochen werden. In einem Fall existiert jedoch bei zwei der drei Unternehmen, die bestimmten Merkmalsausprägungen entsprechen, ein Set von zwei gemeinsamen Top-Anforderungen.

Die Hypothese, dass mehrere, unterschiedliche Archetypen von Unternehmen bezüglich der Anforderungen an ein MBSE-Modellierungstool existieren, wird weder bestätigt noch verworfen. Weder die Auswertungen der Fragebögen noch die offenen Interviews verweisen auf einen deutlichen Zusammenhang zwischen einem Set von Merkmalsausprägungen und einem Set von Tool-Anforderungen. Die Auswertung der Top-Anforderungen deutet nur ansatzweise auf die mögliche Existenz von Archetypen hin.

Die ursprüngliche Erwartung, dass sich alle oder zumindest die Mehrheit der Unternehmen in einige wenige Archetypen einteilen lassen, wurde also nicht erfüllt bzw. war nach jetzigem Kenntnisstand unrealistisch. Dennoch sind die Auswertungen der Fragebögen und Interviews eine deutliche Hilfestellung bei der Toolselektion. Neben den charakteristischen Anforderungen, anhand derer sich Unternehmen bei der

Betrachtung innerhalb eines einzelnen Unterscheidungsmerkmals unterscheiden, werden die Sets von Merkmalsausprägungen in Kombination mit einer bzw. maximal zwei gemeinsamen Anforderungen für den Aufbau des Frameworks herangezogen und als sogenannte Quasi-Archetypen definiert.

Die exemplarische Durchführung für die Selektion eines geeigneten MBSE-Tools anhand des Frameworks für einen Quasi-Archetyp, der zwei Anforderungen beinhaltet, zeigt, dass das Framework schon hier sehr umfangreich wird. Die entsprechenden Features können sehr vielfältig sein und werden in der Regel auch von mehreren MBSE-Tools angeboten, auch wenn sie sich in ihrer Umsetzung im Detail (vgl. Detail-Features) voneinander unterscheiden. Für die sieben Quasi-Archetypen sind die Frameworks als Entscheidungshilfe bereits erstellt. Es wird aber wahrscheinlich häufiger der Fall eintreten, dass ein Unternehmen andere Anforderungen als wichtiger erachtet, als diejenigen, die statistisch gesehen für einen Quasi-Archetyp am wichtigsten sind. Ein derartiges, umfassendes Framework dann für den Fall aufzubauen, dass ein Unternehmen nicht unter die Quasi-Archetypen fällt und auch mehr als zwei wichtigste Tool-Anforderungen aufstellt, stellt sich als zeitaufwendig heraus.

Es empfiehlt sich deshalb – unabhängig davon, ob das Unternehmen in einen der Quasi-Archetypen fällt oder nicht – vor der Erstellung eines Frameworks Ausschlusskriterien oder Muss-Anforderungen zu definieren, wodurch schon im Vorfeld bestimmte Tools vom Auswahlprozess ausgeschlossen werden können. Dies kann den Aufwand für die Vorbereitung der Entscheidungsfindung deutlich reduzieren. Mögliche Ausschlusskriterien können beispielsweise Lizenzkosten sein oder Werkzeuge in der bereits bestehenden Unternehmens-Toolkette, zu denen in jedem Fall eine Interoperabilität gegeben sein muss, oder die Unterstützung bestimmter Standards oder Austauschformate. Ist nach dem beschriebenen Vorgehen zur Toolselektion noch keine eindeutige Gesamttrangfolge der Tools möglich, muss unter Umständen die Auswahl bzw. die Gewichtung der Anforderungen oder Features auf Kompromisse überprüft werden.

Diese Arbeit unterstützt den Betrachter bei der Auswahl eines geeigneten MBSE-Tools also durch die beschriebene Vorgehensweise, auch wenn sein Unternehmen nicht in einen der Quasi-Archetypen fällt. Für die einzelnen Vorgehensschritte werden alle notwendigen Informationen bereitgestellt, insbesondere in Form von umfangreichen Anforderungs- und Feature-Listen. Die vorliegende Arbeit nimmt dem Betrachter nicht die Entscheidungsarbeit ab, welches MBSE-Tool das für seine Anforderungen geeignetste ist. Es wird aber eine Hilfestellung für das Vorgehen bei der Toolauswahl angeboten, mit dem Ergebnis einer Empfehlung für ein oder mehrere in Frage kommende MBSE-Tools. Dabei werden gleichzeitig Stärken und Schwächen der Tools in Bezug auf die Qualität der Erfüllung bestimmter Anforderungen aufgezeigt.

Ein weiterer Vorteil der beschriebenen Vorgehensweise und der bereitgestellten Informationen ist, dass sie anbieterneutral sind. Sie sind insbesondere unabhängig von den kommerziellen Interessen oder dem Verkaufsgeschick eines Anbieters.

In der durchgeführten Untersuchung wird auch die Problematik deutlich, dass die Auswahl eines geeigneten MBSE-Tools von sehr vielen unterschiedlichen Faktoren abhängt.

8.3 Ausblick

Die umfangreiche Feature-Liste mit den entsprechenden Detail-Features zeigt, dass sich die meisten MBSE-Tools in ihren angebotenen Grundfunktionen kaum unterscheiden. Man müsste diese Features beispielsweise in mehreren Pilotprojekten real testen, um anschließend das auf das Unternehmen genau zugeschnittene Tool wählen zu können. Die Auflistung und Beschreibung eines bestimmten Features durch den Tool-Anbieter gibt noch keinen Aufschluss darüber, wie das Feature in der Realität umgesetzt wird bzw. ob es die Anforderungen auch wie gefordert erfüllt. Zum anderen könnten die einzelnen Editionen eines Tools im Speziellen untersucht werden, um eventuelle Archetypen herauszufinden. Denn die Vermutung liegt nahe, dass sich eine Basisedition eines Tools in seinen Features deutlich von einer Premiumedition unterscheidet.

Es hat sich in den Interviews zudem herausgestellt, dass die in der Literatur beschriebenen MBSE-Methoden bei der Ausarbeitung der Vorgehensweise zur Selektion eines MBSE-Tools praktisch eine relativ niedrige Relevanz einnehmen. Der Schwerpunkt der Auswertungen lag eindeutig auf den Tools, was ein Indiz dafür ist, dass für eine umfassende Bewertung und Einordnung der praktischen Relevanz der Methoden eine separate Untersuchung mit anders ausgerichteten Fragen durchgeführt werden müsste. Diese Vermutung wird unterstützt von J. Estefan [29], der in seinem Basiswerk wichtige MBSE-Methoden gegenüberstellt und die Durchführung von zwei getrennten Evaluierungsprozessen für Methode und Tool empfiehlt.

Letztendlich hat sich also gezeigt, dass MBSE das Potential hat, die Aktivitäten des SE effizienter umsetzen zu können, aber derzeit noch nicht flächendeckend zum Einsatz kommt. Die Anbieter versprechen mit ihren Tools, ein sehr breites Spektrum an Features abzudecken und dennoch nennen Anwender und Experten die Tools selbst als häufigste Hürde für die Einführung oder unternehmensinterne Verbreitung von MBSE. Deshalb wäre es in der Zukunft in beidseitigem Interesse, dieses Delta zwischen Anbietern und Nutzern zu untersuchen. Darüber hinaus kann eine spezifischere, noch detailliertere Erörterung von Tool-Anforderungen seitens der Nutzer dazu beitragen, dass die Anbieter der Tools besser verstehen, welche Features tatsächlich gefordert werden – was sich wiederum auf eine höhere Akzeptanz und Verbreitung von MBSE auswirken sollte.

„Systems never go wrong – it’s the people involved who do.” [83, S. 61]

A Literatur

- [1] K. Paetzold, „Systems Engineering - Chancen und Potentiale“ in 06/2015 November/Dezember, *Technik in Bayern: Schwerpunkt Systems Engineering*, VDI Landesverband Bayern, Hg., 2015.
- [2] J. Montigny, „Driving Intelligent Transportation Systems with Capella: Continental Return of Experience“ in *CapellaDay Toulouse 2017*.
- [3] R. Dumitrescu, H. Anacker und T. Westermann, „Interdisziplinäre Anforderungen mit CONSENS managen“ in 06/2015 November/Dezember, *Technik in Bayern: Schwerpunkt Systems Engineering*, VDI Landesverband Bayern, Hg., 2015.
- [4] R. Haberfellner, O. De Weck, E. Fricke und S. Vössner, *Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung*, 12. Aufl. Zürich: Orell Füssli Verlag AG, 2012.
- [5] J. Heidrich *et al.*, „Systems Engineering as an Enabler for Future Innovation“ in *Tag des Systems Engineering: Paderborn, 8. -10. November 2017*, S.-O. Schulze, C. Tschirner, R. Kaffenberger und S. Ackva, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017, S. 87–96.
- [6] D. Steffen, S.-O. Schulze und F. Gaupp, „Systems Engineering: Produktentwicklung erfindet sich neu“, *OPPORTUNITY - Fakten für Entscheider*, 2014.
- [7] International Council on Systems Engineering (INCOSE), *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, 4. Aufl. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2015.
- [8] S. Friedenthal, A. Moore und R. Steiner, *A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language*. Elsevier, 2009.
- [9] T. Weillkiens, *Systems Engineering mit SysML/UML: Anforderungen, Analyse, Architektur*, 3. Aufl. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2014.
- [10] A. L. Ramos, J. V. Ferreira und J. Barceló, „Model-Based Systems Engineering: An Emerging Approach for Modern Systems“, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Nr. 1, S. 101–111, 2012.
- [11] International Council on Systems Engineering (INCOSE), *Systems Engineering Vision 2020*, 2. Aufl. Seattle, WA, USA, 2007.
- [12] P. A. Jansma und R. M. Jones, „Advancing the Practice of Systems Engineering at JPL“, *IEEE Aerospace Conference*, 2006.
- [13] *System Engineering Management*, MIL-STD-499, 1969.
- [14] J. Holt und S. Perry, *SysML for Systems Engineering: A Model-Based Approach (2nd Edition)*. London, UK, 2014.
- [15] M. Eigner, D. Roubanov und R. Zafirov, *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.
- [16] L. Delligatti, *SysML distilled: A brief guide to the systems modeling language*. Upper Saddle River, NJ, USA: Addison-Wesley, 2013.

- [17] U. Sendler und T. Weilkens, „Was Sie schon immer über MBSE, PLM und Industrie 4.0 wissen sollten“ in *Tag des Systems Engineering: Stuttgart, 06.-08. November 2013*, M. Maurer und S.-O. Schulze, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013, S. 303–314.
- [18] H. Weber, „Zum Verhältnis von Systems Engineering und Projektmanagement“ in 06/2015 November/Dezember, *Technik in Bayern: Schwerpunkt Systems Engineering*, VDI Landesverband Bayern, Hg., 2015.
- [19] *Systems and software engineering - System life cycle processes*, ISO/IEC/IEEE 15288:2015(E), 2015.
- [20] M. Brandstätter, „Kompatibilitätsmodellierung im Systems-Engineering Umfeld“. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München, 2009.
- [21] S. Kleiner, M. Krastel und M. Langlotz, „Vorgehensmodell zur modularen Einführung von Systems Engineering“ in *Tag des Systems Engineering: Stuttgart, 06.-08. November 2013*, M. Maurer und S.-O. Schulze, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013, S. 209–218.
- [22] *Systems and software engineering - Lifecycle profiles for Very Small Entities (VSEs) - Part 1: Overview*, ISO/IEC TR 29110-1:2016-06(E), 2016.
- [23] Vector Informatik GmbH, *AUTOSAR Classic Platform: Die AUTOSAR-Idee*. [Online] Verfügbar unter: https://vector.com/vi_autosar_de.html. Zugriff am: Mrz. 11 2018.
- [24] Verband der Automobilindustrie e. V., *Automotive SPICE*. [Online] Verfügbar unter: <http://vda-qmc.de/software-prozesse/automotive-spice/>. Zugriff am: Mrz. 18 2018.
- [25] G. E. P. Box und N. R. Draper, *Empirical model-building and response surfaces*. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- [26] *Systems and software engineering - Architecture description*, ISO/IEC/IEEE 42010:2011(E), 2011.
- [27] R. Malone, B. Friedland, J. Herrold und D. Fogarty, „Insights from Large Scale Model Based Systems Engineering at Boeing“, *26th Annual INCOSE International Symposium (IS 2016)*, S. 542–555, 2016.
- [28] R. L. Malone, B. Friedland, J. Herrold und G. Ferguson, „Conducting a Model Based Systems Engineering Tool Trade Study Using a Systems Engineering Approach“ in *27th Annual INCOSE International Symposium (IS2017)*, Adelaide, Australia, 2017.
- [29] J. A. Estefan, „Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies“, *IncoSE MBSE Initiative*, 2008.
- [30] Bibliographisches Institut GmbH, *Duden: Me-tho-do-lo-gie*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Methodologie>. Zugriff am: Nov. 22 2017.
- [31] A. Blumör, G. Pregitzer und M. Bothen, „Werkzeuge für die Entwicklung mechatronischer Systeme mit Methoden des MBSE“ in *Tag des Systems Engineering: Paderborn, 8. -10. November 2017*, S.-O. Schulze, C. Tschirner, R.

- Kaffenberger und S. Ackva, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017, S. 193–202.
- [32] Object Management Group, *SysML: V2: THE NEXT-GENERATION SYSTEMS MODELING LANGUAGE*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.omg.sysml.org/SysML-2.htm>. Zugriff am: Mrz. 19 2018.
- [33] S. Friedenthal, A. Moore und R. Steiner, *A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language*, 3. Aufl. Elsevier, 2015.
- [34] Sparx Systems, „Model Exchange: User Guide Series“ in *Enterprise Architect User Guide Library*, Sparx Systems, Hg.
- [35] *What is OSLC?: OSLC Primer*. [Online] Verfügbar unter: <https://open-services.net/resources/tutorials/oslc-primer/what-is-oslc/>. Zugriff am: Mrz. 19 2018.
- [36] *Functional Mock-up Interface*. [Online] Verfügbar unter: <http://fmi-standard.org/>. Zugriff am: Mrz. 22 2018.
- [37] C. Knop, S. Dr. Milewski, C. Völl und F. Sannwaldt, „Die Gestaltung eines Systems Engineering Office als zentrale Veränderungsinstanz bei der unternehmensweiten Einführung von Systems Engineering“ in *Tag des Systems Engineering: Herzogenaurach, 25.-27. Oktober 2016*, S.-O. Schulze, C. Tschirner, R. Kaffenberger und S. Ackva, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016, S. 141–150.
- [38] D. von Mengden, „Potentiale, Erfolgsfaktoren und Konsequenzen einer rein modellbasierten Entwicklung komplexer Systeme“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Raumfahrttechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [39] V. Huckriede, B. Joachim und S. Storck, „Systems Engineering im Maschinen- und Anlagenbau verstehen, anwenden und beherrschen“ in *Tag des Systems Engineering: Herzogenaurach, 25.-27. Oktober 2016*, S.-O. Schulze, C. Tschirner, R. Kaffenberger und S. Ackva, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016, S. 151–160.
- [40] J. Heihoff-Schwede, C. Bremer, M. Rabe und C. Tschirner, „Werkzeuge für den Mittelstand – MBSE leicht“ in *Tag des Systems Engineering: Herzogenaurach, 25.-27. Oktober 2016*, S.-O. Schulze, C. Tschirner, R. Kaffenberger und S. Ackva, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016, S. 35–44.
- [41] P. M. Fischer *et al.*, „Implementing Model Based System Engineering for the Whole Lifecycle of a Spacecraft“, *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2016, Braunschweig*, 2016.
- [42] C. Eckl, M. Dr. Brandstätter und J. Dr. Stjepandic, „Using the “Model-based Systems Engineering” Technique for Multidisciplinary System Development“, *22st International Conference on Concurrent Engineering*, 2016.
- [43] L. Wang, M. Izygon, S. Okon, L. Garner und H. Wagner, „Effort to Accelerate MBSE Adoption and Usage at JSC“, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20160010680>, 2016.
- [44] H. A. Anderson, A. Williams und G. Pierce, „Integrating MBSE into Ongoing Projects: Requirements Validation and Test Planning for the ISS SAFER“,

American Institute of Aeronautics and Astronautics,
<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20160010382>, 2016.

