

Constantin Mandel

**Entwicklung einer Model-Based Systems
Engineering Methodik zur Unterstützung der
Validierung im Produktentstehungsprozess**

Development of a Model-Based Systems
Engineering Methodology to support Validation in
Product Engineering

Band 175

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Forschungsberichte



Constantin Mandel

**Entwicklung einer Model-Based Systems Engineering
Methodik zur Unterstützung der Validierung im
Produktentstehungsprozess**

Development of a Model-Based Systems Engineering
Methodology to Support Validation in Product Engineering

Band 175

Herausgeber Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2024
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

Entwicklung einer Model-Based Systems Engineering Methodik zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Constantin Mandel

Tag der mündlichen Prüfung:	17.05.2024
Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
Korreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Husung

Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 175

Die Produktentstehung des 21. Jahrhunderts ist gekennzeichnet durch eine zunehmende Verschmelzung der Lösungen aus dem Maschinenbau, der Elektrotechnik und Informatik zu komplexen und sehr leistungsfähigen adaptiven technischen Systemen und Produkten bis hin zu sogenannten Cyber-Physischen-Systemen – CPS, die durch eine Vernetzung untereinander und mit dem Internet gekennzeichnet sind. Dieser generelle Trend zur Mechatronisierung gilt sowohl im klassischen Maschinen- und Anlagenbau als auch im Bereich der Energietechnik und des Fahrzeugbaus. Allenthalben werden sowohl in der strategischen Produktplanung als auch in der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung ganz neue Herausforderungen an die Interaktion und Zusammenarbeit auf interdisziplinärer domänen- und fachgebietsübergreifender Weise gestellt. Diese Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen ist dabei sowohl bei der Produktsynthese als auch bei der Produktvalidierung eine große Herausforderung, haben sich doch in den einzelnen Disziplinen sehr wirkmächtige und erfolgreiche Vorgehensweisen, Prozesse, Methoden und Vorgehensmodelle etabliert, die nun allerdings zur Hebung der Synergiepotentiale in einer ganz neuen Weise der Zusammenarbeit auf einer interdisziplinären Ebene verknüpft werden müssen. Nur so können attraktive, sichere, leistungsfähige und umweltgerechte Produktlösungen und technische Systeme in einem integrierten Syntheseprozess erstellt werden. Die Herausforderung, die sich aus den unterschiedlichen, sehr leistungsfähigen und etablierten Vorgehensweisen in den Disziplinen für die Zusammenarbeit ergibt, ist dabei allerdings evident, da eine gemeinsame übergreifende Kommunikationsplattform bis heute nicht etabliert ist. Mit den Konzepten des Advanced Systems Engineering haben ALBERS und GAUSEMEIER bereits vor mehr als zehn Jahren hier erste Hinweise gegeben, wie durch Nutzung der Ansätze der Systemtheorie neue Zusammenarbeitsformen erarbeitet werden können. Dabei geht es nicht darum, die sehr leistungsfähigen, disziplinentorientierten Ansätze und Vorgehensweisen zu ersetzen, sondern diese sollen durch entsprechende, die Vernetzung modellierende und gestaltende Methoden und Prozesse ergänzt werden. Ein wichtiger Ansatz ist in diesem Kontext das sogenannte Model-Based Systems Engineering, das als eine grundlegende Vorgehensweise zur Modellierung von interdisziplinären Informations- und Synthese-, sowie Validierungsprozessen angesehen werden kann. Diese, auf der Basis der Systemtheorie des Systems Engineering abgeleiteten Ansätze und Konzepte haben allerdings bisher noch nicht die eigentlich notwendige, große Verbreitung erreicht. Die Nutzung erfordert ein Umdenken der Produktentwickelnden und Systemgestaltenden auf allen Ebenen, um diese ergänzenden Potentiale und Möglichkeiten zu nutzen. Neben der Produktsynthese ist die Produktvalidierung eine ganz zentrale Herausforderung, insbesondere bei den zunehmend komplexer werdenden Produkten und Systemen. Die Validierung eines autonom fahrenden Fahrzeuges stellt Herausforderungen, die bis heute nicht wirklich gelöst sind, da es nahezu unmöglich ist, alle Eventualfälle in einem komplexen Verkehrssystem bereits im Vorfeld in der

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Entwicklung zu berücksichtigen. Auch hier bietet sich unter dem Stichwort szenarienbasierte Entwicklung ein Ansatz auf Basis der Systemtheorie an. Die Validierung komplexer mechatronischer Systeme stellt eine große Herausforderung dar und hier müssen neue Lösungsansätze gefunden werden, um Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung des 21. Jahrhunderts sicher, effizient und nachvollziehbar zu machen. Ein zentraler Ansatz der das Advanced System Engineering in der Modellierung auf ein neues Level bringen kann ist das Modell der System-Generations-Entwicklung – SGE nach ALBERS. In Kombination mit dem MBSE als Werkzeug ergeben sich bisher nicht mögliche Lösungen. An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Constantin Mandel an. Er hat in seiner Arbeit eine neue Methodik zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess auf der Basis des Model-Based Systems Engineering und des Modells der SGE erforscht und gestaltet. Die Arbeit leistet einen wichtigen Beitrag zur Grundlagenforschung im Bereich der Produktentwicklung und liefert dazu auch klare Ansätze und Konzepte für die Herausforderungen in den Unternehmen.

August, 2024

Albert Albers

Kurzfassung

Die Validierung nimmt eine zentrale Bedeutung in der Produktentstehung ein. Durch Validierung wird nicht nur der Erfolg eines Produkts am Markt gewährleistet. Es entsteht zudem Wissen, um die an das Produkt gestellten Erwartungen und Ziele über den Produktentstehungsprozess zu erweitern und zu konkretisieren. Validierung muss dabei kontinuierlich, durchgängig und nachvollziehbar im Produktentstehungsprozess erfolgen. Die steigende Komplexität und Interdisziplinarität in der Entwicklung heutiger und zukünftiger Systeme, beispielsweise für das automatisierte Fahren, bringt hierbei jedoch neue Herausforderungen. Um den Umgang mit dieser steigenden Komplexität und Interdisziplinarität zu unterstützen, wird in einer Initiative durch Partner aus Industrie und Forschung sowie der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, ein neuer ganzheitlicher Ansatz für die Produktentstehung, das Advanced Systems Engineering (ASE), erforscht und vorangetrieben. ASE zielt dabei vor allem auch auf die Unterstützung der Validierung. Insbesondere Model-Based Systems Engineering (MBSE), der Übergang von einer dokumentenzentrierten hin zu einer modellbasierten Arbeitsweise, wird hierbei als zentraler Ansatz gesehen. Hinsichtlich des Einsatzes von MBSE zur methodischen Unterstützung der Validierung zeigen sich jedoch zwei zentrale Herausforderungen. Einerseits unterstützen bestehende MBSE-Ansätze die Validierung bislang nicht ausreichend. Andererseits mangelt es MBSE-Ansätzen an Akzeptanz in der (industriellen) Anwendung.

In dieser Arbeit wird eine ganzheitliche MBSE-Methodik zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess entwickelt. Diese baut auf dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers auf und umfasst vier Kernbestandteile. Zunächst eine Modellierungssprache, welche im Stand der Forschung und in der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung, verwendete Begriffe zur Beschreibung der Validierung sowie deren Beziehungen konsolidiert. Zweitens eine Modellierungsmethode, aufbauend auf dem IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz, um die Synthese und Analyse von Systemmodellen zu unterstützen. Drittens ein Architekturframework, um eine produkt- und generationsübergreifende Struktur für Systemmodelle zu etablieren. Schließlich eine Implementierung aller Kernbestandteile in einer (Software-)Tool Umgebung. Anhand von Fallbeispielen aus der Praxis zeigt sich, dass die entwickelte MBSE-Methodik einen Beitrag zur Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess leisten kann. Zudem zeigen Analysen mit Unternehmenspartnern das Potenzial der MBSE-Methodik zur Steigerung der Akzeptanz von MBSE-Ansätzen im Vergleich zum Stand der Forschung. Dieses Potenzial wird in der Untersuchung eines Schulungskonzepts zur entwickelten MBSE-Methodik bestätigt. Bereits laufende Forschungsarbeiten zeigen zudem Erweiterungsmöglichkeiten der MBSE-Methodik um zusätzliche Anwendungsfelder, wie ein modellbasiertes Änderungsmanagement.

Abstract

Validation plays a central role in product engineering. Validation not only ensures the success of a product in the market. It also creates knowledge that is used to expand and concretize the expectations and goals placed on the product throughout the product development process. Validation must take place continuously, consistently and traceable throughout the product development process. However, the increasing complexity and interdisciplinarity in the development of current and future systems, for example for automated driving, leads to new challenges. In order to support the handling of this increasing complexity and interdisciplinarity, a new holistic approach for product development, Advanced Systems Engineering (ASE), is being researched and advanced in an initiative by partners from industry and research as well as acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. ASE is, amongst others, particularly aimed at supporting validation. In particular, Model-Based Systems Engineering (MBSE), the transition from a document-centric to a model-based approach, is seen as a central approach here. However, with regard to the use of MBSE for methodological support of validation, two central challenges become apparent. On the one hand, existing MBSE approaches do not sufficiently support validation so far. On the other hand, MBSE approaches lack acceptance in (industrial) application.

In this thesis, a holistic MBSE methodology is developed to support validation in the product development process. The methodology builds on the foundation of the model of SGE - System Generation Engineering according to Albers and comprises four core components. First, a modeling language that consolidates terms used in the state of research and in the KaSPro - Karlsruhe School for Product Development as well as their relationships, to describe validation. Second, a modeling method, based on the IPEK-X-in-the-loop-approach, to support the synthesis and analysis of system models. Third, an architecture framework to establish a cross-product and cross-generation structure for system models. Finally, an implementation of all core components in a (software) tool environment. Case studies from practice show that the developed MBSE methodology can contribute to the continuity, consistency and traceability of validation in the product development process. In addition, analyses with company partners show the potential of the MBSE methodology to increase the acceptance of MBSE approaches compared to the state of the art. This potential is confirmed in the investigation of a training concept for the developed MBSE methodology. Further research work already in progress also shows possibilities for extending the MBSE methodology to include additional fields of application, such as model-based change management.

Danksagung

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Mein herzlichster Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers. Durch seine Betreuung konnte meine Forschung nicht nur ermöglicht und durch wichtige Impulse zu einer erfolgreichen Dissertation geführt werden. Ich habe auch den regen Austausch und die unzähligen wissenschaftlichen Diskussionen immer sehr genossen. Zudem habe ich von Anfang ein großes Vertrauen gespürt, so dass ich sowohl in meiner Forschung als auch im Alltag am Institut wichtige Erfahrungen sammeln, viel lernen und mich persönlich weiterentwickeln konnte. Mein Dank gilt zudem Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing Stephan Husung für die Übernahme des Korreferats. Die gemeinsamen Schnittstellen und Diskussionen über viele Jahre, insbesondere mit seiner tiefen Expertise zum Thema Systems Engineering, haben mir immer sehr viel Spaß gemacht und mich in meiner Forschung weitergebracht. Es freut mich, dass dieser Austausch mit der Dissertation seinen (vorläufigen) Höhepunkt gefunden hat.

Zudem möchte ich mich bei dem gesamten IPEK-Team bedanken. Angefangen bei Sekretariaten, Administration und IT, die mich bei kleineren und größeren Problemen immer unterstützt haben. Ein ganz besonderer Dank gilt auch den vielen wissenschaftlichen Mitarbeitenden des Instituts für den Austausch in Projekten und Forschungsgesprächen, aber auch die angenehme Arbeitsatmosphäre über all meine Jahre am IPEK. Insbesondere seien hier die Mitarbeitenden meiner Forschungsgruppe ASE – Advanced Systems Engineering genannt, die stets für erfolgreiche Arbeit in Forschung, Lehre und Innovation, aber auch für Spaß bei der Arbeit gesorgt haben.

Nicht zuletzt gilt ein großer Dank meiner Familie und Freunden. Sie haben mich nicht nur auf den Pfad einer akademischen Karriere gebracht und mich ständig unterstützt, auch haben Sie mir in stressigen Zeiten das ein oder andere Mal den Rücken freigehalten.

Ohne Sie und Euch wäre diese Dissertation nicht möglich gewesen.

Heidelberg, den 31. August 2024

Constantin Mandel

„Perfektion ist nicht dann erreicht, wenn es nichts mehr hinzuzufügen gibt,
sondern wenn man nichts mehr weglassen kann.“
Antoine de Saint-Exupéry (1900-1944).

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xxv
Abkürzungsverzeichnis	xxvii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Fokus der Arbeit	5
1.3 Aufbau der Arbeit.....	6
2 Stand der Forschung	9
2.1 Der Produktentstehungsprozess – Grundbegriffe.....	9
2.1.1 Systemtheorie und ZHO-Modell.....	9
2.1.2 Der Innovationsbegriff	11
2.1.3 Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung	14
2.1.4 Methodische Unterstützung im Produktentstehungsprozess – Begriffsverständnis und Abgrenzung	16
2.1.5 Zwischenfazit.....	19
2.2 Modellierung von Produktentstehungsprozessen	20
2.2.1 Produktentstehung als Problemlösung – die Problemlösungsmethodik SPALTEN	21
2.2.2 Modelle zur Beschreibung von Produktentstehungsprozessen ..	22
2.2.3 Agiles Projektmanagement und ASD – Agile Systems Design ..	28
2.2.4 Zwischenfazit.....	29
2.3 Validierung im Produktentstehungsprozess.....	30
2.3.1 Bedeutung der Validierung im Produktentstehungsprozess.....	30
2.3.2 Der IPEK-X-in-the-Loop- (IPEK-XiL-) Ansatz.....	33
2.3.3 Zwischenfazit.....	37
2.4 Advanced Systems Engineering (ASE) und Model-Based Systems Engineering (MBSE).....	38
2.4.1 Handlungsfelder und Historie	39
2.4.2 MBSE – Model-Based Systems Engineering.....	42
2.4.3 Verbreitung und Einsatz von Systems Engineering und MBSE in der Praxis	46
2.4.4 Zwischenfazit.....	50
2.5 Bekannte MBSE-Methoden.....	50

2.5.1	Konsolidierte Modellierungsmethode auf Basis des Stands der Forschung	51
2.5.2	Im Stand der Forschung beschriebene Modellierungsmethoden.....	69
2.5.3	Zwischenfazit	75
2.6	Systemarchitektur und Architekturframeworks	75
2.6.1	Begriffsverständnis und Abgrenzung.....	76
2.6.2	Bekannte Architekturframeworks im MBSE	80
2.6.3	Zwischenfazit	84
2.7	Erweitertes Begriffsverständnis zur methodischen Unterstützung im Produktentstehungsprozess – Erweiterung um Konzepte des MBSE....	84
2.8	Klärung des Forschungsgegenstands und Zwischenfazit	86
2.8.1	Herausforderungen bei der Validierung komplexer Advanced Systems.....	86
2.8.2	Nutzung von ASE und MBSE zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess.....	89
2.8.3	Herausforderungen für den Einsatz und die Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in der Praxis.....	97
2.8.4	Zwischenfazit	103
3	Forschungsbedarf und Zielsetzung der Arbeit.....	105
3.1	Übergeordneter Forschungsbedarf und Grundannahmen	105
3.2	Teilziele und Forschungsthesen	108
3.3	Forschungsfragen	110
4	Forschungsvorgehen und Forschungsumgebung	113
4.1	Forschungsvorgehen	113
4.2	Forschungsumgebung	117
5	Entwicklung des initialen Zielsystems für die Kernbestandteile der MBSE- Methodik	119
5.1	Zielsystem der Modellierungssprache	119
5.1.1	Systematische Literaturrecherche zu verwendeten Begriffen für die Beschreibung der Validierung technischer Systeme	122
5.1.2	Detaillierte Analyse von Vorarbeiten aus der KaSPpro zur Konkretisierung der identifizierten Begriffe	124
5.1.3	Anforderungen/Competency Questions an die zu entwickelnde Ontologie	129
5.2	Zielsystem der Modellierungsmethode	131
5.2.1	Definition von Wissens- und Definitionslücken im Zielsystem..	131
5.2.2	Definition konkreter Validierungsziele und Testfälle	132

5.2.3	Rückführung von Testergebnissen in das Systemmodell des SiD	134
5.2.4	Zusammenfassung der abzubildenden Zusammenhänge als Zielsystem für die zu entwickelnde Modellierungsmethode.....	135
5.3	Zielsystem für die Umsetzung der MBSE-Methodik: Handlungsfelder für die Akzeptanz von Systems Engineering- und MBSE-Ansätzen	136
5.3.1	Fallstudie und begleitende Beobachtung im Unternehmen	137
5.3.2	Konsolidierte Handlungsfelder und Evaluationskriterien für die Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in der Praxis	139
6	Entwicklung der Kernbestandteile der MBSE-Methodik.....	141
6.1	Ontologie und Modellierungssprache zur Modellierung des Validierungssystems.....	141
6.1.1	Einführung und Grundlagen	141
6.1.2	Entwickelte Ontologie	143
6.2	Entwicklung der Modellierungsmethode	152
6.2.1	Einführung und Übersicht über die Methode	152
6.2.2	Teilaktivitäten der Modellierungsmethode.....	154
6.3	Architekturframework für die entwickelte MBSE-Methodik	175
6.3.1	Entwickeltes Architekturframework für IP 2019/2020	176
6.3.2	Studiendesign.....	182
6.3.3	Ergebnisse der Untersuchung.....	185
6.3.4	Studienfazit.....	191
6.4	Zwischenfazit.....	193
7	Weiterentwicklung der ganzheitlichen MBSE-Methodik.....	195
7.1	Zusammenspiel von Modellierungssprache, Modellierungsmethode und Architekturframework.....	195
7.2	Zusammenspiel zwischen Architekturframework und iterativ ausführbaren Modellierungsaktivitäten der Modellierungsmethode	199
7.3	Implementierung der MBSE-Methodik in einem Software-Tool.....	202
7.4	Zusammenfassung und Zwischenfazit – Adressierung der im Forschungsbedarf herausgearbeiteten Felder zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen.....	207
8	Evaluation der MBSE-Methodik – Implementierungsstudien.....	211
8.1	Fallstudie: Einsatz der entwickelten MBSE-Methodik zur Unterstützung der Planung von Validierungsaktivitäten bei einem Automobilzulieferer 211	
8.1.1	Studiendesign der Fallstudie.....	211
8.1.2	Vorgenommene Anpassungen zur Anwendung der entwickelten MBSE-Methodik für die Fallstudie	213

8.1.3	Durchführung der Modellierung und Ergebnisse der Untersuchung.....	214
8.1.4	Interpretation und Studienfazit.....	220
8.2	Evaluation der Kombination von Modellierungsaktivitäten und Architekturframework für die entwickelte MBSE-Methodik.....	221
8.2.1	Studiendesign der Fallstudie.....	221
8.2.2	Studienergebnisse	226
8.2.3	Interpretation und Studienfazit.....	227
8.3	Beitrag zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz der MBSE- Methodik – Untersuchung im Projekt MoSys	228
8.3.1	Studiendesign der Untersuchung.....	229
8.3.2	Ergebnisse der Untersuchung entlang der identifizierten Handlungsfelder.....	230
8.3.3	Interpretation und Studienfazit.....	241
9	Lehre- und Implementierungsstudie.....	245
9.1	Studiendesign.....	246
9.2	Studienergebnisse	247
9.2.1	Handlungsfelder zur individuellen Akzeptanz	247
9.2.2	Handlungsfelder zur organisatorischen Akzeptanz	252
9.2.3	Methode zur Unterstützung der kontinuierlichen, durchgängigen und nachvollziehbaren Validierung im Produktentstehungsprozess	255
9.3	Interpretation und Studienfazit	257
10	Zusammenfassung und Fazit	259
10.1	Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit	259
10.2	Evaluation und Diskussion der entwickelten MBSE-Methodik	267
11	Ausblick	273
11.1	Integration weiterer Methoden in die MBSE-Methodik	273
11.2	Erweiterbarkeit der MBSE-Methodik zur Unterstützung von Produkt- Produktions-Co-Design	274
11.3	Modell der SGE nach Albers und MBSE-Modellierung	276
11.4	Beschreibung eines multidimensionalen System of Systems Architekturframeworks	277
11.5	Schulung der entwickelten MBSE-Methodik außerhalb der Forschungsumgebungen dieser Dissertation	279
11.6	Anbindung von Simulationsmodellen an MBSE-Systemmodelle	279
11.7	Modellierung von Unsicherheit.....	280
11.8	Unternehmensspezifische Implementierung der entwickelten MBSE- Methodik.....	280

11.9 Schlussbemerkung	282
Literaturverzeichnis	I
Anhang A: Darstellung der Modellierungsaktivitäten nach SYSMOD	XXV
Anhang A1: Modellierungsaktivitäten zur Analyse nach SYSMOD (Weilkiens, 2014, S. 39)	XXV
Anhang A2: Modellierungsaktivitäten zur Architekturentwicklung nach SYSMOD (Weilkiens, 2014, S. 40).....	XXVI
Anhang B: Details zur Data Mining Analyse zur Untersuchung des Stands der Forschung an der Schnittstelle zwischen MBSE und Validierung im Produktentstehungsprozess.....	XXVII
Anhang B1: Liste der untersuchten Veröffentlichungen in der Data Mining Analyse	XXVII
Anhang B2: Liste der Veröffentlichung aus Data Mining Analyse 4: Schnittmenge der Wortgruppen zu Validierung und MBSE in Absätzen von Veröffentlichungen in ausgewählten Journals/ Konferenzen	XXVIII
Anhang C: Weiterführende Informationen zur systematischen Literaturrecherche zu verwendeten Begriffen für die Beschreibung der Validierung technischer Systeme.....	XXXI
Anhang C1: Verwendete Datenbanken für die systematische Literaturrecherche (Fokus Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik, Technitisawad, 2020)	XXXI
Anhang C2: Liste der am relevantesten bewerteten Veröffentlichungen aus der systematischen Literaturrecherche (Technitisawad, 2020).....	XXXII
Anhang C3: Initiale Ontologie auf Basis der systematischen Literaturrecherche (Technitisawad, 2020)	XXXIV
Anhang D: Weiterführende Abbildungen zur entwickelten Modellierungsmethode.....	XXXV
Anhang D1: Darstellung zur Priorisierung und Status einzelner Validierungsbedarfe.....	XXXV
Anhang D2: Entwickeltes modellbasiertes Framework zur Unterstützung der Automatisierung und Nachvollziehbarkeit von Validierungsaktivitäten am Beispiel ADAS (Mandel, Wäschle et al., 2021, S. 6)	XXXVI
Anhang D3: Analyse der von einem Testergebnis betroffenen Modellelemente	XXXVII
Anhang E: Fragebogen zur Online-Umfrage zur Evaluation des initialen Architekturframeworks im Live-Lab IP 2019/2020	XXXIX
Anhang F: Fragebogen der semistrukturierten Interviews in MoSys	XLIII

**Anhang G: Fragebogen der semistrukturierten Interviews im Live-Lab IP
2021/2022 XLVII**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Schematische Darstellung des rasanten Anstiegs der Anzahl an Komponenten (Components), Funktionen (Functions) und Interaktionen (Interactions) in Produkten in den letzten Jahren (Friedenthal et al., 2021, S. 18)	1
Abbildung 1.2:	Die drei Bestandteile des ASE (Dumitrescu et al., 2021, S. 28)	3
Abbildung 1.3:	Entwicklungskosten für verschiedene Stufen des autonomen Fahrens nach einer McKinsey Studie mit 75 Befragten weltweit. Insbesondere für höhere Level der Automatisierung nehmen nach Meinung der Befragten die Validierungskosten stark zu und machen einen Großteil der Entwicklungskosten aus (adaptiert nach McKinsey, 2021, 25. Juli).....	4
Abbildung 1.4:	Durch Menschorientierte, skalierbare und modulare Prozesse, Methoden und Tools wird die Kollaboration auf einer interdisziplinären Vernetzungsebene ermöglicht (Darstellung angelehnt an Albers, 2023).....	6
Abbildung 1.5:	Aufbau der Arbeit	7
Abbildung 2.1:	Die drei Systemkonzepte nach Ropohl (adaptiert nach Ropohl, 2009, S. 76).....	10
Abbildung 2.2:	Kontinuierliches Zusammenspiel zwischen Analyse und Synthese im erweiterten ZHO-Modell (adaptiert nach Albers, Behrendt et al., 2016, S. 544)	11
Abbildung 2.3:	Vorlage zur Modellierung des Produktprofils (adaptiert nach Albers, Heimicke et al., 2018, S. 257)	13
Abbildung 2.4:	Beispielhafte schematische Darstellung der Verwendung des Modells der SGE zur Beschreibung der Entwicklung des Tesla Roadster (adaptiert nach Albers, Rapp et al., 2019b, S. 11)....	15
Abbildung 2.5:	Zusammenhang zwischen Methode und weiteren verwandten Begriffen (adaptiert und übersetzt nach Gericke et al., 2017, S. 106).....	17
Abbildung 2.6:	Zusammenhang zwischen Methode und weiteren verwandten Begriffen (adaptiert und übersetzt nach Estefan, 2007, S. 3) ..	17

Abbildung 2.7:	Zusammenhang zwischen Methode und weiteren verwandten Begriffen, adaptiert und übersetzt nach Atzberger et al. (2020, S. 469)	18
Abbildung 2.8:	SPALTEN Problemlösungsmethodik (adaptiert nach Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016).....	22
Abbildung 2.9:	V-Modell aus VDI-Richtlinie 2206:2021-11-00, S. 22.....	24
Abbildung 2.10:	Das integriertes Produktentstehungsmodell (iPeM), adaptiert nach Albers, Reiss et al. (2016, S. 104).....	26
Abbildung 2.11:	Allgemeines Modell der Produktentwicklung nach VDI-Richtlinie 2221:2019-11-00 Blatt 1, S. 31.....	27
Abbildung 2.12:	Neun Grundprinzipien des ASD (Albers, Heimicke et al., 2019; Darstellung nach Albers & Bursac, 2019)	29
Abbildung 2.13:	Erweitertes ZHO-Modell zur Darstellung der drei Bestandteile der Validierung und des Wechselspiels zum Design/Gestaltung im Produktentstehungsprozess (adaptiert nach Albers, Behrendt et al., 2016, S. 545).....	32
Abbildung 2.14:	Darstellung des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz am Beispiel der Fahrzeug-Antriebsstrangentwicklung (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 559)	35
Abbildung 2.15:	Darstellung des IPEK-X-in-the-Loop-Framework am Beispiel der Fahrzeug-Antriebsstrangentwicklung (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 560)	36
Abbildung 2.16:	System-in-Development (SiD) und System-under-Investigation (Sul) (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 561)	37
Abbildung 2.17:	Charakterisierung unterschiedlicher Faktoren eines Systems hinsichtlich deren SoS-Charakter. Je weiter außen ein Faktor bewertet wird, umso mehr weist dieser SoS-Charakter auf (Darstellung adaptiert nach Albers, Mandel et al., 2018, S. 2805)	40
Abbildung 2.18:	Typen von SysML-Diagrammen (adaptiert nach Friedenthal, Moore & Steiner, 2012, S. 30)	44
Abbildung 2.19:	Untersuchung zu Wichtigkeit und Adressierung im Unternehmen von verschiedenen Themenfeldern des Systems Engineering nach Gausemeier et al. (2015, S. 48). Insbesondere im Maschinen- und Anlagenbau werden dabei viele der Themenfelder als äußerst wichtig für das Unternehmen erachtet, während die eigene Position im Unternehmen noch als schwach angesehen wird.....	48

Abbildung 2.20:	Konsolidierte Modellierungsmethode für eine Produktgeneration (eigene Darstellung).....	52
Abbildung 2.21:	Beispielhafte Stakeholder und Bedarfe für das Leitbeispiel ADAS	54
Abbildung 2.22:	Systemkontext des SiD Fahrzeug für das Leitbeispiel	55
Abbildung 2.23:	Anwendungsfälle der Stakeholder für das SiD (Fokus ADAS) .	56
Abbildung 2.24:	Stakeholder des SiD und Ziele, die aus deren Bedarfen und Anwendungsfällen sowie Randbedingungen abgeleitet werden (Auszug für das Leitbeispiel).....	58
Abbildung 2.25:	Anforderungen mit Bezug zum AEB-System für das Leitbeispiel (Auszug für das Leitbeispiel).....	60
Abbildung 2.26:	Funktionale Architektur für das Leitbeispiel (Auszug)	62
Abbildung 2.27:	Logische Architektur des SID Fahrzeug für das Leitbeispiel (Auszug).....	64
Abbildung 2.28:	Informationsflüsse des ACC-Systems für das Leitbeispiel (verkürzte und vereinfachte Darstellung).....	64
Abbildung 2.29:	Verknüpfung von Zielen und Randbedingungen zu daraus abgeleiteten Systemanforderungen für das Leitbeispiel	67
Abbildung 2.30:	Darstellung der Nachvollziehbarkeit von einem Stakeholder und seinen Bedarfen, über Ziele und Anforderungen bis zur funktionalen und logischen Architektur für das Leitbeispiel (Auszug).....	68
Abbildung 2.31:	Übersicht über die einzelnen Schritte der OOSEM (Friedenthal et al., 2012, S. 436).....	69
Abbildung 2.32:	Sichten der FAS4M-Methode (adaptiert nach Moeser et al., 2016, S. 3).....	71
Abbildung 2.33:	Partialmodelle nach CONSENS (Gausemeier et al., 2012, S. 90).....	73
Abbildung 2.34:	Erweiterung der CONSENS Spezifikationstechnik zur Spezifikation von Testbeds (Bremer et al., 2015, S. 157)	74
Abbildung 2.35:	Elemente des MBSE-Ansatzes nach Holt und Perry (2018, S. 21).....	79
Abbildung 2.36:	MagicGrid Framework (adaptiert nach Aleksandraviciene & Morkevicius, 2021, S. 12)	81
Abbildung 2.37:	SPES XT Modeling Framework (Junker, 2018).....	82

Abbildung 2.38:	Zusammenspiel zwischen mecPro ² Architekturframework und mecPro ² Prozessframework (Eigner et al., 2017, S. 386)	83
Abbildung 2.39:	Aufbau und Ergebnisse der ersten Data-Mining Analyse in Scopus	90
Abbildung 2.40:	Aufbau und Ergebnisse der zweiten Data-Mining Analyse in Scopus	91
Abbildung 2.41:	Aufbau und Ergebnisse der dritten Data-Mining Analyse in ausgewählten Konferenzen und Journals	91
Abbildung 2.42:	Aufbau und Ergebnisse der vierten Data-Mining Analyse in ausgewählten Konferenzen und Journals	92
Abbildung 2.43:	Handlungsfelder/Evaluationskriterien für die individuelle und organisatorische Akzeptanz von MBSE-Methoden (Albers, Lohmeyer & Radimersky, 2012, S. 4)	100
Abbildung 4.1:	Forschungsvorgehen nach Marxen (2014, S. 164)	113
Abbildung 4.2:	Forschungsvorgehen und Ergebnisse der einzelnen Schritte	114
Abbildung 4.3:	Verwendete Forschungsmethoden für die einzelnen Schritte des Forschungsvorgehens	117
Abbildung 5.1:	Visualisierung des Verständnisses dieser Arbeit zum Zusammenhang zwischen LWO, formaler Modellierungssprache, konkretisierter Modellierungssprache und einem konkreten (SysML-) Modell	120
Abbildung 5.2:	Beschreibung und Modellierung von Tests gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 555)	125
Abbildung 5.3:	Strukturierung des Zielsystems nach Ebel (2015, S. 156)	126
Abbildung 5.4:	Zusammenhänge zwischen Systemumgebung und Schnittstellen, Anwendungsfällen, Testfällen, Anforderungen und Zielen (Ebel, 2015, S. 137)	127
Abbildung 5.5:	Nutzung des Elements „Testfall“ zur Verknüpfung von Elementen des Zielsystems (hier orange) und des Objektsystems (Zingel, 2013, S. 153)	128
Abbildung 5.6:	Aktivitäten zur Beschreibung von Wissens- und Definitionslücken in Bezug zu Aktivitäten zur Modellierung des Zielsystems	132
Abbildung 5.7:	Aktivitäten zur Definition konkreter Validierungsziele und Testfälle	133
Abbildung 5.8:	Aktivitäten zur Rückführung von Testergebnissen in das Systemmodell des SiD	135

Abbildung 5.9:	Aktivitäten im kontinuierlichen Wechselspiel zwischen der Entwicklung des SiD und dessen Validierung	136
Abbildung 5.10:	Handlungsfelder zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen (übersetzt und adaptiert nach Mandel, Martin & Albers, 2022, S. 7).....	140
Abbildung 6.1:	Einteilung der identifizierten Begriffe in drei Kategorien.....	142
Abbildung 6.2:	Ausschnitt der entwickelten Ontologie zu Stakeholdern, Bedarfen, Anwendungsfällen und Anwendungsszenarien	143
Abbildung 6.3:	Ausschnitt der entwickelten Ontologie zu Bedarfen, Zielen, Systemanforderungen und Randbedingungen.....	144
Abbildung 6.4:	Ausschnitt der entwickelten Ontologie zu Anforderungen, Funktionen und logischen Systemelementen.....	145
Abbildung 6.5:	Ausschnitt der entwickelten Ontologie zu Validierungsbedarf-Elementen, Validierungsbedarfen und Validierungszielen	147
Abbildung 6.6:	Ausschnitt der entwickelten Ontologie zu Testfall, Testablauf, Testkonfiguration und Testergebnis	148
Abbildung 6.7:	Ausschnitt der entwickelten Ontologie zu Bestandteilen einer Testkonfiguration	149
Abbildung 6.8:	Ausschnitt der entwickelten Ontologie zur Konkretisierung des Zielsystems basierend auf Testergebnissen	150
Abbildung 6.9:	Entwickelte Ontologie für die MBSE-Methodik	151
Abbildung 6.10:	Entwickelte Modellierungsmethode (schematische Übersicht)	153
Abbildung 6.11:	Konsolidierte Modellierungsmethode für eine Produktgeneration/das SiD (eigene Darstellung)	155
Abbildung 6.12:	Ziele, Stakeholder und Validierungsbedarfe im ADAS-Beispiel	157
Abbildung 6.13:	Automatisch generierte Darstellung der für den modellierten Validierungsbedarf relevanten bzw. zu berücksichtigenden Modellelemente (Auszug)	158
Abbildung 6.14:	Anlegen von Validierungszielen und Tests zu einem Validierungsbedarf (Auszug)	160
Abbildung 6.15:	Auswahl und Verknüpfung der relevanten Modellelemente eines Validierungsbedarfs, die in einem Testfall berücksichtigt werden sollen (Auszug)	162

Abbildung 6.16:	Testspezifikation – relevante/zu beachtende Modellelemente für einen Testfall (Auszug).....	163
Abbildung 6.17:	Auswahl/Anlegen und Verknüpfen von <<Testabläufen>> zu einem <<Testfall>>	165
Abbildung 6.18:	Detaillierung der Beschreibung eines <<Testablaufs>>	166
Abbildung 6.19:	Bestandteile der <<Testkonfiguration>> für den betrachteten <<Testfall>> „AEB Test_out_of_town“ (Auszug).....	168
Abbildung 6.20:	Informationsflüsse zwischen den <<Testmodellen>> und <<Koppelsystemen>> für die <<Testkonfiguration>> ModelCenter_ADAS_Simulation	169
Abbildung 6.21:	Übersicht der <<Testabläufe>>, <<Testkonfigurationen>> und <<Testergebnisse>> für einen <<Testfall>>	170
Abbildung 6.22:	Durchführung eines <<Testfalls>> für die ADAS-Validierung des Leitbeispiels. Die linke Seite zeigt den in ModelCenter umgesetzten <<Testablauf>> als Verkettung der unterschiedlichen Modelle und Skripte (siehe Absatz 6.2.2.5). Auf der rechten Seite ist ein Standbild der Simulation in CarMaker zu sehen, bei der das Ego-Fahrzeug (schwarz/grau) dem Target-Fahrzeug (gelb) auf eine Landstraße folgt.	171
Abbildung 6.23:	Darstellung des Testergebnisses als Linkhalter im Systemmodell (oben), Matlab-Plot als beispielhaftes Testergebnis (unten) (adaptiert und erweitert nach Mandel, Wäschle et al., 2021, S. 10)	173
Abbildung 6.24:	Modellierung der Konkretisierung und Erweiterung des Zielsystems basierend auf der Interpretation des <<Testergebnisses>>	174
Abbildung 6.25:	Architekturframework für IP 2019/2020.....	177
Abbildung 6.26:	Inhalt eines einzelnen Views im Architekturframework.....	180
Abbildung 6.27:	Navigationsansicht in Form eines vorgeschlagenen Modellierungsvorgehens als Startpunkt im Template für das Modellierungstool.....	181
Abbildung 6.28:	Umfrage in IP 2019/2020. Frage: „Erkennen Sie die Bedeutung des MBSE-Ansatzes für die Produktentwicklung?“ (22 Antworten)	185
Abbildung 6.29:	Umfrage in IP 2019/2020. Frage: „Hilft Ihnen das bereitgestellte SysML Framework bei dem Verständnis des Modellierungsansatzes?“ (8 Antworten).....	186

Abbildung 6.30:	Umfrage in IP 2019/2020. Frage nach der Nutzung der Architekturframeworks bzw. Navigationsansichten im Template für das Modellierungstool.....	188
Abbildung 7.1:	Erweitertes Architekturframework für die MBSE-Methodik (Sicht Produktgeneration, Ausschnitt).....	197
Abbildung 7.2:	Erweitertes Architekturframework für die MBSE-Methodik (Sicht Validierungssystem, Ausschnitt).....	198
Abbildung 7.3:	Standardmäßige Vorgabe und Muster zur Beschreibung von Modellierungsaktivitäten	201
Abbildung 7.4:	Übersicht der Navigation über Modellierungsaktivitäten (Kreise in der Übersicht ganz rechts hinten), deren detaillierten Ablauf (Mitte, siehe auch Abbildung 7.3) hin zu spezifischen Views/Diagrammen im SysML-Modellierungstool (links vorne) (Mandel, Martin & Albers, 2022, S. 9).....	203
Abbildung 7.5:	Übersicht aller für die MBSE-Methodik beschriebenen Modellierungsaktivitäten (Highlight auf die entwickelten Modellierungsaktivitäten entsprechend der entwickelten Modellierungsmethode)	204
Abbildung 7.6:	Ablauf der Modellierungsaktivität „Testfälle modellieren“	205
Abbildung 7.7:	Darstellung der Arbeitsansicht für das Diagramm zum Anlegen und Detaillieren von Testkonfigurationen	206
Abbildung 7.8:	Ausschnitt des Architekturframeworks und einer Modellierungsaktivität für das Projekt MoSyS – umgesetzt in iQuavis	207
Abbildung 8.1:	Links: Beispieldarstellung einer OBC (Schnitzler & Lutter, 2020); Rechts: OBC und betrachtete Nachbarsysteme für die Fallstudie (Wiecher et al., 2024, S. 731).....	212
Abbildung 8.2:	Angepasste Ontologie für die Fallstudie bei Kostal (Ausschnitt) – Anpassungen für die Fallstudie sind farblich markiert und hervorgehoben (adaptiert nach Wiecher et al., 2024)	213
Abbildung 8.3:	Modellierungsaktivitäten für die Fallstudie bei Kostal (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 736)	214
Abbildung 8.4:	Betrachteter Anwendungsfall, daraus abgeleitete Szenarien sowie verknüpfte Stakeholder-Anforderungen für die Fallstudie (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 737)	215
Abbildung 8.5:	Systemkontext der OBC (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 737).....	216

Abbildung 8.6:	Ableitung von Validierungsbedarfen basierend auf Anwendungsfällen, Anwendungsszenarien und/oder Stakeholder-Anforderungen (adaptiert nach Wiecher et al., 2024).....	216
Abbildung 8.7:	Relevante Informationen zu einem Validierungsbedarf ("Validation Concern") zur Formulierung von Validierungszielen ("Validation Objectives") (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 738)	217
Abbildung 8.8:	Validierungsziele und damit verbundene Testszzenarien, Tests und Testfälle (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 739) ...	217
Abbildung 8.9:	Testspezifikation, Ausschnitt für das beschriebene Validierungsziel der Fallstudie bei Kostal (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 738)	218
Abbildung 8.10:	Analyse des Impacts einzelner Testergebnisse (Auszug)	219
Abbildung 8.11:	Kondensierte Ontologie für das Zielsystemmanagement in der Untersuchungsumgebung (adaptiert und übersetzt nach Windisch et al., 2022, S. 553).....	222
Abbildung 8.12:	Framework zum Zielsystemmanagement in der Untersuchungsumgebung (adaptiert und übersetzt nach Windisch et al., 2022, S. 554).....	223
Abbildung 8.13:	Beispielhafte schematische Darstellung der Modellierungsaktivität "Anforderungen mit Testfällen verknüpfen" und auszugsweiser Bezug der einzelnen Teilaktivitäten zu den Views des Frameworks (adaptiert nach Windisch, 2021; Windisch et al., 2022, S. 553).....	225
Abbildung 8.14:	Auswertung der semistrukturierten Interviews zu Mehrwert und Anwendbarkeit des entwickelten Ansatzes in der Untersuchungsumgebung (adaptiert nach Windisch et al., 2022, S. 554)	227
Abbildung 8.15:	Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Wahrgenommene Leistungsfähigkeit“	231
Abbildung 8.16:	Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Intuitive Anwendbarkeit“	232
Abbildung 8.17:	Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Flexibilität und Adaptierbarkeit der Methodik“	233
Abbildung 8.18:	Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Usability des Software-Tools“	234

Abbildung 8.19:	Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Klares Zielbild und Modellierungsvorgehen“	235
Abbildung 8.20:	Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Ontologie und angemessener Formalisierungsgrad“	237
Abbildung 8.21:	Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „(monetäres) Aufwand/Nutzen-Verhältnis“ ...	237
Abbildung 8.22:	Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Lehr-/Lernbarkeit der Methodik“	238
Abbildung 8.23:	Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit der Methodik“	239
Abbildung 8.24:	Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Problemorientierung/Unterstützung bei der Modellierung des Problemraums“	241
Abbildung 9.1:	Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Wahrgenommene Leistungsfähigkeit von MBSE"	248
Abbildung 9.2:	Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Intuitive Anwendbarkeit der MBSE-Methodik"	249
Abbildung 9.3:	Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Flexibilität und Adaptierbarkeit der MBSE-Methodik"	249
Abbildung 9.4:	Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Usability des Modellierungswerkzeugs"	250
Abbildung 9.5:	Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Klares Zielbild und Modellierungsvorgehen"	251
Abbildung 9.6:	Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Ontologie und angemessener Formalisierungsgrad"	252
Abbildung 9.7:	Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Aufwand/Nutzen-Verhältnis"	253
Abbildung 9.8:	Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Lehr-/Lernbarkeit der MBSE-Methodik"	254

Abbildung 9.9:	Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit".....	255
Abbildung 9.10:	Untersuchung der Methode zur durchgängigen, kontinuierlichen und nachvollziehbaren Validierung in IP 2021/2022.....	256
Abbildung 10.1:	Auszug aus der entwickelten Ontologie zur Beantwortung von Forschungsfrage 1 (vollständige Ontologie in Absatz 6.1).....	262
Abbildung 10.2:	Entwickelte Modellierungsmethode zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess (siehe Absatz 6.2)	263
Abbildung 10.3:	Handlungsfelder zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen (übersetzt und adaptiert nach Mandel, Martin & Albers, 2022, S. 7)	264
Abbildung 10.4:	Darstellung der Modellierungsaktivitäten der ganzheitlichen MBSE-Methodik als Vorlage im Modellierungstool Cameo Systems Modeler	265
Abbildung 10.5:	Mit Hilfe der entwickelten MBSE-Methodik aufgebaute View der Testspezifikation für die Fallstudie bei Kostal (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 738)	268
Abbildung 10.6:	Auswertung der semistrukturierten Interviews zu Mehrwert und Anwendbarkeit des entwickelten Ansatzes im Zielsystemmanagement in der Untersuchungsumgebung (adaptiert nach Windisch et al., 2022, S. 554)	269
Abbildung 11.1:	Übersicht über die Modellierungsaktivitäten der AECIA-Methodik (eigene Darstellung nach Martin et al., 2022).....	274
Abbildung 11.2:	Ausschnitt eines Systemmodells zur integrierten Beschreibung von Produkt und Produktionssystem gemäß der in MoSyS entwickelten Methodik zur Unterstützung des PPCD (adaptiert nach Schäfer et al., 2022)	275
Abbildung 11.3:	Beispielhafte Darstellung der Modellierung von RSE in einem MBSE-Systemmodell.....	276
Abbildung 11.4:	SoS Architekturframework mit sechs Dimensionen (Mandel, Guenther et al., 2022, S. 225)	278
Abbildung 11.5:	Ausschnitt einer implementierten Modellierungsaktivitäten der MBSE-Methodik bei HARTING AT im Modellierungstool iQUAVIS (adaptiert nach Mandel et al., 2023, S. 901).....	281

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Beispiele für die verwendeten Begrifflichkeiten zur Modellierung von Systemarchitekturen und Nutzung von Architekturframeworks	80
Tabelle 2.2:	Übersicht der Berücksichtigung von Validierung in bestehenden MBSE-Ansätzen (siehe Absatz 2.5 und Absatz 2.6)	94
Tabelle 5.1:	Verwendete Suchbegriffe für die systematische Literaturrecherche (Techanitisawad, 2020)	123
Tabelle 5.2:	Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche: Übersicht relevanter Begriffe zur Beschreibung der Validierung technischer Systeme (adaptiert nach Techanitisawad, 2020).....	124
Tabelle 5.3:	Fragen, die durch die Nutzung der auf der Ontologie basierenden MBSE-Methodik beantwortet werden sollen. Durch die Fragen können die in der Ontologie abzubildenden Begriffe/Klassen und deren Beziehungen bestimmt werden..	130
Tabelle 7.1:	Zusammenfassung der Maßnahmen zur Weiterentwicklung der MBSE-Methodik in Bezug zu den identifizierten Handlungsfeldern für die individuelle und organisatorische Akzeptanz von MBSE-Ansätzen.....	208
Tabelle 8.1:	Von den Interviewpartnern genannte bekannte Modellierungssprachen, Modellierungsmethoden/ Architekturframeworks und Modellierungstools.....	230

Abkürzungsverzeichnis

ADAS	Advanced Driver Assistance System (Fahrerassistenzsystem)
AE	Advanced Engineering
AS	Advanced Systems
ASD	Agile Systems Design
ASE	Advanced Systems Engineering
AV	Ausprägungsvariation
CS	Connected Systems
EG	Entwicklungsgeneration
HWO	Heavyweight-Ontologie
INCOSE	International Council on Systems Engineering
IP	Integrierte Produktentwicklung
IPEK	Institut für Produktentwicklung
iPeM	Integriertes Produktentstehungsmodell
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KaSPro	Karlsruher Schule für Produktentwicklung
LWO	Lightweight-Ontologie
MBSE	Model-Based Systems Engineering
MoSyS	Menschenorientierte Gestaltung komplexer System of Systems
OMG	Object Management Group
PPCD	Produkt-Produktions-Co-Design
PG	Produktgeneration
PV	Prinzipvariation
RSE	Referenzsystemelement
SE	Systems Engineering

SGE	Systemgenerationsentwicklung
SiD	System in Development
SoS	System of Systems
Sul	System under Investigation
SysML	Systems Modeling Language
UML	Unified Modeling Language
ÜV	Übernahmevariation
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
XiL	X-in-the-Loop
ZHO	Ziel-, Handlungs-. Objektsystem

1 Einleitung

1.1 Motivation

Heutige Produkte sowie die zugehörigen Produktentstehungsprozesse werden durch eine Vielzahl von Bedarfen global agierender Stakeholder beeinflusst. Megatrends wie Digitalisierung und Nachhaltigkeit erfordern die Entwicklung immer komplexerer Systeme, sogenannter Advanced Systems (AS) (Dumitrescu, Albers, Riedel, Stark & Gausemeier, 2021). Schematisch stellt dies das International Council on Systems Engineering (INCOSE) dar, indem die Entwicklung der Anzahl an Komponenten, Funktionen und Interaktionen in Produkten über die letzten Jahrhunderte visualisiert wird (siehe Abbildung 1.1). Demnach ist in den letzten Jahren ein sprunghafter Anstieg an Komponenten, Funktionen und Interaktionen in Produkten zu verzeichnen.

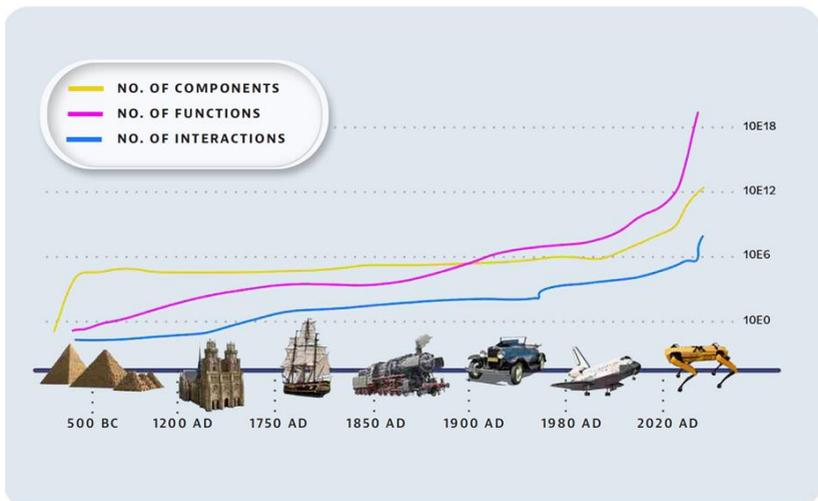


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung des rasanten Anstiegs der Anzahl an Komponenten (Components), Funktionen (Functions) und Interaktionen (Interactions) in Produkten in den letzten Jahren (Friedenthal et al., 2021, S. 18)

Insbesondere der durch die Bedarfe der Stakeholder getriebene Anstieg an Funktionen und Interaktionen macht eine Zusammenarbeit von Personen aus unterschiedlichen (Ingenieurs-) Disziplinen, mit einer Vielzahl an Kompetenzen und Experten-/Expertinnenwissen erforderlich (Albers, Dumitrescu, Gausemeier, Riedel & Stark, 2018). Diese steigende Komplexität von Systemen, aber auch der zugehörigen Produktentstehungsprozesse und Kollaboration der beteiligten Personen, bringen jedoch eine Vielzahl an Herausforderungen.

Bereits bei den Karlsruher Arbeitsgesprächen 2010 formulieren Albers und Gausemeier vier Forschungsbereiche zum Übergang von einer fachdisziplinenorientierten hin zu einer systemorientierten, vorausschauenden Produktentstehung (Albers & Gausemeier, 2010):

- Integrierte Produktentwicklung
- Produktentstehung als Wissensarbeit
- Strategische Entwicklung von Produktinnovationen
- Werkzeuge der Produktentstehung

Dieser Übergang ist jedoch bis heute nicht abgeschlossen und erfordert weitergehende Forschung. In Zusammenarbeit zwischen der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, den Fraunhofer Instituten IAO, IPK und IEM sowie dem IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wird daher 2018 das Leitbild Advanced Systems Engineering (ASE) sowie zehn Handlungsfelder auf dem Weg zu ASE beschrieben (Albers, Dumitrescu et al., 2018).

ASE vereint und integriert die Betrachtung von Advanced Systems, aktueller Ansätze des Systems Engineering (bspw. das Modellbasierte Systems Engineering – MBSE) und Advanced Engineering (bspw. die Nutzung digitaler Technologien wie digitaler Zwillinge im Produktentstehungsprozess) zur Stärkung der Innovationskraft von Unternehmen (Dumitrescu et al., 2021). Insbesondere durch (Modellbasiertes) Systems Engineering soll dabei der Umgang mit der Komplexität heutiger und zukünftiger Produktentstehungsprozesse von Advanced Systems begegnet werden. Im Fokus von ASE steht dabei die Orientierung am Menschen und dessen Rolle im Produktentstehungsprozess (Dumitrescu et al., 2021, Abbildung 1.2).



Abbildung 1.2: Die drei Bestandteile des ASE (Dumitrescu et al., 2021, S. 28)

In diesem Verständnis soll ASE die Zusammenarbeit der an der Entwicklung komplexer sozio-technischer Produkte beteiligter Personen unterstützen. Insbesondere das Finden einer gemeinsamen technischen Kommunikationsbasis, teilweise auch als „technische Sprache“ bezeichnet, ist eines der zentralen Ziele von ASE. Erst durch eine solche gemeinsame Kommunikationsbasis wird die zielgerichtete Produktentstehung höchst interdisziplinärer Systeme, beispielsweise automatisierte Fahrzeuge, Smart Homes oder Systeme zur nachhaltigen Energieversorgung, ermöglicht. (Albers, 2023)

Als zentrale Aktivität der Produktentstehung ist Validierung der Garant für ein erfolgreiches Produkt im Markt (Albers, 2010). Unzureichende Validierung von Produkten kann unter anderem zu extremen Kosten führen. Die Explosion der Trägerrakete Ariane 5, Nr. 501 verursachte 1996 beispielsweise einen Schaden von 370 Mio. US\$. Grund dafür war die Übernahme von Software aus der Vorgängergeneration, welche im neuen System und im Zusammenspiel mit neuen Komponenten und Funktionen nicht ausreichend validiert wurde (Le Lann, 1996). Aktuelle Beispiele lassen sich zudem in wiederkehrenden Software-Fehlern in der Automobilindustrie (beispielsweise beim VW Golf 8 (Knecht, 2022, 20. Juni) oder bei der Full-Self-Driving Software von Tesla (Habdank, 2023, 03. Oktober)) und damit verbundener zwingender Software-Updates, Werkstatt-Besuche der Kunden oder gar Rückrufaktionen finden. Insbesondere für die Automobilentwicklung zeigt zudem eine weltweite Umfrage von McKinsey, dass nach Einschätzung von Experten im aktuellen Forschungs- und Entwicklungsfeld des automatisierten Fahrens die Kosten zur Durchführung von Validierungsaktivitäten für höhere Automatisierungsstufen den größten Anteil an den Entwicklungskosten ausmachen (siehe Abbildung 1.3).

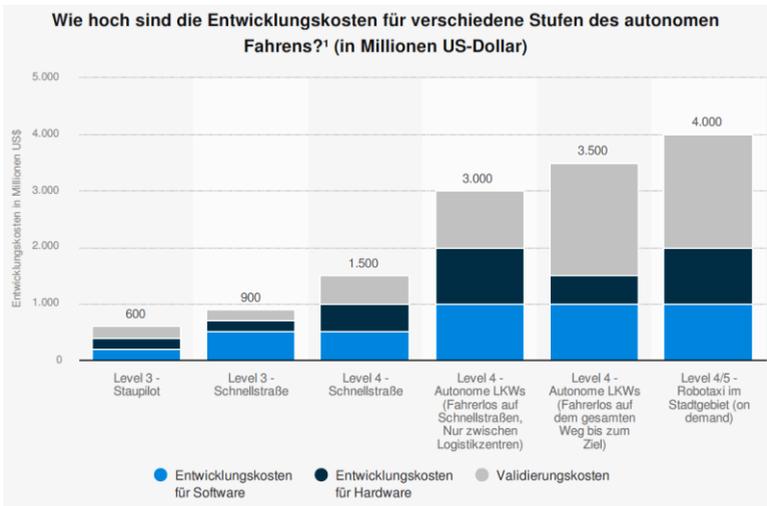


Abbildung 1.3: Entwicklungskosten für verschiedene Stufen des autonomen Fahrens nach einer McKinsey Studie mit 75 Befragten weltweit. Insbesondere für höhere Level der Automatisierung nehmen nach Meinung der Befragten die Validierungskosten stark zu und machen einen Großteil der Entwicklungskosten aus (adaptiert nach McKinsey, 2021, 25. Juli)

Neben hohen Kosten und Imageverlust für die entwickelnden Unternehmen kann unzureichende Validierung allerdings auch eine Gefahr für die Gesundheit von Nutzenden eines Systems bedeuten. Auch wenn die Ursachen derartiger Probleme oftmals spezifischen Disziplinen wie der Software zugeordnet werden, sind sie vielmehr ein Ausdruck der Schwierigkeiten der interdisziplinären Zusammenarbeit unterschiedlicher Disziplinen über verschiedene Produktgenerationen (siehe bspw. Le Lann, 1996).

In der ASE-Strategie zur Gestaltung des zukünftigen Engineerings in Deutschland, wird die Ermöglichung der Validierung komplexer Systeme als ein Handlungsfeld ausgegeben (Albers, Dumitrescu et al., 2022). Aufgrund dieser herausragenden Bedeutung der Validierung im Produktentstehungsprozess und vor dem Hintergrund der stetig steigenden Komplexität von Advanced Systems, gilt es daher die Validierung im Produktentstehungsprozess methodisch zu unterstützen.

1.2 Fokus der Arbeit

Verifikation und Validierung ist eines der zentralen Handlungsfelder für das Leitbild ASE (Albers, Dumitrescu et al., 2018). Zudem ist Validierung die zentrale Aktivität der Produktentstehung (Albers, 2010), allerdings auch die herausforderndste und aufwendigste (Albers, Behrendt, Klingler & Matros, 2016). Insbesondere vor dem Hintergrund der steigenden Komplexität und Interdisziplinarität heutiger Systeme und gemäß des Leitbilds ASE, bieten sich zur methodischen Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess Ansätze des Systems Engineering, insbesondere des MBSE an. Untersuchungen für diese Arbeit zeigen jedoch, dass Validierung bislang unzureichend von existierenden MBSE-Ansätzen adressiert wird.

Gleichzeitig stellt die Ausrichtung von Methoden, Werkzeugen und Hilfsmittel an den Bedarfen der beteiligten Menschen im Mittelpunkt des Produktentstehungsprozess ein zentrales Thema des Leitbilds ASE dar. Wie die Analysen dieser Arbeit zeigen, finden jedoch insbesondere MBSE-Ansätze noch keine weitgehende Akzeptanz in der (industriellen) Anwendung.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer MBSE-Methodik zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess komplexer technischer Systeme wie Advanced Systems. Dabei soll die Kollaboration von Personen aus unterschiedlichen Disziplinen auf einer interdisziplinären Vernetzungsebene ermöglicht werden (siehe Abbildung 1.4). Durch menschenorientierte, skalierbare und modulare Prozesse, Methoden und Tools sollen die Kommunikation und der Austausch dieser Personen bedarfsgerecht auf einer gemeinsamen Basis unterstützt werden. Ergebnisse und Erkenntnisse dieser übergreifenden Kommunikation fließen wieder zielorientiert und konsistent in die Disziplinspezifische Entwicklung ein.

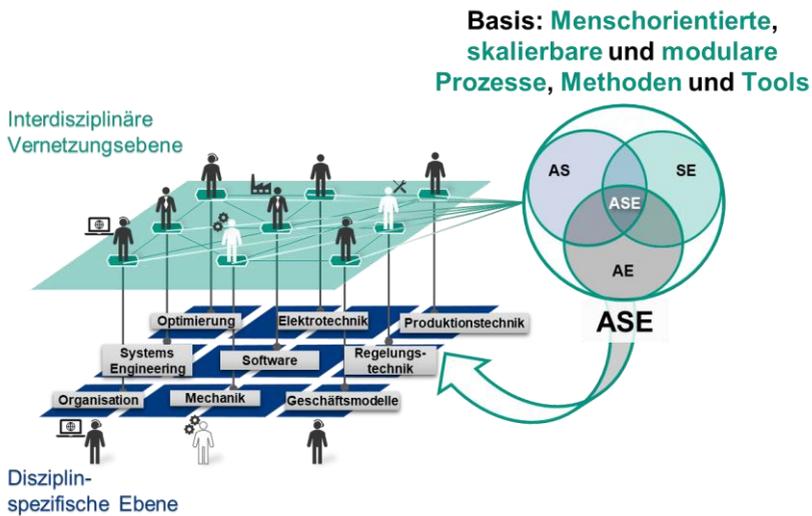


Abbildung 1.4: Durch menschenorientierte, skalierbare und modulare Prozesse, Methoden und Tools wird die Kollaboration auf einer interdisziplinären Vernetzungsebene ermöglicht (Darstellung angelehnt an Albers, 2023)

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.5 dargestellt. Zunächst wird der relevante Stand der Forschung analysiert (Kapitel 2). Der Fokus liegt dabei auf der Beschreibung und Modellierung des Produktentstehungsprozesses im Verständnis der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung, der Bedeutung und des Verständnisses der Validierung im Produktentstehungsprozess sowie des Advanced Systems Engineering (ASE) und Model-Based Systems Engineering (MBSE). Zudem werden für die Arbeit betrachtete im Stand der Forschung beschriebene MBSE-Ansätze vorgestellt. Vor dem Hintergrund des Stands der Forschung wird der Forschungsgegenstand der Arbeit konkretisiert. Aus dem konkretisierten Forschungsgegenstand werden der Forschungsbedarf und die Zielsetzung der Arbeit abgeleitet (Kapitel 3). Zur Adressierung des Forschungsbedarfs und Erreichung der Zielsetzung werden Forschungsthesen sowie Forschungsfragen formuliert. In Kapitel 4 wird das Forschungsvorgehen vorgestellt. Das Forschungsvorgehen ist dabei stark iterativ. So wird in Kapitel 5

zunächst das initiale Zielsystem zur Beantwortung der Forschungsfragen herausgearbeitet. In Kapitel 1 werden initiale Lösungen der Forschungsfragen vorgestellt und anhand von Untersuchungen evaluiert. Die initialen (Teil-)Ergebnisse zu den Forschungsfragen werden in Kapitel 7 weiterentwickelt und zu einer ganzheitlichen Lösung, einer MBSE-Methodik, zusammengeführt. Hierbei werden die Ergebnisse der initialen Evaluationen berücksichtigt. Diese ganzheitliche Lösung wird anhand dreier weiterer Fallstudien bzw. Interviewstudien hinsichtlich der aufgestellten Ziele sowie Forschungsthesen der Arbeit evaluiert (Kapitel 8). Zudem wird ein Schulungskonzept für die entwickelte Lösung und dessen Anwendung mit Studierenden vorgestellt (Kapitel 9). Dies dient gleichzeitig als zusätzliche Evaluation der entwickelten Ergebnisse. In Kapitel 10 werden die Ergebnisse der Arbeit schließlich zusammengefasst und diskutiert. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf anknüpfende Forschungsarbeiten (Kapitel 11).

1	Motivation	
2	Stand der Forschung	
3;4	Forschungsbedarf - Forschungsvorgehen	
5	Zielsystem der MBSE-Methodik	
6;7	Entwicklung der MBSE-Methodik	
8;9	Implementierungs- und Lehrestudien	
10;11	Zusammenfassung – Fazit - Ausblick	

Abbildung 1.5: Aufbau der Arbeit

2 Stand der Forschung

2.1 Der Produktentstehungsprozess – Grundbegriffe

In diesem Absatz werden Grundbegriffe zum Verständnis des Produktentstehungsprozesses in der Karlsruher Schule für Produktentwicklung (KaSPro) eingeführt. Dabei werden zunächst die Systemtheorie und die Beschreibung des Produktentstehungsprozesses mittels des Ziel-, Handlungs-, Objektsystem- (ZHO) Modells erläutert. Anschließend werden der Innovationsbegriff und dessen Bedeutung in der Produktentstehung eingeführt. Zusätzlich wird mit dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers ein Modell für das Verständnis und die Beschreibung grundlegender Phänomene der Produktentstehung erläutert. Schließlich werden verschiedene Begrifflichkeiten, welche im Stand der Forschung für die methodische Unterstützung im Produktentstehungsprozess verwendet werden, gegenübergestellt, um ein konsolidiertes Verständnis für die vorliegende Dissertation zu etablieren.

2.1.1 Systemtheorie und ZHO-Modell

Der Produktentstehungsprozess lässt sich auf Basis der Systemtheorie der Technik beschreiben. Nach Ropohl (2009) umfasst der Systembegriff drei Konzepte (siehe Abbildung 2.1): das funktionale Konzept, das strukturelle Konzept und das hierarchische Konzept. Nach dem funktionalen Konzept stellt ein System eine „black box“ dar, welche Eingangsgrößen (Inputs) in Ausgangsgrößen (Outputs) wandelt und dabei verschiedene Zustände einnimmt. Das strukturelle Konzept beschreibt, dass ein System als eine Gesamtheit verknüpfter Elemente zu betrachten ist, die zusammen eine andere Qualität als die reine Summe der Elemente aufweisen. Dieser Effekt wird als Emergenz bezeichnet. Schließlich beschreibt das hierarchische Konzept, dass die Teile eines Systems wiederum als eigene (Sub-) Systeme angesehen werden können.

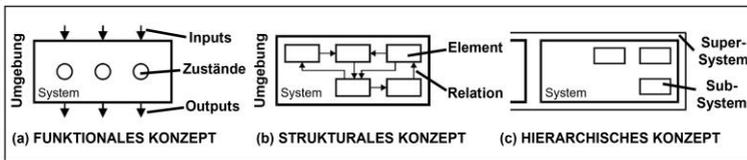


Abbildung 2.1: Die drei Systemkonzepte nach Ropohl (adaptiert nach Ropohl, 2009, S. 76)

Zum Verständnis der Produktentstehung basierend auf der Systemtheorie ist die Bildung eines Modells nötig. Gemäß Stachowiak, stellt ein Modell eine abstrahierte Beschreibung der Realität dar (Stachowiak, 1973). Modelle sind dabei durch drei Merkmale gekennzeichnet (Stachowiak, 1973, 131ff):

- **Abbildungsmerkmal**: Modelle sind Abbildungen bzw. Repräsentationen von Originalen. Letztere können selbst wiederum Modelle sein
- **Verkürzungsmerkmal**: Modelle erfassen im Allgemeinen nur die Attribute eines Originals, die für den Modellierungszweck bzw. den Modellnutzenden relevant sind und nicht alle Attribute des Originals
- **Pragmatisches Merkmal**: Modelle erfüllen eine Ersetzungsfunktion für Modellnutzende, innerhalb eines bestimmten Zeitraums und eingeschränkt auf bestimmte (gedankliche oder tatsächliche) Operationen

Nach Albers (2010) lässt sich der Produktentstehungsprozess als ein komplexes System, bestehend aus den drei Sub-Systemen Zielsystem (Z), Handlungssystem (H) und Objektsystem (O), modellieren. Hierfür wird die Bezeichnung ZHO-Modell verwendet. Das Zielsystem beinhaltet dabei alle Ziele und Randbedingung für ein Produkt inklusive deren Wechselwirkungen. Es wird, ausgehend von einem initialen Zielsystem zu Beginn der Entwicklung, über den Produktentstehungsprozess kontinuierlich erweitert und konkretisiert. Das Objektsystem enthält das finale Produkt sowie alle Artefakte (bspw. Dokumente, Modelle), die während des Produktentstehungsprozesses entstehen. Das Handlungssystem enthält alle Ressourcen sowie Aktivitäten, Methoden und Prozesse, die zur Realisierung der Produktentstehung benötigt werden. Es ist dabei als sozio-technisches System zu verstehen. (Albers, 2010; Albers, Behrendt et al., 2016; Albers, Behrendt, Klingler, Reiss & Bursac, 2017)

Der Produktentstehungsprozess kann demnach als kontinuierliche Überführung des (zunächst vagen) Zielsystems in das Objektsystem durch das Handlungssystem beschrieben werden (Albers, 2010). In Abbildung 2.2 ist dies als kontinuierliches Wechselspiel zwischen Analyse und Synthese im Produktentstehungsprozess beschrieben. Demnach synthetisiert das Handlungssystem aufbauend auf einer

Wissensbasis das Zielsystem. Die Analyse des Zielsystems führt zu einem Lösungsraum für das Handlungssystem auf dessen Basis das Objektsystem synthetisiert wird. Die Analyse des Objektsystems führt wiederum zur Erweiterung der Wissensbasis und stößt die Konkretisierung und Erweiterung des Zielsystems an.

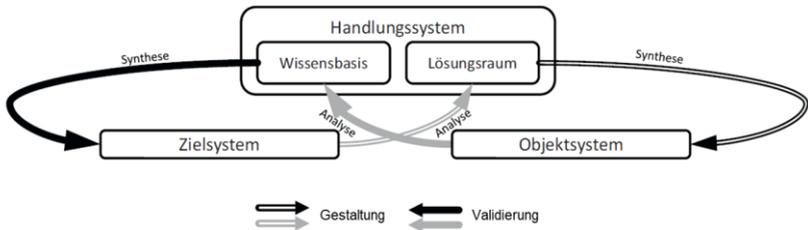


Abbildung 2.2: Kontinuierliches Zusammenspiel zwischen Analyse und Synthese im erweiterten ZHO-Modell (adaptiert nach Albers, Behrendt et al., 2016, S. 544)

Im Zuge der Betrachtung und Beschreibung von Produktentstehungsprozessen fällt häufig der Begriff Innovation in Bezug auf die zu entwickelnde Produkte. Der Begriff wird dabei in Literatur und Anwendung jedoch sehr heterogen verwendet. Im nächsten Abschnitt wird daher der Innovationsbegriff und dessen Verständnis für die vorliegende Dissertation eingeführt.

2.1.2 Der Innovationsbegriff

Innovationen spielen eine entscheidende Rolle für den Erfolg von Unternehmen (Isaksson et al., 2019). Der Begriff der Innovation wird jedoch nicht nur in unterschiedlichen Forschungsgebieten (bspw. Wirtschafts- und Ingenieurwissenschaften), sondern selbst innerhalb der Forschung zur Produktentwicklung unterschiedlich verwendet (Isaksson et al., 2019). Isaksson et al. (2019) tragen unterschiedliche Definitionen zusammen und stellen fest, dass sich die meisten auf die Definitionen nach Schumpeter beziehen. Schumpeter (1927) beschreibt, dass Innovation nicht rein eine technische Neuerung, sondern ebenfalls eine wirtschaftliche Perspektive umfasst. Entsprechend diesem Verständnis ist Innovation daher eine technische Neuerung (auch Invention), die erfolgreich am Markt ist.

Für den Innovationsprozess inklusive des angestrebten Markterfolgs spielt daher die konsequente Berücksichtigung und Validierung des angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzens in der Produktentwicklung eine entscheidende

Rolle. (Albers, Heimicke et al., 2018). Zur deren Modellierung beschreiben Albers et al. das Produktprofil:

Definition Produktprofil

„Ein Produktprofil ist ein Modell eines Nutzenbündels, das den angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen für die Validierung zugänglich macht und den Lösungsraum für die Gestaltung einer Produktgeneration explizit vorgibt.

Ein Nutzenbündel wird hierbei verstanden als eine Gesamtheit aus Produkten und Dienstleistungen, welches mit dem Zweck erstellt wird, an einen Kunden verkauft zu werden und für ihn direkt oder indirekt – z.B. für von ihm berücksichtigte Anwender oder für seine Kunden – Nutzen zu stiften.“

(Albers, Heimicke et al., 2018, S. 255)

Die Autoren schlagen zudem ein Schema zur Modellierung von Produktprofilen vor (siehe Abbildung 2.3). Neben dem angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen werden hierbei auch weiterführende Informationen, wie Anwendungsfälle sowie Elemente des Referenzsystems mit beschrieben. Mit Hilfe der Modellierung des Produktprofils können diese Informationen bereits frühzeitig im Produktentstehungsprozess expliziert werden. Damit stehen das Produktprofil und die darin beschriebenen Informationen frühzeitig zur kontinuierlichen Validierung und Erweiterung über den gesamten Produktentstehungsprozess zur Verfügung, um die Entwicklung von Produkten mit hohem Innovationspotenzial zu unterstützen. Albers und Heimicke et al. (2018) erweitern schließlich das Innovationsverständnis nach Schumpeter. Demnach basiert eine Innovation auf einem Produktprofil, welches durch die Invention technisch realisiert wird und durch eine erfolgreiche Markteinführung komplettiert wird.

Produktclaim <i>Wir brauchen ein Produkt, das...</i>		Bild  <small>Link für zusätzliche Informationen</small>
Initiale Produktbeschreibung <ul style="list-style-type: none"> ■ Produkteigenschaften ■ Hauptfunktionen / Kundenfunktionen ■ USP (Alleinstellungsmerkmal) ■ ... 		
Referenzprodukte <ul style="list-style-type: none"> ■ Referenzprodukte aus <ul style="list-style-type: none"> ■ Vorgänger Produktgeneration ■ Eigenem Unternehmen ■ Gleicher/anderer Branche 	Use Cases <ul style="list-style-type: none"> ■ In welchem Kontext wird dieses Produkt eingesetzt? ■ Wie interagiert der Kunde / Anwender mit dem Produkt? ■ ... 	
Anbiertennutzen <ul style="list-style-type: none"> ■ Strategischer Einsatz ■ Passt zu Unternehmensphilosophie, Marke, ... ■ Erweiterung Produktportfolio ■ Geschäftsmodell ■ Ressourcen ■ Nutzbare Kernkompetenzen 	Kundennutzen <ul style="list-style-type: none"> ■ Customer Pain – das Problem aus Sicht eines Kunden ■ Wie wird das Produkt dem Kunden nutzen? ■ Zielgruppe / Marktsegment 	Anwendernutzen <ul style="list-style-type: none"> ■ User Pain – das Problem aus Sicht eines Anwenders ■ Wie wird das Produkt dem Anwender nutzen? ■ Zielgruppe
Wettbewerbssituation <ul style="list-style-type: none"> ■ Wettbewerb ■ Marktanteile ■ Patentsituation ■ Konkurrierende Produkte 	Nachfrage <ul style="list-style-type: none"> ■ Beschreibung des Kunden / Anwenders ■ Märkte ■ Marktpotential / Marktgröße ■ Trends / Zukunftsszenarien 	
Validierung des ... durch <ul style="list-style-type: none"> ■ z.B. des Customer Pain und User Pain durch Interviews ■ z.B. der Patentsituation durch eine Patentanalyse mit Fokus auf Europa ■ ... 		
Rahmenbedingungen / Einschränkungen <ul style="list-style-type: none"> ■ Gesetzliche Rahmenbedingungen ■ Standards ■ Strategische Partnerschaften ■ ... 		

Abbildung 2.3: Vorlage zur Modellierung des Produktprofils (adaptiert nach Albers, Heimicke et al., 2018, S. 257)

Ein Bestandteil der Modellierung des Produktprofils ist die Beschreibung eines Referenzsystems aus (Teil-) Systemen beispielsweise von Vorgänger- oder Konkurrenz-Produkten. Die Beschreibung des Referenzsystems basiert auf Beobachtungen, dass Produkte – auch solche, die retrospektiv als hoch innovativ bezeichnet werden – immer auf Basis von Referenzen entwickelt werden. Diese Beobachtungen werden mit dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung, beschreibbar gemacht.

2.1.3 Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung

Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers macht fundamentale Phänomene in der Entwicklung von Systemen beschreibbar (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015; Albers & Rapp, 2022). Es baut auf der grundlegenden Beobachtung auf, dass die Entwicklung neuer Produkte immer auf Basis von Elementen eines Referenzsystems erfolgt (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015; Albers, Rapp et al., 2019a). Das Referenzsystem für die Entwicklung einer Systemgeneration setzt sich dabei aus Elementen, welche bereits existierenden oder geplanten sozio-technischen Systemen entstammen, zusammen (Albers, Rapp et al., 2019a). Diese Referenzsystemelemente (RSE) sind Grundlage und Ausgangspunkt der Entwicklung einer neuen Systemgeneration (Albers, Rapp et al., 2019a).

Nach dem Modell der SGE kann die Entwicklung eines neuen Systems basierend auf einem Referenzsystem immer auf Basis der drei Variationsarten „Übernahmevariation (ÜV)“, „Ausprägungsvariation (AV)“ und „Prinzipvariation (PV)“ beschrieben werden (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015; Albers, Rapp et al., 2020). Die Variationsarten werden dabei folgendermaßen definiert:

Definition Übernahme-, Ausprägungs- und Prinzipvariation

- „Übernahmevariation (ÜV): Ein Element aus dem Referenzsystem wird in die neue Systemgeneration übernommen, wobei das Innere dieses Elements als "Black Box" betrachtet wird und Anpassungen entsprechend den Anforderungen der Systemintegration und den Randbedingungen an den Schnittstellen vorgenommen werden. “
- „Ausprägungsvariation (AV): Die Verknüpfung der Elemente des Referenzsystems wird bei der neuen Systemgeneration beibehalten. Das Lösungsprinzip bleibt also gegenüber dem Referenzsystem unverändert. Allerdings werden die Attribute der Elemente variiert."
- „Prinzipvariation (PV): Elemente des Referenzsystems und ihre Verknüpfungen werden variiert, indem Elemente und Verknüpfungen entfernt oder hinzugefügt werden. So wird ein neues Lösungsprinzip realisiert, das im Vergleich zum Referenzsystem [hinsichtlich dessen Elementen und deren Beziehungen, Anmerkung des Verfassers] neu ist."

(Albers, Fahl et al., 2020, S. 2241; eigene Übersetzung)

In Abbildung 2.4 sind die oben erläuterten Zusammenhänge beispielhaft schematisch visualisiert. Bei der Entwicklung des Tesla Roadster stammen Elemente des Referenzsystems unter anderem aus bestehenden Laptops (Batterie/Akku-Einheit) und dem Lotus Elise (Chassis). Zwischen diesen RSE bestehen Wechselwirkungen. Für den Tesla Roadster muss bspw. das Chassis hinsichtlich des neuen Massenschwerpunkts (durch die Verwendung einer Batterie im Fahrzeug) angepasst werden. Insgesamt ergibt sich die Entwicklung des Tesla Roadster als Kombination aus ÜV, AV und PV von Elementen des Referenzsystems.

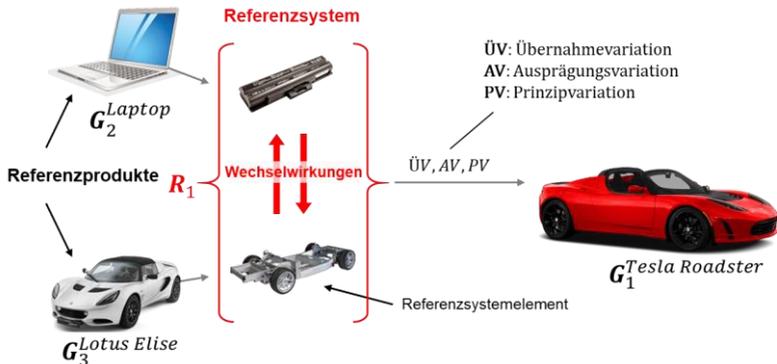


Abbildung 2.4: Beispielhafte schematische Darstellung der Verwendung des Modells der SGE zur Beschreibung der Entwicklung des Tesla Roadster (adaptiert nach Albers, Rapp et al., 2019b, S. 11)

Das Modell der SGE ist sowohl zur Beschreibung von unterschiedlichen Systemgenerationen und deren Bezug zu Elementen des entsprechenden Referenzsystems als auch zur detaillierteren Beschreibung der Entwicklung innerhalb einer Systemgeneration anwendbar. Dabei können verschiedene Entwicklungsinkremente mit fortschreitendem Reifegrad während der Entwicklung einer Systemgeneration mit dem Modell der SGE beschrieben werden (Albers & Rapp, 2022). In diesem Fall wird die Bezeichnung „Entwicklungsgeneration (EG)“ verwendet (Albers, Fahl et al., 2020).

Die Nutzung von Referenzen wird zudem in weiteren Methoden zur Unterstützung des Produktentstehungsprozesses beschrieben, auch wenn diese das Modell der SGE nicht explizit inkludieren (Albers & Rapp, 2022). So beschreiben beispielsweise Weber und Husung (2016) den Ansatz der Nutzung von Lösungsmustern als Aggregation von Eigenschaften und Merkmalen sowie deren bekannter Beziehungen und implizierter externer Randbedingungen in der Produktentwicklung. Dabei bezeichnen Merkmale direkt beeinflussbare Größen eines Systems wie Form, Dimensionen, Material (Weber & Husung, 2016).

Eigenschaften hingegen bezeichnen das Verhalten, z.B. Funktion, Sicherheit und Zuverlässigkeit, die sich aus den Merkmalen und deren Wechselwirkung ergeben und nicht direkt in der Produktentstehung beeinflusst werden können (Weber & Husung, 2016). Die Autoren stellen dabei die Hypothese auf, dass die überwiegende Mehrzahl von Entwicklungsprozessen aus der Kombination bekannter Lösungsmuster bestehe (Weber & Husung, 2016). Auch Anacker, Dumitrescu, Kharatyan und Lipsmeier (2020) beschreiben die Dokumentation und Wiederverwendung von Lösungswissen im Systems Engineering (siehe Absatz 2.3.3) mittels Lösungsmustern.

Es zeigt sich somit, dass die explizite Berücksichtigung von Referenzen im Modell der SGE aber auch in weiteren Arbeiten zur Beschreibung des Produktentstehungsprozesses Verwendung findet. Das Modell der SGE liefert jedoch, mittels der beschriebenen Variationsarten, über die reine Beschreibung hinaus mathematisch begründete Handlungsanweisungen zur Arbeit mit Elementen eines Referenzsystems. Die Betrachtung von Referenzen fließt somit auch in die Entwicklung methodischer Unterstützung im Produktentstehungsprozess ein. Für diese methodische Unterstützung finden sich in der Literatur jedoch eine Vielzahl, teilweise heterogen verwendeter Einsatzgebiete und Begrifflichkeiten. Im nächsten Absatz wird daher ein Begriffsverständnis zur methodischen Unterstützung im Produktentstehungsprozess für die KaSPro konsolidiert.

2.1.4 Methodische Unterstützung im Produktentstehungsprozess – Begriffsverständnis und Abgrenzung

Zur Beschreibung einer methodischen Unterstützung im Produktentstehungsprozess finden sich in der Literatur unterschiedliche Begriffe, die nicht konsistent verwendet bzw. angewendet werden (Gericke, Eckert & Stacey, 2017). Gericke et al. (2017) analysieren den Begriff der (Entwicklungs-)Methode. Diese ist demnach eine Beschreibung, wie ein festgelegtes Ergebnis erzielt werden soll. Dies kann unter anderem Beschreibungen der Eingangsgrößen der Methode oder der zu verwendenden Werkzeuge beinhalten. Die Autoren setzen den Begriff der Methode zudem in Bezug zu anderen Begriffen (siehe Abbildung 2.5). Demnach integriert eine (Entwicklungs-) Methodik Methoden, Leitfäden und Tools, die alle auch unabhängig von der Methodik existieren können und deren Einsatz und Nutzung gemäß einem Prozess organisiert werden. Der Prozess ist dabei eine formalisierte Beschreibung eines Ablaufs von (geplanten oder tatsächlich durchgeführten) Aktivitäten in der Entwicklung. Leitfäden enthalten beispielsweise Regeln oder Best Practices zur Beschreibung, was in bestimmten beschriebenen Situationen bei der Entwicklung zu tun ist. Tools bzw. Werkzeuge werden bei der Durchführung von

Aktivitäten verwendet und können entweder spezifisch für eine Methode, einen Leitfaden oder einen Prozess sein, oder generisch und zur Durchführung unterschiedlicher Methoden, Leitfäden und Prozesse verwendet werden. Der Begriff Ansatz wird nicht zusätzlich definiert und teilweise analog zu Methodik verwendet. (Gericke et al., 2017)

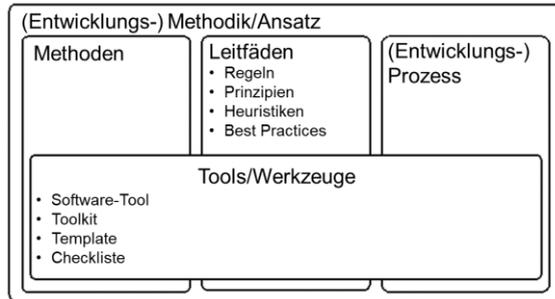


Abbildung 2.5: Zusammenhang zwischen Methode und weiteren verwandten Begriffen (adaptiert und übersetzt nach Gericke et al., 2017, S. 106)

Auch Estefan (2007) beschreibt die Begriffe Methode, Prozess und Tools/Werkzeuge im Zusammenhang mit anderen Begriffen (siehe Abbildung 2.6).

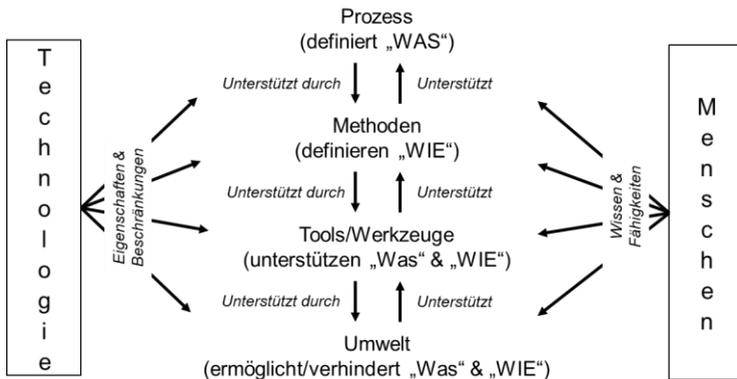


Abbildung 2.6: Zusammenhang zwischen Methode und weiteren verwandten Begriffen (adaptiert und übersetzt nach Estefan, 2007, S. 3)

Wie bei Gericke et al. (2017) bezeichnet nach Estefan ein Prozess „was“ zu tun ist, während die Methode beschreibt, „wie“ die Aktivität auszuführen ist und damit den

Prozess unterstützt. Methoden und Prozesse werden wiederum von Tools/Werkzeugen unterstützt, die durch die Umwelt der Entwicklung ermöglich/verhindert werden. Als zusätzliche Einflussfaktoren und Beschränkungen nennt Estefan zudem die verfügbare Technologie und die Menschen, die die Prozesse und Methoden mit den Tools in der entsprechenden Umgebung durchführen. (Estefan, 2007)

Unter anderem bezugnehmend auf das „Process-oriented method model“ nach Birkhofer, Klobardanz, Berger und Sauer (2002), beschreiben Atzberger, Wallisch, Nicklas und Paetzold (2020) Begriffe und Zusammenhänge zu Methoden im Produktentstehungsprozess (siehe Abbildung 2.7).

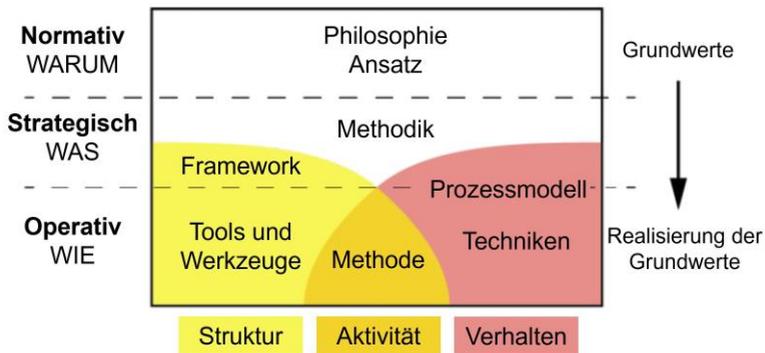


Abbildung 2.7: Zusammenhang zwischen Methode und weiteren verwandten Begriffen, adaptiert und übersetzt nach Atzberger et al. (2020, S. 469)

Das Ziel zum Aufbau des Begriffsverständnisses durch die Autoren ist eine Anwendung auf Konzepte aus der agilen Produktentwicklung, es wird jedoch auch eine allgemeinere Beschreibung der Begriffe diskutiert. Basierend auf Bleicher (1991) ordnen Atzberger et al. die diskutierten Begriffe in drei Ebenen: operativ bzw. „wie“, strategisch bzw. „was“ und normativ bzw. „warum“. Methoden beschreiben dabei, analog zu den obigen Ausführungen, auf der operativen Ebene, wie eine Aktivität auszuführen ist, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Die Ausführung kann durch Tools und Werkzeuge sowie Techniken, die mit den oben beschriebenen Leitfäden nach Gericke et al. (2017) vergleichbar sind, unterstützt werden. Prozesse bzw. Prozessmodelle beschreiben, ebenfalls analog zu obigen Beschreibungen, auf der strategischen Ebene, was beziehungsweise welche Abfolge von Aktivitäten durchzuführen ist. Zusätzlich führen Atzberger et al. den Begriff „Framework“ ein. Frameworks stellen Rahmenwerke dar, mit Hilfe derer strukturell beschrieben wird,

welche Elemente, bspw. Tools und (Teil-) Methoden, für eine Methodik einzuführen und zu nutzen sind, ohne eine bestimmte Sequenz der Nutzung vorzugeben. Methoden hingegen zielen nach Atzberger et al. eher auf die Unterstützung einzelner Aktivitäten. Dahingehend verwenden Atzberger et al. den Begriff Methodik wie Gericke et al. (2017) zur Integration mehrerer genutzter Methoden sowie damit verbundener Tools, Werkzeuge, Techniken, Frameworks und Prozesse/Prozessmodelle für ein übergreifendes Ziel. Über einer Methodik steht auf der normativen Ebene noch eine Philosophie, die sich für ein Anwendungsfeld in Ansätzen ausprägt. Damit wird das „warum“ und somit die Auswahl geeigneter Methodiken bestimmt. (Atzberger et al., 2020)

Die oben aufgeführten Beschreibungen aus den drei Arbeiten überschneiden sich in großen Teilen, weisen jedoch auch einige Spezifika, in denen sie sich voneinander unterscheiden, auf. Daher wird an dieser Stelle das Verständnis der verwendeten Begriffe konsolidiert und für die Nutzung in der KaSPro aufbereitet. Der Begriff Methodik wird als Überbegriff für eine Sammlung von Methoden, Prozessmodellen bestehend aus Aktivitäten, Leitfäden, Werkzeugen und Frameworks hinsichtlich eines übergreifenden Ziels verwendet. Während Prozessmodelle dabei beschreiben, welche Aktivitäten zur Erreichung des Ziels auszuführen sind (was zu tun ist), beschreiben Methoden, wie die Aktivitäten durchzuführen sind, um das Ziel zu erreichen. Wichtig zu betonen ist, dass hierunter keine starren Abfolgen verstanden werden sollen, sondern Prozessmodelle und Methoden beim Einsatz der Methodik bedarfsgerecht ausgewählt und verwendet werden können. Die Durchführung von Methoden und Aktivitäten der Prozessmodelle wird durch den Einsatz von (Software-) Tools und weiteren Werkzeugen (bspw. Whiteboards) sowie Leitfäden unterstützt beziehungsweise sogar erst ermöglicht. Ein Framework beschreibt die Bestandteile der Methodik in einem statischen Rahmenwerk, ohne direkte Aussagen zu deren Anwendung zu liefern. Der Begriff Ansatz wird nicht einheitlich und eher offen verwendet. Daher wird Ansatz als abstrakter Sammelbegriff verwendet, wenn von bestehenden Methoden, Prozessen etc. beziehungsweise einer Zusammenführung dieser gesprochen wird, die nicht explizit als eine Methodik beschrieben werden.

Die verwendeten Begriffe werden bei der Einführung von MBSE – Model-Based Systems Engineering für ihren Einsatz in diesem Anwendungsgebiet nochmals weitergehend detailliert (siehe Absatz 2.7).

2.1.5 Zwischenfazit

In Absatz 2.1 wurden ausgewählte Grundbegriffe und Zusammenhänge eingeführt, die im weiteren Verlauf der vorliegenden Dissertation verwendet werden. Demnach

lässt sich der Produktentstehungsprozess als kontinuierliche Überführung eines Zielsystems in ein Objektsystem mittels eines Handlungssystems beschreiben (Albers, 2010). Diese Überführung wiederum lässt sich als Wechselspiel zwischen Analyse- und Synthese-Aktivitäten charakterisieren (Albers, Behrendt et al., 2016). Die Gestaltung beinhaltet die Analyse des Zielsystems und die darauf basierende Synthese von Elementen des Objektsystems. Die Validierung hingegen beschreibt die Analyse des Objektsystems und die Synthese von Elementen des Zielsystems zu dessen kontinuierlicher Erweiterung und Konkretisierung. Validierung spielt im Zuge des Innovationsprozesses eine entscheidende, gemäß Albers (2010) sogar die zentrale Rolle, um den angestrebten Anbieter-, Anwender- und Kundennutzen eines Produktes sicherzustellen und somit ein erfolgreiches Produkt am Markt zu ermöglichen. Um den Anbieter-, Anwender- und Kundennutzen frühzeitig und kontinuierlich der Validierung zugänglich zu machen und somit die Entwicklung von Produkten mit einem hohen Innovationspotenzial zu unterstützen, werden diese mit Hilfe des Produktprofils modelliert (Albers, Heimicke et al., 2018).

Die Entwicklung eines Produkts erfolgt gemäß dem Modell der SGE immer durch Variation von Elementen eines Referenzsystems (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015). Dieses Verständnis kann dabei sowohl für verschiedene Produktgenerationen als auch für einzelne Entwicklungsgenerationen eines Produkts herangezogen werden (Albers, Fahl et al., 2020). Zur Beschreibung der methodischen Unterstützung des Produktentstehungsprozesses wird im Stand der Forschung eine Vielzahl von Begrifflichkeiten verwendet. Im Verständnis der KaSPro fasst dabei eine Methodik Methoden, Prozessmodelle bestehend aus Aktivitäten, Leitfäden, Werkzeuge und Frameworks hinsichtlich eines übergreifenden Ziels zusammen (siehe Absatz 2.1.4).

Zur konkreten Modellierung und Ausgestaltung von Produktentstehungsprozessen existiert eine Vielzahl von Ansätzen und Modellen. Im folgenden Absatz wird daher zunächst auf die Betrachtung des Produktentstehungsprozesses als Problemlösungsprozess eingegangen. Zusätzlich werden bekannte Modelle zur Beschreibung des Produktentstehungsprozesses sowie Ansätze zum agilen Projektmanagement vorgestellt.

2.2 Modellierung von Produktentstehungsprozessen

Der Prozess der Produktentstehung kann als Problemlösungsprozess verstanden werden (Albers, 2010). Dementsprechend wird in diesem Absatz zunächst die universell anwendbare Problemlösungsmethodik SPALTEN vorgestellt, welche sich beispielsweise zur Strukturierung von methodischer Unterstützung im

Produktentstehungsprozess anwenden lässt. Anschließend wird auf die Modellierung von Produktentstehungsprozessen eingegangen und es werden bekannte und in Normen verankerte Modelle zur Strukturierung und Beschreibung von Produktentwicklungs- bzw. Produktentstehungsprozessen vorgestellt. Schließlich folgt eine Einführung in agile Ansätze zum Management von Produktentstehungsprozessen, insbesondere in das Agile Systems Design (ASD).

2.2.1 Produktentstehung als Problemlösung – die Problemlösungsmethodik SPALTEN

Gemäß Dörner (1979) ist ein Problem dadurch charakterisiert, dass eine Abweichung zwischen einem ungewünschten Anfangszustand und einem gewünschten Endzustand vorliegt, wobei eine Barriere die Überführung des Anfangs- in den Endzustand momentan verhindert. Im Produktentstehungsprozess können somit beispielsweise plötzliche Fehler oder unerwünschte Zustände von Komponenten, die in Tests auftreten, als Problem beschrieben werden (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016). Die effektive und effiziente Behebung derartiger Probleme im Produktentstehungsprozess kann durch systematische Problemlösungsmethodiken unterstützt werden (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016). Hierfür stellen Albers, Saak, Burkhardt und Schweinberger (2002) die Problemlösungsmethodik SPALTEN vor. SPALTEN steht dabei als Akronym für die einzelnen Schritte der Methodik (siehe Abbildung 2.8). Jeder Schritt ist dabei fraktal und kann wiederum durch SPALTEN beschrieben werden. Ein weiterer zentraler Bestandteil von SPALTEN ist das Problemlösungsteam, welches zur Durchführung der Methodik gebildet und nach jedem Schritt bedarfsgerecht angepasst wird. Gleichzeitig findet zwischen den Schritten jeweils ein Informationscheck statt, um zu überprüfen, ob alle relevanten Informationen für den nächsten Schritt verfügbar sind. Alle während der Durchführung von SPALTEN aufkommenden Ideen werden durchgängig im kontinuierlichen Ideenspeicher gesammelt, damit diese nicht verloren gehen. (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016)

Während SPALTEN als generische Problemlösungsmethodik auf unterschiedlichste Probleme angewendet werden kann, finden sich in Literatur und industrieller Anwendung eine Vielzahl von Modellen zur strukturierten Beschreibung des Produktentstehungsprozesses. Eine Auswahl dieser Modelle wird im folgenden Absatz vorgestellt.

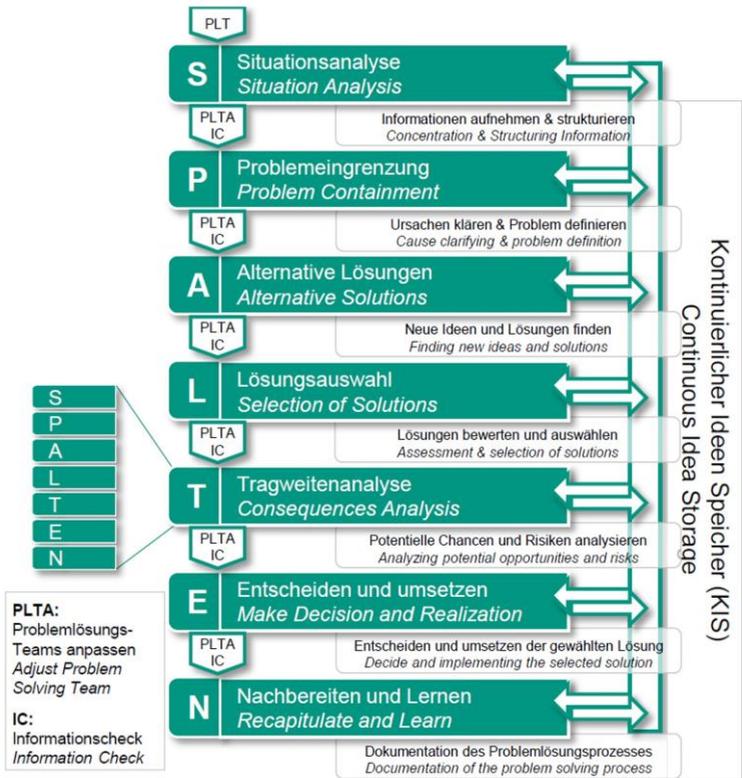


Abbildung 2.8: SPALTEN Problemlösungsmethodik (adaptiert nach Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016)

2.2.2 Modelle zur Beschreibung von Produktentstehungsprozessen

In Literatur und industrieller Praxis wird eine Vielzahl von Modellen zur Beschreibung des Produktentstehungsprozesses verwendet. Wie von Albers (2010) beschrieben, ist jedoch jeder Produktentstehungsprozess einzigartig und individuell. Die beschriebenen Modelle dürfen daher nicht als Blaupausen für jegliche Produktentstehungsprozesse verstanden werden, sondern dienen vielmehr der Unterstützung und Planung solcher. Wynn und Clarkson (2018) beschreiben zwei Dimensionen zur Klassifikation solcher Modelle. Die erste Dimension beinhaltet den

Geltungsbereich (Scope) der Modelle. Dieser wird unterschieden zwischen Mikro-Level (einzelne Schritte innerhalb eines Prozesses), Meso-Level und Makro-Level (komplette Projektstrukturen bzw. der Produktentstehungsprozess in seinem Kontext). Dabei wird zudem, bezugnehmend auf Blessing (1994), zwischen Phasenbasierten und Aktivitäten-basierten Modellen unterschieden. Phasen-basierte Modelle beschreiben einen eher linearen Ablauf einzelner Projektphasen. Aktivitäten-basierte Modelle hingegen adressieren den iterativen Problemlösungsprozess, der orthogonal dazu innerhalb der einzelnen Phasen in der täglichen Arbeit auftritt. Die zweite Dimension zur Einteilung der Modelle unterscheidet den Modelltyp. Modelltypen umfassen dabei unter anderem Prozedurale Modelle zur Beschreibung von Best Practices für eine bestimmte Situation im Produktentstehungsprozess oder abstrakte Modelle, die Theorien und Konzepte für Produktentstehungsprozesse zusammenfassen. Letztere dienen dabei eher zur Analyse bestehender Produktentstehungsprozesse, weniger zur direkten Unterstützung von Personen in diesen. (Wynn & Clarkson, 2018)

Im Folgenden werden mit dem V-Modell, dem integrierten Produktentstehungsmodell (iPeM) und dem Allgemeinen Modell der Produktentwicklung aus der VDI 2221:2019-11 drei Modelle für Produktentwicklungsprozesse vorgestellt.

V-Modell

Das V-Modell, unter anderem auch als „Systems Engineering Vee“ bezeichnet, ist ein weit verbreitetes Modell der mechatronischen Produktentwicklung und des Systems Engineering (siehe Absatz 2.3.3) (Scheithauer & Forsberg, 2013). So wird das V-Modell unter anderem in der VDI-Richtlinie 2206 beschrieben (siehe Abbildung 2.9, VDI-Richtlinie 2206:2021-11-00). Das V-Modell beschreibt dabei (im linken Schenkel) das Herunterbrechen beziehungsweise die Dekomposition des Systems und dessen Anforderungen. Basierend auf Bedarfen relevanter Stakeholder sowie Randbedingungen (vgl. Produktprofil in Absatz 2.1.2) werden Anforderungen an das System erhoben. Auf Grundlage der Anforderungen wird eine interdisziplinäre Systemarchitektur entwickelt und über verschiedene Systemhierarchieebenen konkretisiert. Die Systemarchitektur wird schließlich im Grund des Vs in den unterschiedlichen Disziplinen (Mechanik, Elektrik/Elektronik, Software etc.) in technische Lösungen umgesetzt. Diese Lösungen werden im rechten Schenkel zum Gesamtsystem integriert. Zwischen dem rechten und linken Schenkel werden fortlaufend Verifikations- und Validierungsaktivitäten durchgeführt (siehe Absatz 2.2.4). Über den gesamten Produktentstehungsprozess finden zudem parallel und kontinuierlich das Management der erhobenen Anforderungen sowie eine Modellierung und Analyse des Systems statt. (VDI-Richtlinie 2206:2021-11-00)

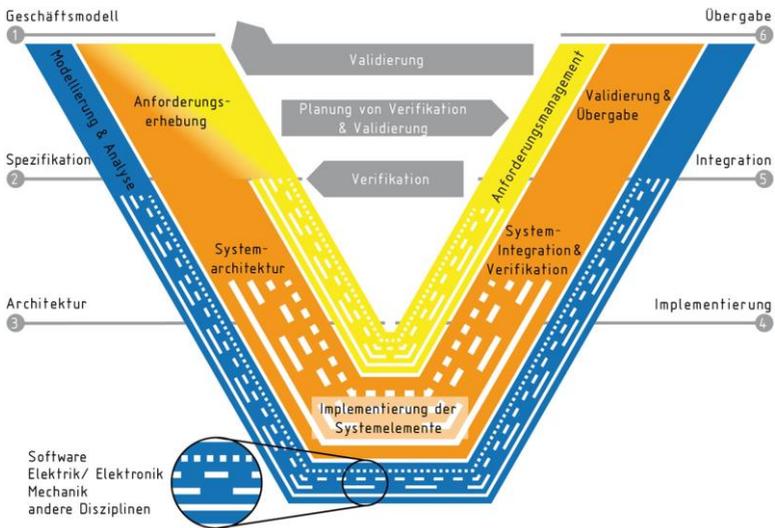


Abbildung 2.9: V-Modell aus VDI-Richtlinie 2206:2021-11-00, S. 22

In einigen Veröffentlichungen wird das V-Modell als zeitliches Ablaufmodell interpretiert (siehe bspw. Walden, Roedler, Forsberg, Hamelin & Shortell, 2015). Dies impliziert jedoch ein Wasserfall-artiges Vorgehen und ignoriert die in der Praxis anzutreffende und in Aktivitäten-basierten Modellen adressierte iterative und sprunghafte Durchführung von Aktivitäten im Produktentstehungsprozess. Scheithauer und Forsberg (2013) beschreiben zudem, dass der Systemkontext im V-Modell nicht ausreichend repräsentiert und die disziplinspezifische Entwicklung im Grund des Vs nicht tiefgehend beschrieben sei. Um den Schwächen des V-Modells zu begegnen, werden in der Literatur von unterschiedlichen Autoren Adaptionen und Erweiterungen vorgeschlagen (siehe bspw. Eigner, Roubanov & Zafirov, 2014, 42ff). Die aktuelle VDI-Richtlinie 2206 greift einige dieser Erweiterungen auf und integriert diese. So expliziert die Richtlinie, dass das V-Modell nicht als Ablaufmodell zu verstehen sei, sondern vielmehr ein Rahmenwerk zur Beschreibung und Vernetzung von Aufgaben im Produktentstehungsprozess (VDI-Richtlinie 2206:2021-11-00).

Trotzdem fehlt weiterhin eine explizite Beschreibung beziehungsweise Unterscheidung von Phasen und Aktivitäten im Modell (s.o.). Zudem bleiben Aspekte aus dem Modell der SGE und die Wiederverwendung und Variation von Elementen eines Referenzsystems unberücksichtigt. Dies wird mit dem integrierten Produktentstehungsmodell adressiert.

Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)

Auf Basis der Systemtheorie und des erweiterten ZHO-Modells (siehe Absatz 2.1.1) beschreiben Albers, Reiss, Bursac und Richter (2016) das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM). Das iPeM folgt dabei dem bereits beschriebenen Verständnis, dass sich Produktentwicklung als Überführung eines Zielsystems in ein Objektsystem mittels eines Handlungssystems beschreiben lässt. Es ist ein integriertes Meta-Modell, welches die relevanten Elemente zur Ableitung und Beschreibung situationsspezifischer Modelle von Produktentstehungsprozessen enthält. Das iPeM umfasst sowohl einen statischen Teil aus Aktivitäten der Produktentstehung als auch einen dynamischen Teil in Form eines Phasenmodells (siehe Abbildung 2.10). Damit wird, gemäß den oben erläuterten Beschreibungen, im iPeM eine Phasen- und Aktivitäten-basierte Modellierung integriert. Die im iPeM beschriebenen Aktivitäten der Produktentstehung werden in Basisaktivitäten (obere vier Aktivitäten in Abbildung 2.10, bspw. „Validieren und Verifizieren“) und Kernaktivitäten (untere Aktivitäten in Abbildung 2.10, bspw. „Profile finden“) aufgeteilt. Basisaktivitäten werden wiederkehrend und parallel zu den weiteren Aktivitäten der Produktentstehung durchgeführt, um diese zu unterstützen. Kernaktivitäten können wiederum auf beliebige Produktentstehungsprozesse angewendet werden. Zur Spezifizierung der einzelnen Aktivitäten wird im iPeM die SPALTEN-Problemlösungsmethodik vorgesehen (siehe Absatz 2.2.1). (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016)

Im iPeM wird, neben der Beschreibung der Entstehung eines Produkts, die parallele Beschreibung der Entstehung eines zugehörigen Validierungssystems, Produktionssystems und der Strategie sowie weiterer Produktgenerationen vorgesehen. Damit wird die parallele Entwicklung dieser Systeme in der Produktentstehung verdeutlicht und folglich die integrierte Modellierung der jeweiligen Entstehungsprozesse ermöglicht. Für die vorliegende Arbeit spielt dabei insbesondere die parallele Entwicklung von Produkt und Validierungssystem eine entscheidende Rolle. Das Validierungssystem enthält dabei alle entwickelten Elemente (Systeme, Methoden und Prozesse), die die Validierung des Systems ermöglichen (Albers, Mandel, Yan & Behrendt, 2018). Die Entwicklung des Validierungssystems kann als eigener Produktentwicklungsprozess verstanden werden, da beispielsweise ein Prüfstand ebenfalls geplant, entwickelt und validiert werden muss (Albers, Mandel et al., 2018).

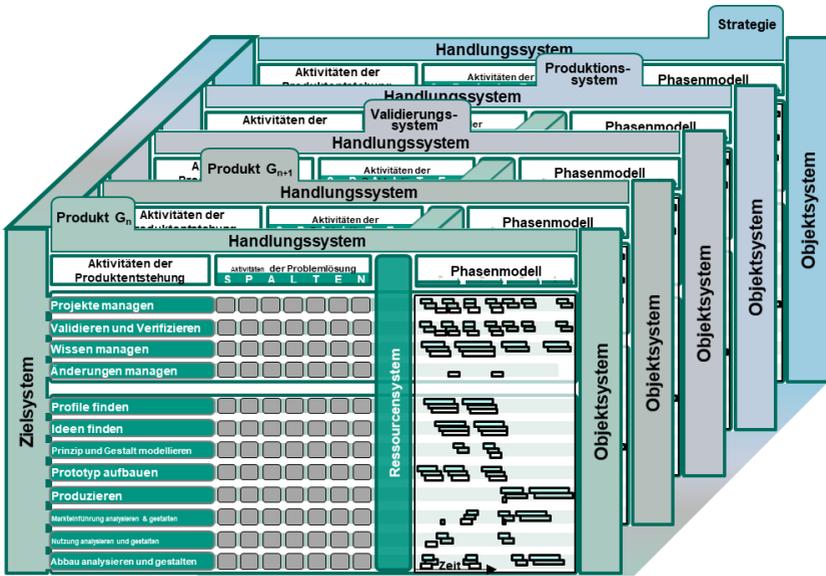


Abbildung 2.10: Das integriertes Produktentstehungsmodell (iPeM), adaptiert nach Albers, Reiss et al. (2016, S. 104)

Dass die Ansätze des iPeM auch Anwendung in weiteren Modellen aus der Praxis finden, zeigt das Allgemeine Modell der Produktentwicklung nach VDI 2221.

Allgemeines Modell der Produktentwicklung nach VDI 2221:2019-11

Das allgemeine Modell der Produktentwicklung nach der VDI-Richtlinie 2221:2019-11 besitzt einen ähnlichen Grundaufbau wie das iPeM (siehe Abbildung 2.11). Ähnlich der Unterteilung nach Ziel-, Handlungs- und Objektsystem im iPeM werden auch im allgemeinen Modell der Produktentwicklung die drei Bereiche Ziele, Aktivitäten und Phasen sowie Ergebnisse unterschieden. Wie im iPeM wird eine explizite Unterscheidung zwischen Aktivitäten und Phasen vorgenommen. Demnach können die aufgeführten Aktivitäten beliebig oft (oder auch gar nicht) während verschiedener Phasen des Produktentstehungsprozesses durchgeführt werden. Zudem wird im Modell durch die Pfeile zwischen Zielen und Ergebnissen die kontinuierliche Weiterentwicklung und Konkretisierung des Zielsystems abgebildet. (VDI-Richtlinie 2221:2019-11-00 Blatt 1; VDI-Richtlinie 2221:2019-11-00 Blatt 2)

Das Modell adressiert jedoch ausschließlich die Entwicklung des Produkts. Eine parallele Modellierung weiterer Systeme, wie Validierungssystem und Produktionssystem im iPeM, ist nicht vorgesehen.

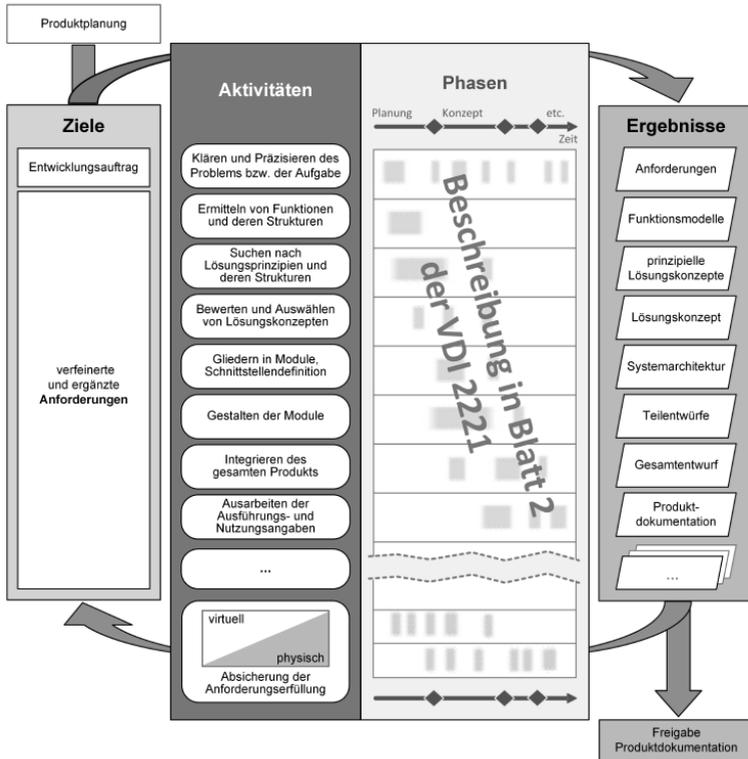


Abbildung 2.11: Allgemeines Modell der Produktentwicklung nach VDI-Richtlinie 2221:2019-11-00 Blatt 1, S. 31

Alle beschriebenen Modelle adressieren die Planung von Produktentwicklungs- beziehungsweise Produktentstehungsprozessen. Insbesondere bei der Entwicklung komplexer Produkte und bei häufig auftretenden Änderungen während des Produktentstehungsprozesses sind jedoch Flexibilität und das Reagieren auf unvorhergesehene Ereignisse essenziell (Thomke & Reinertsen, 1998). Daher rücken in der Produktentstehung zunehmend agile Ansätze der Produktentwicklung in den Fokus.

2.2.3 Agiles Projektmanagement und ASD – Agile Systems Design

Agile Ansätze stammen ursprünglich aus der Software-Entwicklung und basieren auf dem agilen Manifest nach Fowler und Highsmith (2001). Agile Entwicklungsansätze wie SCRUM (Schwaber & Sutherland, 2022) zielen auf eine flexible Projektdurchführung, inkrementelle Entwicklung und eine schnelle Reaktion auf sich ändernde Randbedingungen. In Bezug auf das ZHO-Modell (siehe Absatz 2.1.1) ist Agilität dabei definiert als:

Definition Agilität

„Agilität – basierend auf dem Verständnis des ZHO-Systemtripels – ist die Fähigkeit eines Handlungssystems, die Gültigkeit eines Projektplans hinsichtlich der Planungsstabilität der Elemente im ZHO-Triple kontinuierlich zu überprüfen, zu hinterfragen und bei Vorliegen einer ungeplanten Informationskonstellation eine situations- und bedarfsgerechte Anpassung der Sequenz aus Synthese- und Analyseaktivitäten umzusetzen, wodurch der Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen zielgerichtet erhöht werden.“

(eigene Übersetzung nach Albers, Heimicke, Müller & Spadinger, 2019, S. 10)

Albers, Heimicke et al. (2019) beschreiben, dass agile Entwicklungsansätze zunehmend auch in der mechatronischen Produktentwicklung eingeführt werden. Dort entstünden jedoch neue Herausforderungen beim Übertrag aus der Software-Entwicklung. Mit ASD – Agile Systems Design stellen die Autoren einen strukturierenden Ansatz zur agilen Entwicklung mechatronischer Systeme sowie der zugehörigen Validierungssysteme, Produktionssysteme und der Produktstrategie auf Basis des Modells der SGE vor. Kernbestandteil von ASD ist die situations- und bedarfsgerechte Auswahl und Kombination flexibler und strukturierender Prozesselemente im Produktentstehungsprozess. Für ASD werden auf Basis beobachteter Produktentwicklungsprozesse neun Grundprinzipien als übergeordnete Leitlinien zur Unterstützung von Entwickelnden im Produktentstehungsprozess formuliert (siehe Abbildung 2.12).

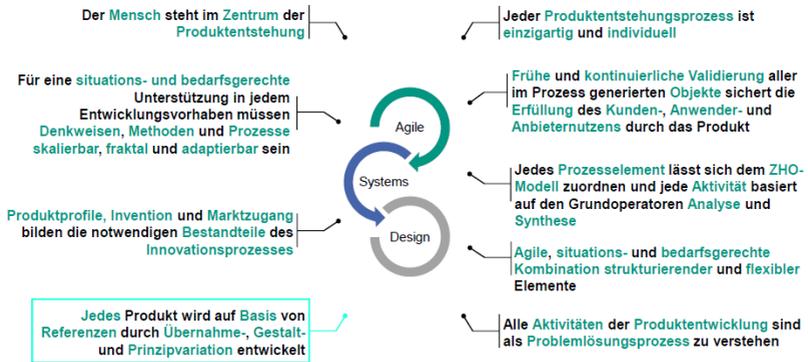


Abbildung 2.12: Neun Grundprinzipien des ASD (Albers, Heimicke et al., 2019; Darstellung nach Albers & Bursac, 2019)

2.2.4 Zwischenfazit

Für die Beschreibung des mechatronischen Produktentstehungsprozesses existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle. Eine Erkenntnis, die sich insbesondere in aktuellen Modellen zeigt, ist die Unterscheidung und Integration von statischen, Aktivitäten-basierten und dynamischen, Phasen-basierten Modellbestandteilen. In allen der vorgestellten Modelle nehmen Verifikation und Validierung eine zentrale Rolle ein. Dies verdeutlicht die Bedeutung der Durchgängigkeit und parallelen Entwicklung von Produkt und Validierungssystem über den gesamten Produktentstehungsprozess. Im V-Modell dienen Verifikation und Validierung zum kontinuierlichen Abgleich der implementierten Ergebnisse im „rechten Schenkel“ mit der disziplinübergreifenden Planung im „linken Schenkel“. Im iPeM wird die Aktivität „Verifizieren und Validieren“ als Basisaktivität definiert. Im Modell der VDI 2221 findet sich die Rückspiegelung der Ergebnisse zu den Zielen für deren Überprüfung und kontinuierlichen Erweiterung beziehungsweise Konkretisierung als Verifikations- / Validierungsaktivität. Auch im ASD ist ein zentrales Grundprinzip die frühe und kontinuierliche Validierung im Produktentstehungsprozess. Detaillierte Aussagen, wie die durchgängige und kontinuierliche Betrachtung der Entwicklung von Produkt und Validierungssystem methodisch unterstützt werden kann, werden in den vorgestellten Modellen jedoch nicht gegeben. Im folgenden Absatz wird daher die Bedeutung und Rolle der Validierung im Produktentstehungsprozess eingehender untersucht und erläutert. Zusätzlich wird der IPEK-X-int-the-Loop-Ansatz zur methodischen Unterstützung der Effektivität und Effizienz der Validierung im Produktentstehungsprozess eingeführt.

2.3 Validierung im Produktentstehungsprozess

Wie bereits in der Motivation zur vorliegenden Dissertation (Absatz 1.1) und im letzten Absatz beschrieben, nimmt die Validierung eine herausragende Bedeutung im Produktentstehungsprozess ein. Nach Albers (2010) stellt Validierung die zentrale Aktivität der Produktentstehung dar. In diesem Absatz wird daher zunächst die Bedeutung der Validierung im Produktentstehungsprozess nochmals eingehender beleuchtet. Anschließend wird der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz als Element der KaSPro zur Unterstützung einer effizienten und effektiven Validierung im Produktentstehungsprozess eingeführt.

2.3.1 Bedeutung der Validierung im Produktentstehungsprozess

Gemäß der VDI Richtlinie 2221:2019-11 ist bezogen auf technische Systeme Validierung zu verstehen als:

Definition Validierung

„[...] die Prüfung [...], ob das Produkt bezogen auf seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt. [...]“

(VDI-Richtlinie VDI 2221, S. 10)

Bei der Validierung fließen Erwartungshaltung von Anwendenden des technischen Systems und Fachexperten ein (VDI-Richtlinie 2221:2019-11-00 Blatt 1). Demgegenüber bezeichnet Verifikation nach der VDI Richtlinie 2221:

Definition Verifikation

„[...] die Überprüfung [...], ob eine Realisierung mit der Spezifikation übereinstimmt. [...]“

(VDI-Richtlinie VDI 2221, S. 11).

Während durch Verifikation umgangssprachlich somit die Frage „wird das Produkt richtig entwickelt?“ beantwortet wird, zielt Validierung umgangssprachlich auf die Beantwortung der Frage „wird das richtige Produkt entwickelt?“ (VDI-Richtlinie 2221:2019-11-00 Blatt 1). Nach Albers (2010) ist Validierung damit die einzige

Aktivität im Produktentstehungsprozess, bei der Wissen entsteht. Sie stellt somit die zentrale Aktivität der Produktentstehung dar und ermöglicht ein erfolgreiches Produkt im Markt (Albers, 2010).

Zur Verdeutlichung der Validierung und der Abgrenzung zur Verifikation sei als Beispiel die Problematik mit Klimaanlageanlagen im ICE3 aufgegriffen (Albers, Behrendt et al., 2016). In ICE3-Zügen kam es bei sehr hohen Außentemperaturen oftmals zu Ausfällen der Klimaanlageanlagen. Die Klimaanlageanlagen waren nur bis zu einer Temperatur von 32°C spezifiziert und dahingehend (vermutlich) verifiziert. Es liegt allerdings die Vermutung nahe, dass die Validierung dieser Spezifikation, also die Überprüfung, ob dies auch dem angestrebten Anwender- und Kundennutzen über die gesamte Lebensdauer des ICE3 entspreche, nicht ausreichend durchgeführt wurde. (Albers, Behrendt et al., 2016)

Das in Absatz 2.1.1 vorgestellte ZHO-Modell lässt sich aus Sichtweise der Validierung konkretisieren, auch um die Abgrenzung zur Verifikation zu verdeutlichen (siehe Abbildung 2.13). Dabei werden in der Darstellung die Systemumwelt und insbesondere die Stakeholder des Systems eingeführt. In der Systemumwelt ist dabei alles gesammelt, was nicht direkt Teil des ZHOs der Produktentstehung ist, aber mit diesen wechselwirkt und interagiert (Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger, 2015). Stakeholder sind Personen, Institutionen etc., die ein Interesse an einem System haben, bspw. durch das Stellen von Anforderungen an das System (Albers, Behrendt et al., 2016; Weilkens, 2014). Dies kann sowohl Elemente des Handlungssystems als auch Stakeholder in der Systemumwelt, wie Kunden, Wettbewerber oder die Gesetzgebung, umfassen.

Während des Produktentstehungsprozesses können an Elementen des Zielsystems sowohl Wissens- als auch Definitionslücken bestehen. Wissenslücken beschreiben, dass Informationen im Kontext der Systementwicklung nicht oder nur unvollständig oder unpräzise vorliegen. Neben bekannten und beschreibbaren Wissenslücken, können auch Wissenslücken existieren, die nicht bekannt und folglich im Produktentstehungsprozess auch nicht vorausschauend beschreibbar sind. Definitionslücken hingegen beschreiben Unsicherheiten aufgrund noch nicht getroffener Entscheidungen oder Spezifikationen im Produktentstehungsprozess. (Hastings & McManus, 2004)

Diese (bekannten) Wissens-/Definitionslücken können nur durch geeignete Validierungsmaßnahmen geschlossen werden. Im Verständnis des ZHO-Modells beschreibt Verifikation den reinen Abgleich zwischen Objektsystem und Zielsystem und kann somit als Teilaktivität der Validierung verstanden werden. Im Gegensatz zur Validierung kann die Durchführung der Verifikation oftmals formal und unter

objektiver Bewertung erfolgen. Für die Validierung kommen dabei jedoch zwei weitere grundlegende Aktivitäten hinzu: (subjektive) Bewertung und Objektivierung (Albers, Matros et al., 2015). Bewertung beschreibt eine Aktivität zur Untersuchung von Elementen des Objektsystems aus Stakeholder-Sicht. Diese erfolgt überwiegend subjektiv, beispielsweise für die „Fahrdynamik“ eines Fahrzeugs. Objektivierung bezeichnet einerseits die Überprüfung, inwieweit die Elemente des Zielsystems Erwartungen der Stakeholder objektiv wiedergeben. Gleichzeitig umfasst Objektivierung Maßnahmen zur Identifikation von Potenzialen zur Erhöhung der Objektivität des Zielsystems. Beispielhaft wäre somit die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen einem gemessenen Geräuschpegel im Fahrzeug-Innenraum und einer Bewertung von dessen Wahrnehmung durch eine fahrende Person eine Aktivität zur Objektivierung. Durch diese Beschreibungen wird nochmals deutlich, dass Validierung keine reine Analyse-Aktivität auf Basis des Objektsystems ist. Gleichzeitig dient Validierung zur Synthese, also zur kontinuierlichen Konkretisierung und Erweiterung des Zielsystems, um den Nutzen für die Stakeholder des Systems sicherzustellen. (Albers, Behrendt et al., 2016)

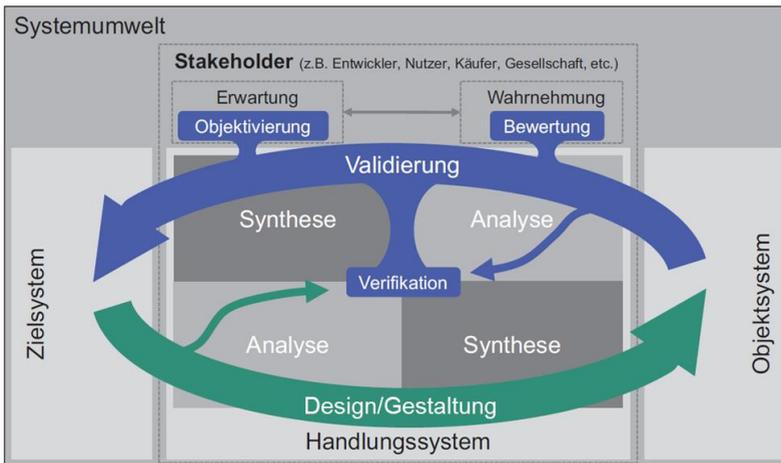


Abbildung 2.13: Erweitertes ZHO-Modell zur Darstellung der drei Bestandteile der Validierung und des Wechselspiels zum Design/Gestaltung im Produktentstehungsprozess (adaptiert nach Albers, Behrendt et al., 2016, S. 545)

Validierung muss früh und kontinuierlich über den Produktentstehungsprozess stattfinden (Albers, Behrendt et al., 2016). Dies zeigt sich plakativ anhand der sogenannten „Zehner-Regel“ oder auch „Rule of Ten“ (Ehrlenspiel und Meerkamm (2013), dort nach Clark und Fujimoto (1991)). Demnach erhöhen sich die Kosten

zur Beseitigung von Fehlern um den Faktor zehn mit fortschreitenden Phasen im Produktentstehungsprozess. Frühzeitige und kontinuierliche Validierung kann dabei unterstützen, diese Fehler früh im Produktentstehungsprozess zu erkennen und mit vergleichsweise geringen Kosten zu beheben (Albers, Behrendt et al., 2016).

Als Ansatz zur effizienten Durchführung von Validierungsaktivitäten beschreiben Albers et al. das Pull-Prinzip der Validierung und dessen Vorteile im Vergleich zum Push-Prinzip (Albers, Matros et al., 2015; Albers, Behrendt et al., 2016). Beim Push-Prinzip werden erst Aktivitäten mit direktem Bezug zum Produkt (im iPeM auf dem Produktlayer modelliert, siehe Absatz 2.2.2) wie das Erarbeiten von Produktprofilen und Ideen sowie die Ausarbeitung von Prinzip und Gestalt durchgeführt (primäre Aktivitäten). Erst nachgelagert werden sekundäre Aktivitäten zur Auswahl beziehungsweise zum Aufbau geeigneter Validierungsumgebungen durchgeführt. Beim Pull-Prinzip erfolgt eine Parallelisierung von primären und sekundären Aktivitäten. Damit können die sekundären Aktivitäten in früheren Phasen des Produktentstehungsprozesses durchgeführt werden. Somit stoßen die Validierungsaktivitäten beim Pull-Prinzip primäre Aktivitäten, beispielsweise zur Modellierung von Prinzip und Gestalt zum Aufbau der notwendigen Modelle für die Validierung, an.

Zur effektiven Durchführung der Validierung gemäß dem hier beschriebenen Verständnis beschreiben Albers, Behrendt et al. (2016) den IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz.

2.3.2 Der IPEK-X-in-the-Loop- (IPEK-XiL-) Ansatz

Die Erkenntnisse zur frühzeitigen und kontinuierlichen Validierung fassen Albers et al. folgendermaßen zusammen:

Erkenntnisse zur frühzeitigen und kontinuierlichen Validierung

„Validierung und nicht nur Verifizierung muss von Anfang an und kontinuierlich über die Entwicklung hinweg systematisch durchgeführt, die Erkenntnisse müssen aufbereitet und dokumentiert und diese in Form von neuen oder modifizierten Entwicklungszielen in das Zielsystem des Produktentwicklungsprozesses zurückgeführt werden.“

(Albers, Behrendt et al., 2016, S. 559)

Während in älteren Prozessmodellen (siehe bspw. Eigner et al., 2014; Paulweber, Lebert, List & Kiel, 2014) die Notwendigkeit zum Frontloading der Validierung zwar betont wird, wird diese gleichwohl noch sehr stark auf einzelne Phasen im Produktentstehungsprozess bezogen. Für aktuelle Modelle des Produktentstehungsprozess, wie die in Absatz 2.2.2 eingeführten Modelle iPeM, das Modell aus der aktuellen VDI-Richtlinie 2221 oder der aktuellen VDI-Richtlinie 2206, wird die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Validierung über den Produktentstehungsprozess hinweg betont. Gerade zu Beginn des Produktentstehungsprozesses liegt das zu validierende System jedoch in der Regel noch nicht oder nur in Teilen vor. Zudem unterscheiden sich oftmals die Reifegrade dieser Teilsysteme. Die durch die Validierung zu untersuchende Bedarfserfüllung wird jedoch in den meisten Fällen erst durch die Wechselwirkung der Teilsysteme im Gesamtsystem erreicht (siehe auch Absatz 2.1.1). Es bedarf daher entsprechender Ansätze zur Modellbildung, um die Teilsysteme im Kontext des Gesamtsystems und in ihrer Systemumwelt validieren zu können. (Albers, Behrendt et al., 2016)

Ansätze zur Einbindung einzelner Teilsysteme in (virtuelle) Modelle für das Gesamtsystem stammen dabei mit Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL) aus dem Bereich der Steuergeräteentwicklung (Bringmann & Krämer, 2008). Der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (IPEK-XiL-Ansatz) greift diese bestehenden Ansätze auf und erweitert sie um die Bedarfe einer mechatronischen Produktentwicklung unter Beteiligung von Personen unterschiedlicher Fachdisziplinen (Albers & Düser, 2010; Albers, Behrendt et al., 2016, Abbildung 2.14).



Abbildung 2.14: Darstellung des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz am Beispiel der Fahrzeug-Antriebsstrangentwicklung (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 559)

Wie in Abbildung 2.14 am Beispiel der Fahrzeugentwicklung dargestellt, beschreibt der IPEK-XiL-Ansatz das grundlegende Verständnis zur Validierung eines (Teil-) Systems im Kontext des Rest-Fahrzeugs, der fahrenden Person beziehungsweise des Anwendenden und der Umwelt unter Durchführung geeigneter Manöver und Testfälle. Die interagierenden Systeme, im Beispiel also das Rest-Fahrzeug, die fahrende Person und die Umwelt, werden dabei als Connected Systems (CS) bezeichnet (Albers, Behrendt et al., 2016).

Zur Darstellung der Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen dem zu untersuchenden System und den Connect Systems über den Produktentstehungsprozess wird das IPEK-X-in-the-Loop-Framework (IPEK-XiL-Framework) verwendet (siehe Abbildung 2.15). Das zu untersuchende System kann dabei entsprechend des spezifizierten Validierungsziels auf verschiedenen Systemebenen, von der Gesamtfahrzeugebene bis hin zu einzelnen Wirkflächenpaaren, vorliegen. Je nach Ebene und Validierungsziel ergeben sich unterschiedliche Modellierungsumfänge für das Rest-Fahrzeug-Modell. Zudem kann sowohl das zu untersuchende System als auch die Connected Systems entweder physisch, virtuell oder gemischt physisch-virtuell vorliegen. (Albers, Behrendt et al., 2016)

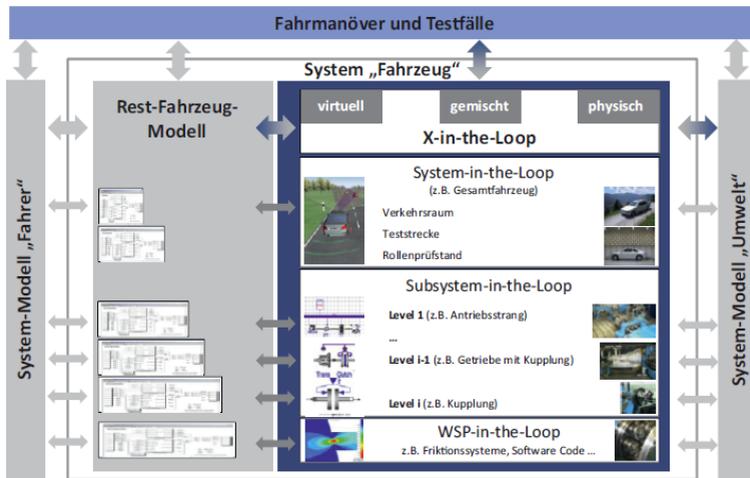


Abbildung 2.15: Darstellung des IPEK-X-in-the-Loop-Framework am Beispiel der Fahrzeug-Antriebsstrangentwicklung (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 560)

Zur Verbindung von Modellen, zwischen denen auf Grund von Inkompatibilitäten keine direkten Verbindungen möglich sind, werden im IPEK-XiL-Framework Koppelsysteme eingesetzt. Inkompatibilitäten können dabei beispielsweise unterschiedliche Dateiformate an In- und Outputs zweier Modelle oder eine räumliche Trennung (z.B. standortverteilte Modelle) umfassen. Koppelsysteme dienen ausschließlich der Verbindung von Modellen und sollen der Testumgebung kein relevantes Systemverhalten hinzufügen. In der Umsetzung der Koppelfunktion bringen Koppelsysteme jedoch (im besten Fall bekannte) Eigenschaften mit sich (z.B. eine frequenzabhängige Übertragungsfunktion), die einen nicht vernachlässigbaren, unerwünschten Einfluss auf das Systemverhalten haben können. Daher ist ggf. eine Kompensation dieses Einflusses (bspw. mittels mathematischer Modelle) bei der Auswertung und Interpretation von Testergebnissen notwendig. Koppelsysteme können entweder zwei physische Modelle, zwei virtuelle Modelle oder ein physisches und ein virtuelles Modell verbinden. Sie können wiederum aus mehreren Modellen bestehen. (Albers, Pinner, Yan, Hettel & Behrendt, 2016)

Für das zu untersuchende System (das „X-in-the-Loop“ in Abbildung 2.15), zu welchem im Fokus einer bestimmten Validierungsaktivität Erkenntnisse gewonnen werden sollen, ergeben sich zwei Sichtweisen (siehe Abbildung 2.16).

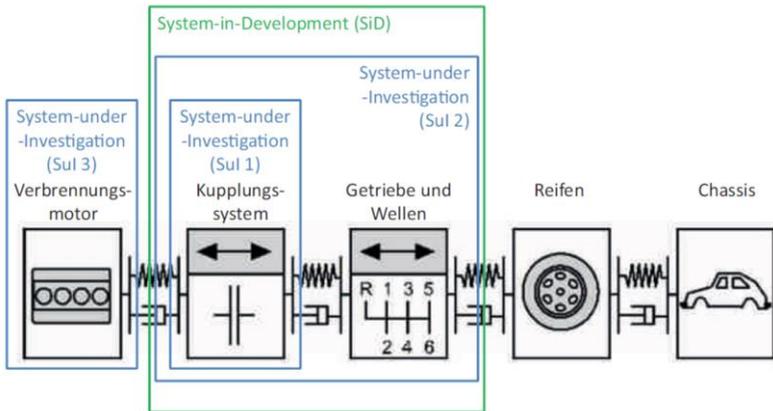


Abbildung 2.16: System-in-Development (SiD) und System-under-Investigation (Sul) (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 561)

So kann dieses System einerseits und überwiegend das (Teil-)System beschreiben, welches sich gerade in der Entwicklung befindet. In diesem Fall wird die Bezeichnung „System-in-Development (SiD)“ verwendet. Der Fokus der mit dem SiD durchgeführten Validierungsaktivitäten liegt dabei oftmals primär auf der Absicherung der Erfüllung von Eigenschaften beziehungsweise Funktionen. Andererseits kann jedoch auch die Gewinnung von Wissen über ein (Teil-)System, welches gerade nicht konkret im Fokus der Entwicklung steht, Gegenstand der Validierungsaktivität sein. In diesem Fall wird die Bezeichnung „System-under-Investigation (Sul)“ verwendet. Das Sul kann dabei ein Sub-System des SiD oder das SiD an sich sein, das SiD beinhalten oder auch unabhängig vom SiD, beispielsweise ein mit dem SiD interagierendes Nachbarsystem, sein. (Albers, Behrendt et al., 2016)

2.3.3 Zwischenfazit

Validierung gilt als die zentrale, gleichzeitig jedoch auch herausforderndste Aktivität im Produktentstehungsprozess (Albers, Behrendt et al., 2016). Der IPEK-XiL-Ansatz zeigt dabei Ansätze zur effektiven und effizienten Validierung auf. Dabei wird ein SiD oder Sul immer im Kontext seines Restsystems, seiner Umwelt und der Anwendenden, bspw. der Fahrer, in einer geeigneten Testumgebung validiert.

Wie in Absatz 1.1 beschrieben, wird die Validierung im Produktentstehungsprozess zukünftig, beispielsweise bei der Entwicklung autonomer Fahrzeuge, zunehmend

weiter an Bedeutung gewinnen. Zusätzlich wird die Komplexität der zu entwickelnden Systeme, beispielsweise durch eine zunehmende dynamische Vernetzung mit weiteren Systemen, weiter ansteigen. Um die Validierung solcher hochkomplexen Systeme bedarfsgerecht unterstützen zu können, bedarf es neuer (methodischer) Ansätze. Neben der in Absatz 2.2 beschriebenen Notwendigkeit einer durchgängigen Entwicklung von Produkt und zugehörigem Validierungssystem zeigt insbesondere die in Absatz 2.3.1 eingeführte „Rule of Ten“ den Bedarf nach einer frühzeitigen und kontinuierlichen Durchführung von Validierungsaktivitäten über den gesamten Produktentstehungsprozess. Eine Herausforderung stellt dabei die Nachvollziehbarkeit von Validierungsaktivitäten beziehungsweise der benötigten und erzeugten Informationen dar.

Die beschriebenen Herausforderungen im Produktentstehungsprozess komplexer Systeme, insbesondere die Verbesserung der Nachvollziehbarkeit von Informationen im Produktentstehungsprozess und damit auch für die Validierung, werden mit dem Leitbild Advanced Systems Engineering (ASE) adressiert.

2.4 Advanced Systems Engineering (ASE) und Model-Based Systems Engineering (MBSE)

Albers und Gausemeier beschreiben bereits 2010 Forschungsbedarfe zum Übergang von einer fachdisziplinorientierten Produktentwicklung hin zu einer vorausschauenden und systemorientierten integrierten Produktentstehung (Albers & Gausemeier, 2010). Um diesen Forschungsbedarfen zu begegnen wurde über die letzten Jahre das Leitbild des Advanced Systems Engineering (ASE) geprägt (siehe bspw. Albers, Zingel & Behrendt, 2012; Albers & Lohmeyer, 2012). Da hinsichtlich des Leitbilds ASE weiterhin Forschungsbedarf besteht und der Bedarf nach neuen interdisziplinären Ansätzen zur Produktentstehung vor dem Hintergrund heutiger Herausforderungen in der Systementwicklung weiter zunehmend steigt (Albers, 2023), finden in den letzten Jahren vermehrt Forschungsvorhaben zu ASE statt (Albers, Dumitrescu et al., 2018; Dumitrescu et al., 2021).

Gemäß dieser aktuellen Forschungsvorhaben umfasst das Leitbild ASE dabei drei Handlungsfelder (Dumitrescu et al., 2021):

- Advanced Systems (AS)
- Systems Engineering (SE)
- Advanced Engineering (AE)

In diesem Absatz werden zunächst diese drei Handlungsfelder eingeführt. Anschließend folgen detaillierte Beschreibungen zu Model-Based Systems Engineering (MBSE) als spezifische aktuelle Ausprägung des Handlungsfelds Systems Engineering und zentraler Baustein zur Ermöglichung der Begegnung der weiteren Handlungsfelder. Schließlich werden die Verbreitung von Systems Engineering und MBSE, als zentrale Bestandteile von ASE, in der industriellen Anwendung analysiert.

2.4.1 Handlungsfelder und Historie

Advanced Systems

Advanced Systems (AS) sind Systeme, die von einem hohen Grad an Autonomie, dynamischer Vernetzung und soziotechnischer Interaktion geprägt sind. AS sind dabei durch eine hohe Systemkomplexität gekennzeichnet. Um das Begriffsverständnis der Komplexität in der Produktentwicklung zu schärfen, existieren unterschiedliche Ansätze in der Forschung (siehe bspw. Weber (2005), de Weck (2021)). Weber beschreibt dabei fünf Dimensionen der Komplexität (vgl. Weber, 2005):

- Numerische Komplexität: Anzahl von Elementen in einem Produkt/System
- Relationale/strukturelle Komplexität: Anzahl von Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den Elementen
- Variationale Komplexität: Anzahl an Varianten eines Produkts/Systems
- Disziplinäre Komplexität: Anzahl an Disziplinen, die an der Entstehung des Produkts/Systems beteiligt sind
- Organisationale Komplexität: Verteilung der Arbeit

In der Zukunft wird eine weitere Zunahme der Komplexität von Systemen über all diese Dimensionen erwartet (siehe bspw. Friedenthal et al., 2021). In diesem Zuge wird daher von Advanced Systems gesprochen, deren Entwicklung durch globale Megatrends getrieben wird (Dumitrescu et al., 2021). AS sind dabei oftmals nicht reine monolithische Systeme bestehend aus Teilsystemen oder interagieren in diesen, sondern können als System of Systems (SoS) angesehen werden. (Dumitrescu et al., 2021)

SoS werden erstmals von Maier (1998) tiefergehend wissenschaftlich beschrieben. Maier konstatiert, dass zum Zeitpunkt der Arbeit keine einheitliche Definition von SoS existiere (Maier, 1998). Der Autor stellt fünf Faktoren, die ein SoS von einem monolithischen System aus Teilsystemen unterscheiden, heraus. Zentral stellt Maier dabei fest, dass ein SoS aus Elementen besteht, die wiederum als

eigenständige Systeme betrachtet werden können und operational (Systeme können auch außerhalb des SoS unabhängig voneinander funktionieren) sowie aus Management-Sicht (Systeme im SoS werden unabhängig voneinander verwaltet) unabhängig sind. (Maier, 1998)

Der Ansatz SoS nicht global zu definieren, sondern über verschiedene Faktoren und deren Ausprägungen zu beschreiben, findet sich dabei auch in neueren Arbeiten (Albers, Mandel et al., 2018; Nielsen, Larsen, Fitzgerald, Woodcock & Peleska, 2015). Eine beispielhafte Charakterisierung des SoS-Charakters eines Systems über unterschiedliche Faktoren ist in Abbildung 2.17 visualisiert.

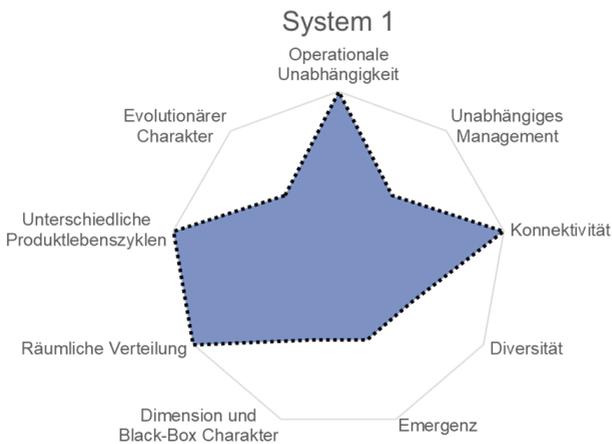


Abbildung 2.17: Charakterisierung unterschiedlicher Faktoren eines Systems hinsichtlich deren SoS-Charakter. Je weiter außen ein Faktor bewertet wird, umso mehr weist dieser SoS-Charakter auf (Darstellung adaptiert nach Albers, Mandel et al., 2018, S. 2805)

Um die Entwicklung solcher AS und SoS zu ermöglichen und zu unterstützen, finden sich parallel und integriert Ansätze des „Systems Engineering“ sowie neue Ansätze des „Advanced Engineering“

Systems Engineering

Wie in Absatz 2.1.1 beschrieben, lässt sich der Produktentstehungsprozess auf Basis der Systemtheorie beschreiben. In diesem Verständnis kann auch Systems Engineering gesehen werden. Eine eindeutige Definition für Systems Engineering aufzustellen gestaltet sich schwierig. Das International Council on Systems

Engineering (INCOSE) beschreibt im Systems Engineering Handbook, dass Systems Engineering als Perspektive, als Prozess und als Profession verstanden werden kann (Walden et al., 2015). Über diese verschiedenen Sichtweisen lassen sich jedoch einige Kernpunkte identifizieren. So ist Systems Engineering ein interdisziplinärer und iterativer Ansatz zur ganzheitlichen Entwicklung soziotechnischer Systeme über den gesamten Produktlebenszyklus (Walden et al., 2015). Auf der Website des INCOSE findet sich Stand 2022 folgende Definition:

Definition Systems Engineering (SE)

„Systems Engineering ist ein interdisziplinärer und integrativer Ansatz, der die erfolgreiche Realisierung, Nutzung und Außerbetriebnahme von technischen Systemen unter Verwendung von Systemprinzipien und -konzepten sowie von wissenschaftlichen, technologischen und Managementmethoden ermöglicht.“

(International Council on Systems Engineering [INCOSE], 2022, eigene Übersetzung)

Die Bezeichnung Systems Engineering fand bereits Anfang des 20. Jahrhunderts in den Bell Laboratories eine konsequente Anwendung (Buede & Miller, 2016). Heutzutage wird Systems Engineering als vielversprechender oder sogar erforderlicher Ansatz zum Umgang mit der Komplexität heutiger und zukünftiger (sozio-) technischer Systeme gesehen (Friedenthal et al., 2021). Unterstützend und integriert zu Systems Engineering finden im Leitbild ASE Ansätze des Advanced Engineering Einzug in die Produktentstehung.

Advanced Engineering (AE)

Die Bezeichnung Advanced Engineering (AE) fasst neue Prozesse, Methoden und Werkzeuge zur Erweiterung aktueller Engineering Ansätze durch Kreativität, Agilität und Digitalisierung zusammen. Hierunter fällt unter anderem Agilität in der Produktentwicklung (siehe Absatz 2.2.3). Andererseits werden hierunter aber auch Ansätze, die durch die Digitalisierung ermöglicht werden, wie der Einsatz digitaler Zwillinge oder künstlicher Intelligenz in der Produktentstehung, gefasst. (Dumitrescu et al., 2021)

Das Leitbild ASE als Integration der drei beschriebenen Handlungsfelder soll die gesamte Produktentstehung unterstützen. Demnach kommt auch der Validierung im Zuge des ASE eine entscheidende Bedeutung zu. So wird in der ASE-Strategie der Handlungsbedarf nach neuen Methoden, die die Validierung komplexer Systeme unterstützen, beschrieben (Albers, Dumitrescu et al., 2022). Eine

Ausprägung des Systems Engineering, welche zentraler und zukünftig immer wichtiger werdender Baustein von ASE ist, ist MBSE – Model-Based Systems Engineering. Die INCOSE Systems Engineering Vision 2035 prognostiziert sogar, dass Systems Engineering zukünftig überwiegend modellbasiert sein wird, um mit der Komplexität zukünftiger Produkte und deren Produktentstehungsprozesse umgehen zu können (Friedenthal et al., 2021). Im folgenden Absatz werden daher die Grundlagen des MBSE beschrieben.

2.4.2 MBSE – Model-Based Systems Engineering

Model-Based Systems Engineering (MBSE) bezeichnet eine Ausprägung des Systems Engineering, welche gemäß des INCOSE definiert ist als:

Definition Model-Based Systems Engineering (MBSE)

„[...] die formalisierte Anwendung von Modellierung zur Unterstützung von System-Anforderungsmanagement, Design, Analyse, Verifikations- und Validierungsaktivitäten, beginnend in der frühen Konzeptphase und kontinuierlich über die Entwicklung in späteren Lebenszyklusphasen.“

(Walden et al., 2015, S. 189, eigene Übersetzung)

MBSE wird dabei oftmals traditionellen, dokumentbasierten Systems Engineering-Ansätzen gegenübergestellt. Informationen, die bei dokumentbasierten Ansätzen über eine Vielzahl unabhängiger (Text-) Dokumente (bspw. Spezifikationen, Testpläne) verteilt vorliegen, sollen beim MBSE in einem zentralen, vernetzten und interdisziplinären Systemmodell abgebildet werden. In Anlehnung an Weillkiens ist ein (MBSE-) Systemmodell dabei definiert als:

Definition MBSE-Systemmodell

„Das Systemmodell im Kontext des MBSE ist das Abbild eines realen oder noch zu entwickelnden Systems, wobei mittels Abstraktion nur die für einen definierten Zweck relevanten Attribute berücksichtigt werden. Das Systemmodell ist gekennzeichnet durch die folgenden Eigenschaften:

- Das Systemmodell darf sich aus mehreren Repositories zusammensetzen, muss aber in sich konsistent sein und sich nach außen wie ein einzelnes Modell verhalten.
- Das Systemmodell erlaubt unterschiedliche Sichten auf die Informationen.
- Das Systemmodell ist maschinell auswertbar und liegt in einer abstrakten Syntax vor, die explizit MBSE-Konzepte wie Anforderungen oder Systemarchitekturen unterstützt.“

(Weilkiens, 2014, S. 22)

Durch die Nutzung eines MBSE-Systemmodells sollen unter anderem die eindeutige Kommunikation verschiedener Stakeholder des Produktentstehungsprozesses, der Umgang mit Systemkomplexität, eine Nachvollziehbarkeit (engl. Traceability) der modellierten Informationen und die Produktqualität verbessert werden. (Walden et al., 2015)

Bei der Verwendung von MBSE sind immer drei Aspekte, die auch als die „drei Säulen des MBSE“ bezeichnet werden, integriert zu betrachten (Delligatti, 2014):

- Die Modellierungssprache
- Die Modellierungsmethode(n)
- Das (Software-) Tool, das zur Modellierung verwendet wird

Die Modellierungssprache stellt das Vokabular und die Grammatik zur Modellierung bereit (Delligatti, 2014). Oftmals handelt es sich hierbei um semi-formale Sprachen, die, im Sinne einer objektorientierten Modellierung, die Typen beziehungsweise Klassen von Elementen und Beziehungen, die zur Modellierung verwendet werden sollen oder dürfen, definiert (Delligatti, 2014).

Als de-facto Standard-Modellierungssprache für MBSE wird die graphische Modellierungssprache Systems Modeling Language (SysML) verwendet (Dumitrescu et al., 2021). Die SysML ist dabei, in der zum Zeitpunkt dieser Arbeit

vorliegenden Version 1.6, ein „erweitertes Sub-Set“ der aus dem Bereich der modellbasierten Software-Entwicklung stammenden Unified Modeling Language (UML) (Object Management Group [OMG], 2019). Mit der zum Stand der Dissertation in der Ausarbeitung befindlichen SysML 2.0 wird allerdings ein kompletter Neuaufbau der Sprache mit Fokus auf die spezifischen Bedarfe des Systems Engineering angestrebt (OMG, 2017). In der SysML-Spezifikation werden eine Vielzahl von Klassen von Elementen und Beziehungen sowie insgesamt neun Typen von Diagrammen (siehe Abbildung 2.18) beschrieben. Die Diagramme lassen sich dabei in vier Kategorien, gemäß der vier Säulen der SysML (siehe Aleksandraviciene & Morkevicius, 2021), einteilen (siehe Abbildung 2.18): Anforderungsdiagramme (Requirement), Verhaltensdiagramme (Behavior), Diagramme zur Modellierung parametrischer Beziehungen (Parametric) und Strukturdiagramme (Structure).

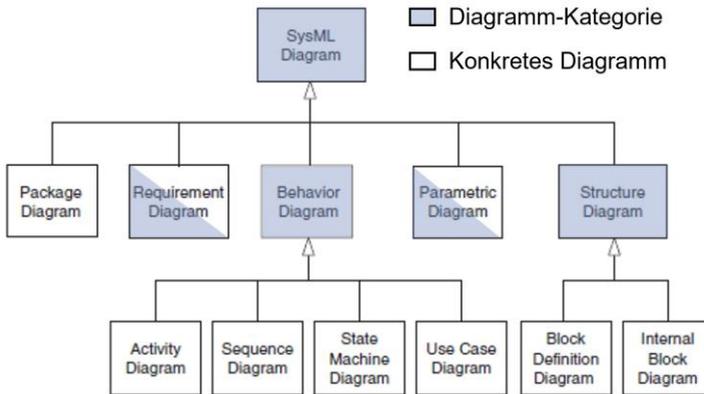


Abbildung 2.18: Typen von SysML-Diagrammen (adaptiert nach Friedenthal, Moore & Steiner, 2012, S. 30)

Darüber hinaus kann die SysML mittels sogenannter Profile erweitert und angepasst werden. In Profilen werden sogenannte Stereotypen definiert, die der Modellierungssprache neue Klassen von Elementen hinzufügen oder bestehende Klassen erweitern. Gleichzeitig sind für eine Modellierung mit SysML auch nicht notwendigerweise alle definierten Klassen von Elementen zu verwenden. SysML an sich ist somit in der ursprünglichen Form auch ein Profil für die UML. Mittels Profilen und Stereotypen kann die Modellierungssprache somit den konkreten Bedürfnisse der Modellierung angepasst werden. (OMG, 2019)

Die Modellierungsmethode hingegen ist eine dokumentierte Beschreibung, wie die Modellierung auszuführen ist. Es existiert eine Vielzahl von Modellierungsmethoden, sowohl zu Modellierung übergreifend über den gesamten Produktentstehungsprozess als auch für einzelne Aktivitäten, wie die Modellierung einer Funktionalen Architektur des Systems (siehe Absatz 2.5). (Delligatti, 2014)

Das Modellierungs- (Software-) Tool schließlich bezeichnet das Werkzeug, mit dessen Hilfe die Modellierung durchgeführt wird. Grundsätzlich kann das Werkzeug zur Modellierung ein einfaches Zeichenprogramm oder sogar ein Whiteboard sein. In diesem Fall werden jedoch ausschließlich Visualisierungen, gegebenenfalls angelehnt an eine existierende Modellierungssprache und einer Modellierungsmethode folgend, erstellt. Eine grundlegende Eigenschaft spezialisierter Modellierungstools ist die Trennung zwischen Modell und Visualisierung, beispielsweise in SysML-Diagrammen. Dabei existieren die modellierten Elemente ausschließlich einmal in einem zu Grunde liegenden Systemmodell, können jedoch in einer Vielzahl von Diagrammen und Visualisierungen dargestellt werden. Werden Änderungen an einem spezifischen Element in einem Diagramm vorgenommen, werden diese Änderungen dementsprechend in allen Darstellungen synchronisiert, in denen das Element noch vorhanden ist. (Delligatti, 2014; Weilkens, 2014)

Bei der Software-Tool-gestützten MBSE-Modellierung fällt häufig das Schlagwort Nachvollziehbarkeit beziehungsweise „Traceability“. So beschreiben beispielsweise Weilkens, Lamm, Roth und Walker (2015), dass das Herstellen einer Traceability/Nachvollziehbarkeit von Modellelementen zur Systembeschreibung, beispielsweise einer modellierten Beziehungen zwischen einem technischen Teilsystem und den an sie gestellten Anforderungen, das Hauptziel der Erstellung von Systemarchitekturmodellen sei. Die Etablierung solcher Nachvollziehbarkeitsbeziehungen wird erst durch die Nutzung geeigneter Software-Tools zur Modellierung ermöglicht (Delligatti, 2014).

MBSE kann somit einen Einsatz für eine Vielzahl von Aufgaben im Produktentstehungsprozess und in unterschiedlichsten Industriezweigen finden. Zur zielgerichteten Einführung und Nutzung von MBSE beschreiben Husung, Lindemann, Korobov, Hamester und Kleiner (2018) einen Anwendungsfall-basierten Ansatz. Dabei werden typische Anwendungsfälle für MBSE (beispielsweise Schnittstellenspezifikation oder Fehleranalyse) in einzelne Schritte aufgeteilt. Jedem dieser Schritte werden passende SysML-Diagramme und Modellelemente zur Modellierung zugeordnet. Untersuchungen dazu, ob und zu welchem Zweck MBSE bislang tatsächlich Einsatz in der Anwendung findet, werden im nächsten Absatz analysiert.

2.4.3 Verbreitung und Einsatz von Systems Engineering und MBSE in der Praxis

Die Verbreitung von Systems Engineering und MBSE in Unternehmen ist Gegenstand einer Vielzahl von Untersuchungen und Studien. So untersuchten Bone und Cloutier bereits 2009 auf eine Initiative der Object Management Group (OMG, welche unter anderem als Standardisierungsorganisation die SysML-Spezifikation herausgibt) die Nutzung von MBSE und SysML in Unternehmen (Bone & Cloutier, 2010). Die Teilnehmer der Studie kamen aus 16 Ländern und 45 unterschiedlichen Einrichtungen. Als Kernpunkte stellen Bone und Cloutier unter anderem heraus, dass ein mittlerer bis hoher Mehrwert von MBSE und SysML gesehen werde. Zudem gaben mehr als 70% der Teilnehmenden der Studie an, SysML bereits zum Zeitpunkt der Untersuchung oder in Zukunft in ihrer Organisation integrieren zu wollen. Demgegenüber interpretieren die Autoren ihre Umfrageergebnisse jedoch dahingehend, dass MBSE nur in sehr geringem Maße bereits in Unternehmensprozessen verankert sei. Der primäre Einsatz von MBSE beziehe sich zudem auf Aufgaben des Anforderungsmanagements. Der Einsatz von SysML in 2009 schien sich nach der Studie zumeist auf sehr komplexe Systeme zu konzentrieren, insbesondere im Bereich Luft- und Raumfahrt sowie Verteidigung. Schon in dieser Studie von 2009 ließ sich zudem erkennen, dass neben Systemingenieuren/Systemingenieurinnen auch andere Disziplinen, insbesondere die Software-Entwicklung aber auch Hardware-Entwickelnde, an der Modellierung mit SysML beteiligt waren. Demgegenüber ergaben die Ergebnisse der Umfrage, dass insbesondere Test-Ingenieure/Ingenieurinnen nur zu einem geringen Maße an der Modellierung mit SysML beteiligt waren. Dies könnte nach Ansicht der Autoren darauf hindeuten, dass MBSE und SysML zum Zeitpunkt der Umfrage noch nicht zur Unterstützung von Verifikation und Validierung eingesetzt wurden. (Bone & Cloutier, 2010)

Albers und Zingel greifen diese Studie von Bone und Cloutier sowie weitere Studien auf und führen 2013 eine weitere Untersuchung zum Stand der Nutzung von MBSE durch. Die Autoren fokussieren dabei insbesondere die Nutzung von SysML. In ihrer Analyse bestehender Studien kommen die Autoren zu der Erkenntnis, dass der Mehrwert von MBSE insbesondere von Großunternehmen erkannt werde, welche in zunehmendem Maße entsprechende Projekte und Programme zur Einführung von MBSE anstoßen würden. Da der Fokus des Einsatzes von MBSE für diese Unternehmen insbesondere auf Architekturmodellierung, Nachvollziehbarkeit von Anforderungen und Konzeptentwicklung läge, würde der Mehrwert von MBSE vermehrt von System- und Software-Ingenieuren/Ingenieurinnen gesehen, weniger hingegen von Hardware-Ingenieuren/Ingenieurinnen. Zudem greifen die Autoren eine Untersuchung verschiedener MBSE-Methoden und -Methodiken von Estefan

(2007) auf. Dabei leiten sie ab, dass keine der untersuchten Methodiken sich signifikant etabliert habe. Als Ergebnis ihrer Untersuchungen stellen die Autoren heraus, dass der Übergang von Dokument-zentriertem hin zu modellbasiertem Arbeiten noch nicht (flächendeckend) stattgefunden habe. Demgegenüber legen Albers und Zingel basierend auf ihrer eigenen Umfrage zur Verbreitung von SysML dar, dass der Mehrwert von SysML gut zu den angestrebten Zielen der Nutzenden passe. (Albers & Zingel, 2013)

In der im Jahr 2015 publizierten Untersuchung „Systems Engineering in industrial practice“ werten Gausemeier et al. Ergebnisse von 33 Experteninterviews zu Systems Engineering in der industriellen Praxis in Deutschland, Österreich und der Schweiz aus. Dabei werden die Orchestrierung der interdisziplinären Kommunikation, die Analyse der Bedarfe aller relevanten Stakeholder, eine verbesserte Sicherheit bezüglich Planung und Kontrolle, Qualitätssicherung und Qualitätsmanagement sowie die Wiederverwendung bestehenden Wissens als Top fünf der potenziellen Mehrwerte des Einsatzes von Systems Engineering genannt. Die Autoren beschreiben, dass gerade in kleineren und mittleren Unternehmen Systems Engineering sehr stark mit einzelnen Personen verbunden sei beziehungsweise von diesen getrieben werde. In großen Unternehmen sei zum Zeitpunkt der Untersuchung noch kein flächendeckendes Bewusstsein für Systems Engineering vorhanden. Zur Untersuchung des Einsatzes von Systems Engineering in der Praxis beschreiben die Autoren sieben Themenfelder, zu welchen sie die empfundene Wichtigkeit („Importance“) sowie deren Adressierung im Unternehmen („Current position of the company“) in den Interviews analysieren (siehe Abbildung 2.19). Dabei ergibt sich über die Themenfelder und insbesondere über unterschiedliche Industriezweige ein heterogenes Bild. So werde beispielsweise in der Automobilindustrie das Anforderungsmanagement nach Aussage zum Zeitpunkt der Untersuchung als sehr wichtig angesehen und bereits intensiv im Unternehmen behandelt. Bei anderen Aspekten hingegen, wie der Etablierung disziplinübergreifender Ansätze zur Architekturentwicklung, werde zum Zeitpunkt der Untersuchung von den Befragten noch ein signifikanter Forschungs- und Entwicklungsaufwand als notwendig gesehen. Hierbei wird beispielsweise beschrieben, dass einige Unternehmen zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits Erfahrungen mit SysML haben, es aber an geeigneten, Nutzer-zentrierten Methoden zu deren Einsatz fehle. (Gausemeier et al., 2015)

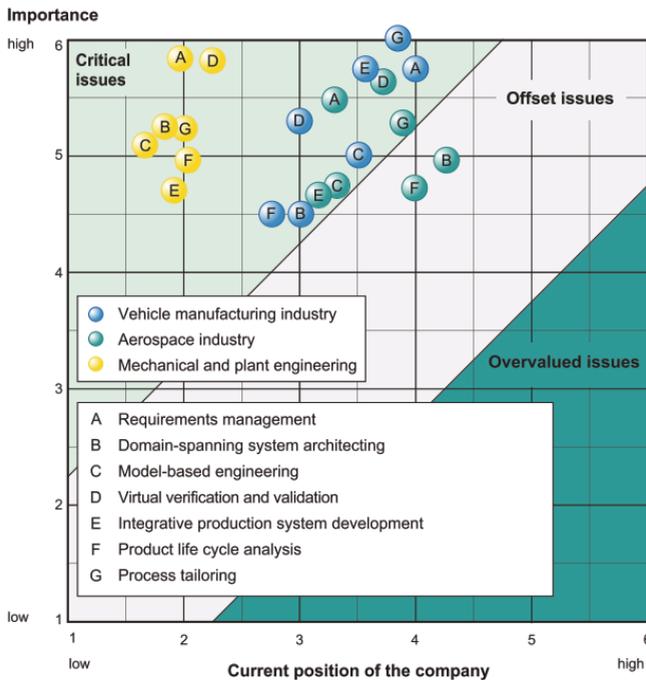


Abbildung 2.19: Untersuchung zu Wichtigkeit und Adressierung im Unternehmen von verschiedenen Themenfeldern des Systems Engineering nach Gausemeier et al. (2015, S. 48). Insbesondere im Maschinen- und Anlagenbau werden dabei viele der Themenfelder als äußerst wichtig für das Unternehmen erachtet, während die eigene Position im Unternehmen noch als schwach angesehen wird.