- [45] M. Rao, S. Ramakrishnan und C. Dagli, „Modeling and simulation of net centric system of systems using systems modeling language and colored Petri-nets: A demonstration using the global earth observation system of systems“ in Bd. 3, *Systems Engineering*, Wiley InterScience, Hg., Wiley Periodicals, Inc., 2008, S. 203–220.
- [46] S. Dr. Husung und S. Dr. Kleiner, „Model Based Systems Engineering: Prinzipien, Anwendung, Beispiele, Erfahrung und Nutzen aus Praxissicht“ in *Tag des Systems Engineering: Herzogenaurach, 25.-27. Oktober 2016*, S.-O. Schulze, C. Tschirner, R. Kaffenberger und S. Ackva, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016, S. 13–22.
- [47] M. Broy, M. Feilkas, M. Herrmannsdoerfer, S. Merenda und D. Ratiu, „Seamless Model-Based Development: From Isolated Tools to Integrated Model Engineering Environments“, *Proceedings of the IEEE*, Nr. 4, S. 526–545, 2010.
- [48] M. Dr. Brandstätter und C. Eckl, „Einsatz von Model-based Systems Engineering in der Automobil Industrie“ in *Tag des Systems Engineering: Ulm, 11.-13. November 2015*, S.-O. Schulze und C. Muggeo, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015, S. 301–311.
- [49] T. Rogalski, „Beschleunigt oder bremst MBSE die Entwicklung von 500 Kilowatt Bremsleistung?“ in *Tag des Systems Engineering: Ulm, 11.-13. November 2015*, S.-O. Schulze und C. Muggeo, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015, S. 313–322.
- [50] A. Stiegler und M. Maletz, „Best-Practice: MBSE und RQ-Engineering als verknüpfte Methoden der Hybridantriebsentwicklung“ in *Tag des Systems Engineering: Bremen, 12.-14. November 2014*, M. Maurer und S.-O. Schulze, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014, S. 321–328.
- [51] J. Hallqvist und J. Larsson, „Introducing MBSE by using Systems Engineering Principles“, *26th Annual INCOSE International Symposium (IS 2016)*, 2015.
- [52] D. Frank *et al.*, „Application of Model-Based Systems Engineering (MBSE) to compare legacy and future forces in Mine Warfare (MIW) missions“. Masters Degree, Systems Engineering, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, USA, 2014.
- [53] V. J. Kovarik und R. Muralidharan, „Model-Based Systems Engineering: Lessons Learned from the Joint Tactical Radio System“, *Journal of Signal Processing Systems*, S. 97–106, 2017.
- [54] G. Pregitzer, A. Blumör, S. Kleiner, M. Neubert und R. Hämisch, „Modellbasierte Entwicklung und vernetzter Produktentstehungsprozess im Maschinenbau“ in *Tag des Systems Engineering: Ulm, 11.-13. November 2015*, S.-O. Schulze und C. Muggeo, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015, S. 153–162.
- [55] G. Moeser, „Example on "Usage of Free Sketches in MBSE": Raising the applicability of Model-Based Systems Engineering for Mechanical Engineers“, *First IEEE International Symposium on Systems Engineering*, 2015.

- [56] U. Walter, „Datenanalyse, Mittelwerte und Fehlerfortpflanzung“, Lehrstuhl für Raumfahrttechnik, TU München, München, Feb. 2018.
- [57] Vector Informatik GmbH, *PREEvision: Die E/E-Engineering-Lösung*. [Online] Verfügbar unter: https://vector.com/vi_preevision_de.html. Zugriff am: Mrz. 31 2018.
- [58] No Magic, Inc., *Cameo Systems Modeler: Intro. Features. Editions. Requirements. Resources. Related*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.nomagic.com/products/cameo-systems-modeler#intro>. Zugriff am: Apr. 10 2018.
- [59] No Magic, Inc., *Cameo Systems Modeler User Guide: 18.1*, 2015.
- [60] No Magic, Inc., *Technical Overview: Modeling Environment*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.nomagic.com/mbse/overview/technical-overview.html>. Zugriff am: Apr. 10 2018.
- [61] No Magic, Inc., „Cameo Systems Modeler Brochure“, 2017. [Online] Verfügbar unter: <https://www.nomagic.com/images/products/cameo-systems-modeler/cameo-systems-modeler-brochure-2017.pdf>. Zugriff am: Apr. 10 2018.
- [62] No Magic, Inc., *MBSE Case Studies*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.nomagic.com/mbse/casestudies.html>. Zugriff am: Apr. 10 2018.
- [63] PolarSys, *Capella MBSE Tool*. Open Source Solution for Model-Based Systems Engineering. [Online] Verfügbar unter: <http://www.polarsys.org/capella/index.html>. Zugriff am: Apr. 10 2018.
- [64] P. Roques, „MBSE with the ARCADIA Method and the Capella Tool“, *8th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS 2016)*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01258014>, 2016.
- [65] Sparx Systems, *Enterprise Architect Funktionsübersicht*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.sparxsystems.de/uml/ea-function/>. Zugriff am: Mrz. 31 2018.
- [66] Sparx Systems, *Enterprise Architecture Startseite*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.sparxsystems.de/start/startseite/>. Zugriff am: Mrz. 31 2018.
- [67] PivotPoint Technology Corporation, *SysML.Tools: SysML Modeling Tool Reviews*. Free, Open Source & Commercial SysML Tools. [Online] Verfügbar unter: <http://sysml.tools/>. Zugriff am: Apr. 10 2018.
- [68] D. Norfolk, „PTC Integrity Modeler: ...a standards-based tool for Systems and Software Engineering“. InDetail Paper by Bloor, London, UK, 2015. [Online] Verfügbar unter: www.bloorresearch.com. Zugriff am: Apr. 10 2018.
- [69] PTC, *Customer Successes with Systems Engineering and Model-Based Systems Engineering*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.ptc.com/en/products/plm/functions/mbse/customers>. Zugriff am: Apr. 10 2018.
- [70] ISID Ltd und iTiD Consulting, *Introduction to iQUAVIS*. [Online] Verfügbar unter: http://www.isid-industry.jp/pdf/iquavis/iQUAVIS_Introduction_En_web.pdf. Zugriff am: Apr. 10 2018.

- [71] Sales Engineer for European region at ISID Ltd, "Information about iQUAVIS", Schriftlich-Elektronisch (Email), Apr. 2018.
- [72] ISID Ltd, *iQUAVIS: Visualization of development*. [Online] Verfügbar unter: <https://iqhptest.jimdo.com/solution/>. Zugriff am: Apr. 10 2018.
- [73] IBM Corporation, *IBM Knowledge Center - Overview of Rational Rhapsody*. [Online] Verfügbar unter: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSB2MU_8.3.0/com.ibm.rhp.overview.doc/topics/rhp_c_po_rr_product_overview.html. Zugriff am: Apr. 10 2018.
- [74] IBM Corporation, *IBM Knowledge Center - Rational Rhapsody editions*. [Online] Verfügbar unter: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSB2MU_8.3.0/com.ibm.rhp.overview.doc/topics/rhp_c_po_specailized_editions.html. Zugriff am: Apr. 12 2018.
- [75] Visual Paradigm International Ltd, *Visual Paradigm Editions*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.visual-paradigm.com/editions/>. Zugriff am: Apr. 10 2018.
- [76] Visual Paradigm International Ltd, *Visual Paradigm Startseite*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.visual-paradigm.com/>. Zugriff am: Apr. 10 2018.
- [77] Intercax LLC, *Syndeia*. [Online] Verfügbar unter: <http://intercax.com/products/syndeia/>. Zugriff am: Apr. 19 2018.
- [78] Phoenix Integration, *ModelCenter MBSE Pak*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.phoenix-int.com/product/mbsepak/>. Zugriff am: Apr. 19 2018.
- [79] Intercax LLC, *ParaMagic*. [Online] Verfügbar unter: <http://intercax.com/products/paramagic/>. Zugriff am: Apr. 19 2018.
- [80] Visual Paradigm International Ltd, *Visual Paradigm Online Shop*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.visual-paradigm.com/shop/vp.jsp?license=perpetual>. Zugriff am: Apr. 18 2018.
- [81] H.-P. Hoffmann, „Model-Based Systems Engineering with Rational Rhapsody and Rational Harmony for Systems Engineering: Deskbook Release 4.1“, 2014.
- [82] Vitech Corporation, *STRATA MBSE Methodology*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.vitechcorp.com/solutions/strata.shtml>. Zugriff am: Apr. 20 2018.
- [83] K. Hambleton, „Systems Engineering - an Educational Challenge“ in *Ingenia: Issue 6, Nov 2000*, Royal Academy of Engineering, Hg., London, UK, 2000, S. 61–67.

B Anhang

B.1 Notationsübersicht OMG Systems Modeling Language

Internes Blockdiagramm

Anwendungsfalldiagramm

Systemkontextdiagramm

Blockdefinitionsdiagramm

Ports

Modellsicht

Pakete

Anforderungen

ID	Name	Text
4711	Anforderung	Das System...
...

OMG Systems Modeling Language (OMG SysML) v1.3 (<http://www.omg.com/sysml>)
 inkl. Stereotypen aus S'INOD (<http://www.sysmod.de>) und FAS (<http://www.fas-method.org>)
 MBSE Blog: <http://www.model-based-systems-engineering.com>

OMG Systems Modeling Language (OMG SysML) v1.3 (<http://www.omg.com/sysml>)
 inkl. Stereotypen aus S'INOD (<http://www.sysmod.de>) und FAS (<http://www.fas-method.org>)
 MBSE Blog: <http://www.model-based-systems-engineering.com>

B.2 Auswertungsmatrix der Literaturrecherche

		Anzahl	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		Anwendung (Kurzzeile)	Implementing MBSE for the Whole Lifecycle of a Spacecraft	Satellitenentwicklung und Bus-Systeme am Beispiel des Satelliten MOVE	MBSE am Johnson Space Center der NASA	MBSE Einsatz für „ISS SAFER“	System-of-Systems: GEOS	Fahrzeugtechnik und Bus-Systeme	MBSE bei GKN Driveline	Automobil-OEMs und Zulieferer	MBSE in der Automobilindustrie	MBSE bei der Entwicklung von 500 kW Bremsleistung	MBSE und Requirements Engineering bei der AVL GmbH	Entwicklungsorganisation bei Saab AB	MBSE bei Boeing	MBSE in Minenbekämpfungsmissionen	Entwicklung einer softwarebasierten Architektur für Radiosysteme	Textilmaschinenfabrik Karl Mayer	MBSE in KMUs im Maschinen- und Anlagenbau	Skizzen und Entwürfe	MBSE bei Miele
Randbedingung oder Anforderung	Raumfahrt- und Satellitentechnik	4	x	x	x	x															
	Automotive	6							x	x	x	x	x								
	Defense & Aerospace	4												x	x	x	x				
	Anlagen-/ Sonder-/ Allg. Maschinenbau	3																x	x	x	
	Konsumgüter/ Haushaltsgeräte	1																			x
	keiner Branche zuordenbar	1																			
	Produktionsvolumen	1						x			x										
	(sehr) geringes Produktionsvolumen	2																			
	Entwicklungsanlass	1	x	x																	
	Einzelanfertigungen	1	x	x																	
kundenspezifische Entwicklung	3	x	x																		
wenige Zulieferer involviert	1																				
Stakeholder	3						x			x					x						
global verteilte, heterogene und viele Stakeholder (intern und extern)	1																				
hohe Produktvielfalt/Variantenvielfalt	1																				
geringer Bedarf für Produktvariationen	1		x																		
konservatives Unternehmen (träge bzgl. Innovation, geringe Bereitschaft für Änderungen)	1				x																
geringe Kenntnisse zu MBSE oder SysML vorhanden	1											x									
System ist System-of-Systems	2						x														
Schwerpunkt mechatronische Systeme	1																		x		
Schwerpunkt mechanische Systeme	1																			x	
Software (z.B. Steuerungs-SW) Teil des Systems	3											x						x			
Anforderungen	Systemmodell erweitern und anpassen (z.B. an neue Anforderungen)	2				x											x				
	Versions- bzw. Änderungsmanagement unterstützen	1																			
	Use Cases modellieren und Anforderungen ableiten	2		x								x									
	Anforderungen modellieren	6				x															
	Integration des Anforderungsmanagements in die modellbasierte Systementwicklung	2										x									
	Architekturen (funktionale, logische und physikalische) modellieren	4									x							x			
	Systemverhalten und -struktur beinhalten/modellieren	6		x								x									
	Verknüpfung von Anforderungen, Funktionen und Systemelementen modellieren	5				x								x							
	bdd zu farbige Petri-Netze	1					x														
	(phasenübergreifende) Datenbank	2	x																		
	Zugangskontrolle/-berechtigungen für Modelle/innerhalb einer Datenbank	2																			
	Erstellen/ Ableiten von Dokumenten	5				x			x					x							
	Integration von freien Skizzen in Diagramme und Modelle	1																			
	Von Änderungen betroffene Systemelemente finden/ bewerten	2							x												
	Import/ Export Mechanismus für Systemmodell (Stücklisten, Anforderungen, Excel, XML, ...)	3	x			x															
	Systemmodell auf Fehler/ fehlende Verknüpfungen prüfen	4					x														
	Systemkontext und Systemgrenzen modellieren	3		x							x										
	Stakeholder modellieren	1																			
	Modellierung auf verschiedenen Abstraktionslevels	2																			
	Schnittstellen zwischen Systemelementen oder zur Systemumgebung modellieren	8							x	x		x	x			x					
	Sichten auf das System generieren können	5		x																	
	Simulation View	1																			
	Simulation der Systemarchitektur zum Test des Systemverhaltens	1						x													
	Simulation von verschiedenen Szenarien (Parametervariation, Sensitivitätsanalysen)	2																			
	Vergleich und Validierung (Auslegung/ Bewertung) von bestimmten Bauteilkombinationen/ Komponentenvarianten	2								x											
	Testen/ Absichern der Integration des Systems in Gesamtsystem (z.B. Zulieferer und OEM)	3																			
	Testen von Kundenfunktionen am virtuellen Prototypen bzw. Systemmodell	1																			
	virtuelle, modellbasierte Absicherung vor der Produktionsphase (Testen/ Absichern)	7																			
	Programmierung von Steuerungssoftware am virtuellen Prototypen (Systemmodell)	1																			
	Gemeinsames Systemverständnis und interdisziplinäre Zusammenarbeit verbessern	5			x																
	niedriger Lern- und Schulungsaufwand	1				x															
	niedrige Kosten	1				x															
	geringer Modellierungsaufwand	1																			
	Scaling/ Tailoring/ reduzierter MBSE Ansatz	1																			
	Aktivitäten von Verifikation&Validierung modellieren	1					x														
	Automatisierte Erstellung von Vorgehensplänen für Analysen und Verifikationstests	1						x													
	Instanzenmodell für Bildung/ Ableitung von Instanzen	2			x																
	Variantenmgmt unterstützen	1																			
	Toolintegration: Verknüpfung zwischen Systemmodell und disziplinspezif. Entwicklungsmodellen	2			x																
	Wiederverwendung von Dateien, Modellen oder Informationen	4	x				x														
Bibliothek für wiederverwendbare Referenzmodelle	1					x															

B.3 Interview-Unterlagen

1. Leitfragen: Deutsch, offen-allgemein

INTERVIEW B – LEITFADEN			
Name	Unternehmen	Position	Branche
Datum	Dauer	Art der Durchführung	
	Geplant	Tel.	Pers.
	Tatsächlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Einleitung			
<ul style="list-style-type: none"> Informationen über Ablauf und Aufbau des Interviews Hinweis: Alle Antworten werden anonym behandelt, Namen und Firmen werden nicht in der Arbeit veröffentlicht. Funktion und Haupttätigkeiten des Teilnehmers: _____ 			
I Kurz-Vorstellung der Masterarbeit			
<ul style="list-style-type: none"> Betreuung durch TUM Lehrstuhl für Raumfahrttechnik und 3DSE Management Consultants Untersuchte Fragestellungen und geplantes Ergebnis der Arbeit Ziel und Umfang der Literaturrecherche: Welche Anwendungsbeispiele gibt es in den verschiedenen Branchen? Welche Randbedingungen in der Entwicklung werden genannt und welche Anforderungen an MBSE Tools werden genannt? Gibt es Gemeinsamkeiten oder Abhängigkeiten, sodass sich Archetypen ableiten lassen? Resultat der Literaturrecherche: Ableitung oder Bewertung von Archetypen nicht möglich Wie lautet Ihre Einschätzung zur Existenz und zu möglichen Unterscheidungskriterien von Archetypen: _____ Umfang der Interviewreihe: Untersuchung von Randbedingungen und Anforderungen an Modellierungstools in verschiedenen Branchen Stand der Technik: MBSE Modellierungstools 			
II Leitfragen (offene Fragen)			
<ul style="list-style-type: none"> MBSE-Anwendungsbeispiele: <ul style="list-style-type: none"> Sind weitere Datenbanken oder Quellen für MBSE-Anwendungsbeispiele bekannt? Sind weitere Unternehmen mit MBSE-Anwendung bekannt? 			