Cloutier führt 2018 erneut eine ähnliche Umfrage wie jene mit Bone 2009 durch und vergleicht die Umfrageergebnisse mit ähnlichen Umfragen von 2012 und 2014. Die Teilnehmenden der Umfrage kamen überwiegend aus den USA sowie aus den Branchen Verteidigung, Luft- und Raumfahrt. Cloutier stellt basierend auf der Umfrage jedoch fest, dass sich MBSE über die ursprünglichen Kerngebiete Verteidigung und Raumfahrt hinaus verbreite. Der Einsatz von MBSE liege laut der Umfrage hauptsächlich auf der Modellierung der Systemarchitektur (siehe Absatz 2.6) sowie auf der Anforderungsbeschreibung und Verknüpfung von Anforderungen. Trade Studies sowie Verifikation und Validierung stünden bislang nicht im Fokus des Einsatzes von MBSE. Auch werde MBSE das meiste Potenzial für den Einsatz in der Architekturentwicklung, der Anforderungsanalyse sowie im frühen

Konzeptentwurf zugeschrieben. Das Potenzial für den Einsatz zur Unterstützung der Validierung wird eher im Mittelfeld gesehen. Nach Cloutier sehen die Befragten einen Mehrwert durch den Einsatz von MBSE. Gleichzeitig herrsche ein Mangel an MBSE-Fähigkeiten in Unternehmen. (Cloutier, 2019)

Aktuelle Untersuchungen zu Systems Engineering in Deutschland stammen aus dem Jahr 2021. Hierbei ist zu betonen, dass diese Untersuchungen nicht speziell MBSE und SysML, sondern breiter das Thema Systems Engineering analysieren.

In einer Studie mit 127 Teilnehmenden untersuchen Stützel und Paul (2021) unter anderem Gründe für die Einführung von Systems Engineering (nicht rein bezogen auf MBSE). Hierbei werden insbesondere Produktkomplexität und Interdisziplinarität genannt. Hinsichtlich der Produktkomplexität berichten die Autoren, dass von den Unternehmen keine Alternative zu Systems Engineering als Mittel zur Beherrschung der Komplexität gesehen werde. Die Relevanz von Systems Engineering wird von 78% der Teilnehmenden als hoch eingestuft. Während in einer vorangegangenen Untersuchung von 2018 nur 13% der Befragten angaben, dass das Bewusstsein für Systems Engineering hoch sei, taten dies 2021 48% der Teilnehmenden. Analog zur Untersuchung von 2018 gaben auch 2021 77% der Unternehmen an momentan dabei zu sein, Systems Engineering einzuführen. Auf die Frage hin, welche Kompetenzen das eigene Unternehmen mitbringen könnte, gaben nur 27% der Teilnehmenden Kenntnisse zu SysML an. Die Autoren der Studie schließen daraus, dass unter anderem die Modellierung mit SysML ein Bereich ist, der von Unternehmen zukünftig gefördert werden könnte. (Stützel & Paul, 2021)

In einer Interviewstudie mit 78 Teilnehmenden aus der Wirtschaft und 31 aus der Wissenschaft wurde 2021 im Zuge der Initiative zu Advanced Systems Engineering des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) eine Leistungsstanderhebung zum Engineering in Deutschland durchgeführt (Dumitrescu et al., 2021). Auch in dieser Leistungsstanderhebung wird eine hohe Erwartungshaltung an Systems Engineering ersichtlich und es werden große Nutzenpotenziale von den Teilnehmenden gesehen. Trotzdem scheinen Methoden und Werkzeuge des Systems Engineerings immer noch nur in einzelnen Pionierunternehmen bereits durchgängig und über verschiedene Unternehmensbereiche hinweg genutzt zu werden. Der Fokus der Nutzung liege nach der Leistungsstanderhebung, so die Autoren, vorrangig auf Anforderungsspezifikation und Architekturgestaltung. Die Voraussetzung für die durchgängige Anwendung sei eine breite Akzeptanz bei den Mitarbeitenden. Eine weitreichende Nutzung der Potenziale des Systems Engineering sei noch nicht erkennbar, obgleich die noch verbreitete komponenten- und disziplinerorientierte

Denkweise nach Aussage der Interviewpartner voraussichtlich nicht zum langfristigen Erfolg führe. Eine Vielzahl der interviewten Unternehmen sieht MBSE als entscheidend für den effizienten Einsatz von Systems Engineering an. Insbesondere wird Potenzial darin gesehen, Systemmodelle als Kommunikations- und Kooperationsbasis aller am Entwicklungsprozess beteiligten Disziplinen zu nutzen. Laut der Leistungsstanderhebung werde zudem MBSE stark mit SysML assoziiert. Derzeitig verfügbare MBSE-Werkzeuge werden dabei jedoch nach Aussage der Befragten zum Großteil als Expertentools und zu wenig nutzerfreundlich für die Anwendung in der Breite wahrgenommen. Erforderliche Kompetenzen zum Umgang mit den Werkzeugen und Sprachen des MBSE fehlten laut mehreren Unternehmen. (Dumitrescu et al., 2021)

2.4.4 Zwischenfazit

Das Leitbild ASE integriert die Betrachtung heutiger und zukünftiger Advanced Systems mit Methoden des Systems Engineering und des Advanced Engineering, um die Produktentstehung in Zukunft zu unterstützen. Systems Engineering und insbesondere MBSE werden dabei als Kernbestandteile angesehen. Die Beschreibungen dieses Absatzes zeigen, dass Systems Engineering und MBSE von Befragten aus Industrie und Forschung vielfältige Potenziale zugeschrieben werden. Stellenweise wird (MB)SE sogar als zwingende Voraussetzung zum Umgang mit der Komplexität in der Entwicklung von AS gesehen. Trotzdem scheint (MB)SE noch keine flächendeckende Verbreitung in der industriellen Praxis zu finden. Dies scheint insbesondere auch an fehlender Nutzer-Zentrierung und mangelnder Akzeptanz bestehender MBSE-Ansätze zu liegen.

Wie in Absatz 2.4.2 beschrieben, stellen die Modellierungssprache, die Modellierungsmethode und das Modellierungstool die drei Säulen des MBSE dar. Während als Modellierungssprache hauptsächlich die SysML Anwendung findet (siehe letzter Absatz), existiert eine Vielzahl von Modellierungsmethoden für unterschiedliche Anwendungsfälle. Um das Verständnis für MBSE weiter zu schärfen und Herausforderungen für dessen Einsatz in der Praxis analysieren zu können, werden ausgewählte, häufig in der Literatur anzutreffende Modellierungsmethoden im folgenden Absatz vorgestellt.

2.5 Bekannte MBSE-Methoden

Viele der in der Literatur beschriebenen MBSE-Modellierungsmethoden nehmen Bezug auf die „technical processes“ der ISO Norm 15288 (ISO/IEC/IEEE 15288:2015-05-15) beziehungsweise auf das V-Modell (siehe Absatz 2.2.2). Häufig

wird dabei ein Bezug zur „linken Seite des V“ (vgl. Cloutier, 2019, S. 23), also der Modellierung von Anforderungen, funktionaler Beschreibung, logischer/konzeptueller Beschreibung und physischer Beschreibung eines Systems genommen. In Anlehnung an die englischen Bezeichnungen „Requirements“, „Functional“, „Logical“, „Physical“ wird dies auch als RFLP bezeichnet (Kleiner & Kramer, 2013). Zusätzlich werden in einigen Modellierungsmethoden Elemente des Problemraums beziehungsweise des Produktprofils (bspw. Stakeholder-Bedarfe oder Anwendungsfälle, siehe auch Walden et al. (2015)) adressiert.

Im nächsten Absatz wird daher zunächst übergreifend eine allgemeine Modellierungsmethode beschrieben, die sich an den obigen Beschreibungen orientiert und Aspekte verschiedener konkreter in der Literatur beschriebener Modellierungsmethoden integriert. Anschließend werden einige bekannte Modellierungsmethoden eingeführt.

2.5.1 Konsolidierte Modellierungsmethode auf Basis des Stands der Forschung

Einführung

In diesem Teilkapitel soll eine übergreifende Modellierungsmethode aus dem Stand der Forschung konsolidiert werden. Diese Modellierungsmethode soll als Referenz zur MBSE-Modellierung einer Produktgeneration für die folgenden Kapitel dienen. Die einzelnen Schritte der konsolidierten Modellierungsmethode sind in Abbildung 2.20 dargestellt. Die Darstellung der Modellierungsmethode und die einzelnen Modellierungsschritte folgen dabei nicht einer spezifischen Modellierungsmethode aus dem Stand der Forschung. Vielmehr wird in diesem Absatz eine eigene Konsolidierung von Modellierungsaktivitäten einer Produktgeneration vorgestellt.

Die Schritte der Modellierungsmethode umfassen die Modellierung von Informationen zum Produktprofil (Stakeholder inkl. deren Bedarfe, Systemkontext, Anwendungsfälle, Ziele und Randbedingungen) sowie von Systemanforderungen, funktionaler-, logischer- und physischer Architektur (RFLP, siehe oben). Hierbei ist zu beachten, dass die einzelnen Schritte aus Übersichtlichkeitsgründen zwar sequentiell dargestellt werden, deren Durchführung in der Praxis jedoch sprunghaft und iterativ geschieht.

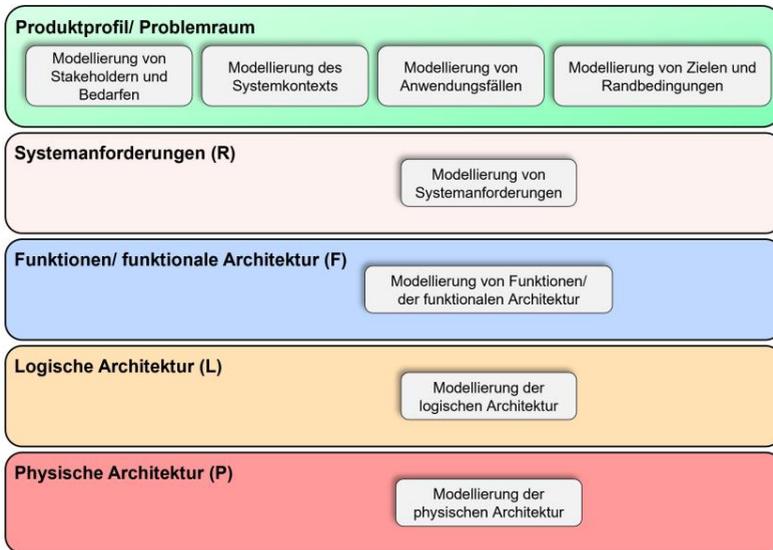


Abbildung 2.20: Konsolidierte Modellierungsmethode für eine Produktgeneration (eigene Darstellung)

Zur besseren Verständlichkeit der Modellierungsmethode werden die einzelnen Schritte in den folgenden Absätzen anhand von Auszügen eines vereinfachten Leitbeispiels dargestellt. Als Modellierungssprache wird die SysML und als Software-Tool zur Erstellung der Diagramme Cameo Systems Modeler (Dassault Systèmes, 2022, 18. März) verwendet. Dabei werden geeignete Darstellungsformen (insbesondere Diagramme, Tabellen und Matrizen) für die Durchführung der Modellierungsschritte beschrieben. Wie bei der Modellierung mittels SysML und entsprechenden Software-Tools üblich, sind jedoch auch andere Diagrammart mit dem gleichen Informationsgehalt für die einzelnen Modellierungsschritte denkbar, beispielsweise die Nutzung einer Tabelle statt eines Blockdefinitionsdiagramms. Das Leitbeispiel stammt aus den Untersuchungen zur modellbasierten Unterstützung bei der Validierung von Fahrerassistenzsystemen (ADAS – Advanced Driver Assistance Systems) (Mandel, Wäsche, Lutz & Behrendt, 2021; Zeng, 2020). Insbesondere werden die ADASs Abstandsregeltempomat (ACC – Adaptive Cruise Control) und Notbremsassistent (AEB – Autonomous Emergency Brake) vereinfacht und auszugsweise betrachtet. Ein ACC-System dient der Regulierung der Fahrgeschwindigkeit basierend auf einem Sollwert und der Verkehrssituation. Ein AEB-System überwacht die Fahrsituation und löst in Notfallsituationen automatisch ein Bremsmanöver aus. Für

weitere Details zu den Fahrerassistenzsystemen sei auf Winner, Hakuli, Lotz und Singer (2015) verwiesen.

Modellierung von Stakeholdern und deren Bedarfen

Wie in Absatz 2.3.1 beschrieben, sind Stakeholder Personen oder Institutionen, die ein Interesse an einem System-in-Development (SiD) haben. Stakeholder sind der Ausgangspunkt zur Beschreibung des angestrebten Anbieter-, Anwender- und Kundennutzens des Systems im Produktprofil und somit ebenfalls Ausgangspunkt für Ziele und abgeleitete Anforderungen an das SiD. Stakeholder können dabei von unterschiedlichen Quellen identifiziert werden und können beispielsweise Anwendende des Systems, Fachabteilungen als Teil des Handlungssystems der Produktentwicklung, Gesetzgebung oder Personen aus der Produktion des Systems umfassen (siehe bspw. Weilkiens 2014, S. 55). Stakeholder werden für die beschriebene Modellierungsmethode, z.B. in Form einer Tabelle, in das Systemmodell aufgenommen. Zusätzlich können spezifizierende Informationen, wie die Priorität eines Stakeholders, ergänzt werden (siehe bspw. Weilkiens, 2014). Stakeholder hegen Bedarfe, die durch das System befriedigt werden sollen, z.B. in Form von Wünschen, Erwartungen oder festen Vorgaben. Diese Stakeholder-Bedarfe sind oftmals abstrakte technische oder geschäftliche Erwartungen an ein (Sub-) System, die für die Ausgestaltung des Systems zunächst nicht bindend sind (Kubin, Wagenmann, Reichert, Mandel & Albers, 2023). Bedarfe sind somit eine Beschreibung von (gewünschten) Kunden-, Anwender- oder Anbieternutzen des zu entwickelnden Systems. Sie können bspw. durch Interviews aufgenommen (Aleksandraviciene & Morkevicius, 2021) und in ein Systemmodell eingefügt werden.

Zur Formulierung von Bedarfen bieten sich User Stories in der Form „als [Bezeichnung des Stakeholders] möchte ich [Stakeholder-Bedarf], um [angestrebter Nutzen]“ an (Kubin et al., 2023). Bedarfe sind oftmals eher vage formuliert und werden im Verlauf des Produktentstehungsprozesses in Ziele und konkrete Anforderungen überführt (siehe folgende Abschnitte) (Kubin et al., 2023)

In Abbildung 2.21 sind beispielhaft einige Stakeholder des SiD Fahrzeug sowie deren Bedarfe dargestellt. So möchte beispielsweise ein Fahrer/eine Fahrerin durch die Unterstützung des ADAS möglichst sicher und komfortabel fahren. Fußgänger/Fußgängerinnen möchten durch Fahrzeuge, die ADAS verwenden, nicht in ihrer Sicherheit im Straßenverkehr beeinträchtigt werden. Alternativ zur Darstellung in Form einer Tabelle können Stakeholder und Bedarfe in Form eines Blockdefinitionsdiagramms dargestellt und miteinander in Beziehung gesetzt werden.

#	Name	○ Bedarfe
1	🚶 Fahrer/Fahrerin	Als Fahrer/Fahrerin möchte ich vom Fahrzeug in Gefahrensituationen unterstützt werden, um möglichst sicher zu fahren
2	🚶 Fußgänger/Fußgängerin	Als Fußgänger/Fußgängerin gehe ich davon aus, dass teilautomatisiert fahrende Fahrzeuge auf mich reagieren, damit ich mich sicher im Straßenverkehr bewegen kann

Abbildung 2.21: Beispielhafte Stakeholder und Bedarfe für das Leitbeispiel ADAS

Modellierung des Systemkontexts

Die Modellierung des Systemkontexts dient zur Abbildung der Schnittstellen des SiD nach außen (siehe bspw. Weillkiens, 2014). Dabei werden alle Interaktionen des SiDs mit seiner Umwelt, aber auch Interaktionen mit dem Handlungssystem (bspw. Wartungsmitarbeiter, die mit dem SiD interagieren) betrachtet. Durch die Modellierung des Systemkontexts findet eine Festlegung der Systemgrenzen statt. Bei der Modellierung des Systemkontexts wird das SiD als „Blackbox“ betrachtet, das bedeutet, dessen interne Struktur ist zunächst nicht im Fokus der Modellierung (siehe bspw. Aleksandraviciene & Morkevicius, 2021). Ziel ist es, äußere Interaktionspunkte und Schnittstellen des SiD zu identifizieren und zu beschreiben.

In Abbildung 2.22 ist auszugsweise das Diagramm zur Darstellung des Systemkontexts des SiD Fahrzeug abgebildet. Neben direkt mit dem SiD interagierenden Stakeholdern (Fahrer/Fahrerin und Beifahrer/Beifahrerin als Nutzer des Systems, Fußgänger/Fußgängerin, Fahrer/Fahrerin weiterer Fahrzeuge sowie Fahrzeugkäufer/Fahrzeugkäuferin als Kunde/Kundin) werden hier Umweltsysteme modelliert, die außerhalb der Systemgrenze mit dem System interagieren (bspw. „Straße“). Diese Interaktionen sind in Abbildung 2.22 als rein logische Beziehungen dargestellt. Zur weiteren Detaillierung des Systemkontexts können jedoch auch konkrete Stoff-, Informations- und Energieflüsse zwischen dem SiD und den Umweltsystemen und Stakeholdern modelliert werden. Somit können Schnittstellen an der Systemgrenze frühzeitig identifiziert und beschrieben werden.

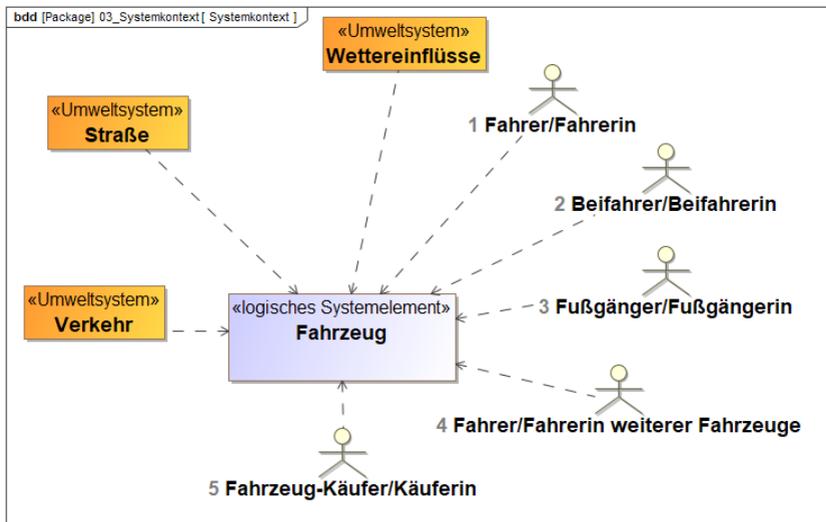


Abbildung 2.22: Systemkontext des SiD Fahrzeug für das Leitbeispiel

Modellierung von Anwendungsfällen

Anwendungsfälle beschreiben, wie Außenstehende das SiD wahrnehmen und mit diesem interagieren (Weilkiens, 2014). Ein Beispiel bei der Entwicklung eines Fahrzeugs könnte der Anwendungsfall „In das Fahrzeug einsteigen“ sein. Anwendungsfälle können somit als Umrahmung von Funktionen des Systems aus Anwendenden-Sicht verstanden werden (Weilkiens et al., 2015). Bei der Modellierung von Anwendungsfällen können dabei nicht nur gewünschte Anwendungsfälle, sondern ebenfalls Missbrauch oder Fehlbedienung des Systems betrachtet werden. Ein Anwendungsfall umfasst ein Hauptszenario sowie gegebenenfalls zugehörige Alternativ- und Ausnahmeszenarien (Pohl, 2007). Zusammenfassend wird hierfür der Begriff Anwendungsszenarien verwendet (Pohl, 2007). Der Ablauf jedes Anwendungsfalls, beziehungsweise jedes Anwendungsszenarios, wird bei der Modellierung gemäß der hier beschriebenen Modellierungsmethode mittels einzelner Anwendungsfall-Aktivitäten detailliert (vgl. bspw. Weilkiens (2014)). Zwischen den einzelnen Anwendungsfall-Aktivitäten kann sowohl ein logischer Ablauf (Kontrollfluss) als auch ein Objektfluss modelliert werden (Weilkiens, 2014). Die Modellierung der Anwendungsfälle geschieht dabei aus Sicht der Anwendenden und dient als Eingangsgröße für die Modellierung von (geforderten bzw. benötigten) Funktionen und somit der funktionalen Architektur des Systems (siehe unten). Auch stellen Anwendungsfälle einen essenziellen Input für

die Validierung dar, da mit ihrer Hilfe das von den Anwendenden erwartete Systemverhalten modelliert wird.

Abbildung 2.23 zeigt ausschnittsweise das Anwendungsfalldiagramm für das Leitbeispiel mit Fokus auf Anwendungsfälle, die das AEB- und das ACC-System betreffen. Die Anwendungsfälle werden dabei einerseits direkt mit den Stakeholdern und Umweltsystemen verknüpft, die bei der Durchführung des Anwendungsfalls beteiligt sind. So sind beispielsweise der „Fahrer“/ die „Fahrerin“ als auch das Umweltsystem „Verkehr“ mit dem Anwendungsfall „Mit aktiviertem Abstandsregeltempomat (ACC) fahren“ verknüpft. Zudem können die Anwendungsfälle durch verschiedene Anwendungsszenarien und Sub-Anwendungsfälle weiter spezifiziert werden. In Abbildung 2.23 ist so beispielsweise der Anwendungsfall „Außerstädtisch mit aktiviertem Abstandsregeltempomat (ACC) fahren“ als enthaltener Anwendungsfall (verbunden mittels der SysML „include“ Beziehung) mit dem vorher beschriebenen Anwendungsfall verknüpft.

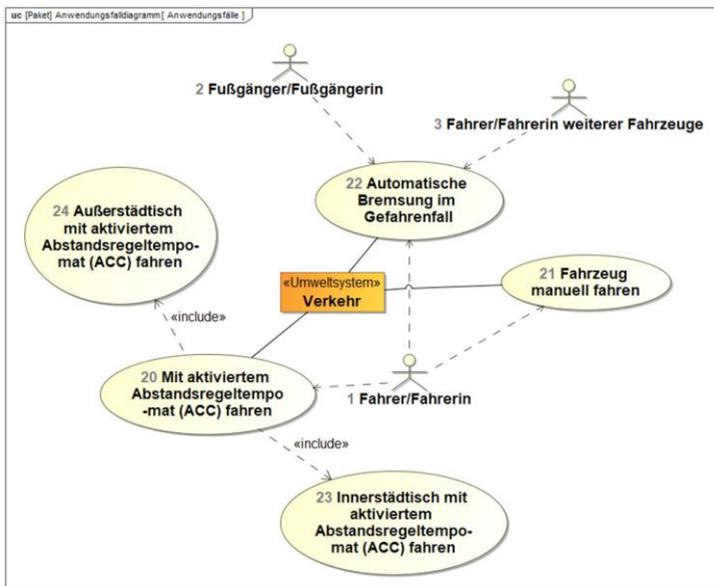


Abbildung 2.23: Anwendungsfälle der Stakeholder für das SiD (Fokus ADAS)

Die Modellierung von Anwendungsfällen erfolgt iterativ und ist eng mit der Modellierung von Stakeholdern und deren Bedarfen sowie Zielen und Randbedingungen (siehe nächster Absatz) verknüpft. Einerseits kann die

Modellierung von Anwendungsfällen Ausgangspunkt für die Identifikation oder Konkretisierung von Stakeholder-Bedarfen, Zielen oder Randbedingungen sein. Andererseits können durch die Modellierung von Stakeholder-Bedarfen, Zielen oder Randbedingungen neue Anwendungsfälle identifiziert werden, die es zu detaillieren gilt. So beschreibt beispielsweise Ebel (2015) die Bedeutung von Anwendungsfällen als Kommunikationsmittel bei der Konkretisierung von Zielen und Systemanforderungen.

Modellierung von Zielen und Randbedingungen

Während Bedarfe von Stakeholdern oftmals eher abstrakt und unverbindlich sind, stellen Ziele eine Konkretisierung der Stakeholder-Bedarfe dar (Kubin et al., 2023). Ziele werden in erster Linie aus Analyse, Konsolidierung und Konkretisierung von Stakeholder-Bedarfen entwickelt. Demnach ist es für die Modellierung gemäß der hier beschriebenen Methode essenziell, eine Nachvollziehbarkeit zwischen den modellierten Zielen und den Stakeholdern inklusive deren Bedarfen, aus welchen die Ziele abgeleitet wurden, zu etablieren. Diese Nachvollziehbarkeit dient zudem als wichtige Information für die Validierung im Produktentstehungsprozess, da hiermit Informationen zum angestrebten Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen bei der Planung, Durchführung und Auswertung von Validierungsaktivitäten verfügbar gemacht werden.

In der Literatur wird zur Konkretisierung von Stakeholder-Bedarfen oftmals statt von Zielen von „Stakeholder-Requirements“ gesprochen (siehe bspw. Walden et al., 2015). Die deutsche Übersetzung „Stakeholder-Anforderungen“ ist an dieser Stelle jedoch missverständlich und erschwert eine klare Unterscheidung zu konkreten (technischen) Systemanforderungen (siehe nächster Absatz). Daher wird im weiteren Verlauf die Bezeichnung Ziele verwendet.

Randbedingungen (engl. constraints) stellen eine besondere Art von Zielen dar. Diese sind verbindlich für die Produktentstehung und unterliegen keinem Interpretationsspielraum (Walden et al., 2015, S.262). Ein Beispiel für Randbedingungen können Grenzwerte für den CO²-Ausstoß neu zugelassener Fahrzeuge sein oder die Randbedingung, dass die Nutzung des ADAS Systems im Fahrzeug Fußgänger nicht zusätzlich gefährden darf.

In Abbildung 2.24 sind durch die gestrichelten Linien die Stakeholder des SiD mit beispielhaften Zielen/Randbedingungen verbunden, die sich aus ihren Bedarfen ergeben. Hiermit kann modelliert werden, aus welchen Stakeholdern, inklusive deren Bedarfe, sich welche Ziele ableiten. Für das Leitbeispiel ist damit unter anderem das Ziel „automatisches Bremsen“ modelliert, welches sich aus Bedarfen

des Stakeholders „Fahrer/Fahrerin“ ergibt. Zusätzlich ist eine Randbedingung der Entwicklung modelliert.

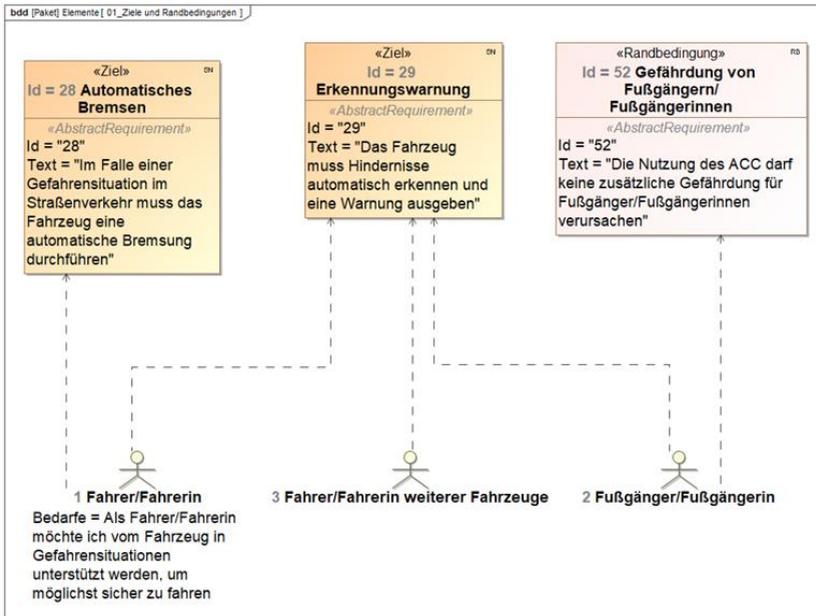


Abbildung 2.24: Stakeholder des SiD und Ziele, die aus deren Bedarfen und Anwendungsfällen sowie Randbedingungen abgeleitet werden (Auszug für das Leitbeispiel)

Modellierung von Systemanforderungen

Während Ziele und Anwendungsfälle die Bedarfssituation beschreiben, werden Systemanforderungen lösungsorientiert aus technischer Sicht beschrieben (Walden et al., 2015). Die modellierten Systemanforderungen sind dabei vergleichbar mit den Inhalten des in der Industrie gebräuchlichen Pflichtenhefts (siehe Lindemann, 2009). Der Begriff Systemanforderung wird an dieser Stelle verwendet, um eine Abgrenzung von Zielen vorzunehmen, umfasst aber ebenfalls Anforderungen an Sub-Systeme und Komponenten.

Systemanforderungen können unterschiedlich klassifiziert werden. Hierfür finden sich in der Literatur zahlreiche Ansätze, z.B. entsprechend der Qualitätsmerkmale nach ISO/IEC 25010 (ISO/IEC 25010:2011-03-01) oder entsprechend des FURPS-Modells (Functional, Usability, Reliability, Performance, Supportability) nach Grady

(1992). Für Details sei an dieser Stelle auf die entsprechenden Veröffentlichungen verwiesen. Im Rahmen der hier beschriebenen übergreifenden Modellierungsmethode wird lediglich die grundsätzliche Unterscheidung zwischen funktionalen Anforderungen und nicht-funktionalen Anforderungen (bspw. Qualitäts- oder Sicherheitsanforderungen) getroffen (siehe auch Walden et al., 2015).

Zwischen den Anforderungen können wiederum unterschiedliche Arten von Beziehungen modelliert werden. So lassen sich Anforderungen zu Zwecken der Übersichtlichkeit in eine hierarchische Struktur bringen. Zudem lassen sich, wie für die SysML beschrieben, Ableitungsbeziehungen (<<deriveReq>>) zwischen Anforderungen modellieren. Mit der Ableitungsbeziehung werden beispielsweise Anforderungen auf unterschiedlichen Systemebenen oder auch das Ziel eines Stakeholders und die daraus abgeleiteten Anforderungen in Beziehung gesetzt, unabhängig von ihrer Einordnung in einer modellierten Anforderungshierarchie (siehe hierzu auch das SYSMOD-ZIGZAG-Pattern nach Weilkiens et al., 2015, 50ff).

Einige der modellierten Anforderungen mit Bezug zum AEB-System des Leitbeispiels sind in Abbildung 2.25 dargestellt. So wird der minimale Abstand zum Hindernis im Falle einer Notbremsung durch das AEB-System („AEB_res_dis_min“) oder die Forderung nach einer Lichtmeldung im Falle einer Systemstörung spezifiziert. Zudem sind die Ableitungsbeziehungen zwischen den modellierten Anforderungen und dem Ziel „Automatisches Bremsen“ dargestellt. Systemanforderungen können einerseits direkt von Zielen abgeleitet werden. Andererseits ergibt sich eine Konkretisierung und Identifikation weiterer spezifischerer Systemanforderungen (insb. auf tieferen Sub-System-Ebenen) erst durch die Definition von Sub-Systemen und insbesondere entsprechenden Validierungsaktivitäten (siehe das erweiterte ZHO-Modell in Absatz 2.1.1).

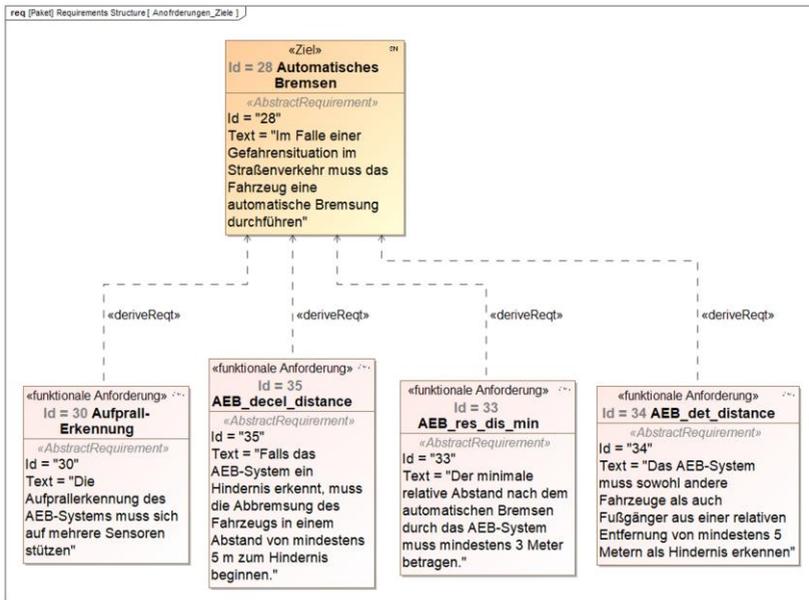


Abbildung 2.25: Anforderungen mit Bezug zum AEB-System für das Leitbeispiel (Auszug für das Leitbeispiel)

Modellierung von Funktionen und der funktionalen Architektur

Die funktionale Modellierung von Systemen wird in unterschiedlichen Ingenieursdisziplinen (Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik etc.) angewendet und in der Forschung untersucht. Eine Funktion ist nach Pahl et al. folgendermaßen definiert:

Definition Funktion

„Allgemeiner und gewollter Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen“

(Pahl et al., 2021, S. 14)

Neben diesen gewollten Funktionen werden in der VDI-Richtlinie 2221 zudem auch sogenannte Störfunktionen (wie „Lärm verursachen“) beschrieben (VDI-Richtlinie 2221:2019-11-00 Blatt 2).

Pahl et al. beschreiben die Aufgliederung von Funktionen in Teilfunktionen und das Aufstellen einer Funktionsstruktur. Eisenbart, Gericke und Blessing untersuchen weitere Ansätze zur funktionalen Modellierung und konsolidieren relevante Perspektiven zur Modellierung (Eisenbart, Gericke & Blessing, 2013). Grundsätzlich lassen sich neben der strukturellen/hierarchischen Modellierung noch die flussbasierte Modellierung (siehe bspw. „Process flow view“ nach Eisenbart, Qureshi, Gericke & Blessing, 2013), die Modellierung von Zuständen/Zustandsautomaten als ereignisorientierte Modellierung (siehe z.B. Weilkiens et al., 2015) und die Nachrichten-orientierte Modellierung z.B. in Form von SysML-Sequenzdiagrammen (siehe z.B. Weilkiens et al., 2015) als vier zentrale Ansätze zur Modellierung von Funktionen und Verhalten konsolidieren. Die letzten beiden stellen dabei jedoch weniger Ansätze zur Modellierung der funktionalen Architektur dar, sondern fokussieren eher auf die Verknüpfung zwischen Funktionen und technischer Umsetzung beziehungsweise logischer Architektur (siehe nächster Absatz).

Weilkiens et al. argumentieren, dass sich die Nutzung einer blockorientierten, hierarchischen Darstellung von Funktionen für die Modellierung von Architekturen anbietet, während eine flussbasierte Darstellung sich eher für die Modellierung im Rahmen des Anforderungsmanagements eignet (Weilkiens et al., 2015, S. 190). In diesem Verständnis wird für die hier beschriebene konsolidierte Modellierungsmethode die flussbasierte Modellierung zur Detaillierung der Anwendungsfälle und Anwendungsfall-Aktivitäten genutzt. Angelehnt an die Bildung von „Functional Groups“ nach der FAS-Methode (siehe Absatz 2.5.2) kann somit das Konsolidieren von Anwendungsfall-Aktivitäten, die zur Detaillierung von Anwendungsfällen/Anwendungsszenarien modelliert werden, zu Funktionen in Form einer Block-basierten Modellierung beschrieben werden. Die Funktionen lassen sich daraufhin wiederum, unabhängig von der Strukturierung der Aktivitäten zu den Anwendungsfällen, in eine hierarchische Struktur, angelehnt an die Beschreibungen von Pahl et al. (2021) bringen. Dabei können zusätzlich funktionale Schnittstellen zur Beschreibung von Ein- und Ausgängen von Energie, Stoff- oder Informationsflüssen an den Funktionen modelliert werden. Über die modellierten Schnittstellen werden die Funktionen miteinander verknüpft und somit die Interaktion der Funktionen untereinander modelliert.

Bei der Modellierung der funktionalen Architektur wird oftmals die Verwendung von lösungs- beziehungsweise technologieneutraler Beschreibung der einzelnen Funktionen hervorgehoben (siehe z.B. in der VDI-Richtlinie 2221:2019-11-00 Blatt 2). Durch diese Trennung zwischen lösungs-/technologieneutraler Beschreibung und Umsetzung soll, zumindest für eher abstrakte Funktionen auf hohen Hierarchieebenen, eine gewisse Lösungsoffenheit im Produktentstehungsprozess

(siehe z.B. Lamm & Weilkiens, 2014) sowie eine Nutzung der entwickelten funktionalen Architektur für verschiedene technische Umsetzungen in zukünftigen Produktgenerationen (siehe z.B. Weilkiens et al., 2015) ermöglicht werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die lösungsneutrale Beschreibung der funktionalen Architektur nicht bedeutet, dass die Entwicklung der funktionalen Architektur unabhängig von ihrer Umsetzung geschieht. So beschreibt Matthiesen, dass bei der Gestaltung eines Produkts immer explizit oder zumindest implizit eine Vorstellung über die (technische) Umsetzung einer Funktion in der potenziellen Gestalt des Systems vorliegen muss (Matthiesen, 2021). Daher kommt der Modellierung von Gestalt-Funktions-Zusammenhängen, insbesondere in der mechanischen Produktentwicklung, eine entscheidende Bedeutung zu (Albers & Wintergerst, 2014).

In Abbildung 2.26 ist auszugsweise die funktionale Architektur des SiD Fahrzeugs mit Bezug zum ACC- und AEB-System dargestellt. Aus den Beschreibungen der Anwendungsfälle wurde dabei die Funktion „Automatisches Bremsen im Gefahrenfall“ konsolidiert. Diese gliedert sich wiederum in mehrere Sub-Funktionen, z.B. „Gefahrensituation erkennen“ und „Automatisch Notbremsung einleiten“ auf.

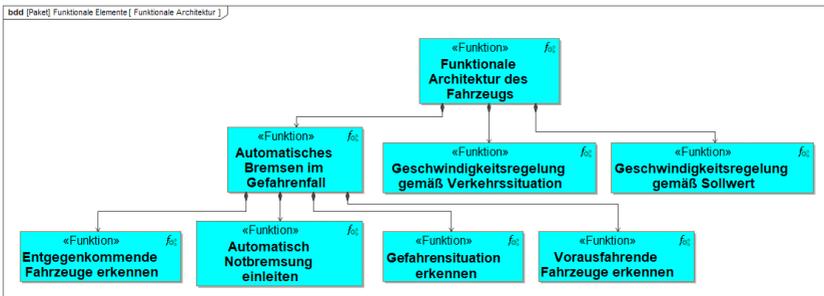


Abbildung 2.26: Funktionale Architektur für das Leitbeispiel (Auszug)

Modellierung der logischen Architektur

Der Begriff der logischen Architektur wird in der Literatur nicht einheitlich verwendet. So beschreiben beispielsweise Lamm und Weilkiens, dass die funktionale Architektur und die logische Architektur teilweise gleichgesetzt werden (Lamm & Weilkiens, 2014). In der VDI 2221 hingegen wird die logische Architektur mit der sogenannten Wirkstruktur gleichgesetzt, die eine geordnete und verknüpfte Darstellung der für einzelne (Teil-) Funktionen der funktionalen Architektur gewählten Lösungs- beziehungsweise Wirkprinzipien darstellt (VDI-Richtlinie

2221:2019-11-00 Blatt 2). Dabei ist ein Wirkprinzip definiert als „*Lösungsprinzip zur Erfüllung einer Funktion auf erster konkreter Stufe bestehend aus zugrundeliegendem physikalischem, biologischem oder chemischem Effekt sowie geometrischen und stofflichen Merkmalen (Wirkgeometrie, Wirkbewegung und Werkstoff)*“ (Gericke, Bender, Feldhusen & Grote, 2021, S. 257). In bestehenden MBSE-Methoden wird eine dreiteilige Unterscheidung in funktionale Architektur, Lösungsprinzipien und logische Architektur bzw. Konzept-Sicht vorgenommen (Moeser, 2016 und Absatz 2.5.2).

Die Beschreibungen für die konsolidierte Modellierungsmethode dieser Arbeit lehnen sich an die Beschreibungen zur logischen Architektur nach Weilkiens et al. (2015) an. Hiernach werden in der logischen Architektur technische Konzepte zur Umsetzung des Systems beschrieben, die aber noch nicht spezifisch die technische Umsetzung inklusive der Gestalt, konkretem Software-Code oder ähnlichem beschreiben. Die logische Architektur lässt sich somit auch als konsolidierte und abstrahierte Darstellung der Wirkstruktur verstehen.

Ziel der Modellierung der logischen Architektur für die hier vorgestellte Modellierungsmethode ist in erster Linie die Schaffung einer interdisziplinären, abstrahierten Darstellung der Konzepte zur technischen Umsetzung des Systems. Hierfür werden insbesondere Block-Darstellungen, sowohl zur Darstellung der Hierarchie als auch zur Darstellung der Interaktion der einzelnen Elemente der logischen Architektur, verwendet. Auf diese Weise soll eine interdisziplinäre Kommunikationsbasis geschaffen werden und eine Verknüpfung – und damit Nachvollziehbarkeit – der logischen Architektur zu funktionaler Beschreibung, Anforderungsmanagement und Produktprofil/Problemraum ermöglicht werden. Dabei kommt der Modellierung von Schnittstellen und Stoff-, Energie- und Informationsflüssen zwischen den einzelnen Blöcken der logischen Architektur eine zentrale Bedeutung zu.

Wie dargelegt ist die Abgrenzung der logischen Architektur zur funktionalen Architektur auf der einen Seite und zur physischen Architektur (siehe nächster Absatz) auf der anderen Seite nicht immer ganz offensichtlich. Insbesondere die im Absatz zur funktionalen Architektur beschriebene Bedeutung der gemeinsamen Modellierung von Funktions-Gestalt-Zusammenhängen widerspricht in Teilen der explizit losgelösten Beschreibung der logischen Architektur. Wie bei der funktionalen Architektur erläutert, gilt jedoch auch hier, dass die Beschreibung der logischen Architektur nicht mit deren Entwicklung gleichzusetzen ist.

In Abbildung 2.27 ist auszugsweise die logische Architektur des Fahrzeugs für das Leitbeispiel dargestellt. Hierbei werden die hierarchischen Beziehungen der einzelnen logischen Systemelemente modelliert.

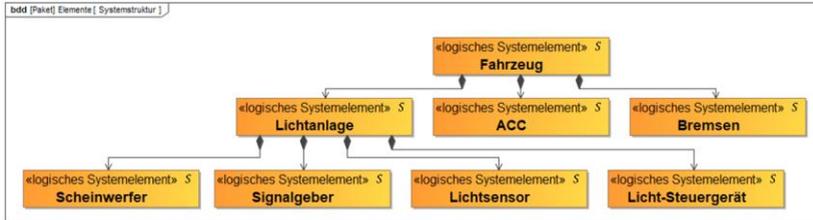


Abbildung 2.27: Logische Architektur des SID Fahrzeug für das Leitbeispiel (Auszug)

Beispielhafte Informationsflüsse zwischen logischen Systemelementen des Fahrzeugs sind vereinfacht in Abbildung 2.28 dargestellt. Hierbei ist modelliert, dass eine Kamera die Fahr- und Verkehrssituation aufnimmt und diese an ein Steuergerät weiterleitet. Das Steuergerät sendet wiederum Signale an den Motor und an die Bremsen, um das Fahrzeug, gemäß der Fahrsituation, zu beschleunigen oder zu bremsen. Zusätzlich werden durch das Steuergerät Signale an das HMI im Cockpit des Fahrzeugs gesendet, damit ein Fahrer/eine Fahrerin über den aktuellen Zustand des ACC-Eingriffs informiert wird.

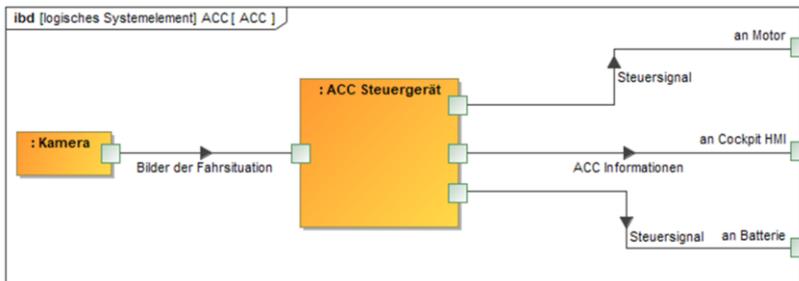


Abbildung 2.28: Informationsflüsse des ACC-Systems für das Leitbeispiel (verkürzte und vereinfachte Darstellung)

Modellierung der physischen Architektur

In Anlehnung an Weilkens (2014) wird in der VDI 2221 die physische Produktarchitektur als „Gesamtheit der Module oder Lösungsbausteine, aus denen das Produkt/System besteht“ definiert (VDI-Richtlinie 2221:2019-11-00 Blatt 1,

S. 8). Weilkens beschreibt, dass oftmals keine klare Trennung zwischen physischer und logischer Systemarchitektur herrscht und in der Praxis oft „Mischformen“ anzutreffen sind (Weilkens, 2014). Grundsätzlich geht die physische Architektur jedoch über die Modellierung von Konzepten hinaus und beschreibt konkrete technische Lösungen (Weilkens, 2014).

Eine detaillierte Betrachtung und Modellierung der physischen Architektur ist nicht Teil der in dieser Dissertation vorgestellten konsolidierten Modellierungsmethode. Die Modellierung der physischen Architektur ist, gemäß der drei Hauptmerkmale von Modellen nach Stachowiak, nicht Teil der mit Hilfe der Modellierungsmethode erstellten Modelle (Stachowiak, 1973, S. 131–133). Die mittels der vorgestellten Modellierungsmethode erstellten Modelle stellen pragmatisch und problemorientiert nur ein (verkürztes) Abbild des modellierten Systems dar. Die physische Architektur befindet sich dabei außerhalb des anvisierten Betrachtungsraums.

Für die Modellierung der physischen Architektur existiert bereits eine Vielzahl disziplinspezifischer Modellierungsansätze. So beschreiben beispielsweise Matthiesen, Grauberger, Bremer und Nowoseltschenko (2019) 34 verschiedene Arten von Produkt-Modellen für die Modellierung der Gestalt, wie CAD-Modelle oder FEM-Simulationsmodelle. Um trotzdem Elemente der physischen Architektur mit in die Nachvollziehbarkeit der Modellierung einzubinden und so unter anderem die Nachvollziehbarkeit z.B. zur funktionalen Architektur und dem Produktprofil herzustellen, können „Platzhalter-Elemente“ der physischen Architektur eingeführt und modelliert werden. Diese sind somit in den erstellten Systemmodellen verfügbar. Sie stellen eine Schnittstelle (bspw. in Form eines Hyperlinks) zu weiteren Modellen dar und können daher bspw. zu CAD-Modellen in einem PDM System verknüpft werden.

Verknüpfung und Nachvollziehbarkeit der einzelnen Modellelemente

Wie in Absatz 2.4.2 beschrieben, ist die Etablierung der Nachvollziehbarkeit zwischen verschiedenen Elementen der Produktbeschreibung ein zentraler Vorteil und Anreiz zum Einsatz von MBSE. Neben der Verlinkung zwischen den gleichen Klassen von Elementen eines erstellten Systemmodells (bspw. hierarchische Beziehungen zwischen Funktionen und Sub-Funktionen) ist insbesondere die Verknüpfung zwischen Klassen von Elementen aus verschiedenen Modellierungsaktivitäten für die vorgestellte Modellierungsmethode essenziell.

Gemäß den obigen Beschreibungen ist die Modellierung folgender Beziehungen vorgesehen:

- Die Verknüpfung von Stakeholdern und Umweltsystemen mit den basierend auf ihren Bedarfen konkretisierten Zielen bzw. Randbedingungen und den Anwendungsfällen, an denen die Stakeholder/Umweltsysteme beteiligt sind
- Die Verknüpfung der Ziele und Randbedingungen zu den Systemanforderungen, die aus den Zielen und Randbedingungen entwickelt werden
- Die Verknüpfung der Anwendungsfälle beziehungsweise einzelner Schritte/Aktivitäten in diesen, zu Funktionen, um die Konsolidierung der Anwendungsfall-Aktivitäten in den Funktionen abzubilden
- Die Verknüpfung von Systemanforderungen zu Elementen der logischen Architektur bzw. von funktionalen Systemanforderungen zu Elementen der funktionalen Architektur, um den Beitrag zur Erfüllung der Anforderungen zu beschreiben
- Die Verknüpfung von Elementen der funktionalen Architektur zu Elementen der logischen Architektur zur Darstellung, welche logischen Elemente an der Erfüllung der einzelnen Funktionen beteiligt sind
- Die Verknüpfung von Elementen der logischen Architektur zu Elementen der physischen Architektur, um eine Verknüpfung zu externen Modellen herzustellen, die die Umsetzung bzw. Implementierung der Produktgeneration abbilden

Durch diese Verknüpfung der Informationen werden Nachvollziehbarkeits-Ketten von den Stakeholdern und Zielen über ausformulierte Systemanforderungen, angestrebte Funktionen und die geplante (logische) Architektur bis hin zur tatsächlichen technischen Ausgestaltung hergestellt. Diese Verknüpfung bildet die Grundlage für verschiedene (Teil-) Methoden und Analysen mit Hilfe des Modell, z.B. Auswirkungs- und Risikoanalysen von Änderungen (Mandel, Stürmlinger, Yue, Behrendt & Albers, 2020).

Die Modellierung der einzelnen Verknüpfungen kann beispielsweise über Matrizen erfolgen. Für das Leitbeispiel ist in Abbildung 2.29 die Verknüpfung von Zielen und Randbedingungen zu daraus abgeleiteten Systemanforderungen dargestellt.

Legend		Systemanforderungen								
DeriveReq		f/Req 30	f/Req 31	f/Req 32	f/Req 33	f/Req 34	f/Req 35	f/Req 36	f/Req 37	f/Req 38
		Aufprall-Erkennung	Benachrichtigung im Falle einer Sto	Akustischer Indikator Tür	AEB_res_dis_min	AEB_det_distance	AEB_decel_distance	AEB_a_min	ACC_rel_dis_min	ACC_a_E_x_min
Ziele und Randbedingungen		3	1	2	1	1	1	1	2	1
SN 27	Beschleunigen und Bremsen ACC	5	↗							
SN 28	Automatisches Bremsen	6	↗		↗	↗	↗	↗	↗	↗
SN 29	Erkennungswarnung	3	↗	↗	↗					

Abbildung 2.29: Verknüpfung von Zielen und Randbedingungen zu daraus abgeleiteten Systemanforderungen für das Leitbeispiel

Dank der im Modell etablierten Verknüpfungen können Darstellungen wie Abbildung 2.30 automatisiert im Systemmodell erzeugt werden. Dort ist (auszugsweise) zu sehen, welche Ziele sich aus dem Stakeholder „Fahrer/Fahrerin“ beziehungsweise dessen/deren Bedarfen ableiten. Für das Ziel des automatischen Bremsens sind die damit in Verbindung stehenden abgeleiteten Systemanforderungen gezeigt. Die Anforderung „AEB_res_dis_min“ spezifiziert z.B. den minimalen einzuhaltenden Abstand zu einem Hindernis im Falle einer Notbremsung durch das AEB System (siehe auch Abbildung 2.25). Weiterhin ist gezeigt, welche Elemente der funktionalen und der logischen Architektur (bspw. die Bremsen) an der Umsetzung der Systemanforderung beteiligt sind.

Dieser Absatz stellt abstrahiert eine konsolidierte Modellierungsmethode basierend auf Best Practices und Beschreibungen aus dem Stand der Forschung zu MBSE dar. In den nächsten Teilkapiteln werden einige prominente im Stand der Forschung beschriebene Modellierungsmethoden eingeführt.

2.5.2 Im Stand der Forschung beschriebene Modellierungsmethoden

Object Oriented Systems Engineering Method (OOSEM)

Die Object Oriented Systems Engineering Method (OOSEM) wird von Friedenthal et al. (2012) beschrieben. Unter Nutzung von SysML adressiert OOSEM Top-Down die Analyse, die Spezifikation, das Design und die Verifikation eines Systems. In Abbildung 2.31 sind die übergreifenden Aktivitäten der OOSEM dargestellt.

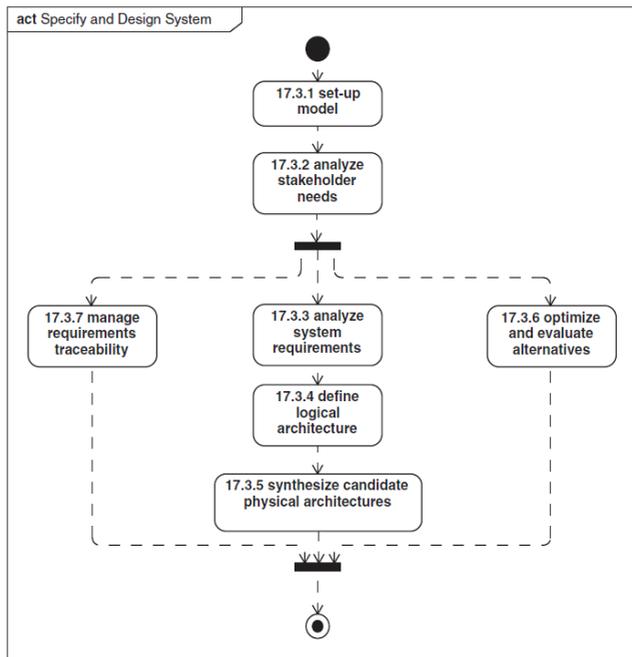


Abbildung 2.31: Übersicht über die einzelnen Schritte der OOSEM (Friedenthal et al., 2012, S. 436)

Jede Aktivität besteht dabei wiederum aus einzelnen Sub-Aktivitäten. Nach dem Aufsetzen und Organisieren des Modells („set-up model“) ist zunächst eine Analyse von Stakeholder-Bedarfen und Anwendungsfällen vorgesehen („analyze stakeholder needs“). Anschließend werden die Anforderungen an das System erarbeitet und analysiert („analyze system requirements“). Dem folgt die Entwicklung der logischen Architektur des Systems („define logical architecture“), welche anschließend in die physische Architektur überführt wird („synthesize candidate physical architectures“). Parallel dazu werden Aktivitäten zur Modellierung beziehungsweise Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit zwischen Anforderungen untereinander sowie zur Systemarchitektur („manage requirements traceability“) und zur Optimierung und Evaluation von (Design-) Alternativen („optimize and evaluate alternatives“) durchgeführt. (Friedenthal et al., 2012)

SYSMOD – Systems Modeling Toolbox

Weilkiens beschreibt mit SYSMOD Modellierungsaktivitäten zur Unterstützung bei der Analyse und Architekturentwicklung eines Systems. Ein potenzieller Ablauf von SYSMOD-Modellierungsaktivitäten ist dabei in Anhang A1 und Anhang A2, gesplittet für die Analyse und Architekturentwicklung, dargestellt. Weilkiens betont jedoch, dass die einzelnen Aktivitäten nicht zwingend starr sequentiell zu befolgen sind, sondern bedarfsgerecht im Sinne eines Werkzeugkastens durchgeführt werden sollen. Für SYSMOD wird ein SysML-Profil entwickelt, um die Modellierung zu unterstützen. Die Analyse nach SYSMOD startet mit einer Beschreibung der Systemidee beziehungsweise der Systemziele. Darauf aufbauend werden mit der sogenannten Basisarchitektur des Systems Entscheidungen zu konkreten Technologien und Architekturkonzepten als Randbedingungen festgelegt. Basisarchitektur sowie Systemidee und Systemziele sind Eingangsgrößen zur Ermittlung und Modellierung von Anforderungen. Weilkiens trennt dabei explizit zwischen Anforderungen aus Stakeholder-Sicht und daraus abgeleiteten Systemanforderungen (aus technischer Sicht). Anforderungen sind wiederum eine Eingangsgröße zur Modellierung des Systemkontexts und Anwendungsfällen/Anwendungsfall-Abläufen des Systems. Schließlich beschreibt Weilkiens bei der Modellierung zur Systemanalyse die Modellierung von Fachwissen, um genutzte Begrifflichkeiten eindeutig zu beschreiben und ein eindeutiges Verständnis aller Beteiligten zu etablieren. (Weilkiens, 2014)

Die modellierten Anwendungsfälle sowie der Systemkontext dienen als Eingangsgrößen bei der Modellierung zur Unterstützung der Architekturentwicklung gemäß SYSMOD. Darauf aufbauend wird die logische Architektur des Systems entwickelt. Basierend auf dieser wird schließlich die physische Architektur entwickelt und modelliert. (Weilkiens, 2014)

Functional Architecture for Systems (FAS), FAS4M und FAS4X

Das Ziel der Functional Architecture for Systems Methode (FAS) nach Lamm und Weilkens ist die Modellierung einer funktionalen Architektur eines Systems, welche eine längere Lebensdauer als die technische Ausgestaltung des Systems aufweist (Lamm & Weilkens, 2014). Ausgehend von der Interaktion eines Systems mit der Systemumwelt werden Anwendungsfälle des Systems beschrieben. Diese werden wiederum durch einzelne Anwendungsfall-Aktivitäten detailliert. Anschließend erfolgt eine Gruppierung der Anwendungsfall-Aktivitäten über die unterschiedlichen Anwendungsfälle hinweg, beispielsweise unterstützt durch Heuristiken. Diese sogenannten funktionalen Gruppen werden schließlich zu Elementen der funktionalen Architektur des Systems weiterentwickelt. (Lamm & Weilkens, 2014)

Die Functional Architecture of Systems for Mechanical Engineers Methode (FAS4M) baut auf der FAS-Methode auf und erweitert diese, insbesondere im Hinblick auf die Unterstützung von Entwickelnden aus dem Feld der Mechanik. Dafür werden für die FAS4M-Methode vier Sichten zur Modellierung definiert. Diese Sichten und Aktivitäten zur Arbeit in diesen Sichten sind in Abbildung 2.32 dargestellt. Zu Erläuterungszwecken werden die Aktivitäten als sequentieller Ablauf dargestellt. Wie bereits im Rahmen der Beschreibungen zum Modell der SGE erläutert (siehe Absatz 2.1.3) spiegelt ein solch sequentieller Ablauf jedoch nicht das reale Vorgehen in der Praxis dar. Daher werden für die FAS4M-Methode explizit andere Abläufe und das iterative Durchführen der Aktivitäten betont. So werden in der FAS4M-Methodenguideline beispielsweise auch alternative Abläufe der Aktivitäten für die Anwendungsfälle „System dokumentieren“, „System analysieren“ und „System weiterentwickeln“ dargestellt. (Moeser, 2016)

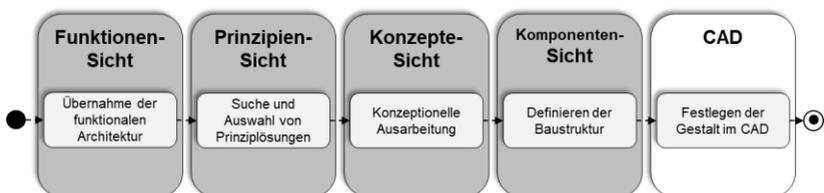


Abbildung 2.32: Sichten der FAS4M-Methode (adaptiert nach Moeser et al., 2016, S. 3)

Ausgangspunkt bildet die Übernahme der funktionalen Architektur gemäß der FAS-Methode. Zur Umsetzung dieser werden Lösungsprinzipien gesucht und mittels Methoden wie z.B. morphologischer Kästen ausgewählt. Die Lösungsprinzipien werden in der Konzepte-Sicht zur logischen Architektur ausgearbeitet. Der Konzepte-Sicht schließt sich die Komponenten-Sicht an, in der die physische

Architektur des Systems modelliert wird. Die Komponenten-Sicht ist dabei bidirektional mit der Modellierung der Gestalt in einem CAD-System verknüpft. (Moeser et al., 2016; Moeser, 2016)

Zur Unterstützung der FAS4M-Methode wurde ein SysML-Profil namens „MechML“ entwickelt, das beispielsweise Elemente zur Modellierung von Lösungsprinzipien oder Konzepten definiert (Roth & Scheithauer, 2016). Zudem wurden Ansätze zum Einbringen freier Skizzen in die semi-formale Modellierung mit SysML entwickelt (Moeser et al., 2016).

Dem Konzept der FAS4M-Methode folgend, wurden für den FAS4X-Ansatz (Functional Architecture of Systems for X) Anknüpfungspunkte für die Integration weiterer Disziplinen beschrieben. Der FAS4X-Ansatz integriert neben der FAS4M-Methode die Teil-Methoden FAS4EL, FAS4SPS und FAS4Modelica. Ziel des FAS4X-Ansatzes ist es, zusätzlich zu den Aktivitäten auf der linken Seite des V-Modells (siehe Absatz 2.2.2) bereits frühzeitig und kontinuierlich Aktivitäten zur Validierung des Systems einzubringen. Hierzu wird die Unterstützung beim Aufbau rein virtueller Validierungsumgebungen gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes (siehe Absatz 2.3.2) angestrebt. Neben der methodischen Beschreibung wird für FAS4X ebenfalls ein SysML-Profil entwickelt. Der Fokus des FAS4X-Ansatzes liegt insbesondere auf den Teil-Methoden FAS4SPS und FAS4Modelica. Mittels FAS4SPS wird die Modellierung zur Entwicklung von Steuerungscode für Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) unterstützt. Mittels FAS4Modelica wird die Modellierung zum Aufbau eines Simulationsmodells in der Modellierungssprache Modelica (Modelica Association, 2021) ermöglicht. Das mittels FAS4Modelica erstellte SysML-Modell kann über eine Schnittstelle zum semi-automatischen Aufbau des Modelica-Modells exportiert werden. Über eine Schnittstelle basierend auf dem Kommunikationsstandard OPC (B. Krause, 2022) können zudem das generierte Modelica-Modell und die Umgebung zur Entwicklung des SPS-Codes verknüpft werden, um die Code-Entwicklung parallel zur Simulation des Modelica-Modells durchführen und validieren zu können. (Kleiner, Husung, Mandel, Albers & Behrendt, 2017)

CONSENS/INVIRTES

Mit der Spezifikationstechnik CONSENS beschreiben Gausemeier et al. (2012) einen Ansatz zur integrativen Entwicklung und Modellierung von Produkt und Produktionssystem. CONSENS definiert dabei sowohl eine Methode als auch eine eigene graphische Modellierungssprache. Letztere existiert dabei sowohl als unabhängige Modellierungssprache als auch als UML-Profil (Bernijazov, Hillebrand, Bremer, Kaiser & Dumitrescu, 2018; Gausemeier et al., 2012). Für CONSENS wird

die Erstellung von insgesamt zehn Partialmodellen zur Modellierung der Prinziplösung eines mechatronischen Systems beschrieben (siehe Abbildung 2.33).

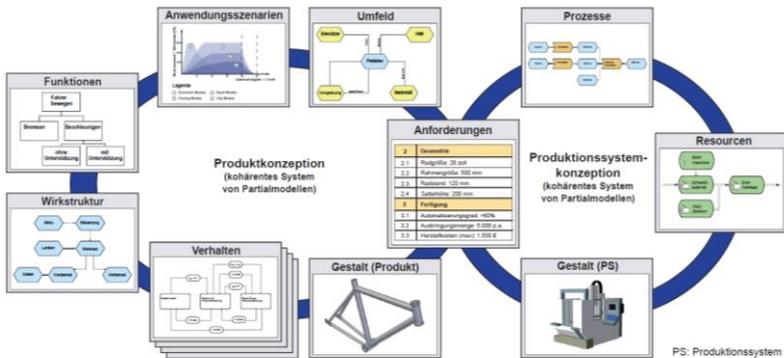


Abbildung 2.33: Partialmodelle nach CONSENS (Gausemeier et al., 2012, S. 90)

Für die Modellierung nach CONSENS wird ein Vorgehensmodell für Modellierungsaktivitäten in den einzelnen Partialmodellen beschrieben. Ähnlich wie bei SYSMOD wird jedoch betont, dass die Erstellung der Partialmodelle im Wechselspiel erfolgt. (Gausemeier et al., 2012)

Gemäß dem Vorgehensmodell werden zunächst das Systemumfeld und die Schnittstellen zum zu entwickelnden System beschrieben. Dies ist vergleichbar mit der Modellierung des Systemkontexts (siehe Absatz 2.5.1). Anschließend folgt eine Beschreibung der Anwendungsszenarien (ähnlich zur Modellierung von Anwendungsfällen, siehe Absatz 2.5.1). Anschließend folgt die Modellierung von Anforderungen, Funktionen und der Wirkstruktur (bzw. logischen Architektur) des Systems. Für das System wird schließlich die Gestalt ausgearbeitet (vgl. physische Architektur in siehe Absatz 2.5.1) und das Verhalten, z.B. in Form von Zustandsautomaten, als Ausgangspunkt für den Entwurf von Software und Regelungstechnik modelliert. Die Modellierung für das Produktionssystem erfolgt über die Beschreibung von Produktionsprozessen (Betriebsmittel-unabhängig), Ressourcen (Maschinen, Personen etc.), die die Prozesse ausführen und im Modell mit diesen verknüpft sind sowie der Gestalt des Produktionssystems. (Gausemeier et al., 2012)

Bremer, Hillebrand, Hassan und Dumitrescu (2015) konstatieren, dass in bestehenden MBSE-Ansätzen Aspekte zur Unterstützung der Verifikation im Produktentstehungsprozess (bspw. die Beschreibung von Testfällen) noch

unzureichend adressiert werden. Aufbauend auf CONSENS stellen die Autoren daher eine Sprach- und Methoden-Erweiterung zur Spezifikation von Testumgebungen (dort: Testbeds) und das ganzheitliche Testen mechatronischer Systeme vor. Hierzu beschreiben die Autoren sechs Partialmodelle (siehe Abbildung 2.34). Das Partialmodell Anforderungen entspricht dabei den Beschreibungen nach CONSENS (siehe oben). Die Modellierung von Testszenarien wird verwendet, um Anwendungsszenarien zu konkretisieren sowie Vorbedingungen, Ablauf, Abbruchkriterien und das erwartete Verhalten eines Systems für einen Test zu beschreiben. Für das Testobjekt wird das zu testende System auf Grundlagen des mittels CONSENS erstellten Systemmodells beschrieben. Das Testumfeld beschreibt das Umfeld, inklusive Randbedingungen und Einflussfaktoren, in welchem das Testobjekt sich befindet. Testmerkmale werden zur Spezifikation der zu testenden Merkmale des Systems auf Basis der Anforderungen verwendet. Die Testkonfiguration gibt schließlich die konkrete Konfiguration eines Testbeds, spezifisch für ein Testszenario an. (Bremer et al., 2015)

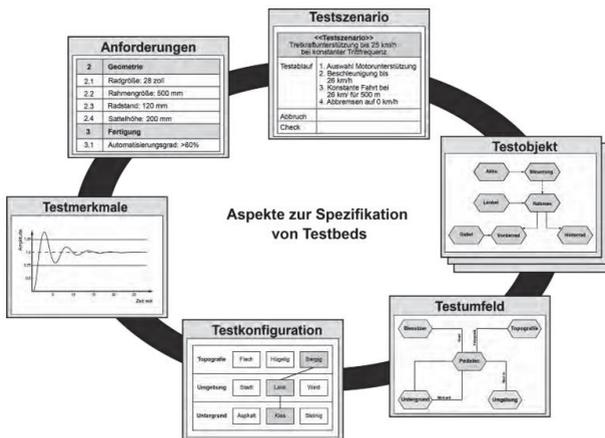


Abbildung 2.34: Erweiterung der CONSENS Spezifikationstechnik zur Spezifikation von Testbeds (Bremer et al., 2015, S. 157)

Zusätzlich beschreiben die Autoren eine Vorgehenssystematik für das ganzheitliche Testen, bestehend aus Systemanalyse, Definition von Testszenarien, Definition der Testkonfigurationen/Testumgebung und Beschreibung von Testmerkmalen sowie zu testenden Anforderungen (Bremer et al., 2015). Im Projekt INVIRTES (Integrierte Entwicklung komplexer Systeme mit virtuellen Testbeds auf der Basis zentraler Weltmodelle und moderner Konzepte der eRobotik) wurde zudem ein UML-Profil zur Unterstützung der Spezifikationstechnik für Testbeds entwickelt (Bernijazov et

al., 2018). Hier finden sich auch Beispielanwendungen für Systeme aus der Raumfahrt (Bernijazov et al., 2018).

2.5.3 Zwischenfazit

In Absatz 2.5 werden verschiedene bekannte MBSE-Modellierungsmethoden vorgestellt. Die übergreifende abstrakte Beschreibung verschiedener Modellierungsaktivitäten (siehe Absatz 2.5.1) basiert auf kondensierten Gemeinsamkeiten unterschiedlicher in der Literatur beschriebener Modellierungsmethoden für Elemente des Produktprofils/Problemraums, für Systemanforderungen sowie für Elemente der funktionalen-, logischen, und physischen Architektur. Die vorgestellten Modellierungsmethoden aus dem Stand der Forschung beschreiben hauptsächlich Abläufe beziehungsweise Vorgehensmodelle zur Modellierung. Teilweise werden Sprachen, oftmals in Form von SysML-/UML-Profilen beschrieben. Die Modellierungsmethoden werden dabei unabhängig von einer Implementierung in einem Software-Tool beschrieben.

Morkevicius, Aleksandraviciene, Mazeika, Bisikirskiene und Strolia (2017) stellen fest, dass den meisten Modellierungsmethoden ein Rahmenwerk bzw. (Architektur-) Framework zur Organisation von erstellten Systemmodellen fehle. Dadurch seien die Modellierungsmethoden zu abstrakt, um auf reale Problemstellungen angewendet zu werden. Im Folgenden soll daher auf Hintergrund und Nutzen von Architekturframeworks zur Unterstützung und Formalisierung von Modellierungsmethoden eingegangen. Zudem werden einige im Stand der Forschung beschriebene Architekturframeworks vorgestellt.

2.6 Systemarchitektur und Architekturframeworks

In diesem Absatz wird zunächst der Begriff der (System-) Architektur definiert und erläutert. Zusätzlich werden Begrifflichkeiten, die zur Erstellung und Beschreibung von Systemarchitekturen und Architekturframeworks verwendet werden eingeführt. Anschließend folgt eine Übersicht bekannte MBSE-Ansätze, die die Nutzung von Architekturframeworks beschreiben.

2.6.1 Begriffsverständnis und Abgrenzung

Gemäß der ISO 42010 ist (System-) Architektur definiert als:

Definition (System-) Architektur

„[...] grundlegende Konzepte oder Eigenschaften eines Systems in seiner Umgebung, die in seinen Elementen, Beziehungen und in den Grundsätzen seiner Gestaltung und Entwicklung verkörpert sind.“

(ISO 42010:2022-11, S. 2, eigene Übersetzung)

Zur Beschreibung von Architekturen wird in der ISO 42010:2022-11 die Verwendung von Architekturframeworks beschrieben. Der Begriff Architekturframework findet jedoch in unterschiedlichen Kontexten Anwendung. So beschreiben Gurbuz & Tekinerdogan (2018) mit Bezug zu Systems Engineering drei Arten von Architekturframeworks (Architecture Frameworks): Software Engineering Architecture Frameworks, Enterprise Architecture Frameworks und Systems Engineering Architecture Frameworks. Erstere beziehen sich dabei auf die Entwicklung von Software und sind nicht im Fokus dieser Arbeit. Enterprise Architecture Frameworks hingegen dienen der Modellierung von Unternehmen oder Organisationen (Weilkiens et al., 2015). Zum Teil wird zudem bereits die Nutzung von Enterprise Architecture Frameworks zur Modellierung von SoS angedacht (siehe bspw. das UAF – Unified Architecture Framework, Aleksandraviciene & Morkevicius, 2021). Im Zuge dieser Arbeit liegt der Fokus jedoch auf Systems Engineering Architecture Frameworks zur Modellierung der Architektur von (sozio-technischen) Systemen. Im Folgenden wird daher zur einfachen Lesbarkeit lediglich der Begriff Architekturframework verwendet.

Zur Entwicklung von MBSE-Ansätzen unter Nutzung von Architekturframeworks beschreiben Holt und Perry (2018) drei Bestandteile:

- Eine Ontologie als Grundlage für eine Modellierungssprache
- Viewpoints und Views, die jeweils verschiedene Ausschnitte der Ontologie umfassen
- Ein Architekturframework (bei Holt und Perry lediglich als Framework bezeichnet), dass alle Viewpoints/Views integriert.

Ursprünglich kommt der Begriff der Ontologie aus der Philosophie. Ontologien finden jedoch seit den 1990er Jahren Verbreitung in der Informatik (Studer & Sure-

Vetter, 2019, 12. März). Studer und Sure-Vetter beschreiben in ihrer Definition, dass eine Ontologie durch drei Aspekte charakterisiert wird:

Definition Ontologie

„Eine Ontologie ist

- eine explizite, formale Spezifikation
- der Konzeptualisierung eines abgegrenzten Diskursbereichs zu einem definierten Zweck
- auf die sich eine Gruppe von Akteuren geeinigt hat.“

(Studer & Sure-Vetter, 2019)

Für diese Arbeit sind insbesondere die Beschreibungen zur Konzeptualisierung des abgegrenzten Diskursbereichs für einen definierten Zweck von Bedeutung. Nach Studer und Sure-Vetter (2019, 12. März) umfassen Ontologien dabei in der Regel:

- Eine Taxonomie von Begriffen bzw. Klassen
- Attribute an diesen Begriffen/Klassen
- Beziehungen zwischen den Begriffen/Klassen

Zusätzlich können Ontologien Axiome (z.B. Kardinalitäten von Beziehungen) enthalten oder mittels Regelsprachen um Integritätsbedingungen oder Herleitungswissen zur Beschreibung impliziter Zusammenhänge ergänzt werden (Studer & Sure-Vetter, 2019, 12. März).

Auch im MBSE-Ansatz nach Holt und Perry werden durch die Ontologie Begriffe/Klassen einer Modellierungssprache sowie deren Abhängigkeiten identifiziert und definiert. Mittels der aufgebauten Ontologie wird anschließend die domänenübergreifende Modellierungssprache SysML für den durch die Ontologie beschriebenen Anwendungsbereich (vgl. auch oben „Diskursbereich“ in der Definition zur Ontologie) erweitert beziehungsweise eingeschränkt und somit konkretisiert (Holt & Perry, 2018, S. 10). Dadurch soll ein eindeutiges und geteiltes Verständnis der genutzten Begriffe/Klassen und deren Abhängigkeiten im betrachteten Themengebiet etabliert werden (Holt & Perry, 2018).

In der Ontologie werden dabei (zunächst abstrakt) Begriffe beziehungsweise Klassen von Elementen und deren Attribute und Beziehungen festgelegt, die zur Modellierung verwendet werden sollen beziehungsweise dürfen. In der Informatik

wird bei der Beschreibung von Ontologien zwischen „Lightweight-Ontologien (LWO)“ und „Heavyweight-Ontologien (HWO)“ unterschieden (Gómez-Pérez, Fernández-López & Corcho, 2004; Hildebrandt et al., 2020): LWOs beschreiben dabei Konzepte sowie deren Abhängigkeiten und Eigenschaften auf abstrakter Ebene. Zur Beschreibung und Darstellung der LWO können beispielsweise UML-Klassendiagramme verwendet werden. HWOs hingegen beinhalten zusätzlich Axiome, Integritätsbedingungen und/oder Herleitungswissen, um LWOs zu konkretisieren. Die Ontologie nach Holt und Perry weist somit zunächst Charakteristika eine LWO auf. Sie dient zur Anpassung semi-formaler Modellierungssprachen, beispielsweise in Form eines SysML-Profiles. Dieses trägt wiederum Charakteristika eine HWO, kann jedoch nicht zwangsläufig als vollständige HWO im Sinne der Informatik bezeichnet werden kann. Durch die Entwicklung der Ontologie und Anpassung der genutzten Modellierungssprache soll ein eindeutiges und geteiltes Verständnis der für die Modellierung zu nutzenden Begriffe beziehungsweise Klassen von Elementen und deren Abhängigkeiten etabliert werden.

Die Beschreibung von Viewpoints und Views nach Holt und Perry lehnt sich an die Definitionen der ISO 42010:2022-11 an. Ein Viewpoint bezieht sich dabei auf mindestens einen Informationsbedarf eines Stakeholders des Modells. Ein Viewpoint umfasst Aussagen dazu, welche Ausschnitte des Modells der Stakeholder zur Analyse oder Synthese hinsichtlich des beschriebenen Bedarfs benötigt. Dementsprechend beschreibt ein Viewpoint im Ansatz nach Holt und Perry einen Ausschnitt beziehungsweise Filter auf die Ontologie bezüglich eines Informationsbedarfs. Ein Viewpoint bestimmt die Regeln zum Aufbau eines oder mehrerer konkreter Views. Das Architekturframework beschreibt den Einsatz der Ontologie und die Gesamtheit der Viewpoints. (Holt & Perry, 2018)

Die oben beschriebenen Zusammenhänge sind in Abbildung 2.35 dargestellt und in Bezug zu weiteren Konzepten des MBSE nach Holt und Perry gesetzt. Das „Process Set“ umfasst Prozesse und Aktivitäten zur Modellierung. Diese werden mit Hilfe des Architekturframeworks durchgeführt. Die Views wiederum sind Teil eines Modells („Model“) welches ein System abbildet (vgl. Beschreibungen nach Stachowiak in Absatz 2.1.1). Im MBSE werden Views für gewöhnlich in Diagrammen realisiert (bspw. SysML-Diagramme). Diese Diagramme folgen einer festgelegten Notation (bspw. gemäß SysML). (Holt & Perry, 2018)

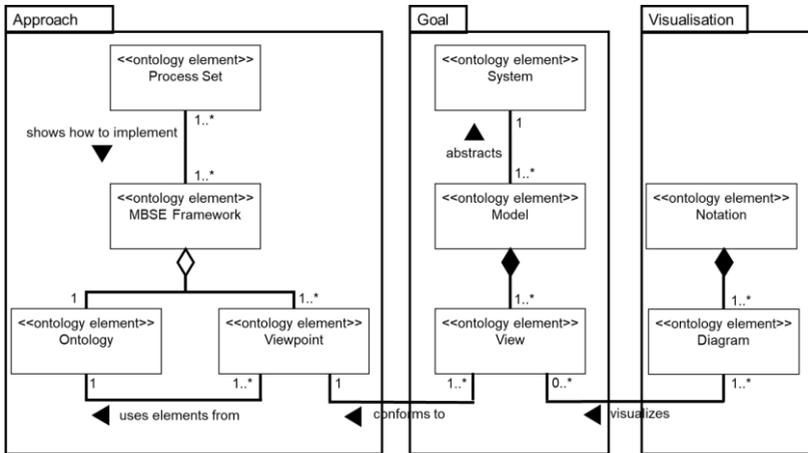


Abbildung 2.35: Elemente des MBSE-Ansatzes nach Holt und Perry (2018, S. 21)

Zusätzlich führen Weilkens et al. (2015) sowie die ISO 42010:2022-11 den Begriff „Perspektiven“ bei der Modellierung von Systemarchitekturen ein. In Anlehnung an diese Beschreibungen, werden für diese Dissertation Perspektiven zur Zusammenfassung mehrerer thematisch zusammenpassende Viewpoints verwendet. So könnte beispielsweise eine Perspektive „Funktionale Systembeschreibungen“ unter anderem einen Viewpoint für die Modellierung von Soll-Funktionen (z.B. „automatisch Notbremsung einleiten“) und einen Viewpoint für die Modellierung von Störfunktionen (z.B. „ungewollte Wärme erzeugen“) umfassen. In Tabelle 2.1 sind vereinfachte Beispiele für die in diesem Absatz eingeführten Begrifflichkeiten zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 2.1: Beispiele für die verwendeten Begrifflichkeiten zur Modellierung von Systemarchitekturen und Nutzung von Architekturframeworks

Begriff	Beispiel
Ontologie	Begriffe/Klassen wie „Funktion“, „Systemanforderung“ und deren Zusammenhänge
Viewpoint/View	„Soll-Funktionen“, „Störfunktionen“
Diagramm	SysML-Aktivitätsdiagramm
Perspektive	„Funktionale Systembeschreibung“
Process Set	Alle verwendeten Modellierungsaktivitäten wie z.B. „Soll-Funktionen modellieren“

In den letzten Jahren finden vermehrt Ansätze zur Nutzung von Architekturframeworks Einzug in die MBSE-Modellierung. In den folgenden Absätzen wird daher eine Auswahl von MBSE-Ansätzen unter Nutzung von Architekturframeworks vorgestellt.

2.6.2 Bekannte Architekturframeworks im MBSE

MagicGrid

Das MagicGrid von Dassault Systèmes kombiniert ein Architekturframework und eine Modellierungsmethode. MagicGrid verwendet dabei SysML als Modellierungssprache. Das entsprechende Architekturframework ist als Template in den Software-Tools zur Modellierung von Dassault Systèmes, insbesondere Cameo Systems Modeler (Dassault Systèmes, 2022, 18. März), verfügbar. Das Architekturframework für MagicGrid wird als zweidimensionale Matrix dargestellt (siehe Abbildung 2.36). Jede graue Box des Architekturframeworks repräsentiert einen Viewpoint des Modells. Die Viewpoints sind dabei in der einen Dimension in Problemraum, Lösungsraum und Implementierung untergliedert. In der anderen Dimension werden die Viewpoints nach den vier Säulen der SysML (Anforderungen-Struktur-Verhalten-parametrische Beziehungen) sowie Sicherheit und Zuverlässigkeit gegliedert. Dies dient gleichzeitig zur Organisation der Ordnerstruktur des Modells (bzw. im entsprechenden Software-Tool), für welches das MagicGrid verwendet wird. Zur Arbeit mit dem MagicGrid wird für jede der drei Ebenen – Problemraum, Lösungsraum und Implementierung – ein Modellierungsvorgehen beziehungsweise eine Modellierungsmethode beschrieben.

Auch dieses Modellierungsvorgehen ist vergleichbar mit der in Absatz 2.5.1 vorgestellten übergreifenden Modellierungsmethode. (Aleksandraviciene & Morkevicius, 2021)

		Pillar					
		Requirements	Structure	Behavior	Parameters	Safety & Reliability	
Domain	Problem	Black Box	Stakeholder Needs	System Context	Use Cases	Measures of Effectiveness (MOEs)	Conceptual and Functional Failure Mode & Effects Analysis (FMEA)
		White Box		Conceptual Subsystems	Functional Analysis	MoEs for Subsystems	Conceptual Subsystems FMEA
	Solution	System Requirements	System Structure	System Behavior	System Parameters	System Safety & Reliability (S&R)	
		Subsystem Requirements	Subsystem Structure	Subsystem Behavior	Subsystem Parameters	Subsystem S&R	
		Component Requirements	Component Structure	Component Behavior	Component Parameters	Component S&R	
	Implementation	Implementation Requirements					

Abbildung 2.36: MagicGrid Framework (adaptiert nach Aleksandraviciene & Morkevicius, 2021, S. 12)

Software Platform Embedded Systems XT (SPES XT)

Software Platform Embedded Systems XT (SPES XT) bezeichnet ein Forschungsprojekt mit 21 Partnern aus Industrie und Forschung. Für SPES XT wird eine modellbasierte Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses eingebetteter Systeme entwickelt. Die SPES XT Methodik ist jedoch auch auf andere Arten von Systemen anwendbar. Bestandteil von SPES XT ist das als „SPES Modeling Framework“ bezeichnete Architekturframework (siehe Abbildung 2.37). Auf der horizontalen Achse des SPES Modeling Frameworks sind die vier Viewpoints Anforderungen (Requirements)-Funktional (Functional)-Logisch (Logical)-Technisch (Technical, analog zur physischen Architektur) aufgereiht. Jeder Viewpoint kann entlang der vertikalen Achse in unterschiedlichen Hierarchieebenen (Levels of Granularity) des Systems (System, Sub-System etc.) modelliert werden. Zudem wird die Einführung übergreifender Perspektiven in einer dritten Dimension über alle Viewpoints hinweg angedacht. In diesen Perspektiven können beispielsweise Informationen zur Systemsicherheit („Safety“, ähnlich der Perspektive im MagicGrid Framework) modelliert werden. (Pohl, Broy, Daembkes & Hönninger, 2016)

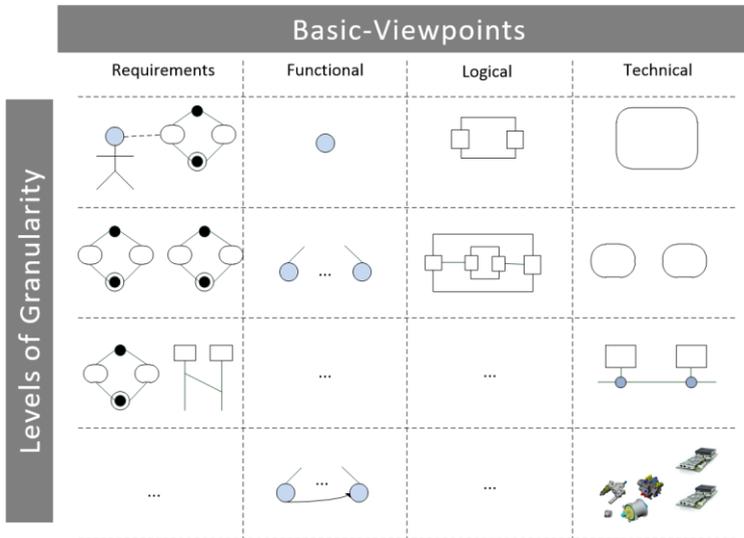


Abbildung 2.37: SPES XT Modeling Framework (Junker, 2018)

Im Rahmen der SPES XT-Methodik werden zudem sogenannte „Methodological Building Blocks“ beschrieben. Diese beschreiben jeweils Input, Output, Randbedingungen sowie eine methodische Unterstützung, beispielsweise in Form eines Leitfadens oder eines Tools, zur Unterstützung einer Aktivität im Produktentstehungsprozess. Für jeden Methodological Building Block werden zudem die Viewpoints aus dem SPES Modeling Framework beschrieben, die bei dessen Durchführung genutzt werden können. Dabei wird zwischen Construction Building Blocks und Analysis Building Blocks unterschieden. Construction Building Blocks dienen zur Synthese von Informationen im Modell beziehungsweise den unterschiedlichen Views. Analysis Building Blocks hingegen nutzen Informationen aus dem Modell für Analysen, die für gewöhnlich nicht im Modell hinterlegt werden. (Dau, Bohn, Brings & Weyer, 2016)

Während der Ausarbeitung der vorliegende Dissertation¹ laufen Aktivitäten zur Definition von SpesML, eines SysML-Profiles sowie eines Plug-Ins für das Modellierungstool MagicDraw zur Unterstützung der SPES XT Methodik (Femmer

¹ Stand Mai 2022

& Böhm, 2021). Somit werden das Architekturframework und die Methodological Building Blocks von SPES um eine angepasste Modellierungssprache sowie eine spezifische Tool-Implementierung ergänzt.

MBSE-Ansatz aus dem Projekt mecPro² – Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Produkte und Produktionssysteme

Ziel des Projekts mecPro² – Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Produkte und Produktionssysteme, war die Unterstützung des Entwicklungsprozesses cybertronischer Systeme mittels MBSE. Ein Fokus von mecPro² bestand in der integrierten Betrachtung der Entwicklung cybertronischer Produkte und Produktionssysteme. Der im Projekt entwickelte mecPro² MBSE-Ansatz beschreibt ein Architekturframework und ein damit verbundenes Prozessframework (siehe Abbildung 2.38). Der Aufbau des Architekturframeworks folgt dabei dem Ansatz nach Holt und Perry (2018) (siehe Absatz 2.6.1). Dementsprechend werden im mecPro² MBSE-Ansatz eine Ontologie und ein Satz an Viewpoints und Views beschrieben, die im Architekturframework integriert werden. Ähnlich wie beim SPES XT Modeling Framework werden auch beim mecPro² Architekturframework eine Dimension zur Beschreibung des Systems über verschiedene Hierarchieebenen und eine Dimension mit verschiedenen Ebenen zur Einordnung der Viewpoints (Kontext, Funktional, Prinziplösung, Technische Lösung) beschrieben. (Eigner, Dickopf, Schneider & Schulte, 2017)

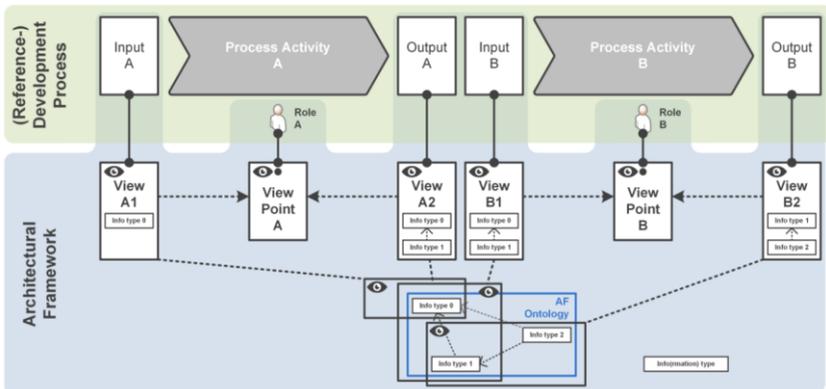


Abbildung 2.38: Zusammenspiel zwischen mecPro² Architekturframework und mecPro² Prozessframework (Eigner et al., 2017, S. 386)

Neben dem mecPro² Architekturframework wird das mecPro² Prozessframework beschrieben. Dabei wird verschiedenen Rollen im Produktentstehungsprozess jeweils ein fest definierter Viewpoint zugeordnet. Jeder Viewpoint wird durch einen oder mehrere Views ausgeprägt welche, je nach Aktivität im Produktentstehungsprozess, von der die Rolle ausfüllenden Person zur Modellierung verwendet werden. (Eigner et al., 2017)

2.6.3 Zwischenfazit

Um Rahmenwerke für die Erstellung und Organisation von Systemmodellen im MBSE zu bieten, werden in den letzten Jahren vermehrt MBSE-Architekturframeworks in Forschung und Anwendung beschrieben. Architekturframeworks gliedern sich somit als weiterer Baustein in die drei Säulen des MBSE – Modellierungssprache, Modellierungsmethode und Modellierungstool – ein. Ein Ansatz zur Erstellung von Architekturframeworks wird dabei von Holt und Perry beschrieben. Diese beschrieben die Erstellung einer Ontologie, welche zunächst abstrakt Klassen von Elementen und Beziehungen beschreibt, die für die Modellierung verwendet werden sollen. Durch die Integration dieser abstrakten Ontologie in einer Modellierungssprache wie SysML, wird so die Erstellung einer angepassten Modellierungssprache für den konkreten Einsatzzweck der Modellierung ermöglicht. Das Architekturframework besteht wiederum aus Viewpoints und Views, die jeweils Filter auf ein Systemmodell gemäß einem eingeschränkten Bereich der Ontologie ermöglichen.

Die Nutzung von MBSE-Architekturframeworks in Verbindung mit den weiteren Säulen des MBSE wird für diese Arbeit als vielversprechender Ansatz zur methodischen Unterstützung der Validierung im Entstehungsprozess komplexer Produkte gesehen. Im Folgenden wird daher zunächst das in Absatz 2.1.4 etablierte Begriffsverständnis der KaSPro zur methodischen Unterstützung im Produktentstehungsprozess um Begriffe des MBSE erweitert. Anschließend wird übergreifend zum beschriebenen Stand der Forschung ein Zwischenfazit gezogen und der Forschungsgegenstand für die vorliegende Dissertation geklärt.

2.7 Erweitertes Begriffsverständnis zur methodischen Unterstützung im Produktentstehungsprozess – Erweiterung um Konzepte des MBSE

Zur Etablierung eines einheitlichen Verständnisses für die KaSPro und für eine eindeutige Nomenklatur in den folgenden Kapitel der Arbeit wird an dieser Stelle

das in Absatz 2.1.4 etablierte Begriffsverständnis zur methodischen Unterstützung im Produktentstehungsprozess aufgegriffen und um das Verständnis aus den Beschreibungen zu MBSE aus Absatz 2.4, Absatz 2.5 und Absatz 2.6 ergänzt.

Analog zu den Beschreibungen in Absatz 2.1.4, wird der Begriff MBSE-Methodik als Überbegriff für eine Sammlung verschiedener Bestandteile verwendet. Eine MBSE-Methodik umfasst somit zunächst die drei Säulen des MBSE: eine Modellierungssprache, Modellierungsmethoden und ein Modellierungswerkzeug beziehungsweise Software-Tool zu deren Durchführung (siehe Absatz 2.4.2). Die Modellierungssprache ist dabei eine MBSE-spezifische Ergänzung, die in den Beschreibungen in Absatz 2.1.4 nicht auftaucht. Das in Absatz 2.1.4 etablierte Verständnis eines Frameworks für die Methodik wird für eine MBSE-Methodik durch die Nutzung eines Architekturframeworks gemäß den Beschreibungen in Absatz 2.6 spezifiziert. Im weiteren Verlauf der Arbeit bezeichnet daher der Begriff Framework ein Architekturframework im Verständnis des MBSE nach Absatz 2.6. Modellierungssprache, Modellierungsmethode, Architekturframework und Umsetzung in einem (Software-) Tool stellen somit integriert die Kernbestandteile einer ganzheitlichen MBSE-Methodik dar. Zusätzlich kann die MBSE-Methodik, angelehnt an die Beschreibungen aus Absatz 2.1.4, um Leitfäden wie Regeln oder Best Practices ergänzt werden. Den Beschreibungen in Absatz 2.1.4 folgend stellt ein Prozess, bestehend aus mehreren Aktivitäten, den Rahmen für das Einsatzgebiet der MBSE-Methodik dar.

Nach dem hier etablierten Verständnis ist der Prozess jedoch nicht explizit Bestandteil einer entwickelten MBSE-Methodik. Vielmehr kann eine MBSE-Methodik zur Unterstützung unterschiedlicher Prozesse eingesetzt werden.

Der Begriff Ansatz wurde in den Beschreibungen in Absatz 2.1.4 nicht eindeutig verwendet. Die Bezeichnung MBSE-Ansatz wird daher als abstrakter Begriff für eine beliebige, nicht vollständige Kombination oder Auswahl aus Modellierungssprache, Modellierungsmethode, Framework und (Software-) Tool verwendet.

2.8 Klärung des Forschungsgegenstands und Zwischenfazit

Die Analyse des Stands der Forschung zeigt die herausragende Bedeutung der Validierung im Produktentstehungsprozess. Die Bedeutung der Validierung wird zusätzlich für zukünftige, hochkomplexe Advanced Systems, beispielsweise für das automatisierte Fahren, weiter an Bedeutung gewinnen. Gleichzeitig gilt Validierung auch als aufwändigste Aktivität im Produktentstehungsprozess.

Es gilt daher, die Validierung im Produktentstehungsprozess methodisch zu unterstützen, um auch zukünftig den Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen hochkomplexer Advanced Systems zu gewährleisten. Eine umfassende Formalisierung und durchgängige methodische Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess ist bislang jedoch noch nicht gegeben (Albers, Behrendt et al., 2016).

Wie im Stand der Forschung gezeigt, bieten sich für diese methodische Unterstützung Ansätze des Leitbilds ASE, insbesondere MBSE an. gemäß der Leistungsstanderhebung zu ASE 2021 wird die Validierung von den Befragten als eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung von Advanced Systems angesehen (Dumitrescu et al., 2021). Zudem wird in der ASE Strategie die Ermöglichung der Validierung komplexer Systeme als ein zentrales Handlungsfeld gesehen (Albers, Dumitrescu et al., 2022).

In diesem Absatz werden die Herausforderungen bei der Validierung komplexer Advanced Systems konsolidiert zusammengefasst. Zusätzlich werden Herausforderungen und Forschungsbedarfe für den Einsatz von MBSE zur Unterstützung der Validierung herausgearbeitet. Damit wird die Grundlage zur Konkretisierung des Forschungsbedarfs und der Zielsetzung der Arbeit geschaffen.

2.8.1 Herausforderungen bei der Validierung komplexer Advanced Systems

Basierend auf der Analyse des Stands der Forschung, muss eine methodische Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess insbesondere drei Handlungsfelder adressieren:

Kontinuität

Wie in Absatz 2.2.4 beschrieben und von Albers, Behrendt et al. (2016) herausgestellt, sollte die Validierung bereits beginnend in frühen Phasen und kontinuierlich im Produktentstehungsprozess durchgeführt werden. Die

Notwendigkeit nach kontinuierlicher Validierung wird zudem in aktuellen Modellen des Produktentstehungsprozesses betont. Insbesondere im Zusammenspiel mit agilen Vorgehensweisen im Produktentstehungsprozess kann eine kontinuierliche Validierung zur ständigen Überprüfung, Konkretisierung und Erweiterung des Zielsystems beitragen (siehe Absatz 2.2.3 und Absatz 2.3). Die kontinuierliche Validierung und deren Integration in agile Vorgehensweisen ist besonders vor dem Hintergrund derzeitiger und zukünftiger, hochkomplexer und interdisziplinärer Produktentstehungsprozesse unter ständiger Berücksichtigung der anvisierten Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen eine Notwendigkeit (Dumitrescu et al., 2021). So ist die frühe und kontinuierliche Validierung auch eines der Grundprinzipien des ASD (siehe Absatz 2.2.3). Durch die kontinuierliche Erweiterung und Konkretisierung des Zielsystems, werden im Verständnis des Pull-Prinzips der Validierung zudem kontinuierlich Entwicklungsaktivitäten für das SiD angestoßen (Albers et al., 2017). Wenngleich die Bedeutung der kontinuierlichen Validierung flächendeckend betont wird, geben die vorgestellten Modelle keine explizite methodische Unterstützung, wie eine kontinuierliche Validierung durchgeführt werden kann. Hierbei ist insbesondere auch das Zusammenspiel und die parallele Entwicklung von Produkt und Validierungssystem zu beachten. Dies bedingt das zweite Handlungsfeld, die Durchgängigkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess.

Durchgängigkeit

Durchgängigkeit der Validierung bedeutet die Integration der Entwicklung von Produkt und Validierungssystem über unterschiedliche Aktivitäten im Produktentstehungsprozess hinweg. Wie in Absatz 2.3 herausgestellt, sollte gemäß dem Pull-Prinzips der Validierung die Entwicklung von Produkt und Validierungssystem parallel, integriert und im ständigen Austausch erfolgen. Auf diese Weise kann eine zielgerichtete Entwicklung von Modellen für die Validierung erfolgen, die immer einen konkreten Kontext und Bezug zu Bedarfen, Zielen und konkreten Systemanforderungen, die sie erfüllen müssen, haben (Albers, Behrendt et al., 2016, Absatz 2.2.4). Gleichzeitig fokussieren viele Modelle des Produktentstehungsprozess lediglich auf die Aktivitäten zur Entwicklung des Produktes (siehe Absatz 2.2). Das Validierungssystem wird als Grundlage herangenommen, um Verifikation- und Validierungsaktivitäten für das Produkt durchzuführen, ohne dass dessen Entwicklung explizit adressiert wird (siehe bspw. das V-Modell, Absatz 2.2.2). Der IPEK-XiL-Ansatz beschreibt ein grundlegendes Verständnis und gibt methodische Unterstützung zum Aufbau von Validierungsumgebungen. Wie sich die Aktivitäten zum Aufbau der Validierungsumgebungen und damit des Validierungssystems konkret in den Produktentstehungsprozess integrieren wird hingegen nicht detailliert ausgeführt.

Zur Erreichung der Durchgängigkeit in der Entwicklung von Produkt und Validierungssystem ist es zudem essenziell, Entwicklungsartefakte und deren Abhängigkeiten nachvollziehbar zu beschreiben und zu dokumentieren, um gegenseitige Auswirkungen in der Entwicklung abschätzen zu können. Das dritte Handlungsfeld zur methodischen Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess ist daher die Nachvollziehbarkeit.

Nachvollziehbarkeit

Wie in Absatz 2.3 beschrieben, stellt die Herstellung einer Nachvollziehbarkeit von Informationen und Dokumentationen für die Validierung komplexer Advanced Systems eine Herausforderung dar. So beschreiben beispielsweise Utting, Pretschner und Legard (2012, S. 297, eigene Übersetzung):

„[...] Traditionell ist der Prozess der Ableitung von Tests eher unstrukturiert, nicht reproduzierbar, nicht dokumentiert, es fehlen detaillierte Begründungen für den Testentwurf und er hängt vom Einfallsreichtum einzelner Ingenieure ab.“

Gleichzeitig ist diese Nachvollziehbarkeit von Informationen ein Hebel, um die Kontinuität und Durchgängigkeit der Validierung zu unterstützen. Bestehende Ansätze, insbesondere aus dem Anforderungsmanagement und entsprechenden Software-Tools, fokussieren dabei häufig eine Nachvollziehbarkeit zwischen Anforderungen und Testfällen (siehe bspw. Polarion, Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2024 oder Beschreibungen nach Friedenthal et al., 2012). Somit wird jedoch ausschließlich eine Nachvollziehbarkeit hinsichtlich der Verifikation unterstützt. Ein erweitertes Verständnis des Begriffs Nachvollziehbarkeit ergibt sich unter Berücksichtigung des erweiterten ZHO-Modells (siehe Absatz 2.1.1). Durch eine explizite Modellierung von Nachvollziehbarkeitsbeziehungen, kann das **gezielte Herleiten** von Validierungsbedarfen und Validierungszielen aus Analyse des Produktprofils in Bezug auf die angestrebten Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen des Produkts methodisch unterstützt und dokumentiert werden. Explizit modellierte Nachvollziehbarkeitsbeziehungen können zudem die gezielte Auswahl und Entwicklung passender Testfälle und Validierungsumgebungen für ein Validierungsziel unterstützen. Gleichzeitig kann durch das Herstellen einer konsistenten Nachvollziehbarkeit zwischen Modellelementen zur Beschreibung des SiD beziehungsweise einer Produktgeneration (beispielsweise Systemanforderungen und Elemente der logischen Architektur) die **Einordnung und Bewertung** von Testergebnissen und die Analyse von deren Auswirkung unterstützt werden. Auf diese Weise kann ein Beitrag zur gezielten kontinuierlichen Weiterentwicklung des Zielsystems basierend auf Testergebnissen geleistet werden.

Wie in Absatz 2.4.2 beschrieben, ist die Etablierung einer Nachvollziehbarkeit modellierter Elemente eines der Hauptziele der Nutzung von MBSE. Insbesondere die Nachvollziehbarkeit von Zielen und Systemanforderungen zu weiteren Modellelementen wird dabei häufig betont (siehe bspw. die „technical processes“ des Systems Engineering Handbuchs nach Walden et al., 2015). Zudem wird das Herstellen und der Nachweis bestimmter Nachvollziehbarkeiten teilweise bereits in Standards gefordert. Mit Bezug zu Verifikation und Validierung schreibt beispielsweise der ASPICE-Standard das Herstellen einer Nachvollziehbarkeit zwischen Systemanforderungen und den Testfällen, die diese Anforderungen verifizieren sollen, vor (VDA QMC Working Group 13 / Automotive SIG, 2017). Es liegt daher nahe, MBSE-Ansätze zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess einzusetzen. Wie in den folgenden Absätzen beschrieben, ergeben sich hierbei jedoch zwei zentrale Herausforderungen. Zunächst adressieren bestehende MBSE-Ansätze Verifikation und Validierung bislang nicht umfassend. Zudem finden MBSE-Ansätze, wie in Absatz 2.4.3 beschrieben, noch keine weitreichende Verbreitung in der Praxis.

2.8.2 Nutzung von ASE und MBSE zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess

In diesem Absatz wird die derzeitige Berücksichtigung von Verifikation und Validierung in Forschung und Anwendung von MBSE-Ansätzen untersucht. Hierzu wird zunächst eine Data Mining Analyse zur Berücksichtigung von Validierung in Zusammenhang mit MBSE in bestehender Literatur durchgeführt. Anschließend werden die im Stand der Forschung beschriebenen MBSE-Ansätze (siehe Absatz 2.5 und Absatz 2.6) detailliert hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten zur Unterstützung der Validierung analysiert.

2.8.2.1 Data Mining Analyse zur Schnittmenge von Veröffentlichungen zu MBSE und Validierung

In der Definition zu MBSE (siehe Absatz 2.4.2) wird die Validierung als ein zentrales Einsatzgebiet beschrieben. Demgegenüber lassen sich jedoch in der Literatur Aussagen finden, dass MBSE bislang wenig zur Unterstützung der Validierung eingesetzt werde (bspw. Cloutier, 2019) beziehungsweise bestehende MBSE-Ansätze die Modellierung zur Unterstützung von Verifikations- und Validierungsaktivitäten unzureichend berücksichtigten (Bremer et al., 2015).

Um einen Überblick über Forschungsaktivitäten an der Schnittstelle zwischen MBSE und methodischer Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess zu bekommen, werden daher zwei Data Mining Analysen durchgeführt.

Eine Recherche zum initialen Screening wurde im Frühjahr 2022 in „Scopus“ durchgeführt. Scopus ist eine Online Datenbank für Kurzfassungen und Zitationen von mehr als 84 Mio. wissenschaftlichen Dokumenten (Elsevier, 2021, 12. Februar). Die Parameter und Ergebnisse der ersten Analyse sind in Abbildung 2.39 dargestellt:

Data Mining Scopus: Analyse 1	
Suchfelder	„Engineering“, „Computer Science“
Suchbereich	Titel
Suchstring 1.1: „Validierung“ OR „Validation“	174.958 Dokumente
Suchstring 1.2: „MBSE OR “Model-Based Systems Engineering” OR “Model Based Systems Engineering”	679 Dokumente
Schnittmenge Suchstring 1.1 und 1.2	10 Dokumente, davon zwei vom Autor der vorliegenden Dissertation

Abbildung 2.39: Aufbau und Ergebnisse der ersten Data-Mining Analyse in Scopus

Auf Basis dieser Analyse lässt sich die These formulieren, dass der Einsatz von MBSE zur methodischen Unterstützung der Validierung bislang wenig beschrieben ist. Die Ausweitung der Analyse auf Kurzfassung und Schlüsselwörter (neben dem Titel), führt zum in Abbildung 2.40 dargestellten Ergebnis. Hier ergibt sich ein ähnliches Bild zur ersten Analyse. Zu beachten ist zudem, dass die identifizierten Dokumente aus der Schnittstelle der beiden Forschungsgebiete nicht zwangsläufig MBSE-Methoden zur Unterstützung der Validierung beschreiben, sondern beispielsweise auch Ansätze zur Validierung von Modellen und Methoden des MBSE.

Data Mining Scopus: Analyse 2	
Suchfelder	„Engineering“, „Computer Science“
Suchbereich	Titel, Kurzfassung, Keywords
Suchstring 2.1: „Validierung“ OR „Validation“	798.242 Dokumente
Suchstring 2.2: „MBSE OR “Model-Based Systems Engineering” OR “Model Based Systems Engineering“	2.211 Dokumente
Schnittmenge Suchstring 1.1 und 1.2	243 Dokumente, davon zwei vom Autor der vorliegenden Dissertation

Abbildung 2.40: Aufbau und Ergebnisse der zweiten Data-Mining Analyse in Scopus

Nachdem die Analyse mit Hilfe von Scopus einen ersten Einblick geliefert hat, wird eine zweite, spezifischere Text Mining Analyse durchgeführt. Hierzu wird das Tool Wordstat von PROVALIS Research verwendet (PROVALIS research, 2022, 13. Februar). Statt einer Online-Datenbank werden dabei Veröffentlichungen von Konferenzen und Journals mit Schwerpunkten zu (MB)SE ausgewählt. Die ausgewählten Konferenzen und Journals umfassen 9.075 Dokumente aus den in Anhang B1 beschriebenen Quellen. Die dritte Analyse ist in Abbildung 2.41 dargestellt:

Ausgewählte Konferenzen und Journals: Analyse 3	
Gesamtanzahl Dokumente	9.075 Dokumente
Suchbereich	Gesamter Inhalt der Dokumente
Suchstring 3.1: „Validierung“ OR „Validation“	2.641 Dokumente
Suchstring 3.2: „MBSE OR “Model-Based Systems Engineering” OR “Model Based Systems Engineering“	868 Dokumente
Schnittmenge Suchstring 3.1 und 3.2	545 Dokumente

Abbildung 2.41: Aufbau und Ergebnisse der dritten Data-Mining Analyse in ausgewählten Konferenzen und Journals

Bei dieser Analyse ergibt sich eine höhere Trefferquote für die Schnittmenge, als bei der Analyse in Scopus. Dies lässt sich damit erklären, dass spezifisch Konferenzen ausgewählt wurden, die Themen rund um (MB)SE und Entwicklungsmethodik adressieren. Für eine tiefergehende Analyse, wird der Suchraum von einzelnen Dokumenten auf einzelne Absätze verändert (siehe Abbildung 2.42):

Ausgewählte Konferenzen und Journals: Analyse 4	
Gesamtanzahl Dokumente	9.075 Dokumente
Suchbereich	Absätze
Suchstring 4.1: „Validierung“ OR „Validation“	10.014 Absätze
Suchstring 4.2: „MBSE OR “Model-Based Systems Engineering” OR “Model Based Systems Engineering”	10.275 Absätze
Schnittmenge Suchstring 4.1 und 4.2	33 Absätze

Abbildung 2.42: Aufbau und Ergebnisse der vierten Data-Mining Analyse in ausgewählten Konferenzen und Journals

Hier ergibt sich eine ähnlich geringe Schnittmenge der beiden Wortgruppen wie bei den Analysen in Scopus. Die 33 Absätze finden sich dabei in 26 Dokumenten (siehe Anhang B2). In den entsprechenden Veröffentlichungen wird unter anderem das Potenzial, aber auch der bislang noch nicht weit verbreitete Einsatz von MBSE zur Unterstützung von Validierungsaktivitäten betont (siehe bspw. Scheithauer & Forsberg, 2013; Wilson-Smith & Kibler, 2016).

Des Weiteren finden sich einzelne Beschreibungen von MBSE-Ansätzen, die Aspekte zur Verifikation und Validierung technischer Systeme integrieren. Hierbei scheint das Forschungsthema jedoch eher auf der Integration von ausführbaren Simulationsmodellen und weiteren formalen Modellen des MBSE beispielsweise zur direkten Rückspiegelung von Simulationsergebnissen zur Überprüfung der Erfüllung von Anforderungen zu liegen (siehe bspw. Chaudemar & Saqui-Sannes, 2021; Di Maio et al., 2018).

Die hier aufgeführten Analysen deuten demnach darauf hin, dass das Potenzial für den Einsatz von MBSE zur Unterstützung von Validierung im Produktentstehungsprozess von mehreren Autoren erkannt wird. Zudem wird bei Veröffentlichungen zu bestehenden MBSE-Ansätzen beschrieben, dass die Erweiterung dieser zur Unterstützung von Verifikation und Validierung ein zukünftiger Forschungsaspekt beziehungsweise nächster Schritt sei (Morkevicus et al., 2017; Sanduka, Hornickel, Hofmann, Chahin & Gilz, 2018). Es finden sich jedoch unabhängig von bestehenden Arbeiten aus der KaSPro (siehe bspw. Wäschle, Behrendt, Xing, Shi & Albers, 2021 oder Mandel, Wolter et al., 2020) nur wenige Veröffentlichungen, in denen die Berücksichtigung von Validierung im MBSE explizit adressiert wird. Hier zeigt sich ein Forschungsbedarf für die vorliegende Arbeit. Um die Analyse weiter zu vertiefen und den identifizierten Forschungsbedarf zu konkretisieren, werden im Folgenden die im Stand der Forschung eingeführten MBSE-Ansätze im Detail bezüglich ihrer Unterstützung von Validierung im Produktentstehungsprozess analysiert.

2.8.2.2 Analyse der im Stand der Forschung vorgestellten MBSE-Ansätze hinsichtlich der Unterstützung von Validierung im Produktentstehungsprozess

Um den durch die Data Mining Analyse gewonnen Überblick über Forschungsaktivitäten an der Schnittstelle zwischen MBSE und der Validierung technischer Systeme zu vertiefen, wird eine weitergehende Analyse durchgeführt.

Für die vertiefte Analyse der im Stand der Forschung beschrieben etablierten MBSE-Ansätze (siehe Absatz 2.5 und Absatz 2.6) bezüglich ihrer Einsatzmöglichkeiten zur methodischen Unterstützung der Validierung, werden die vier (potenziellen) Bestandteile von MBSE-Ansätzen – Modellierungssprache, Modellierungsmethode, Tool (-Unterstützung) und Architekturframework (siehe Absatz 2.7) – herangezogen. Für die vier Bestandteile werden dabei folgende Aspekte empirisch und subjektiv analysiert:

- Modellierungssprache/Sprachelemente zur Modellierung: Werden, zusätzlich zu den Sprachelementen standardisierter Modellierungssprachen wie SysML, Sprachelemente für die Validierung (bspw. In SysML-Profilen) definiert?
- Modellierungs- (Teil-)methode: Wird in der beschriebenen Methode die Validierung im Produktentstehungsprozess explizit adressiert beziehungsweise Unterstützung für diese angestrebt?
- Architekturframework: Werden in einem zum MBSE-Ansatz passenden Architekturframework Viewpoints beschrieben, die explizit die Modellierung zur Unterstützung der Validierung adressieren?
- Tool-Unterstützung: Wird in einer Tool-Umsetzung des MBSE-Ansatzes explizit Unterstützung für die Modellierung zur Unterstützung der Validierung geleistet?

Eine Übersicht der Analyse ist in Tabelle 2.2 dargestellt. Mit einem + ausgefüllte, grüne Zellen bedeuten, eine Adressierung. Mit einem – ausgefüllte, rote Zellen entsprechend keine Berücksichtigung. In der Übersicht wird keine Aussage zur Tiefe oder dem Grad der Berücksichtigung getroffen.

Tabelle 2.2: Übersicht der Berücksichtigung von Validierung in bestehenden MBSE-Ansätzen (siehe Absatz 2.5 und Absatz 2.6)

MBSE-Ansatz	Umfasst	Berücksichtigung hinsichtlich Validierung			
		Sprach- elemente	(Teil-) Methoden	Architektur- framework	Tool- Unterstützung
OOSEM	Methode	+	+	-	-
SYSMOD	Sprache, Methode, (Tool- Unterstützung)	-	-	-	-
FAS	Sprache, Methode, (Tool- Unterstützung)	-	-	-	-
FAS4M	Sprache (MechML), Methode, Tool- Unterstützung	-	-	-	-
FAS4X	Sprache, Methode, (Tool- Unterstützung)	+	+	-	+
CONSENS/ Invirtes	Sprache, Methode	+	+	-	-
MagicGrid	Methode, Architektur- Framework, Tool- Unterstützung	-	+	+	+
SPES XT	Methode, Framework	-	+	+	-
mecPro ²	Sprache, Methode, Architektur- Framework	-	-	-	-

Sprachelemente zur Validierung (in Erweiterung bestehender Modellierungssprachen wie SysML)

Es zeigt sich, dass lediglich für OOSEM, die FAS4X-Methode und für die auf CONSENS aufbauende Spezifikationstechnik für virtuelle Testbeds aus dem Projekt INVIRTES zusätzliche Sprachelemente mit Bezug zur Validierung definiert werden. In einem Profil für OOSEM führen Friedenthal et al. (2012) im Speziellen die Klasse <<test component>> zur Modellierung von Systemen einer Testumgebung ein. Hinsichtlich FAS4X handelt es sich bei den zusätzlichen Sprachelementen um die Sprachelemente für die Teilmethode FAS4Modelica, die zur Kopplung von ausführbaren Simulationsmodellen in Modelica an das Systemmodell genutzt werden. Damit können jedoch ausschließlich Simulationsmodelle der Validierungsumgebung modelliert werden. Für die Spezifikationstechnik aus dem Projekt INVIRTES wird ein UML-Profil beschrieben. Hiermit werden einerseits Elemente der Testumgebung beschrieben. Gleichzeitig werden Elemente für die Beschreibung von Testfällen und relevanten Parametern für den Test eingeführt. Beziehungen zwischen Elementen des Profils der Testspezifikation und den Elementen des Systemmodells werden zu Anforderungen, Anwendungsfällen und System-/Umweltelementen definiert. Durch die Spezifikationstechnik werden damit insbesondere Elemente zur Modellierung von Verifikationsaktivitäten beschrieben. Zusätzliche Sprachelemente für weitere Aspekte der Validierung, wie Validierungsziele oder eine Verknüpfung zu Bedarfen und Zielen von System-Stakeholdern, werden nicht adressiert.

(Teil-) Methoden zur Unterstützung der Validierung

(Teil-) Methoden zur Unterstützung der Validierung werden für FAS4X, OOSEM, die INVIRTES Spezifikationstechnik, MagicGrid und SPES XT beschrieben. Für FAS4X betrifft dies die Methoden zur Nutzung der Sprachelemente aus FAS4Modelica zur Integration des Systemmodells und des Simulationsmodells. Für OOSEM wird die Nutzung zur Unterstützung von System Integration und Verifikation beschrieben (Friedenthal et al., 2012, S. 513–515). Dabei wird allerdings ausschließlich auf Verifikation eingegangen. Im Speziellen wird lediglich die Modellierung von Testfällen und deren Verknüpfung zu Anforderungen erläutert. In der Modellierungsmethode zu MagicGrid wird unter der Überschrift „Safety and Reliability“ die Modellierung beziehungsweise Durchführung von Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) beschrieben. Gemäß der Beschreibungen nach Albers und Behrendt et al. (2016) kann die FMEA als eine Methode zur Unterstützung der kontinuierlichen Validierung angesehen werden. Hierbei werden jedoch nur Teilaspekte der Validierung, speziell die frühe Identifikation potenzieller Fehler und deren Ursachen, die Bewertung deren Risikos und die Definition von Maßnahmen

zur Risikominimierung, adressiert. Für die INVIRTES Spezifikationstechnik wird eine Methode zur Modellierung der Testspezifikation, bestehend aus detaillierten Beschreibungen der Testfälle und Testumgebungen, beschrieben (Bernijazov et al., 2018). Ähnlich wie bei OOSEM, wird hier jedoch auch hauptsächlich die Verifikation unterstützt. Zudem wird das Herstellen von Nachverfolgbarkeitsbeziehungen zwischen Testspezifikation und dem Modell der Systemarchitektur lediglich für Elemente der Testumgebung und die Verknüpfung von Anwendungsfällen zu Beschreibungen des Testablaufs detailliert. Ausführlichere methodische Beschreibungen zur Unterstützung von Verifikation und Validierung finden sich in der SPES und SPES XT Methodik. Hier wird insbesondere auch die Bedeutung der frühzeitigen Berücksichtigung von Validierung im Produktentstehungsprozess adressiert. Dabei werden verschiedene Teilmethoden, beispielsweise zur Validierung der Anforderungsspezifikation gegenüber einer explizierten Wissensbasis der Stakeholder, beschrieben. Zudem wird die Bezeichnung des „Validierungsziels“ zur Beschreibung, warum eine Validierungsaktivität durchgeführt wird, eingeführt. Detaillierte Beschreibungen zur Umsetzung der methodischen Bausteine mittels einer Modellierungssprache wie SysML finden sich jedoch nicht.

Berücksichtigung von Validierung in Architekturframeworks

In Bezug auf Architekturframeworks sind die beschriebenen Vorlagen zur Durchführung der FMEA fest im MagicGrid verankert. Für SPES XT werden für einzelne Schritte der methodischen Bausteine die relevanten (Teil-) Modelle aus dem beschriebenen Architekturframework verknüpft. Ein gesonderter, explizierter Bereich für Verifikation und Validierung findet sich jedoch nicht im SPES XT Framework.

Tool-Unterstützung (bspw. Templates) zur Modellierung in Bezug zu Validierung

Eine (teilweise) Tool-Unterstützung zur Modellierung der Validierung lässt sich dem MagicGrid durch die genutzten Templates für die Modelle in Cameo Systems Modeler attestieren. Zudem wird für die FAS4X-Methode die Synchronisation bzw. Kopplung zwischen dem Systemmodell und dem Modelica-Simulationsmodell unterstützt.

Die Ansätze SYSMOD, FAS und FAS4M sowie mecpro² bedienen keinen der vier Aspekte zur Unterstützung bzw. Modellierung von Verifikation und Validierung.

Auch bei dieser subjektiven empirischen Untersuchung zeigt sich, dass Validierung bislang nur wenig in etablierten MBSE-Ansätzen adressiert wird. Eine Adressierung findet lediglich für einzelne Teilaspekte, wie die Durchführung von FMEAs

(MagicGrid), die Verknüpfung von Anforderungen zu Testfällen (OOSEM), oder die Modellierung von Testfällen und Testumgebungen (INVIRTES Spezifikationstechnik) statt. Insbesondere zeigt sich, dass keine der analysierten Ansätze eine ganzheitliche MBSE-Methodik, bestehend aus definierten Sprachelementen, (Teil-) Methoden, einem Architekturframework und einer Tool-Umsetzung zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess bietet.

2.8.3 Herausforderungen für den Einsatz und die Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in der Praxis

Wie in Absatz 2.4.3 beschrieben, wird MBSE in Umfragen ein hohes Potenzial zur Unterstützung einer Vielzahl von Aktivitäten im Produktentstehungsprozess zugeschrieben. Gleichzeitig scheint Systems Engineering und insbesondere MBSE noch nicht in der Praxis etabliert zu sein und keine weitreichende Verbreitung zu finden (siehe bspw. Dumitrescu et al., 2021). In einigen der in Absatz 2.4.3 beschriebenen Untersuchungen werden, zusätzlich zum Stand des Einsatzes von Systems Engineering und MBSE in der Praxis, auch Herausforderungen und Hemmnisse beschrieben und analysiert.

In der Analyse von Bone und Cloutier wird als größtes Hemmnis für die Verbreitung vor allem die Unternehmenskultur und eine generelle Abneigung zu Veränderungen genannt. Zudem wird die steile Lernkurve von SysML und MBSE als Hemmnis gesehen. Speziell wird dabei betont, dass für die Einführung und Umsetzung neben MBSE und SysML Grundlagen, zusätzlich die angewandten Methoden und ein entsprechendes Software-Tool zur Umsetzung gelernt werden müssen. Zudem wird beschrieben, dass die Mehrwerte des Einsatzes von MBSE sinken, je später es in einem Produktentwicklungsprojekt eingesetzt werde. (Bone & Cloutier, 2010)

Als Grundlage für eine formale, disziplinübergreifende Modellierung sehen Albers und Zingel ein gemeinsames Verständnis von genutzten Begrifflichkeiten. Dieses sei jedoch selbst unter Systemingenieuren noch sehr heterogen. Zur Umsetzung der formalen Modellierung sehen die Autoren SysML als ein geeignetes Mittel an. Gemäß der Umfrage-Ergebnisse nach Albers und Zingel stellt weniger SysML als Sprache an sich, sondern die genutzten Modellierungstools einen Ansatzpunkt für Verbesserungen dar. Insbesondere die Benutzerfreundlichkeit der Tools, z.B. im Sinne der Navigation durch das Modell oder Bereitstellung angepasster Sichten, wird als ein Aspekt zur Verbesserung genannt. (Albers & Zingel, 2013)

Zu ähnlichen Erkenntnissen kommt auch Cloutier 2019. Dieser beschreibt, dass die Funktionalität und Usability von MBSE-Werkzeugen noch ein Ansatzpunkt für

Verbesserungen seien. Zudem beschreibt der Autor, neben der kulturellen und generellen Abneigung für Veränderungen, den Mangel an wahrgenommenem Mehrwert, die MBSE Lernkurve sowie die fehlende Verfügbarkeit von MBSE-Kenntnissen als Haupt-Hemmnisse zur Einführung von MBSE im Unternehmen. (Cloutier, 2019)

Die Untersuchung „Systems Engineering in industrial practice“ von Gausemeier et al. (2015) beschreibt auf Basis der durchgeführten Interviews sieben Herausforderungen beziehungsweise Hindernisse bei der Nutzung von Systems Engineering:

- Mehrwerte sind nicht quantifizierbar
- Unzureichende Verfügbarkeit von Methoden zur Einführung
- Unzureichende Expertise
- Notwendigkeit für eigene Produkte wird nicht gesehen
- Unzureichende Adaptierbarkeit von Methoden
- Keine eindeutiges bzw. gemeinsames Verständnis genutzter Begrifflichkeiten
- Unzureichende Tool-Unterstützung

Bretz, Kaiser und Dumitrescu greifen die Untersuchungen von Gausemeier et al. auf und untersuchen beziehungsweise erweitern diese mit eigenen Analysen. So detaillieren die Autoren das Hindernis der nicht quantifizierbaren Mehrwerte nach Gausemeier et al. durch die Erkenntnis, dass Entscheidern, insbesondere in großen Unternehmen, klare Key Performance Indicators (KPIs) zur Bewertung des Mehrwerts fehlen würden. Dies gelte, obwohl Wissen über generelle Mehrwerte von Systems Engineering bei den Entscheidern vorhanden sei. Bretz et al. arbeiten zudem zusätzliche Hindernisse bei der Einführung von Systems Engineering heraus. So beschreiben die Autoren nicht-technische Hindernisse, wie eine unzureichende Betrachtung aller relevanten Stakeholder. Würde die Einführung von Systems Engineering beispielsweise aus einer Fachabteilung getrieben, berge dies das Risiko einer fehlenden Akzeptanz anderer Abteilungen im weiteren Verlauf. Zudem beschreiben die Autoren die Notwendigkeit von change management bei der Einführung von Systems Engineering. Die Autoren sehen daher gleichzeitig ein Top-Down und Bottom-Up-Vorgehen bei der Einführung vor. (Bretz, Kaiser & Dumitrescu, 2019)

Ein Ergebnis der Leistungsstanderhebung zu Systems Engineering in Deutschland aus der ASE Initiative ist, dass die breite Akzeptanz von Systems Engineering bei den Mitarbeitenden als zentrale Voraussetzung für dessen Einführung und Nutzung gesehen wird. Zudem bedürfe es modularer und flexibler Ansätze bei der

Einführung. Unternehmen müssten demnach bei der Auswahl und Adaption geeigneter MBSE-Ansätze unterstützt werden. Als weitere Herausforderungen wird genannt, dass Mehrwert und Amortisationsdauer von Systems Engineering bei der Einführung nur schwer quantifizierbar und projektspezifisch seien. Der Mehrwert werde zudem erst mittel- bis langfristig sichtbar. Dies erschwere eine Bewertung durch das Management. Eine Unterstützung durch das Management wird allerdings als relevant für eine Verbreitung von Systems Engineering, über einzelne Entwicklungsbereiche als (Pilot-) Anwendende hinaus, gesehen. Ähnlich wie bereits bei Albers und Zingel 2013 beschrieben, werden auch in der Leistungsstanderhebung 2021 MBSE-Werkzeuge immer noch als Expertentools gesehen. Die erforderlichen Kompetenzen zum Umgang mit Werkzeugen und Sprachen des MBSE würden demnach bei vielen Unternehmen noch fehlen. Auch die mangelnde Nutzerfreundlichkeit von Modellierungssprachen und Tools des MBSE wird als Faktor genannt, der eine Akzeptanz von MBSE in der Breite verhindere. Zudem wird beschrieben, dass die Einbindung von MBSE in eine bestehende Engineering-IT-Infrastruktur eines Unternehmens notwendig sei. (Dumitrescu et al., 2021)

Darüber hinaus adressieren weitere Forschungsarbeiten speziell Herausforderungen für die Einführung und den Einsatz von Systems Engineering und MBSE.

Friedenthal beschreibt 2009 erste Erkenntnisse aus der Anwendung von MBSE mit SysML. Der Autor betont, dass MBSE ein Kulturwandel für Unternehmen sei und deshalb die Probleme, die mittels MBSE angegangen werden sollten, klar identifiziert werden müssten. Zudem beschreibt er die Notwendigkeit einer klar definierten Methode zur Erstellung und Nutzung von Modellen. Gleichzeitig betont er, dass neue MBSE-Anwendende (ggf. separate) Schulungen in den drei Säulen des MBSE – Modellierungssprache, Modellierungsmethode, Modellierungstool – benötigten, was mitunter mehrere Monate dauern könne. Zudem sollte die Schulung an die MBSE-Anwendenden angepasst werden, so dass z.B. ein Modellierungs-Kernteam ein tiefergehendes Training als weitere Teammitglieder erhalten sollte. Weiterhin beschreibt der Autor, dass Pilotprojekte genutzt werden könnten, um den Einsatz von MBSE zu demonstrieren und die Nutzbarkeit beziehungsweise den Mehrwert für Projekte im Unternehmen zu evaluieren. Zuletzt betont Friedenthal, dass klare Modellierungsziele und der Umfang des Einsatzes von MBSE kritische Faktoren für einen erfolgreichen Einsatz seien. (Friedenthal, 2009)

Albers, Lohmeyer et al. gehen vertieft auf das Themen Akzeptanz von Systems Engineering Methoden ein (Albers, Lohmeyer & Radimersky, 2012; Lohmeyer, Albers, Radimersky & Breitschuh, 2014). Die Autoren arbeiten dabei Kategorien für

Herausforderungen und potenzielle Defizite von Methoden heraus und wenden Ihre Erkenntnisse für eine Untersuchung zur Akzeptanz von MBSE-Methoden an. Dabei unterscheiden die Autoren zwischen Akzeptanz auf organisatorischer Ebene (organisatorische Akzeptanz) und Akzeptanz einzelner Personen (individuelle Akzeptanz). Basierend auf Arbeiten von Badke-Schaub, Daalhuizen und Roozenburg (2011) werden sowohl hinsichtlich individueller als auch organisatorischer Akzeptanz drei Kategorien von Herausforderungen und Defiziten beschrieben:

- Nicht eindeutige oder fragwürdige Performance bzw. Leistung von Methoden (Performance)
- Defizite bei der Darstellung bzw. Formulierung von Methoden (Presentation)
- Prozessbezogene Herausforderungen bei der Anwendung der Methoden (Process)

Für jede dieser drei Kategorien beschreiben die Autoren dabei ein Handlungsfeld beziehungsweise Evaluationskriterium für MBSE-Methoden, jeweils für organisatorische und individuelle Akzeptanz (siehe Abbildung 2.43).

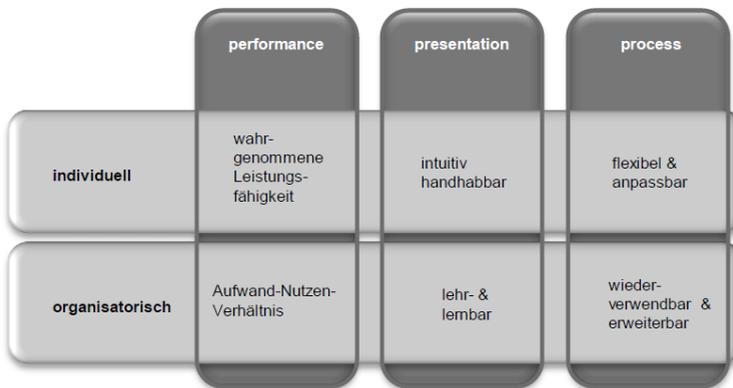


Abbildung 2.43: Handlungsfelder/Evaluationskriterien für die individuelle und organisatorische Akzeptanz von MBSE-Methoden (Albers, Lohmeyer & Radimersky, 2012, S. 4)

Während die Perspektive der individuellen Akzeptanz dabei vor allem Aspekte wie intuitive Anwendbarkeit und empfundene Leistungsfähigkeit/Mehrwert beschreibt, spielen bei der organisatorischen Akzeptanz eher Aspekte wie die Integrierbarkeit von Methoden in bestehende Organisationsstrukturen oder die Messbarkeit des

Mehrwerts der Methoden eine Rolle. In ihrer Untersuchung stellen die Autoren fest, dass, obwohl die Nutzung von Modellen weitgehend in der Praxis akzeptiert werde, die Befragten davon berichten, dass Dokument-zentrierte Ansätze für schnelle und flexible Anwendung von Methoden hilfreich seien und somit zur Akzeptanz von Systems Engineering Methoden beitragen. Zusätzlich wird die Umsetzung einer kontinuierlichen Modellierung in entsprechenden (teilweise neuen) Software-Tools als sowohl finanziell als auch organisatorisch aufwendig beschrieben. Weiterhin wird die Notwendigkeit ausgedehnter Schulungs- und Lehrkonzepte herausgestellt. Einige der Befragten gaben dabei an, dass sich bestehende Schulungskonzepte oftmals eher auf die Tool-Nutzung statt auf die Vermittlung der dahinterliegenden Methode und des Modellierungszwecks bezögen. Außerdem werden die Software-Tools als zu kompliziert und nicht intuitiv beschrieben. Des Weiteren beschreiben die Autoren, dass zum Zeitpunkt ihrer Untersuchung der Nutzen von SysML als noch relativ gering angesehen werde. So werde beschrieben, dass einige disziplinspezifische Aspekte (bspw. zur funktionalen Modellierung mit Stoff-, Energie- und Informationsflüssen für die mechanische Entwicklung) nicht ausreichend unterstützt seien. Potenziale für den Einsatz von SysML werden eher auf organisatorischer Ebene gesehen, in dem durch eine durchgängige Modellierung bereits frühzeitig im Entwicklungsprozess kritische Aspekte identifiziert, beschrieben und dokumentiert werden könnten.

Bei der Entwicklung eines Konzepts zum Tailoring von MBSE-Ansätzen für die industrielle Anwendung beschreiben auch Tschirner, Dumitrescu, Bansmann und Gausemeier (2015) Herausforderungen für den Einsatz von MBSE. Bezugnehmend auf Cloutier (2011) stellen die Autoren dabei heraus, dass die Modellierung immer davon getrieben sein sollte, ein Problem zu verstehen und diskutieren zu können. Dies werde oft ignoriert. Zudem betonen die Autoren die Notwendigkeit eines angemessenen Formalisierungsgrad der Modellierung sowie der Nutzung unterschiedlicher Sichten, je nach Stakeholder und deren Anliegen an die erstellten Systemmodelle.

Alt (2019) geht speziell auf die Einstiegshürden zur Nutzung der SysML ein. So beschreibt der Autor eine Herausforderung darin, dass SysML auf Notationskonzepten der UML basiere, die für die Modellierung objektorientierter Software ausgelegt sei. Kenntnisse zur Objektorientierung seien dabei für Anwendende z.B. aus dem Maschinenbau aufgrund ihrer Ausbildung oftmals nicht vorhanden und müssten erst vermittelt und verstanden werden. Zudem beschreibt der Autor die Beobachtung aus durchgeführten Workshops, dass bei der Nutzung von SysML-Sprachelementen außerhalb expliziter Software-Tools (bspw. am Whiteboard) oftmals Vereinfachungen beim Formalismus der SysML getroffen

würden. Trotzdem seien die erstellten Modelle für die Workshop-Teilnehmenden verständlich gewesen. (Alt, 2019)

Chami, Aleksandraviciene, Morkevicius und Bruel (2018) beschreiben insgesamt zehn Herausforderungen bei der Einführung von MBSE. Zunächst wird betont, dass zur Einführung von MBSE vorab ein substanzieller (monetärer) Aufwand notwendig sei. Zudem stelle die Wahl einer geeigneten Strategie zur Einführung (im operativen Produktgeschäft oder abseits der operativen Arbeit als Pilot-Projekt) eine Herausforderung dar. Weiterhin sei die Festlegung eines klaren Ziels und Umfangs der Einführung von MBSE ein zentraler Faktor, was aufgrund der vielfältigen Einsatzbereiche von MBSE allerdings oft schwer zu ermitteln sei. Ähnlich wie im Rahmen der ASE-Leistungsstanderhebung 2021 (Dumitrescu et al., 2021) wird der Widerstand zu Veränderung bei den Betroffenen als weitere Herausforderung beschrieben. Auch die Realisierung einer notwendigen (monetären) Unterstützung des Managements sei im Spannungsfeld zwischen dem Wunsch nach geringen Einführungskosten und langfristigen Zielen der Einführung von MBSE schwer zu erreichen. Als weitere Herausforderungen werden die Entwicklung, Einführung und Dokumentation von auf das Ziel der MBSE-Einführung angepassten Methoden sowie deren Adaption beschrieben. Des Weiteren sei bei vielen Organisationen noch kein ganzheitliches Konzept zur Modularisierung und Wiederverwendung von Daten implementiert, was die generationsübergreifende Nutzung von Modellen be- oder sogar verhindere. Da MBSE insbesondere als Mittel zum Umgang mit der Komplexität von Systemen eingesetzt werde, stelle die Komplexität der erstellten Modelle an sich (z.B. eine hohe Anzahl modellierter Elemente und deren Beziehungen) eine weitere Herausforderung dar. Weiterhin sei die Wahl eines auf die Bedarfe des Unternehmens passenden Tools und dessen Einbindung in die bestehende IT-Infrastruktur, eine Herausforderung. Zuletzt sehen Chami et al. den Zeitaufwand zur Visualisierung und Aufbereitung von Modellinhalten, speziell bei großen Modellen, als eine Herausforderung. (Chami et al., 2018)

Weitere Herausforderungen zur Einführung und Akzeptanz von MBSE-Ansätzen lassen sich aus Erkenntnissen bei der Entwicklung des SysKIT-Schulungsansatzes gewinnen. Der SysKIT-Schulungsansatz ist ein am IPEK entwickeltes Schulungskonzept zur Vermittlung von MBSE mit SysML (Matthiesen, Schmidt, Moeser & Munker, 2014).

Matthiesen et al. (2014) beschreiben vier identifizierte Defizite in bestehenden Schulungsansätzen für SysML:

- Verwirrung und Überforderung durch die Nutzung eines unbekanntem Modellierungs-Software-Tools
- Verwirrung und Überforderung durch die Einführung und Schulung zu vieler Elemente gleichzeitig
- Unzufriedenheit durch fehlende Beispiele und Musterlösungen
- Nicht erkannter Mehrwert der Modellierung

Wie in Absatz 2.4.2 beschrieben, können die vollen Potenziale von MBSE erst durch die Nutzung geeigneter Software-Tools zur Modellierung ausgeschöpft werden. Nach den Erkenntnissen von Matthiesen et al. lenkt allerdings die Einarbeitung in ein Software-Tool von den eigentlichen Lehrinhalten, der Modellierung mit SysML teilweise stark ab, da vermehrt bestimmte Funktionen im Software-Tool gesucht würden. Die Spezifikation der SysML umfasst eine Vielzahl von Elementen und Relationen (OMG, 2019). Matthiesen et al. beschreiben, dass dies zur Verwirrung und Überforderung der Schulungsteilnehmer führen könne. Daher orientieren sich die einzelnen Abschnitte des SysKIT-Schulungsansatzes konkret an den einzelnen Diagrammen der SysML und geben konkret die in diesen Diagrammen zu verwendenden Elementen vor. Nach Matthiesen et al. werden häufig Beispielmodelle und Musterlösungen für die erstellten Modelle angefragt. Dies sei jedoch teilweise nur bedingt möglich, da sich die erstellten Modelle, je nach Modellierungszweck und Modellierungsvorgehen, unterscheiden könnten, ohne dass sie als richtig oder falsch bezeichnet werden könnten. Matthiesen et al. beschreiben, dass die Mehrwerte der Modellierung mit SysML in einem zweitägigen Workshop schwer zu vermitteln seien. Die Autoren weisen daher auf den Einsatz der gelernten Inhalte in einer Projektarbeit hin. (Matthiesen et al., 2014)

2.8.4 Zwischenfazit

Für die methodische Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess werden, basierend auf Analysen des Stands der Forschung, die drei Handlungsfelder Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit herausgearbeitet. Um diesen Handlungsfeldern zu begegnen, bieten sich ASE und insbesondere MBSE als geeignete Leitbilder und Entwicklungsparadigmen an. Es zeigt sich jedoch, dass hinsichtlich des Einsatzes von MBSE zur methodischen Unterstützung der Validierung zwei Forschungsbedarfe bestehen. Erstens behandeln bestehende MBSE-Ansätze die methodische Unterstützung der Validierung bislang nicht ausreichend, wengleich hierin von mehreren Autoren

Potenzial zur Entwicklungsunterstützung gesehen wird. Zweitens finden bestehende MBSE Ansätze bislang wenig Akzeptanz in der Praxis.

Der Forschungsbedarf und die daraus abgeleitete Zielsetzung um diesen Herausforderungen zu begegnen und eine methodische Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess zu ermöglichen, werden im folgenden Kapitel detailliert.

3 **Forschungsbedarf und Zielsetzung der Arbeit**

In diesem Kapitel wird zunächst der übergeordnete Forschungsbedarf der Arbeit basierend auf den analysierten Beschreibungen des Stands der Forschung herausgearbeitet. Der übergeordnete Forschungsbedarf wird anschließend in zwei Teilziele heruntergebrochen, zu deren Beantwortung jeweils eine Forschungsthese aufgestellt wird. Zur Erreichung der Teilziele vor dem Hintergrund der aufgestellten Forschungsthese, werden drei strukturierende Forschungsfragen aufgestellt.

3.1 **Übergeordneter Forschungsbedarf und Grundannahmen**

Wie in Absatz 2.8 herausgearbeitet, gilt es die Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess zu unterstützen, um komplexe Advanced Systems mit hohem Innovationspotenzial entwickeln zu können. Der übergeordnete Forschungsbedarf, der in dieser Arbeit adressiert werden soll, lautet somit:

Übergeordneter Forschungsbedarf

Entwicklung einer methodischen Unterstützung für die Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess.

MBSE wird als vielversprechender beziehungsweise sogar notwendiger Ansatz gesehen, um mit der Komplexität moderner Produktentstehungsprozesse umgehen zu können (siehe Absatz 2.4.2). In der Definition von MBSE (siehe Absatz 2.4.2) werden dabei explizit Verifikation und Validierung von Systemen als ein Einsatzgebiet für MBSE beschrieben. Auch die Autoren der Systems Engineering Vision 2035 sehen ein modellbasiertes Arbeiten als essenziell für die Unterstützung der Validierung komplexer Systeme wie SoS an (Friedenthal et al., 2021).

Basierend auf der Analyse des Stands der Forschung lässt sich somit feststellen, dass MBSE als ein zentraler Baustein gesehen wird, um die Validierung in zukünftigen Produktentstehungsprozessen zu unterstützen und eine Nach-

vollziehbarkeit von Informationen zu etablieren. Als Grundannahme (siehe Blessing & Chakrabarti, 2009) für diese Dissertation wird daher formuliert:

Grundannahme

Die Anwendung von MBSE besitzt ein hohes Potenzial, um die Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit in der Validierung komplexer technischer Systeme methodisch zu unterstützen.

MBSE ist dabei als Werkzeug zu verstehen, mit welchem die Kommunikation beteiligter Personen im Produktentstehungsprozess auf einer interdisziplinären Vernetzungsebene (siehe Abbildung 1.4) unterstützt werden kann. Für diese Arbeit soll MBSE dabei nicht bestehende domänenspezifische Methoden zu Verifikation und Validierung ersetzen. Vielmehr soll MBSE dazu beitragen, eine konsistente und interdisziplinäre Informationsbasis zur Entscheidungsunterstützung bei Aktivitäten zur Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess zu etablieren. Grundlage dafür bilden das Modell der SGE (siehe Absatz 2.1.3) und etablierte Forschungsmethoden und Ansätze der KaSPro, insbesondere der IPEK-XiL-Ansatz (siehe Absatz 2.3.2). Gemäß den Beschreibungen in Absatz 2.8 ergeben sich für den Einsatz von MBSE zur methodischen Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess jedoch zwei zentrale Herausforderungen: Die fehlende Unterstützung von Verifikation und Validierung in bestehenden MBSE-Ansätzen sowie die fehlende Akzeptanz von MBSE in der praktischen Anwendung

Fehlende Unterstützung von Verifikation und Validierung in bestehenden MBSE-Ansätzen

Die Analysen in Absatz 2.8.2 zeigen, dass wenngleich ein Potenzial zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess durch geeigneten Einsatz von MBSE gesehen wird, Validierung in bestehenden MBSE-Ansätzen noch wenig Berücksichtigung findet. Dies gilt sowohl für etablierte MBSE-Ansätze als auch aktuelle Forschungsarbeiten. Validierung wird lediglich in Teilen bestehender MBSE-Ansätze, insbesondere in bestehenden Modellierungsmethoden, stellenweise adressiert. Es fehlt eine integrierte Berücksichtigung und Unterstützung von Validierung in allen Kernbestandteilen einer MBSE Methodik: Modellierungssprache, Modellierungsmethode, Architekturframework und Tool-Implementierung. Wie im Stand der Forschung erläutert, sind diese vier Kernbestandteile für die Entwicklung und den Einsatz von MBSE jedoch immer integriert zu betrachten. Zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit in der Validierung mittels MBSE lässt sich also der Bedarf nach

einer ganzheitlichen MBSE-Methodik, bestehend aus Modellierungssprache, Modellierungsmethode, Architekturframework und Tool-Unterstützung, festhalten.

Fehlende Akzeptanz von MBSE in der Anwendung

Weiterhin zeigt die Analyse bestehender Untersuchungen in Absatz 2.8.3, dass bereits seit vielen Jahren ein großer Mehrwert bei der Anwendung von Methoden, Sprachen und Tools des Systems Engineering und MBSE im Speziellen gesehen wird. Auch wenn das Bewusstsein für Systems Engineering über die Jahre gestiegen zu sein scheint, findet MBSE, insbesondere mit formalen Sprachen wie SysML, augenscheinlich noch keine flächendeckende Verbreitung. Herausforderungen für die Akzeptanz von MBSE in der Praxis werden dabei bereits in wissenschaftlichen Arbeiten herausgearbeitet. Diese Herausforderungen bestehen sowohl hinsichtlich einzelner Individuen (individuelle Akzeptanz), als auch auf Ebene der Organisation (organisatorische Akzeptanz). Es gilt, diese Herausforderungen zu analysieren, um konkrete Handlungsfelder für die Steigerung der Akzeptanz von MBSE ableiten zu können.

Das Ziel der Arbeit lässt sich demnach basierend auf dem herausgearbeiteten Forschungsbedarf folgendermaßen konkretisieren:

Ziel

Entwicklung einer MBSE-Methodik auf Grundlage des Modells der SGE zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess unter Berücksichtigung von Handlungsfeldern zu deren Akzeptanz in der Anwendung.

Die Arbeit baut dabei auf Vorarbeiten aus der KaSPro auf und erweitert diese um Bausteine zur modellbasierten Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess im Sinne des MBSE (siehe Absatz 2.4.2). Grundlage für das Verständnis des Produktentstehungsprozesses bildet dabei das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers (siehe Absatz 2.1.3) sowie das im erweiterten ZHO-Modell (siehe Absatz 2.1.1) beschriebene Verständnis des Produktentstehungsprozesses als Überführung eines Zielsystems (Z) in ein Objektsystem (O) durch ein Handlungssystem (H). Insbesondere der IPEK-XiL-Ansatz (siehe Absatz 2.3.2) bildet das Fundament zur angestrebten methodischen Unterstützung. Zudem wird, entsprechend der zentralen Bedeutung des Menschen in der Produktentwicklung gemäß dem Leitbild ASE (siehe Absatz 2.4), ein

besonderer Fokus auf die Akzeptanz der zu entwickelnden MBSE-Methodik in der Anwendung gelegt.

Den übergeordneten Forschungsbedarf und das Ziel der Arbeit gilt es weiter zu detaillieren, um konkrete Forschungsthemen und Forschungsfragen zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess mittels MBSE herauszuarbeiten.

3.2 Teilziele und Forschungsthemen

Gemäß dem beschriebenen Forschungsbedarf lassen sich zwei Teilziele sowie Forschungsthemen zur Erreichung der Teilziele formulieren:

Teilziel 1:

Die zu entwickelnde MBSE-Methodik soll Informationen interdisziplinär und verknüpft verfügbar machen, um eine Entscheidungsgrundlage bei der Planung und Bewertung von Validierungsaktivitäten im Produktentstehungsprozess zu bieten

Ziel der zu entwickelnden MBSE-Methodik ist es, eine Entscheidungsgrundlage zu liefern, um Aktivitäten zur Validierung im Produktentstehungsprozess zu unterstützen. Die MBSE-Methodik und insbesondere die erstellten MBSE-Systemmodelle sollen dabei einerseits die Definition von Testfällen und den Aufbau von Validierungsumgebungen unterstützen. Hierzu spielt insbesondere die interdisziplinäre und konsistente Verknüpfung von Informationen des Produktprofils (inkl. den Bedarfen und Zielen der Stakeholder im Produktentstehungsprozess) bis hin zu Testfällen und Validierungsumgebungen eine entscheidende Rolle. Zudem soll, im Sinne des Pull-Prinzips der Validierung (siehe Absatz 2.3.1), die Nachvollziehbarkeit mittels der MBSE-Methodik erstellter Systemmodelle dabei unterstützen, die Auswirkung von Ergebnissen aus Validierungsaktivitäten nachvollziehbar modellieren zu können. Hierdurch soll die Bewertung der Ergebnisse und somit die kontinuierliche Erweiterung und Konkretisierung des Zielsystems des Produkts unterstützt werden.

Dementsprechend lässt sich die zu entwickelnde methodische Unterstützung durch die MBSE-Methodik in drei Handlungsfelder aufgliedern:

- Beschreibung von Wissens- und Definitionslücken im Zielsystem und zielgerichtete Bereitstellung von Kontextwissen für die Definition von Testfällen zur Untersuchung dieser
- Unterstützung bei der Herleitung konkreter Validierungsziele und notwendiger Testfälle, basierend auf beschriebenen Wissens- und Definitionslücken und abhängig vom angestrebten Reifegrad einer Entwicklungsgeneration
- Rückführung von Testergebnissen in das Systemmodell des SiD, um die Interpretation der Auswirkungen der Testergebnisse zu unterstützen und das Zielsystem kontinuierlich zu erweitern und zu konkretisieren

Ziel der zu entwickelnden MBSE-Methodik ist es dabei explizit nicht, domänen-spezifische Methoden, Systeme und Prozesse, beispielsweise zur konkreten Ausgestaltung von Testfällen, zu ersetzen. Vielmehr soll im Sinne des ASE die Modellierung, Vernetzung und Bereitstellung von Informationen auf einer interdisziplinären Vernetzungsebene ermöglicht werden, um disziplinspezifische Systeme, Methoden und Prozesse konsistent und verknüpft zu unterstützen (siehe Abbildung 1.4). Basierend auf der formulierten Grundannahme, dass MBSE ein hohes Potenzial besitzt, um die Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit in der Validierung komplexer technischer Systeme methodisch zu unterstützen, wird die erste Forschungsthese formuliert:

Forschungsthese 1:

Durch eine ganzheitliche MBSE-Methodik auf Grundlage des Modells der SGE kann ein Beitrag zur durchgängigen Modellierung und nachvollziehbaren Darstellung von Informationen im Produktentstehungsprozess geleistet und die kontinuierliche Planung und Bewertung von Validierungsaktivitäten im Produktentstehungsprozess gemäß dem IPEK-XIL-Ansatz unterstützt werden.

Angelehnt an die Beschreibungen in Absatz 2.7, besteht eine ganzheitliche MBSE-Methodik aus vier Kernbestandteilen:

- Einer Modellierungssprache, die explizit Elemente zur Modellierung des Validierungssystems beinhaltet
- Einer Modellierungsmethode zur Durchführung der Modellierungsaktivitäten
- Einem Architekturframework zur Produktgenerations-übergreifenden Strukturierung der erstellten Systemmodelle
- Einer Tool-Umsetzung der Modellierungssprache, Modellierungsmethode und des Architekturframeworks

Das zweite Teilziel der Arbeit zielt auf die individuelle und organisatorische Akzeptanz der entwickelten MBSE-Methodik:

Teilziel 2:

Bei der Entwicklung der MBSE-Methodik sollen explizit Handlungsfelder zu deren individueller und organisatorischer Akzeptanz berücksichtigt werden, so dass ein Beitrag zu deren Akzeptanz in der (industriellen) Anwendung geleistet wird.

Im Stand der Forschung werden oftmals nur einzelne Bestandteile einer ganzheitlichen MBSE-Methodik adressiert (siehe Absatz 2.5 und Absatz 2.6). Zur Erreichung des zweiten Teilziels wird an dieser Stelle jedoch die konsequent integrierte Betrachtung aller Kernbestandteile der MBSE-Methodik und deren Ausrichtung auf Bedarfe der anwendenden Personen (individuelle Akzeptanz) und Unternehmen (organisatorische Akzeptanz) angestrebt. Daher wird zur Erreichung des Teilziels folgende Forschungsthese formuliert:

Forschungsthese 2:

Durch die integrierte Bereitstellung von Modellierungssprache, Modellierungsmethode, Architekturframework und Tool-Umsetzung der entwickelten MBSE-Methodik sowie durch die Ermöglichung der bedarfsgerechten und iterativen Anwendung im Produktentstehungsprozess im Verständnis des erweiterten ZHO-Modells kann ein Beitrag zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz der entwickelten MBSE-Methodik geleistet werden.

Um die beiden formulierten Teilziele zur Bearbeitung des identifizierten Forschungsbedarfs zu erreichen, werden im folgenden Absatz drei strukturierende Forschungsfragen aufgestellt. Die Forschungsfragen zielen dabei auf den Aufbau der ganzheitlichen MBSE-Methodik aus den aufgestellten Forschungsthesen.

3.3 Forschungsfragen

Zur strukturierten Erarbeitung der MBSE-Methodik im Hinblick auf die formulierten Forschungsthesen werden drei Forschungsfragen (FF) formuliert. Die

Forschungsfragen orientieren sich dabei an den Kernbestandteilen der ganzheitlichen MBSE-Methodik:

Forschungsfrage 1 (FF 1):

Welche Klassen von Elementen müssen auf Grundlage des Modells der SGE in der Modellierungssprache der entwickelten MBSE-Methodik enthalten sein, um eine kontinuierliche, durchgängige und nachvollziehbare Validierung im Produktentstehungsprozess zu unterstützen?

Forschungsfrage 2 (FF 2):

Wie kann für die entwickelte MBSE-Methodik die Analyse und Synthese von MBSE-Systemmodellen methodisch unterstützt werden, um eine Entscheidungsunterstützung bei der Planung und Bewertung von Validierungsaktivitäten im Verständnis des IPEK-XiL-Ansatzes zu liefern?

Forschungsfrage 3 (FF 3):

Wie lassen sich für die entwickelte MBSE-Methodik die Analyse und Synthese von Systemmodellen, gemäß dem Verständnis des erweiterten ZHO-Modells, unter Berücksichtigung von Kriterien individueller und organisatorischer Akzeptanz im Rahmen des Produktentstehungsprozess im Modell der SGE in einem Modellierungstool umsetzen?

Die Beantwortung von FF 1 zielt dabei auf die Entwicklung der Modellierungssprache für die MBSE-Methodik auf Basis des Modells der SGE. Im Rahmen der Beantwortung von FF 2 wird die Modellierungsmethode zur Unterstützung der durchgängigen, kontinuierlichen und nachvollziehbaren Validierung im Produktentstehungsprozess aufbauend auf dem IPEK-XiL-Ansatz entwickelt. FF 3 adressiert das Architekturframework, die Tool-Unterstützung sowie die Anwendung der entwickelten MBSE-Methodik folgend dem Verständnis des erweiterten ZHO-Modells. Das Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen und der Evaluation der entwickelten MBSE-Methodik hinsichtlich der formulierten Forschungsthesen wird im folgenden Absatz detailliert.

4 Forschungsvorgehen und Forschungsumgebung

4.1 Forschungsvorgehen

Basierend auf der DRM – Design Research Methodology nach Blessing und Chakrabarti (2009) sowie in Bezug auf die fünf Kategorien des Forschungsdesigns nach Cantamessa (2003), beschreibt Marxen ein Vorgehen zur entwicklungsmethodischen Forschung, an welchem sich diese Arbeit orientiert (Marxen & Albers, 2012; Marxen, 2014). Die einzelnen Aktivitäten des Forschungsvorgehens sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Das Forschungsvorgehen ist dabei iterativ, da durch Erkenntnisse aus empirischer Untersuchung und experimentellen Studien die Forschungsbedarfe und Forschungsziele konkretisiert werden.

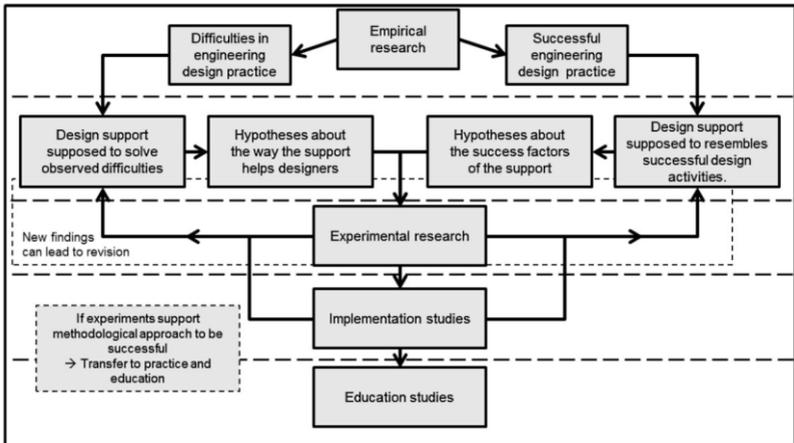


Abbildung 4.1: Forschungsvorgehen nach Marxen (2014, S. 164)

Das konkret verfolgte Forschungsvorgehen für diese Dissertation und der Bezug zu den Forschungsfragen ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

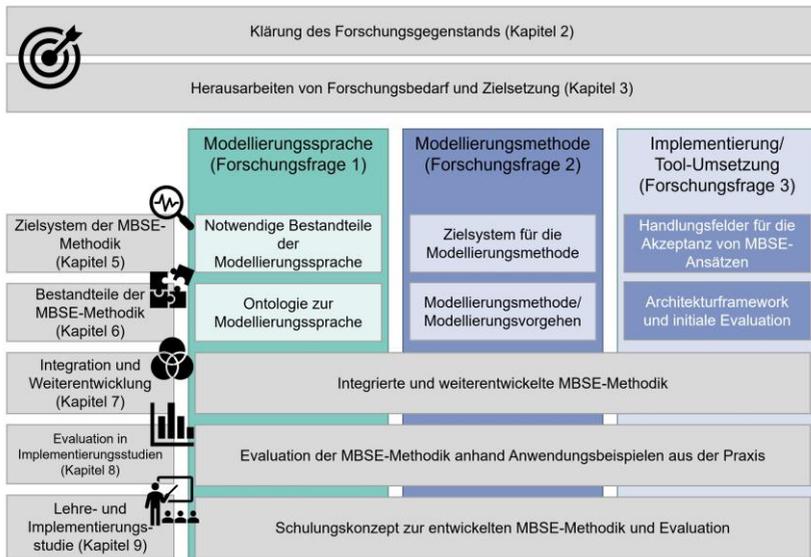


Abbildung 4.2: Forschungsvorgehen und Ergebnisse der einzelnen Schritte

Basierend auf dem Stand der Forschung sowie vertiefenden Analysen wurde in Absatz 2.8 bereits der Forschungsgegenstand dieser Arbeit herausgearbeitet. Dies bildet die Grundlage zur Konkretisierung des Forschungsbedarf und der Zielsetzung in Kapitel 3. Als übergreifendes Ziel der Arbeit wird die Entwicklung einer MBSE-Methodik zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess unter Berücksichtigung von Handlungsfeldern zu deren Akzeptanz in der Anwendung herausgearbeitet. Wie die Analyse zum Forschungsgegenstand zeigt, ergeben sich hierbei zwei zentrale Herausforderungen. Zunächst findet die methodische Unterstützung der Validierung bislang wenig Berücksichtigung in bestehenden MBSE-Ansätzen. Gleichzeitig finden bestehende MBSE-Ansätze häufig noch keine Akzeptanz in der Anwendung. Zur Entwicklung der MBSE-Methodik werden drei Forschungsfragen formuliert. Die Forschungsfragen richten sich jeweils an einen Kernbestandteil der zu entwickelnden MBSE-Methodik. Durch Forschungsfrage 1 wird die Entwicklung einer Modellierungssprache adressiert, die explizit die Modellierung von Elementen des Validierungssystems ermöglicht. Forschungsfrage 2 zielt auf die Entwicklung einer Modellierungsmethode zur Unterstützung von Aktivitäten zur Validierung im Produktentstehungsprozess. In Forschungsfrage 3 wird die Umsetzung der zu entwickelnden MBSE-Methodik in Form eines

Architekturframeworks und der Implementierung in einem Modellierungstool adressiert.