<ul style="list-style-type: none"> Branchen: <ul style="list-style-type: none"> In welchen Branchen sind heute MBSE-Ansätze, Softwaretools und Methoden besonders stark oder schwach etabliert? Warum ist das so? Archetypen: <ul style="list-style-type: none"> Existieren verschiedene Archetypen an Unternehmen in Bezug auf unterschiedliche Anforderungen an ein Modellierungstool? Worin könnten sich Archetypen unterscheiden? Machen Archetypen Sinn? MBSE-Tools: Features: <ul style="list-style-type: none"> Welche Anforderungen gelten Ihrer Einschätzung nach an ein Modellierungstool? Was muss ein Tool auf jeden Fall können? MBSE-Tools: Kriterien bei der Auswahl: <ul style="list-style-type: none"> Was sind die wichtigsten Kriterien bei der Selektion eines Modellierungstools? Entsprechen Sie den wichtigsten Features? Ansätze in einer Toolandschaft: <ul style="list-style-type: none"> Ist eine föderative oder integrierte Toolandschaft in einer Produktentwicklung sinnvoller?
III Fragebogen (geschlossene Fragen)
<ul style="list-style-type: none"> Einschätzungen bezüglich der Anforderungen an MBSE-Tools: Wie hoch schätzen Sie die Wichtigkeit der folgenden Anforderungen bei der Selektion eines MBSE-Tools ein? Separates Template
Gesprächsabschluss
<ul style="list-style-type: none"> Weitere Anmerkungen zum Thema MBSE-Modellierungstools: _____ Zusenden der Interviewergebnisse nach Abschluss der Arbeit

Hinweis: Der Fragebogen „Deutsch, offen-spezifisch“ befindet sich in Abschnitt 5.1.

2. Leitfragen: Englisch, offen-spezifisch

Interview Protocol			
Name	Company (City)	Position/ Function	Industry Sector
Date	Duration [min]	Type	
	Planned	Tel.	Pers.
	Real	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Intro			
<ul style="list-style-type: none"> Outline and content of the interview Answers are anonymously; names of participants or companies will not be shown in my Thesis What is your position and your main field of activity? _____ 			
Part 1 Content and goal of my Thesis: What is it about?			
<ul style="list-style-type: none"> Thesis is being developed by the Chair of Astronautics at the Technical University of Munich and is supervised in cooperation with 3DSE Management Consultants GmbH. The focus is on the questions 'What do MBSE software tools need to be capable of and what they must offer – and in particular when, under which conditions?' Furthermore, 'How do I make decisions for an adequate MBSE strategy with said tools and methods?' The result is a tradeoff assessment methodology for tool and method decision, independent of any tool vendor. During a literature research, I cross-examined the case studies in different industry sectors. (1) 'which basic conditions can be extracted?' (like is it a small or large company, is it mass production or individual manufacture) (2) 'which are the requirements that are imposed on the modeling tools?'. The goal was to identify several archetypes. An archetype is defined by a set of conditions combined with a set of requirements. What is your personal assessment, do those archetypes exist? _____ Based on this literature research, it was not possible to identify those archetypes. One of the reasons for that is that the use cases were not easy to find; there are not that many and they were only superficially described. Series of interviews, to determine the requirements for the modeling tools 			

<ul style="list-style-type: none"> across a diverse range of industries and to find out if the archetypes exist. State of the art of modeling tools, in order to evaluate which tool can best satisfy which requirements.
Part 2 Key Questions
<ul style="list-style-type: none"> Understanding of MBSE: What is your personal definition of MBSE? <ul style="list-style-type: none"> Does a company-wide definition exist? Organizational structure of your product development department: How close is the cooperation between development teams from different domains? <ul style="list-style-type: none"> Are they digitally networked? Is there a synchronized data and information exchange between domain teams? How is the impact of modifications communicated across domains? Level of awareness of MBSE in the company: How would you describe the level of awareness of MBSE in your company? Level of modeling: Where do you use models in development, in which domains or development phases is a MBSE approach applied? Usage of MBSE tools: Do you already use certain MBSE software? <ul style="list-style-type: none"> Where and what is it used for? Requirements related to a MBSE modeling tool: What are or would be your top requirements for MBSE modeling tools?
Part 3 Survey
<ul style="list-style-type: none"> See Excel-Template
Ending
<ul style="list-style-type: none"> Do you have any further comments? _____ I will provide the survey results in the beginning of May

3. Fragebogen: Deutsch



Einschätzungen bezüglich der Anforderungen an ein MBSE-Softwaretool

MBSE unterstützt Anforderungserhebung, Systemdesign, -analyse, -verifikation und -validierung phasenübergreifend und bereits ab den frühen Entwicklungsphasen.
 MBSE ist eine formalisierte Anwendung der Modellierung, bei der ausführbare, eindeutige Modelle als Repräsentationen des Systems entstehen. Dabei wird ein operativer Bedarf in eine Systemkonfiguration umgewandelt.
 Ziel der Modellierung ist es, das Systemverhalten ausgehend von der Systemstruktur vorherzusagen, zu simulieren und zu erklären.

Freiwillige Angaben zu Ihrer Person

Funktion/Position:	
Haupttätigkeiten:	
Genutztes MBSE-Tool:	

Hinweise zur Durchführung

Alle Punkte sollten relativ zügig beantwortet werden und auf Ihren eigenen Erfahrungen und Einschätzungen basieren. Die Bearbeitung des Fragebogens sollte weniger als 15 Minuten in Anspruch nehmen.
 Alle Daten werden anonymisiert behandelt. Es werden keine Unternehmens- oder Teilnehmernamen veröffentlicht.

- Vielen Dank für Ihre Teilnahme! -



Wie hoch schätzen Sie die Wichtigkeit der folgenden Anforderungen bei der Selektion eines MBSE Tools ein?

- 0: keine Aussage machbar
- 1: unwichtig / nicht relevant
- 2: weniger wichtig
- 3: wichtig
- 4: sehr wichtig / Muss-Anforderung

Das MBSE-Softwaretool kann ...		Wichtigkeit
FEATURES beim Modellieren		
1.	Dateien und Informationen exportieren/ importieren. <i>[Beispiele: Anforderungen aus Excel-Liste, Referenzmodelle aus einer Bibliothek, Stücklisten, XML-Dateien]</i>	
2.	Änderungen und Anpassungen am vorhandenen Systemmodell vornehmen und nachverfolgen.	
3.	Anforderungen, Funktionen und Systemelemente miteinander verknüpfen.	
4.	Blockdiagramme in Petri-Netze konvertieren. <i>[Petri-Netze: Modelle zur Beschreibung und Analyse von Abläufen]</i>	
5.	Schnittstellen zwischen Systemelementen modellieren.	
6.	den Systemkontext und die Systemgrenzen modellieren.	
7.	unterschiedliche Views generieren. <i>[Beispiele: funktionale, physikalische oder betriebswirtschaftliche Sicht]</i>	
8.	das System auf verschiedenen Detail- und Abstraktionslevels anzeigen.	
9.	Handskizzen und 2D-Zeichnungselemente in Modellierungs-Diagramme aufnehmen.	
10.	automatisiert Text und Diagramme für das Dokumentationsmanagement aus dem Systemmodell ausleiten. <i>[Beispiele: Spezifikationen, Anforderungslisten, Strukturbäume]</i>	

Das MBSE-Softwaretool kann ...	Wichtigkeit
DATENBANK	
11. das Systemmodell mit einer entwicklungsphasen- und domänenübergreifenden Datenbank verknüpfen.	
12. unterschiedliche Zugriffsberechtigungen für Dateien und Informationen erteilen.	
WIEDERVERWENDUNG	
13. bereits entwickelte Elemente und Informationen für neue Systeme wiederverwenden. <i>[zum Beispiel auch für Systeme in anderen Unternehmen]</i>	
14. bereits entwickelte Modelle als Referenzen in einer Bibliothek archivieren.	
ANFORDERUNGEN	
15. Use Cases modellieren und daraus Anforderungen ableiten.	
16. Software aus dem Anforderungsmanagement (z.B. DOORS) integrieren oder verknüpfen.	
TOOLLANDSCHAFT	
17. das Systemmodell mit domänenspezifischen Entwicklungsmodellen (z.B. CAD-Modell oder Simulationsmodell) verknüpfen und synchronisieren.	
VARIANTEN	
18. aus einem Systemmodell einzelne Instanzen ableiten (i.S.v. Varianten des Systems).	
INTEGRATION & VERIFICATION	
<i>[Hinweis zum Begriff Simulation: Die Durchführung einer Simulation kann im Folgenden auch mit einem Simulationstool geschehen. Simulations- und MBSE-Tool sind aber mindestens verknüpft und das MBSE Tool gibt die Simulations-Parameter vor.]</i>	
19. automatisiert Vorgehenspläne für Test und Verifikation des Systems erstellen.	
20. durch Simulationen das Systemverhalten testen und absichern.	
21. eine eigene Simulations-Sicht generieren. <i>[Hinweis: In dieser Sicht werden die für die numerische Simulation benötigten Attribute, Parameter und mathematischen Funktionen bereitgestellt.]</i>	
22. Bauteilkombinationen und Lösungsalternativen testen und absichern.	
23. Auswirkung von Änderungen auf das System aufzeigen.	
24. die Integration von Subsystemen in das System testen und absichern.	
25. das Systemmodell auf Fehler, wie z.B. offene Verknüpfungen oder Inkonsistenzen, testen.	
26. verschiedene Systemzustände durch Parametervariationen simulieren.	
27. Kunden- und Systemnutzerfunktionen virtuell simulieren und absichern.	
GERINGE KENNNTNIS der Anwender in der MBSE Systemmodellierung	
Bei einem geringen Kenntnisstand der Mitarbeiter sollte(n) in einem MBSE Tool ...	
28. der Umfang und Aufwand der Modellierung reduzierbar und anpassbar sein.	
29. auch Bilder in die verschiedenen Diagramme des Modells aufgenommen werden können (für ein besseres Verständnis der Diagramme).	
Welche weiteren relevanten Anforderungen möchten Sie ergänzen?	
Das MBSE-Softwaretool kann ...	Wichtigkeit
30.	
31.	
32.	
33.	
34.	

4. Fragebogen: Englisch

 	
<p>Chair of Astronautics Technical University of Munich</p> <p>Hannes Rosenow</p>	
<p>Assessment of the Requirements for MBSE Modeling Tools</p>	
<p>MBSE supports system requirements, design, analysis, verification, and validation activities beginning in the conceptual design phase and continuing throughout development and later life cycle phases. MBSE is the formalized application of modeling, where executable and unambiguous models as a system's representation are generated. An operational need is being transformed into a system configuration. The goal of modeling is to better predict, simulate and explain the system behavior based on the system structure.</p>	
<p>Optional Personal Information</p> <p>Role/ Position: _____ Core Activities: _____ Used MBSE Tool: _____</p>	
<p>General Information</p> <p>All listed requirements should be handled relatively fast and based on your experiences and estimates. The survey should not take more than 15 minutes. All data will be treated anonymously. Names of companies or participants are not going to be published.</p> <p style="text-align: center;">- Thank you very much for your participation! -</p>	
<p>How high would you rate the importance of the following requirements when it comes to the selection of a MBSE tool?</p> <p>0: no statement possible 1: unimportant / irrelevant 2: less important 3: important 4: highly important / must-have</p>	
<p>The MBSE Softwaretool can ...</p>	
<p>FEATURES at modeling</p>	<p>Importance</p>
<p>1. export/ import data files and information. <i>[Examples: requirements out of E-soft, reference models out of a library, bill of materials, XML-files]</i></p> <p>2. make and retrace modifications and adaptations at the existing system model.</p> <p>3. link requirements, functions and system elements.</p> <p>4. convert block diagrams into Petri-nets. <i>[Petri-net: model to describe and analyze sequences]</i></p> <p>5. model the interfaces between system elements.</p> <p>6. model the system context and system boundaries.</p> <p>7. generate different views. <i>[Examples: functional, physical, business view]</i></p> <p>8. display the system on different detail or abstraction levels.</p> <p>9. include freehand sketches and 2D drawing elements into the diagrams.</p> <p>10. automatically generate text or diagrams out of the system model for documentation purpose. <i>[Example: specifications, requirements list, structure tree]</i></p>	<p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>

<p>The MBSE Softwaretool can ...</p>		<p>Importance</p>
<p>DATA BASE</p>		
11.	connect the system model to a database that is established across different domains and development phases.	_____
12.	assign different access rights for the use of data files and information.	_____
<p>REUSE</p>		
13.	reuse already generated elements and information for new systems. <i>[for example also for systems in other companies]</i>	_____
14.	archive already generated models as reference models in a library.	_____
<p>REQUIREMENTS</p>		
15.	model use cases and can derive requirements from the use cases.	_____
16.	integrate or combine software from requirements management (e.g. DOORS).	_____
<p>TOOL ENVIRONMENT</p>		
17.	connect and synchronize the system model with domain specific engineering models (e.g. CAD or Matlab/Simulink).	_____
<p>VARIANTS</p>		
18.	derive single instances from the system model (according to variants of the system).	_____
<p>INTEGRATION & VERIFICATION</p>		
<p><i>[Remark on the term 'simulation': In the following, the simulation can be carried out by an own simulation tool, too. The simulation tool and the MBSE tool are at least connected and the MBSE tool defines the simulation parameters.]</i></p>		
19.	automatically generate procedures for system test and verification.	_____
20.	test and verify the system behaviour by simulation.	_____
21.	generate its own simulation view. <i>[Remark: This view provides attributes, parameters and mathematical functions for the numerical simulation.]</i>	_____
22.	test and verify combinations of parts and alternative solutions.	_____
23.	point out the impact of changes on the system.	_____
24.	test and verify the integration of sub-systems into the system.	_____
25.	test the system model for errors, for example missing links or inconsistencies.	_____
26.	simulate different system states by parameter variation.	_____
27.	virtually simulate and verify customer and system user functions.	_____
<p>LITTLE USER KNOWLEDGE about system modeling</p>		
<p>In case of little user knowledge, it should be possible to ...</p>		
28.	reduce and adapt the scale and effort of the modeling approach.	_____
29.	include pictures in the different diagrams to enhance the reader's understanding.	_____
<p>What other relevant requirements would you like to complement?</p>		
<p>The MBSE Softwaretool can ...</p>		
30.	_____	_____
31.	_____	_____
32.	_____	_____
33.	_____	_____
34.	_____	_____

B.4 Ergebnisse aus der Interviewreihe

1. MBSE-Definitionen der Interviewteilnehmer

Ergebnisse aus Interview Teil I, Leitfrage: "Wie würden Sie MBSE in einem Satz definieren?"

<p>MBSE Definitionen (Antworten)</p>
<p>Systeme bereits in einer der Entwicklung vorgelagerten Phase systemorientiert und teilweise lösungsabhängig modellieren und somit ein gemeinsames Systemverständnis sicherstellen.</p>
<p>MBSE verknüpft die unterschiedlichen Domänen und trägt dazu bei, unter Zuhilfenahme eines Modells ein komplexes System zu verstehen. Das Modell versucht, die Wirklichkeit mit allen Abhängigkeiten im System abzubilden und im Sinne einer Komplexitätsverminderung das System in seine Elemente zu zerlegen. Der Modellierung sollte dabei eine definierte Sprache zugrunde liegen.</p>
<p>Der MBSE-Ansatz im Unternehmen orientiert sich am V-Modell mit den drei Säulen "Systemanalyse, Physikalische Entwicklung und Systemintegration" und basiert auf dem RFLP-Ansatz und auf der FAS-Methode mit einem heterogenen Werkzeugersatz.</p>
<p>MBSE ist die Modellbildung entlang der gesamten Wertschöpfungskette, die es mithilfe von Modellierungssprachen wie z.B. SysML ermöglicht, Verbindungen zwischen Domänenmodellen herzustellen.</p>
<p>Bei der Anwendung von MBSE steht das digitale Modell im Rahmen der Wissensgenerierung und Fragenklärung im Vordergrund. Während der Modellierung eines Systems können viele Möglichkeiten genutzt werden, um unterschiedliche Sichten auf das Modell zu erzeugen.</p>

<p>Eine konkrete Definition des Begriffs MBSE ist sehr schwierig. Ein Ziel von MBSE sollte in jedem Fall eine gemeinsame Plattform zur Kommunikation sein.</p>
<p>Dem MBSE-Ansatz liegt ein Informationsmodell zugrunde, welches ein digitales, IT-gestütztes Abbild der Realität ist und in dem die Entwicklungsartefakte aus den Systems Engineering Prozessen gespeichert, organisiert und vernetzt werden.</p>
<p>MBSE fördert eine einheitliche Entwicklungssprache über verschiedene Domänen hinweg und stellt damit die domänenübergreifende Kommunikation sicher, sodass ein ein-eindeutiges Verständnis über ein definiertes System vorherrscht. Die Umsetzung von MBSE basiert auf der Systemmodellierung mit einem Modellierungswerkzeug und auf einer einheitlichen Modellierungssprache, wobei das Modell als Quelle für die Systemarchitektur dient.</p>
<p>Definition entspricht INCOSE SE Vision 2020: "Model-based systems engineering (MBSE) is the formalized application of modeling to support system requirements, design, analysis, verification and validation activities beginning in the conceptual design phase and continuing throughout development and later life cycle phases."</p>
<p>MBSE ermöglicht es, das Fachwissen aus verschiedenen Bereichen in einem Modell konsolidiert zusammenzubringen, sodass das Modell zur single-source-of-truth wird.</p>
<p>MBSE bezweckt eine toolbasierte, graphische Darstellung eines komplexen Systems in Form eines Modells, welches im Wesentlichen aus Diagrammen statt Text besteht und alle systemrelevanten Informationen enthält. Es ist wichtig, dass verschiedene Disziplinen, die am Projekt beteiligt sind, auf dieses zentrale Modell zugreifen können - so sollen zum Beispiel Daten sowohl für FEM-Analysen als auch für das Controlling leicht verfügbar sein. Weitere zentrale Aspekte sind Schnittstellenbeschreibungen, Verhaltensweisen und Anforderungen.</p>
<p>MBSE hilft komplexe Sachverhalte abstrakt zu visualisieren und zu verstehen. MBSE ist die Verknüpfung von Anforderungen, Funktionen, Anwendungsszenarien mit den Funktions-/Lösungselementen.</p>
<p>MBSE beschreibt den Ansatz und Versuch einer durchgängigen Produktentwicklung. MBSE unterstützt die Produktentstehungsprozesse über alle Phasen des Entwicklungszyklus hinweg und über alle Detaillierungsebenen und physikalischen Domänen. Die digitale Modellierung hat dabei Vorteile, ist aber kein inhärenter Bestandteil von MBSE.</p>
<p>MBSE means to enhance the development of a system by processes and methods from change management, variability management, early validation and product line engineering activities as well as safety and security aspects. The MBSE approach shall provide different viewpoints and views and shall be applicable to different domains. The main artefact is one single model of sufficient high quality and value, being used as a single-source-of-truth and avoiding system failure when it comes to system integration. MBSE also means a holistic approach that includes all stakeholders very early in the development process. MBSE is not equivalent to system architecture. Systems Engineering includes MBSE and MBSE includes the system architecture.</p>
<p>MBSE means to support the development processes and the system design by digital models. MBSE opens the door to many additional benefits and accelerates the product development process.</p>
<p>MBSE ermöglicht die frühe Verifikation der Anforderungen, stellt eine effiziente Kommunikation mit allen Stakeholdern sicher und ermöglicht die Visualisierung von Systemfunktionen.</p>
<p>MBSE unterstützt das Requirements Engineering und bietet eine Möglichkeit, um den RFLP-Ansatz und agile Entwicklungsmethoden umzusetzen. Der modellbasierte Ansatz ist geprägt von starker Modularisierung und einer Verknüpfung von System-Komponenten untereinander. Dabei ist die Möglichkeit der Wiederverwendung von erstellten Modellen oder Elementen sowie ein konsistentes Datenmanagement wichtig.</p>
<p>MBSE beschreibt eine Methode und ein systematisches Vorgehen, um die Ergebnisse des Systems Engineering Prozesses frühzeitig verifizieren zu können. Dabei sind ein Softwaretool und ein digitales Modell nicht zwingend notwendig, das Tool ist aber ein Hilfsmittel, Ergebnisse und Entwicklungsartefakte schneller und wiederholbar generieren zu können. Somit hilft MBSE dabei, das Risiko in der Produktentwicklung zu reduzieren und Systeme schneller zu optimieren.</p>
<p>Definition entspricht INCOSE SE Vision 2020: "Model-based systems engineering (MBSE) is the formalized application of modeling to support system requirements, design, analysis, verification and validation activities beginning in the conceptual design phase and continuing throughout development and later life cycle phases."</p>

<p>Unter MBSE ist die Verwendung von einem formalen Modell zu verstehen, das beispielsweise in SysML oder einer anderen Sprache erstellt wurde und zur besseren Darstellung von übergreifenden Zusammenhängen dient. Dabei spielen sowohl disziplinenübergreifende Aspekte eine Rolle als auch hierarchische Zusammenhänge über verschiedene Detaillierungsgrade der Systeme hinweg.</p>
<p>MBSE bedeutet die Anwendung der Modellierung auf die klassischen Systems Engineering Aktivitäten wie beispielsweise Anforderungserhebung oder Verification & Validation. Kernpunkt von MBSE ist die Existenz von nur einem Modell mit gleicher Nomenklatur.</p>
<p>MBSE ist eine Methode, um bestimmte technische Systems Engineering Prozesse nach ISO 15288, die in einem Vorgehensmodell einer Firma verankert sind, mittels Modellierung zu unterstützen bzw. so auszuführen, um Vorteile für die Entwicklung und Freigabe solcher Systeme zu erzielen.</p>
<p>MBSE ist eine Methode, um komplexe Systeme zu entwickeln. Dazu gehören die modellbasierte Beschreibung, Abstimmung, Spezifikation und Dokumentation des Systems und das frühzeitige Testen mit Modellen.</p>
<p>MBSE kann nichts anderes sein als Systems Engineering, das durch Modelle unterstützt wird. Zu diesen Modellen gehören nicht nur SysML-Modelle, sondern eine Vielzahl an Modellen, also beispielsweise beschreibende, analytische, Budgeting- oder Schnittstellen-Modelle.</p>
<p>MBSE beschreibt den Übergang von verbalen Beschreibungen und Dokumenten hin zu Daten in Modellen. Die Modelle lassen sich in einem gemeinsamen, zentralen Systemmodell zusammenführen, sodass eine Zusammenarbeit und der Austausch von Modellen untereinander ermöglicht wird. Das Systemmodell muss mindestens die Daten und Informationen beinhalten, die ausgetauscht werden, und auf Verknüpfungen zu anderen Modellen und auf Ablageorte der Daten verweisen können. Zu den Modellen können ebenso Exceltabellen oder Matlab-Modelle zählen.</p>

2. Ergänzende Aussagen aus den Interviews

Für den Umgang mit komplexen System können vier Anwendungsfälle im Sinne von Beweggründen für die Einführung von MBSE unterschieden werden: (1) Systemmodellierung prospektiv für die Zukunft aufbauen, (2) MBSE als Kommunikationsgrundlage im Unternehmen, (3) MBSE aus Dokumentationszwecken, (4) Reverse Engineering, um bestehende Lösungen im Nachhinein zu verstehen. [Teilnehmer Nr. 4]

Die Etablierung von Systems Engineering ist der erste Schritt und wird vom Management getragen. Die tatsächliche Umsetzung, dokumentenzentriert oder modellbasiert, obliegt dann der Entscheidung der leitenden Systems Engineers. [Teilnehmer Nr. 5]

Dass ein MBSE-Tool einfach zu benutzen sein muss, ist ein Widerspruch in sich, denn MBSE ist nicht einfach. [Teilnehmer Nr. 5]

Der föderative MBSE-Ansatz hat eindeutig mehr Vorteile. Die Schnittstellenbewältigung ist hier allerdings noch ein Nachteil, der sich aber durch die Etablierung von standardisierten Austauschformaten vermindern wird. Der integrierte Ansatz wird nicht funktionieren. [Teilnehmer Nr. 3]

Unabhängig von MBSE-Ansätzen oder MBSE-Tools ist der Standard Automotive SPICE maßgebend für ein Unternehmen, das in der Automobilindustrie tätig ist. [Teilnehmer Nr. 12]

Zwei Experten weisen darauf hin, dass die MBSE-Tools und deren Auswahl ein zweitrangiges Problem seien. Wichtiger seien beispielsweise die Prozessanforderungen, eine definierte Methodik und

die organisierte Einführung von MBSE in den Entwicklungsprozess. Für die Praxis sei es auch zielführender, eine Methodik zu entwickeln, die die Anwendungsfälle eines Unternehmens herausfindet, um daraus dann die Anforderungen an ein Tool ableiten zu können. [Teilnehmer Nr. 1, 39]

Ein weiteres Problem der MBSE-Tools sei, dass sie zu generisch sind und nicht für ein bestimmtes Anwendungsfeld entwickelt wurden. [Teilnehmer Nr. 39]

Die veröffentlichten Anwendungsbeispiele in der Literatur werden ebenfalls kritisch gesehen. Oftmals seien diejenigen, die es publizieren, keine Experten oder Anwender. Zwischen der wissenschaftlichen Betrachtung und der industriellen Praxis herrsche außerdem eine große Differenz. Ansätze wie RFLP werden zwar stark beworben, aber so arbeite kaum jemand in der tatsächlichen Anwendung. [Teilnehmer Nr. 1]

Begriffe wie MBSE, model-based oder model-driven seien zudem sehr schwer zu definieren. Zum einen sei der Begriff SE oftmals noch nicht klar abgegrenzt und zum anderen bedarf es immer einer stark individuellen Anpassung des MBSE-Ansatzes an das Unternehmen. Für den tatsächlichen Anwender seien die Begriffe auch uninteressant. Systemmodelle seien mittlerweile oftmals schon inhärenter Bestandteil der Entwicklung – wie diese Entwicklung dann betitelt würde, sei ohne Praxisrelevanz. Oftmals sei auch der Mehrwert einer abstrakten Theorie in Frage gestellt, wenn bereits etablierte und funktionierende Toolketten im Einsatz sind. [Teilnehmer Nr. 39]

3. Leitfrage 5: Vollständiger Überblick der Nennungen der verwendeten MBSE-Tools je Unterscheidungsmerkmal

Nachfolgende Tabelle gibt eine vollständige Übersicht mit allen genannten Tools (vgl. 5.4.6). Dabei ist folgendes zu beachten: Bei der Nennung von Tools waren Mehrfachnennungen möglich. Bei fast allen Unternehmen wurde mehr als ein Werkzeug genannt. Ein Unternehmen kann zudem mehreren Branchen angehören und zusätzlich zum Entwicklungsanlass noch Forschungsaufträge ausführen (vgl. Tab. 5–1). Wurden mehrere Personen eines Unternehmens interviewt (zum Beispiel aus verschiedenen Abteilungen und/ oder Standorten), so gingen gleiche Nennungen eines Tools nur einmal in die Auswertung ein. Der Eintrag „sonstiges“ bedeutet, dass ein Wert nicht ermittelbar war. Außerdem blieben Unternehmensgröße, Umsatz und Standortverteilung von befragten Forschungseinrichtungen, Beratungsfirmen oder Toolanbietern bei der Auswertung unbeachtet und wurden ebenfalls unter „sonstiges“ gezählt.