Zur Konkretisierung der Zielsetzung der Arbeit, wird in Kapitel 5 das (initiale) Zielsystem für die Kernbestandteile der zu entwickelnden MBSE-Methodik entwickelt. Dies entspricht der „empirical research“, beziehungsweise Phase I des Forschungsvorgehens nach Marxen. Erkenntnisse aus der Entwicklung des Zielsystems werden zudem zur kontinuierlichen Evaluation und Weiterentwicklung der MBSE-Methodik herangezogen. Für Forschungsfrage 1 werden somit notwendige Begriffe und deren Beziehungen für die Beschreibung der Validierung im Produktentstehungsprozess im Modell der SGE herausgearbeitet. Hierzu werden eine systematische Literaturrecherche sowie ergänzende, vertiefende Literaturanalysen durchgeführt. Ziel dieser Recherchen und Analysen ist es, Begriffe, die im Stand der Forschung zur Beschreibung von Validierungsaktivitäten verwendet werden, herauszuarbeiten und zu konsolidieren. In Bezug auf Forschungsfrage 2 wird, basierend auf dem IPEK-XiL-Ansatz, das Zielsystem in Form von notwendigen Aktivitäten für die Modellierungsmethode konkretisiert. Für Forschungsfrage 3 werden Handlungsfelder für die Akzeptanz von MBSE in der Praxis herausgearbeitet. Die Handlungsfelder werden dabei basierend auf Literaturanalysen (bspw. Analysen der beschriebenen Herausforderungen für die Akzeptanz von MBSE in Absatz 2.8.3) sowie einer ergänzenden Fallstudie mit einem Industrieunternehmen erarbeitet. Eine Berücksichtigung der Handlungsfelder bei der zu entwickelten MBSE-Methodik soll dabei einen Beitrag zu deren individueller und organisatorischer Akzeptanz in der Anwendung leisten. Gleichzeitig dienen die Handlungsfelder als Grundlage für Evaluationskriterien der Akzeptanz der zu entwickelnden MBSE-Methodik in der Anwendung.

In Kapitel 6 wird die initiale Entwicklung und Evaluation der Kernbestandteile der MBSE-Methodik beschrieben. Dies entspricht Phase II und Phase III des Forschungsvorgehens nach Marxen. Für die Modellierungssprache wird, basierend auf der vorangegangenen Analyse notwendiger Bestandteile im entwickelten Zielsystem, eine Ontologie entwickelt. Damit werden die für die Modellierungssprache zu verwendenden Begriffen in Form von Klassen von Elementen und deren Beziehungen festgelegt. Die zu entwickelnde Modellierungsmethode nutzt die erarbeitete Ontologie und beschreibt ein methodisches Vorgehen basierend auf den vorab herausgearbeiteten notwendigen Aktivitäten zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess. Gleichzeitig findet eine initiale Anwendung der Modellierungsmethode anhand eines Leitbeispiels statt. Für Forschungsfrage 3 wird ein initiales Architekturframework für die MBSE-Methodik entwickelt und in einem Modellierungstool implementiert. Durch das Architekturframework und die Tool-Implementierung soll die Umsetzung der zu entwickelnden MBSE-Methodik in der Anwendung ermöglicht werden. Zudem finden eine Anwendung und Evaluation des

initialen Architekturframeworks und dessen Tool-Implementierung statt. Hierdurch werden Erkenntnisse zum Beitrag der entwickelten Lösungen für die individuelle und organisatorische Akzeptanz der MBSE-Methodik gewonnen. Diese Erkenntnisse fließen in die Weiterentwicklung der MBSE-Methodik ein, um weitere Potenziale zu deren Akzeptanz in der Anwendung zu heben.

Wie von Marxen beschrieben, können Erkenntnisse aus experimenteller Untersuchung zu einer Weiterentwicklung und Konkretisierung der entwickelten Forschungsergebnisse führen (siehe „Schleife“ zwischen Phase II und Phase III des Forschungsvorgehens in Abbildung 4.1). In Kapitel 7 werden demnach die Ergebnisse aus Kapitel 1 aufgegriffen und die weiterentwickelte, ganzheitliche MBSE-Methodik vorgestellt. Diese stellt die zentrale Entwicklung der vorliegenden Dissertation dar.

Die weiterentwickelte MBSE-Methodik wird anhand mehrerer Fallstudien und Anwendungen mit Partnern aus Industrie und Forschung evaluiert. Diese Implementierungsstudien (Phase IV nach Marxen) und deren Auswertungen werden in Kapitel 8 beschrieben. Die Implementierungsstudien erfolgen dabei einerseits anhand von Fallstudien bei Unternehmenspartnern. Zusätzlich wird eine Interviewstudie in einem Projektkontext mit Partnern aus Industrie und Forschung durchgeführt. Durch die Implementierungsstudien werden Erkenntnisse gewonnen, inwieweit die zu entwickelnde MBSE-Methodik die angestrebte Zielsetzung der Arbeit erfüllt und somit einen Beitrag zur Adressierung des Forschungsbedarfs leistet. Zusätzlich werden Anknüpfungspunkte für weiterführende Forschungsaktivitäten identifiziert.

Ergänzend wird in Kapitel 9, entsprechend Phase V des Forschungsvorgehens nach Marxen, die Umsetzung eines Schulungskonzepts sowie dessen Evaluation für die MBSE-Methodik beschrieben. Hierdurch werden einerseits zusätzliche Erkenntnisse hinsichtlich der Adressierung des Forschungsbedarfs durch die zu entwickelnde MBSE-Methodik gewonnen. Gleichzeitig wird ein Konzept zur Vermittlung und Einführung der MBSE-Methodik entwickelt. Damit wird ein Beitrag zu deren zukünftiger Vermittlung in Forschung, Lehre und industrieller Praxis geleistet.

Dem vorgestellten Forschungsvorgehen schließt sich darüber hinaus eine Zusammenfassung und Diskussion (Kapitel 10) der Ergebnisse und Evaluationen an. Abschließend wird ein Ausblick auf zukünftige Anknüpfungspunkte der Arbeit gegeben (Kapitel 11). Ein Überblick über die verwendeten Methoden und Ansätze des Forschungsvorhabens ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

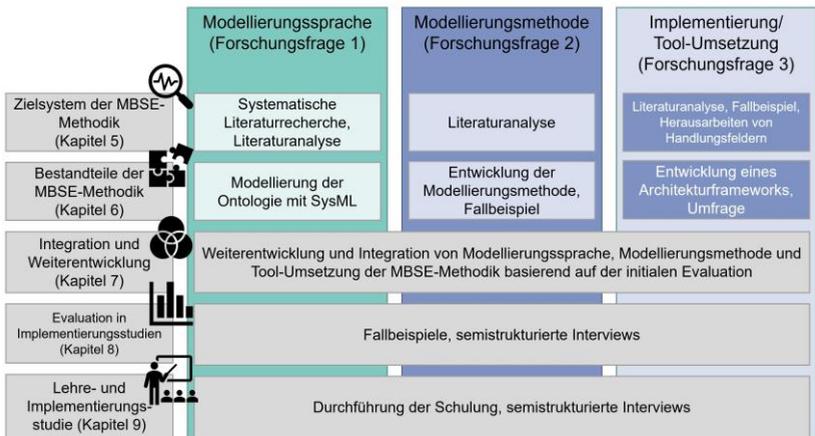


Abbildung 4.3: Verwendete Forschungsmethoden für die einzelnen Schritte des Forschungsvorgehens

4.2 Forschungsumgebung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen einer Assistenzpromotion am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Die Inhalte dieser Arbeit wurden durch Literaturarbeit, Projektarbeiten, Forschungsgespräche mit dem Betreuer der Dissertation sowie weiteren wissenschaftlichen Mitarbeitenden und Co-betreute Abschlussarbeiten am IPEK und in Zusammenarbeit mit Unternehmenspartnern, erarbeitet. Eine zentrale Forschungsumgebung für diese Arbeit ist das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt MoSyS – Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems (IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2021, S. 10–11). Im Projekt MoSyS erforschen vier Forschungseinrichtungen, neun Anwenderunternehmen, vier „Enabler“ (Tool-Hersteller, Entwicklungsdienstleister und Beratungshäuser) und eine Gewerkschaft zusammen Methoden, IT-Werkzeuge und weitere Hilfsmittel wie Handlungsleitfäden zur Unterstützung des ASE. Dabei werden integriert sowohl Aspekte des technischen Systems (of Systems) wie auch des soziotechnischen Handlungssystems betrachtet. Mit Hilfe der Partner des Projekts MoSyS wird dabei die (Weiter-) Entwicklung der MBSE-Methodik (Kapitel 7) sowie deren Evaluation (Kapitel 8) vorangetrieben. Weitere Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie finden sich bei den Fallbeispielen zur Erarbeitung des Zielsystems für die MBSE-

Methodik (Kapitel 5) sowie bei den Evaluationen in Implementierungs- und Lehrestudien (Kapitel 8). Details zum Vorgehen werden in den jeweiligen Kapiteln beschrieben. Zudem werden Untersuchungen im Live-Lab IP – integrierte Produktentwicklung durchgeführt (Kapitel 1, Kapitel 9). Ein Live-Lab für die Produktentwicklung ist dabei nach Walter et al. folgendermaßen definiert:

Definition Live-Lab

„Ein Live-Lab im Kontext der Produktentwicklung ist eine Untersuchungsumgebung, die es ermöglicht, Methoden und Prozesse der Produktentwicklung in einem möglichst realen Entwicklungsprozess zu erforschen und gleichzeitig die Randbedingungen in hohem Maße gestalten zu können. Ziel hierbei ist es, Entwicklungsmethoden, Prozesselemente, Werkzeuge und Arbeitsweisen weiterzuentwickeln und zu evaluieren, um diese mehrwertstiftend der Praxis in Industrieunternehmen bereitstellen zu können.“

(Walter, Albers, Haupt & Bursac, 2016, S. 287)

Im Live-Lab IP durchlaufen bis zu 42 Studierende in sieben Teams einen Produktentwicklungsprozess von der initialen Recherche und Profillfindung bis zum Aufbau von Prototypen. Die Aufgabenstellung für IP wird dabei von einem Unternehmenspartner definiert, der den Produktentwicklungsprozess begleitet und Entscheidungen zum Projektverlauf an festgelegten Meilensteinen trifft. (Walter, Albers, Haupt & Bursac, 2016)

Zur Darstellung und initialen Evaluation der entwickelten Modellierungsmethode wird zudem ein Leitbeispiel aus der Validierung von Fahrerassistenzsystemen (ADAS – Advanced Driver Assistance Systems) genutzt (Mandel, Wäschle et al., 2021; Zeng, 2020). Das Beispiel wurde bereits bei der Beschreibung der konsolidierten Modellierungsmethode für eine Produktgeneration eingeführt (siehe Absatz 2.5.1). Es werden auszugsweise und vereinfacht die ADAS Abstandsregeltempomat (ACC – Adaptive Cruise Control) und Notbremsassistent (AEB – Autonomous Emergency Brake) betrachtet. Ein ACC-System dient der Regulierung der Fahrgeschwindigkeit basierend auf einem vorgegebenen Sollwert sowie der Verkehrssituation. Für weitere Details zu den betrachteten Fahrerassistenzsystemen sei auf Winner et al. (2015) verwiesen.

5 Entwicklung des initialen Zielsystems für die Kernbestandteile der MBSE-Methodik

In diesem Kapitel werden Analysen zum Aufbau des Zielsystems der zu entwickelnden MBSE-Methodik beschrieben. Diese Analysen erfolgen gemäß der formulierten Forschungsfragen aufgeteilt nach den Bestandteilen Modellierungssprache (Absatz 5.1), Modellierungsmethode (Absatz 2.8) und Umsetzung der MBSE-Methodik (Toolumsetzung, Architekturframework, Absatz 5.3). Die Ergebnisse der einzelnen Absätze dienen als Grundlage für die Entwicklung der einzelnen Kernbestandteile der MBSE-Methodik (Kapitel 1).

5.1 Zielsystem der Modellierungssprache

Den ersten Kernbestandteil der zu entwickelnden MBSE-Methodik bildet die Modellierungssprache. Das Ziel für diese Arbeit besteht explizit nicht darin, eine domänenspezifische Sprache für eine Ingenieursdisziplin, wie beispielsweise die Mechanik, zu entwickeln. Analog zu den Beschreibungen nach Holt und Perry soll vielmehr eine formale, interdisziplinäre Modellierungssprache (bspw. SysML) mittels einer entwickelten Ontologie so erweitert und eingeschränkt werden, dass sie die Modellierung im Sinne der entwickelten MBSE-Methodik ermöglicht und gezielt unterstützt (Holt & Perry, 2018). Die Erweiterung, beziehungsweise Spezifizierung, dient dabei dazu, formale und standardisierte Sprachen wie SysML um spezifische Begriffe und Konzepte zu erweitern, die für die Modellierung gemäß der zu entwickelnden MBSE-Methodik verwendet werden sollen. Dies geschieht am Beispiel von SysML durch die Nutzung von Stereotypen und Profilen (siehe Absatz 2.4.2). Hierdurch werden die in der Ontologie definierten Begriffe als Klassen von Elementen für die Modellierung (in einem SysML Software-Tool) verfügbar gemacht und gleichzeitig die Konsistenz zum Standard (SysML) gewahrt. Auf der anderen Seite wird durch die Ontologie aber auch eine Eingrenzung von Begriffen und Klassen von Elementen zur Modellierung geschaffen. Hierdurch ist es möglich, Begriffe und Klassen formaler Sprachen wie SysML, die für die in dieser Arbeit zu entwickelnde MBSE-Methodik nicht benötigt werden und zu Unklarheiten bei Anwenden führen könnten, aus der Modellierung auszuschließen.

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage wird im Zuge dieser Arbeit zunächst eine Leichtgewichtige Ontologie (LWO, siehe Absatz 2.6.1) entwickelt. Hierzu gilt es, relevante Begriffe im Kontext der Validierung technischer Systeme zu identifizieren und in Form von Klassen zu konsolidieren. Zusätzlich gilt es, Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen diesen Begriffen/Klassen zu beschreiben. Die Implementierung der LWO als SysML-Profil inklusiver gezielter Anpassung der gewählten Tool-Umgebung weist Charakteristika einer Heavyweight Ontologie (HWO) auf, ohne dass im Rahmen dieser Arbeit ein Anspruch auf die Umsetzung aller Charakteristika im Sinne der Informatik gestellt wird. Die konkretisierte Modellierungssprache beziehungsweise das SysML-Profil kann anschließend wiederum zur Erstellung konkreter Modelle, beispielsweise des SysML-Modells eines Fahrzeugs, verwendet werden. Basierend auf den Beschreibungen in Absatz 2.6 sowie in Anlehnung an die Arbeiten der OMG – Object Management Group Working Group „Ontology Action Team“ in der MBSE Initiative (Graves & West, 2012) wird das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Ontologie, Formaler Modellierungssprache, konkretisierter Modellierungssprache und konkreter Modelle für diese Arbeit in Abbildung 5.1 dargestellt.

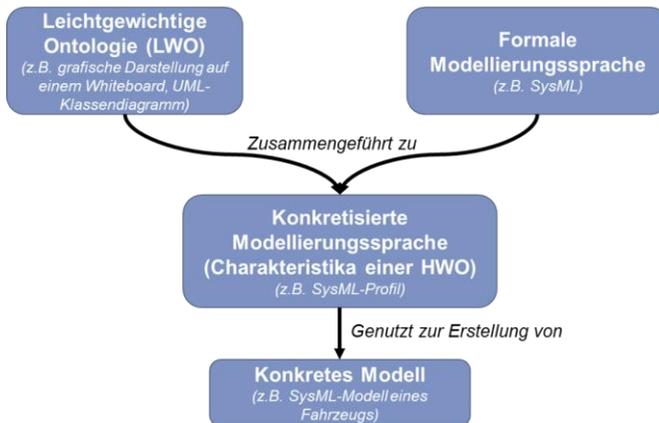


Abbildung 5.1: Visualisierung des Verständnisses dieser Arbeit zum Zusammenhang zwischen LWO, formaler Modellierungssprache, konkretisierter Modellierungssprache und einem konkreten (SysML-) Modell

In Anlehnung an die Layer des iPeMs (siehe Absatz 2.2.2), sollen auch für die zu entwickelnde Ontologie die zwei verknüpften Layer zur Produkt- und Validierungssystem-Modellierung beschrieben werden. Der Fokus der Arbeit liegt

auf der Modellierung der Begriffe/Klassen aus dem Layer des Validierungssystems. Allerdings sind für die entwickelte MBSE-Methodik insbesondere auch die Zusammenhänge zwischen den für das Produkt und das Validierungssystem modellierten Informationen essenziell zur Unterstützung einer kontinuierlichen, durchgängigen und nachvollziehbaren Validierung. Daher werden für die zu entwickelnde Ontologie sowohl Klassen zur Modellierung des Produkts, als auch des Validierungssystems sowie deren Abhängigkeiten und Beziehungen aufgenommen.

Die Unterscheidung zwischen LWO und deren Implementierung in einer formalen Modellierungssprache bietet mehrere Vorteile. So kann mit Hilfe der LWO ein übergreifendes Informationsmodell der Ontologie aus methodischer Sicht aufgebaut werden. Für dieses Informationsmodell ist eine Umsetzung in verschiedenen Modellierungssprache und Modellierungs- (Software-) Tools denkbar. So kann eine Implementierung konkret angepasst auf die Bedarfe, Kenntnisse und vorhandene Infrastruktur der Anwendenden erfolgen. Zudem ist es möglich, die Implementierung der LWO und somit die Arbeit mit der entwickelten MBSE-Methodik über verschiedene Software-Tools verteilt zu implementieren. Die in der LWO beschriebenen Zusammenhänge unterstützen bei der Identifikation von Anforderungen an etwaige Tool-Schnittstellen.

Zur Entwicklung des Zielsystems für die Ontologie beziehungsweise der Modellierungssprache wird zunächst eine systematische Literaturrecherche zu Begriffen, die im Kontext von Verifikation und Validierung verwendet werden, durchgeführt (Absatz 5.1.1). Die Recherche wird durch eine detailliertere Analyse bestehender Arbeiten im Themenfeld aus der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung, detailliert (Absatz 5.1.2). Schließlich werden Anforderungen an die zu entwickelnde Ontologie in Form von Competency Questions formuliert (Absatz 5.1.3).

5.1.1 Systematische Literaturrecherche zu verwendeten Begriffen für die Beschreibung der Validierung technischer Systeme

Zur initialen Identifikation verwendeter Begriffe für die Beschreibung der Validierung technischer Systeme, wurde im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit eine systematische Literatur-Recherche durchgeführt (Techanitisawad, 2020)². Das Vorgehen zur Durchführung orientiert sich dabei grundsätzlich an den Beschreibungen von Dresch, Lacerda und Antunes Jr (2015) und ist stark iterativ.

Für die Literaturrecherche gilt es zunächst die zu untersuchenden Fragen und den Umfang und Fokus der untersuchten Quellen festzulegen. Da das Ziel der Literaturrecherche in einem ersten Screening und der Konsolidierung bereits etablierter Begriffe lag, wurde der Fokus auf die Analyse von Normen und Standards sowie ausführliche wissenschaftliche Arbeiten festgelegt. Da der Begriff der Validierung neben den Ingenieurwissenschaften auch in weiteren Wissenschaften gebräuchlich ist, galt es, den Fokus insbesondere auf Arbeiten im Kontext mechatronischer Produktentwicklung zu setzen. Neben den Normen/Standards und wissenschaftlichen Arbeiten wurden ergänzend einige Veröffentlichung zu konkreteren Anwendungsbeispielen für Validierungsmethoden untersucht.

Aufbauend auf den zu untersuchenden Forschungsfragen und dem gewählten Fokus der Literaturrecherche, wird eine „Research Strategy“ entwickelt (Dresch et al., 2015, S. 132). Im Zuge der beschriebenen Abschlussarbeit galt es hier vor allem die zu untersuchenden Datenbanken und für die Suche verwendete Begriffe zu beschreiben. Die verwendeten Datenbanken sind in Anhang C1 aufgeführt.

Die Liste der verwendeten Suchbegriffe wurde iterativ, basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche, aufgebaut, erweitert und konkretisiert. Dabei wurden sowohl englische, als auch deutsche Begriffe in der Suche verwendet. Die finale Liste der Suchbegriffe ist in Tabelle 5.1 zu sehen.

² Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Tabelle 5.1: Verwendete Suchbegriffe für die systematische Literaturrecherche (Techanitisawad, 2020)³

Deutsche Begriffe	Englische Begriffe
Validierung	Validation
Verifizierung	Verification
	V&V
	Verification and Validation
	VV&A
	Verification, Validation and Accreditation
	Validation Framework
Produktentwicklung	Product Development
	Test
Qualitätsmanagement / -analyse	Quality management / Quality analysis
Anforderung	Requirement
Anforderungsmanagement	Requirement management
(Zuverlässigkeitstechnik)	Reliability engineering
Untersuchung	Inspection
Prototyp	Prototype

Eine Liste der am relevantesten bewerteten Quellen für die Literaturrecherche ist in Anhang C2 zu finden.

Als Ergebnis der Literaturrecherche wurden 28 Begriffe als besonders relevant, i.e. häufig zur Beschreibung der Validierung technischer Systeme verwendet, identifiziert (siehe Tabelle 5.2, angepasst nach Techanitisawad, 2020)⁴. Zudem wurde eine initiale LWO als Übersicht dieser Begriffe und Beziehungen dieser untereinander erstellt (Anhang C3).

³ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

⁴ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Tabelle 5.2: Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche: Übersicht relevanter Begriffe zur Beschreibung der Validierung technischer Systeme (adaptiert nach Technitisawad, 2020)

Sol – System of Interest	Funktion
Sub-System	Konzept
Validierung	Modell
Verifikation	Validierungsverfahren (Analyse)
Validierungsziel	Betriebsumgebung
Projektplan	Test
Lastenheft	Testumgebung
Pflichtenheft	Testmethoden
Überwachung	Testplan
Dokumentation	Testfall
Bewertung	Testdesign
Stakeholder	Testressourcen
Stakeholder-Anforderung	Testhypothese
Systemanforderung	Testergebnis

Die Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche werden im folgenden Ansatz mit Hilfe von Vorarbeiten aus der KaSPro detailliert und ergänzt.

5.1.2 Detaillierte Analyse von Vorarbeiten aus der KaSPro zur Konkretisierung der identifizierten Begriffe

Um die in der systematischen Literaturrecherche identifizierten Begriffe und deren Zusammenhänge zu konkretisieren, werden bestehende Vorarbeiten der KaSPro im Forschungsfeld Validierung technischer Systeme analysiert. Dabei ist zu beachten, dass die Vorarbeiten nur selten auf einer Modellierung im Sinne des MBSE abzielen. Trotzdem lassen sich die Arbeiten zur Konkretisierung und Ergänzung der identifizierten Begriffe und Konzepte sowie der daraus zu entwickelnden Ontologie heranziehen. Der Fokus der ergänzenden Analyse liegt dabei auf Modellierungsansätzen für das Validierungssystem. Zudem werden Vorarbeiten zu Elementen zur Modellierung des Zielsystems herangezogen.

IPEK-XiL-Ansatz

Wie in Absatz 2.3.2 beschrieben, kann mit Hilfe des IPEK-XiL-Ansatzes (für den Anwendungsfall der Validierung von Fahrzeugen) die Modellierung eines SiD bzw. Sul im Kontext seines Restsystems, eines Fahrers und der Umwelt ausgehend von beschriebenen Validierungszielen erfolgen. Zudem erfolgt die Beschreibung von Fahrmanövern und Testfällen. Zusätzlich werden Begriffe und Zusammenhänge zur Beschreibung und Modellierung von Tests definiert (siehe Abbildung 5.2).

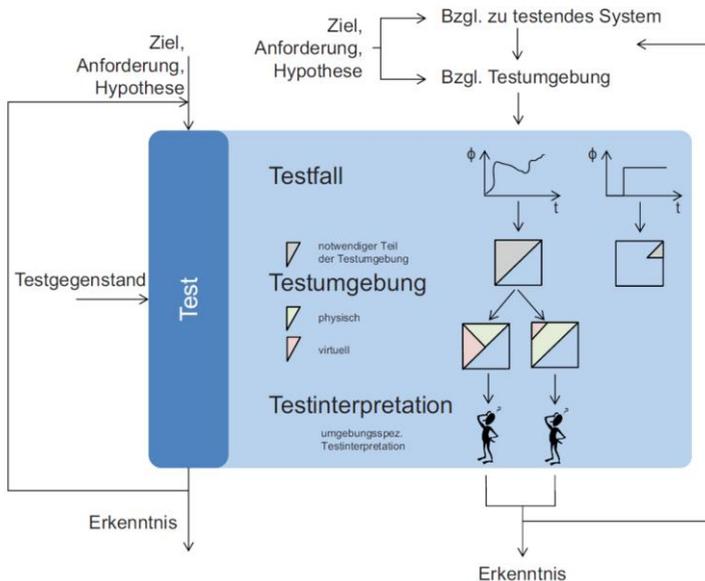


Abbildung 5.2: Beschreibung und Modellierung von Tests gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 555)

Gemäß der Beschreibungen nach (Ebel, 2015) umfasst ein Test dabei einen Testfall, eine Testumgebung und eine Testinterpretation. Im IPEK-XiL-Ansatz werden zudem Ziele, Anforderungen und Hypothesen bezüglich des Tests, des zu testenden Systems und der Testumgebung beschrieben (siehe Abbildung 5.2). Gemäß dem ZHO-Modell (siehe Absatz 2.1.1) führt die Durchführung von Tests zudem wiederum zu Erkenntnissen, die zur Erweiterung und Konkretisierung des Zielsystems und somit gegebenenfalls zu neuen Zielen, Anforderungen und Hypothesen an den Test, das zu testenden System und der Testumgebung führen (Albers, Behrendt et al., 2016).

Modellierung des Zielsystems nach Ebel

Ebel beschreibt Partialmodelle, Elementtypen, Relationen und Attribute zur Modellierung von Zielsystemen (Ebel, 2015). Aufgrund der Bedeutung des Zielsystems für die Validierung nach dem ZHO-Modell (siehe Absatz 2.1.1 und Absatz 2.3.1), werden auch diese Elemente als Input für die Klassen der zu entwickelnden Ontologie herangezogen. In Abbildung 5.3 ist eine Übersicht über die von Ebel entwickelten Strukturierung des Zielsystems dargestellt.

Partialmodelle	Ziele	Anforderungen	Anwendungsfälle
	Funktionen	Gestalt / Implementation	Phasen und PE-Aktivitäten
	Meilensteine und Deliverables	Stakeholder	Tests
Elementtypen	Ziel	Anforderung	Anwendungsfall
	Funktion	Gestalt / Implementation	Phasen / Aktivitäten
	Meilenstein	Deliverable	Stakeholder
	Test	Entscheidung	Begründung
	Dokument / Information	Schnittstelle	
Relationen	Dekomposition	Verfeinerung	Ungerichtete Relation
	Gerichtete Relation	Unterstützung	Konflikt
	Inkonsistenz	Ableitung	Erfüllung
	Verifizierung	Validierung	Verantwortlichkeit
	Treiber		
Attribute	Bezeichner	Status	Wichtigkeit
	Autorisation	Änderungsinformation	Freitext

Abbildung 5.3: Strukturierung des Zielsystems nach Ebel (2015, S. 156).

Zudem beschreibt Ebel die Zusammenhänge zwischen Systemumgebung und Schnittstellen, Anwendungsfällen, Testfällen, Anforderungen und Zielen (Abbildung 5.4). Demnach können Anwendungsfälle basierend auf einer Anwendungsfallidentifikation für die betrachtete Systemumgebung und Schnittstellen zwischen Systemumgebung und SiD beschrieben werden. Die Anwendungsfälle dienen nach Ebel damit einerseits als Basis zur Identifikation von zu erreichenden Zielen und zu erfüllenden Anforderungen. Gleichzeitig sind Anwendungsfälle der Ausgangspunkt zur Definition von Testfällen. Zwischen Testfällen, Anforderungen und Zielen bestehen enge Wechselwirkungen. Einerseits gilt es, Testfälle sowie die dazugehörige Testumgebung und Testinterpretation (siehe auch die Beschreibungen zum IPEK-XiL-Ansatz in diesem Absatz)

kontinuierlich und iterativ auf die zu erfüllenden Ziele und Anforderungen auszurichten. Gleichzeitig können Tests Ausgangspunkt zur Identifikation von Zielen und Anforderungen an das zu entwickelnde System sein. Ebel betont hierbei die Notwendigkeit, eine Nachvollziehbarkeit zwischen den Tests sowie daraus abgeleiteten Anforderungen und Zielen herzustellen. Falls keine Nachvollziehbarkeit der Tests zu den Zielen gewährleistet werden kann, ist somit laut Ebel lediglich eine Verifikation der Anforderungen eines SiD beziehungsweise Sul möglich. Sind zu einzelnen Zielen und Anforderungen noch keine Tests definiert, sollte nach Ebel die Testdefinition frühzeitig und in enger Abstimmung mit den Zielen und Anforderungen erfolgen. (Ebel, 2015)

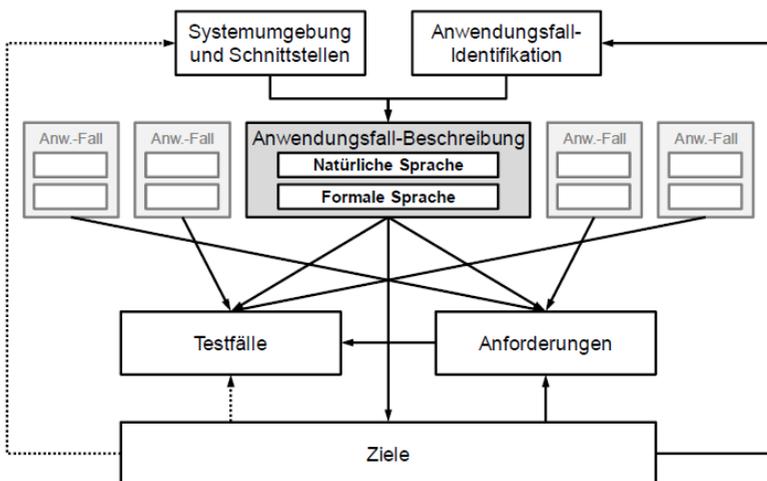


Abbildung 5.4: Zusammenhänge zwischen Systemumgebung und Schnittstellen, Anwendungsfällen, Testfällen, Anforderungen und Zielen (Ebel, 2015, S. 137)

Modellierung von Produktprofilen

Das Produktprofil (siehe Absatz 2.1.2) ist essenzieller Bestandteil des Innovationsprozesses und ein zentraler Erfolgsfaktor für die Produktentwicklung im Modell der SGE. Insbesondere aufgrund seiner Bedeutung für die Validierung, sind Beschreibungen zur Modellierung des Produktprofils ein essenzieller Bestandteil für die zu entwickelnde Ontologie. Das Produktprofil ist demnach nicht nur Ausgangspunkt der Entwicklung einer Produktgeneration, sondern zudem die Basis für die Validierung gegenüber beispielsweise Produktideen, Produktkonzepten oder dem finalen Produkt. Abbildung 2.3 visualisiert eine Vorlage zur Modellierung des

Produktprofils. Für die hier betrachtete Entwicklung der Ontologie stehen zunächst insbesondere die Beschreibung von Anwendungsfällen („Use Cases“), der Nutzen für Anbieter, Kunde und Anwender, der Bedarf („Nachfrage“) sowie die Rand-/Rahmenbedingungen heraus. Diese wurden in ähnlicher Weise auch in der systematischen Literaturrecherche identifiziert beziehungsweise in den weiteren analysierten Arbeiten beschrieben. Weiterhin werden Anknüpfungspunkte zur Validierung beschrieben („Validierung des ... durch“). Dies kann als Ausgangspunkt zur Definition von Validierungszielen und Tests dienen.

Ontologie der Modellierungstechnik nach Zingel

Zingel entwirft eine Modellierungstechnik für Zielsystem und Objektsystem technischer Systeme (Zingel, 2013). Dazu wird ebenfalls eine Ontologie beschrieben, die hauptsächlich die Beschreibung des Ziel- und Objektsystems des Produkts und weniger das Validierungssystem adressiert (siehe bspw. Abbildung 5.5). Die detaillierte Betrachtung des Objektsystems ist im Zuge der für diese Dissertation entwickelten MBSE-Methodik außerhalb des Fokus. Zu bemerken ist jedoch, dass Zingel den Testfall als ein zentrales Element zur Verknüpfung von Zielsystem und Objektsystem beschreibt (Abbildung 5.5). Dies entspricht dem Verständnis des IPEK-XiL-Ansatzes und des ZHO-Modells, wonach nur durch geeignete Validierung Wissen über ein System entsteht, welches wiederum zur Konkretisierung und Erweiterung des Zielsystems herangezogen wird (siehe Absatz 2.3.2).

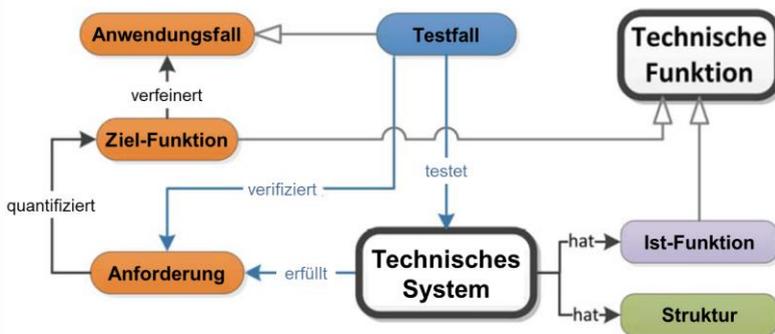


Abbildung 5.5: Nutzung des Elements „Testfall“ zur Verknüpfung von Elementen des Zielsystems (hier orange) und des Objektsystems (Zingel, 2013, S. 153)

Im nächsten Absatz werden, basierend auf den getätigten Analysen, Anforderungen an die zu entwickelnde Ontologie beschrieben.

5.1.3 Anforderungen/Competency Questions an die zu entwickelnde Ontologie

Ein Ansatz, um Anforderungen an den Umfang der zu entwickelnden Ontologie beziehungsweise der darin enthaltenen Begriffe/Klassen und Beziehungen zu beschreiben ist die Aufstellung sogenannter „Competency Questions and Answers“ (siehe bspw. Hildebrandt et al., 2020). Hierbei werden Fragen formuliert, deren Beantwortung durch die Nutzung der auf der Ontologie basierenden MBSE-Methodik ermöglicht werden soll. In Anlehnung an dieses Vorgehen und in Bezug zu den Zielen dieser Arbeit (siehe Kapitel 4) werden daher die in Tabelle 5.3 aufgeführten Fragen formuliert.

Zur Strukturierung der Fragen werden dabei die drei in Absatz 3.2 beschriebenen Handlungsfelder herangezogen: Beschreibung von Wissens- und Definitionslücken im Zielsystem und zielgerichtete Bereitstellung von Kontextwissen für die Definition von Testfällen zur Untersuchung dieser (1), Herleitung konkreter Validierungsziele und notwendiger Testfälle, basierend auf beschriebenen Wissens- und Definitionslücken und abhängig vom angestrebten Reifegrad einer Entwicklungsgeneration (2), Rückführung von Testergebnissen in das Systemmodell des SiD, um die Auswirkungen der Testergebnisse zu interpretieren und das Zielsystem kontinuierlich zu erweitern und zu konkretisieren (3).

Tabelle 5.3: Fragen, die durch die Nutzung der auf der Ontologie basierenden MBSE-Methodik beantwortet werden sollen. Durch die Fragen können die in der Ontologie abzubildenden Begriffe/Klassen und deren Beziehungen bestimmt werden

Handlungsfeld	Frage
1	<p>Bei welchen Bedarfen, Zielen und Anwendungsfällen bestehen Wissens- und Definitionslücken?</p> <p>Welche bereits modellierten Elemente (Anforderungen, Anwendungsfälle etc.) sind bei der Untersuchung der Wissens-/Definitionslücke zu beachten?</p>
2	<p>Welche Validierungsziele werden über den Produktentstehungsprozess zur Schließung der Wissens-/Definitionslücken formuliert?</p> <p>Was ist das Validierungsziel eines spezifischen Tests/Testfalls?</p> <p>Welche zur Schließung der Wissens-/Definitionslücke zu berücksichtigenden Elemente des Zielsystems werden entsprechend des konkret formulierten Validierungsziels für einen konkreten Test/Testfall betrachtet?</p> <p>Welche Testabläufe, Testkonfiguration und Testergebnisse gehören zu einem Testfall?</p> <p>Welche Stakeholder, Umweltsysteme an der Systemgrenze und logischen Systemelemente müssen gemäß dem formulierten Validierungsziel eines Testfalls in einer konkreten Testkonfiguration berücksichtigt werden?</p>
3	<p>Durch welche Testfälle wird eine spezifische Systemanforderung verifiziert?</p> <p>Auf welche Elemente des Zielsystems hat ein Testergebnis potenziell Auswirkungen?</p> <p>Welche konkretisierten oder neuen Elemente des Zielsystems ergeben sich aus der Testinterpretation durch ein Testergebnis?</p>

5.2 Zielsystem der Modellierungsmethode

Die entwickelte Modellierungsmethode für die MBSE-Methodik baut auf dem in Absatz 2.2.4 beschriebenen Verständnis der Validierung im Produktentstehungsprozess auf. Bezogen auf das ZHO-Modell (siehe Absatz 2.1.1) und das iPeM (siehe Absatz 2.2.2), lässt sich dieses Verständnis der Validierung als kontinuierliches Wechselspiel zwischen der Entwicklung eines SiD und des zugehörigen Validierungssystems beschreiben. Die für die vorliegende Dissertation zu entwickelnde Modellierungsmethode greift die zu entwickelnde Ontologie und die darin beschriebenen Elementen und Beziehungen auf. Die Modellierungsmethode zielt jedoch auf die Beschreibung von Aktivitäten im kontinuierlichen Wechselspiel zwischen der Entwicklung des SiD beziehungsweise einer Produktgeneration und deren Validierung beziehungsweise dem Aufbau eines geeigneten Validierungssystems. Eine erste Detaillierung dieser Aktivitäten wird von Mandel und Wolter et al. (2020) beschrieben. Eine vertiefende Beschreibung der Aktivitäten ist momentan Forschungsgegenstand am IPEK⁵. In diesem Absatz werden die Aktivitäten weiter detailliert und beschrieben. Zur Strukturierung der folgenden Absätze werden auch hier die in Absatz 3.2 beschriebenen Handlungsfelder herangezogen. Im Zielsystem für die zu entwickelnde Modellierungsmethode werden schließlich die Aktivitäten herausgearbeitet, deren Durchführung durch die Nutzung der zu entwickelnden MBSE-Methodik unterstützt werden sollen (siehe Absatz 5.2.4).

5.2.1 Definition von Wissens- und Definitionslücken im Zielsystem

Im Zuge der Erläuterungen zum Innovationsprozess in Absatz 2.1.2 wurde die Bedeutung der konsequenten Betrachtung des Produktprofils zur Entwicklung von Produkten mit hohem Innovationspotenzial beschrieben. Gemäß den Beschreibungen zur konsolidierten Modellierungsmethode für ein SiD in Absatz 2.5.1 werden für das Produktprofil Stakeholder inklusive ihrer Bedarfe, Ziele, Anwendungsfälle/Anwendungsszenarien und Randbedingungen für ein SiD beschrieben und für die Validierung zugänglich gemacht. Ein ähnliches Verständnis findet sich ebenfalls in den „technical processes“ des INCOSE Systems Engineering

⁵ Forschungsgespräche am IPEK (2022): Teilnehmende: Martin, Alex; Kürten, Claas; Wäsche, Moritz; Bause, Katharina; Cortes, Sven; Schwarz, Stefan; Albers, Albert; Mandel, Constantin

Handbook beziehungsweise der ISO 15288. In den dort beschriebenen Prozessen „Business or Mission Analysis“ und „Stakeholder Needs and Requirements Definition“ spielt ebenfalls das Herausarbeiten und die Beschreibung von Bedarfen, Zielen und Anwendungsfällen unterschiedlicher Stakeholder eine entscheidende Rolle (ISO/IEC/IEEE 15288:2015-05-15; Walden et al., 2015).

Im Verständnis des ZHO-Modells (siehe Absatz 2.1.1) werden im Rahmen der Produktentwicklung diese Informationen des Produktprofils als Teil des Zielsystems beschrieben, konkretisiert, erweitert und in Anforderungen, Funktionen sowie die logische und physische Systemarchitektur überführt. An den modellierten Elementen des Zielsystems können sowohl Wissens- als auch Definitionslücken bestehen. Bekannte und beschreibbare Wissens- beziehungsweise Definitionslücken sollen mit Hilfe der zu entwickelnden Modellierungsmethode modelliert werden können. Sie stellen damit die Schnittstelle zwischen der Modellierung der aktuell in der Entwicklung befindlichen Produktgeneration G_n und dem Validierungssystem dar (siehe auch die entsprechenden Layer des iPeM 2.2.2). Die beschriebenen Zusammenhänge sind in Abbildung 5.6 dargestellt.

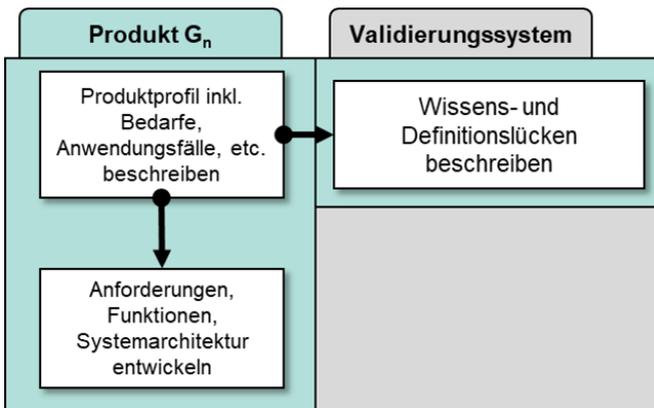


Abbildung 5.6: Aktivitäten zur Beschreibung von Wissens- und Definitionslücken in Bezug zu Aktivitäten zur Modellierung des Zielsystems

5.2.2 Definition konkreter Validierungsziele und Testfälle

Die Beschreibung von Wissens- und Definitionslücken erfolgt, ähnlich der Beschreibung von (Stakeholder-) Bedarfen, eher abstrakt und unverbindlich. Über den Produktentstehungsprozess werden daher die Wissens- und Definitionslücken in konkrete Validierungsziele und Testfälle überführt. Die Formulierung der

Validierungsziele in Bezug zu den Wissens- und Definitionslücken ist dabei vom angestrebten Reifegrad der aktuellen Entwicklungsgeneration abhängig. Somit können für eine Wissens-/Definitionslücke mehrere Validierungsziele definiert werden. Gleichzeitig kann ein Validierungsziel mehrere Wissens-/Definitionslücken adressieren. Validierungsziele können beispielsweise in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses zunächst die Eignung gewählter Lösungskonzepte zur Befriedigung der Wissens-/Definitionslücke untersuchen. In späteren Phasen des Produktentstehungsprozesses kann hingegen die Absicherung der Wissens-/Definitionslücke durch die auskonstruierte Gestalt des SID im Fokus stehen.

Die Validierungsziele wiederum sind der Ausgangspunkt zur Auswahl beziehungsweise Entwicklung benötigter Testfälle zur Untersuchung und Befriedigung der Validierungsziele. Die in der Modellierungsmethode zu berücksichtigenden Zusammenhänge der Aktivitäten zur Definition konkreter Validierungsziele und Testfälle sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

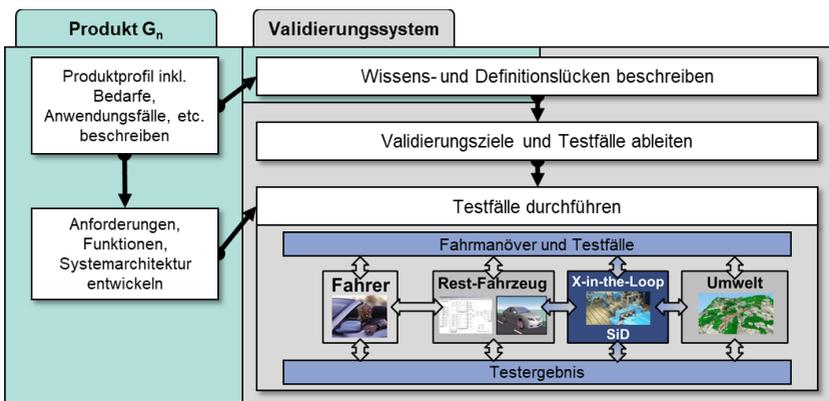


Abbildung 5.7: Aktivitäten zur Definition konkreter Validierungsziele und Testfälle

Die konkrete Auswahl und Entwicklung von Testfällen inklusive deren Abläufen und verwendeten Testkonfigurationen ist außerhalb des Fokus der in der vorliegenden Dissertation zu entwickelnden Modellierungsmethode. Jedoch soll die zu entwickelnde Modellierungsmethode durch die Etablierung einer konsistenten Informationsbasis anschließende Methoden zur konkreten Auswahl und

Entwicklung von Testfällen und Testumgebungen unterstützen⁶. Dies soll durch eine modellierte Nachvollziehbarkeit von Testfall und Validierungsziel zum Validierungsbedarf und von dort aus zu Informationen des Produkts gewährleistet werden. Konkret sollen so die zu untersuchenden Anforderungen, Anwendungsfälle und Funktionen zur Planung von Testabläufen sowie relevante Stakeholder, Nachbarsysteme und Systemelemente zur Unterstützung bei der Planung der Testkonfiguration durch die Anwendung der zu entwickelnden Modellierungsmethode bereitgestellt werden.

5.2.3 Rückführung von Testergebnissen in das Systemmodell des SiD

Bei der Durchführung der definierten Testfälle für ein Validierungsziel werden Testergebnisse erzeugt. Der reine Abgleich der Testergebnisse mit dem Validierungsziel stellt gemäß des in Absatz 2.3 beschriebenen Verständnisses jedoch lediglich eine Verifikationsaktivität dar. Für die Validierung müssen die Testergebnisse nicht rein in Bezug auf das Validierungsziel, sondern ebenfalls in Bezug zur den damit verbundenen Wissens-/Definitionslücken interpretiert werden. Die Testinterpretation stellt wiederum eine Schnittstelle zwischen der Modellierung des SiD und des entsprechenden Validierungssystems dar. Die interpretierten Ergebnisse aus der Durchführung der Tests und ihr Bezug zu den Wissens-/Definitionslücken können somit zur Erweiterung und Konkretisierung des Zielsystems herangezogen werden. Dadurch kann beispielsweise identifiziert werden, ob formulierte Wissens-/Definitionslücken durch die aktuellen Entwicklungsgeneration $E_{n,x}$ des SiD geschlossen werden. In diesem Fall können die entsprechenden Elemente des Zielsystems als validiert angesehen werden. Zudem entsteht nur durch die Validierung Wissen im Produktentstehungsprozess, welches beispielsweise zur Konkretisierung von Zielen, Definition zusätzlicher konkreter Systemanforderungen oder zur Formulierung weiterer, bislang unbekannter, Wissens-/Definitionslücken führen kann. Die Anwendung der zu entwickelnden Modellierungsmethode soll dementsprechend dabei unterstützen, erzeugte Testergebnisse mit von diesen betroffenen Elementen der Produktgeneration (beispielsweise Systemanforderungen oder Elemente der

⁶ Solche Methoden werden basierend auf dem Modell der SGE beispielsweise durch Yan, Nickel, Behrendt und Albers (2018) beschrieben.

logischen Architektur) in Verbindung zu setzen. Somit soll die Interpretation der Auswirkung der Testergebnisse unterstützt werden. Gemäß des Pull-Prinzips der Validierung können basierend auf der Testinterpretation weitere Aktivitäten des Produktentstehungsprozesses, beispielsweise in Form der Planung von Aktivitäten im nächsten agilen Sprint, angestoßen werden (Albers et al., 2017). Die beschriebenen Zusammenhänge sind in Abbildung 5.8 dargestellt.

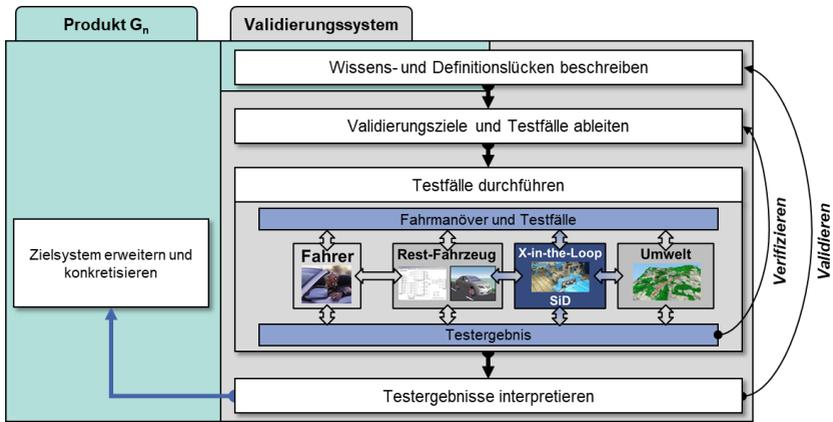


Abbildung 5.8: Aktivitäten zur Rückführung von Testergebnissen in das Systemmodell des SiD

5.2.4 Zusammenfassung der abzubildenden Zusammenhänge als Zielsystem für die zu entwickelnde Modellierungsmethode

Die in den letzten Absätzen beschriebenen Zusammenhänge zum Verständnis der Validierung im Produktentstehungsprozess sind in Abbildung 5.9 konsolidiert dargestellt. Durch die Anwendung der Modellierungsmethode soll eine Durchgängigkeit in der Entwicklung und Modellierung eines SiD / einer Produktgeneration G_n und deren Validierung unterstützt werden. Insbesondere die Nachvollziehbarkeit von Informationen zwischen der Modellierung einer Produktgeneration und dem Validierungssystem soll durch die Modellierungsmethode ermöglicht werden. Gleichzeitig soll die zu entwickelnde Methode, durch deren kontinuierliche und iterative Anwendung, ebenfalls die kontinuierliche Validierung und damit die Weiterentwicklung und Konkretisierung des Zielsystems unterstützen.

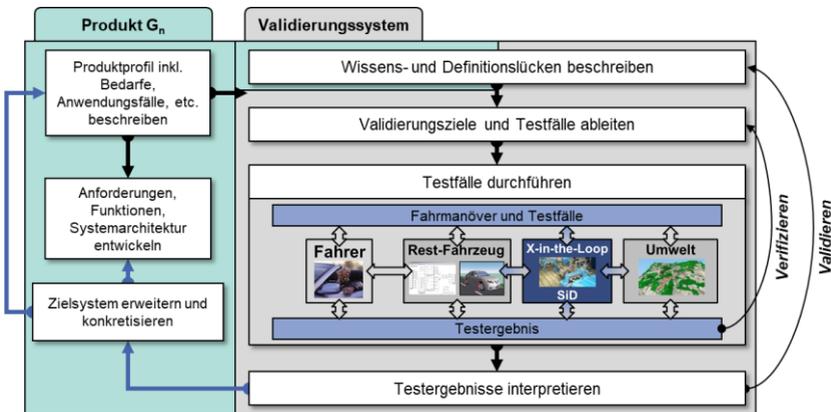


Abbildung 5.9: Aktivitäten im kontinuierlichen Wechselspiel zwischen der Entwicklung des SiD und dessen Validierung

5.3 Zielsystem für die Umsetzung der MBSE-Methodik: Handlungsfelder für die Akzeptanz von Systems Engineering- und MBSE-Ansätzen

Wie in der Klärung des Forschungsgegenstands herausgearbeitet, scheint Systems Engineering und insbesondere MBSE noch keine weitreichende Akzeptanz in der Praxis zu finden. Die Umsetzung der zu entwickelnden MBSE-Methodik soll diese Herausforderung entsprechend adressieren und Lösungen zur Steigerung der Akzeptanz integrieren.

Zur Problemeingrenzung werden in Absatz 2.8.3 bereits Herausforderungen für den Einsatz und die Akzeptanz von MBSE-Ansätzen analysiert. Aufbauend auf den identifizierten Herausforderungen sowie einer zusätzlichen Fallstudie in einem Unternehmen (Absatz 5.3.1), wird in diesem Absatz das Zielsystem für die Umsetzung der zu entwickelnden MBSE-Methodik entwickelt. Hierzu werden Handlungsfelder beziehungsweise damit verbundene Evaluationskriterien für die Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in der (industriellen) Anwendung herausgearbeitet. Durch die Berücksichtigung dieser Handlungsfelder bei der Entwicklung der zu entwickelnden MBSE-Methodik soll somit ein Beitrag zu deren Akzeptanz geleistet werden. Gleichzeitig werden die Handlungsfelder als Evaluationskriterien zur Untersuchung der Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in der Anwendung herangezogen.

Die Handlungsfelder werden dabei einerseits bereits explizit in bestehenden Arbeiten beschrieben und diskutiert. Andererseits werden weitere Handlungsfelder in dieser Dissertation auf Basis der identifizierten Herausforderungen für die Nutzung und Akzeptanz von MBSE-Ansätzen herausgearbeitet. Die hier beschriebenen Analysen beziehen sich dabei auf die Akzeptanz von MBSE-Ansätzen an sich. Der Einführungsprozess von MBSE in einem Unternehmen stellt ein weiteres Forschungsgebiet für die Akzeptanz von MBSE in der Praxis dar (siehe bspw. Bretz et al., 2019). Dies ist jedoch außerhalb des Fokus der vorliegenden Arbeit. Einige der beschriebenen und herausgearbeiteten Herausforderungen für die Einführung von MBSE wirken sich jedoch unmittelbar und mittelbar auf verwendete MBSE-Ansätze aus. Diese Herausforderungen und daraus abgeleitete Handlungsfelder werden daher mit aufgenommen. Weitere organisatorische oder soziotechnische Faktoren zur Einführung, wie beispielsweise Erfolgsfaktoren zur Gestaltung eines Kulturwandels im Unternehmen, werden hingegen in der vorliegenden Dissertation nicht adressiert.

5.3.1 Fallstudie und begleitende Beobachtung im Unternehmen

Die in Absatz 2.8.3 beschriebenen Herausforderungen für die Nutzung und Akzeptanz von MBSE-Ansätzen wurden anhand einer Fallstudie im Unternehmen detailliert und erweitert. Im Zuge einer Co-betreuten Abschlussarbeit wurden Potenziale des Einsatzes von Systems Engineering und MBSE sowie Herausforderungen bei der Einführung im Unternehmenskontext analysiert (Scherer, 2021)⁷. Der betreute Studierende nahm dabei innerhalb einer frühen Projektphase eines agilen Produktentwicklungsprozess zur Entwicklung eines Hexapod-Positioniersystems im Unternehmen PI – Physik Instrumente teil. Am Projekt waren weniger als zehn Personen beteiligt. Die Laufzeit des Projekts war auf ein Jahr geplant. Analysiert wurde dabei einerseits, an welchen Stellen des begleiteten Produktentwicklungsprozesses der Einsatz von MBSE unterstützen könnte. Zudem wurde die Reaktion und Akzeptanz der am Produktentwicklungsprozess beteiligten Personen für vorgeschlagene MBSE-Ansätze untersucht.

Im betrachteten Produktentwicklungsprozess wurde die Systemarchitektur eines bestehenden Hexapods-Positioniersystems des Unternehmens weitestgehend als Übernahmevariation aufgenommen. Ausprägungs- und Prinzipvariationen fanden vor allem auf Detailebene einzelner Komponenten statt. Dieser große Anteil an

⁷ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Übernahmevariationen firmeneigener (Teil-) Systeme, wurde von den Beteiligten als Notwendigkeit gesehen, um den für das Produkt vorgegebene Technology Readiness Level in der zur Verfügung stehenden Zeitspanne erreichen zu können.

Bereits zu einem frühen Projektzeitpunkt wurde den Beteiligten eine lösungsneutrale, funktionale Modellierung, die bereits aus anderen Projekten im Unternehmen vorlag, vorgestellt. Dies ist vergleichbar mit Ansätzen zur Modellierung einer funktionalen Architektur, wie sie in etablierten MBSE-Methoden beschrieben wird (vgl. Absatz 2.5.1). Diese funktionale Modellierung wurde von den Beteiligten jedoch als „zu abstrakt“ angesehen und fand somit keine Akzeptanz. Das Zitat eines Beteiligten zur funktionalen Modellierung lautete hierbei „*Wir bauen aber schon noch einen Hexapod, oder?*“ (Scherer, 2021, S. 50)⁸. Im beobachteten Projekt wurde daher eine eher lösungsneutrale Modellierung einer funktionalen und logischen Architektur als nicht zielführend angesehen und eher pro forma durchgeführt. Intensivere Diskussionen hingegen wurden im Bereich des Anforderungsmanagements beobachtet.

Eine weitere Erkenntnis der Beobachtung bestand darin, dass einige zwischen den Mitarbeitenden verwendeten Begriffe, beispielsweise „Funktion“, nicht eindeutig definiert und teilweise von einzelnen Personen unterschiedlich belegt waren. Wie in Absatz 2.8.3 beschrieben, sehen Albers und Zingel ein eindeutiges Verständnis solcher Begriffe jedoch als eine zentrale Grundlage für den Einsatz einer disziplinübergreifenden Modellierung (Albers & Zingel, 2013). Im Rahmen der Beobachtung wurde das nicht einheitliche Verständnis jedoch als kein zentraler Hinderungsgrund gesehen (Scherer, 2021)⁹. Mehrdeutigkeiten und Unklarheiten konnten durch Diskussionen und Rückfragen aufgelöst werden. Dies kann nach Meinung des beobachtenden Studierenden daraufhin hindeuten, dass im beobachteten Projekt einer hoher Formalisierungsgrad verwendeter Modellierungssprachen nicht die Ausdrucksfähigkeit der Beteiligten einschränken sollte. Ähnliche Beobachtungen werden auch von Eisenbart, Mandel, Gericke und Blessing (2015) beschrieben.

Im Projekt wurde mit einer Vielzahl unterschiedlicher Software-Tools (bspw. MS-Office, CAD-Tools) gearbeitet. Die Anwendung eines neuen Tools in Form eines digitalen Whiteboards wurde aufgrund der nicht intuitiven Bedienung und damit einhergehendem Zeitaufwand nach kurzer Zeit wieder verworfen.

⁸ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Insgesamt wurde der lineare Einsatz eines MBSE-Ansatzes, die sich am RFLP-Ansatz (vgl. Absatz 2.5.1) für den betrachteten Projektrahmen der Entwicklung einer neuen Generation eines bekannten Produkts als nicht zielführend angesehen. Es bildeten sich jedoch mehrere Schwerpunkte heraus, in denen ein Einsatz von MBSE unterstützen könnte. Neben der Modellierung von Anforderungen und deren Verknüpfung zur (logischen und physischen) Architektur, sieht der Co-betreute Studierende, ähnlich wie Tschirner et al. (2015) vor allem ein Potenzial des Einsatzes von MBSE bei der Beschreibung und Klärung des Problemraums (Scherer, 2021)⁹. Dies ist eng verbunden mit der Entwicklung und Beschreibung des Produktprofils (siehe Absatz 2.1.2).

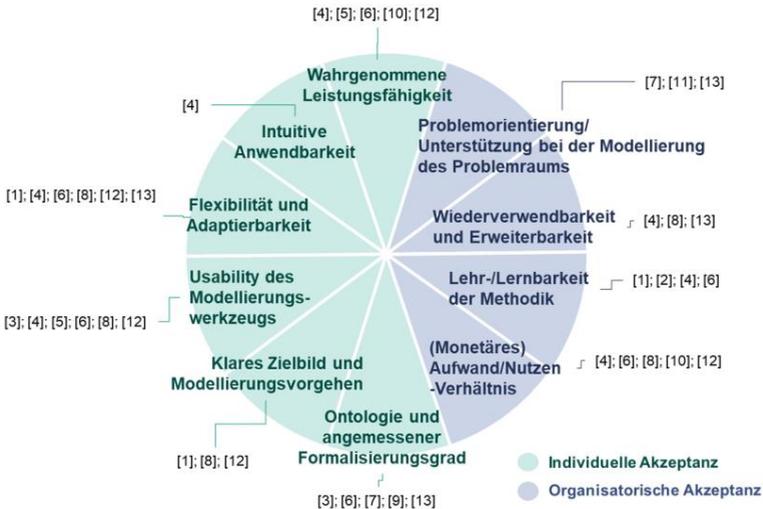
5.3.2 Konsolidierte Handlungsfelder und Evaluationskriterien für die Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in der Praxis

Anhand der beschriebenen Untersuchungen werden Handlungsfelder für die Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in der (industriellen) Anwendung konsolidiert und herausgearbeitet (Mandel, Martin & Albers, 2022). Wie beschrieben adressieren die analysierten Untersuchungen einerseits Herausforderungen, Handlungsfelder und Evaluationskriterien für MBSE-Ansätze, andererseits für den Einführungsprozess von (MB)SE in Unternehmen. In einigen der vorgestellten Arbeiten werden nicht nur Hindernisse und Evaluationskriterien für MBSE, sondern auch für das breitere Feld von Systems Engineering im Allgemeinen beschrieben. Die Beschreibungen in diesem Absatz behandeln jedoch explizit Evaluationskriterien und Handlungsfelder für MBSE-Ansätze.

Die konsolidierten Handlungsfelder sind in Abbildung 5.10 dargestellt. Zudem sind die in Absatz 2.8.3 und Absatz 5.3.1 beschriebenen Quellen, aus denen die Handlungsfelder konsolidiert wurden, an jedem Handlungsfeld aufgeführt. Wie beschrieben können die Handlungsfelder entweder die individuelle Akzeptanz (grün, linke Seite in Abbildung 5.10) oder die organisatorische Akzeptanz (blau, rechte Seite in Abbildung 5.10) von MBSE-Ansätzen adressieren. Maßnahmen, die auf die positive Evaluation der entwickelten Handlungsfelder abzielen, dienen im weiteren Verlauf als Ziele bei der Entwicklung von MBSE-Ansätzen. Zudem werden Analysen zur Evaluation der individuellen und organisatorischen Akzeptanz der in dieser Arbeit entwickelten MBSE-Methodik ebenfalls entlang der Handlungsfelder ausgerichtet. Ein Ziel für die in dieser Dissertation entwickelte MBSE-Methodik ist

⁹ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

daher, bei deren Evaluation eine positive Bewertung in Bezug auf die konsolidierten Handlungsfelder zu erzielen. Dadurch wird die individuelle und organisatorische Akzeptanz der entwickelten MBSE-Methodik angestrebt.



[1]: Friedenthal, 2019; [2]: Bone und Cloutier, 2010; [3]: Albers und Zingel, 2013; [4]: Lohmeyer et al., 2014; [5]: Matthiesen et al., 2014; [6]: Gausemeier et al. 2015; [7]: Tschirner et al., 2015; [8]: Chami et al., 2018; [9]: Alt, 2019; [10]: Bretz et al., 2019; [11]: Cloutier, 2019; [12]: Dumitrescu et al. 2021; [13]: Scherer, 2021

Abbildung 5.10: Handlungsfelder zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen (übersetzt und adaptiert nach Mandel, Martin & Albers, 2022, S. 7)

6 Entwicklung der Kernbestandteile der MBSE-Methodik

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der initialen Ergebnisse für die Modellierungssprache, die Modellierungsmethode sowie die Entwicklung eines Architekturframeworks und dessen Umsetzung in einem Modellierungstool beschrieben. Absatz 6.1 beschreibt dabei die Entwicklung der Ontologie zur Modellierungssprache, basierend auf den Analysen zum Zielsystem der Modellierungssprache aus Absatz 5.1. In Absatz 6.2 wird die Modellierungsmethode beschrieben, die auf Grundlage der Beschreibungen aus Absatz 5.2 entwickelt wird. Absatz 5.3 umfasst Ergebnisse zur Entwicklung, Umsetzung und Implementierung eines Architekturframeworks für die zu entwickelnde MBSE-Methodik. Hierzu wird zunächst die Entwicklung und der Inhalt des Architekturframeworks und dessen Umsetzung in einem Modellierungstool beschrieben. Zudem wird eine Interviewstudie zur Evaluation von Architekturframework und Umsetzung im Live Lab IP 2019/2022 beschrieben.

6.1 Ontologie und Modellierungssprache zur Modellierung des Validierungssystems

6.1.1 Einführung und Grundlagen

Zur Identifikation der für die Ontologie relevanten Begriffe und Klassen wurde in Absatz 5.1 eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Diese wurde durch eine tiefere Analyse von bestehenden Arbeiten aus der KaSPro ergänzt. Wie beschrieben liegt der Fokus für die Klassen der Ontologie insbesondere auf Begriffen zur Modellierung des Validierungssystems. Für verbundene Begriffe zur Modellierung eines Produkts/SiD wird daher insbesondere auf bestehende Ontologien und MBSE-Methoden zurückgegriffen (siehe Absatz 2.5 und Absatz 2.6). Die entwickelte Ontologie wird zudem in mehreren Forschungsgesprächen am IPEK und im Rahmen des Projekts MoSyS eingebracht und weiter verfeinert¹⁰. Die

¹⁰ Forschungsgespräche am IPEK (2022): Teilnehmende: Martin, Alex; Kürten, Claas; Wäschle, Moritz; Bause, Katharina; Cortes, Sven; Schwarz, Stefan; Albers, Albert; Mandel, Constantin

in Absatz 2.5.1 vorgestellte konsolidierte MBSE-Methode zur Modellierung einer Produktgeneration wird als Referenz für Begriffe und Klassen zur Modellierung des SiD herangezogen. Für die entwickelte Ontologie steht die detaillierte Modellierung der physischen Architektur des SiD nicht im Fokus. Hierfür bieten sich statt einer Modellierung mit MBSE-Modellierungssprachen wie SysML eher andere Ansätze wie der C&C²-Ansatz an (Albers & Wintergerst, 2014).

Die in den Analysen aus Absatz 5.1 identifizierten Begriffe lassen sich in drei Kategorien einteilen (siehe Abbildung 6.1).

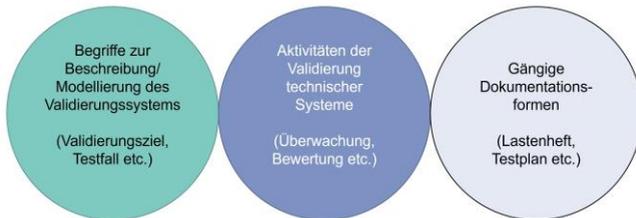


Abbildung 6.1: Einteilung der identifizierten Begriffe in drei Kategorien

Die erste Kategorie sind Begriffe, die zur Modellierung eines SiD inklusive des Produktprofils sowie des zugehörigen Validierungssystems verwendet werden. Diese Begriffe lassen sich als Klassen abstrahieren, analog zu den Klassen und Stereotypen, die mit Hilfe der SysML beschrieben und zur Modellierung verwendet werden (siehe Absatz 2.4.2). Einige der Begriffe werden dabei bereits in der SysML-Spezifikation oder existierenden SysML-Profilen adressiert. So findet sich beispielsweise der Stereotyp „Requirement“ zur Modellierung von Systemanforderungen in der Spezifikation der SysML (OMG, 2019). Die Begriffe dieser Kategorie werden als Bestandteil der LWO adressiert.

In die zweite Kategorie von Begriffen fallen Bezeichnungen von Aktivitäten der Validierung technischer Systeme. Hierunter fallen beispielsweise die Begriffe „Überwachung“ oder „Bewertung“. Diese fließen nicht direkt in die Ontologie ein, sind aber für die Entwicklung der Modellierungsmethode (siehe Absatz 6.2) von Interesse.

Die dritte Kategorie sind gängige Dokumentationsformen, wie „Lastenheft“ oder „Pflichtenheft“, die bei Validierungsaktivitäten im Produktentstehungsprozess verwendet werden und zum Objektsystem gehören. Diese Objekte bezeichnen keine Klassen zur Modellierung des SiD und/oder des Validierungssystems und fließen somit ebenfalls nicht direkt in die Ontologie ein.

6.1.2 Entwickelte Ontologie

Vor dem Hintergrund der in Absatz 5.1.3 herausgearbeiteten Competency Questions an die Ontologie, der in Absatz 2.5.1 vorgestellten konsolidierten Modellierungsmethode für eine Produktgeneration/ein SiD sowie in Erweiterung der Ontologie nach Mandel, Böning, Behrendt und Albers (2021) und Böning (2020)¹¹, wird die Ontologie für die MBSE-Methodik entwickelt. Die Ontologie beschreibt auf Basis der konsolidierten Begriffe Klassen von Elementen, die zur Modellierung in der entwickelten MBSE-Methodik verwendet werden. Im Folgenden werden einzelne Bestandteile der Ontologie schrittweise erläutert. In diesem Absatz werden die Klassen der Ontologie dabei in Guillements (<<>>) beschrieben, um sie im Text herauszustellen. Zur Strukturierung der folgenden Abschnitte werden die formulierten Competency Questions aus Absatz 5.1 herangezogen. Zunächst wird jedoch ein Ontologie-Ausschnitt für die Modellierung des SiDs beschrieben.

Modellierung des SiD

In Abbildung 6.2 ist der erste Ausschnitt der entwickelten Ontologie für Elemente des Produktprofils des SiD dargestellt¹².

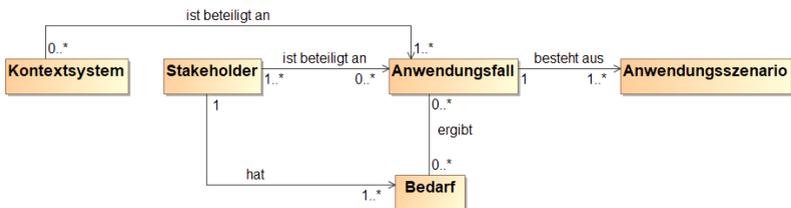


Abbildung 6.2: Ausschnitt der entwickelten Ontologie zu Stakeholdern, Bedarfen, Anwendungsfällen und Anwendungsszenarien

Unterschiedliche <<Stakeholder>> des Produkts haben verschiedene <<Bedarfe>> und sind an <<Anwendungsfällen>> beteiligt. An den <<Anwendungsfällen>> können zudem <<Kontextsysteme>> beteiligt sein, die an der Systemgrenze mit

¹¹ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹² Hinweis: Die Zahlen an den Beziehungen bilden die Kardinalitäten der Beziehungen ab. Gemäß SysML-Notation steht ein * dabei für eine undefinierte Anzahl (n) an Beziehungen. So ist beispielsweise ein <<Kontextsystem>> an 1 bis n (*) Anwendungsfällen beteiligt.

dem SiD interagieren. <<Bedarfe>> und <<Anwendungsfälle>> sind dabei eng verknüpft, da sich beispielsweise aus der Analyse von <<Anwendungsfällen>> <<Bedarfe>> der <<Stakeholder>> ergeben und vice-versa. <<Anwendungsfälle>> können zudem aus verschiedenen <<Anwendungsszenarien>> bestehen (siehe Absatz 2.5.1, Abbildung 6.2).

Zur Nutzung in der Produktentwicklung, müssen basierend auf den Bedarfen <<Ziele>> formuliert beziehungsweise konkretisiert werden (Kubin et al., 2023). In der Literatur zu Systems Engineering wird an dieser Stelle auch häufig der englische Begriff <<Stakeholder-Requirements>> verwendet (Walden et al., 2015). Anders als die direkte Übersetzung des Begriffs <<Stakeholder-Requirement>> zu „Stakeholder-Anforderung“ jedoch suggeriert, werden hiermit nicht nur konkrete Anforderungen, sondern ebenfalls Ziele beschrieben. Im Verständnis der KaSP und der hier vorgestellten Ontologie ist die Unterscheidung von <<Bedarfen>>, <<Zielen>> und <<(System-)Anforderungen>> (siehe unten) jedoch essenziell. Daher wird für die entwickelte Ontologie der Begriff <<Ziele>> verwendet und bei Anwendungen, die explizit den Begriff <<Stakeholder-Requirement>> verwenden, dessen Bezug zu <<Zielen>> erläutert.

In Abbildung 6.3 sind die Zusammenhänge zwischen Bedarfen, Zielen, Systemanforderungen und Randbedingungen für die entwickelte Ontologie dargestellt.

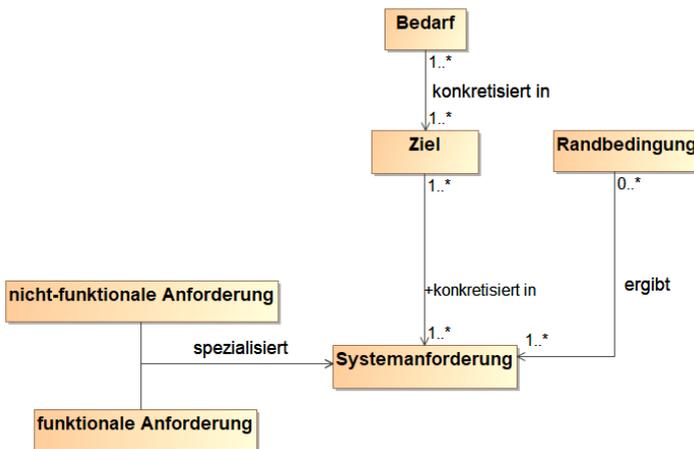


Abbildung 6.3: Ausschnitt der entwickelten Ontologie zu Bedarfen, Zielen, Systemanforderungen und Randbedingungen

Zusammen mit <<Randbedingungen>> bilden <<Ziele>> den Ausgangspunkt zur Formulierung von <<Systemanforderungen>>. <<Systemanforderungen>> wird dabei in der Ontologie lediglich als konsolidierende Klasse verwendet, mit welcher auch Anforderungen an Sub-Systeme und Komponenten modelliert werden können. <<Systemanforderungen>> lassen sich zudem auf verschiedene Arten klassifizieren (siehe Absatz 2.5.1). Für diese Arbeit ist eine Unterteilung in <<funktionale Anforderungen>> und <<nicht-funktionale Anforderungen>> ausreichend

<<Funktionale Anforderungen>> werden durch <<Funktionen>> des Systems adressiert. <<Funktionen>> sind dabei eng mit den <<Anwendungsfällen>> verknüpft, in denen das System genutzt werden soll. <<Logische Systemelemente>> sind die Bestandteile der logischen Architektur (siehe Absatz 2.5.1) und erfüllen im Zusammenspiel <<Funktionen>>. Zudem besteht eine Verknüpfung zwischen <<Systemanforderungen>> und <<logischen Systemelementen>>, um anzuzeigen, durch welche <<logischen Systemelemente>> die <<Systemanforderungen>> befriedigt werden beziehungsweise werden sollen (Abbildung 6.4).

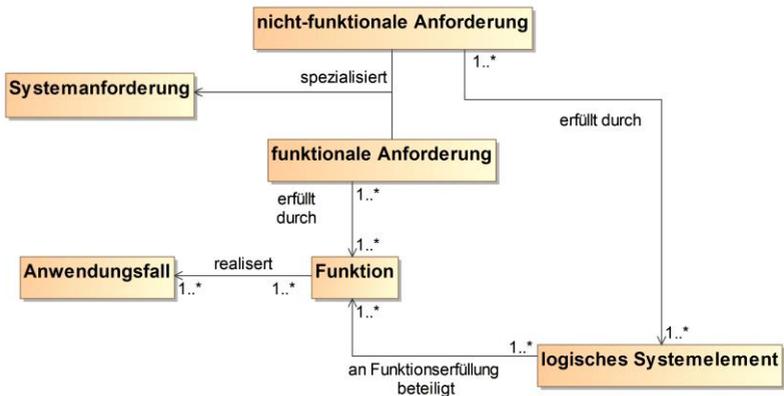


Abbildung 6.4: Ausschnitt der entwickelten Ontologie zu Anforderungen, Funktionen und logischen Systemelementen

Beschreibung von Wissens- und Definitionslücken im Zielsystem und zielgerichtete Bereitstellung von Kontextwissen für die Definition von Testfällen zur Untersuchung dieser

Im Zielsystem für die Modellierungsmethode wurden zum ersten Handlungsfeld zwei Competency Questions beschrieben (siehe Absatz 5.1.3):

- Bei welchen Bedarfen, Zielen und Anwendungsfällen bestehen Wissens- und Definitionslücken?
- Welche bereits modellierten Elemente (Anforderungen, Anwendungsfälle etc.) sind bei der Untersuchung der Wissens-/Definitionslücke zu beachten?

Zur Modellierung von Wissens- und Definitionslücken in Bezug auf das Produktprofil beziehungsweise den Problemraum wird das Element <<Validierungsbedarf>> eingeführt. <<Validierungsbedarfe>> bilden somit die Schnittstelle zwischen dem Modell des SiD/der Produktgeneration und dem Modell des Validierungssystems. Sie können damit unter anderem Wissensaufbau, Fehlererkennung oder Absicherung in der Produktentstehung adressieren. Ähnlich den Bedarfen zur Modellierung einer Produktgeneration, werden Validierungsbedarfe eher abstrakt beschrieben. Ein <<Validierungsbedarf>> steht in Verbindung zu <<Bedarfen>>, <<Zielen>>, <<Anwendungsfällen>>/<<Anwendungsszenarien>> oder <<Randbedingungen>>. Zur Vereinfachung der Modellierung werden diese Elemente daher im abstrahierenden <<Validierungsbedarf-Element>> zusammengefasst. Durch die Verbindung der <<Validierungsbedarf-Elemente>> zu <<Systemanforderungen>>, <<Funktionen>> und <<logischen Systemelementen>> sowie untereinander (siehe Ontologie zur Modellierung des SiD), sind somit auch potenziell relevante Elemente für einen <<Validierungsbedarf>> mit diesem indirekt verknüpft. Zur Adressierung des <<Validierungsbedarfs>> werden über den Produktentwicklungsprozess <<Validierungsziele>> definiert (Abbildung 6.5).

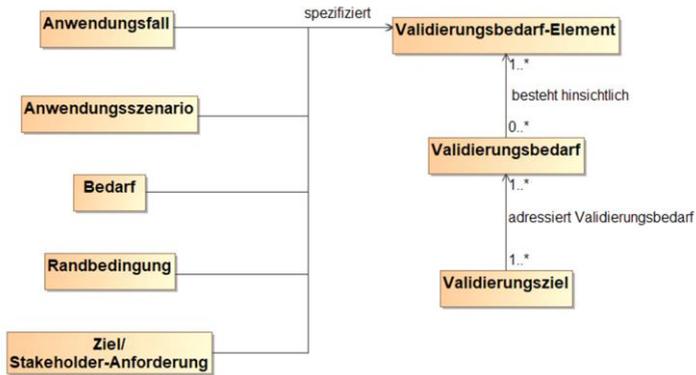


Abbildung 6.5: Ausschnitt der entwickelten Ontologie zu Validierungsbedarf-Elementen, Validierungsbedarfen und Validierungszielen

Herleitung konkreter Validierungsziele und notwendiger Testfälle, basierend auf beschriebenen Wissens- und Definitionslücken und abhängig vom angestrebten Reifegrad einer Entwicklungsgeneration

Für das zweite Handlungsfeld wurden insgesamt fünf Competency Questions formuliert (siehe Absatz 5.1.3):

- Welche Validierungsziele werden über den Produktentstehungsprozess zur Schließung der Wissens-/Definitionslücken formuliert?
- Was ist das Validierungsziel eines spezifischen Tests/Testfalls?
- Welche zur Schließung der Wissens-/Definitionslücke zu berücksichtigen Elemente des Zielsystems werden entsprechend des konkret formulierten Validierungsziels für einen konkreten Test/Testfall betrachtet?
- Welche Testabläufe, Testkonfiguration und Testergebnisse gehören zu einem Testfall?
- Welche Stakeholder, Umweltsysteme an der Systemgrenze und logischen Systemelemente müssen gemäß dem formulierten Validierungsziels eines Testfalls in einer konkreten Testkonfiguration berücksichtigt werden?