MBSE Modellierungstool	Nennungen	Branche (häufigste)	Nennungen	Unternehmens- größe (häufigste)	Nennungen	Umsatzgruppe (häufigste)	Nennungen	Standortverteilung (häufigste)	Nennungen	Entwicklungsanlass (häufigster)	Nennungen
Sparx Enterprise Architect	10	Automobil	6	mittel	4	sehr hoch, hoch, mittel oder relativ niedrig	2	international verteilt	8	"kundenspezifische Auftragsentw."	7
		Defense & Aerospace	3	sehr groß	3		2	zentriert	1	"Katalogware"	2
		Bahnindustrie/ Schienen	2	klein	1	sonstige	2	sonstige	1	Forschungsaufträge	2
IBM Rational Rhapsody	7	Defense & Aerospace	3	sehr groß	3	sehr hoch	2	international verteilt	6	"kundenspezifische Auftragsentw."	3
		Bahnindustrie/ Schienen	3	groß	2	relativ hoch	2	sonstige	1	gemischt	3
		Automobil	2	mittel	1	mittel	1			Forschungsaufträge	1
PTC Integrity Modeler	5	Automobil	2	groß	2	relativ hoch	2	international verteilt	4	"kundenspezifische Auftragsentw."	3
		Bahnindustrie/ Schienen	1	mittel	2	mittel	1	sonstige	1	"Katalogware"	1
		Nutzfahrzeuge	1	sonstige	1	relativ niedrig	1			sonstige	1
Capella	5	Defense & Aerospace	2	sehr groß	2	relativ hoch	2	international verteilt	4	"kundenspezifische Auftragsentw."	3
		Automobil, Bahnind./ Sch. oder Kraftwerkst.	1	groß sonstige	2 1	sehr hoch mittel	1 1	sonstige	1	gemischt Forschungsaufträge	1 1
Officetools (Visio/ Powerpoint/ MindMap) *	4	Nutzfahrzeuge	2	groß	2	relativ hoch	2	international verteilt	3	"Katalogware"	2
		Anlagen-/ Sonder-/ Masc	1	klein	1	relativ niedrig	1	sonstige	1	gemischt	1
		Defense & Aerospace	1	sonstige	1	sonstige	1			Forschungsaufträge	1
No Magic MagicDraw	4	Bahnindustrie/ Schienen	1	groß	2	relativ hoch	1	international verteilt	3	"Katalogware"	2
		Medizintechnik	1	klein	1	mittel	1	sonstige	1	"kundenspezifische Auftragsentw."	1
		Nutzfahrzeuge	1	sonstige	1	relativ niedrig	1			sonstige	1
No Magic Cameo Systems Modeler	3	Defense & Aerospace	1	mittel	1	sehr hoch	1	international verteilt	3	"kundenspezifische Auftragsentw."	2
		Anlagen-/ Sonder-/ Masc	1	groß	1	relativ hoch	1			"Katalogware"	1
		Automobil	1	sehr groß	1	relativ niedrig	1			Forschungsaufträge	1
MathWorks MATLAB/Simulink *	2	Automobil	2	sehr groß	1	relativ hoch	2	international verteilt	2	"kundenspezifische Auftragsentw."	2
				groß	1						
Phoenix Integration ModelCenter *	2	Defense & Aerospace	1	mittel	2	relativ niedrig	2	international verteilt	2	"Katalogware"	1
		Anlagen-/ Sonder-/ Masc	1							gemischt	1
Vector PREEvision *	1	Automobil	1	sehr groß	1	relativ hoch	1	international verteilt	1	"kundenspezifische Auftragsentw."	1
Visual Paradigm	1	Automobil	1	mittel	1	relativ niedrig	1	international verteilt	1	"kundenspezifische Auftragsentw."	1
unternehmenseigenes Tool	1	Defense & Aerospace	1	sehr groß	1	relativ hoch	1	international verteilt	1	"kundenspezifische Auftragsentw."	1

* Fällt in dieser Arbeit nicht unter die Definition eines MBSE Tools.

4. Gesamtaufistung aller Anforderungen

Nummer	Anforderung	neu	Mapping zu Nr. 1-29 bzw. zu Nr. T	Wichtigkeit (Mittelwert)	Häufigkeit Nennungen/ Bewertungen
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren			3,6	31
2	Änderungen und Anpassungen am vorhandenen Systemmodell vornehmen und nachverfolgen			3,6	31
3	Anforderungen, Funktionen und Systemelemente miteinander verknüpfen			3,9	31
4	Blockdiagramme in Petri-Netze konvertieren			1,9	31
5	Schnittstellen zwischen Systemelementen modellieren			3,8	31
6	den Systemkontext und die Systemgrenzen modellieren			3,5	31
7	unterschiedliche Views generieren			3,6	31
8	das System auf verschiedenen Detail- und Abstraktionslevels anzeigen			3,5	31
9	Handskizzen und 2D-Zeichnungselemente in Modellierungs-Diagramme aufnehmen			1,8	31
10	automatisiert Text und Diagramme für das Dokumentationsmanagement aus dem Systemmodell ausleiten			3,2	31
11	das Systemmodell mit einer entwicklungsphasen- und domänenübergreifenden Datenbank verknüpfen			3,1	31
12	unterschiedliche Zugriffsberechtigungen für Dateien und Informationen erteilen			3,0	31
13	bereits entwickelte Elemente und Informationen für neue Systeme wiederverwenden			3,4	31
14	bereits entwickelte Modelle als Referenzen in einer Bibliothek archivieren			3,1	31
15	Use Cases modellieren und daraus Anforderungen ableiten			3,0	31
16	Software aus dem Anforderungsmanagement (z.B. DOORS) integrieren oder verknüpfen			3,3	31
17	das Systemmodell mit domänenspezifischen Entwicklungsmodellen (z.B. CAD-Modell oder Simulationsmodell) verknüpfen und synchronisieren			2,9	31
18	aus einem Systemmodell einzelne Instanzen ableiten (i.S.v. Varianten des Systems)			3,1	31
19	automatisiert Vorgehenspläne für Test und Verifikation des Systems erstellen			2,5	31
20	durch Simulationen das Systemverhalten testen und absichern			2,5	31
21	eine eigene Simulations-Sicht generieren			2,1	31
22	Bauteilkombinationen und Lösungsalternativen testen und absichern			2,6	31
23	Auswirkung von Änderungen auf das System aufzeigen			3,5	31
24	die Integration von Subsystemen in das System testen und absichern			2,9	31
25	das Systemmodell auf Fehler, wie z.B. offene Verknüpfungen oder Inkonsistenzen, testen			3,7	31
26	verschiedene Systemzustände durch Parametervariationen simulieren			2,4	31
27	Kunden- und Systemnutzerfunktionen virtuell simulieren und absichern			2,4	31
28	der Umfang und Aufwand der Modellierung reduzierbar und anpassbar sein			2,9	31
29	auch Bilder in die verschiedenen Diagramme des Modells aufgenommen werden können			2,4	31
30	Anforderungen modellieren	N	Nr. T3	3,0	1
31	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten	N	Nr. T8	3,5	2
32	Code Generierung	N	Nr. T9	3,0	1
33	definierte Profile/ Layer/ Oberfläche anbieten	N	Nr. T10	3,7	3
34	funktionale Sicherheit abbilden (FMEA, CAN-Bus, AUTOSAR, FTA, ...)	N	Nr. T14	3,3	3
35	holistischen, homogenen Toolansatz bieten (z.B. von Reqs bis V&V; z.B. von Reqs bis BOM)	N	Nr. T15	4,0	1
36	Integration & Test durchführen (erfüllt das System alle Reqs?)	N	Nr. T17	4,0	1
37	Integration in (best.) Unt.-Toolkette gewährleisten	N	Nr. T18	3,6	5
38	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/Export) über Schnittstellen zu anderen Tools (z.B. XMI, OSLC)	N	Nr. T19	3,8	4
39	Kollaboration/ multi user Fähigkeit (standortübergreifend, schnell)	N	Nr. T20	4,0	1
40	Konfigurations-/ Änderungs-/ Versionsmanagement ermöglichen (Baselines)	N	Nr. T22	3,0	1
41	Model Review unterstützen	N	Nr. T23	3,0	1
42	Modell(element)verknüpfung / Datenaustausch der Modelle untereinander	N	Nr. T24	4,0	1
43	Modelviewer anbieten	N	Nr. T25	4,0	2
44	Prozesse/ Methoden/ Workflows umsetzen oder unterstützen (wie z.B. Capella-Arcadia)	N	Nr. T26	3,8	4

Nummer	Anforderung	neu	Mapping zu Nr. 1-29 bzw. zu Nr. T	Wichtigkeit (Mittelwert)	Häufigkeit Nennungen/ Bewertungen
45	Schulung für Methoden und Tool bieten	Y		3,0	1
46	Scripting/Add-Ons ermöglichen	Y		4,0	1
47	Vendor Support gewährleisten	N	Nr. T35	3,0	2
48	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige (Lizenz-) Kosten (z.B. floating-licenses, open source)	N	Nr. T39	3,7	3
49	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)	N	Nr. T2	4,0	2
T1	Ableitung von Varianten/ Instanzen aus Sys.modell (Variantenmanagement)	N	Nr.18		3
T2	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)	Y			7
T3	Anforderungen modellieren	Y			1
T4	Anforderungsmanagement integrieren oder verknüpfen	N	Nr.16		4
T5	Auswirkung von Änderungen auf das System aufzeigen	N	Nr.23		1
T6	basierend auf Text statt Diagrammen arbeiten	Y			1
T7	Bauteilkombin. und Lösungsalternat. testen und absichern (Vergleich von Lösungsalternat.)	N	Nr.22		1
T8	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten	Y			11
T9	Code Generierung	Y			1
T10	definierte Profile/ Layer/ Oberfläche anbieten	Y			2
T11	dynamische Modellierung und die zugehörige Ausführung von Modellen (executableStateCharts)	Y			1
T12	Elemente wiederverwenden	N	Nr.13		2
T13	Export/ Import von Dateien und Informationen (aus/in Systemmodell)	N	Nr.1		3
T14	funktionale Sicherheit abbilden (FMEA, CAN-Bus, AUTOSAR, FTA, ...)	Y			2
T15	holistischen, homogenen Toolansatz bieten (z.B. von Reqs bis V&V; z.B. von Reqs bis BOM)	Y			2
T16	Innovationen fördern	Y			1
T17	Integration & Test durchführen (erfüllt das System alle Reqs?)	Y			2
T18	Integration in (best.) Unt.-Toolkette gewährleisten	Y			6
T19	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/Export) über Schnittstellen zu anderen Tools (z.B. XMI, OSLC)	Y			9
T20	Kollaboration/ multi user Fähigkeit (standortübergreifend, schnell)	Y			3
T21	Kommunikation unterstützen	Y			3
T22	Konfigurations-/ Änderungs-/ Versionsmanagement ermöglichen (Baselines)	Y			5
T23	Model Review unterstützen	Y			1
T24	Modell(element)verknüpfung / Datenaustausch der Modelle untereinander	Y			1
T25	Modelviewer anbieten	Y			1
T26	Prozesse/ Methoden/ Workflows umsetzen oder unterstützen	Y			4
T27	Referenzmodelle in Bib. Archivieren	N	Nr.14		2
T28	sehr komplexes Systemverhalten abbilden	Y			1
T29	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen	Y			2
T30	SysML verwenden	Y			1
T31	Test auf Modellierungsfehler (Model Checking)	N	Nr.25		1
T32	untersch. Zugriffsrechte auf Dateien/Inform.	N	Nr.12		2
T33	unterschiedliche Views generieren	N	Nr.7		3
T34	V&V unterstützen	Y			1
T35	Vendor Support gewährleisten	Y			2
T36	Verknüpfung Anf-Funkt-Sys.elemente	N	Nr.3		4
T37	Verknüpfung und Synchro. von Sys.modell mit Entw.modell	N	Nr.17		1
T38	Verknüpfung zu/ Bereitstellung einer Datenbank	N	Nr.11		1
T39	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige Kosten	Y			4

5. Detail-Auswertungen der im Fragebogen gelisteten Anforderungen (Nr. 1 - 29)

Branche	Anzahl Unternehmen, die Fragebogen bearbeitet haben	5 wichtigste Anf. (#)			5 unwichtigste Anf. (#)		
			MW	STABW		MW	STABW
Defense & Aerospace	6	#25	4,0	0,0	#4	1,4	0,6
		#2	3,8	0,4	#9	1,7	0,8
		#3	3,8	0,4	#21		
		#7	3,8	0,4	#26	2,0	1,0
		#1	3,8	0,5	#27	2,0	1,4
Anlagen-/ Sonder-/ Maschinenbau	3	#3	4,0	0,0	#9	2,0	0,0
		#8			#19	2,3	0,6
		#5, #7, #12, #25	3,7	0,6	#18	2,5	0,7
					#24	2,7	0,6
					#11, ##20, #21, #22, #28	2,7	1,2
Automobil	7	#3	4,0	0,0	#4	1,8	0,7
		#5			#9	1,7	0,5
		#25	3,8	0,4	#21	1,9	0,4
		#16	3,8	0,4	#26	2,3	0,5
		#7	3,7	0,5	#22	2,5	0,8
Bahnindustrie/ Schienenverkehr	3	#3	4,0	0,0	#4	1,7	1,2
		#5			#9	2,0	0,0
		#7			#20	2,0	1,0
		#25			#21		
		#1, #6, #8, #13	3,7	0,6	#26, #27	2,3	1,2
Medizintechnik	1	#1, #2, #5, #6, #7	4,0	-	#4, #17, #20, #21, #22, #24, #26, #27	1,0	-
Nutzfahrzeuge (alle: große Unt. relativ hoher Umsatz, Katalogware)	2	#3	4,0	0,0	#9	1,0	0,0
		#1, #2, #5, #6, #18, #23, #25	3,5	0,7	#27	1,0	-
					#4	1,5	0,7
					#17, #19, #20, #21, #28	2,0	0,0
Kraftwerkstechnik	1				#10	2,0	1,4
		#1, #3 - #8, #10, #13, #14, #16 - #18, #23 - #25, #28	4,0	-	#11	2,0	-
					#12		
Mischkonzern	2	#3	4,0	0,0	#20	1,5	0,7
		#5			#21		
		#7			#9, #22	2,0	0,0
		#25	#4, #26, #27	2,0	1,4		
		#1, #6, #8, #13, #15, #16, #29	3,5	0,7			
keine/ Experte/ Forschungseinrichtung	6	#1	4,0	0,0	#9	1,5	0,6
		#2	4,0	0,0	#21	1,8	0,8
		#25	3,8	0,4	#29	2,0	0,9
		#3, #5, #8	3,6	0,6	#4	2,2	0,5
					#27	2,2	0,8

Unternehmensgröße	Anzahl Unternehmen, die Fragebogen bearbeitet haben	5 wichtigste Anf. (#)	MW	STABW	5 unwichtigste Anf. (#)	MW	STABW
klein	3	#2	4,00	0,00	#21	1,33	0,58
		#3	3,67	0,58	#11	1,67	0,58
		#5			#20	1,67	0,58
		#8			#18	2,00	0,00
		#25			#4, #9, #17, #22, #24, #26, #27	2,00	1,00
mittel	4	#3	4,00	0,00	#4	1,33	0,58
		#5			#9	2,25	0,50
		#6	3,75	0,50	#19	2,25	0,96
		#1, #7, #10, #14, #25, #27			#11, #28, #29	2,75	0,96
groß	6	#3	4,00	0,00	#9	1,81	0,75
		#5	3,83	0,41	#27	1,87	0,87
		#6	3,81	0,40	#4	1,98	1,10
		#7	3,62	0,49	#21	2,05	0,64
		#25	3,57	0,49	#20, #26	2,21	0,75
sehr groß	6	#1	4,00	0,00	#9	1,50	0,55
		#3			#4	1,60	0,89
		#7			#21	1,83	0,41
		#25			#27	2,17	0,98
		#11	3,75	0,42	#26	2,33	0,82

Umsatz	Anzahl Unternehmen, die Fragebogen bearbeitet haben	5 wichtigste Anf. (#)	MW	STABW	5 unwichtigste Anf. (#)	MW	STABW
relativ niedrig	5	#3	3,80	0,45	#4	1,75	0,96
		#5			#19	2,00	0,82
		#6	3,60	0,55	#9	2,40	0,55
		#1, #7, #25			#11	2,40	0,89
					#28	2,40	0,89
mittel	3	#3	4,00	0,00	#9	2,33	0,58
		#5			#29		
		#6			#4	2,33	1,53
		#7			#11, #12, #19, #21, #26, #	2,67	0,58
		#10					
relativ hoch	7	#3	4,00	0,00	#4	1,41	0,51
		#5	3,86	0,38	#9		
		#25	3,78	0,40	#27	1,72	0,85
		#7	3,67	0,47	#21	1,76	0,53
		#23	3,65	0,47	#26	2,04	0,82
sehr hoch	3	#1	4,00	0,00	#9	1,67	0,58
		#3			#21	2,00	0,00
		#7			#4	2,00	1,41
		#11			#19	2,33	0,58
		#25			#15, #27	2,33	1,15