Die <<Validierungsziele>> werden wie beschrieben direkt zu den <<Validierungsbedarfen>> verknüpft (siehe Abbildung 6.5). Sie sind Ausgangspunkt für die Formulierung beziehungsweise Definition von <<Testfällen>>. Durch diese Verknüpfung, können aus den potenziell relevanten Elementen (bspw. <<Systemanforderungen>> oder <<Funktionen>>) für einen <<Validierungsbedarf>> genau die ausgewählt werden, die für ein konkretes

<<Validierungsziel>> berücksichtigt werden sollen. Das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Validierungsbedarfen – Validierungszielen – Testfällen ist dabei analog zum Verständnis der Zusammenhänge zwischen Stakeholder Bedarfen – Zielen – Systemanforderungen bei der Modellierung des SiD.

In Anlehnung und konkretisierend an Ebel (2015) umfasst ein <<Testfall>> in der entwickelten Ontologie mindestens einen <<Testablauf>>, eine <<Testkonfiguration>> und ein <<Testergebnis>>¹³. Für die gleiche Kombination aus <<Testablauf>> und <<Testkonfiguration>> kann es für unterschiedliche <<Testdurchführungen>>, beispielsweise aufgrund variierender äußerer Einflüsse, zu unterschiedlichen Ergebnissen und Erkenntnissen kommen. Ein <<Testergebnis>> fasst diese konsolidierend zusammen. Zudem wird die in Richtlinien wie ASPICE geforderte Verbindung von <<Systemanforderungen>> und <<Testfällen>> (VDA QMC Working Group 13 / Automotive SIG, 2017) für die entwickelte Ontologie umgesetzt. Somit sind neben dem <<Testablauf>> zusätzlich die <<Testkonfiguration>>, in welcher der <<Testfall>> durchgeführt wurde, und das <<Testergebnis>> zur <<Systemanforderung>> verknüpft (Abbildung 6.6).

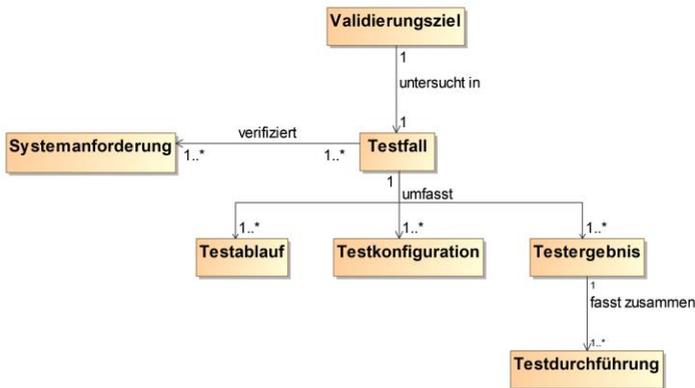


Abbildung 6.6: Ausschnitt der entwickelten Ontologie zu Testfall, Testablauf, Testkonfiguration und Testergebnis

Gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes besteht eine <<Testkonfiguration>> einerseits aus Modellen, die <<logische Systemelemente>>, <<Kontextsysteme>> oder

¹³ Nach Ebel umfasst ein Test einen Testfall, eine Testumgebung und eine Testinterpretation Ebel (2015).

<<Stakeholder>> des Systems abbilden. Dies ist in der entwickelten Ontologie durch das Element <<Testmodell>> und dessen Verknüpfung zu den entsprechenden Elementen abgebildet. Gleichzeitig wird ein Element zur Modellierung von <<Koppelsystemen>> eingeführt (Abbildung 6.7).

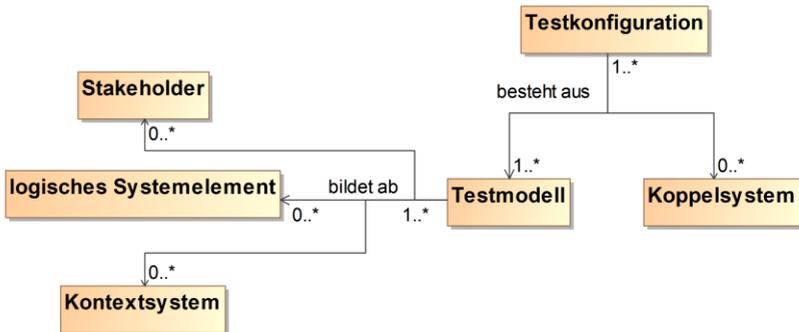


Abbildung 6.7: Ausschnitt der entwickelten Ontologie zu Bestandteilen einer Testkonfiguration

Rückführung von Testergebnissen in das Systemmodell des SiD, um die Interpretation der Auswirkungen der Testergebnisse zu unterstützen und das Zielsystem kontinuierlich zu erweitern und zu konkretisieren

Für das dritte Handlungsfeld wurden drei Competency Questions formuliert (siehe Absatz 5.1.3):

- Durch welche Testfälle wird eine spezifische Systemanforderung verifiziert?
- Auf welche Elemente des Zielsystems hat ein Testergebnis potenziell Auswirkungen?
- Welche konkretisierten oder neuen Elemente des Zielsystems ergeben sich aus der Testinterpretation durch ein Testergebnis?

Einerseits steht gemäß den Beschreibungen im letzten Absatz ein <<Testfall>> in Verbindung mit den <<Systemanforderungen>>, die durch den <<Testfall>> verifiziert werden sollen. Um zusätzlich entsprechend des ZHO-Modells (siehe Absatz 2.1.1) <<Testergebnisse>> in Bezug auf das Zielsystem zu analysieren und das Zielsystem zu konkretisieren beziehungsweise zu erweitern, werden <<Testergebnisse>> mit <<Validierungsbedarf-Elementen>> sowie mit <<Systemanforderungen>> verknüpft. Dadurch können die Konkretisierung, Neu-

Definition oder Absicherung der Validität dieser Elemente basierend auf der Interpretation eines <<Testergebnisses>> modelliert werden (Abbildung 6.8).

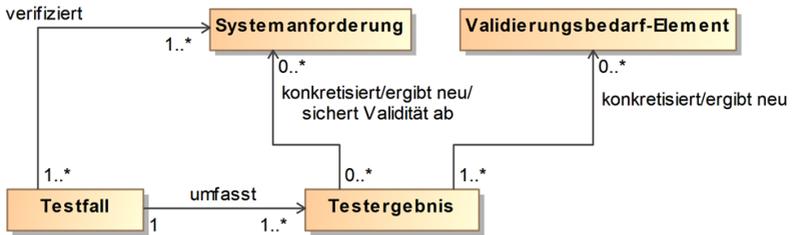


Abbildung 6.8: Ausschnitt der entwickelten Ontologie zur Konkretisierung des Zielsystems basierend auf Testergebnissen

6.1.2.1 Vollständige Ontologie

Die vollständige Ontologie für die in dieser Dissertation entwickelte MBSE-Methodik ist in Abbildung 6.9 dargestellt. Auf Basis der Ontologie wird im folgenden Absatz die Entwicklung der Modellierungsmethode vorgestellt.

6.2 Entwicklung der Modellierungsmethode

In diesem Absatz wird die Entwicklung der Modellierungsmethode als Teil der ganzheitlichen MBSE-Methodik beschrieben. Absatz 6.2.1 behandelt zunächst eine Einführung in die Modellierungsmethode. Zusätzlich wird ein Überblick über die Gesamtmethode gegeben. Details zu einzelnen Schritten beziehungsweise Aktivitäten der Modellierungsmethode werden in den weiteren Absätzen ausgeführt.

6.2.1 Einführung und Übersicht über die Methode

Ziel der entwickelten Modellierungsmethode ist es, eine methodische Unterstützung bei der im beschriebenen Zielsystem (siehe Absatz 5.2) herausgearbeiteten Aktivitäten zu bieten. Zusätzlich baut die Modellierungsmethode auf der entwickelten Ontologie (Absatz 6.1) und den dort definierten Begriffen und Zusammenhängen auf.

Grundlagen zur Modellierungsmethode und eine erste Anwendung werden von Mandel et al. (2021) sowie Böning (2020)¹⁴ beschrieben. In der vorliegenden Dissertation wird eine weiterentwickelte Modellierungsmethode beschrieben. Der schematische Ablauf der Modellierungsmethode ist in Abbildung 6.10 dargestellt. An dieser Stelle sei nochmals betont, dass der sequentielle Ablauf der einzelnen Modellierungsschritte rein der Darstellung dient und die tatsächliche Modellierung iterativ und sprunghaft erfolgen kann. Gemäß dem beschriebenen Wechselspiel zwischen der zur Entwicklung der Produktgeneration G_n (bzw. eines SiD) und des entsprechenden Validierungssystems, wird auch in der entwickelten Modellierungsmethode die Modellierung für die beiden Systeme parallel durchgeführt. Entsprechend des herausgearbeiteten Forschungsbedarfs (siehe Kapitel 3) steht die Teil-Methode für die Modellierung des Validierungssystem im Fokus dieser Dissertation. Für die Modellierung der Produktgeneration beziehungsweise des SiD wird die in Absatz 2.5.1 beschriebene kondensierte Modellierungsmethode herangezogen.

Die entwickelte Modellierungsmethode orientiert sich an der Problemlösungsmethodik SPALTEN (siehe Absatz 2.2.1) und zielt spezifisch auf die Entwicklung und Bereitstellung einer konsistenten Informationsbasis auf der interdisziplinären Vernetzungsebene gemäß des Leitbilds ASE (siehe Abbildung 1.4). Hierdurch soll, gemäß der Zielsetzung dieser Dissertation, eine

¹⁴ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Entscheidungsunterstützung bei der Durchführung von Validierungsaktivitäten im Produktentstehungsprozess geboten werden. Es sollen explizit keine Aussagen getroffen werden, wie Anwendende der Methode bspw. Testfälle zu formulieren oder Testumgebungen auszuwählen haben.

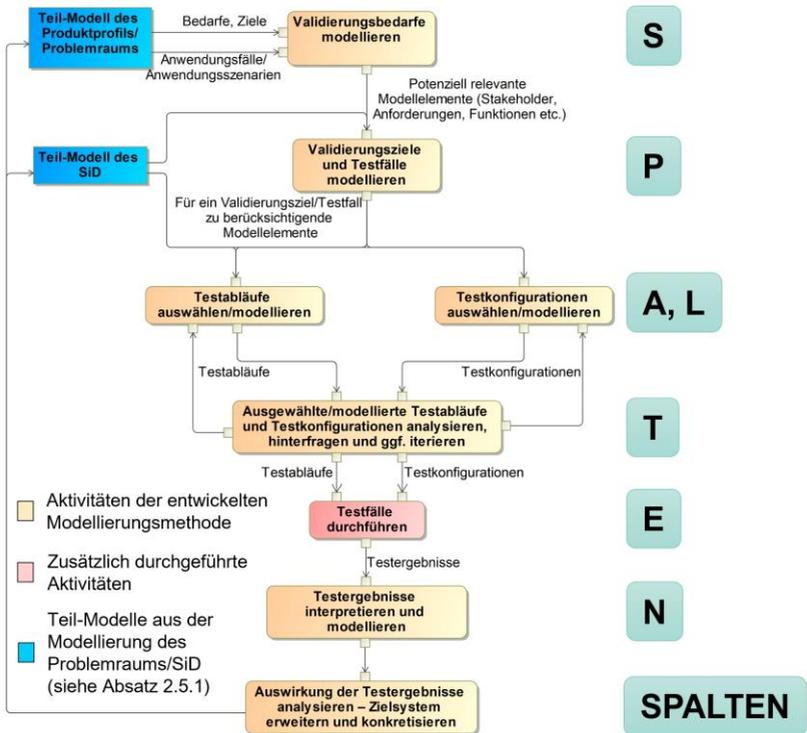


Abbildung 6.10: Entwickelte Modellierungsmethode (schematische Übersicht)

Die Darstellung der einzelnen Schritte der entwickelten Modellierungsmethode erfolgt anhand des bereits in Absatz 2.5.1 und Absatz 4.2 eingeführten Leitbeispiels der Validierung von ADAS. Der Fokus des Beispiels liegt weiterhin auf der vereinfachten auszugswweisen Betrachtung der ADASs Abstandsregeltempomat (ACC – Adaptive Cruise Control) und Notbremsassistent (AEB – Autonomous Emergency Brake). Durch die Darstellung am Leitbeispiel kann somit zudem initial der Mehrwert der Modellierungsmethode demonstriert und evaluiert werden. Für die

Beschreibung und Anwendung der Methode anhand des Leitbeispiels, werden die in Absatz 6.1 herausgearbeiteten Klassen von Elementen aus der entwickelten Ontologie genutzt (siehe Abbildung 6.9). Hierfür wurde die Ontologie in ein SysML-Profil überführt. Zur Modellierung wird das SysML-Modellierungstool Cameo Systems Modeler von Dassault Systèmes verwendet (Dassault Systèmes, 2022, 18. März).

6.2.2 Teilaktivitäten der Modellierungsmethode

6.2.2.1 Teil-Modelle des SiD und des Produktprofils/Problemraums

Für die Modellierung des Problemraums/Produktprofils sowie von Systemanforderungen, Funktionen und logischen Systemelementen einer Produktgeneration, wird für die entwickelte MBSE-Methodik die in Absatz 2.5.1 beschriebene konsolidierte Modellierungsmethode verwendet. Die Übersicht über die konsolidierte Modellierungsmethode und den beschriebenen Modellierungsaktivitäten ist in Abbildung 6.11 erneut dargestellt. Das Systemmodell lässt sich somit, in Anlehnung an die in Abbildung 6.9 dargestellten Ontologie, in die drei Teil-Modelle Problemraum/Produktprofil, Produktgeneration G_n /SiD und Validierungssystem unterteilen.

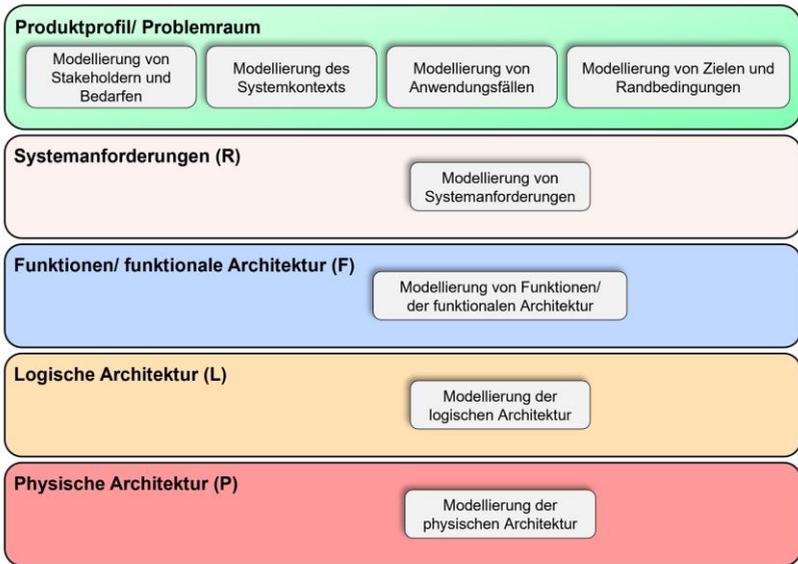


Abbildung 6.11: Konsolidierte Modellierungsmethode für eine Produktgeneration/das SiD (eigene Darstellung)

6.2.2.2 Validierungsbedarfe an Zielen, Randbedingungen und Anwendungsfällen modellieren

Wie in Absatz 6.1 zur entwickelten Ontologie beschrieben, werden mit Hilfe von <<Validierungsbedarfen>> Wissens- oder Definitionslücken modelliert. Diese werden direkt an modellierte <<Ziele>>, <<Randbedingungen>> und <<Anwendungsfälle>> im Produktprofil verknüpft. Gemäß der in Absatz 2.5.1 beschriebene Methode zur Modellierung der Produktgeneration/des SiD, werden zur Herstellung einer Nachvollziehbarkeit modellierter Elemente Verknüpfungen von <<Zielen>> zu <<Systemanforderungen>> sowie von <<Anwendungsfällen>> zu <<Funktionen>> angelegt. Durch die hergestellte Nachvollziehbarkeit der Modellelemente, können indirekt auch <<Systemanforderungen>>, <<Funktionen>>, <<Stakeholder>>, <<Umweltsysteme>> und <<logische Systemelemente>> identifiziert werden, die zur Untersuchung des <<Validierungsbedarfs>> beziehungsweise Auflösen der Wissens-/Definitionslücke potenziell relevant sind. Die modellierten <<Validierungsbedarfe>> stellen somit die Schnittstelle zwischen der Modellierung der Produktgeneration und des Validierungssystems dar.

Die Modellierung von <<Validierungsbedarfen>> erfolgt für die entwickelte Modellierungsmethode direkt in Diagrammen, in denen die Elemente des Produktprofils modelliert sind. Zudem wird ein View vorgesehen, in welchem zentral alle modellierten <<Validierungsbedarfe>> gesammelt werden. Dies geschieht beispielsweise in Form einer Tabelle, in der die (direkt oder indirekt) mit dem <<Validierungsbedarf>> verknüpften Elemente des Systemmodells angezeigt werden. Dank der Nutzung spezialisierter Modellierungstools, kann diese Anzeige über Templates für die Tabelle automatisiert werden. Somit kann auf einen Blick identifiziert werden, welche der für die Produktgenerationen modellierten Elemente für den <<Validierungsbedarf>> relevant sind. Zusätzlich können weitere Metriken zur Beschreibung des Validierungsbedarfs in die Übersicht integriert werden. In Anlehnung an die von Albers und Behrendt et al. (2016) beschriebene Kritikalitätsbewertung für Testfälle kann die Anzahl der Verknüpfungen des <<Validierungsbedarfs>> gezählt werden, um eine Aussage zum Impact des <<Validierungsbedarfs>> zu erhalten.

Darstellung für das Leitbeispiel

In Abbildung 6.12 wird das bereits in Absatz 2.5.1 dargestellte Diagramm zur Modellierung von <<Stakeholdern>>, aus deren Bedarfen abgeleiteten <<Zielen>> und <<Randbedingungen>> herangezogen. Zusätzlich wird nun der <<Validierungsbedarf>> „Automatisches Bremsen bei ACC-Fahrten-gerade Landstraße“ mit der Beschreibung „Kann eine Kollision mit einem vorausfahrenden Fahrzeug vermieden werden, wenn während des ACC-Fahrens auf einer geraden Landstraße eine automatische Bremsung aufgrund weiterer Verkehrsteilnehmer erfolgt?“ modelliert (rote Box). Im Modellierungstool kann dank eigenem Customizing der <<Validierungsbedarf>> per Drag and Drop mit dem Ziel „Automatisches Bremsen“ verknüpft werden (siehe Verweis zu „adressierten Elementen“ am <<Validierungsbedarf >>).

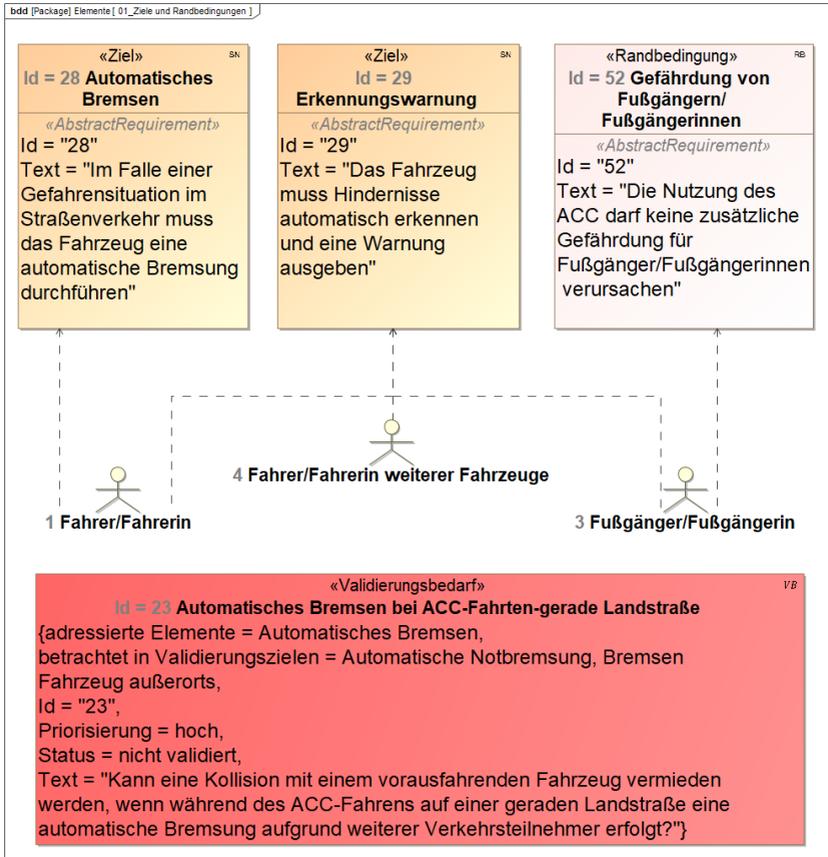


Abbildung 6.12: Ziele, Stakeholder und Validierungsbedarfe im ADAS-Beispiel

Das <<Ziel>> „Automatisches Bremsen“ wurde bereits bei der Modellierung des Produkts direkt und indirekt mit <<Systemanforderungen>>, <<Funktionen>> und <<logischen Systemelementen>> verknüpft ist (siehe Absatz 2.5.1). Zusätzlich sind die <<Stakeholder>> an verschiedenen <<Anwendungsfällen>> beteiligt. Unter Nutzung der im SysML-Profil hinterlegten Ontologie können im Modellierungstool Templates erstellt werden, die somit auch für den <<Validierungsbedarf>> alle (direkt und indirekt) verbundenen Modellelemente anzeigen. In Abbildung 6.13 ist auszugswise eine Tabelle dargestellt, die als Template im Modell hinterlegt wird

und automatisch alle für einen <<Validierungsbedarf>> relevanten bzw. zu berücksichtigende Modellelemente anzeigt.

Name	Relevante Stakeholder/ Nachbarsysteme	Relevante Anwendungsfälle	Relevante Anforderungen
Automatisches Bremsen bei ACC-Fahrten-gerade Landstraße	1 Fahrer/Fahrerin	<ul style="list-style-type: none"> 20 Mit aktiviertem Abstandsregeltempomat (ACC) fahren 22 Automatische Bremsung im Gefahrenfall 21 Fahrzeug manuell fahren 	<ul style="list-style-type: none"> 30 Aufprall-Erkennung 33 AEB_res_dis_min 34 AEB_det_distance 35 AEB_decel_distance 36 AEB_a_min 37 ACC_rel_dis_min

Abbildung 6.13: Automatisch generierte Darstellung der für den modellierten Validierungsbedarf relevanten bzw. zu berücksichtigenden Modellelemente (Auszug)

In einer weiteren Darstellung (Anhang D1) kann zudem die Priorisierung und der Status (validiert/nicht validiert) einzelner <<Validierungsbedarfe>> dargestellt werden. Diese Darstellungen dienen als Ausgangsbasis zur Ableitung spezifischer <<Validierungsziele>> und der Testplanung.

6.2.2.3 Modellierung von Validierungszielen und Testfällen

Zur Begegnung der <<Validierungsbedarfe>> müssen <<Testfälle>> geplant und durchgeführt werden. Die Ausgestaltung der <<Testfälle>> wird wiederum maßgeblich durch das abgestrebte <<Validierungsziel>> bestimmt. Durch das <<Validierungsziel>> soll, entsprechend des Reifegrads der aktuellen Entwicklungsgeneration $E_{i,j}$, der <<Validierungsbedarf>> und die dadurch beschriebene Wissen-/Definitionslücke (teilweise) geschlossen werden.

Für die entwickelte Modellierungsmethode wird somit für jeden modellierten <<Validierungsbedarf>> mindestens ein konkretisierendes <<Validierungsziel>> modelliert und mit dem <<Validierungsbedarf>> verknüpft. Zudem wird für jedes <<Validierungsziel>> ein <<Testfall>> definiert und mit diesem verknüpft. <<Testfälle>> dienen dabei wie beschrieben als zusammenfassende Elemente für mindestens einen <<Testablauf>>, eine <<Testkonfiguration>> und ein <<Testergebnis>>.

Die Modellierung der <<Validierungsziele>> und <<Testfälle>> kann gemäß vier Teilaktivitäten erfolgen:

- Analyse der modellierten <<Validierungsbedarfe>>
- Synthese von <<Validierungszielen>> und <<Testfällen>> für die <<Validierungsbedarfe>>
- Auswahl und direkte Verknüpfung der in für einen <<Testfall>> konkret zu berücksichtigenden Modellelemente
- Analyse der Übersicht zur Testplanung

Durch die Verknüpfung eines <<Testfalls>> zu einem <<Validierungsziel>> und damit indirekt zu einem <<Validierungsbedarf>> werden indirekt alle modellierten <<Stakeholder>> mit ihren <<Bedarfen>>, <<Ziele>>, <<Anwendungsfälle>>, <<Systemanforderungen>>, <<Funktionen>> und <<logischen Systemelemente>> mit dem <<Testfall>> verknüpft, die für den <<Validierungsbedarf>> relevant sind. Wird ein <<Validierungsbedarf>> jedoch mittels mehrerer <<Validierungsziele>> und somit mehrerer <<Testfälle>> adressiert, sind nicht zwangsweise alle modellierten Elemente, die für den adressierten <<Validierungsbedarf>> relevant sind, auch für jedes <<Validierungsziel>> beziehungsweise jeden einzelnen <<Testfall>> relevant. Es gilt daher, für jedes <<Validierungsziel>> aus der Liste der potenziell relevanten Elemente (über den <<Validierungsbedarf>>) die Elemente auszuwählen, die im konkreten <<Validierungsziel>> und für einen konkreten <<Testfall>> adressiert werden sollen.

Die Auswahl der relevanten Elemente aus der Liste aller potenziell relevanten Elemente geschieht über das Anlegen einer direkten Beziehung. Damit ergibt sich eine Übersicht über die relevanten Informationen zur Testplanung. Diese kann einer verantwortlichen Person als konsistente Informationsbasis zur Planung von <<Testabläufen>> und <<Testkonfigurationen>> dienen. Zusätzlich wird eine direkte Nachvollziehbarkeit/Traceability zwischen den <<Testfällen>> und <<Systemanforderungen>> hergestellt, wie es in unterschiedlichen Normen und Richtlinien (bspw. ASPICE, siehe VDA QMC Working Group 13 / Automotive SIG, 2017) gefordert ist.

In der Praxis findet sich zudem häufig das Vorgehen, direkt <<Testfälle>> zu <<Systemanforderungen>> zu definieren, beziehungsweise Test-Anforderungs-Paare aus einem Referenzsystem zu übernehmen, ohne dabei über die Beschreibung eines <<Validierungsbedarfs>> zu gehen (Wäschle et al., 2021). Einerseits soll die hier entwickelte Modellierungsmethode auch dieses Modellierungsvorgehen unterstützen. Andererseits bietet die Verknüpfung von <<Testfällen>> und <<Systemanforderungen>> ohne die Berücksichtigung von

<<Validierungsbedarfen>> die Gefahr, <<Testfälle>> zu einer Produktgeneration, die nicht mehr auf die <<Validierungsbedarfe>> der aktuell entwickelten Produktgeneration passen oder gegebenenfalls überflüssig sind, ohne geeignete Variation zu übernehmen. Zudem kann durch die direkte Verknüpfung von <<Systemanforderungen>> und <<Testfällen>> lediglich die Verifikation unterstützt werden. Zur Unterstützung der Validierung ist zwingend eine Verknüpfung zum Produktprofil, beziehungsweise den modellierten <<Validierungsbedarfen>> und somit zu <<Bedarfen>>, <<Zielen>> und <<Anwendungsfällen>> der <<Stakeholder>> erforderlich. Ist kein geeigneter <<Validierungsbedarf>> modelliert, gilt es den <<Testfall>> zu hinterfragen oder einen neuen <<Validierungsbedarf>> zu beschreiben und mit Elementen des Produktprofils zu verknüpfen. Zusätzlich kann durch die Verbindung des <<Testfalls>> zu einem geeigneten <<Validierungsbedarf>> die Testdefinition nochmals geschärft werden, da beispielsweise am <<Validierungsbedarf>> weitere Elemente (bspw. <<Systemanforderungen>> oder <<Funktionen>>) der aktuellen Produktgeneration offensichtlich werden, die bei der Planung und Durchführung des <<Testfalls>> zu beachten sind.

Darstellung für das Leitbeispiel

Als Grundlage zur Definition von <<Validierungszielen>> und Tests wird die in Abbildung 6.13 dargestellten Views zum <<Validierungsbedarf>> herangezogen. Zum Anlegen der <<Validierungsziele>> und <<Testfälle>> wird in der gewählten Modellierungsumgebung das in Abbildung 6.14 dargestellte Diagramm verwendet.



Abbildung 6.14: Anlegen von Validierungszielen und Tests zu einem Validierungsbedarf (Auszug)

Hierbei wird für den <<Validierungsbedarf>> „Automatisches Bremsen bei ACC-Fahrten-gerade Landstraße“ (links in Abbildung 6.14, Name gekürzt) unter anderem das Validierungsziel „Bremsen Fahrzeug außerorts“ (Mitte unten in Abbildung 6.14, Name gekürzt) mit der Beschreibung „Simulative Absicherung, dass beim gewählten Sensor-konzept ein Zusammenstoß mit einem bremsenden Fahrzeug bei Fahrten

außerhalb der Stadt mit aktiviertem ACC vermieden wird“ definiert (gestrichelte Verbindungen links). An diesem Validierungsziel wiederum wird der Testfall „AEB Test_out_of_town“ definiert (gestrichelte Verbindung rechts).

Wie beschrieben gilt es im Weiteren, für die einzelnen <<Validierungsziele>> und <<Testfälle>> speziell die Modellelemente auszuwählen, die für den konkreten <<Testfall>> relevant sind. Abbildung 6.15 zeigt daher mit dem grauen Pfeil „potenziell relevant“ alle Modellelemente an, die für den mit dem <<Validierungsziel>> verknüpften <<Validierungsbedarf>> relevant sind. Mittels des orangenen Pfeils, der SysML-„Allocate“-Beziehung, wird anschließend bestimmt, welche dieser potenziell relevanten Elemente für ein spezifisches <<Validierungsziel>> und einen spezifischen <<Testfall>> tatsächlich betrachtet werden sollen. Für eine vollständige Validierung des <<Validierungsbedarfs>> ist es notwendig (jedoch nicht hinreichend), dass durch die Summe der <<Validierungsziele>> und <<Testfälle>> alle relevanten Modellelemente für einen <<Validierungsbedarf>> betrachtet werden. Durch das Anlegen der Allocate-Beziehung wird zudem auch die direkte Verknüpfung zwischen <<Systemanforderungen>> und <<Testfällen>> realisiert (s.o.). Für das Leitbeispiel ist somit in Abbildung 6.15 zu sehen, dass für den „AEB Test_out_of_town“ lediglich zwei der drei für den <<Validierungsbedarf>> relevanten <<Anwendungsfälle>> betrachtet werden sollen. Der dritte <<Anwendungsfall>> wird hingegen im <<Testfall>> „AEB Test_explorative“ betrachtet.

Legend		Ziele und Randbedingungen	Anwendungsfälle				Stakeholder und Umweltsy	Systema
↗ Allocate ↗ Potenziell relevant			21 Fahrzeug manuell fahre	22 Automatische Bremsun	20 Mit aktiviertem Abstand	24 Außerstädtisch mit aktiv	23 Innerstädtisch mit aktiv	
			1 Fahrer/Fahrerin	3 Fahrer/Fahrerin weiterer	Verkehr	Straße		
			35 AEB_decel_distance	30 Aufprall-Erkennung	34 AEB_det_distance			
Validierungsziele			4	5	4		6	
41 Automatische Notbremsung		2	4	↗	↗			10
T AEB Test_explorative		1	2	↗	↗		1	4
42 Bremsen Fahrzeug außerorts		2	5	↗	↗		2	12
T AEB Test_out of town		1	2	↗	↗		1	6

Abbildung 6.15: Auswahl und Verknüpfung der relevanten Modellelemente eines Validierungsbedarfs, die in einem Testfall berücksichtigt werden sollen (Auszug)

Eine zentrale Sicht für die entwickelte Methode ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Hier werden auf Basis eines erstellten Templates automatisch alle Modellelemente zusammengestellt, die für einen spezifischen <<Testfall>> relevant sind. Dies kann Testplanenden als Entscheidungsunterstützung für die Auswahl und Definition geeigneter <<Testabläufe>> und <<Testkonfigurationen>> dienen.

#	Name	Validierungsziel	Dokumentation	Adressiert Validierungsbedarfe	Relevante Stakeholders/ Umfeldsysteme	Relevante Anwendungsfälle	Relevante Systemanforderungen	Relevante Systemelemente
1	T AEB Test_explorative	41. Automatische Notbremsung	Explorative simulative Analyse der Grenzwerte des AEB Systems	41. Automatische Notbremsung	1 Fahrer/Fahrern	21 Fahrzeug manuell fahren 22 Automatische Bremsung im Gefährtnfall	36 AEB_a_min 39 AEB_res_dis_min 35 AEB_decel_distance 30 Aufprall-Erkennung 34 AEB_det_distance	AEB Batterie
2	T AEB Test_Out of town	42. Bremsen Fahrzeug außerorts	Simulative Untersuchung eines Fahrzenarioes auf der Landstraße mit einem univarierten Notbremsmanöver	42. Bremsen Fahrzeug außerorts	1 Fahrer/Fahrern	20 Mit aktiviertem Abstandsregeltempo-mat (ACC) Fahren 22 Automatische Bremsung im Gefährtnfall	37 ACC_rel_dis_min 33 AEB_res_dis_min 35 AEB_decel_distance 36 AEB_a_min 34 AEB_det_distance 30 Aufprall-Erkennung	AEB ACC Batterie Cruise Control

Abbildung 6.16: Testspezifikation – relevante/zu beachtende Modellelemente für einen Testfall (Auszug)

6.2.2.4 Modellierung von Testabläufen

Wie beschrieben steht für die entwickelte Modellierungsmethode die Bereitstellung einer konsistenten Informationsbasis, unter anderem als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl und Definition von <<Testabläufen>> im Fokus. Ein detailliertes methodisches Vorgehen bei dieser Auswahl und Definition ist nicht Kern der Arbeit. <<Testabläufe>> können jedoch als logischer Ablauf auch mit Modellierungssprachen wie SysML modelliert werden. Für die entwickelte Modellierungsmethode kann daher die Modellierung von <<Testabläufen>> parallel und integriert zur Modellierung geeigneter <<Testkonfigurationen>> erfolgen. Als Grundlage zur Beschreibung der <<Testabläufe>> dient die Übersicht der <<Testfälle>> inklusive der durch die Nachvollziehbarkeit im Modell erkannten relevanten Modellelemente (siehe Abbildung 6.16). Ein wesentlicher Input für die Definition und Modellierung von <<Testabläufen>> ist dabei die Analyse relevanter <<Anwendungsfälle>> und <<Funktionen>> für den <<Testfall>>. Gleichzeitig gilt es jedoch zu beachten, dass bestehende <<Testfälle>> inklusive der definierten <<Testabläufe>> und <<Testkonfigurationen>> nach dem Verständnis des Modells der SGE oft Teil des Referenzsystems sind. So können einerseits bereits definierte <<Testabläufe>>, beispielsweise aus Vorgänger-Generationen, als Referenzelemente für die aktuelle Systemgeneration genutzt werden. Zudem existieren Normen und Standards mit der Beschreibung von <<Testabläufen>>, beispielsweise die Euro NCAP Test Protokolle für AEB-Systeme (EuroNCAP, 2015). Daher kann es hilfreich sein, häufig verwendete <<Testabläufe>> in Form einer Bibliothek für die Modellierung zu hinterlegen. Die Modellierung der <<Testabläufe>> besteht dann in der Auswahl, Weiterentwicklung beziehungsweise Variation (ÜV, AV, PV, siehe Absatz 2.1.3) und Verknüpfung der <<Testabläufe>> zu den entsprechenden <<Testfällen>> statt einer kompletten Neu-Modellierung.

<<Testabläufe>> können entweder mittels Freitextes oder, ähnlich zur Detaillierung von <<Anwendungsfällen>> und <<Funktionen>> (siehe Absatz 2.5.1), mittels Aktivitätsdiagrammen oder Zustandsautomaten detailliert werden. Zudem existieren Softwaretools, die auf die Beschreibung und Modellierung von <<Testabläufen>> spezialisiert sind (siehe bspw. Open Test Framework, emotive GmbH & Co. KG, 2022, 03. Juli). Ähnlich zur Beschreibung der physischen Architektur (siehe Absatz 2.5.1) bietet sich hier also eine Schnittstelle und Verlinkung zwischen Systemmodell und weiteren Tools an.

Darstellung für das Leitbeispiel

Abbildung 6.16 wird als Grundlage für die Auswahl/Definition von <<Testabläufen>> für den <<Testfall>> „AEB Test_out_of_town“ herangezogen. Der <<Testfall>> ist

dabei zum <<Validierungsziel>> „Bremsen Fahrzeug außerorts“ verknüpft. Zur Auswahl oder Neuanlage und direkten Verknüpfung eines <<Testablaufs>> zu einem <<Testfall>> wird das in Abbildung 6.17 dargestellte Diagramm herangezogen. Für das Beispiel wird der <<Testablauf>> „Notbremsung_Straße_außerorts“ dem <<Testfall>> zugewiesen (grüner Pfeil rechts).



Abbildung 6.17: Auswahl/Anlegen und Verknüpfen von <<Testabläufen>> zu einem <<Testfall>>

Für das Leitbeispiel wird für die Detaillierung von <<Testabläufen>> ein SysML-Aktivitätsdiagramm verwendet (Abbildung 6.18). Hierin werden einerseits die einzelnen logischen Schritte des <<Testablaufs>> („Ego- Fahrzeug startet mit konstanter Geschwindigkeit und angeschaltetem ACC mit Abstand zum Target-Fahrzeug“ → „Ego Fahrzeug fährt mit angeschaltetem ACC automatisch auf Target-Fahrzeug auf“ etc.) dargestellt. Zusätzlich werden die zu variierenden Größen (bspw. Initialabstand von Ego- und Target-Fahrzeug) sowie die zu untersuchenden Größen (bspw. Restabstand zwischen Ego-Fahrzeug und Target-Fahrzeug nach Notbremsung) beschrieben.

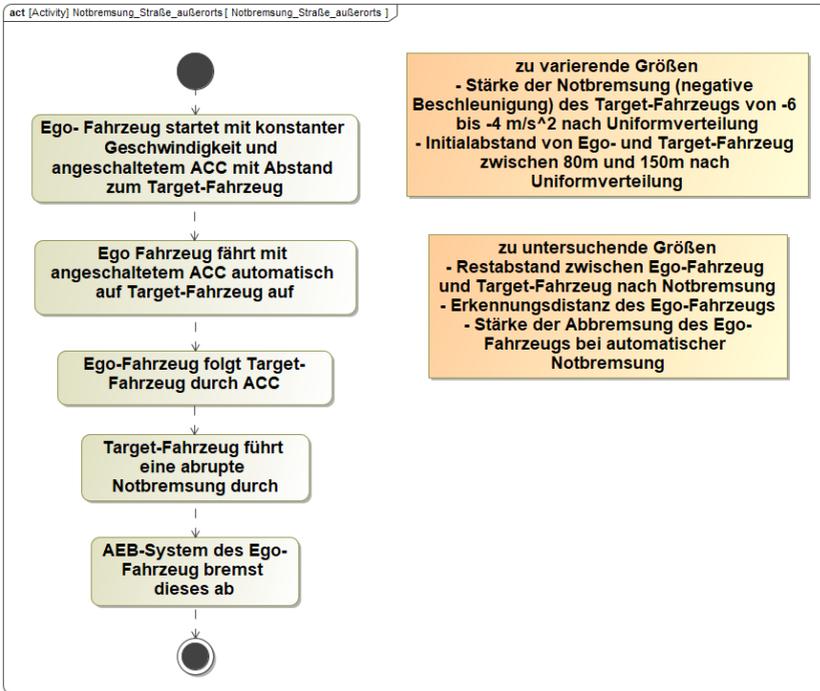


Abbildung 6.18: Detaillierung der Beschreibung eines <<Testablaufs>>

6.2.2.5 Modellierung von Testkonfigurationen

Parallel und integriert zur Modellierung von <<Testabläufen>> erfolgt die Modellierung geeigneter <<Testkonfigurationen>>. Eine wichtige Grundlage hierfür bildet die Analyse relevanter <<Stakeholder>> sowie <<Funktionen>> und <<logischer Systemelemente>>, die über den <<Testfall>> identifiziert werden können (siehe Abbildung 6.16). Mandel und Wolter et al. (2020) beschreiben zudem einen MBSE-Ansatz zur Wiederverwendung von Modellelementen zur Beschreibung von <<Testkonfigurationen>>. Hierbei sind insbesondere die beschriebenen Informationen an den (Teil-) Modellen vorhandener <<Testkonfigurationen>> relevant. Anstatt Elemente der <<Testkonfiguration>> jedes Mal neu zu modellieren, kann somit im Referenzsystem auf eine Bibliothek bereits modellierter Elemente, inklusive Beschreibungen zu Erfahrungswissen aus deren Anwendung, zurückgegriffen werden. Zudem können an den

wiederverwendbaren Teil-Modellen ausführbare Modelle (bspw. Matlab/Simulink-Modelle) verknüpft werden. Damit kann aus der Systemmodellierung heraus direkt ein Simulationsmodell zur Vorauslegung einer <<Testkonfiguration>> aufgebaut werden. Bei Bedarf können zudem die Stoff-, Informations- und Energieflüsse zwischen den <<Testmodellen>> und <<Koppelsystemen>>, ähnlich der Modellierung der logischen Architektur (siehe Abbildung 2.28), in einem internen Blockdiagramm detailliert werden.

Darstellung für das Leitbeispiel

Die Bestandteile der <<Testkonfiguration>> für den betrachteten <<Testfall>> des Leitbeispiels sind auszugsweise in Abbildung 6.19 modelliert. Kernbestandteil der <<Testkonfiguration>> ist die Simulationsumgebung „CarMaker“ (IPG Automotive GmbH, 2019, 11. März). Die CarMaker Simulationsumgebung ist dabei mittels des Tools ModelCenter (Phoenix Integration, 2019, 07. März) in einen automatisierten Workflow aus verschiedenen Modellen eingebettet. In diesem Workflow sind insbesondere ein Matlab-Skript zur automatischen Generierung von Fahrsituationen für CarMaker sowie ein weiteres Matlab-Skript zur Aufbereitung und Speicherung der Simulationsergebnisse eingebunden. Das Simulationsmodell in CarMaker (repräsentiert das Fahrzeug und seine Umgebung) sowie das Matlab-Skript zur automatischen Generierung von Fahrsituationen (repräsentiert die fahrende Person) bilden explizit Elemente der Produktarchitektur ab und werden daher mittels des Stereotyps <<Testmodell>> modelliert. Das Matlab Skript zum Postprocessing von Ergebnissen der Simulation, das Tool ModelCenter und ein Python Script für die Kommunikation zwischen Matlab und ModelCenter hingegen stellen <<Koppelsysteme>> dar und sind dementsprechend mit dem passenden Stereotyp modelliert.

Wie beschrieben werden auch <<Testkonfigurationen>> in Generationen entwickelt. Folglich kann für das Beispiel die <<Testkonfiguration>> nicht von Grund auf neu modelliert, sondern aus einer Bibliothek in das Modell übernommen werden. Dadurch können Zusatzinformationen, wie verantwortliche Ansprechpartner für die <<Testkonfiguration>>, Erfahrungswerte aus deren Anwendung oder Links zu bestehenden Simulationsmodellen, direkt am Element der <<Testkonfiguration>> eingesehen werden.

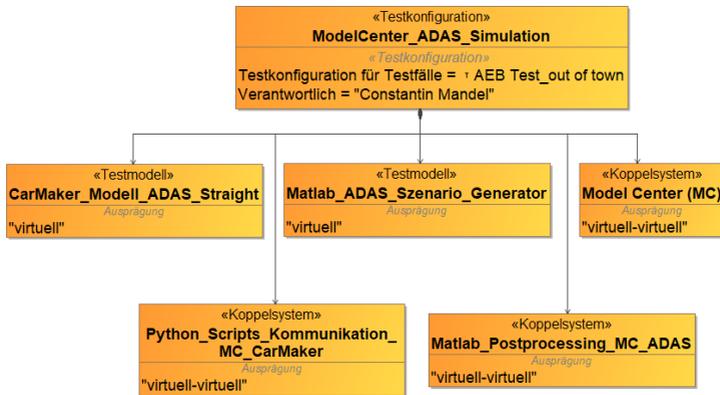


Abbildung 6.19: Bestandteile der <<Testkonfiguration>> für den betrachteten <<Testfall>> „AEB Test_out_of_town“ (Auszug)

Eine vereinfachte Darstellung der Informationsflüsse der <<Testkonfiguration>> ist in Abbildung 6.22 dargestellt. Gemäß dem IPEK-XiL-Framework sind die <<Testmodelle>> und <<Koppelsysteme>> dabei nach ihrer Ausprägung (virtuell, physisch oder gemischt physisch-virtuell) sowie entsprechend ihrer Abbildung des SiD oder der Connected Systems (Umwelt, fahrende Person) eingeteilt. In der <<Testkonfiguration>> sendet das Matlab Skript „Matlab_ADAS_Szenario_Generator“ Informationen zum <<Testablauf>> sowie der Umgebung des SiD (bspw. Verkehr) an ModelCenter. ModelCenter leitet diese Informationen an das <<Testmodell>> „CarMaker_Modell_ADAS_Straight“ weiter. Zusätzlich werden von ModelCenter über das <<Koppelsystem>> der Python Skripte („Python_Scripts_Kommunikation_MC_CarMaker“) Start-Stop Signale zur Simulation an CarMaker gesendet. Die in CarMaker erzeugten Simulationsergebnisse fließen wiederum über ModelCenter an ein Koppelsystem zum Postprocessing (bspw. Erzeugung von Plots, Berechnung von Maximal-Werten aus der Simulation) an ein Matlab Skript („Matlab_Postprocessing_MC_ADAS“). Für detailliertere Beschreibungen der Testkonfiguration sei auf Mandel und Wäschle et al. (2021) verwiesen.

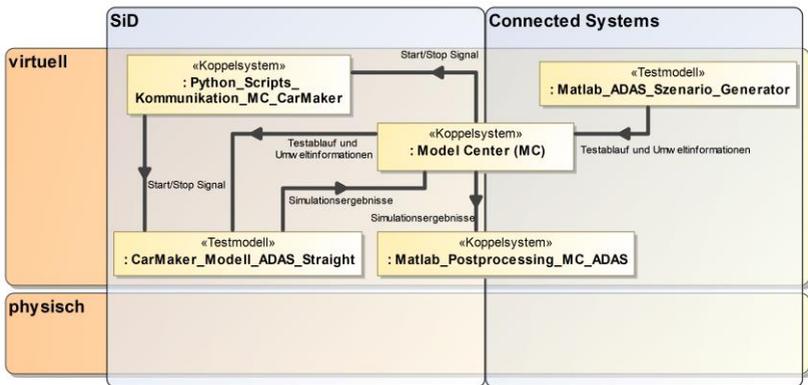


Abbildung 6.20: Informationsflüsse zwischen den <<Testmodellen>> und <<Koppelsystemen>> für die <<Testkonfiguration>> ModelCenter_ADAS_Simulation

6.2.2.6 Ausgewählte/modellierte Testabläufe und Testkonfigurationen analysieren, hinterfragen und gegebenenfalls iterieren

Modellierte <<Testabläufe>> und <<Testkonfigurationen>> werden bei der Modellierung immer zu <<Testfällen>> verknüpft. <<Testfälle>> fassen somit, gemäß der entwickelten Ontologie (siehe Absatz 6.1), zusammenhängende <<Testabläufe>>, <<Testkonfigurationen>> und <<Testergebnisse>> für verbundene <<Validierungsziele>> zusammen. Diese Übersicht der <<Validierungsziele>>, <<Testabläufe>>, <<Testkonfigurationen>> und <<Testergebnisse>> für einen <<Testfall>> kann in geeigneten Modellierungstools ebenfalls, über entsprechend definierte Templates, automatisch generiert werden.

Die Übersicht kann damit zur Tragweitenanalyse vor der eigentlichen Durchführung der <<Testfälle>> dienen. Die zusammenfassend dargestellten Informationen dienen als Ausgangspunkt zur Analyse der ausgewählten/modellierten <<Testabläufe>> und <<Testkonfigurationen>> für die betrachteten <<Testfälle>>. Auf Basis dieser Analyse können beispielsweise potenzielle Risiken und Chancen vor der Durchführung der <<Testfälle>> identifiziert werden. Darauf aufbauend kann entschieden werden, ob zusätzliche Iterationsschleifen zur Auswahl/Modellierung von <<Testabläufen>> und <<Testkonfigurationen>> notwendig sind oder ob mit der Durchführung der <<Testfälle>> begonnen werden kann.

Darstellung für das Leitbeispiel

Nach der parallelen Auswahl/Definition der <<Testabläufe>> und <<Testkonfigurationen>> kann die in Abbildung 6.21 gezeigte Darstellung herangezogen werden, um eine konsolidierte Übersicht über alle definierten <<Testfälle>> inklusive der dafür definierten <<Testabläufe>>, <<Testkonfigurationen >> und (nach der Testdurchführung) <<Testergebnisse>> zu erhalten. Die Übersicht kann als Ausgangspunkt für Analysen, ob weitere Iterationsschleifen notwendig sind oder ob mit der Durchführung der <<Testfälle>> begonnen werden kann, dienen.

#	Name	Dokumentation	Testabläufe	Testkonfigurationen	Erzeugte Testergebnisse
1	T AEB Test_out of town	Simulative Untersuchung eines Fahr Szenarios auf der Landstraße mit einem unerwarteten Notbremsmanöver	 Notbremsung_Straße_außerorts  NEUER TESTABLAUF	 ModelCenter_ADAS_Simulation	 Ergebnis_ADAS_Test1
2	T AEB Test_explorative	Explorative simulative Analyse der Grenzwerte des AEB Systems			

Abbildung 6.21: Übersicht der <<Testabläufe>>, <<Testkonfigurationen>> und <<Testergebnisse>> für einen <<Testfall>>

6.2.2.7 Durchführung der Tests

Die Durchführung der Tests erfolgt außerhalb des SysML-Modells in der gewählten <<Testkonfiguration>>.

Darstellung für das Leitbeispiel

Ein Screenshot der Testdurchführung ist in Abbildung 6.22 dargestellt. Auf der linken Seite findet sich eine Darstellung des <<Testablaufs>> beziehungsweise der Workflow in ModelCenter. Basierend auf den Informationen zum modellierten <<Testfall>> werden mit Hilfe des ersten Matlab Skripts Fahr Situationen für CarMaker erzeugt. Variiert werden dabei der initiale Abstand zwischen Ego- und Target-Fahrzeug sowie die Stärke der Bremsung des Target-Fahrzeugs (siehe den modellierten <<Testablauf>> in Abbildung 6.18). Die generierten Fahr Situationen werden an die CarMaker-Simulationsumgebung auf einem zweiten Rechner gesendet und die Simulation gestartet (rechte Seite in Abbildung 6.22). Nach Durchführung des <<Testablaufs>> werden die Simulationsergebnisse zurück an ModelCenter und anschließend Matlab gesendet. In diesem zweiten Matlab-Skript werden die Ergebnisse aufbereitet, Plots erzeugt, und schließlich zur weiteren Verwendung und Analyse gespeichert. Anschließend startet der <<Testablauf>> erneut mit anderen Parametern. Für detailliertere Beschreibungen zur Durchführung

des <<Testfalls>> und Schnittstellen zwischen den einzelnen (Teil-)Modellen sei auf Mandel und Wäschle et al. (2021) und Anhang D2 verwiesen.

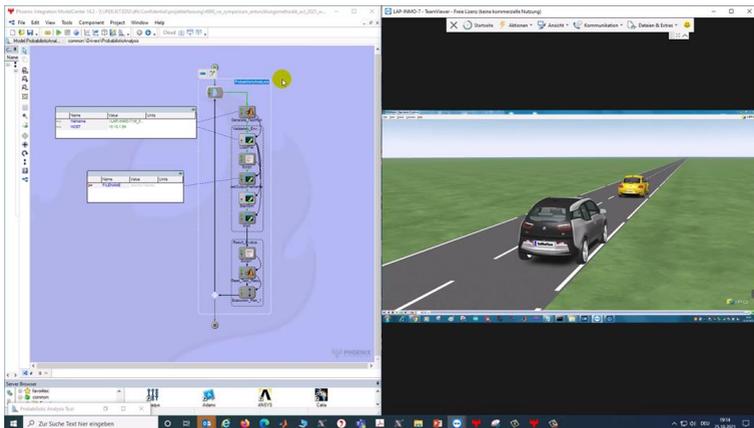


Abbildung 6.22: Durchführung eines <<Testfalls>> für die ADAS-Validierung des Leitbeispiels. Die linke Seite zeigt den in ModelCenter umgesetzten <<Testablauf>> als Verkettung der unterschiedlichen Modelle und Skripte (siehe Absatz 6.2.2.5). Auf der rechten Seite ist ein Standbild der Simulation in CarMaker zu sehen, bei der das Ego-Fahrzeug (schwarz/grau) dem Target-Fahrzeug (gelb) auf eine Landstraße folgt.

6.2.2.8 Modellierung von Testergebnissen und Erweiterung/Konkretisierung des Zielsystems

Als drittes Teil-Element eines <<Testfalls>>, werden <<Testergebnisse>> aus der Durchführung der <<Testabläufe>> in den entsprechenden <<Testkonfiguration>> modelliert. Ähnlich zu Beschreibungen der physischen Architektur, ist eine detaillierte Hinterlegung von <<Testergebnissen>>, wie beispielsweise Testrohdaten, im MBSE-Systemmodell nicht sinnvoll. Daher werden für die Modellierung von <<Testergebnissen>> ebenfalls „Platzhalter-Elemente“ verwendet, die beispielsweise auf Testdaten auf einem Server verlinken. Gleichzeitig wird ein Attribut am <<Testergebnis>> festgelegt, um Erkenntnisse aus der Interpretation der <<Testergebnisse>> im MBSE-Systemmodell hinterlegen zu können.

Durch die Modellierung der <<Testergebnisse>> als Platzhalter-Elemente, sind diese mit anderen Elementen des Systemmodells verknüpfbar und in die

Nachvollziehbarkeits-Ketten im MBSE-Systemmodell eingebunden. Bei der Testinterpretation können somit einerseits Auswirkungsanalysen von einem <<Testergebnis>> aus startend durchgeführt werden, um beispielsweise zu analysieren, ob alle relevanten <<Systemanforderungen>> für den anvisierten <<Testfall>> verifiziert werden konnten. Ist dies nicht der Fall, können relevante Elemente der funktionalen und logischen Systemarchitektur identifiziert werden, die gegebenenfalls angepasst oder weiter detailliert werden müssen. Methoden zu modellbasierten Auswirkungs- und Risikoanalysen sind derzeit Gegenstand weiterer Forschung am IPEK (Martin et al., 2022).

Im Verständnis des ZHO-Modells stoßen so Validierungsaktivitäten die Weiterentwicklung und Detaillierung des Zielsystems im MBSE-Systemmodell an. Neben der Anpassung beziehungsweise Detaillierung bestehender Modellelemente kann die Analyse und Interpretation eines <<Testergebnisses>> aber auch die Beschreibung und Modellierung zusätzlicher Modellelemente anstoßen. So können anfänglich noch sehr abstrakte <<Systemanforderungen>> auf Gesamtsystemebene dank Erkenntnissen eines <<Testfalls>> durch konkretere <<Systemanforderungen>> auf Sub-System-Ebene detailliert werden. Zusätzlich können durch die Interpretation des <<Testergebnisses>> weitere <<Validierungsbedarfe>> oder weitere <<Validierungsziele>> identifiziert werden, die notwendig sind, um einen <<Validierungsbedarf>> zu befriedigen. Hierzu werden die modellierten <<Testergebnisse>> mit den neu angelegten Modellelementen verknüpft. Hierdurch wird im MBSE-Systemmodell eine Nachvollziehbarkeit der neu angelegten Elemente nicht nur zu den <<Testergebnissen>>, sondern auch zu den zugehörigen <<Testfällen>> und <<Validierungsbedarfen>> realisiert.

Darstellung für das Leitbeispiel

Nach Durchführung des <<Testablaufs>> in der entsprechenden <<Testkonfiguration>> wird ein neues Element vom Typ <<Testergebnis>> im Modell angelegt und mit dem zugehörigen <<Testfall>> verknüpft. Dieses dient als Hyperlink-Halter für den Ordner der aufbereiteten Testergebnisse, beispielsweise in Form von Matlab-Plots. Gleichzeitig wird eine Aussage aus der Interpretation des <<Testergebnisses>> an Modellelement hinterlegt (siehe Abbildung 6.23).

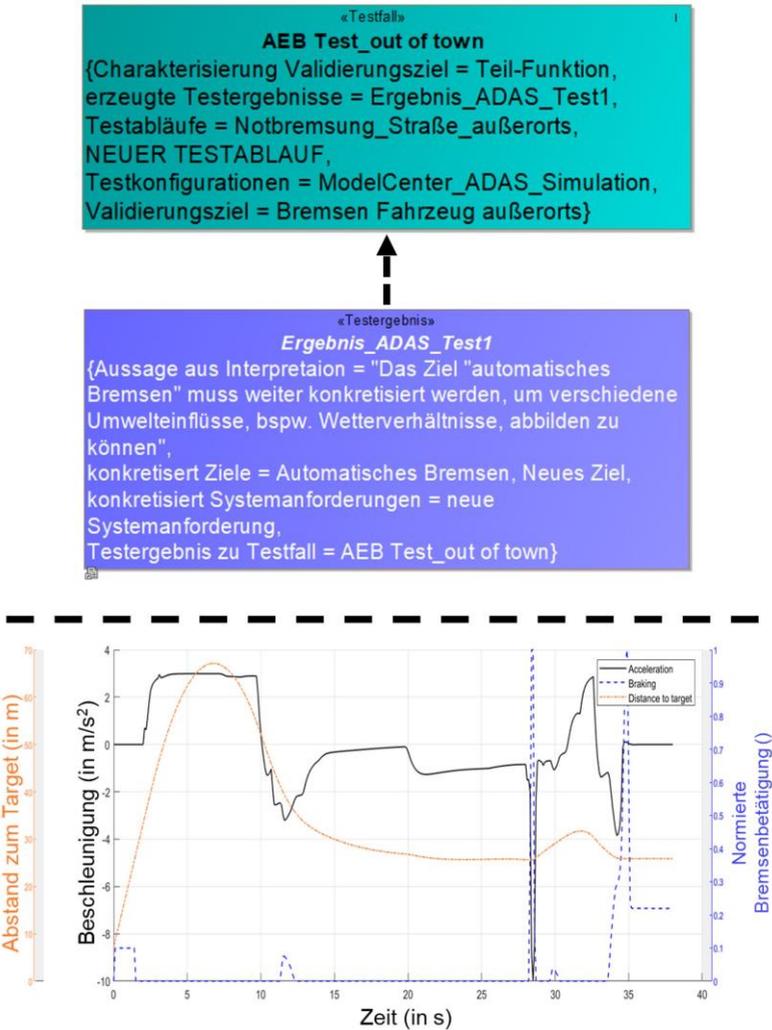


Abbildung 6.23: Darstellung des Testergebnisses als Linkhalter im Systemmodell (oben), Matlab-Plot als beispielhaftes Testergebnis (unten) (adaptiert und erweitert nach Mandel, Wäschle et al., 2021, S. 10)

Für das Beispiel wird bei der Testinterpretation die Aussage festgehalten, dass das <<Ziel>> „automatisches Bremsen“ weiter detailliert werden muss, um verschiedene Umwelteinflüsse (bspw. Sonnenstand, Regen) abzubilden. Durch die Verknüpfung zum <<Testfall>> können auf Grundlage der Testinterpretation daraufhin Elemente des Systemmodells (bspw. <<Ziele>>, <<Systemanforderungen>>) analysiert werden, die vom <<Testergebnis>> betroffen sind (siehe Anhang D3). So betrifft das erzeugte <<Testergebnis>> unter anderem das <<Ziel>> „Automatisches Bremsen“ oder den <<Anwendungsfall>> „Mit aktiviertem Abstandsregeltempomat (ACC) fahren“. Durch geeignete Darstellung im Modellierungstool, beispielsweise ähnlich der Nachvollziehbarkeits-Darstellung zur Auswahl/Anlegen und Verknüpfen von <<Testabläufen>> zu einem <<Testfall>> (siehe Abbildung 6.17), können somit Nachvollziehbarkeitsbeziehungen weiter im Modell analysiert werden, um vom <<Testergebnis>> betroffene <<Systemanforderungen>> oder <<logische Systemelemente>> zu identifizieren.

Ergeben sich aus der Interpretation des <<Testergebnisses>> in Bezug auf die betroffenen Modellelemente neue oder konkretisierte Modellelemente, wird dies ebenfalls im Systemmodell abgebildet. Im Beispiel ergibt sich aus der Testinterpretation eine Konkretisierung des <<Ziels>> „Automatisches Bremsen“, in dem genauer beschrieben wird, wie verschiedene Umwelteinflüsse den automatischen Bremsvorgang beeinflussen (oberer blauer Pfeil in Abbildung 6.24). Zudem können sich aus der Interpretation der <<Testergebnisse>> auch neue <<Ziele>> oder <<Systemanforderungen>> ergeben (pinker Pfeil in Abbildung 6.24). Somit wird das Zielsystem kontinuierlich erweitert und konkretisiert.

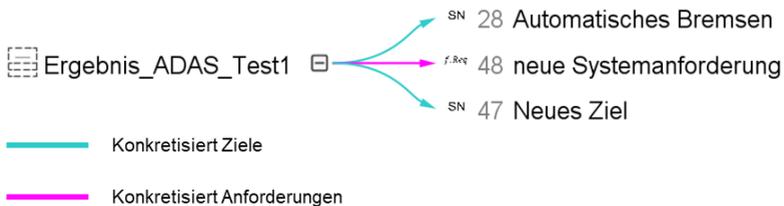


Abbildung 6.24: Modellierung der Konkretisierung und Erweiterung des Zielsystems basierend auf der Interpretation des <<Testergebnisses>>

Durch die neuen und konkretisierten Elemente des Zielsystems können im nächsten Schritt weitere <<Validierungsziele>> zur Befriedigung eines <<Validierungsbedarfs>> in zukünftigen Entwicklungsgenerationen oder gar zusätzliche <<Validierungsbedarfe>> identifiziert werden. Deren Modellierung und die Durchführung der passenden Validierungsaktivitäten wird wiederum nach der

beschriebenen Methode durchgeführt. Am Ende des Produktentwicklungsprozesses sollten alle <<Validierungsbedarfe>> untersucht und befriedigt sein.

In diesem Absatz wurde die Modellierungsmethode als Teil der MBSE-Methodik beschrieben. Diese baut auf der entwickelten Ontologie für die MBSE-Methodik auf (siehe Absatz 6.1). Zur Umsetzung der Ontologie und Modellierungsmethode wird im nächsten Absatz die Entwicklung eines initialen Architekturframeworks sowie dessen Implementierung in einem Software-Tool beschrieben.

6.3 Architekturframework für die entwickelte MBSE-Methodik

Wie in Absatz 2.6 beschrieben, finden Architekturframeworks zunehmend Verwendung in MBSE-Ansätzen. Damit soll die Anwendung von Modellierungsmethoden durch ein Rahmenwerk zur Strukturierung der erstellten MBSE-Systemmodelle unterstützt werden (vgl. Morkevicus et al., 2017).

In diesem Absatz wird die Entwicklung eines Architekturframeworks sowie eine Untersuchung hinsichtlich dessen Eignung zur Unterstützung der Akzeptanz von MBSE-Ansätzen beschrieben. Das hier beschriebene initiale Architekturframework dient einerseits als Bestandteil der zu entwickelnden MBSE-Methodik. Andererseits werden durch die durchgeführte Studie die in Absatz 5.3 herausgearbeiteten Handlungsfelder zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen durch weitere Erkenntnisse anhand einer konkreten Anwendung der (initialen) MBSE-Methodik erweitert und detailliert.

Hierzu wird in Absatz 6.3.1 zunächst das initiale Architekturframework für die zu entwickelnde MBSE-Methodik vorgestellt. Die Untersuchung der Eignung des Architekturframeworks für die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte MBSE-Methodik und Auswirkung auf deren individuelle und organisatorische Akzeptanz, wurde im Live-Lab IP – integrierte Produktentwicklung 2019/2020 durchgeführt. In Absatz 6.3.2 wird daher zunächst das Studiendesign der Untersuchung in IP vorgestellt. Ergebnisse der Untersuchung folgen in Absatz 6.3.3. Eine Interpretation der Ergebnisse und eine darauf aufbauende Schlussfolgerung für die (Weiter-)Entwicklung der MBSE-Methodik werden in Absatz 6.3.4 vorgestellt.

An dieser Stelle sei betont, dass die Entwicklung des in diesem Kapitel beschriebenen Architekturframeworks und der in 6.1 und 6.2 beschriebenen Ontologie beziehungsweise Modellierungsmethode parallel verläuft. Somit wurden noch nicht alle Aspekte der entwickelten Ontologie und Modellierungsmethode im

Architekturframework berücksichtigt. Zudem war im Rahmen von IP 2019/2020 rein die Modellierung des Produkts und nicht des Validierungssystems im Fokus. Der Schwerpunkt der Untersuchung in IP lag jedoch nicht auf Details zur Ontologie oder Modellierungsmethode, sondern auf der Untersuchung der Eignung des Architekturframeworks zur Unterstützung der individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen. Details zu den Inhalten der Modelle oder der gewählten Modellierungsmethode stehen in diesem Absatz somit nicht im Fokus.

6.3.1 Entwickeltes Architekturframework für IP 2019/2020

Abbildung 6.25 zeigt das entwickelte Architekturframework für IP 2019/2020. Das Architekturframework ist direkt als Startpunkt-Diagramm in einem Template für die genutzte Modellierungsumgebung Cameo Systems Modeler (Dassault Systèmes, 2022, 18. März) angelegt. Zudem sind Diagramme zu allen genutzten Views und eine festgelegene Ordnerstruktur im Template hinterlegt. Damit können auch für Matrizen und Nachvollziehbarkeits-Diagramme Templates angelegt werden, die sich der festgelegten Ordnerstruktur des Modell-Templates bedienen, um automatisch befüllt zu werden.

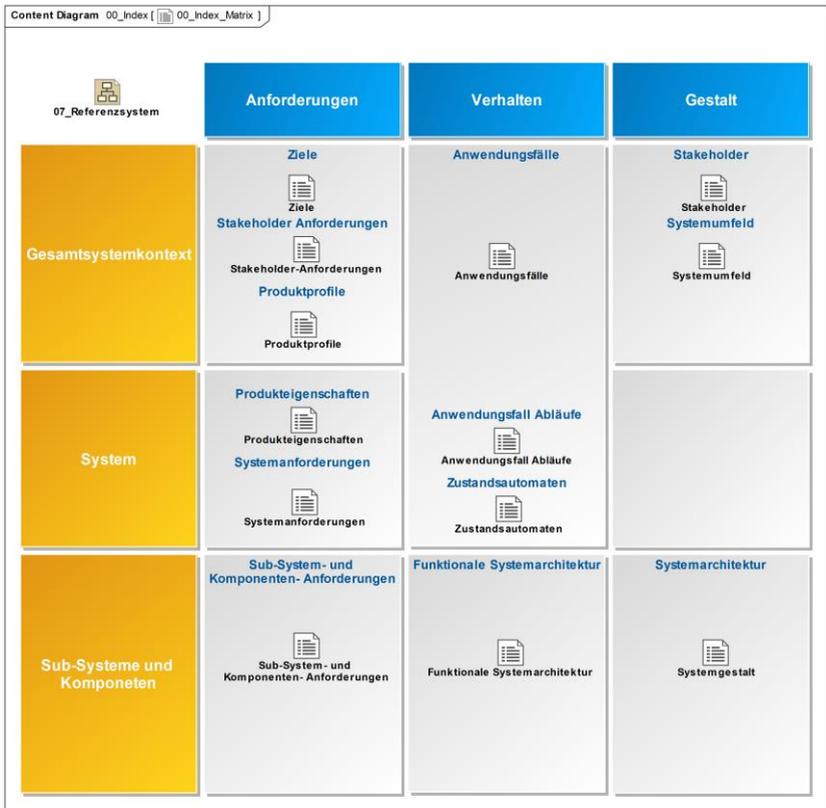


Abbildung 6.25: Architekturframework für IP 2019/2020

Im Gegensatz zum SysKIT-Schulungsansatz (siehe Matthiesen et al., 2014 und Absatz 2.8.3) soll damit ein Anlegen zusätzlicher Diagramme und Ordner überflüssig gemacht werden. Das Architekturframework enthält Viewpoints zur Modellierung des Produkts als Bestandteil der zu entwickelnden MBSE-Methodik. Zudem werden zusätzliche Viewpoints, zur Unterstützung weiterer in IP 2019/2020 untersuchter Methoden mit Hilfe eines zentralen Systemmodells integriert.

Die weißen Rechtecke in Abbildung 6.25 (z.B. „Systemanforderungen“) repräsentieren jeweils einzelne Viewpoints, bestehend aus einem oder mehreren Diagrammen. Die Views sind in einer zweidimensionalen Matrix, die sich an dem SPES-Framework (siehe Absatz 2.6.2) orientiert angeordnet. Die Zeilen gliedern

das Architekturframework in verschiedene Systemhierarchieebenen: Vom System im Kontext beziehungsweise Interaktion mit weiteren Systemen und Akteuren außerhalb der Systemgrenze, über das Gesamtsystem hin zu Sub-Systemen und Komponenten. Die Spalten unterteilen sich in die Perspektiven „Anforderungen“, „Verhalten-/bzw. Funktion“ und „Gestalt-/Umsetzung“. Letztere wurde dabei aus Gründen der Vereinfachung als Integration der logischen- und physischen Systemarchitektur genommen. Dies ist nach Weilkens eine häufig anzutreffende Integration in der Anwendung von MBSE (Weilkens, 2014, S. 173). Im Folgenden werden die Inhalte der Viewpoints und den daraus abgeleiteten Views in den einzelnen Perspektiven kurz zusammengefasst.

Perspektive „Anforderungen“

Die Viewpoints der Perspektive Anforderungen auf der Ebene „Gesamtsystemkontext“ sind „Ziele“, „Stakeholder-Anforderungen“ und „(alternative) Produktprofile“. Der Viewpoint „Ziele“ dient zur Modellierung von Zielen an das Produkt und stellt eine Schnittstelle zur ebenfalls in IP untersuchten Methode zur Zielsystemmodellierung nach Richter et al. dar (Richter, Felber, Troester, Albers & Behdian, 2020). Im Viewpoint „Stakeholder-Anforderungen“ werden übergeordnete Anforderungen aus Stakeholder-Sicht modelliert. Während der Untersuchungen in IP 2019/2020 wurde, zusätzlich zu den in der Ontologie für die entwickelte MBSE-Methodik (siehe Absatz 6.1) definierten Klassen, „Stakeholder-Anforderungen“ als weitere Klasse zwischen „Zielen“ und „Systemanforderungen“ verwendet. Wie in Absatz 6.1 beschrieben, bezeichnet der englische Begriff „Stakeholder-Requirements“ oftmals eine Mischform aus Zielen und Anforderungen. Um diese Unterscheidung explizit zu machen, erfolgte die Aufnahme der Klasse „Stakeholder-Anforderungen“. Zur Konsolidierung der Klassen wird für die in dieser Arbeit entwickelte Ontologie jedoch die Klasse „Stakeholder-Anforderungen“ nicht explizit aufgenommen, um zu vermeiden, dass zu viele Klassen bei der Modellierung zu Unklarheiten und Missverständnissen führen. Stattdessen werden, je nach Verbindlichkeit und Abstraktionsgrad des zu beschreibenden Artefakts, „Ziele“ oder, nach einer Konkretisierung, „Systemanforderungen“ zur Modellierung verwendet.

Der Viewpoint „Produktprofile“ dient zur Modellierung der Product-Claims aus den extern ausgefüllten Produktprofil-Templates (siehe Absatz 2.1.2), um diese für Nachvollziehbarkeits-Analysen im Modell verfügbar zu machen.

Auf der Abstraktionsebene des Systems werden die Viewpoints „Produkteigenschaften“ und „Systemanforderungen“ beschrieben. Der Viewpoint Produkteigenschaften bildet die Eigenschaftsprofil nach Hirschter et al. (2018) ab

und dient damit als Schnittstelle zu dieser ebenfalls in IP 2019/2020 untersuchten Methode zur Unterstützung der Produktspezifikation. Der Viewpoint Systemanforderungen dient zur Modellierung dieser.

Der Viewpoint „Sub-System- und Komponenten-Anforderungen“ entspricht dem Viewpoint Systemanforderungen auf der Abstraktionsebene des Systems und ist analog für tiefere Abstraktionsebenen aufgebaut.

Perspektive „Verhalten/Funktion“

Die Perspektive Verhalten/Funktion beschreibt vier Viewpoints über die Abstraktionsebenen Gesamtsystemkontext und System gemeinsam. Im Viewpoint „Anwendungsfälle“ werden die Anwendungsfälle der Stakeholder, aber auch Misuse-Fälle des Systems modelliert. Der Viewpoint „Anwendungsfall Abläufe“ dient zur Modellierung der Abläufe einzelner Anwendungsfälle in Form von Aktivitätsdiagrammen. Der Viewpoint „Zustandsautomaten“ wird zur Modellierung von Zuständen des Systems genutzt. Auf Sub-System- und Komponenten-Ebene dient der Viewpoint „Funktionale Systemarchitektur“ zum Aufbau eben jener.

Perspektive „Gestalt“

Der Viewpoint „Stakeholder“ auf Abstraktionsebene des Gesamtsystemkontext wird zur Modellierung und Detaillierung aller Stakeholder des zu entwickelnden Systems genutzt. Im Viewpoint „Systemumfeld“ werden die Interaktionen des Systems mit Stakeholdern und Kontextsystemen an der Systemgrenze beschrieben. Die logische beziehungsweise physische Architektur des Systems wird im Viewpoint „Systemgestalt“ modelliert.

Referenzsystem

Neben dem Architekturframework steht zudem noch ein Link zu einem Viewpoint, welcher der Beschreibung von Referenzsystemelementen dient (siehe links oben in Abbildung 6.25). Referenzsystemelemente werden genutzt, um Variationsarten einzelner modellierter Elemente in Bezug auf Referenzsystemelemente abzubilden. Die Modellierung von Referenzsystemelementen und deren Verknüpfung zu modellierten Elementen einer Produktgeneration stand für IP 2019/2020 noch nicht im Fokus und ist Gegenstand aktueller Forschung (siehe Absatz 11.3).

Die Darstellungen der einzelnen Views dienen zunächst zur Navigation zu Diagrammen, die Inhalte des Views und das Vorgehen zur Modellierung detailliert beschreiben. Ein solches Diagramm für den View Systemanforderungen ist in Abbildung 6.26 dargestellt.

Das Diagramm besteht aus 4 Kernbestandteilen:

- Links zu allen Diagrammen, die zur Modellierung des Views verwendet werden (linke Seite in Abbildung 6.26)
- Links zu Ordnern der Modellstruktur, in denen die (bereits modellierten) Elemente für den entsprechenden View im Modellbaum hinterlegt sind (rechts oben, „04_Systemanforderungen“ in Abbildung 6.26). Hiermit soll das schnelle und gezielte Auffinden bereits modellierter Informationen zur Nutzung in unterschiedlichen Diagrammen unterstützt werden.
- Eine Zusammenfassung zu Inhalten und Modellierungsvorgehen für den View (rechts in der Mitte in Abbildung 6.26). Diese Zusammenfassung fasst die Inhalte eines begleitenden Schulungsdokuments zusammen
- Links zum Rücksprung auf das Architekturframework (rechts unten in Abbildung 6.26)

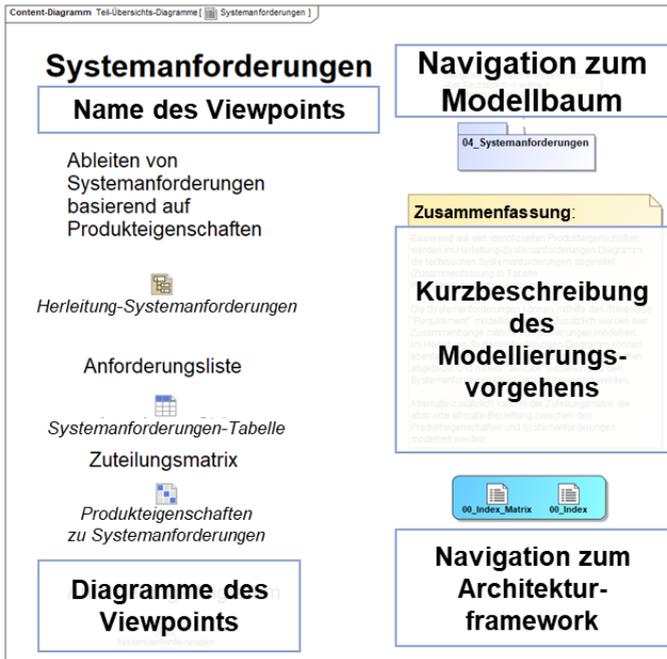


Abbildung 6.26: Inhalt eines einzelnen Views im Architekturframework

Neben dem Architekturframework, wurde zudem eine Navigationsansicht, ähnlich der Ansicht des SysKIT-Schulungsansatzes (Matthiesen et al., 2014) in das Modell-Template integriert (Abbildung 6.27). Diese stellt die einzelnen Schritte der genutzten Modellierungsmethode dar. Analog zum SysKIT-Schulungsansatz sind jedoch auch diese Modellierungsschritte nicht als sequentielle Abfolge zu verstehen, sondern sollen, je nach Bedarf, sprunghaft und iterativ ausgeführt werden. Die gleichen Views, die auch im Architekturframework verwendet werden, werden auch in der Navigationsansicht des Modellierungsvorgehens genutzt. Die Views sind dabei den entsprechenden Modellierungsschritten zugeordnet, bei denen sie verwendet werden.

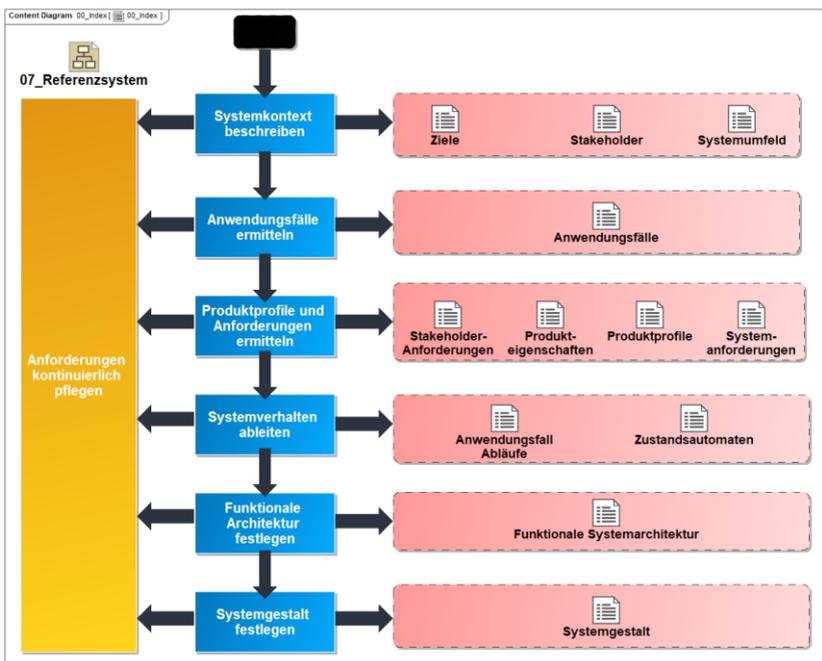


Abbildung 6.27: Navigationsansicht in Form eines vorgeschlagenen Modellierungsvorgehens als Startpunkt im Template für das Modellierungstool

Die Einführung und Untersuchung des Architekturframeworks erfolgten in IP 2019/2020 in mehreren Schritten. Diese Schritte werden im Rahmen des Studiendesigns im nächsten Absatz erläutert.

6.3.2 Studiendesign

In diesem Absatz wird das Studiendesign zur Untersuchung des Architekturframeworks hinsichtlich dessen Einfluss auf die Akzeptanz von MBSE-Ansätzen beschrieben. Hierzu werden zunächst Randbedingungen der Untersuchungsumgebung erläutert. Anschließend wird auf das Schulungskonzept von MBSE im Allgemeinen und dem entwickelten Architekturframework im Speziellen eingegangen. Schließlich wird die Durchführung der Untersuchung beschrieben.

Randbedingungen der Untersuchungsumgebung

Das Live-Lab IP 2019/2020, in welchem die in diesem Absatz beschriebene Untersuchung stattfand, wurde zusammen mit dem Industriepartner Robert Bosch GmbH (im Folgenden Bosch) durchgeführt. Die Aufgabestellung des Projekts lautete:

„Zukünftige Mobilität für Personen und Güter auf städtischen Straßen: Anforderungen und Lösungen für ein flexibles, modulares und skalierbares Fahrzeug- und Transport-Konzept.“

Im Live-Lab IP 2019/2020 hatte jeweils ein Mitglied pro Team die Rolle eines Systemingenieurs/ einer Systemingenieurin inne. Zu den Aufgaben des Systemingenieurs/der Systemingenieurin gehörte insbesondere auch die Erstellung und Pflege eines MBSE-Systemmodells. Diese sieben Systemingenieure/Systemingenieurinnen waren daher im Fokus der in diesem Absatz beschriebenen Untersuchung. Der Zugang zur Nutzung der Modelle war jedoch für alle Teammitglieder möglich.