Verteilung der Standorte	Anzahl Unternehmen, die Fragebogen bearbeitet haben	5 wichtigste Anf. (#)		5 unwichtigste Anf. (#)	
		MW	STABW	MW	STABW
zentriert	2	#2		#9	
		#3	4,00	#11	1,50
		#8		#21	0,71
		#25		#20	2,00
		#5, #12, #23	3,50	#29	1,41
international verteilt	17	#3	3,94	#4	1,66
		#5	3,82	#9	1,87
		#7	3,81	#21	2,13
		#25	3,73	#26	2,37
		#1	3,66	#27	2,40

Entwicklungsanlass	Anzahl Unternehmen, die Fragebogen bearbeitet haben	5 wichtigste Anf. (#)		5 unwichtigste Anf. (#)	
		MW	STABW	MW	STABW
kundenspez. Auftragsentwicklung	10	#3	4,00	#4	1,65
		#25	3,94	#9	1,69
		#1	3,83	#21	2,03
		#5	3,80	#26	2,33
		#7	3,77	#29	2,40
		#3	3,75	#4	1,33
		#5	3,50	#9	1,75
Katalogware	4	#6		#19	2,00
		#1	3,50	#28	0,82
		#7	4,00	#24	2,00
		#3	3,80	#21	2,20
gemischt	5	#5	3,60	#9	2,20
		#7	3,60	#4	2,20
		#25	3,60	#17	2,40
		#6	3,60	#19	0,55

6. Detail-Auswertungen der Top-Anforderungen (Nr. T1-T39)

Branche	Anzahl Teilnehmer, die Top-Anf. nannten	Anzahl an genannten, untersch. Top-Anforderungen	wichtigste Anf. (häufigste)	Nennungen
Defense & Aerospace	6	21	T2	3
			T19	3
			T4	2
			T8	2
			T17	2
Anlagen-/ Sonder-/ Maschinenbau	4	13	T8	2
			T19	2
			T39	2
			T3, 16, 28, 37	1
Automobil	6	20	T19	3
			T22	3
			T26	3
			T10	2
			T32	2
Bahnindustrie/ Schienenverkehr	4	10	T8	4
			T4	2
			T19	2
			T30	1
			T37	1
Medizintechnik	1	3	T25	1
			T33	1
			T22	1
Nutzfahrzeuge	2	5	T25	1
			T14	1
			T15	1
			T1	1
			T8	1
Kraftwerkstechnik	1	3	T39	1
			T2	1
			T8	1
Mischkonzern	2	7	T8	2
			T37	1
			T21	1
			T4	1
			T26	1
keine/ Experte/ Forschungseinrichtung	5	14	T18	4
			T8	3
			T5, 7, 9, 31	1

Verteilung der Standorte	Anzahl Teilnehmer, die Top-Anf. nannten	Anzahl an genannten, untersch. Top-Anforderungen	wichtigste Anf. (häufigste)	Nennungen
zentriert	2	10	T3	1
			T16	1
			T10	1
			T20	1
			T1	1
international verteilt	19	33	T19	8
			T8	8
			T20	5
			T4	4
			T22	4

Umsatz	Anzahl Teilnehmer, die Top-Anf. nannten	Anzahl an genannten, untersch. Top-Anforderungen	wichtigste Anf. (häufigste)	Nennungen
relativ niedrig	6	20	T22	3
			T29	2
			T39	2
			T19	2
			T8	2
mittel	5	12	T8	3
			T39	2
			T2	2
			T19	2
			T30	1
relativ hoch	6	19	T33	2
			T26	2
			T2	2
			T19	2
			T8	2
sehr hoch	3	11	T4	2
			T19	2
			T6, 34, 37, 38	1

Unternehmensgröße	Anzahl Teilnehmer, die Top-Anf. nannten	Anzahl an genannten, untersch. Top-Anforderungen	wichtigste Anf. (häufigste)	Nennungen
klein	4	14	T39	2
			T22	2
			T3	1
			T16	1
			T25	1
mittel	5	14	T19	4
			T29	2
			T1	2
			T4	2
			T11, 28	1
groß	6	12	T8	4
			T2	3
			T14	2
			T26	2
			T24, 30	1
sehr groß	6	19	T19	4
			T12	2
			T27	2
			T33	2
			T4, 36	2

Entwicklungsanlass	Anzahl Teilnehmer, die Top-Anf. nannten	Anzahl an genannten, untersch. Top-Anforderungen	wichtigste Anf. (häufigste)	Nennungen
kundenspez. Auftragsentwicklung	11	24	T19	5
			T2	4
			T8	4
			T10, 12, 27, 32	2
Katalogware	4	11	T24, 25, 28	1
			T14, 15, 29	1
gemischt	6	18	T8	3
			T21	2
			T4, 26, 39	2

B.5 MBSE-Tools

1. Quellenangaben

Cameo Systems Modeler:		
CSM_1	Tool-Website	https://www.nomagic.com/products/cameo-systems-modeler#intro
CSM_2	User Guide	https://www.nomagic.com/files/manuals/Cameo%20Systems%20Modeler%20UserGuide.pdf
CSM_3	Brochure	https://www.nomagic.com/images/products/cameo-systems-modeler/cameo-systems-modeler-brochure-2017.pdf
CSM_4	Techn. Overview	http://www.nomagic.com/mbse/overview/technical-overview.html
CSM_5	CSM Documentation	https://docs.nomagic.com/display/CSM185/Cameo+Systems+Modeler+Documentation
CSM_6	CSM Documentation	https://www.nomagic.com/support/documentation
Capella:		
CAP_1	Tool-Startseite	http://www.polarsys.org/capella/
CAP_2	Features	http://www.polarsys.org/capella/features.html
CAP_3	Extensibility	http://www.eclipse.org/community/eclipse_newsletter/2017/december/article4.php
CAP_4	Forum	https://polarsys.org/forums/index.php/i/4/
CAP_5	Introduction	http://download.polarsys.org/capella/publis/An_Introduction_to_Arcadia_20150115.pdf
CAP_6	Paper	P. Roques
Enterprise Architect:		
EA_1	Features	https://www.sparxsystems.de/uml/ea-function/
EA_2	User Guide	http://sparxsystems.com.au/resources/user-guides/index.html
EA_3	User Guide	http://www.sparxsystems.com/enterprise_architect_user_guide/13.5/index/index.html
EA_4	Editions	http://www.sparxsystems.com/products/ea/compare-editions.html
EA_5	Startseite	https://www.sparxsystems.de/start/startseite/
Integrity Modeler:		
PTC_1	Startseite	https://www.ptc.com/en/products/plm/plm-products/integrity-modeler
PTC_2	Introduction	https://www.youtube.com/watch?v=aXc1xLpHra8
PTC_3	Bloor Report	https://www.ptc.com/en/resources/plm/report/integrity-modeler-independent-review
iQUAVIS:		
IQ_1	Startseite	https://iqhptest.jimdo.com/solution/
IQ_2	Introduction	http://www.isid-industry.jp/pdf/iquavis/iQUAVIS_Introduction_En_web.pdf
IQ_3	PDF	iQUAVISandSysML.pdf
Rhapsody:		
RR_1	Overview	https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSB2MU_8.3.0/com.ibm.rhp.overview.doc/topics/rhp_c_po_rr_product_overview.html
RR_2	Tool-Website	https://www.ibm.com/us-en/marketplace/rational-rhapsody/details#product-header-top
RR_3	Model Manager	https://jazz.net/products/rhapsody-model-manager
RR_4	Version 8 Releases	https://www-01.ibm.com/support/docview.wss?uid=swg27025023
Visual Paradigm:		
V_1	Tool-Website	https://www.visual-paradigm.com/
V_2	Editions & Features	https://www.visual-paradigm.com/editions/
V_3	Product Leaflet	https://cdn.visual-paradigm.com/about/leaflet.pdf

2. Gesamtaufstellung der Zuordnung von Features zu Anforderungen (Mapping)

Nr.	Anforderung	Uameo Systems Modeler	Capella	Enterprise Architect	Integrity Modeler	iQUAVIS	Rational Rhapsody	Visual Paradigm
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren			96				
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren	100	100	100	100		100	100
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren	101	101	101*	101*		101	
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren							102
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren	104	104	104	104		104	104
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren	105	105	105	105		105	105
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren	110		110	110	110	110	110
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren							111
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren	112		112	112		112	112
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren	115	115	115	115		115	115
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren	117						
1	Dateien und Informationen exportieren/ importieren	118	118	118	118		118	118
2	Änderungen und Anpassungen am vorhandenen Systemmodell vornehmen und nachverfolgen	187	187	187	187		187	187
2	Änderungen und Anpassungen am vorhandenen Systemmodell vornehmen und nachverfolgen	258		258	258		258	258
2	Änderungen und Anpassungen am vorhandenen Systemmodell vornehmen und nachverfolgen			221	221		221	221
3	Anforderungen, Funktionen und Systemelemente miteinander verknüpfen	280	280	280	280	280	280	280
3	Anforderungen, Funktionen und Systemelemente miteinander verknüpfen	452		452	452		452	452
3	Anforderungen, Funktionen und Systemelemente miteinander verknüpfen	301		301	301		301	301
3	Anforderungen, Funktionen und Systemelemente miteinander verknüpfen		302					
4	Blockdiagramme in Petri-Netze konvertieren	135*						
5	Schnittstellen zwischen Systemelementen modellieren		20					
5	Schnittstellen zwischen Systemelementen modellieren	21		21	21		21	21
5	Schnittstellen zwischen Systemelementen modellieren	22		22	22		22	22
6	den Systemkontext und die Systemgrenzen modellieren	4		4	4		4	4
6	den Systemkontext und die Systemgrenzen modellieren	7		7	7		7	7
6	den Systemkontext und die Systemgrenzen modellieren		12					
6	den Systemkontext und die Systemgrenzen modellieren					18		
7	unterschiedliche Views generieren	163**		163				163
7	unterschiedliche Views generieren	164	164	164	164		164	164
8	das System auf verschiedenen Detail- und Abstraktionslevels anzeigen	163**		163				163
8	das System auf verschiedenen Detail- und Abstraktionslevels anzeigen	164	164	164	164		164	164
8	das System auf verschiedenen Detail- und Abstraktionslevels anzeigen	293	293	293	293	293	293	293
8	das System auf verschiedenen Detail- und Abstraktionslevels anzeigen	37		37	37		37	37
8	das System auf verschiedenen Detail- und Abstraktionslevels anzeigen		38					
8	das System auf verschiedenen Detail- und Abstraktionslevels anzeigen		39*					
9	Handskizzen und 2D-Zeichnungselemente in Modellierungs-Diagramme aufnehmen	443**						
10	automatisiert Text und Diagramme für das Dokumentationsmanagement aus dem Systemmodell ausleiten				123			
10	automatisiert Text und Diagramme für das Dokumentationsmanagement aus dem Systemmodell ausleiten	120			120			120
11	das Systemmodell mit einer entwicklungsphasen- und domänenübergreifenden Datenbank verknüpfen			26	26			
11	das Systemmodell mit einer entwicklungsphasen- und domänenübergreifenden Datenbank verknüpfen	27*		27	27		27	27
11	das Systemmodell mit einer entwicklungsphasen- und domänenübergreifenden Datenbank verknüpfen			28				
12	unterschiedliche Zugriffsberechtigungen für Dateien und Informationen erteilen	240						
12	unterschiedliche Zugriffsberechtigungen für Dateien und Informationen erteilen			248	248		248*	248
13	bereits entwickelte Elemente und Informationen für neue Systeme wiederverwenden		65	65	65*	65	65*	65
13	bereits entwickelte Elemente und Informationen für neue Systeme wiederverwenden				67			
13	bereits entwickelte Elemente und Informationen für neue Systeme wiederverwenden	448*	448*	448*	448*		448*	
14	bereits entwickelte Modelle als Referenzen in einer Bibliothek archivieren	68	68	68*		planned		

15	Use Cases modellieren und daraus Anforderungen ableiten	42	42	42	42		42	42
15	Use Cases modellieren und daraus Anforderungen ableiten						272	
15	Use Cases modellieren und daraus Anforderungen ableiten							276
15	Use Cases modellieren und daraus Anforderungen ableiten			303				
16	Software aus dem Anforderungsmanagement (z.B. DOORS) integrieren oder verknüpfen	127*		127	127		127	
16	Software aus dem Anforderungsmanagement (z.B. DOORS) integrieren oder verknüpfen						136	
16	Software aus dem Anforderungsmanagement (z.B. DOORS) integrieren oder verknüpfen	258		258	258		258	258
16	Software aus dem Anforderungsmanagement (z.B. DOORS) integrieren oder verknüpfen		147					
17	das Systemmodell mit domänenspezifischen Entwicklungsmodellen (z.B. CAD-Modell oder Simulationsmodell) verknüpfen und synchronisieren	130*						130*
17	das Systemmodell mit domänenspezifischen Entwicklungsmodellen (z.B. CAD-Modell oder Simulationsmodell) verknüpfen und synchronisieren						138	
17	das Systemmodell mit domänenspezifischen Entwicklungsmodellen (z.B. CAD-Modell oder Simulationsmodell) verknüpfen und synchronisieren						139	
17	das Systemmodell mit domänenspezifischen Entwicklungsmodellen (z.B. CAD-Modell oder Simulationsmodell) verknüpfen und synchronisieren						141	
17	das Systemmodell mit domänenspezifischen Entwicklungsmodellen (z.B. CAD-Modell oder Simulationsmodell) verknüpfen und synchronisieren	446*						446*
17	das Systemmodell mit domänenspezifischen Entwicklungsmodellen (z.B. CAD-Modell oder Simulationsmodell) verknüpfen und synchronisieren	133		133*	133			133
17	das Systemmodell mit domänenspezifischen Entwicklungsmodellen (z.B. CAD-Modell oder Simulationsmodell) verknüpfen und synchronisieren	143			143			
17	das Systemmodell mit domänenspezifischen Entwicklungsmodellen (z.B. CAD-Modell oder Simulationsmodell) verknüpfen und synchronisieren						144	
18	aus einem Systemmodell einzelne Instanzen ableiten (i.S.v. Varianten des Systems)	142*	142*	142*	142*			142*
18	aus einem Systemmodell einzelne Instanzen ableiten (i.S.v. Varianten des Systems)						155	
18	aus einem Systemmodell einzelne Instanzen ableiten (i.S.v. Varianten des Systems)						156	
18	aus einem Systemmodell einzelne Instanzen ableiten (i.S.v. Varianten des Systems)						158	
19	automatisiert Vorgehenspläne für Test und Verifikation des Systems erstellen							
20	durch Simulationen das Systemverhalten testen und absichern	72		72	72		72	72
20	durch Simulationen das Systemverhalten testen und absichern	78		78	78		78	
20	durch Simulationen das Systemverhalten testen und absichern	449* **	449* **	449* **	449* **	449* **	449* **	449* **
20	durch Simulationen das Systemverhalten testen und absichern	83*			83*			
20	durch Simulationen das Systemverhalten testen und absichern	85*		85*	85*			85*
20	durch Simulationen das Systemverhalten testen und absichern						86*	
20	durch Simulationen das Systemverhalten testen und absichern	130*					130*	
20	durch Simulationen das Systemverhalten testen und absichern					450*		
20	durch Simulationen das Systemverhalten testen und absichern	446*						446*
21	eine eigene Simulations-Sicht generieren		167					
22	Bauteilkombinationen und Lösungsalternativen testen und absichern				278	278		
23	Auswirkung von Änderungen auf das System aufzeigen							274*
23	Auswirkung von Änderungen auf das System aufzeigen	385	385	385	385	385	385	385
24	die Integration von Subsystemen in das System testen und absichern	258		258	258		258	258
24	die Integration von Subsystemen in das System testen und absichern	261						
24	die Integration von Subsystemen in das System testen und absichern							373
24	die Integration von Subsystemen in das System testen und absichern	453		453	453		453	453
25	das Systemmodell auf Fehler, wie z.B. offene Verknüpfungen/ Inkonsistenzen, testen	231	231	231	231		231	231
26	verschiedene Systemzustände durch Parametervariationen simulieren	72		72	72		72	
26	verschiedene Systemzustände durch Parametervariationen simulieren	449* **	449* **	449* **	449* **	449* **	449* **	449* **
26	verschiedene Systemzustände durch Parametervariationen simulieren	77		77				
26	verschiedene Systemzustände durch Parametervariationen simulieren			79				
26	verschiedene Systemzustände durch Parametervariationen simulieren	83*			83*			
26	verschiedene Systemzustände durch Parametervariationen simulieren	85*		85*	85*		85*	
26	verschiedene Systemzustände durch Parametervariationen simulieren						86*	
26	verschiedene Systemzustände durch Parametervariationen simulieren	130*					130*	
26	verschiedene Systemzustände durch Parametervariationen simulieren	446*					446*	

27	Kunden- und Systemnutzerfunktionen virtuell simulieren und absichern	74						
27	Kunden- und Systemnutzerfunktionen virtuell simulieren und absichern	449**	449**	449**	449**	449**	449**	
27	Kunden- und Systemnutzerfunktionen virtuell simulieren und absichern	72		72	72		72	
28	der Umfang und Aufwand der Modellierung reduzierbar und anpassbar sein	316			316			
29	auch Bilder in die verschiedenen Diagramme des Modells aufgenommen werden können	318		318			318	
45	Schulung für Methoden und Tool bieten	425	425	425	425	425	425	425
46	Scripting/Add-Ons ermöglichen			161				
46	Scripting/Add-Ons ermöglichen				209			
49	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)						183	
49	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)	205	205	205	205			205
49	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)	360					360	360
49	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)		362					
49	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)			363		363		363
49	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)			364				
49	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)				366			
49	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)					367		
49	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)						369	
49	Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)							370
30	Anforderungen modellieren	257	257	257	257	257	257	257
	basierend auf Text statt Diagrammen arbeiten							
31	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten	205	205	205	205			205
31	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten	316			316			
31	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten	425	425	425	425	425	425	425
31	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten	359	359	359	359	359	359	359
31	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten	395	395	395	395	395	395	395
31	Bedienung/ Anwendbarkeit/ Erlernbarkeit gewährleisten		12					
32	Code Generierung	49		49	49		49	49
32	Code Generierung	50		50	50		50	50
32	Code Generierung	51		51	51		51	51
32	Code Generierung			52				
32	Code Generierung			53				
32	Code Generierung			54				54
32	Code Generierung				55			
32	Code Generierung			56			56	
32	Code Generierung	59		59				
32	Code Generierung		60*					
32	Code Generierung							63
33	definierte Profile/ Layer/ Oberfläche anbieten	178		178	178	178		
33	definierte Profile/ Layer/ Oberfläche anbieten			179	179		179	
33	definierte Profile/ Layer/ Oberfläche anbieten				180			
33	definierte Profile/ Layer/ Oberfläche anbieten				181			
33	definierte Profile/ Layer/ Oberfläche anbieten					182		
33	definierte Profile/ Layer/ Oberfläche anbieten						183	
33	definierte Profile/ Layer/ Oberfläche anbieten						184	
	dynamische Modellierung und die zugehörige Ausführung von Modellen (executableStateCharts)	78		78	78		78	
34	funktionale Sicherheit abbilden (FMEA, CAN-Bus, AUTOSAR, FTA, ...)	378**		378	378*	378	378	
34	funktionale Sicherheit abbilden (FMEA, CAN-Bus, AUTOSAR, FTA, ...)	379			379			
34	funktionale Sicherheit abbilden (FMEA, CAN-Bus, AUTOSAR, FTA, ...)			381	381*		381	

35	holistischen, homogenen Toolansatz bieten (z.B. von Reqs bis V&V; z.B. von Reqs bis BOM)			153	153		153	
	Innovationen fördern							
36	Integration & Test durchführen	258		258	258		258	258
36	Integration & Test durchführen	261						
36	Integration & Test durchführen	453		453	453		453	453
36	Integration & Test durchführen		372	372	372*		372	
36	Integration & Test durchführen						373	
37	Integration in (best.) Unt.-Toolkette gewährleisten	126*	126*	126*	126*	126*	126*	126*
37	Integration in (best.) Unt.-Toolkette gewährleisten	149		149	149		149	
37	Integration in (best.) Unt.-Toolkette gewährleisten	112		112	112		112	112
38	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/Export) über Schnittstellen zu anderen Tools (z.B. XMI, OSLC)	126*	126*	126*	126*	126*	126*	126*
38	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/Export) über Schnittstellen zu anderen Tools (z.B. XMI, OSLC)	149		149	149		149	
38	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/Export) über Schnittstellen zu anderen Tools (z.B. XMI, OSLC)	112		112	112		112	112
38	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/Export) über Schnittstellen zu anderen Tools (z.B. XMI, OSLC)	110		110	110	110	110	110
38	Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/Export) über Schnittstellen zu anderen Tools (z.B. XMI, OSLC)	101	101	101*	101*		101	
39	Kollaboration/ multi user Fähigkeit (standortübergreifend, schnell)	238	238	238	238	238	238	238
	Kommunikation unterstützen							313
	Kommunikation unterstützen							314
40	Konfigurations-/ Änderungs-/ Versionsmanagement ermöglichen (z.B. Baselines)			221	221		221	221
41	Model Review unterstützen	231	231	231	231		231	231
42	Modell(element)verknüpfung / Datenaustausch der Modelle untereinander				282			
42	Modell(element)verknüpfung / Datenaustausch der Modelle untereinander	280	280	280	280	280	280	280
42	Modell(element)verknüpfung / Datenaustausch der Modelle untereinander	301		301	301		301	301
42	Modell(element)verknüpfung / Datenaustausch der Modelle untereinander		302					
43	Modelviewer anbieten	173		173	173			173
44	Prozesse/ Methoden/ Workflows umsetzen oder unterstützen	329	329	329	329*	329	329	329
	sehr komplexes Systemverhalten abbilden							
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen	4		4	4		4	4
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen	7		7	7		7	7
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen	14		14				14
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen	17		17*	17		17*	
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen			199			199	
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen			200	200*		200	
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen				201			
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen		202					
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen		447					
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen				330*			
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen	333		333				333
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen						334*	
	Standardkonformität gewährleisten/ Umsetzung von standardisierten Prozessen	336**						
	SysML verwenden	7		7	7		7	7
	V&V unterstützen	453		453	453		453	453
	V&V unterstützen		372	372	372*		372	
	V&V unterstützen						373	
	V&V unterstützen	261						
47	Vendor Support gewährleisten	425	425	425	425	425	425	425
48	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige Kosten	400		400	400		400	400
48	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige Kosten	401						
48	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige Kosten	403			403	403	403	
48	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige Kosten			404			404	404
48	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige Kosten			405			405	405
48	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige Kosten			406			406	406
48	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige Kosten			407			407	407
48	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige Kosten	408		408	408			
48	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige Kosten	424		424	424		424	424
48	Wirtschaftlichkeit gewährleisten/ Lizenzmanagement/ niedrige Kosten		409					

** PlugIn, * AddOn

B.6 Exemplarische Frameworks für die Quasi-Archetypen

Quasi-Archetypen	Anforderungen	Features/ Eigenschaften	Detail-Features	Tools	
1 Defense & Aerospace, sehr großes Unternehmen, international verteilte Standorte, kundenspezifische Auftragsentwicklung	T2 Adaption an Kundenanforderungen ermöglichen (Customizing, Scaling, Extendability, API)	205 GUI anpassen	206 customize shortcuts or toolbars 211 colors, formats: display properties 212 colors, formats: diagram legend 218 colors, formats: spacing, alignment, centering symbols 219 colors, formats: diagram layout engine with nine layout options	Cameo Systems Modeler	
		360 offene API			
		205 GUI anpassen	213 colors, formats: customize the graphical rendering of elements in a diagram 217 colors, formats: consistent colour scheme	Capella	
		362 API für die Entwicklung von Standpunkten (Viewpoints)			
		205 GUI anpassen	207 extend the user interface by adding new menus, sub menus, windows 214 colors, formats: themes: change the color, font, gradient, line thickness and background image (tile) 215 colors, formats: visual styles like Office 2016	Enterprise Architect	
		363 create or modify modeling language			
		364 create new elements and connectors you want to use in modeling (extends UML notation)			
		205 GUI anpassen	208 adapt user interfaces to specific domain and project needs 209 use scripting to modify virtually every aspect of the user interface 210 apply your organization's styles and templates.	Integrity Modeler	
		366 change diagram stereotypes like from english block to german Strukturblock			
	T19 Interoperabilität (Daten-/Modellaustausch, Import/Export) über Schnittstellen zu anderen Tools	363 create or modify modeling language			iQUAVIS
		367 Users need to design operational rules in detail (how to utilize the tool)			
		183 creation of custom profiles for the development of domain-specific languages (DSL)			Rational Rhapsody
		360 offene API			
		369 Profiles, settings, stereotypes, tags, and APIs with which you can extend and configure the product			
		205 GUI anpassen	216 colors, formats: Create the right type of shapes, color legend		Visual Paradigm
		360 offene API			
		363 create or modify modeling language			
		370 User-defined requirement types			
		126 Interoperabilität zu anderen Tools	127* Interoperabilität zu: IBM Rational DOORS 133 Interoperabilität zu: MATLAB/Simulink 143 Interoperabilität zu: ParaMagic 446 Interoperabilität zu: Model Center (MBSEpak) 130 Syndea AddOn (Interfax) für CAD-Tools (NX, Creo), PLM (TeamCenter, Windchill), Simulation (Matlab/Simulink), ALM, Reqs Mgmt 129* Interoperabilität zu: IBM Rational Software Architect (RSA), IBM Rational Software Modeler (RSM) 137* Interoperabilität zu: PTC Windchill 140* Interoperabilität zu: Siemens PLM Teamcenter 142 Interoperabilität zu: pure:variants 132* Interoperabilität zu: IBM Rational Rhapsody 134* Interoperabilität zu: Vitech CORE 135* Interoperabilität zu: Petri-nets	Cameo Systems Modeler	
149 unterstützt OSLC					
112 unterstützt XMI					
110 unterstützt Import und Export von XML					
101 unterstützt Import von ReqIF					
	126 Interoperabilität zu anderen Tools	142 Interoperabilität zu: pure:variants 147 Capella enables the integration and interoperability with third-party engineering tools: requirements engineering, product-lines, simulation, UML tools, etc.	Capella		
101 unterstützt Import von ReqIF					
	126 Interoperabilität zu anderen Tools	127 Interoperabilität zu: IBM Rational DOORS 445 Interoperabilität zu: JAMA 133* Interoperabilität zu: MATLAB/Simulink 140 Interoperabilität zu: Siemens PLM Teamcenter 142 Interoperabilität zu: pure:variants	Enterprise Architect		
149 unterstützt OSLC					
112 unterstützt XMI					
110 unterstützt Import und Export von XML					
101* unterstützt Import von ReqIF					
	126 Interoperabilität zu anderen Tools	127 Interoperabilität zu: IBM Rational DOORS 136 Interoperabilität zu: Integrity Lifecycle Manager 133 Interoperabilität zu: MATLAB/Simulink 143 Interoperabilität zu: ParaMagic 450 Interoperabilität zu: Integrity Modeler SySim 137 Interoperabilität zu: PTC Windchill 142 Interoperabilität zu: pure:variants 138 Interoperabilität zu: PTC Creo (CAD) 139 Interoperabilität zu: PTC Mathcad	Integrity Modeler		
149 unterstützt OSLC					
112 unterstützt XMI					
110 unterstützt Import und Export von XML					
101* unterstützt Import von ReqIF					
144 Interoperabilität zu: OpenModelica			iQUAVIS		
110 unterstützt Import und Export von XML					
	126 Interoperabilität zu anderen Tools	127 Interoperabilität zu: IBM Rational DOORS 133 Interoperabilität zu: MATLAB/Simulink 446 Interoperabilität zu: Model Center (MBSEpak) 130 Syndea AddOn (Interfax) für CAD-Tools (NX, Creo), PLM (TeamCenter, Windchill), Simulation (Matlab/Simulink), ALM, Reqs Mgmt 145 Interoperabilität zu: IBM Rational Rhapsody Design Manager 142 Interoperabilität zu: pure:variants	Rational Rhapsody		
149 unterstützt OSLC					
112 unterstützt XMI					
110 unterstützt Import und Export von XML					
101 unterstützt Import von ReqIF					
129 Interoperabilität zu: IBM Rational Software Architect (RSA), IBM Rational Software Modeler (RSM)			Visual Paradigm		
112 unterstützt XMI					
110 unterstützt Import und Export von XML					