Die Studierenden kamen überwiegend aus den Studiengängen Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen. Es waren bei den Studierenden keine oder maximal sehr wenig Vorerfahrungen mit MBSE vorhanden.

Bosch als Projektpartner im IP Jahrgang 2019/2020 nutzt bereits etablierte Modellierungsmethoden und ein Architekturframework (Johannaber, Schwartzkopff, Schulmeister & Boumans, 2021). Diese basieren auf der SPES-Methodik (siehe Absatz 2.6.2). Zur Modellierung wird auf SysML zurückgegriffen. Die Modellierung mit SysML und eine Nähe zur SPES-Methodik waren somit Randbedingungen für das entwickelte Architekturframework für IP 2019/2020. Zudem wurde die Modellierungssoftware Cameo Systems Modeler von Dassault Systèmes/NoMagic als Modellierungsumgebung vorgegeben (Dassault Systèmes, 2022, 18. März). Da

sich die Aufgabenstellung in IP jedoch jedes Jahr ändert, wurden die SysML-Modelle von den Systemingenieuren/Systemingenieurinnen von Grund auf neu erstellt.

Eine weitere Randbedingung der durchgängigen Nutzung von MBSE in IP 2019/2020 bestand darin, Untersuchungen zu weiteren Entwicklungsmethoden durch die Nutzung der erstellten MBSE-Modelle zu unterstützen. Somit konnte die Durchführung verschiedener Entwicklungsmethoden konsistent über die MBSE-Systemmodelle verknüpft werden und nicht losgelöst voneinander geschehen. Dies bedeute eine Anpassung der entwickelten MBSE-Methodik, beispielsweise in Form der Definition zusätzlicher Ontologie-Elemente oder Einführung zusätzlicher Viewpoints/Views im Architekturframework als „Schnittstelle“ zu weiteren Methoden. Hiermit kann einerseits das Potenzial der MBSE-Methodik zur Integration verschiedener Methoden gehoben und untersucht werden. Andererseits gilt es bei der Auswertung der Untersuchung jedoch genau zu analysieren, worauf sich Aussagen der Studienteilnehmer beziehen (bspw. eine der Teilmethoden oder den Aufbau des Architekturframeworks). Die weiteren Methoden betrafen im Speziellen die Modellierung des Zielsystems nach Richter et al. (2020) sowie zur Produktspezifikation nach Hirschter et al. (2018). Für Details zu den weiteren Methoden sei an dieser Stelle auf die entsprechenden Veröffentlichungen verwiesen.

Schulungsziel und Schulungskonzept

Ein zentraler Aspekt bei der Entwicklung, Nutzung und Untersuchung des Architekturframeworks kommt dem Schulungs- beziehungsweise Einführungskonzept zu. Zur Schulung von MBSE mit SysML wurde am IPEK der SysKIT-Schulungsansatz entwickelt (siehe Matthiesen et al., 2014 und Absatz 2.8.3). Dieser bildete eine zentrale Grundlage für die Schulung und Einführung von MBSE in IP 2019/2020. Insbesondere aufgrund der kurzen Schulungszeiträume und der angestrebten Nutzung eines Architekturframeworks, ist der SysKIT-Schulungsansatz jedoch nicht ohne weiteres auf die Untersuchungen in IP 2019/2020 anwendbar. Dennoch sollten die Beobachtungen und Herausforderungen, die zur Schulung von MBSE für die Entwicklung des SysKIT-Schulungsansatzes gemacht wurden, berücksichtigt werden.

Zentral ist jedoch, dass die Schulung und Einführung von MBSE in IP ein anderes Ziel als der SysKIT-Schulungsansatz verfolgten: Für die Schulung in IP stand weniger das detaillierte Vermitteln der Modellierung mit SysML im Vordergrund. Vielmehr sollten die Studierenden in kurzer Zeit dazu befähigt werden, integrierte

und vernetzte MBSE-Systemmodelle ihrer Produkte gemäß einer vorgegebenen MBSE-Methodik zu erstellen.

Zur Schulung wurde eine einstündige Einführungsvorlesung in das Thema MBSE sowie ein eineinhalb stündiger Workshop zur Modellierung gehalten. Weiterhin wurde die Modellierung durch regelmäßige Rücksprache und Fragestunden mit den Systemingenieuren/Systemingenieurinnen begleitet

Zusätzlich wurde den Studierenden neben dem Tool-Template des Architekturframeworks ein speziell entwickeltes Schulungshandbuch mitgegeben, in dem Ziel und Zweck jedes Viewpoints, die verwendeten Diagramme sowie die Vorgehensweise bei der Befüllung des Views erläutert werden. Zudem wurden beispielhafte Diagramme für jeden View, anhand eines durchgängigen, simplen Beispiels in das Schulungshandbuch integriert.

Durchführung der Untersuchungen

Über die gesamte Projektlaufzeit wurden regelmäßige Rücksprachen mit den Systemingenieuren/Systemingenieurinnen und weiteren Modell-Verantwortlichen der einzelnen Teams durchgeführt. Dies geschah konkret an den einzelnen Systemmodellen, so dass auf konkrete Fragestellungen und Probleme bei der Modellierung eingegangen werden konnte. Die Analyse zur Nutzung und Potenzialen des Architekturframeworks basiert einerseits auf Erkenntnissen und Mitschriften aus diesen Gesprächen. Zusätzlich wurde zum Ende des Live-Labs IP eine Online-Umfrage zur Nutzung des Architekturframeworks und der Modellierung durchgeführt. Diese adressierte insbesondere die Systemingenieure/Systemingenieurinnen, konnte aber auch von weiteren Teammitgliedern ausgefüllt werden.

Die Umfrage wurde an alle 33 Teilnehmenden des Jahrgangs verteilt. Die Umfrage wurde insgesamt 44-mal mindestens teilweise ausgefüllt (stellenweise doppelter Beginn der Umfrage). Im Fokus der Auswertung stehen 14 komplett ausgefüllte Umfragen. Alle Fragen der Umfrage sind in Anhang E aufgeführt. Die Ergebnisse der Umfrage sind dabei als qualitativ zu betrachten. Für den Rahmen der durchgeführten Studie wird nicht der Anspruch einer vollständigen, quantitativen Evaluation erhoben. Nichtsdestotrotz lassen sich aus den Ergebnissen der Umfrage und der durchgeführten Studie starke Signale hinsichtlich des beschriebenen Untersuchungsziels ableiten.

6.3.3 Ergebnisse der Untersuchung

Die übergreifende Frage, ob die Bedeutung von MBSE für die Produktentwicklung erkannt wird, wurde auf einer Skala von 1 (überhaupt nicht) bis 5 (deutlich) überwiegend positiv beantwortet (siehe Abbildung 6.28).

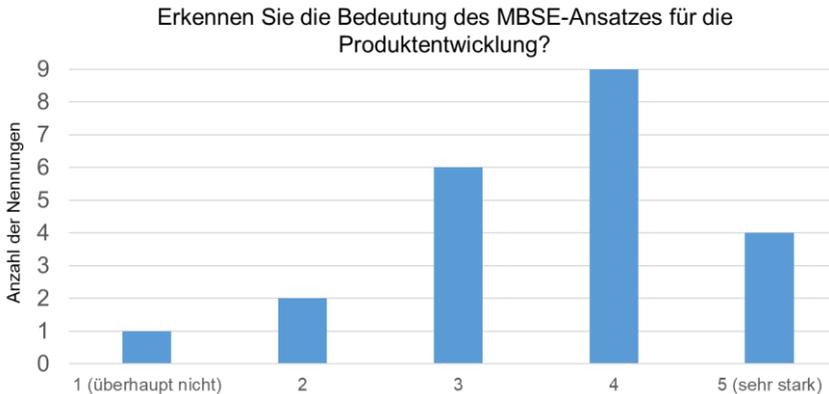


Abbildung 6.28: Umfrage in IP 2019/2020. Frage: „Erkennen Sie die Bedeutung des MBSE-Ansatzes für die Produktentwicklung?“ (22 Antworten)

Für eine detaillierte Analyse der Umfrageergebnisse, werden diese anhand verschiedener Fragekategorien genauer beleuchtet.

Empfundene Aufgabe/Zweck der Modellierung

Um tiefer in die Analyse einzusteigen wurde zudem nach der empfundenen Aufgabe und Zweck der Modellierung gefragt. Als potenzielle Antwortmöglichkeiten wurden „Nachdokumentation des Entwicklungsprozesses“, „hilfreiches Entwicklungswerkzeug, um zielsicher voranzukommen“ und „hilfreiches Entwicklungswerkzeug, um schneller voranzukommen“ vorgegeben. Zudem konnten die Umfrageteilnehmer in einem Kommentarfeld per Freitext zusätzliche Antworten eintragen. Als Antwort wurde insbesondere die Aufgabe zur Nachdokumentation des Entwicklungsprozesses und die Unterstützung zum zielsicheren Vorankommen im Entwicklungsprozess genannt. Die Unterstützung für ein schnelleres Vorankommen im Entwicklungsprozess wurde hingegen nicht genannt. Als zusätzlicher Kommentar wurde zudem noch genannt: *[Die Modellierung empfinde ich eher als] „hilfreiches Entwicklungswerkzeug, um Sub-Systeme sowie Funktionen zu ordnen“*

Nach Interpretation des Autors liegt insbesondere die Nennung der Nachdokumentation in dem Format von IP begründet. In jeder Phase des Projekts generieren die Teams eine Vielzahl alternativer Lösungen für Profile, Systemkonzepte etc. Das weiter zu verfolgende Lösungskonzept wird jeweils an einem Meilenstein ausgewählt. Insofern ist es nicht sinnvoll, alle alternativen Lösungskonzepte zu modellieren.

Mehrwert durch das Architekturframework

Eine zentrale Frage war, ob das bereitgestellte Architekturframework, in Form der Matrix (siehe Abbildung 6.25) und der Ablaufbeschreibung mit Views (Abbildung 6.27), beim Verständnis des Modellierungsansatzes helfen. Wie in Abbildung 6.29 zu sehen, wurde diese Frage ausschließlich positiv bzw. neutral beantwortet.

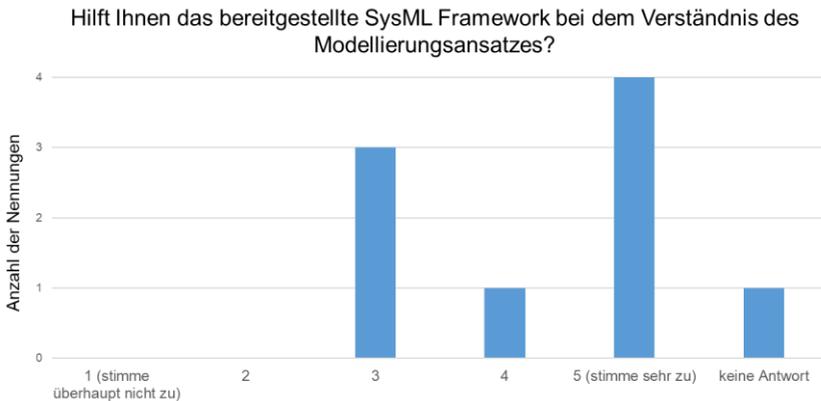


Abbildung 6.29: Umfrage in IP 2019/2020. Frage: „Hilft Ihnen das bereitgestellte SysML Framework bei dem Verständnis des Modellierungsansatzes?“ (8 Antworten)

Zur beschriebenen Frage wurden zudem noch drei Kommentare gegeben:

Kommentar 1: „Für mich war es sehr verständlich. Für andere Teammitglieder, die nicht so regelmäßig mit Cameo gearbeitet haben, war es nicht so verständlich.“

Dieser Kommentar wurde von einem Systemingenieur hinterlassen. Der Kommentar deutet darauf hin, dass das erstellte Modell nicht regelmäßig/konsequent als Wissensbasis für Aufgaben im Team herangezogen und hauptsächlich von den Systemingenieuren/Systemingenieurinnen der Teams erstellt und bearbeitet wurde.

Diese Interpretation wird durch einen zweiten Kommentar, hier nicht von einem Systemingenieur/Systemingenieurin, unterstützt:

Kommentar 2: „Problem in unserer Gruppe war, dass sich hauptsächlich der Systemingenieur um Cameo [Anmerkung des Autors: das genutzte Modellierungs-Software-Tool] gekümmert hat. Wir anderen aber kaum Informationen darüber bekommen haben und dadurch selten die in Cameo generierten Informationen genutzt haben“

Diese Kommentare passen zudem zu der oben beschriebenen Aussage, dass die Modellierung als Nachdokumentation des Entwicklungsprozesses wahrgenommen wurde. Der dritte Kommentar lautete:

Kommentar 3: „Strukturierter Aufbau entlang der Phasen ist sehr gut“

Die Ergebnisse der Umfrage und der Kommentare lassen auf das generelle Potenzial der Nutzung des Architekturframeworks zur Steigerung der individuellen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen schließen. Insbesondere Kommentar 3 lässt sich jedoch dahingehend interpretieren, dass die Person sich auf die Navigationsansicht in Form eines vorgeschlagenen Modellierungsvorgehens/Modellierungsmethode als Startpunkt im Modell-Template bezieht (Abbildung 6.27). Antworten und Kommentare zur Darstellungsform des Architekturframeworks (als Matrix und als Ablaufdiagramm) werden daher im Folgenden beschrieben.

Matrix und Ablaufdiagramm als Darstellungsform des Architekturframeworks

In der Umfrage wurde ebenfalls die Nutzung der zwei Navigationssichten, als vorgeschlagenes Ablaufdiagramm des Modellierungsvorgehen (Abbildung 6.27) und als Matrix-Darstellung des Architekturframeworks (Abbildung 6.25), abgefragt. Dabei wurde einerseits abgefragt, welche Navigationssicht die Teilnehmenden überwiegend zur Modellierung genutzt haben. Andererseits wurde abgefragt, welche Darstellung hauptsächlich zum Verständnis der vermittelten Modellierungsmethode beigetragen habe. Die Ergebnisse der beiden Fragen sind in Abbildung 6.30 zu sehen. Die Antworten zeigen beide Male eine klare Auswahl der Darstellung als Ablaufdiagramm.

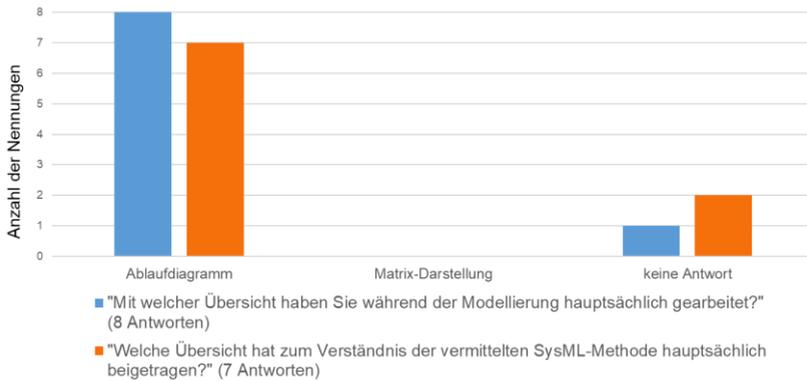


Abbildung 6.30: Umfrage in IP 2019/2020. Frage nach der Nutzung der Architekturframeworks bzw. Navigationsansichten im Template für das Modellierungstool

Hilfreiche/ weniger hilfreiche Views

Bei detaillierter Nachfrage nach einzelnen Views, die als besonders hilfreich angesehen werden, wurden vor allem die Modellierung von Stakeholder-Anforderungen, Systemanforderungen und Produkteigenschaften genannt. Etwas weniger hilfreich, aber dennoch überwiegend hilfreich wurde die Modellierung des Systemkontexts/Systemumfelds, von Anwendungsfällen und Funktionen bewertet. Als eher wenig hilfreich wurde die zusätzliche separate Modellierung des Produktprofil-Claims (als zusätzliches Element zu Anwendungsfällen, Zielen etc.), von Zuständen und der Systemgestalt bewertet.

Es zeigt sich damit, dass insbesondere Views zu Informationen des Produktprofils und des Anforderungsmanagements als hilfreich bewertet wurden. Nach Interpretation des Autors kann auch dies mit dem Format von IP begründet werden. Ein signifikanter Teil des Live-Labs IP liegt im Analysieren der Problemsituation und methodischen Entwickeln geeigneter Produktprofile und Produktkonzepte. Die Ausgestaltung der Produktkonzepte erfolgt hauptsächlich durch den Bau von Prototypen. Die detaillierte Ausgestaltung des Systems und die Weiterverwendung der modellierten Informationen stehen weniger im Fokus. Dies könnte ein Faktor sein, warum die eher lösungsnahen Modellierungen von Systemgestalt und Zuständen als weniger hilfreich angesehen wurden. Eine Ausnahme bildet die explizite Modellierung des Produktprofil-Claims. Dies kann nach Ansicht des Autors jedoch darin begründet liegen, dass die Modellierung des Produktprofil-Claims im Architekturframework wenig zusätzliche Informationen enthält und eher als eine

„Hülle“ im Modell ist. Die Informationen des Produktprofils werden in weiteren Views (z.B. zur Stakeholder-Anforderungs-Modellierung) modelliert.

Einsatz des Modells zu Kommunikationszwecken

Ein weniger positives Bild ergibt sich bei der Frage des Einsatzes des Modells für die Kommunikation im Team und „nach außen“, im Rahmen von IP, insbesondere mit dem Projektpartner Bosch. Nur 4 von 20 Umfrageteilnehmenden, die die Frage beantwortet haben, gaben an, dass das erstellte Modell zur Kommunikation mit weiteren Teammitgliedern und Projektpartnern genutzt wurde. Ein ähnliches, wenn auch nicht ganz so negatives Bild, ergibt sich bei der Frage, ob das Modell zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen innerhalb des Teams eingesetzt wurde. Hier gaben 10 von 14 Ausfüllenden der Frage an, dass das Modell sehr selten oder überhaupt nicht zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen eingesetzt wurde. In zusätzlichen Kommentaren lassen sich verschiedene Gründe dafür identifizieren. Zum einen wurde wiederum der schon besprochene Charakter der „Nachdokumentation“ von Informationen im Modell genannt. Kommentare hierzu lauteten:

Kommentar 4: „Es war nicht möglich, das Modell VOR den Gesprächen mit Experten zu haben. Da wir erst danach die weiteren Informationen für das Model hatten. Darüber hinaus ist das Modell auch ein bisschen zu unhandlich um es schnell jemand zu zeigen, der es noch nie verwendet hat.“

Kommentar 5 (Systemingenieur): „Da es Großteils zur Nachdokumentation verwendet wurde, der Teampate sich nicht so damit auskannte und eine übersichtliche Darstellung in Screenshots (da kein Zugang zum Modell möglich war) sehr schwer war.“

Die Zugänglichkeit beziehungsweise Verständlichkeit der Modellierung wurden zudem von weiteren Befragten kritisiert:

Kommentar 6: „Verständlichkeit der Diagramme, Gesprächsführung erscheint kompliziert“

Kommentar 7: „Eine andere Darstellung, bspw. in PowerPoint war greifbarer und für alle eher eine "Lingua Franca".“

Kommentar 8: „Als Außenstehender zu unübersichtlich“

Gleichzeitig wurde insbesondere der Aufwand zur Erstellung und Pflege der Modelle kritisiert:

Kommentar 9: „Unnötig viel Aufwand für so ein kleines Projekt“

Kommentar 10 (Systemingenieur): „Weil Erklärungen in normaler Sprache schneller verständlich sind. Weil der Informationsfluss durch die enge Zusammenarbeit in einem kleinen Team sowieso jederzeit ausreichend gegeben ist.“

Kommentar 11: „Wenig Akzeptanz für MBSE innerhalb des Teams“

Kommentar 12: „Es wurde nur als Last aufgenommen und hat uns inhaltlich nichts gebracht.“

Die Kommentare müssen wiederum in Bezug auf das Format des Live-Labs IP interpretiert werden. Die Teams in IP arbeiten über einen begrenzten Zeitraum und sehr eng zusammen. Auch ist die Komplexität der entwickelten Produkte durch den begrenzten Zeitraum, überschaubar. Hierfür sind sehr formalisierte Ansätze, z.B. auf Basis von SysML für die Systemmodellierung unter Umständen überdimensioniert (siehe auch Beschreibungen der Fallstudie in Absatz 5.3.1).

Herauszustellen ist zudem, dass nur wenige der aufgeführten kritischen Kommentare (Kommentar 5, Kommentar 10) von Systemingenieuren/Systemingenieurinnen abgegeben wurde. Eine Interpretation daraus ist, dass insbesondere der Zugang zu den modellierten Informationen für Außenstehende, stärker als für die Systemingenieure selbst, verbessert werden muss. Auch ein weiterer Kommentar eines Systemingenieurs stärkt diesen Eindruck:

Kommentar 13 (Systemingenieur): „Da Pate [Anm. des Autors: Teampate des Projektpartners Bosch] nicht so viel damit zu tun hatte.“

Auch der bereits beschriebene Kommentar, dass das Modell hauptsächlich von Systemingenieur/Systemingenieurinnen benutzt wurde und unter Umständen wenig in die Teams getragen wurde deutet darauf hin, insbesondere da sich in den bereits diskutierten Fragen und in der teilnehmenden Beobachtung kein ausschließlich negatives Bild der Nutzung von MBSE zeigte. Dies bestätigt sich auch durch zwei weitere Kommentare, die wiederum auf den speziellen Charakter des Einsatzes in IP hinweisen:

Kommentar 14: „Wenn man es konsequent eingesetzt hätte, wäre es vermutlich sinnvoll gewesen. Da es aber nur halbherzig gepflegt wurde, hat es effektiv nichts gebracht“

Kommentar 15: „Gutes Prinzip für größere Projekte, eher hinderlich bei IP“

6.3.4 Studienfazit

In diesem Absatz sollen die Ergebnisse der Umfrage nochmals konsolidiert interpretiert werden. Dies wird durch weitere Erkenntnisse aus der teilnehmenden Beobachtung und regelmäßigen Rücksprache mit den Studierenden über den Verlauf des Projekts ergänzt.

Die Trennung hinsichtlich Aussagen zum Einsatz von MBSE allgemein und Aussagen zum Einsatz des entwickelten Architekturframeworks ist in der Umfrage schwierig

Eine Erkenntnis bei der Analyse der Umfrageergebnisse ist, dass sich nicht immer klar differenzieren lässt, ob sich die getätigten Aussagen im Konkreten auf das Architekturframework beziehungsweise den Schulungsansatz beziehen oder allgemeiner Eindrücke und das Potenzial von MBSE betreffen. Die negativen Aussagen gehen eher übergreifend auf den Einsatz von MBSE ein und beschreiben dort ähnliche Probleme, wie sie sich auch in der Literatur bereits finden lassen (siehe Absatz 2.8.3). So wird oftmals beschrieben, dass das Potenzial von MBSE zwar gesehen wird, der Einsatz im Rahmen von IP jedoch überdimensioniert sei. Dies wird nach Meinung des Autors noch dadurch verstärkt, dass keine bestehenden Modelle zu Anfang des Projekts genutzt und dass die entstehenden Modelle nicht in weiteren IP-Jahrgängen wiederverwendet werden können, da sich jährlich die Aufgabenstellung und der Projektpartner ändern.

Es wird ein Potenzial in der Nutzung des Architekturframeworks gesehen

Die Antworten der Umfrageteilnehmenden deuten auf ein generelles Potenzial des Einsatzes von Architekturframeworks und Viewpoints zur Unterstützung des Verständnisses der eingesetzten MBSE-Methodik hin. Dies wird vom Autor als vielversprechender Indikator gesehen, dass die Nutzung eines Architekturframeworks das Potenzial hat, die individuelle Akzeptanz von MBSE-Ansätzen zu steigern. Dies wird dadurch unterstützt, dass trotz eines relativ geringen Schulungsumfangs in jedem Team formal korrekte Modelle über verschiedene Views erstellt wurden.

Aus Gründen der Fairness und Gleichberechtigung im Projekt, konnte jedoch keine Kontrollgruppe gebildet werden. Es war somit auch kein direkter Vergleich der Ergebnisse mit einer Kontrollgruppe möglich, da im Rahmen von IP 2019/2020 alle Teams mit den gleichen Voraussetzungen hinsichtlich der Schulung und des Templates für das Modellierungstool gestartet sind.

Die Kommunikation von Modellinhalten mit Teammitgliedern und Externen gestaltet sich stellenweise schwierig

Besonders aus den Kommentaren zur Umfrage lässt sich herauslesen, dass sich die Kommunikation von Inhalten der erstellten Modelle mit Teammitgliedern oder externen Partnern schwierig gestaltet. Zum einen kann dies, wie beschrieben, darin begründet liegen, dass das Modell zur Nachdokumentation statt als aktives Arbeitsdokument genutzt wurde. Zum anderen lässt sich für eine Erweiterung des Architekturframeworks jedoch die Anforderung ableiten, dass explizit die Nutzung der Modellinhalte für weitere Anwendungsfälle im Team unterstützt werden muss.

Systemhierarchieebenen im Architekturframework können sowohl Mehrwert schaffen, als auch zusätzliche Aufwände bei der Modellerstellung erzeugen

Einige Architekturframeworks, wie das SPES-Modellierungsframework, sehen explizit die Unterteilung in Systemhierarchieebenen als eine Achse des Architekturframeworks vor (siehe Absatz 2.6.2). Dies wurde, in vereinfachter Form, auch für das Architekturframework im Live-Lab IP 2019/2020 übernommen. Nach Erfahrungen des Autors der vorliegenden Dissertation kann dies durchaus zu einer klaren Strukturierung der Modelle beitragen. In IP sind die entwickelten Produkte jedoch sehr unterschiedlich und es existiert kein festgelegtes Modell für System-Hierarchieebenen. Hierdurch kann es zu Diskussionen kommen, auf welcher Hierarchieebene ein bestimmtes System oder eine bestimmte Funktion zu modellieren ist. Dies lenkt jedoch von den eigentlichen Zielen der Modellerstellung ab. Eine Erkenntnis des Autors ist daher, die klare Vorgabe der Modellierung nach Hierarchieebenen nur zusammen mit einem etablierten Systemebenen-Konzept einzuführen.

Anwendende im Live-Lab IP 2019/2020 bevorzugen eindeutig die sequentielle Darstellung des Modellierungsvorgehens anstatt der Matrix-Darstellung des Architekturframeworks als zentrale Sicht

Eine zentrale Erkenntnis war die sehr eindeutige Tendenz zur Nutzung des schematischen Modellierungsvorgehens in Form eines Ablaufdiagramms statt der Matrix-Darstellung des Architekturframeworks als Navigationsansicht im Template für das Modellierungstool. Einerseits scheint somit die eher Fluss-orientierte

Darstellung der Modellierungsschritte eingängiger für die Anwendenden zu sein. Andererseits wird mit der Darstellung ein eher „Wasserfall-artiges“ Modellierungsvorgehen suggeriert. Das Springen und iterative Durchführen von Modellierungsaktivitäten wird durch diese Darstellung nach Ansicht des Autors nicht zielgerichtet adressiert. Eine Schlussfolgerung hieraus ist, dass sich die statische Sicht der Matrix des Architekturframeworks und eine Fluss-basierte Sicht von Modellierungsaktivitäten noch stärker integrieren lassen müssen.

6.4 Zwischenfazit

In diesem Kapitel werden initiale Lösungen zu den in Absatz 3.3 formulierten Forschungsfragen beschrieben. Zur Beantwortung von Forschungsfrage 1 wird eine Ontologie entworfen, die als Grundlage für eine Modellierungssprache dient (Absatz 6.1). Die Modellierungssprache berücksichtigt explizit Elemente zur Modellierung des Validierungssystems (bspw. <<Validierungsbedarfe>> oder <<Testergebnisse>>) und erweitert damit den Stand der Forschung. In Absatz 6.2 wird die entwickelte Modellierungsmethode zur Unterstützung der Durchgängigkeit, Kontinuität und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess zur Beantwortung von Forschungsfrage 2 vorgestellt. Die Modellierungsmethode nutzt dabei die entwickelte Modellierungssprache. Eine initiale Anwendung der Modellierungsmethode anhand eines Leitbeispiels zeigt deren Potenzial zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess. Parallel zur Entwicklung der Modellierungssprache und Modellierungsmethode wird das Potenzial des Einsatzes eines entwickelten Architekturframeworks zur Unterstützung der individuellen und organisatorischen Akzeptanz der MBSE-Methodik analysiert und damit Forschungsfrage 3 adressiert (Absatz 6.3). Die Analyse des Einsatzes des Architekturframeworks im Live-Lab IP 2019/2020 zeigt das Potenzial, deckt jedoch auch Ansatzpunkte zur Verbesserung der Umsetzung und Operationalisierung der MBSE-Methodik auf. Insbesondere gilt es Lösungen für die Kombination von strukturierendem Architekturframework und niederschweligen Ablaufbeschreibungen von Modellierungsaktivitäten zu entwickeln.

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Kapitels zur Weiterentwicklung der integrierten MBSE-Methodik zusammengeführt. Neben den Erkenntnissen der Untersuchungen in diesem Kapitel, wird zudem nochmal ein Fokus auf die Berücksichtigung der in Absatz 5.3 herausgearbeiteten Handlungsfelder zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz bei der Umsetzung und Tool-Implementierung der MBSE-Methodik gelegt.

7 Weiterentwicklung der ganzheitlichen MBSE-Methodik

In diesem Kapitel werden die im letzten Kapitel beschriebenen Erkenntnisse aufgegriffen und zur Weiterentwicklung der ganzheitlichen MBSE-Methodik genutzt. Hierzu wird die Integration und Weiterentwicklung von Ontologie beziehungsweise Modellierungssprache (Absatz 6.1), Modellierungsmethode (Absatz 6.2) und Architekturframework (Absatz 6.3) beschrieben (Absatz 7.1).

Basierend auf den Studienergebnissen zum Einsatz des Architekturframeworks im Live-Lab IP 2019/2020, wird ein weiterentwickeltes Konzept zum Zusammenspiel zwischen Architekturframework und Modellierungsaktivitäten, basierend auf Modellierungssprache und Modellierungsmethode, vorgestellt (Absatz 7.2). In Absatz 7.3 wird die Tool-Implementierung der erweiterten MBSE-Methodik vorgestellt. In Absatz 7.4 wird ein Zwischenfazit zur Weiterentwicklung der MBSE-Methodik gezogen und diese dem ermittelten Forschungsbedarf (Kapitel 3) gegenübergestellt.

7.1 Zusammenspiel von Modellierungssprache, Modellierungsmethode und Architekturframework

Grundlage für die ganzheitliche MBSE-Methodik bildet die in Absatz 6.1 beschriebene Ontologie/Modellierungssprache. Die Viewpoints für das entwickelte Architekturframework geben jeweils einen Ausschnitt dieser Ontologie wieder. Das in Absatz 6.3 vorgestellte Architekturframework ordnet die Viewpoints zur Beschreibung des Produkts dabei über zwei Dimensionen in die Perspektiven „Anforderungen-Funktionen-Gestalt“ und „Systemhierarchieebene“. Durch Arbeiten im Projekt MoSyS (siehe Forschungsumgebung in Absatz 4.2) wird die erste Dimension weiter ausdetailliert. Angepasst an die Beschreibungen bestehender MBSE-Ansätze, wird die Perspektive „Gestalt“ in die Perspektiven „logische Architektur“ und „physische Architektur“ aufgeteilt (vgl. Absatz 2.5.1). Zudem wird die neue Perspektive „Produktprofil/Problemraum“ eingeführt. Hier werden die Viewpoints zur Modellierung von Informationen aus dem Produktprofil, insbesondere der Stakeholder des Systems, des Systemkontexts, der Anwendungsfälle und der entwickelten Ziele und Randbedingungen verortet. Die fünf Perspektiven „Problemraum/Produktprofil“-„Systemanforderungen“-

„Funktionen“-„logische Architektur“-„physische Architektur“, (abgekürzt PSRFLP) bilden die vertikale Achse des Architekturframeworks.

Basierend auf Beobachtungen zur Einführung des Architekturframeworks im Live-Lab IP 2019/2020 (siehe Absatz 6.3) werden für das weiterentwickelte Architekturframework Systemhierarchieebenen nicht mehr explizit abgebildet. Vielmehr wird ein modularer Ansatz angestrebt. Erreichen einzelne Sub-Systeme in der Modellierung eine Komplexität, die detaillierte Modellierungen notwendig macht, wird für diese Sub-Systeme ein eigenes Modell angelegt und in das übergeordnete Systemmodell integriert. So können einerseits sehr detaillierte Modelle von Teilsystemen erstellt werden. Andererseits geht hierdurch die Übersicht in einem übergeordneten Systemmodell nicht durch die Abbildung zu vieler Elemente verloren¹⁵.

Die horizontale Achse des erweiterten Architekturframeworks wird in Anlehnung an das SPES XT-Framework (siehe Absatz 2.6.2) durch weitere, orthogonale Perspektiven zur Modellierung des Systems ergänzt. Hier findet sich vor allem eine Perspektive zur Modellierung der Nachvollziehbarkeit/Traceability über alle Perspektiven der vertikalen Achse (PSRFLP) hinweg, beispielsweise zur Verknüpfung von Systemanforderungen und an deren Erfüllung beteiligten Elementen der logischen Systemarchitektur. Die Darstellung der Perspektive Nachvollziehbarkeit ist angelehnt an das „House of Quality“ aus dem Quality Function Deployment (QFD), um die zu vernetzenden Perspektiven auf der x-Achse leichter auffinden zu können¹⁶. Die Darstellung weiterer übergreifender Perspektiven, wie beispielsweise zur Modellierung sicherheitsrelevanter Aspekte wie im MagicGrid Framework (siehe Absatz 2.6.2), können in zukünftigen Arbeiten eingeführt werden.

Das erweiterte Architekturframework zur Modellierung einer Produktgeneration gemäß der entwickelten MBSE-Methodik ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

¹⁵ Als Richtwert gelten in der Forschung zu Komplexitätsmanagement sieben plus/minus zwei Elemente in einer Ansicht als überschaubar, siehe de Weck (2021).

¹⁶ Darstellung entwickelt nach Forschungsgespräch (2022). Teilnehmende: Martin, Alex; Mandel, Constantin

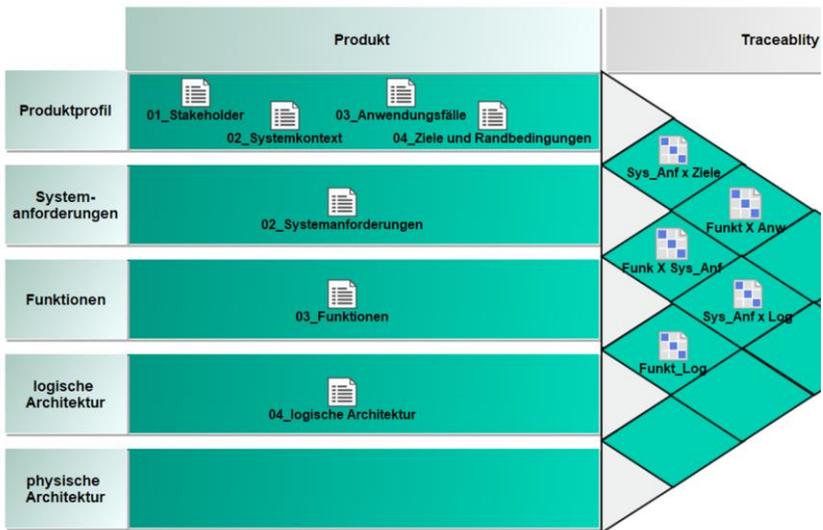


Abbildung 7.1: Erweitertes Architekturframework für die MBSE-Methodik (Sicht Produktgeneration, Ausschnitt)

Zur Integration von Viewpoints zur Beschreibung des Validierungssystems wird, angelehnt an die Darstellung des iPeM (siehe Absatz 2.2.2), das Architekturframeworks in die dritte Dimension erweitert. Die Matrix-Darstellung zur Modellierung des Validierungssystems orientiert sich dabei an der Darstellung für die Produktgeneration. Übertragen in die Beschreibung des Validierungssystems ergeben sich daraus folgende Perspektiven zur Modellierung auf der vertikalen Achse:

- Validierungsbedarfe – in Bezug auf modellierte Informationen aus dem Produktprofil
- Validierungsziele und Testfälle – zur Untersuchung und Begegnung der Validierungsbedarfe
- Testabläufe – als Bestandteile der Testfälle zur Beschreibung und Modellierung von deren Ablauf
- Test-/Validierungskonfigurationen – zur Modellierung der Systeme und Modelle der Test-/Validierungskonfigurationen zu einem Testfall
- Testergebnisse – zur Rückführung der Ergebnisse aus der Durchführung der Testfälle und Nutzung der Nachvollziehbarkeit im Modell, um deren Auswirkungen einschätzen und Maßnahmen zur Konkretisierung und Erweiterung des Zielsystems ableiten zu können

Die Matrix-Darstellung des Layer zur Modellierung des Validierungssystems ist in Abbildung 7.2 dargestellt.

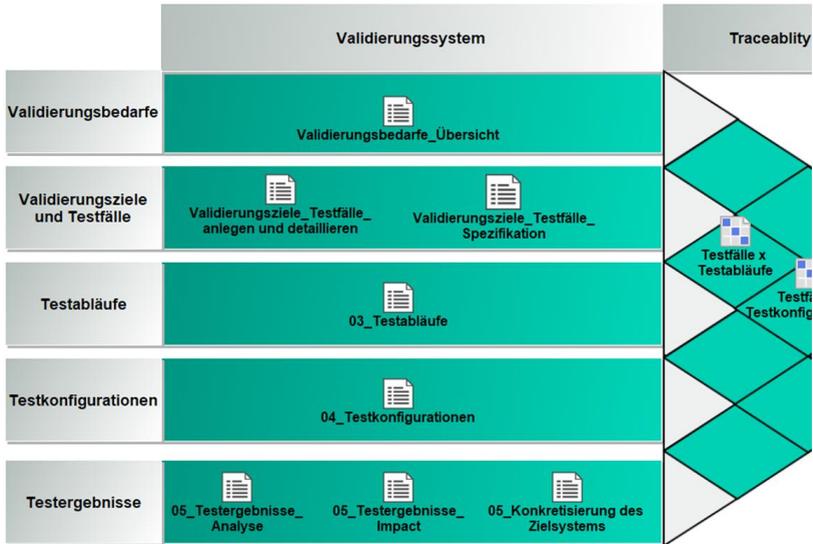


Abbildung 7.2: Erweitertes Architekturframework für die MBSE-Methodik (Sicht Validierungssystem, Ausschnitt)

Jede der Perspektiven enthält mindestens einen Viewpoint zur Modellierung des Validierungssystems. So werden beispielsweise in der Perspektive „Validierungsziele und Testfälle“ die Viewpoints „Validierungsziele_Testfälle_anlegen und detaillieren“ und „Validierungsziele_Testfälle_Spezifikation“ beschrieben. Ersterer umfasst dabei die in Abbildung 6.14 und Abbildung 6.15 gezeigten Views.

Gleichzeitig ist, angelehnt an das iPeM, auch die Integration weiterer Layer wie zusätzlicher Systemgenerationen oder des Produktionssystems, möglich. Dies ist nicht Umfang der vorliegenden Arbeit, mögliche Ansätze für weiterführende Forschung hierzu werden jedoch bereits erforscht und im Ausblick diskutiert (siehe Kapitel 11).

7.2 Zusammenspiel zwischen Architekturframework und iterativ ausführbaren Modellierungsaktivitäten der Modellierungsmethode

Wie in Absatz 6.3 beschrieben, zeigte sich beim Einsatz des ursprünglichen Architekturframeworks im Live-Lab IP 2018/2019, dass die Modellierung hauptsächlich anhand des zentralen Ablaufdiagramms und nicht anhand der Matrix-Anordnung der Viewpoints durchgeführt wurde. Durch die Matrix-Darstellung und den damit einhergehenden Ordnungsrahmen kann jedoch eine eindeutige, wiederverwendbare Struktur für zu erstellende MBSE-Systemmodelle vorgegeben werden.

Für die Weiterentwicklung der MBSE-Methodik werden daher Lösungen für die Verknüpfung der statischen Anordnung von Viewpoints in der Matrix-Darstellung und der dynamischen und zielgerichteten Durchführung von Modellierungsaktivitäten, basierend auf der entwickelten Modellierungsmethode, untersucht. Zentral dabei ist die auch im Rahmen des iPeM beschriebene Unterscheidung zwischen Phasen und Aktivitäten im Produktentstehungsprozess (siehe Absatz 2.2.2). Die entwickelte MBSE-Methodik soll nicht ein Wasserfallartiges Vorgehen beschreiben, welches einmal in Gänze sequentiell durchgeführt wird. Vielmehr soll die iterative Durchführung einzelner Modellierungsaktivitäten, je nach Anwendenden und Situation im Produktentstehungsprozess, unterstützt werden. Somit wird zudem eine Einbindung der Modellierung in eine (teilweise) agile Projektdurchführung im Verständnis des ASD (siehe Absatz 2.2.3) unterstützt.

Im Stand der Forschung werden bereits Ansätze zur Verknüpfung von Architekturframeworks und Modellierungsmethoden beschrieben.

Husung et al. (2018) beschreiben einen Anwendungsfall-basierten Ansatz zur Umsetzung und Nutzung von MBSE (siehe Absatz 2.4.2). Die Nutzung eines Architekturframeworks zur Strukturierung von Systemmodellen wird dabei jedoch nicht explizit adressiert. Für das mecPro²-Projekt (siehe Absatz 2.6.2) wird neben dem Modellierungsrahmenwerk ein Prozessrahmenwerk entwickelt. Dabei wird verschiedenen Rollen im Produktentstehungsprozess jeweils ein fest definierter Viewpoint zugeordnet. Jeder Viewpoint ist durch mehrere Views ausgeprägt, die je nach Aktivität im Produktentstehungsprozess zur Modellierung verwendet werden. Die für die SPES XT-Methodik beschriebenen „Methodological Building Blocks“ beschreiben jeweils Input, Output, eine Handlungsweise, Werkzeug o.Ä. für eine Aktivität im Produktentstehungsprozess. Unterschieden wird dabei zwischen Construction Building Blocks zur Synthese und Analysis Building Blocks zur Analyse von Informationen eines Systemmodells (siehe Absatz 2.6.2).

Der für diese Arbeit entwickelte Ansatz, das statische Architekturframework und die dynamischen Modellierungsaktivitäten zu verbinden, kombiniert und erweitert diese beschriebenen Ansätze aus dem Stand der Forschung. Die einzelnen Schritte des Vorgehens der Modellierungsmethode (siehe Absatz 6.2) werden, als in sich konsistente Modellierungsaktivitäten aufgefasst und detailliert (Mandel, Behrendt & Albers, 2021; Mandel, Martin & Albers, 2022). Somit wird jeder Schritt und damit jede Aktivität der Modellierungsmethode in verschiedenen Teilaktivitäten aufgeteilt und in einem eigenen Ablaufdiagramm dargestellt. Jeder dieser Teilaktivitäten ist ein spezifischer View aus dem Architekturframework zugeordnet. Dabei existiert keine ausschließende Zuweisung zwischen Views und Teilaktivitäten, da derselbe View für verschiedene Teilaktivitäten unterschiedlicher Modellierungsaktivitäten (wieder-)verwendet werden kann. Damit bleibt der durch das Architekturframework vorgegebene Rahmen für die erstellten Systemmodelle bestehen.

Anders als im für mecpro² beschriebenen Ansatz, wird hierbei die Zuweisung von Views nicht Rollen- sondern Aktivitäten-basiert umgesetzt. Hierdurch soll, dem Leitbild ASE folgend, eine kollaborative Arbeitsweise statt einer rein kooperativen Arbeitsweise unterstützt werden (siehe Dumitrescu et al., 2021, 105ff). Durch die Aktivitäten-basierte Zuweisung von Views können Entwickelnde je nach Aufgaben im Produktentstehungsprozess notwendige Aktivitäten gemeinsam ausführen und dabei angeleitet werden. Eine Rollen-basierte Zuweisung von Views würde hingegen eine kooperative Arbeitsweise, bei der Experten und Expertinnen jeweils nur für einen Teil des Modells verantwortlich sind und ein Austausch über Modellinhalte nur indirekt, beispielsweise über Abteilungsgrenzen hinweg, stattfindet, bestärken. In Erweiterung des Ansatzes nach Husung et al. (2018), werden nicht nur passende Modellelemente und Diagramme für einen Modellierungsaktivität beschrieben, sondern diese direkt zu einem View/Viewpoint aus dem strukturierenden Architekturframework verknüpft. In Erweiterung der Methodological Building Blocks aus der SPES XT Methodik, werden, gemäß dem erweiterten ZHO-Modell (siehe Absatz 2.1.1), für eine Modellierungsaktivität immer Teilaktivitäten sowohl zur Analyse als auch Synthese des Systemmodells beschrieben.

Der Aufbau und Ablauf einer Modellierungsaktivität orientiert sich dabei immer an dem gleichen Muster aus vier Teilaktivitäten (Mandel, Martin & Albers, 2022, Abbildung 7.3). Dabei ist zu beachten, dass nicht jede Modellierungsaktivität aus genau vier Schritten gemäß der vier Teilaktivitäten bestehen muss. Je nach Modellierungsaktivität können für die einzelnen Teilaktivitäten unter Umständen mehrere Modellierungsschritte benötigt werden beziehungsweise Teilaktivitäten integriert über einen gemeinsamen Schritt bedient werden. Die Ziele der vier Teilaktivitäten werden im Folgenden kurz erläutert:

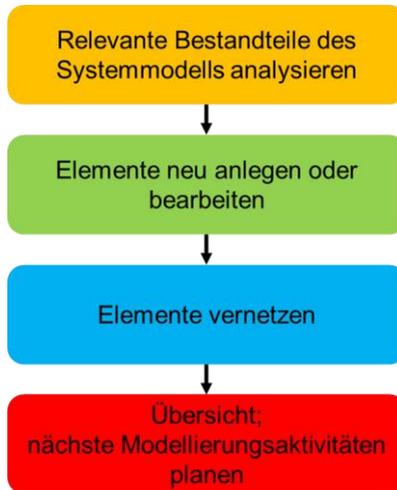


Abbildung 7.3: Standardmäßige Vorgabe und Muster zur Beschreibung von Modellierungsaktivitäten

Relevante Bestandteile des Systemmodells analysieren

Für die erste Teilaktivität einer Modellierungsaktivität werden in der Ablaufbeschreibung alle Views verknüpft, die als Ausgangsbasis für die Modellierungsaktivität dienen. So werden beispielsweise bei der Modellierungsaktivität zur Beschreibung von Testabläufen die Views zur Übersicht aller modellierten Validierungsziele und Testfälle sowie der bereits modellierten Stand der Testspezifikation hinterlegt. Daraus lässt sich das Zielsystem für die auszuführende Modellierungsaktivität bestimmen.

Elemente neu anlegen oder bearbeiten

Im zweiten Schritt werden, auf Basis der Analyse in der vorherigen Teilaktivität, neue Elemente im Modell angelegt beziehungsweise bestehende Elemente detailliert/geändert. Im bereits genannten Beispiel würden hier neue Testabläufe im Modell angelegt, angepasst, detailliert oder gelöscht.

Elemente vernetzen

Die dritte Teilaktivität dient zur Vernetzung der angelegten Elemente zu weiteren Elementen des Modells. Basierend auf den Beschreibungen der Ontologie, wird so die Nachvollziehbarkeit im Modell hergestellt. Im Beispiel würden hier die definierten

Testabläufe zu den entsprechenden Validierungszielen und Testfällen, zu denen der Testablauf zugehörig ist, verknüpft werden.

Übersicht; nächste Modellierungsaktivitäten planen

In der vierten und letzten Teilaktivität sind die Views zu zusammenfassenden Analyse-Sichten für die Modellierungsaktivität hinterlegt. Für das Beispiel würde hier eine Übersichts-Darstellung der modellierten Testabläufe inklusive deren Beschreibungen genutzt.

Die letzte Teilaktivität soll zudem weitere Modellierungs- und Entwicklungsaktivitäten anstoßen. So könnte beispielsweise eine Analyse der Übersicht der Testabläufe ergeben, dass weitere Testkonfigurationen zur Durchführung der Testabläufe definiert beziehungsweise entwickelt werden müssen. Im Sinne des ZHO-Modells und des Pull-Prinzips der Validierung (siehe Absatz 2.3) würde so die Modellierungsaktivität zur Definition der Testabläufe im nächsten Schritt die Modellierungsaktivität zur Modellierung von Testkonfigurationen anstoßen.

7.3 Implementierung der MBSE-Methodik in einem Software-Tool

Alle Erkenntnisse der vorangegangenen Untersuchungen und der darauf basierenden Weiterentwicklungen fließen in die ganzheitliche MBSE-Methodik ein. Zudem wird ein auf die Methodik angepasste Template zur Modellierung im Software-Tool-Cameo Systems Modeler entwickelt. Der Aufbau der Implementierung wird dabei auch in Mandel, Martin und Albers (2022) beschrieben.

Analog zum Vorgehen bei der Erstellung der MBSE-Methodik für das Live-Lab IP 2018/2019 (siehe Absatz 6.3), wird die vollständige Ontologie (siehe Absatz 6.1) in ein SysML-Profil überführt. Dadurch können die beschriebenen Elemente sowie deren Eigenschaften und Beziehungen direkt als Stereotypen bei der Modellierung verwendet werden. Gemäß den Beschreibungen in Absatz 7.1 werden zudem die Architekturframeworks zur Beschreibung der Produktgeneration sowie zur Beschreibung des Validierungssystems als Templates in Cameo Systems Modeler hinterlegt.

Zur Implementierung des in Absatz 7.2 beschriebenen Zusammenspiels zwischen Architekturframework und Modellierungsmethode, werden die in der entwickelten

Modellierungsmethode beschriebenen Schritte in einzelne, in sich konsistente Modellierungsaktivitäten überführt.

Abbildung 7.4 zeigt als Überblick die Navigation aus einer Übersicht aller Modellierungsaktivitäten, über die detaillierte Ablaufbeschreibung der Teilaktivitäten einer Modellierungsaktivität hin zu einem spezifischen View/Diagramm, welches im Rahmen einer Teilaktivität genutzt wird. Die Navigation erfolgt dabei mit Hilfe vorangelegter Hyperlinks. Die einzelnen Bestandteile von Abbildung 7.4 werden im Folgenden detailliert erläutert.

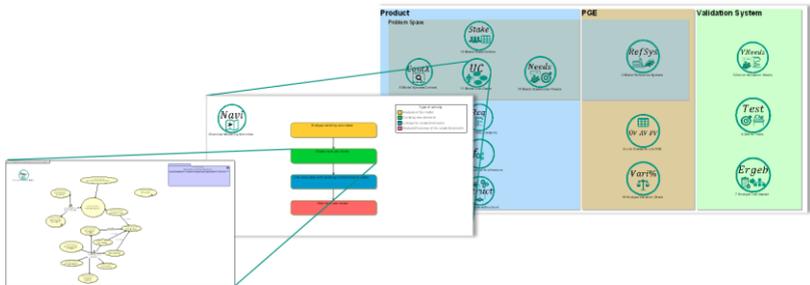


Abbildung 7.4: Übersicht der Navigation über Modellierungsaktivitäten (Kreise in der Übersicht ganz rechts hinten), deren detaillierten Ablauf (Mitte, siehe auch Abbildung 7.3) hin zu spezifischen Views/Diagrammen im SysML-Modellierungstool (links vorne) (Mandel, Martin & Albers, 2022, S. 9)

In Abbildung 7.5 ist eine Übersicht aller im Rahmen der MBSE-Methodik definierten Modellierungsaktivitäten dargestellt (vgl. rechten Teil in Abbildung 7.4). Je nach Bedarf können dabei weitere Modellierungsaktivitäten definiert und im Modellierungstool angelegt werden. Auf der rechten Seite ist detailliert der Ausschnitt zu den Modellierungsaktivitäten für das Validierungssystem, gemäß der in Absatz 6.2 vorgestellten Modellierungsmethode dargestellt.

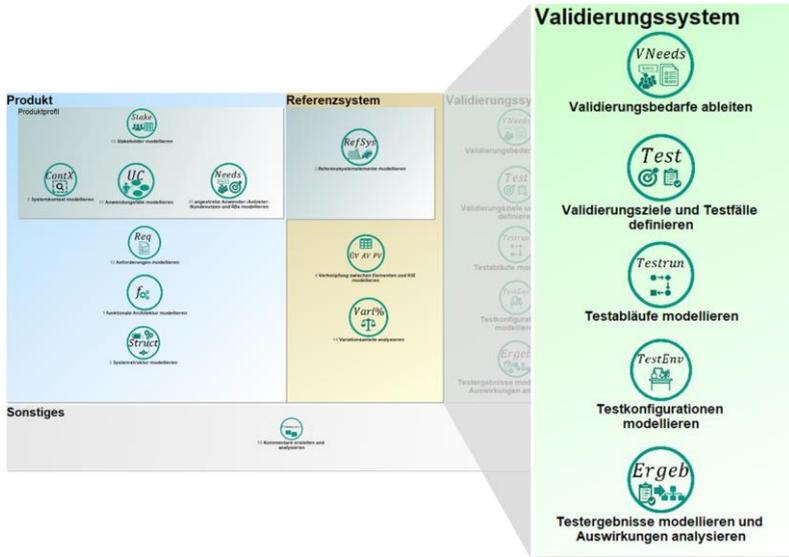


Abbildung 7.5: Übersicht aller für die MBSE-Methodik beschriebenen Modellierungsaktivitäten (Highlight auf die entwickelten Modellierungsaktivitäten entsprechend der entwickelten Modellierungsmethode)

Jede dieser Modellierungsaktivitäten aus der Übersicht verlinkt dabei auf ein Diagramm in welchem der Ablauf der Modellierungsaktivität in Anlehnung an die in Absatz 7.2 beschriebenen vier Teilaktivitäten zur Analyse und Synthese für die Modellierungsaktivität beschrieben sind. In Abbildung 7.6 ist beispielhaft der Ablauf für die Aktivität „Validierungsziele und Testfälle modellieren“ dargestellt.

Der gelb markierte Block („Validierungsbedarfe sichten“) verweist auf den View zur Darstellung der Validierungsbedarfe und für diese relevante Modellelemente (siehe Abbildung 6.13). Für die erste Teilaktivität zur Synthese (grün markiert, „Validierungsziele und Testfälle für Validierungsbedarfe modellieren“) werden Validierungsziele und Testfälle zu den Validierungsbedarfen modelliert (siehe Abbildung 6.14). In der zweiten Teilaktivität zur Synthese (blau markiert, „relevante Elemente für Validierungsziele und Testfälle auswählen“) werden aus den Modellelementen, die für den Validierungsbedarf zu beachten sind, genau die ausgewählt und verknüpft, die in den zuvor angelegten Validierungszielen und Testfällen konkret betrachtet werden sollen (siehe Abbildung 6.15). Als finale Teilaktivität zur Analyse (rot markiert) stehen eine zusammenfassende Analyse-Sicht aller Testfälle inkl. den adressierten Elementen („Testspezifikation (relevante

Elemente)“, Abbildung 6.16) sowie eine Übersicht der Testfälle inklusive der zugehörigen Testabläufe, Testkonfigurationen und Testergebnisse („Testspezifikation (Testabläufe, Testkonfigurationen, Testergebnisse)“, Abbildung 6.21).

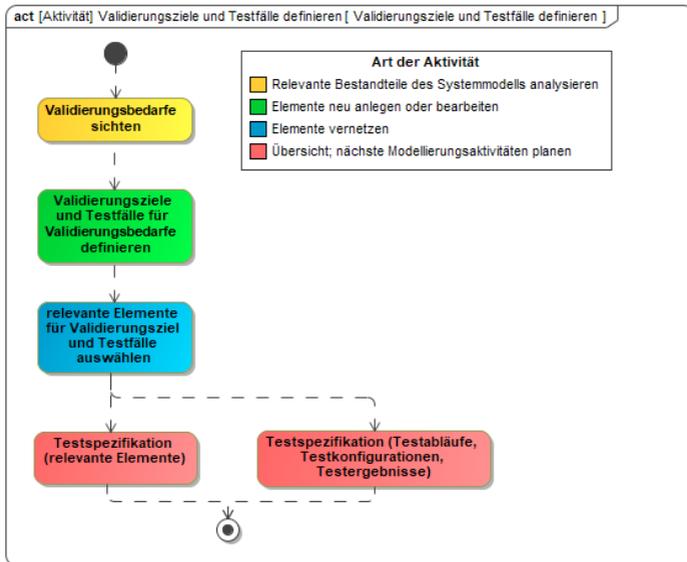


Abbildung 7.6: Ablauf der Modellierungsaktivität „Testfälle modellieren“

Zusätzlich wird im Software-Tool die Arbeitsansicht zur Modellierung in den einzelnen Diagrammen auf die entwickelte MBSE-Methodik angepasst. In Abbildung 7.7 ist das Diagramm zum Anlegen und Detaillieren der Testkonfigurationen dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung ist zu sehen, dass eine zusätzliche Registerkarte „IPEK“ angelegt wurde, die ausschließlich die Elemente (Bestandteile der entwickelten Modellierungssprache) enthält, die im Rahmen der entwickelten MBSE-Methodik im vorliegenden Diagramm zu nutzen sind. Somit wird eine Fokussierung auf die relevanten und korrekten Modellelemente für die Modellierung gemäß der entwickelten MBSE-Methodik unterstützt. Gleichzeitig ist es jedoch über einen „Expertenmodus“ weiterhin möglich, bei Bedarf zusätzliche SysML Elemente in der Diagrammleiste anzuzeigen und zur Bearbeitung zu nutzen.

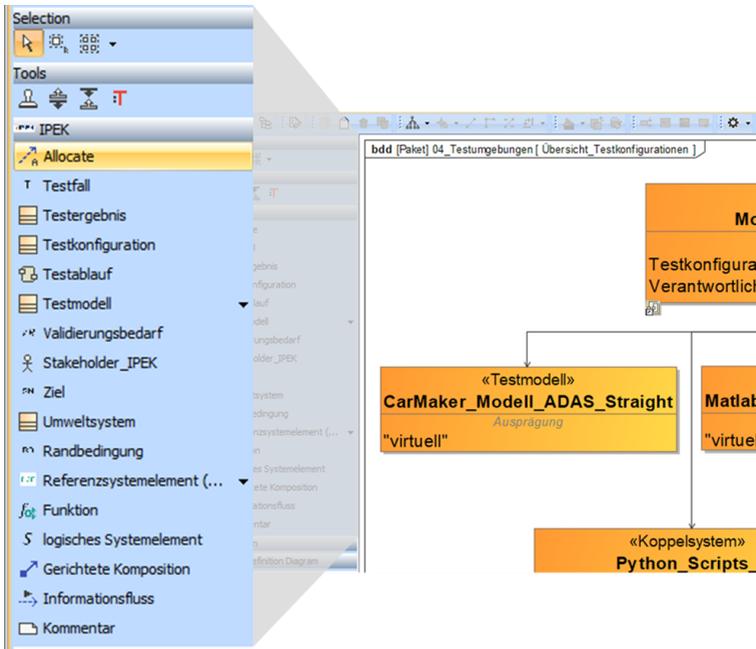


Abbildung 7.7: Darstellung der Arbeitsansicht für das Diagramm zum Anlegen und Detaillieren von Testkonfigurationen

Wie beschrieben soll die entwickelte MBSE-Methodik auch auf andere Modellierungssprache als SysML und weitere Software-Tools zur Modellierung anwendbar beziehungsweise übertragbar sein. Im Projekt MoSyS wird, neben SysML und Cameo Systems Modeler, noch das Modellierungstool iQuavis von Two Pillars verwendet (TwoPillars, 2022, 18. März). Die Modellierungssprache für iQuavis basiert dabei auf CONSENS (siehe Absatz 2.5.2), ist jedoch, ähnlich zur SysML, ebenfalls durch das Hinzufügen und Konkretisieren von Klassen erweiterbar. Daher wird in MoSyS auch für iQuavis eine Ontologie, ein Architekturframework, Modellierungsaktivitäten und eine Tool-Anpassung gemäß der entwickelten MBSE-Methodik umgesetzt¹⁷. Abbildung 7.8 zeigt einen Ausschnitt

¹⁷ Hinweis: Die Arbeiten in MoSyS sind zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Dissertation noch laufend (siehe z.B. Mandel et al. (2023)). Daher wird an dieser Stelle auf Basis der Ergebnisse zum Zeitpunkt der Anfertigung der Dissertation beschrieben.

Zusammenfassung und Zwischenfazit – Adressierung der im Forschungsbedarf herausgearbeiteten Felder zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen

aus dem für MoSyS entwickelten Architekturframeworks sowie die modellierten Teilaktivitäten der Modellierungsaktivität „(System-)Anforderungen modellieren“.

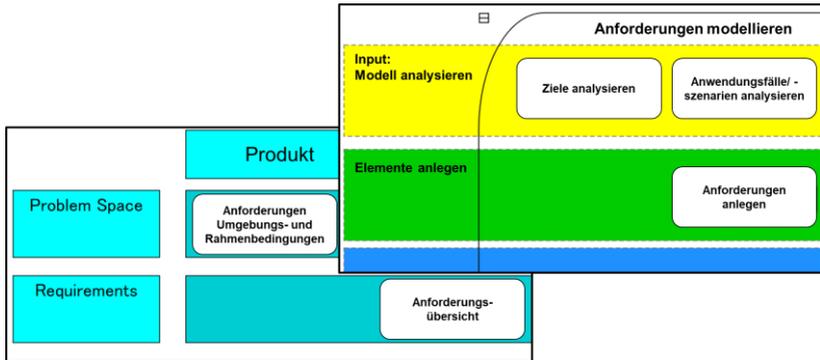


Abbildung 7.8: Ausschnitt des Architekturframeworks und einer Modellierungsaktivität für das Projekt MoSyS – umgesetzt in iQuavis

7.4 Zusammenfassung und Zwischenfazit – Adressierung der im Forschungsbedarf herausgearbeiteten Felder zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen

In den vorangegangenen Absätzen dieses Kapitels wurden die Maßnahmen zur Integration und zur Erweiterung der Kernbestandteile der entwickelten MBSE-Methodik vorgestellt. Hierbei fließen Erkenntnisse aus der Entwicklung und initialen Anwendung der Kernbestandteile der MBSE-Methodik (siehe Kapitel 1) ein. Zudem werden die im Forschungsbedarf beschriebenen Handlungsfelder für die individuelle und organisatorische Akzeptanz von MBSE-Ansätzen herangezogen. In Tabelle 7.1 sind die getroffenen Maßnahmen zur Adressierung der in Absatz 5.3 herausgearbeiteten Handlungsfelder zusammengefasst (siehe auch Mandel, Martin & Albers, 2022).

Tabelle 7.1: Zusammenfassung der Maßnahmen zur Weiterentwicklung der MBSE-Methodik in Bezug zu den identifizierten Handlungsfeldern für die individuelle und organisatorische Akzeptanz von MBSE-Ansätzen

Handlungsfeld	Maßnahmen, die zur Adressierung des Handlungsfelds für die MBSE-Methodik getroffen wurden.
Wahrgenommene Leistungsfähigkeit durch die Anwendenden	Einführung des Architekturframeworks für die genutzten Viewpoints (Abbildung 7.1, Abbildung 7.2) und der Übersichtsdarstellung der Modellierungsaktivitäten (Abbildung 7.5), welche Anwendende dabei unterstützen sollen, schnell die Viewpoints/Modellierungsaktivitäten zu identifizieren, die für ihr Projekt relevant/hilfreich sein können
Intuitive Anwendbarkeit	Einführung des Architekturframeworks und der Übersichtsdarstellung der Modellierungsaktivitäten, die Anwendende dabei unterstützen sollen, schnell zu den für ihren Modellierungszweck geeigneten Teilen des Modells zu navigieren. Hinweise und Modellierungstipps sind direkt in ein Template für das verwendete Modellierungstool integriert
Flexibilität und Adaptierbarkeit der Methodik	Entwicklung des Konzepts der Modellierungsaktivitäten, die iterativ und nach Bedarf in einem Projekt angewendet werden können (Absatz 7.2)
Klares Zielbild und Modellierungsvorgehen	Nur die Modellierungsaktivitäten und Viewpoints, die für den Modellierungszweck in einem konkreten Projekt als notwendig erachtet werden, werden in das Schulungskonzept und das Methodik-Template für das genutzte Software-Tool aufgenommen.

Zusammenfassung und Zwischenfazit – Adressierung der im Forschungsbedarf herausgearbeiteten Felder zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen

<p>Usability des Modellierungs- (Software-) Tools</p>	<p>Implementierung eines benutzerdefinierten Methodik-Templates für das verwendete Softwaretool, welches mit vordefinierten Diagrammen für jeden Viewpoint und jede Modellierungsaktivität bereitgestellt wird. Für jeden Diagrammtyp wird eine Registerkarte mit allen Elementen und Beziehungen eingeführt, die für die Modellierung gemäß der MBSE-Methodik erforderlich sind (Abbildung 7.7).</p>
<p>Ontologie und angemessener Formalisierungsgrad, die die Kommunikation zwischen Anwendenden unterstützt (und nicht behindert)</p>	<p>Die Ontologie der MBSE-Methodik adressiert explizit Elemente zur Modellierung des Validierungssystems. Am Ende jeder ausdetaillierten Modellierungsaktivität werden zusammenfassende Sichten verlinkt, um die Kommunikation zwischen den Anwendenden zu erleichtern.</p>
<p>(Monetäres) Aufwand/Nutzen Verhältnis</p>	<p>Die Darstellung der Architekturframeworks und der Übersichtsdarstellung der Modellierungsaktivitäten im Template für das genutzte Software-Tool leitet Anwendende gezielt auf für sie relevante Modellierungsaktivitäten/ Viewpoints hin und trägt somit zu einem positiven Aufwand/Nutzen-Verhältnis bei</p>
<p>Lehr- und Lernbarkeit der Methodik</p>	<p>Es wird ein Schulungskonzept für die MBSE-Methodik bereitgestellt, welches gezielt entlang der Modellierungsaktivitäten und Viewpoints organisiert ist, die verwendet werden (sollen) und nicht generisch für MBSE- oder SysML-Modellierung ist</p>
<p>Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit der MBSE-Methodik und der erstellten Modelle</p>	<p>Die Architekturframeworks und die Übersicht der Modellierungsaktivitäten bieten eine wiederverwendbare Struktur für jedes Projekt, in dem die MBSE-Methodik angewendet wird. Erweiterungen können durch das Hinzufügen zusätzlicher Viewpoints und/oder Modellierungsaktivitäten vorgenommen werden.</p>

Problemorientierung/Unterstützung bei der Modellierung des Problemraums/Produktprofils	Modellierungsaktivitäten zur Unterstützung der Modellierung des Problemraums/Produktprofils werden in einer eigenen Perspektive hervorgehoben (siehe Abbildung 7.5). Zusätzliche Viewpoints werden als Zusammenfassung am Ende jeder Modellierungsaktivität hinzugefügt, um die Kommunikation zwischen den Anwendenden zu unterstützen.
--	---

Die zentrale Erweiterung der ursprünglichen MBSE-Methodik ist die Einführung der einzelnen Modellierungsaktivitäten als dynamische Sicht, zusätzlich zur statischen Sicht des Architekturframeworks. Wie beschrieben soll hiermit gleichzeitig die klare Strukturierung erstellter Systemmodelle, und damit unter anderem die Wiederverwendbarkeit und das Zurechtfinden in den Modellen, sowie die bedarfsgerechte und agile Durchführung von Modellierungsaktivitäten unterstützt werden. Dies basiert insbesondere auf den Erkenntnissen der Anwendung des ursprünglichen Architekturframeworks im Live-Lab IP 2019/2020 (siehe Absatz 6.3).

Zusätzlich steht die noch stärkere Unterstützung der Modellierung in den gewählten Software-Tools im Fokus der Erweiterung. Für Cameo Systems Modeler und iQuavis werden spezifische Templates und Tool-Anpassungen zur Unterstützung der Modellierung gemäß der MBSE-Methodik entwickelt und implementiert. Es zeigt sich dabei, dass die MBSE-Methodik, wie anvisiert, auf verschiedene Modellierungssprachen und Software-Tools anpassbar und übertragbar ist. Unterschiedliche Software-Tools verfolgen dabei gegebenenfalls unterschiedliche Ansätze zur Modellierung. So ist die Implementierung nicht für jedes Software-Tool gleich, sondern muss sich an den Randbedingungen der Tools orientieren. Bei der Implementierung in iQuavis werden beispielsweise einige Viewpoints in Form von Tabellen in Views übersetzt, statt als (SysML-) Diagramme wie in Cameo Systems Modeler, da dies im Rahmen der Implementierung im Projekt MoSys als zielführende Darstellung erschien.

Die folgenden Kapitel beschreiben die Evaluation der entwickelten MBSE-Methodik hinsichtlich der in Absatz 3.2 beschriebenen Forschungsthesen. Dies wird einerseits anhand von Implementierungsstudien bei Unternehmenspartnern und im Projekt MoSys durchgeführt (Kapitel 8). Zusätzlich wird eine weitere Implementierungs- und Lehrestudie im Live-Lab IP 2021/2022 durchgeführt (Kapitel 9).

8 Evaluation der MBSE-Methodik – Implementierungsstudien

8.1 Fallstudie: Einsatz der entwickelten MBSE-Methodik zur Unterstützung der Planung von Validierungsaktivitäten bei einem Automobilzulieferer

Zur Evaluation der erweiterten MBSE-Methodik wird diese im Rahmen einer Fallstudie im Projekt MoSyS anhand eines Beispiels des Unternehmens KOSTAL Automobil Elektrik GmbH & Co. KG (im Folgenden Kostal) eingesetzt. Zudem sind die Unternehmen TwoPillars, :em AG sowie das Fraunhofer Institut für Entwurfstechnik Mechatronik (IEM) beteiligt. Ziel der Fallstudie ist die Untersuchung der Umsetzbarkeit der entwickelten MBSE-Methodik auf ein reales Anwendungsbeispiel. Dabei wird untersucht, ob durch den Einsatz der entwickelten MBSE-Methodik ein Beitrag zur Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung für das Beispiel der Fallstudie geleistet werden kann. Im Fokus der Untersuchung steht somit die erste Forschungsthese (siehe Absatz 3.2). Konkret wird durch den Einsatz der MBSE-Methodik angestrebt, die Definition von Validierungsbedarfen und die Planung entsprechender Validierungsaktivitäten, beginnend bereits bei der initialen Zielsystembildung und kontinuierlich über den Produktentwicklungsprozess zu unterstützen. Zudem sollen die kontinuierliche Konkretisierung und Erweiterung des Zielsystems modellbasiert und nachvollziehbar unterstützt werden. Detaillierte Beschreibungen zur Fallstudie finden sich in Wiecher et al. (2024).

In Absatz 8.1.1 wird zunächst das Studiendesign der Fallstudie vorgestellt. In Absatz 8.1.2 werden Anpassungen an der MBSE-Methodik zur Nutzung in der Untersuchungsumgebungen der Fallstudie vorgestellt. Die Durchführung der Modellierung für die Fallstudie und Ergebnisse der Untersuchung werden in Absatz 8.1.3 beschrieben. In Absatz 0 folgt schließlich eine Interpretation der Ergebnisse und ein Studienfazit in Bezug zu den beschriebenen Forschungsthese.

8.1.1 Studiendesign der Fallstudie

Beim betrachteten SiD für die Fallstudie handelt es sich um eine Onboard-Charger Control Unit (OBC) in batterieelektrischen Fahrzeugen. Die OBC ist für die

Umwandlung von Wechselstrom des Netzes in Gleichstrom zum Laden der Batterie verantwortlich. Dabei müssen unterschiedliche Randbedingungen und Anforderungen bezüglich der Ladeinfrastruktur verschiedener Länder oder unterschiedliche Lade-Standards beachtet werden. Daher muss die OBC in unterschiedlichen Hard- und Software-Umgebungen untersucht und validiert werden. Spezifisch wird für das hier vorgestellte Beispiel der Fallstudie der Anwendungsfall „Timer-Laden“ betrachtet. Dabei soll Nutzenden über eine Mensch-Maschine Schnittstelle (Human-Machine Interface, HMI) oder eine Smartphone-App ermöglicht werden, unterschiedliche Eigenschaften zum Ladevorgang, beispielsweise den gewünschten Ladezustand zu einer bestimmten Uhrzeit, einzustellen (siehe Abbildung 8.1).

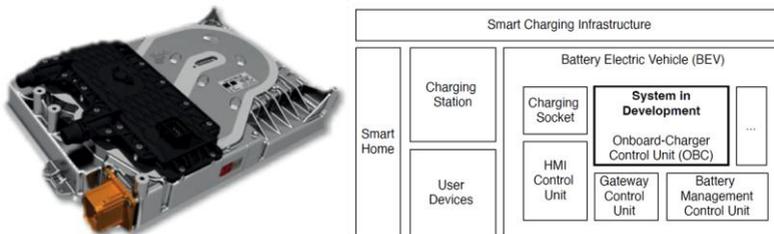


Abbildung 8.1: Links: Beispieldarstellung einer OBC (Schnitzler & Lutter, 2020); Rechts: OBC und betrachtete Nachbarsysteme für die Fallstudie (Wiecher et al., 2024, S. 731)

Für die Fallstudie wird die entwickelte MBSE-Methodik mit der Methode für die Testgetriebene Szenario-Modellierung und Simulation (TDSS - Test-Driven Scenario Modeling and Simulation) für Automotive Software Komponenten nach Wiecher et al. integriert (Wiecher, Greenyer & Korte, 2019). Bei der TDSS werden basierend auf Stakeholder-Anforderungen und Zielen (bspw. vorgegeben durch einen OEM an einen Tier 1 Zulieferer) automatisch Testfälle zu deren Überprüfung generiert. Die iterative Ausführung dieser Testfälle und die Bewertung der Testergebnisse in Bezug auf die Stakeholder-Anforderungen und Ziele wird wiederum zur Spezifikation und Detaillierung von (technischen) Anforderungen an das SiD herangezogen. Gleichzeitig werden durch die Durchführung der Tests notwendige (Teil-) Systeme und Komponenten des SiD sowie deren Interaktionen spezifiziert (entspricht der logischen Architektur des Systems) (Wiecher et al., 2024).

Durch die Integration der TDSS in die entwickelte MBSE-Methodik sowie durch das in MoSyS genutzte Modellierungswerkzeug iQuavis, ergeben sich notwendige Adaptionen und Erweiterungen der MBSE-Methodik. Da diese jedoch bewusst darauf ausgelegt ist, adaptierbar und erweiterbar zu sein, ist die Integration der Erweiterungen und Anpassungen nicht nur möglich, sondern explizit ein Ziel der

„Systemanforderung“, die ebenfalls das Hinzufügen und Konkretisieren neuer Systemanforderungen basierend auf Testergebnissen abbildet, redundant und wird entfernt (siehe Abbildung 8.2).

Zur Modellierung werden die in Abbildung 7.5 gezeigten Modellierungsaktivitäten für das Produkt und Validierungssystem verwendet. Die Implementierung der Übersicht der Modellierungsaktivitäten in iQuavis ist schematisch in Abbildung 8.3 dargestellt. Durch die Integration der TDSS werden die Modellierungsaktivitäten „Anforderungen validieren“, „Anforderungen verifizieren“ und „Test-getriebene Systemanforderungen modellieren“ (graue Markierung in Abbildung 8.3) eingeführt, welche die Modellierungsaktivitäten „Anforderungen modellieren“, „Testfälle modellieren“ und „Testergebnisse modellieren und Auswirkungen analysieren“ aus den Beschreibungen in Absatz 7.3 integrieren. Für die detaillierte Beschreibung der Modellierungsaktivitäten für die TDSS sei an dieser Stelle auf Wiecher et al. (2024) verwiesen.

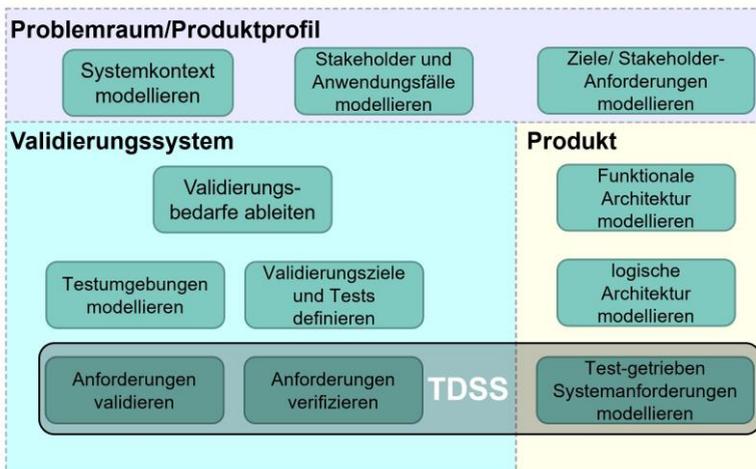


Abbildung 8.3: Modellierungsaktivitäten für die Fallstudie bei Kostal (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 736)

8.1.3 Durchführung der Modellierung und Ergebnisse der Untersuchung

Als Ausgangspunkt der Modellierung im Produktentstehungsprozess steht bei Kostal als Tier-1 Zulieferer für gewöhnlich ein Satz an Stakeholder-Anforderungen

und/oder Zielen aus Sicht eines OEMs. Zusätzlich werden Beschreibungen zu Anwendungsfällen und dem Systemkontext des zu entwickelnden Systems genutzt. Die Modellierungsaktivitäten zur Modellierung des Problemraums/Produktprofils (siehe Abbildung 8.3) dienen zu dessen Abbildung sowie Konkretisierung und Erweiterung. Damit werden Informationen zum Produktprofil des SiD im Modell beschrieben.

Für die Fallstudie werden die 67 vom OEM formulierte Ziele/Stakeholder-Anforderungen („Stakeholder-Requirements“) an die OBC in das Modell überführt (aus Geheimhaltungsgründen nur codiert aufgeführt in Abbildung 8.4). Darauf aufbauend wird ein Anwendungsfall („Use-Case“) näher untersucht, bei dem eine nutzende Person die gewünschte Fahrtzeit sowie den zu diesem Zeitpunkt gewünschten Ladezustand des Fahrzeugs angeben kann („User sets time to charge on HMI“ in Abbildung 8.4). Dieser Anwendungsfall wird wiederum in acht unterschiedliche Anwendungsszenarien aufgeteilt. Ein Szenario („the user requests timer-charging. Subsequently the SOC and the departure time is transmitted to the OBC control unit“, gekürzt in der Mitte in Abbildung 8.4) beschreibt dabei beispielsweise, wie eine nutzende Person die Timer-Laden Funktion aktiviert und anschließend Ladezustand und gewünschte Abfahrtszeit an die OBC kommuniziert werden. Die einzelnen Anwendungsfall-Szenarien werden wiederum direkt zu den Stakeholder-Anforderungen verknüpft, die für das Szenario relevant sind. Auf diese Weise konnten alle der 67 Stakeholder-Anforderungen zu mindestens einem Szenario verknüpft werden (siehe Abbildung 8.4).

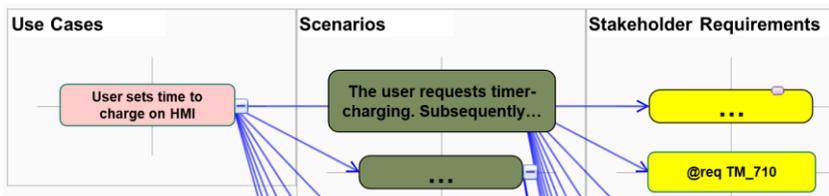


Abbildung 8.4: Betrachteter Anwendungsfall, daraus abgeleitete Szenarien sowie verknüpfte Stakeholder-Anforderungen für die Fallstudie (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 737)

Die Erkenntnisse aus der Modellierung der Anwendungsfälle, Szenarien und Stakeholder-Anforderungen werden wiederum zur Konkretisierung der Modellierung des Systemkontexts (siehe Abbildung 8.5) verwendet. An der Systemgrenze interagiert die OBC insbesondere mit einer Stromversorgung („Power Supply“), einer Gateway Steuereinheit („Gateway Control Unit“) sowie, über ein User Interface, mit dem Nutzer („User“) des Systems.

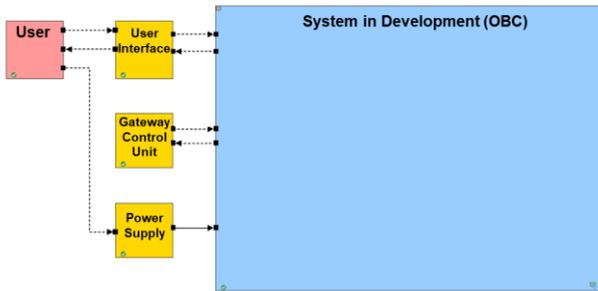


Abbildung 8.5: Systemkontext der OBC (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 737)

Bei Durchführung der Modellierungsaktivität „Validierungsbedarfe ableiten“, werden Validierungsbedarfe an den modellierten Anwendungsfällen, Anwendungsszenarien und/oder Stakeholder-Anforderungen beschrieben (siehe Abbildung 8.6). So wird beispielsweise ein Validierungsbedarf zur Untersuchung möglicher Auswirkungen im System bei der Aktivierung der Timer-Laden Funktion durch Nutzende („activation of the timer charging function“ in der Spalte „Validation Concerns“ in Abbildung 8.6) modelliert. Wie in der Abbildung zu sehen, wird dieser Validierungsbedarf mit dem oben beschriebenen Szenario verknüpft.