Quasi-Archetypen	Anforderungen	Features/ Eigenschaften	Detail-Features	Tools																																																																	
2 Anlagen-/ Sonder-/ Maschinenbau, kleines Unternehmen, relativ niedriger Umsatz, "gemischter" Entwicklungsanlass	T39 Wirtschaftlichkeit/ Lizenzmanagement/ niedrige (Lizenz-) Kosten	<table border="1"> <tr><td>400 Floating-Lizenzen möglich</td><td></td></tr> <tr><td>401 Mobile Lizenzen möglich</td><td></td></tr> <tr><td>424 Testversion (kostenfrei)</td><td></td></tr> <tr><td>403 Individual-Preis auf Anfrage</td><td></td></tr> <tr><td>408 Model Reader/ Viewer</td><td></td></tr> <tr><td>409 Open Source</td><td></td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>400 Floating-Lizenzen möglich</td><td></td></tr> <tr><td>424 Testversion (kostenfrei)</td><td></td></tr> <tr><td>404 High-End Variante, Floating-Lizenz: 809,00</td><td></td></tr> <tr><td>405 High-End Variante, Basis-Lizenz: 665,00</td><td></td></tr> <tr><td>406 Low-End Variante, Floating-Lizenz: 319,00</td><td></td></tr> <tr><td>407 Low-End Variante, Basis-Lizenz: 129,00</td><td></td></tr> <tr><td>408 Model Reader/ Viewer</td><td></td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>400 Floating-Lizenzen möglich</td><td></td></tr> <tr><td>424 Testversion (kostenfrei)</td><td></td></tr> <tr><td>403 Individual-Preis auf Anfrage</td><td></td></tr> <tr><td>408 Model Reader/ Viewer</td><td></td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>403 Individual-Preis auf Anfrage</td><td></td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>400 Floating-Lizenzen möglich</td><td></td></tr> <tr><td>424 Testversion (kostenfrei)</td><td></td></tr> <tr><td>403 Individual-Preis auf Anfrage</td><td></td></tr> <tr><td>404 High-End Variante, Floating-Lizenz: ab \$1660</td><td></td></tr> <tr><td>405 High-End Variante, Basis-Lizenz: ab \$739</td><td></td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>400 Floating-Lizenzen möglich</td><td></td></tr> <tr><td>424 Testversion (kostenfrei)</td><td></td></tr> <tr><td>404 High-End Variante, Floating-Lizenz: \$2599</td><td></td></tr> <tr><td>405 High-End Variante, Basis-Lizenz: \$1999</td><td></td></tr> <tr><td>406 Low-End Variante, Floating-Lizenz: \$129</td><td></td></tr> <tr><td>407 Low-End Variante, Basis-Lizenz: \$99</td><td></td></tr> </table>	400 Floating-Lizenzen möglich		401 Mobile Lizenzen möglich		424 Testversion (kostenfrei)		403 Individual-Preis auf Anfrage		408 Model Reader/ Viewer		409 Open Source		400 Floating-Lizenzen möglich		424 Testversion (kostenfrei)		404 High-End Variante, Floating-Lizenz: 809,00		405 High-End Variante, Basis-Lizenz: 665,00		406 Low-End Variante, Floating-Lizenz: 319,00		407 Low-End Variante, Basis-Lizenz: 129,00		408 Model Reader/ Viewer		400 Floating-Lizenzen möglich		424 Testversion (kostenfrei)		403 Individual-Preis auf Anfrage		408 Model Reader/ Viewer		403 Individual-Preis auf Anfrage		400 Floating-Lizenzen möglich		424 Testversion (kostenfrei)		403 Individual-Preis auf Anfrage		404 High-End Variante, Floating-Lizenz: ab \$1660		405 High-End Variante, Basis-Lizenz: ab \$739		400 Floating-Lizenzen möglich		424 Testversion (kostenfrei)		404 High-End Variante, Floating-Lizenz: \$2599		405 High-End Variante, Basis-Lizenz: \$1999		406 Low-End Variante, Floating-Lizenz: \$129		407 Low-End Variante, Basis-Lizenz: \$99			<table border="1"> <tr><td>Cameo Systems Modeler</td></tr> <tr><td>Capella</td></tr> <tr><td>Enterprise Architect</td></tr> <tr><td>Integrity Modeler</td></tr> <tr><td>iQUAVIS</td></tr> <tr><td>Rational Rhapsody</td></tr> <tr><td>Visual Paradigm</td></tr> </table>	Cameo Systems Modeler	Capella	Enterprise Architect	Integrity Modeler	iQUAVIS	Rational Rhapsody	Visual Paradigm
400 Floating-Lizenzen möglich																																																																					
401 Mobile Lizenzen möglich																																																																					
424 Testversion (kostenfrei)																																																																					
403 Individual-Preis auf Anfrage																																																																					
408 Model Reader/ Viewer																																																																					
409 Open Source																																																																					
400 Floating-Lizenzen möglich																																																																					
424 Testversion (kostenfrei)																																																																					
404 High-End Variante, Floating-Lizenz: 809,00																																																																					
405 High-End Variante, Basis-Lizenz: 665,00																																																																					
406 Low-End Variante, Floating-Lizenz: 319,00																																																																					
407 Low-End Variante, Basis-Lizenz: 129,00																																																																					
408 Model Reader/ Viewer																																																																					
400 Floating-Lizenzen möglich																																																																					
424 Testversion (kostenfrei)																																																																					
403 Individual-Preis auf Anfrage																																																																					
408 Model Reader/ Viewer																																																																					
403 Individual-Preis auf Anfrage																																																																					
400 Floating-Lizenzen möglich																																																																					
424 Testversion (kostenfrei)																																																																					
403 Individual-Preis auf Anfrage																																																																					
404 High-End Variante, Floating-Lizenz: ab \$1660																																																																					
405 High-End Variante, Basis-Lizenz: ab \$739																																																																					
400 Floating-Lizenzen möglich																																																																					
424 Testversion (kostenfrei)																																																																					
404 High-End Variante, Floating-Lizenz: \$2599																																																																					
405 High-End Variante, Basis-Lizenz: \$1999																																																																					
406 Low-End Variante, Floating-Lizenz: \$129																																																																					
407 Low-End Variante, Basis-Lizenz: \$99																																																																					
Cameo Systems Modeler																																																																					
Capella																																																																					
Enterprise Architect																																																																					
Integrity Modeler																																																																					
iQUAVIS																																																																					
Rational Rhapsody																																																																					
Visual Paradigm																																																																					

Quasi-Archetypen	Anforderungen	Features/ Eigenschaften	Detail-Features	Tools
3 Automobilbranche, sehr großes Unternehmen, international verteilte Standorte	T19 Interoperabilität (Daten-/ Modellaustausch, Import/ Export) über Schnittstellen zu anderen Tools		analog zu T19 von Quasi-Archetyp 1	

Quasi-Archetypen	Anforderungen	Features/ Eigenschaften	Detail-Features	Tools																											
4 Bahnindustrie/ Schienenverkehr, international verteilte Standorte	T8 Bedienung/ Anwendbarkeit/	<table border="1"> <tr><td>205 GUI anpassen</td><td></td></tr> <tr><td>316 Komplexität bei Modellierung reduzierbar (z.B. SysML-Lite)</td><td></td></tr> <tr><td>425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)</td><td></td></tr> <tr><td>360 offene API</td><td></td></tr> <tr><td>395 OS/ Betriebssysteme</td><td></td></tr> </table>	205 GUI anpassen		316 Komplexität bei Modellierung reduzierbar (z.B. SysML-Lite)		425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)		360 offene API		395 OS/ Betriebssysteme		<table border="1"> <tr><td>206 customize shortcuts or toolbars</td><td></td></tr> <tr><td>211 colors, formats: display properties</td><td></td></tr> <tr><td>212 colors, formats: diagram legend</td><td></td></tr> <tr><td>218 colors, formats: spacing, alignment, centering symbols</td><td></td></tr> <tr><td>219 colors, formats: diagram layout engine with nine layout options</td><td></td></tr> <tr><td>396 Mac OS X</td><td></td></tr> <tr><td>397 Windows</td><td></td></tr> <tr><td>398 Linux</td><td></td></tr> </table>	206 customize shortcuts or toolbars		211 colors, formats: display properties		212 colors, formats: diagram legend		218 colors, formats: spacing, alignment, centering symbols		219 colors, formats: diagram layout engine with nine layout options		396 Mac OS X		397 Windows		398 Linux		<table border="1"> <tr><td>Cameo Systems Modeler</td></tr> </table>	Cameo Systems Modeler
205 GUI anpassen																															
316 Komplexität bei Modellierung reduzierbar (z.B. SysML-Lite)																															
425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)																															
360 offene API																															
395 OS/ Betriebssysteme																															
206 customize shortcuts or toolbars																															
211 colors, formats: display properties																															
212 colors, formats: diagram legend																															
218 colors, formats: spacing, alignment, centering symbols																															
219 colors, formats: diagram layout engine with nine layout options																															
396 Mac OS X																															
397 Windows																															
398 Linux																															
Cameo Systems Modeler																															
5 Bahnindustrie/ Schienenverkehr, mittelgroßer Umsatz, international verteilte Standorte, kundenspezifische Auftragsentwicklung		<table border="1"> <tr><td>205 GUI anpassen</td><td></td></tr> <tr><td>12 Weniger komplexe Modellierungssprache</td><td></td></tr> <tr><td>425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)</td><td></td></tr> <tr><td>362 API for viewpoint development</td><td></td></tr> <tr><td>395 OS/ Betriebssysteme</td><td></td></tr> </table>	205 GUI anpassen		12 Weniger komplexe Modellierungssprache		425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)		362 API for viewpoint development		395 OS/ Betriebssysteme		<table border="1"> <tr><td>213 colors, formats: customize the graphical rendering of elements in a diagram</td><td></td></tr> <tr><td>217 colors, formats: consistent colour scheme</td><td></td></tr> <tr><td>396 Mac OS X</td><td></td></tr> <tr><td>397 Windows</td><td></td></tr> <tr><td>398 Linux</td><td></td></tr> </table>	213 colors, formats: customize the graphical rendering of elements in a diagram		217 colors, formats: consistent colour scheme		396 Mac OS X		397 Windows		398 Linux		<table border="1"> <tr><td>Capella</td></tr> </table>	Capella						
205 GUI anpassen																															
12 Weniger komplexe Modellierungssprache																															
425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)																															
362 API for viewpoint development																															
395 OS/ Betriebssysteme																															
213 colors, formats: customize the graphical rendering of elements in a diagram																															
217 colors, formats: consistent colour scheme																															
396 Mac OS X																															
397 Windows																															
398 Linux																															
Capella																															
6 Bahnindustrie/ Schienenverkehr, international verteilte Standorte, "gemischter" Entwicklungsanlass		<table border="1"> <tr><td>205 GUI anpassen</td><td></td></tr> <tr><td>425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)</td><td></td></tr> <tr><td>363 create or modify modeling language</td><td></td></tr> <tr><td>364 create new elements and connectors you want to use in modeling (extends UML notation)</td><td></td></tr> <tr><td>395 OS/ Betriebssysteme</td><td></td></tr> </table>	205 GUI anpassen		425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)		363 create or modify modeling language		364 create new elements and connectors you want to use in modeling (extends UML notation)		395 OS/ Betriebssysteme		<table border="1"> <tr><td>207 extend the user interface by adding new menus, sub menus, windows</td><td></td></tr> <tr><td>214 colors, formats: themes: change the color, font, gradient, line thickness and background image (tile)</td><td></td></tr> <tr><td>215 colors, formats: visual styles like Office 2016</td><td></td></tr> <tr><td>396 Mac OS X</td><td></td></tr> <tr><td>397 Windows</td><td></td></tr> <tr><td>398 Linux</td><td></td></tr> </table>	207 extend the user interface by adding new menus, sub menus, windows		214 colors, formats: themes: change the color, font, gradient, line thickness and background image (tile)		215 colors, formats: visual styles like Office 2016		396 Mac OS X		397 Windows		398 Linux		<table border="1"> <tr><td>Enterprise Architect</td></tr> </table>	Enterprise Architect				
205 GUI anpassen																															
425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)																															
363 create or modify modeling language																															
364 create new elements and connectors you want to use in modeling (extends UML notation)																															
395 OS/ Betriebssysteme																															
207 extend the user interface by adding new menus, sub menus, windows																															
214 colors, formats: themes: change the color, font, gradient, line thickness and background image (tile)																															
215 colors, formats: visual styles like Office 2016																															
396 Mac OS X																															
397 Windows																															
398 Linux																															
Enterprise Architect																															
7 Mischkonzern, international verteilte Standorte, "gemischter" Entwicklungsanlass		<table border="1"> <tr><td>205 GUI anpassen</td><td></td></tr> <tr><td>316 Komplexität bei Modellierung reduzierbar (z.B. SysML-Lite)</td><td></td></tr> <tr><td>425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)</td><td></td></tr> <tr><td>366 change diagram stereotypes like from english block to german Strukturblock</td><td></td></tr> <tr><td>395 OS/ Betriebssysteme</td><td></td></tr> </table>	205 GUI anpassen		316 Komplexität bei Modellierung reduzierbar (z.B. SysML-Lite)		425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)		366 change diagram stereotypes like from english block to german Strukturblock		395 OS/ Betriebssysteme		<table border="1"> <tr><td>208 adapt user interfaces to specific domain and project needs</td><td></td></tr> <tr><td>209 use scripting to modify virtually every aspect of the user interface</td><td></td></tr> <tr><td>210 apply your organization's styles and templates.</td><td></td></tr> <tr><td>397 Windows</td><td></td></tr> </table>	208 adapt user interfaces to specific domain and project needs		209 use scripting to modify virtually every aspect of the user interface		210 apply your organization's styles and templates.		397 Windows		<table border="1"> <tr><td>Integrity Modeler</td></tr> </table>	Integrity Modeler								
205 GUI anpassen																															
316 Komplexität bei Modellierung reduzierbar (z.B. SysML-Lite)																															
425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)																															
366 change diagram stereotypes like from english block to german Strukturblock																															
395 OS/ Betriebssysteme																															
208 adapt user interfaces to specific domain and project needs																															
209 use scripting to modify virtually every aspect of the user interface																															
210 apply your organization's styles and templates.																															
397 Windows																															
Integrity Modeler																															
		<table border="1"> <tr><td>425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)</td><td></td></tr> <tr><td>363 create or modify modeling language</td><td></td></tr> <tr><td>367 Users need to design operational rules in detail (how to utilize the tool)</td><td></td></tr> <tr><td>395 OS/ Betriebssysteme</td><td></td></tr> </table>	425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)		363 create or modify modeling language		367 Users need to design operational rules in detail (how to utilize the tool)		395 OS/ Betriebssysteme		<table border="1"> <tr><td>397 Windows</td><td></td></tr> </table>	397 Windows		<table border="1"> <tr><td>iQUAVIS</td></tr> </table>	iQUAVIS																
425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)																															
363 create or modify modeling language																															
367 Users need to design operational rules in detail (how to utilize the tool)																															
395 OS/ Betriebssysteme																															
397 Windows																															
iQUAVIS																															
		<table border="1"> <tr><td>425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)</td><td></td></tr> <tr><td>360 offene API</td><td></td></tr> <tr><td>183 creation of custom profiles for the development of domain-specific languages (DSL)</td><td></td></tr> <tr><td>369 Profiles, settings, stereotypes, tags, and APIs with which you can extend and configure the product</td><td></td></tr> <tr><td>395 OS/ Betriebssysteme</td><td></td></tr> </table>	425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)		360 offene API		183 creation of custom profiles for the development of domain-specific languages (DSL)		369 Profiles, settings, stereotypes, tags, and APIs with which you can extend and configure the product		395 OS/ Betriebssysteme		<table border="1"> <tr><td>397 Windows</td><td></td></tr> <tr><td>398 Linux</td><td></td></tr> </table>	397 Windows		398 Linux		<table border="1"> <tr><td>Rational Rhapsody</td></tr> </table>	Rational Rhapsody												
425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)																															
360 offene API																															
183 creation of custom profiles for the development of domain-specific languages (DSL)																															
369 Profiles, settings, stereotypes, tags, and APIs with which you can extend and configure the product																															
395 OS/ Betriebssysteme																															
397 Windows																															
398 Linux																															
Rational Rhapsody																															
		<table border="1"> <tr><td>205 GUI anpassen</td><td></td></tr> <tr><td>425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)</td><td></td></tr> <tr><td>360 offene API</td><td></td></tr> <tr><td>363 create or modify modeling language</td><td></td></tr> <tr><td>395 OS/ Betriebssysteme</td><td></td></tr> </table>	205 GUI anpassen		425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)		360 offene API		363 create or modify modeling language		395 OS/ Betriebssysteme		<table border="1"> <tr><td>216 colors, formats: Create the right type of shapes, color legend</td><td></td></tr> <tr><td>396 Mac OS X</td><td></td></tr> <tr><td>397 Windows</td><td></td></tr> <tr><td>398 Linux</td><td></td></tr> </table>	216 colors, formats: Create the right type of shapes, color legend		396 Mac OS X		397 Windows		398 Linux		<table border="1"> <tr><td>Visual Paradigm</td></tr> </table>	Visual Paradigm								
205 GUI anpassen																															
425 Service und Support des Herstellers sind gewährleistet (Training, Consulting, User Guide, Community Forum, ...)																															
360 offene API																															
363 create or modify modeling language																															
395 OS/ Betriebssysteme																															
216 colors, formats: Create the right type of shapes, color legend																															
396 Mac OS X																															
397 Windows																															
398 Linux																															
Visual Paradigm																															

B.7 Digitaler Anhang

- 📁 01_Ausarbeitung
 - 📁 01_Abbildungen
- 📁 02_Literatur
- 📁 03_Rohdaten Interviews
 - 📁 01_Protokolle und Fragebögen
 - 📁 02_Templates
- 📁 04_Gesamt-Feature-Liste