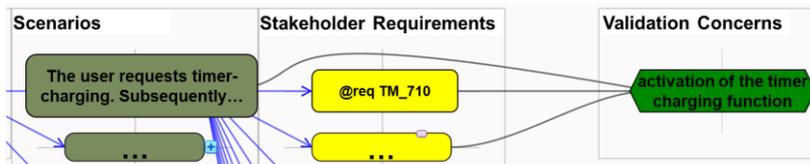


Abbildung 8.6: Ableitung von Validierungsbedarfen basierend auf Anwendungsfällen, Anwendungsszenarien und/oder Stakeholder-Anforderungen (adaptiert nach Wiecher et al., 2024)

In Abbildung 8.7 ist als Zusammenfassung der Views des Modells zur Darstellung der Validierungsbedarfe („Validation Concerns“) sowie deren (direkte und indirekte) Verknüpfung zu adressierten Anwendungsfällen, Anwendungsszenarien („Scenario“), Stakeholder-Anforderungen („Stakeholder-Requirement“) und Systemanforderungen („Requirement“) dargestellt. Dank der in den einzelnen Modellierungsaktivitäten angelegten Verknüpfungen, werden die Inhalte dieses Views automatisch befüllt. Der View dient im weiteren als Ausgangspunkt der Modellierungsaktivität „Validierungsziele und Tests definieren“ (siehe Abbildung 8.3).

Fallstudie: Einsatz der entwickelten MBSE-Methodik zur Unterstützung der Planung von Validierungsaktivitäten bei einem Automobilzulieferer

	Validation Concern	Addressed Elements				Relevant Requirements
		Name	Type	Name	Type	
1	Activation of the timer charging function	the user requests timer-charging. Subsequently the SOC and the departure time is transmitted to the OBC control unit	Scenario	@req_TM_708	Stakeholder Requirement	
2				@req_TM_710	Stakeholder Requirement	
3						@req_TM_770
4						@req_TM_712
5						@req_TM_713
6						@req_TM_714
7						@req_TM_715
8						@req_TM_775
9						@req_TM_716
10						@req_TM_717

Abbildung 8.7: Relevante Informationen zu einem Validierungsbedarf ("Validation Concern") zur Formulierung von Validierungszielen ("Validation Objectives") (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 738)

Für die Fallstudie werden für den beschriebenen Validierungsbedarf über den Verlauf des Produktentstehungsprozesses konkrete Validierungsziele („Validation Goals“), die zur Untersuchung beziehungsweise Befriedigung des Validierungsbedarfs erreicht werden sollen, beschrieben (siehe Abbildung 8.8). Auf diese Weise können für die Fallstudie bereits (abstrakte) Validierungsziele und Tests basierend auf Validierungsbedarfen hinsichtlich des Problemraums/Produktprofils beschrieben werden. So wird das Validierungsziel „Nutzende Person kann SOC und gewünschte Abfahrtszeit einstellen“ (User can set SOC and departure time) definiert.

	Validation Goal		Test Scenario	Test	Test Cases	Test Environment
1	User can set SOC and departure time	The plausibility of the clock time can be checked	self-healing	@testTM_712	@test-case TM712.1	
2				plausibility check	@testTM_770	@test-case TM_770.3
3			@test_TM_770		@test-case TM770.1	SwIT
4			User activates timer charging function		@test_TM_708	@test-case TM708.1
5				@test_TM_710	@test-case TM710.1	

Abbildung 8.8: Validierungsziele und damit verbundene Testszenarien, Tests und Testfälle (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 739)

Gemäß der entwickelten MBSE-Methodik werden zu den beschriebenen Validierungszielen Tests definiert. Für die vorliegende Fallstudie bei Kostal können mehrere zusammengehörige Tests wiederum zu einem Test-Szenario („Test Scenario“) zusammengefasst werden, um diese zu bündeln. Für die Fallstudie wird dabei das Testszenario „Nutzende Person aktiviert Timer-Laden Funktion“ („User

activates timer charging function“ in der Spalte „Test Scenario“ in Abbildung 8.8) betrachtet.

Die modellierten Tests und Testscenarien sind direkt mit dem Validierungsziel verknüpft. Dadurch können im Modell alle (direkten und indirekten) Verknüpfungen zu modellierten Elementen des Produktprofils (bspw. Anwendungsfälle) oder zu Systemanforderungen und der Architektur des SiD (bspw. Funktionen und logische Systemelemente) als potenziell relevante Elemente für einen Test identifiziert werden. Nach Auswahl der tatsächlich relevanten Elemente für einen Test aus diesen verknüpften Elementen ergibt sich der View zur Testspezifikation (Abbildung 8.9). In diesem Viewpoint werden die zum Test zugehörigen Testfälle, Testumgebungen und Testergebnisse angezeigt (siehe Spalten „Test-Case“, „Test-Environments“ und „Test Result“ in Abbildung 8.9). Zusätzlich sind eine Beschreibung des Tests (Spalte „Text“ in Abbildung 8.9) und als relevant verknüpfte Systemanforderungen, die im Test verifiziert werden sollen (Spalte „System Requirements“ in Abbildung 8.9), im View abgebildet. Die Erstellung und Modellierung der Tests erfolgt für die Fallstudie gemäß der TDSS, für detaillierte Beschreibungen sei auf Wiecher et al. (2024) verwiesen. Das in der in Absatz 6.2 vorgestellten Modellierungsmethode beschriebene Vorgehen zu deren Modellierung ist jedoch auch für die Implementierung der Fallstudie und die Implementierung der Methodik in iQuavis analog anwendbar.

Test	Requirement		System Requirement	Test Case		Test Environment	Test Result
	ID	Text		ID	Description		
@test TM_708	@req TM_708	After the customer has activated the timer charging function and set the destination SOC and the departure time, the software of the OBC shall transmit data to the application	SMLK TM_708.1	@test-case TM708.1	activate timer charging and destination SOC, set departure time. The data is transmitted to the destination	SysIT	passed
			SMLK TM_708.2	@test-case TM708.2	don't activate timer charging, set destination SOC, set departure time. The data is not transmitted to the destination		passed
			SMLK TM_708.3	@test-case TM708.3	activate timer charging, don't set destination SOC, set departure time. The data is not transmitted to the destination		passed
			SMLK TM_708.4	@test-case TM708.4	activate timer charging, set destination SOC, set departure time. The data is not transmitted to the destination		passed

Abbildung 8.9: Testspezifikation, Ausschnitt für das beschriebene Validierungsziel der Fallstudie bei Kostal (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 738)

In Abbildung 8.10 ist schließlich auszugswise die Darstellung zur Analyse der Auswirkungen einzelner Testergebnisse dargestellt. Die Analyse zur Auswirkung von Testergebnissen auf weitere Modellelemente (Anforderungen, Ziele, Anwendungsfälle etc.) ist ein wichtiger Bestandteil der in dieser Arbeit entwickelten

MBSE-Methodik, um die Weiterentwicklung des Zielsystems eines Produkts zu unterstützen. Im gezeigten Ausschnitt ist dargestellt, auf welche Testfälle, Stakeholder-Anforderungen und Funktionen (hier: Timer laden/"timer charging") ein nicht-bestandenes Testergebnis zum Test @test TM_737.1 Auswirkungen hat. Dies kann wiederum als Auslöser zum Anstoßen neuer Entwicklungsaktivitäten oder weiterer Tests sowie zur Konkretisierung des Zielsystems (bspw. Hinterfragen und Überarbeiten von Systemanforderungen) dienen.

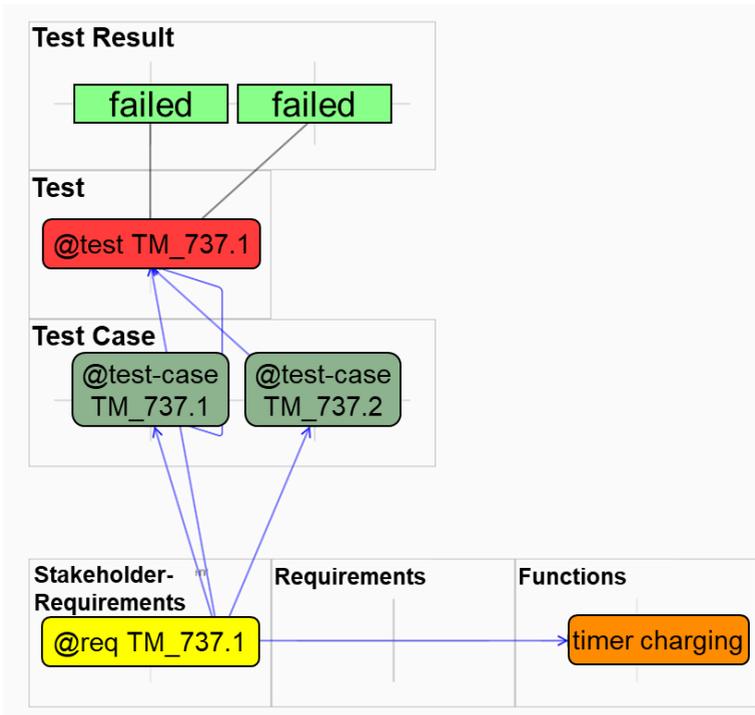


Abbildung 8.10: Analyse des Impacts einzelner Testergebnisse (Auszug)

8.1.4 Interpretation und Studienfazit

Die Ausführungen zur Fallstudie bei Kostal zeigen das Potenzial der entwickelten MBSE-Methodik zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess. Durch die Beschreibung der Modellierungsmethode in einzelnen Modellierungsaktivitäten, können diese iterativ und kontinuierlich über den Produktentstehungsprozess ausgeführt werden. Für die Fallstudie werden somit Validierungsbedarfe und daraus abgeleitete Validierungsziele und Tests einerseits auf Basis des initialen Zielsystems (Ziele und Stakeholder-Anforderungen des OEMs, initiale Anwendungsfälle) beschrieben. Gleichzeitig können weitere, konkrete Validierungsbedarfe nach Durchführung von Validierungsaktivitäten neu modelliert und bearbeitet werden. Zudem findet eine parallele und durchgängige Modellierung von Produkt und Validierungssystem statt. So werden beispielsweise der Systemkontext und Anwendungsfälle zur Konkretisierung der durch einen OEM vorgegebenen Stakeholder-Anforderungen modelliert. Auf Basis der Interpretation erzielter Testergebnisse werden neue Systemanforderungen formuliert. Dies wird durch die im Modell etablierte Nachvollziehbarkeit einzelner Modellelemente ermöglicht und unterstützt. Zudem werden Views wie jener zur Testspezifikation (siehe Abbildung 8.9) mit nachvollziehbar verknüpften Modellelementen automatisch aus dem Modell generiert und aktuell/konsistent gehalten.

Die Verknüpfung zwischen den (zunächst vom OEM als Auftraggeber vorgegebenen) Stakeholder-Anforderungen und den Anwendungsfällen/Anwendungsszenarien hilft dabei erstere zu kontextualisieren und verständlich zu machen. Die im Modell etablierte Nachvollziehbarkeit zwischen Anwendungsfällen/Anwendungsszenarien und Elementen des Systemkontexts sowie der logischen Architektur, unterstützt zudem die Identifikation, Entwicklung und Analyse zusätzlicher Anwendungsfälle in der iterativen Entwicklung und Validierung der OBC. Durch die Anwendung der entwickelten MBSE-Methodik wird eine frühzeitige und kontinuierliche Modellierung von Validierungsbedarfen und Validierungszielen in Verbindung zu Informationen des Produktprofils unterstützt. Dadurch können relevante Informationen zur Validierung einer Entwicklungsgeneration auf Basis des Systemmodells bestimmt werden, noch bevor die Entwicklungsgeneration detailliert spezifiziert oder auskonstruiert ist. Die Darstellung des in Abbildung 8.7 gezeigten Views zu relevanten Informationen bezüglich eines Validierungsbedarfs kann dabei zukünftig als hilfreiches Mittel zur Unterstützung der Projektplanung dienen. So kann beispielsweise analysiert werden, welche zusätzlichen Validierungsziele auf Basis eines definierten Validierungsbedarfs notwendig sind, um den gewünschten Reifegrad für eine geplante Entwicklungsgeneration zu erreichen. Die Verknüpfung zwischen (automatisch generierten oder bereits vorliegenden) Testfällen zu

Testumgebungen in Kombination mit Testumgebungen in Kombination mit Testumgebungen/ Testfällen, die gezielte Einordnung der Ergebnisse eines Tests unterstützt werden.

In Bezug auf Forschungsthese 1 lässt sich basierend auf den Erkenntnissen der Fallstudie somit feststellen, dass die entwickelte MBSE-Methodik einen Beitrag zur durchgängigen Modellierung und nachvollziehbaren Darstellung von Informationen im Produktentstehungsprozess leisten kann, um die kontinuierliche Planung und Bewertung von Validierungsaktivitäten im Produktentstehungsprozess zu unterstützen. Die im nächsten Absatz vorgestellte Studie beleuchtet insbesondere die Kombination von Modellierungsaktivitäten und Architekturframework sowie das Potenzial dieser Kombination zur Steigerung der Akzeptanz modellbasierter Ansätze in der industriellen Praxis (Forschungsthese 2).

8.2 Evaluation der Kombination von Modellierungsaktivitäten und Architekturframework für die entwickelte MBSE-Methodik

Basierend auf Erkenntnissen aus der Nutzung eines Architekturframeworks im Live-Lab IP 2019/2020, wurde in Kapitel 7 der Ansatz zur Kombination aus Architekturframework und Modellierungsaktivitäten vorgestellt. Inwiefern diese Kombination einen Beitrag zur Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in der industriellen Anwendung leisten kann, wird in diesem Absatz beleuchtet. Hierzu wird eine Fallstudie im Zielsystemmanagement eines Werkzeugmaschinenherstellers vorgestellt. Absatz 8.2.1 behandelt das Studiendesign der Fallstudie. In Absatz 8.2.2 werden die Studienergebnisse vorgestellt. Eine Interpretation der Studienergebnisse und ein Studienfazit in Bezug zu den aufgestellten Forschungsthese folgt in Absatz 8.2.3.

8.2.1 Studiendesign der Fallstudie

Der entwickelte Ansatz zur Kombination eines statischen Architekturframeworks und dynamischer Modellierungsaktivitäten, die auf spezifische Views verweisen, wurde in einem industriellen Umfeld bei einem deutschen Werkzeugmaschinenhersteller evaluiert (Windisch, 2021; Windisch, Mandel, Rapp, Bursac & Albers, 2022). Anwendungsbeispiel war dabei die Unterstützung eines

modellbasierten Zielsystem- und Anforderungsmanagement für die Planung von Entwicklungsgenerationen in der agilen Entwicklung mechatronischer Systeme. Hierfür wurde, analog zum Aufbau eines Architekturframeworks, ein Framework mit unterschiedlichen Views für das Anforderungsmanagement im Unternehmen im Tool Jira mit dem PlugIn R4J (Atlassian, 2022) aufgebaut. Grundlage für das Framework bildet eine kondensierte Ontologie, bei der die Klassen „Anforderung“, „Testfall“ und „Entwicklungsaktivität“ sowie deren Beziehungen untereinander festgelegt werden (siehe Abbildung 8.11). Der Fokus der Arbeit lag dabei auf dem Umgang mit Systemanforderungen, welche bereits auf Grundlage von Bedarfen und Zielen der Stakeholder abgeleitet und detailliert wurden. Daher war die explizite Modellierung von Bedarfen und Zielen zunächst außerhalb des Betrachtungsraums. Gemäß dem erweiterten ZHO-Modell (siehe Absatz 2.1.1) besitzt der entwickelte Ansatz jedoch Schnittstellen zur Ableitung der Systemanforderungen aus Bedarfen und Zielen einerseits, sowie zur Konkretisierung und Erweiterung von Bedarfen und Zielen basierend auf Ergebnissen der Testfälle andererseits, welche in weiteren Untersuchungen detailliert werden können.

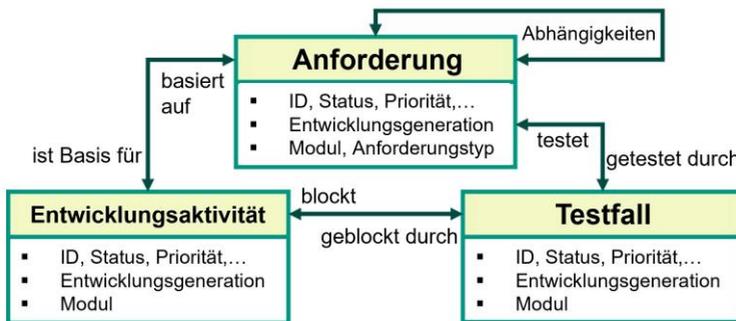


Abbildung 8.11: Kondensierte Ontologie für das Zielsystemmanagement in der Untersuchungsumgebung (adaptiert und übersetzt nach Windisch et al., 2022, S. 553)

Die rechte Seite des Frameworks in Abbildung 8.12 bildet dabei die zentrale Anlaufstelle zur Arbeit mit Anforderungen. Unter einer Maske für zentrale Filteroptionen für die Anforderungen findet sich eine Übersicht hinsichtlich Priorität und Status der Anforderungen. Darunter werden die einzelnen Anforderungen inklusive deren Beschreibung (bspw. Priorität) aufgeführt. Schließlich findet sich eine Übersicht hinsichtlich der Abdeckung der Anforderungen durch Testfälle.

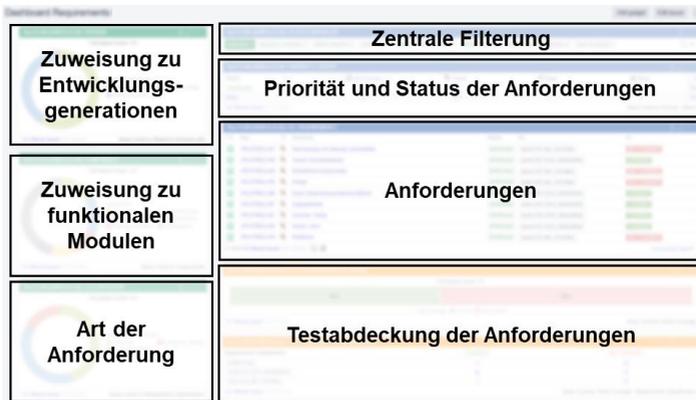


Abbildung 8.12: Framework zum Zielsystemmanagement in der Untersuchungsumgebung (adaptiert und übersetzt nach Windisch et al., 2022, S. 554)

Auf der linken Seite des Frameworks finden sich Übersichtsdarstellungen hinsichtlich der Zuweisung der Anforderungen zu den (geplanten) Entwicklungs-generationen, in denen diese realisiert werden sollen, der Zuweisung zu funktionalen Modulen, die die Anforderungen umsetzen und der Art der Anforderungen (funktional/nicht-funktional). Die Darstellung des Frameworks ist dabei exemplarisch für das Zielsystemmanagement in der Untersuchungsumgebung und erweiterbar/anpassbar.

Als Grundlage zur Beschreibung von Entwicklungs- und Modellierungsaktivitäten für das Anforderungs- und das Zielsystemmanagement in Verbindung mit dem Framework, wurden in der Untersuchungsumgebung User Stories identifiziert. Jede User Story beschreibt dabei eine Entwicklungsaktivität aus Sicht eines/einer Entwickelnden. Zusätzlich wird zu jeder User Story ein Akzeptanzkriterium beschrieben. Die User Stories werden jeweils mittels einzelner Teilaktivitäten zur Modellierung ausdetailliert, die, analog zu den Modellierungsaktivitäten für die entwickelte MBSE-Methodik (siehe Absatz 7.2), aus einzelnen Analyse- und Syntheseaktivitäten bestehen. Jede Teilaktivität verweist dabei auf einen View beziehungsweise Ausschnitt aus dem Framework des Zielsystemmanagements, der zur Durchführung der Teilaktivität verwendet wird.

In Abbildung 8.13 ist schematisch und auszugsweise das Zusammenspiel zwischen der Modellierungsaktivität „Anforderungen mit Testfällen verknüpfen“ und dem Framework dargestellt. Für diese Modellierungsaktivität gilt es zunächst die Anforderungen zu identifizieren, die in der aktuellen Entwicklungsgeneration

umgesetzt werden sollen (bspw. auf Basis priorisierter Ziele in der Produktentwicklung) und denen noch keinen Testfall zugewiesen ist. Hierfür wird der View zur Testabdeckung der Anforderungen aus dem Framework verwendet. Wird eine Anforderung ohne zugewiesenen Testfall („not covered“) identifiziert, gilt es anschließend mit Hilfe der an den Anforderungen beschriebenen Attribute (siehe Ontologie in Abbildung 8.11), kritische Anforderungen für den aktuellen Status des Produktentstehungsprozesses zu identifizieren und entsprechend zu priorisieren. Ist die Anforderung in der aktuellen Entwicklungsgeneration testbar, schließt sich die Frage an, ob bereits ein passender Testfall für die Anforderung definiert ist. Falls nicht, gilt es diesen nun zu definieren. Der passende Testfall (neu definiert oder bereits vorhanden) wird anschließend über den zusätzlichen View einer Allokationsmatrix mit der Anforderung verknüpft (siehe Abbildung 8.13 rechts unten). Hierdurch wird zudem automatisch der Status der Testabdeckung der Anforderung auf „covered“ gesetzt. (Windisch et al., 2022)

Zur Auswertung der Nutzung und des Mehrwerts beziehungsweise der Anwendbarkeit des Ansatzes in der Untersuchungsumgebung wurden eine Datenanalyse und sechs semi-strukturierte Experteninterviews durchgeführt (Windisch, 2021; Windisch et al., 2022). Die Ergebnisse der Untersuchungen werden im nächsten Absatz aufgeführt.

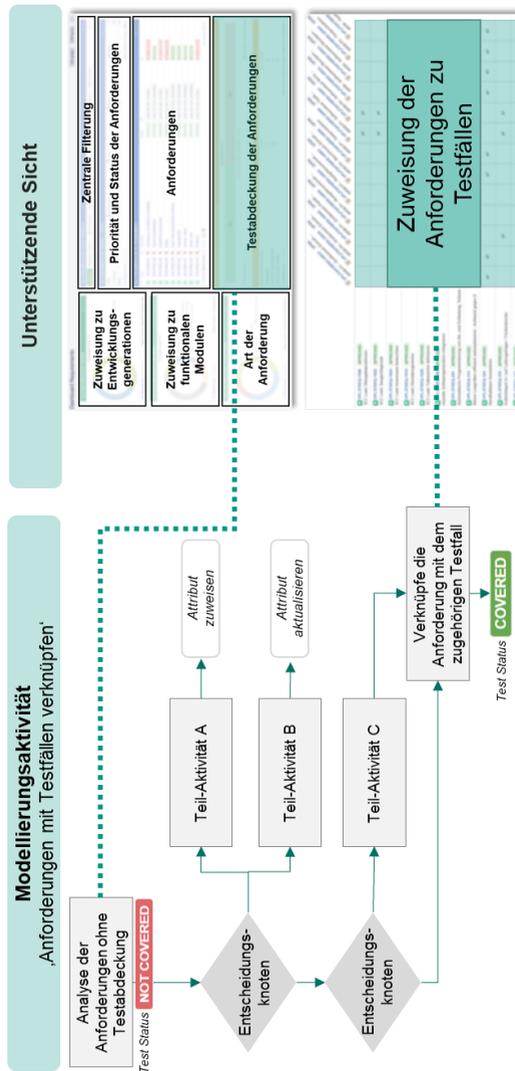


Abbildung 8.13: Beispielhafte schematische Darstellung der Modellierungsaktivität "Anforderungen mit Testfällen verknüpfen" und auszuweisener Bezug der einzelnen Teilaktivitäten zu den Views des Frameworks (adaptiert nach Windisch, 2021; Windisch et al., 2022, S. 553).

8.2.2 Studienergebnisse

Für die Datenanalyse wurde untersucht, wie oft Anwendende mit dem Framework und den entsprechenden Modellierungsaktivitäten gearbeitet haben. Im Speziellen wurde untersucht, wie oft Anwendende im Tool Anforderungen verknüpften. Der betrachteten Entwicklungsgeneration wurden 83 Anforderungen zugewiesen, von denen 61 Anforderungen eine Verifikation durch entsprechende Testfälle benötigen. Über eine zweimonatige Phase der Testplanung wurden Daten zur Modellierung mit dem entwickelten Ansatz erhoben. Am Beispiel der Aktivität „Anforderungen mit Testfällen verknüpfen“ zeigt sich, dass sich die Anzahl modellierter Verknüpfungen (bspw. durch Zuweisung zusätzlicher Testfälle zu Anforderungen oder Entfernen von Verknüpfungen, da Anforderungen nicht mehr mit dem ursprünglich geplanten Testfall verifiziert werden sollten) über den Betrachtungszeitraum entwickelte. Lediglich für 10% der modellierten Anforderungen wurden keine Verknüpfungen im Modell angelegt. 49% der angelegten Verknüpfungen wurden dabei mindestens einmal überarbeitet. Dies deutet auf eine aktive Nutzung des entwickelten Ansatzes in der Untersuchungsumgebung hin. (Windisch et al., 2022)

Für die semistrukturierten Interviews wurden sechs Mitarbeitende des Unternehmens der Untersuchungsumgebung befragt. Dabei handelte es sich um Personen aus der Forschung und Entwicklung sowie dem Testing. Abbildung 8.14 zeigt die Auswertung der semistrukturierten Interviews hinsichtlich dreier Kernaussagen. Für jede der Kernaussagen lässt sich dabei eine positive Rückmeldung zum entwickelten Ansatz erkennen. So stimmen die Befragten zu, dass die Views im Framework eine effektive Unterstützung bei der Bündelung von Anforderungen in der agilen Planung von Entwicklungsgenerationen bieten. Auch stimmen die Befragten überwiegend zu, dass die Verwendung der Views die Übersichtlichkeit und Transparenz der Anforderungen steigere. Dies hänge jedoch stark von der Qualität der beschriebenen Anforderungen ab. Die Views dienen laut den Expertinnen und Experten als interdisziplinäre Kommunikationsgrundlage und fördern einen Austausch mit den Inhalten des Zielsystems. Schließlich wird durch die Befragten ein Nutzen in der Kombination der Views mit den wiederkehrenden Modellierungsaktivitäten gesehen. Der Großteil der Befragten antwortet hierbei jedoch nur mit „stimme eher zu“. Ein Vorteil der Views wird insbesondere in deren Nutzung bei regelmäßigen Meilensteinen gesehen. (Windisch et al., 2022)

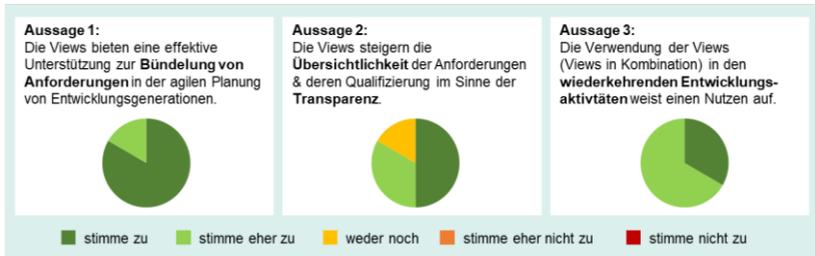


Abbildung 8.14: Auswertung der semistrukturierten Interviews zu Mehrwert und Anwendbarkeit des entwickelten Ansatzes in der Untersuchungsumgebung (adaptiert nach Windisch et al., 2022, S. 554)

8.2.3 Interpretation und Studienfazit

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung zeigen das Potenzial der Kombination aus einem strukturierenden Framework und iterativ durchführbarer Modellierungsaktivitäten zur Steigerung der Akzeptanz modellbasierter Ansätze in der industriellen Anwendung. Der entwickelte Ansatz ermöglicht die kontinuierliche Durchführung der Modellierungsaktivitäten in unterschiedlichen Entwicklungsgenerationen. Durch die agile (Weiter-) Entwicklung der Anforderungen und Testfälle wird einerseits die Kontinuität in der Validierung unterstützt. Gleichzeitig wird die Durchgängigkeit durch die integrierte Modellierung von Anforderungen und Testfällen adressiert. Anforderungen, Testfälle und die geplante Modellierungsaktivitäten werden mit Hilfe des Ansatzes zueinander verknüpft, wodurch die Nachvollziehbarkeit von Validierungsaktivitäten gesteigert werden kann.

Eine Datenanalyse zeigt, dass der entwickelte Ansatz und die entsprechend entwickelten Tool-Vorlagen Anwendung in der Praxis finden. In den semistrukturierten Interviews ergibt sich eine positive Bewertung des Ansatzes. So wird durch den Ansatz eine Unterstützung in der Bündelung von Anforderungen für eine Entwicklungsgeneration gesehen. Gleichzeitig sehen die Befragten einen positiven Effekt auf die Übersichtlichkeit und Transparenz hinsichtlich der modellierten Anforderungen und deren Qualifizierung. Zudem wird die Kombination aus strukturierenden Views in einem Framework und wiederkehrenden Modellierungsaktivitäten positiv bewertet.

Die vorgestellte Studie lässt somit die Interpretation zu, dass die für die MBSE-Methodik entwickelten Bestandteile Potenzial sowohl zur Unterstützung der

Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit, als auch zur Steigerung der Akzeptanz modellbasierter Ansätze in der industriellen Anwendung aufweist. Dies stützt somit die in Absatz 3.2 aufgestellten Forschungsthesen. Der in diesem Absatz beschriebene Ansatz ist jedoch stark auf die Bedarfe des Unternehmens der Untersuchungsumgebung zugeschnitten und betrachtet nur einen kleinen Ausschnitt des anvisierten Einsatzgebietes der entwickelten MBSE-Methodik. So wird beispielsweise keine explizite Modellierung von Bedarfen und Zielen vorgenommen. Die Unterscheidung und Modellierung der Zusammenhänge von Bedarfen, Zielen und Systemanforderungen spielt jedoch für die zielgerichtete Planung, Durchführung und Interpretation von Validierungsergebnissen eine zentrale Rolle (siehe Absatz 5.2). Im folgenden Absatz wird daher eine weitere Implementierungsstudie vorgestellt, bei der die vollständige MBSE-Methodik im Rahmen des Projekts MoSyS eingesetzt, weiterentwickelt und evaluiert wurde.

8.3 Beitrag zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz der MBSE-Methodik – Untersuchung im Projekt MoSyS

Die entwickelte MBSE-Methodik wurde kontinuierlich im Rahmen des Projekts MoSyS eingebracht und evaluiert. Erkenntnisse aus dieser Evaluation fließen in die Detaillierung und Weiterentwicklung der MBSE-Methodik ein. Insbesondere wurde in MoSyS untersucht, inwieweit die entwickelte MBSE-Methodik dank der in Absatz 7.4 beschriebenen Maßnahmen einen positiven Beitrag zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz im Vergleich zu bestehenden MBSE-Ansätzen gemäß der in Absatz 5.3 beschriebenen Handlungsfelder leisten kann.

In Absatz 8.3.1 wird das Studiendesign der Untersuchungen in MoSyS detailliert. Ergebnisse der Untersuchung werden entlang der in Absatz 5.3 herausgearbeiteten Handlungsfelder in Absatz 8.3.2 vorgestellt. Eine Interpretation der Ergebnisse und ein Studienfazit folgen in Absatz 8.3.3. Die Ergebnisse der Studie sind dabei als qualitativ zu verstehen. Insbesondere aufgrund der kleinen Stichprobe an Teilnehmenden der Studie, einer fehlenden Kontrollgruppe und gemäß dem (zeitlichen) Rahmen der Dissertation wird kein Anspruch auf eine vollständige, quantitative Evaluation erhoben. Nichtsdestotrotz können die Ergebnisse der Studie starke Signale hinsichtlich erzielter Mehrwerte, aber auch weiterer Forschungsbedarfe für die entwickelte MBSE-Methodik liefern. Zudem befand sich die MoSyS-MBSE-Methodik zum Zeitpunkt der Studie noch in der Entwicklung. Stellenweise weisen einige der Befragten daraufhin, dass eine abschließende Bewertung zu spezifischen Fragen daher noch nicht final möglich sei. Auszüge der Studie wurden in Mandel et al. (2023) veröffentlicht.

8.3.1 Studiendesign der Untersuchung

Wie beschrieben stellt das Projekt MoSyS eine zentrale Forschungsumgebung für die vorliegende Arbeit dar. Über den Verlauf des Projekts wird die für diese Arbeit entwickelte MBSE-Methodik kontinuierlich in die Forschungsumgebung MoSyS eingebracht, evaluiert und weiterentwickelt. Die Tool-Umsetzung erfolgt für MoSyS in iQuavis (siehe auch Abbildung 7.8). In den folgenden Beschreibungen dieses Absatzes wird daher die Bezeichnung MoSyS-MBSE-Methodik für die spezifische Ausprägung der für diese Dissertation entwickelten MBSE-Methodik im Projekt MoSyS verwendet.

Für die Untersuchung wurden in MoSyS sieben semistrukturierte Experteninterviews mit Partnern von sechs unterschiedlichen Unternehmen durchgeführt. Die Unternehmen kamen dabei aus dem Bereich des Sondermaschinenbaus (zwei), Automobilzulieferer, Werkzeugmaschinenbau, Produktentwicklungs-Dienstleistung sowie MBSE-Tool-Entwicklung und -Beratung. Die Interviews fanden ca. nach der Hälfte der Laufzeit des Projekts MoSyS statt. Arbeiten mit Bezug zur MBSE-Methodik laufen in MoSyS seit Projektbeginn, so dass die Befragten sich bereits längere Zeit intensiv mit dem Thema auseinandergesetzt hatten. Die spezifische Ausprägung der MBSE-Methodik für MoSyS war zum Zeitpunkt der Interviews jedoch noch in Erarbeitung, so dass sich die Interviews auf einen entsprechenden Zwischenstand beziehen.

Ihre Vorkenntnisse (vor MoSyS) zu (MB)SE gaben die Befragten auf einer Skala von eins (keine Vorkenntnisse) bis fünf (tiefgehendes Expertenwissen) durchschnittlich im mittleren Bereich (Durchschnittswert 2,86) an, wobei jeweils einmal die eins und einmal die fünf angegeben wurde. In Tabelle 8.1 sind die von den Befragten genannten und ihnen bekannte MBSE-Ansätze aufgeführt, zur Übersichtlichkeit eingeteilt in Modellierungssprachen, Modellierungsmethoden /Architektur-frameworks und Modellierungstools.

Tabelle 8.1: Von den Interviewpartnern genannte bekannte Modellierungssprachen, Modellierungsmethoden/ Architekturframeworks und Modellierungstools

Modellierungssprachen	Modellierungsmethoden/ Architekturframeworks	Modellierungstools
BPMN	SYSMOD	iQuavis
SysML	CONSENS	Vector Informatik Tools
UML	FAS	Enterprise Architect
CONSENS	Zachman	Cameo Systems Modeler
	MagicGrid	PTC Modeler
	(ASPICE als Reifegradmodell für Prozesse)	Papyrus

Entlang der zehn in Absatz 5.3.2 beschriebenen Handlungsfelder wurden die Teilnehmenden gefragt, ob der Aufbau der entwickelten MoSys-MBSE-Methodik einen Beitrag zu deren individueller und organisatorischer Akzeptanz im Vergleich zu diesen ihnen bekannten MBSE-Ansätzen leisten kann. Hierzu wurde eine Skala von – 2 (starke Verschlechterung hinsichtlich des Handlungsfelds) bis + 2 (starke Verbesserung hinsichtlich des Handlungsfelds) verwendet. Gleichzeitig wurden die Interviews aufgenommen, um Bemerkungen zu den einzelnen Bewertungen und zusätzliche Kommentare aufzunehmen und auswerten zu können. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese Aufteilung lediglich zur Strukturierung der qualitativen Umfrage und deren Ergebnisse dient. Die Handlungsfelder sind nicht als unabhängige Kategorien zu verstehen, sondern überschneiden und beeinflussen sich teils gegenseitig. Auch stellen die einzelnen Fragen in den einzelnen Handlungsfeldern keinen Anspruch auf eine vollständige Validierung der MBSE-Methodik. Vielmehr sollen sie bei der Auswertung und Analyse der qualitativen Interviews unterstützen und einen Strukturrahmen bieten. Der Fragebogen zur Durchführung der semistrukturierten Interviews ist in Anhang F aufgeführt.

8.3.2 Ergebnisse der Untersuchung entlang der identifizierten Handlungsfelder

Wahrgenommene Leistungsfähigkeit von MBSE durch den Einsatz der MoSys-MBSE-Methodik im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen

Wie in Abbildung 8.15 dargestellt, sehen die Befragten einen positiven Beitrag der MoSys-MBSE-Methodik hinsichtlich des wahrgenommenen Mehrwerts von MBSE im Vergleich zu den ihnen bekannten Referenzen (Durchschnittsbewertung 1,5). Eine befragte Person sieht durch die vorgegebene Struktur bei der Modellierung

eine Verbesserung der Einheitlichkeit bei der Modellierung, wodurch Anwendende weniger Freiheiten hätten, etwas „falsch“ zu modellieren. Eine abschließende Bewertung auf dem zum Zeitpunkt der Interviews vorliegenden Stand der MoSys-MBSE-Methodik ist für einige Befragte jedoch noch nicht final zu treffen. So merkt eine Person an, dass die Strukturierung über Viewpoints/Views und das Architekturframework bei passender Umsetzung einen großen Mehrwert böten. Es bestünde jedoch auch die Gefahr, durch unpassende Entscheidungen beim Aufbau der Methodik, beispielsweise zu viele Elemente in der Ontologie oder nicht nachvollziehbarer Anordnung der Viewpoints/Views im Architekturframework, zusätzliche Komplexität in die Modellierung einzubringen.

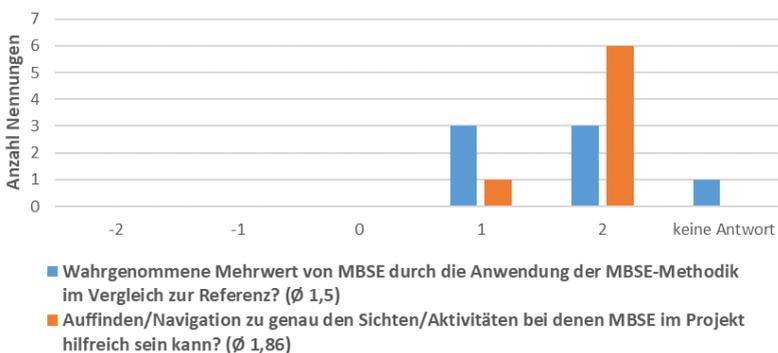


Abbildung 8.15: Auswertung der Interviews in MoSys hinsichtlich des Handlungsfelds „Wahrgenommene Leistungsfähigkeit“

Mit einer Durchschnittsbewertung von 1,86 sehen die Befragten eine große Verbesserung durch die MoSys-MBSE-Methodik im gezielten Auffinden von Sichten/Aktivitäten, bei denen MBSE im Projekt hilfreich sein kann. Hierbei sieht eine befragte Person einen Vorteil durch eine klarere Festlegung des Modellierungsumfangs durch die gezielte Auswahl von Sichten und Modellierungsaktivitäten für den Modellierungszweck.

Intuitive Anwendbarkeit der MoSys-MBSE-Methodik im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen

In den Interviews geben die Befragten an, dass die MoSys-MBSE-Methodik einen Mehrwert hinsichtlich des Findens eines schnellen Einstiegs in die Modellierung sowie des gezielten Auffindens der Modellierungstätigkeiten und Diagramme, die für einen gewünschten Modellierungszweck/Problemstellung relevant sind liefert (beide Male Durchschnittsbewertung 1,14, siehe Abbildung 8.16). Eine befragte

Person merkt an, dass durch die MoSys-MBSE-Methodik zwar ein Mehrwert zum schnellen Einstieg beziehungsweise Auffinden von Modellierungsaktivitäten /Diagramme geliefert werde, der Umfang jedoch immer noch sehr „mächtig“ sei. Die Person schlägt daher vor, zusätzlich über rollenspezifische Filterungen der Viewpoints und Modellierungsaktivitäten nachzudenken. Ähnliche Konzepte zu rollenspezifischen Filtern werden auch von zwei weiteren Befragten vorgeschlagen.

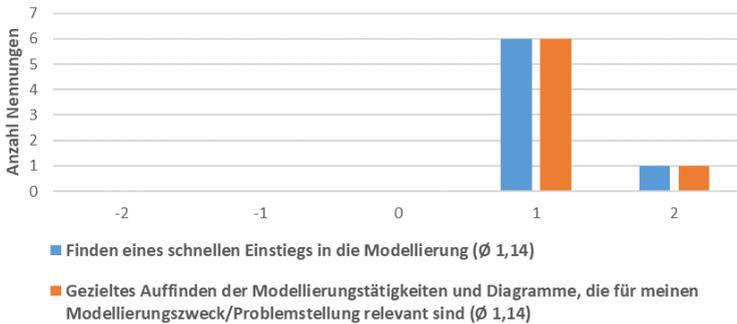


Abbildung 8.16: Auswertung der Interviews in MoSys hinsichtlich des Handlungsfelds „Intuitive Anwendbarkeit“

Eine weitere befragte Person gibt an, dass aus ihrer Sicht das Architekturframework gut zur Navigation im Modell und die Modellierungsaktivitäten gut zur Unterstützung bei der Modellierung an sich herangezogen werden könnten. Diese Person vermutet jedoch zusätzlich, dass für komplette Neueinsteiger in die MBSE-Modellierung, ein Wasserfall-artiges Modellierungsvorgehen noch intuitiver sein könnte. Der Mehrwert des iterativen und agilen Modellierens mit Hilfe der Modellierungsaktivitäten würde jedoch ab einem gewissen Grundwissen ersichtlich.

Zuletzt merkt die befragte Person mit tiefgehenden MBSE-Vorkenntnissen an, dass sie sich bei dem zum Zeitpunkt der Interviews vorliegenden Stand der MoSys-MBSE-Methodik unsicher sei, ob die Vorgabe der Modellierungsaktivitäten unter Umständen schon zu stark einschränkend für die Modellierung sei.

Flexibilität und Adaptierbarkeit der MoSys-MBSE-Methodik im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen

Die Befragten geben an, eine Verbesserung der Möglichkeit zur flexiblen, iterativen und agilen Durchführung von Modellierungsaktivitäten durch die MoSys-MBSE-Methodik zu erkennen (Durchschnittsbewertung 1,17, eine Enthaltung, siehe Abbildung 8.17). Auch hier gibt eine befragte Person an, dass eine Bewertung auf

dem vorliegenden Stand der MoSyS-MBSE-Methodik noch schwierig sei. Das Konzept der Modellierungsaktivitäten könne theoretisch eine flexible, iterative und agile Modellierung unterstützen. Bei ungeeignetem Aufsetzen der Modellierungsaktivitäten könne dies jedoch sogar ins Gegenteil umschlagen und eher hemmend wirken. In ähnlicher Weise merkt eine weitere befragte Person an, dass einerseits das Potenzial zur flexiblen, iterativen und agilen Durchführung der Modellierung gesehen werde. Andererseits bestünde jedoch die Gefahr, durch zu viele starre Abhängigkeiten in der Ontologie, das Tailoring der MoSyS-MBSE-Methodik zu erschweren, da beim Weglassen einzelner Modellierungsaktivitäten oder Viewpoints, auf der Ontologie basierende Templates für das genutzte Software-Tool nicht mehr funktionieren könnten.

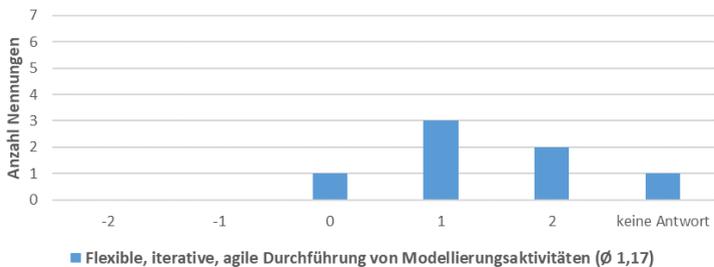


Abbildung 8.17: Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Flexibilität und Adaptierbarkeit der Methodik“

Usability des Modellierungswerkzeugs für die MoSyS-MBSE-Methodik im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen

Die Usability des Modellierungswerkzeugs beziehungsweise die Verbesserung des Zurechtfindens im Software-Tool durch das eingeführte Template wird von den Befragten als sehr gut bewertet (Durchschnittsbewertung 1,5, siehe Abbildung 8.18). Ähnlich wie bei den Fragen zur intuitiven Anwendbarkeit der MoSyS-MBSE-Methodik wird auch hier von einer befragten Person ein Konzept zur Rollen-spezifischen Anpassung des Templates vorgeschlagen.

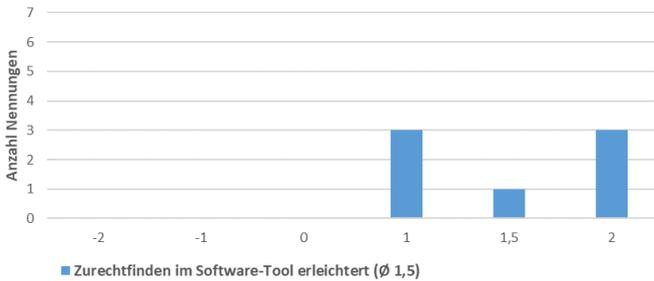


Abbildung 8.18: Auswertung der Interviews in MoSys hinsichtlich des Handlungsfelds „Usability des Software-Tools“

Klares Zielbild und Modellierungsvorgehen für die MoSys-MBSE-Methodik im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen

Eine leichte Verbesserung durch die MoSys-MBSE-Methodik im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen sehen die Befragten hinsichtlich des Festlegens/Klarmachens des Ziels des Einsatzes von MBSE im Projekt (Durchschnittsbewertung 0,36, siehe Abbildung 8.19). Hier wird jedoch zum ersten Mal auch eine Verschlechterung im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen durch eine befragte Person angegeben. Von dieser Person wird angemerkt, dass für Neueinsteiger ein Wasserfall-artiges Modellierungsvorgehen statt der flexiblen Auswahl von Modellierungsaktivitäten und Viewpoints zielgerichteter sein könnte. Letzteres könne jedoch bei Anwendenden mit etwas Erfahrung wiederum zur zielgerichteteren Modellierung beitragen, da durch die Auswahl relevanter Modellierungsaktivitäten und Viewpoints Overhead, wie er in einem starren Modellierungsvorgehen vorhanden wäre, vermieden werden könne. Zu einer weiteren eher kritischen Bewertung kommt eine befragte Person, welche anmerkt, dass das Zielbild für MBSE aus ihrer Sicht auch auf Erfahrungswerten basiere und somit schwierig durch eine MBSE-Methodik an sich vorgegeben werden könne. Das entstandene Zielbild sei jedoch wiederum Grundlage dafür, eine passende MBSE-Methodik nutzen zu wollen. Eine weitere Person merkt an, dass eine Evaluierung mit Personen im Unternehmen, die gegebenenfalls schwieriger von neuen Methoden und Ansätzen im Produktentstehungsprozess zu überzeugen seien als die Teilnehmenden des MoSys-Projekts, noch zusätzliche Erkenntnisse liefern könne.

Die Befragten sehen durch die MoSys-MBSE-Methodik eine Verbesserung der Möglichkeit zum kontinuierlichen Einsatz von MBSE über alle Phasen eines Projekts (Durchschnittsbewertung 1,07). Eine befragte Person gibt an, eine Bewertung, ob

der kontinuierliche Einsatz über alle Phasen eines Projekts möglich sei, sei im vorliegenden Stand der MoSys-MBSE-Methodik noch schwierig zu treffen. Weitere befragte Personen merken an, dass „Phasen“ eines Projekts je nach Person und Unternehmen sehr individuell verstanden werden könnten. Hierdurch wird eine klare Bewertung der Frage erschwert.

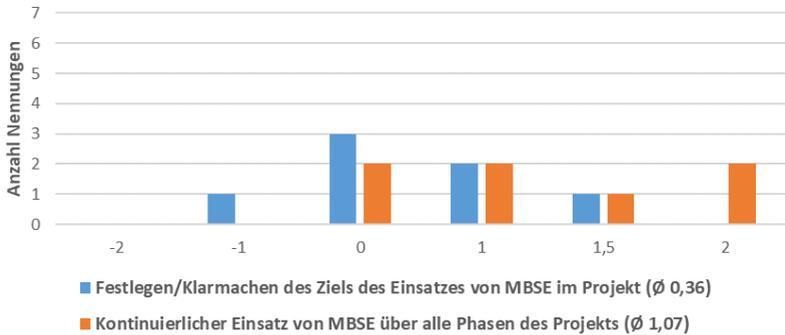


Abbildung 8.19: Auswertung der Interviews in MoSys hinsichtlich des Handlungsfelds „Klares Zielbild und Modellierungsvorgehen“

Ontologie und angemessener Formalisierungsgrad der MoSys-MBSE-Methodik im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen

Die Befragten sehen einen positiven Beitrag der MoSys-MBSE-Methodik zur Unterstützung der Kommunikation im Team (Durchschnittsbewertung 1,43, siehe Abbildung 8.20). Etwas weniger positiv wird von den Befragten der positive Beitrag der MoSys-MBSE-Methodik zur Verbesserung der Kommunikation mit Externen wie beispielsweise Kunden oder Zulieferern bewertet (Durchschnittsbewertung 0,86). Hierbei gibt eine befragte Person an, durch die MoSys-MBSE-Methodik bereits einen positiven Beitrag zu sehen, ein Einsatz von Bildern oder Videos in den erstellten MBSE-Systemmodellen könnte jedoch noch zur weiteren Verbesserung beitragen. Hinsichtlich der Ontologie merkt eine weitere befragte Person an, dass zwischen dem Prozess zu deren Erstellung und deren Nutzung unterschieden werden müsse. Der Erstellungsprozess diene einer eindeutigen Kommunikation und sei sehr positiv zu bewerten. Die Präsentation der (fertigen) komplexen Ontologie sei jedoch schwierig und erschlagend, so dass hier reduzierte Darstellungen benötigt würden. Auch seien die vorhandenen grafischen Darstellungsmöglichkeiten bestehender MBSE-Tools nicht ansprechend. Gemäß einer weiteren befragten Person, sei eine Herausforderung der Ontologie, dass diese erst einen gewissen Reifegrad erreicht haben müsse, damit sie für alle verständlich sei und

zur Kommunikation genutzt werden könne. Diesen Reifegrad beim kompletten Neuaufbau der Ontologie in MoSyS zu erreichen habe für einige Teil-Bereiche fast eineinhalb Jahre gedauert. Eine andere befragte Person merkt an, dass bei der Tool-Umsetzung der MoSyS-MBSE-Methodik in iQuavis viel auf Tabellen zurückgegriffen werde, welche ohne größere Herausforderung verständlich sein sollten. Zusätzlich werden von zwei weiteren befragten Personen insbesondere Diagramme zur Beschreibung von Use Cases und funktionalen Abläufen, wie Aktivitäts- oder Sequenzdiagramme, als gute Darstellungen genannt, die zur Kommunikation und gegenseitigem Verständnis beitragen würden. Laut einer weiteren Person würde eine Verbesserung der Kommunikation dadurch erreicht werden, wenn durch den Einsatz der MoSyS-MBSE-Methodik mehr Personen (über einzelne „Power-User“ hinaus) an der Modellierung und der Nutzung der Modelle beteiligt würden.

Ein gespaltenes Bild mit Bewertungen von -1 bis +2 ergibt sich hinsichtlich der Bewertung der eindeutigen Modellierung und eindeutigen Kommunikation im Team (Durchschnittsbewertung 0,75, eine Enthaltung). Zur negativsten Bewertung von -1 wird hierbei angemerkt, dass das entwickelte Architekturframework grundsätzlich als hilfreich angesehen werde, jedoch sehr formal sei. Dies bedeute, dass erst einmal Zeit benötigt würde, um in die MoSyS-MBSE-Methodik einzusteigen, was einige Personen, die sich nicht mit der Methodik auseinandersetzen möchten, schon frühzeitig abschrecken könne. Von einer weiteren befragten Person wird grundsätzlich ein Mehrwert gesehen, jedoch müsse eine gewisse Flexibilität in der Kommunikation (hinsichtlich der Modellinhalte) beibehalten werden. Die Bewertung sei sehr stark vom Team abhängig. Auch betont die Person, dass die Kommunikation basierend auf der Ontologie und gewissen Vorgaben durch Viewpoints, hilfreicher bei gemeinsamen vor-Ort Workshops als beim Arbeiten in einem Software-Tool sei. Eine weitere Person befürchtet, dass die bislang entwickelte Ontologie bereits zu umfangreich für die Modellierung, also bestehend aus zu vielen Klassen und Verbindungen, sein könnte.

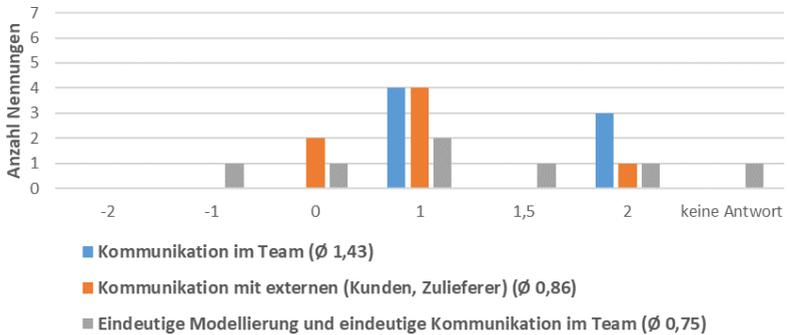


Abbildung 8.20: Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Ontologie und angemessener Formalisierungsgrad“

Aufwand/Nutzen-Verhältnis der MoSyS-MBSE-Methodik im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen

Die Befragten sehen durch die MoSyS-MBSE-Methodik einen positiven Beitrag zum Aufwand/Nutzen-Verhältnis im Vergleich zu bestehenden MBSE-Ansätzen (Durchschnittsbewertung 1,14, siehe Abbildung 8.21).

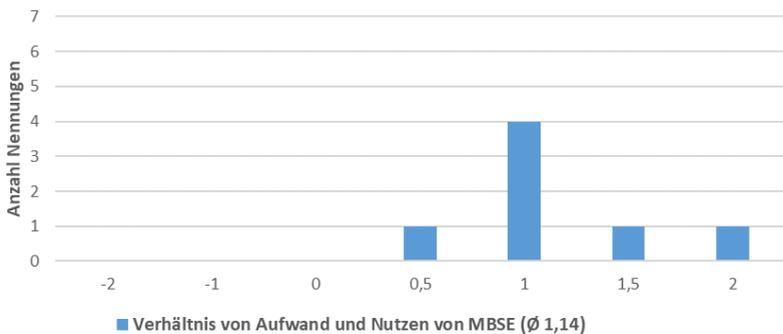


Abbildung 8.21: Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „(monetäres) Aufwand/Nutzen-Verhältnis“

Eine befragte Person betont hierbei den Mehrwert durch die gesteigerte Transparenz. Allerdings sollten „QuickWins“ für die Anwendenden noch stärker sichtbar gemacht werden. Somit könne Anwendenden direkt der Mehrwert durch die Modellierung sichtbar gemacht werden, da bei MBSE der Mehrwert der

Modellierung oft erst bei Wiederverwendung der Modelle und nicht für die Modellierenden selbst ersichtlich sei. Zwei weitere befragte Personen sehen den Einsatz der Modellierung gemäß der MoSyS-MBSE-Methodik als Frontloading-Aktivität.

Lehr-/Lernbarkeit der MoSyS-MBSE-Methodik im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen

Auch wenn einige befragte Personen angeben, eine detaillierte Bewertung sei auf dem vorliegenden Stand der MoSyS-MBSE-Methodik schwierig, wird der Lehr- und Lernbarkeit der Methodik von den Befragten ein Mehrwert im Vergleich zu bestehenden MBSE-Ansätzen zugeschrieben (Durchschnittsbewertung 1,2 bei zwei Enthaltungen, siehe Abbildung 8.22). Vor allem die Modularität der MBSE-Methodik und damit die Möglichkeit modularer Schulungskonzepte werden von den Befragten hervorgehoben. Eine befragte Person gibt dabei an, dass ihr firmeninternes MBSE-Schulungskonzept bereits Ähnlichkeiten aufweise. Eine weitere befragte Person gibt an, ein Schulungskonzept basierend auf der MoSyS-MBSE-Methodik für eine Veranstaltung mit Studierenden außerhalb von MoSyS nutzen zu wollen. Gleichzeitig bemerkt jedoch eine befragte Person, dass die MoSyS-MBSE-Methodik gegebenenfalls schon ein erweitertes MBSE-Konzept sei. Bei einer initialen Schulung benötige es gemäß dieser Person zuerst einige Grundlagen zur Modellierung. Die Inhalte der MoSyS-MBSE-Methodik würden erst darauf aufbauend relevant.

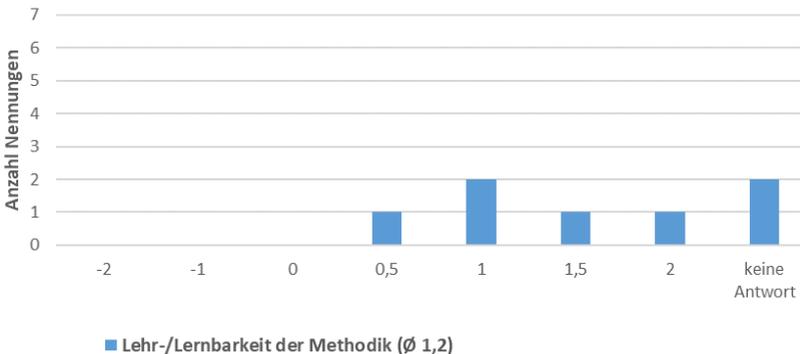


Abbildung 8.22: Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Lehr-/Lernbarkeit der Methodik“

Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit der MoSys-MBSE-Methodik im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen

Mit einer Durchschnittsbewertung von 1,21 sehen die Befragten einen positiven Einfluss der MoSys-MBSE-Methodik zur spezifischen Anpassung/Erweiterung auf eigene Bedarfe im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen (siehe Abbildung 8.23). Auch hier werden von einer befragten Person wieder die Modularität und flexible Erweiterbarkeit der MoSys-MBSE-Methodik positiv hervorgehoben. Eine weitere befragte Person merkt an, dass zusätzlich zur MoSys-MBSE-Methodik der Aufbau einer Bibliothek mit wiederverwendbaren (Teil-)Modellen notwendig beziehungsweise hilfreich sei. Dies ist als weitere Aktivität in MoSys geplant.

Der Beitrag zu Wiederverwendbarkeit von (Teilen von) Modellen wird von den Befragten durchschnittlich mit 1,14 bewertet.

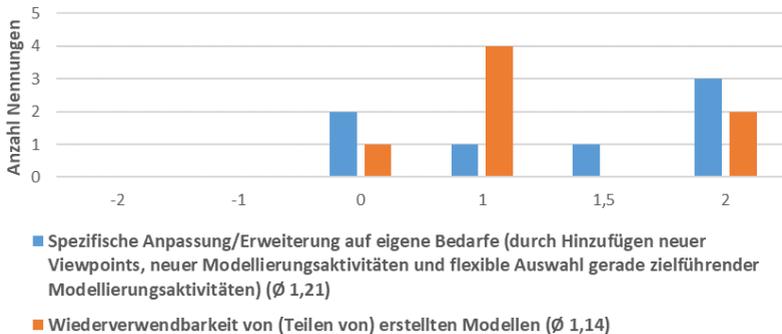


Abbildung 8.23: Auswertung der Interviews in MoSys hinsichtlich des Handlungsfelds „Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit der Methodik“

Bei dieser Frage wird erneut angemerkt, dass eine Bewertung auf dem vorliegenden Stand der MoSys-MBSE-Methodik noch schwierig sei. Eine befragte Person gibt an, dass Wiederverwendbarkeit von Modellen grundsätzlich unterstützt werde, sofern man sich über verschiedene Modelle einer einheitlichen Methodik bediene. Teilweise sei eine Wiederverwendung von Modellen gegebenenfalls sogar einfacher, wenn simple, Wasserfall-artige Modellierungsmethoden verwendet würden, da weniger Individualisierung vorherrschen würde. Bei iterativem und flexiblen Modellierungsvorgehen biete jedoch das Architekturframework und die modulare Auswahl wiederzuverwendender Teil-Modelle einen Mehrwert. Auch eine weitere befragte Person sieht einen großen Mehrwert zur Wiederverwendung, auch wenn dieser auf dem zum Zeitpunkt der Interviews vorliegenden Stand der MoSys-

MBSE-Methodik noch schwierig abschließend zu bewerten sei. Dabei wird insbesondere nochmal der Vorteil der Wiederverwendung von Wissen, welches in zentralen Modellen anstatt in unabhängigen Textdokumenten gespeichert sei, betont.

Problemorientierung/Unterstützung bei der Modellierung des Problemraums der MoSyS-MBSE-Methodik im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen

Als letztes Handlungsfeld wird der Beitrag der MoSyS-MBSE-Methodik zur Verbesserung der Problemorientierung beziehungsweise der Modellierung zur Schärfung des Problemraums/Produktprofils im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen untersucht. Auch hier ergibt sich über die Befragten ein leicht positives Bild (Durchschnittsbewertung 0,86, siehe Abbildung 8.24). Eine befragte Person gibt dabei an, einen positiven Beitrag zu sehen, die Bedeutung und Mehrwerte der konsequenten Modellierung des Problemraums müssten jedoch noch stärker herausgestellt und kommuniziert werden. Von einer anderen befragten Person wird der Mehrwert vor allem in einer frühzeitigen und nachvollziehbaren Beschreibung von Anforderungen und deren Verbindung zum Problemraum gesehen. Eine Person merkt an, dass generell eine Schwierigkeit bei der Modellierung eine Übermodellierung und unzureichende Betrachtung des Problemraums sei. Zusätzlich wird von einer befragten Person wieder der Vorschlag nach dem Einbringen von Bildern zur Unterstützung der Modellierung und Kommunikation des Problemraums eingebracht. Weiterhin wird von einer befragten Person angebracht, dass hinsichtlich des Problemraums noch User Stories, wie sie unter anderem in agilen Ansätzen eingesetzt werden, in der Ontologie ergänzt werden sollten. Schließlich betont eine Person, dass die Modellierung des Problemraums kontinuierlich und im Wechselspiel mit der Ausarbeitung der Lösung und nicht als übergeordnete und vorgelagerte Aktivität geschehen muss.

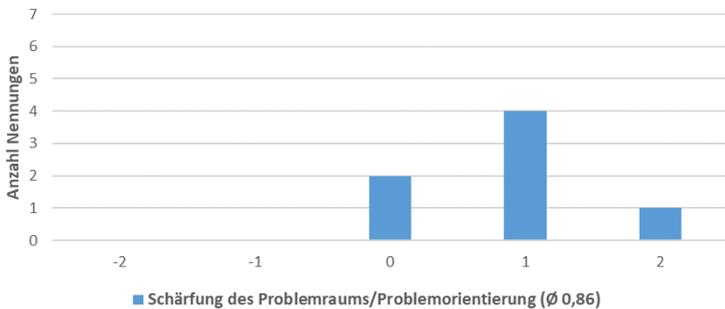


Abbildung 8.24: Auswertung der Interviews in MoSyS hinsichtlich des Handlungsfelds „Problemorientierung/Unterstützung bei der Modellierung des Problemraums“

Zusätzliche freie Kommentare aus den Interviews

Zusätzlich gaben drei befragte Personen Kommentare unabhängig der beschriebenen Handlungsfelder. Eine Person merkt dabei an, dass die Gefahr bestünde, beim gemeinsamen Modellieren Personen ohne tiefere Modellierungskennnisse abzuhängen. Hierdurch könnten Spaltungen in einer Gruppe/einem Team entstehen. Auch eine parallele Modellierung sei schwierig. Hierfür benötige es Modellierende, die alle die gleiche Methodik nutzen beziehungsweise anwenden könnten. Dafür würden klare Regeln benötigt, um konsistente und von allen Beteiligten nachvollziehbare Modelle zu erzeugen, was aufgrund der vielen Freiheiten bei der Modellierung aber schwierig sei.

Die Kommentare der beiden anderen Personen betonen nochmal, dass sie einen Mehrwert durch die MoSyS-MBSE-Methodik und den Ansatz der menschenorientierten Ausrichtung auf einzelne Anwendende sehen.

8.3.3 Interpretation und Studienfazit

Die oben aufgeführten Ergebnisse zeigen eine durchweg positive Bewertung der MoSyS-MBSE-Methodik im Vergleich zu bekannten MBSE-Ansätzen durch die Befragten. Die Ergebnisse der Umfrage deuten darauf hin, dass die integrierte Bereitstellung aller Kernbestandteile in der entwickelten MBSE-Methodik und die bedarfsgerechte und iterative Modellierung durch die Einführung der Modellierungsaktivitäten, einen positiven Beitrag zur individuellen und

organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in der (industriellen) Anwendung leisten kann. Dies stützt demnach Forschungsthese 2.

Die am positivsten bewerteten Handlungsfelder der Befragten finden sich in der Verbesserung der wahrgenommenen Leistungsfähigkeit von MBSE durch die entwickelte MBSE-Methodik (Durchschnittsbewertung 1,5 und 1,86) Usability des Modellierungstools (Durchschnittsbewertung 1,5) sowie der Verbesserung der Kommunikation im Team (Durchschnittsbewertung 1,43). Etwas schwächer, aber immer noch mit Mehrwert gegenüber bekannten MBSE-Ansätzen, wurde hingegen die Etablierung eines klaren Zielbilds und Modellierungsvorgehens (Durchschnittsbewertung 0,36), die eindeutige Modellierung und eindeutige Kommunikation im Team (Durchschnittsbewertung 0,75) sowie die Kommunikation mit Externen und die Unterstützung bei der Modellierung/Schärfung des Problemraums (beide Durchschnittsbewertung 0,86) bewertet.

Die MoSyS-MBSE-Methodik basiert dabei auf den in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen und wird in MoSyS kontinuierlich evaluiert und weiterentwickelt. Daher weisen die Befragten bei einigen Antworten darauf hin, dass sich finale Bewertungen beim aktuellen Zwischenstand nur mit einer gewissen Unsicherheit treffen ließen.

Es muss betont werden, dass die Ergebnisse, insbesondere aufgrund der kleinen Stichprobe an befragten Personen, qualitativ zu verstehen sind und dass kein Anspruch auf eine vollständige, quantitative Validierung der entwickelten MBSE-Methodik erhoben wird. Im Rahmen der Dissertation war eine solche quantitative Validierung mit einer größeren Stichprobe an Befragten und einer Kontrollgruppe nicht darstellbar. Nichtsdestotrotz können die Ergebnisse der Studie starke Signale hinsichtlich der angestrebten Evaluation der entwickelten MBSE-Methodik liefern, insbesondere hinsichtlich deren Potenzial zur Steigerung der individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in der (industriellen) Praxis.

Die Befragten kommen aus verschiedenen Unternehmen und Industrien. Damit konnte ein breites Bild an Meinungen eingeholt werden. Gleichzeitig hatten die Befragten jedoch sehr unterschiedliche Vorerfahrungen mit (MB)SE. Zudem nannten sie eine Vielzahl unterschiedlicher bekannter MBSE-Ansätze, zu denen die Vergleiche während der Interviews gezogen wurden. Schließlich waren alle Befragten aktiv in die Evaluierung und (Weiter-) Entwicklung der MoSyS-MBSE-Methodik eingebunden. Dies muss bei der Interpretation der Interviewergebnisse berücksichtigt werden.

Um die in dieser Dissertation entwickelte MBSE-Methodik mit zusätzlichen externen Personen zu evaluieren sowie die im Rahmen des Forschungsvorgehens

beschriebene Education Study (siehe Absatz 4.1) durchzuführen, wurde daher in ähnlicher Weise wie in MoSyS, eine Interviewstudie mit Studierenden des Live-Labs IP 2021/2022 durchgeführt.

9 Lehre- und Implementierungsstudie

Als zusätzliche Evaluation der entwickelten MBSE-Methodik, wird diese im Live-Lab IP 2021/2022 angewendet. Hierbei wird zudem im Sinne der Education Study nach dem verfolgten Forschungsvorgehen (siehe Absatz 4.1) ein Schulungskonzept für die Methodik entwickelt und untersucht. Das Live-Lab IP 2021/2022 wurde zusammen mit dem Unternehmenspartner Gerhard Schubert GmbH durchgeführt. Ziel war die Entwicklung von Konzepten für kundenorientierte und flexible Verpackungsprozesse und -maschinensysteme.

Im Fokus der Untersuchung stand, analog zur in Absatz 8.2.3 beschriebenen Untersuchung, die Evaluation der individuellen und organisatorischen Akzeptanz der entwickelten MBSE-Methodik gemäß den Beschreibungen in Absatz 5.3. Die Untersuchung wurde zudem um Fragen zur Evaluation der MBSE-Methodik hinsichtlich der Unterstützung von Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess aufgenommen. Die Ergebnisse zur Untersuchung im Live-Lab IP 2021/2022 wurden auch von Mandel, Martin und Albers (2022) publiziert. In Absatz 9.1 wird zunächst das Studiendesign der Untersuchung im Live-Lab IP 2021/2022 vorgestellt. Anschließend folgen in Absatz 9.2 die Ergebnisse der Studie. Die Ergebnisse werden dabei gemäß der Handlungsfelder zur individuellen Akzeptanz, der Handlungsfelder zur organisatorischen Akzeptanz und der Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung präsentiert. Schließlich werden die Ergebnisse in Absatz 9.3 interpretiert und ein Studienfazit gezogen.

Auch die Ergebnisse der in diesem Kapitel vorgestellten Lehre- und Implementierungsstudie sind als qualitativ zu verstehen und erheben nicht den Anspruch einer vollständigen, quantitativen Evaluation. Analog zur Studie im Projekt MoSyS (siehe Absatz 8.3) liegt dies insbesondere im geringen Umfang an Studienteilnehmenden und dem (zeitlichen) Rahmen der Dissertation begründet. Die Studienergebnisse können jedoch trotzdem einen qualitativen Eindruck und starke Signale zur Evaluation der entwickelten MBSE-Methodik und deren Schulung liefern.

9.1 Studiendesign

Analog zur Untersuchung im IP Jahrgang 2019/2020 (siehe Absatz 6.3), arbeiteten die Studierenden im IP Jahrgang 2021/2022 wieder in sieben Teams. In jedem Team hatte ein Mitglied die Rolle des Systemingenieurs/ der Systemingenieurin inne. Die Aufgaben des Systemingenieurs/ der Systemingenieurin umfasste wiederum unter anderem den Aufbau und die Pflege von MBSE-Systemmodellen. Die Schulung der Systemingenieure/ Systemingenieurinnen zur MBSE-Methodik bestand in einem dreistündigen Workshop sowie einem Input in Form eines Videos an die Studierenden zu Fragen, die sich in den ersten drei Wochen der Modellierung angesammelt hatten. Zudem wurde wieder eine Textdokumentation zur Schulung (ähnlich wie im IP Jahrgang 2019/2020) zur Verfügung gestellt. Für die Modellierung verwendeten die Studierenden eine verkürzte Version der in Kapitel 7 beschriebenen MBSE-Methodik. Die Tool-Umsetzung fand in Cameo Systems Modeler statt (siehe nächster Absatz).

Durch die Nutzung des entwickelten Architekturframeworks und der Modellierungsaktivitäten, kann die Schulung zur entwickelten MBSE-Methodik modularisiert werden. Nicht alle der entwickelten Modellierungsaktivitäten und Viewpoints sind für jeden Einsatz von MBSE relevant. In Vorbereitung der Schulung zu IP 2021/2022 wurde daher analysiert, welche Modellierungsaktivitäten tatsächlich im Rahmen von IP durchgeführt werden sollten. Dementsprechend wurden ausschließlich eine Auswahl relevanter Modellierungsaktivitäten sowie die damit verknüpften Viewpoints des Architekturframeworks in das Template für das Modellierungstool übernommen. Da sich auch die Dokumentation zur Schulung an den Modellierungsaktivitäten orientiert, wurden dementsprechend auch nur die betrachteten Modellierungsaktivitäten und verknüpften Viewpoints in der Schulung erläutert. Es ergibt sich somit ein „Sub-Set“ der MBSE-Methodik, welches speziell auf das Ziel der Modellierung in IP angepasst ist. So sind Aktivitäten zur Modellierung von Testabläufen und Testkonfigurationen (siehe Absatz 6.2) nicht im Layer der Modellierungsaktivitäten des Validierungssystems in der MBSE Methodik für IP 2021/2022 inkludiert.

Zum Ende des Projekts wurde mit jedem der Systemingenieure/ Systemingenieurinnen ein semistrukturiertes Interview geführt. Im Interview wurde dabei einerseits die Zustimmung der Befragten zu Aussagen, die auf den in Absatz 5.3 herausgearbeiteten Handlungsfeldern für die individuelle und organisatorische Akzeptanz der MBSE-Methodik basieren, abgefragt. Hierfür wurde ein Likert Skala von 1 – 4 (1: stimme überhaupt nicht zu – 2: stimme eher nicht zu – 3: stimme eher zu – 4: stimme sehr zu) verwendet. Zudem wurden weitere Anmerkungen der Studierenden zu den Fragen aufgezeichnet sowie vertiefenden freie Fragen gestellt

und aufgezeichnet. Zusätzlich wurden nach einem ähnlichen Aufbau Fragen zur Methode zur Unterstützung der Durchgängigkeit, Kontinuität und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess, der Modellierung von Referenzsystemelementen und Variationsarten sowie zum modellbasierten Änderungsmanagement gestellt. Die letzten beiden sind dabei nicht Fokus dieser Arbeit. Der Fragebogen zur Durchführung der semistrukturierten Interviews ist in Anhang G aufgeführt.

9.2 Studienergebnisse

Die sieben befragten Studierenden belegten die Studiengänge Maschinenbau (fünf Studierende), Mechatronik und Wirtschaftsingenieurwesen (jeweils eine studierende Person). Von den Studierenden gab nur eine Person an, tiefgehende Vorkenntnisse in MBSE zu haben. Eine andere Person hatte erste Vorkenntnisse. Die anderen Befragten gaben an, keine Vorkenntnisse zu haben. Die Auswertung der Umfrage wird im Folgenden anhand der in Absatz 5.3 herausgearbeiteten Handlungsfelder vorgestellt.

9.2.1 Handlungsfelder zur individuellen Akzeptanz

Wahrgenommene Leistungsfähigkeit von MBSE

Auf die Frage, ob Sie den Mehrwert von MBSE für ihr Projekt erkennen, antworteten die Studierenden zwischen „eher nicht“ und „eher ja“ (siehe Abbildung 9.1). In den freien Kommentaren wird dabei jedoch häufig angemerkt, dass ein Mehrwert, insbesondere für größere Projekte gesehen werde. Im Rahmen von IP, wo die Projektmitarbeitenden sehr intensiv, zeitlich beschränkt und räumlich eng zusammenarbeiten, wurde nach Aussage einiger Befragten viel über eine direkte Kommunikation geregelt. Somit seien ausführliche MBSE-Systemmodelle zum Informationsaustausch nicht zwingend notwendig gewesen. Auch werde der Mehrwert dadurch beschränkt, dass nicht alle Teammitglieder Vorwissen in MBSE hätten und so der Systemingenieur/die Systemingenieuren teilweise Zeit darauf verwenden müsse, bestimmte Diagramme oder andere Inhalte aus dem Systemmodell zu erklären. Andere Dokumentationsformen wurden daher als schneller wahrgenommen. Eine Person merkte dabei vor allem an, dass gerade durch das sehr dynamische Projektgeschehen in IP, viel Zeitaufwand in die Pflege und Aktualisierung der Modelle geflossen sei. Dies werde dadurch verstärkt, dass die Verantwortung für die Pflege der Systemmodelle bei einer Person lag. Es wurde daher vorgeschlagen, dass alle Teammitglieder die Möglichkeit haben sollten, Informationen zum Modell hinzuzufügen. Gleichzeitig wird die Frage, ob die MBSE-

Methodik dabei unterstütze zu genau den Sichten/Aktivitäten zu navigieren, bei denen MBSE in Ihrem Projekt hilfreich sein kann von den Befragten als sehr positiv bewertet (siehe Abbildung 9.1).

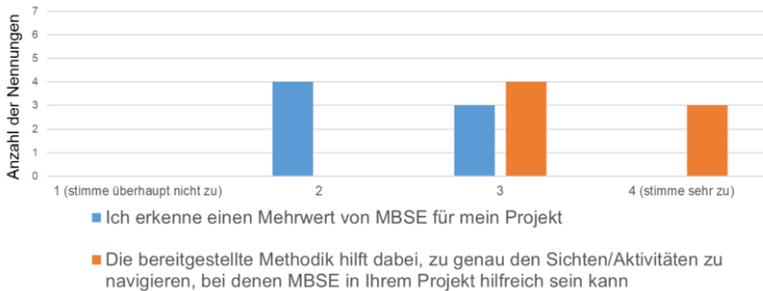


Abbildung 9.1: Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Wahrgenommene Leistungsfähigkeit von MBSE"

Intuitive Anwendbarkeit der MBSE-Methodik

Die Studierenden stimmten zu, dass das Schulungskonzept, auf Basis der entwickelten MBSE-Methodik, dabei helfe, einen schnellen Einstieg in die Modellierung zu finden (siehe Abbildung 9.2, blau). Eine befragte Person gab dabei an, dass sie nach einem Tag das Template im Modellierungstool verstanden habe und daher mit dem Modell arbeiten konnte. Auch die befragte Person, die bereits tiefgehende Vorkenntnisse in MBSE hatte, bemerkte, dass der Einstieg über die MBSE-Methodik im Vergleich zum Einstieg ohne deutlich schneller gelang. Außerdem ergab sich ein positives Bild bei der Frage, ob die MBSE-Methodik dabei unterstütze, schnell und gezielt genau die Modellierungsaktivitäten und Diagramme zu finden, die für eine Problemstellung/Modellierungszweck relevant sind (siehe Abbildung 9.2, orange). Eine Anmerkung bestand jedoch darin, dass die befragte Person es teilweise als schwierig empfand, genau die Modellierungsaktivität beziehungsweise Viewpoint zu identifizieren, der für eine sehr konkrete Frage-/Problemstellung im Projekt zu nutzen wäre.



Abbildung 9.2: Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Intuitive Anwendbarkeit der MBSE-Methodik"

Flexibilität und Adaptierbarkeit der MBSE-Methodik

Die Studierenden stimmten mehrheitlich zu, dass sie die Modellierungsaktivitäten während des Produktentstehungsprozesses flexibel/iterativ/ohne „Wasserfall-Reihenfolge“ durchgeführt haben/ durchführen konnten, was eine zielorientierte Modellierung unterstütze (Abbildung 9.3). Dabei beschreiben die Befragten häufig, dass sie zunächst „Wasserfall-artig“ vorgegangen seien, um das Modell initial zu befüllen, im Folgenden aber iterativ und auch „springend“ zwischen den Modellierungsaktivitäten gearbeitet hätten.



Abbildung 9.3: Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Flexibilität und Adaptierbarkeit der MBSE-Methodik"

Usability des Modellierungswerkzeugs

Das bereitgestellte und auf die entwickelte MBSE-Methodik angepasste Template wurde als Erleichterung beim Zurechtfinden im Modellierungstool (Cameo Systems Modeler) betrachtet (siehe Abbildung 9.4). Eine befragte Person gab dabei an, dass

die Einarbeitungszeit in das Tool ca. drei Tage betragen habe, während sie aus Erfahrungen von Kollegen eine Einarbeitungszeit von ca. 2 Monaten in dasselbe Modellierungstool erfahren hätte. Dies kann als Signal gesehen werden, dass die eingeführte MBSE-Methodik zu einer Verbesserung der Usability des Modellierungstools beitragen kann. Zudem wird von einer befragten Person die Anpassung der Diagrammleiste im Tool (siehe Abbildung 7.7) als besonders hilfreich hervorgehoben. Auch stimmten die Studierenden mehrheitlich zu, dass im bereitgestellten Template und dem Software-Tool alle Funktionen erklärt würden, die zur Modellierung in ihrem Projekt benötigt würden (siehe Abbildung 9.4). Die befragte Person mit Vorerfahrungen in MBSE merkte an, dass sie einen Mehrwert des Templates vor allem für Einsteiger und die angestrebte Anwendung von MBSE sehe. Für Experten, die unter Umständen Individualisierungen und Erweiterungen einbringen möchten, sei das Template eventuell zu starr. Ähnliche Aussagen wurden ebenfalls von einigen Befragten für die Untersuchung im Projekt MoSys getroffen (siehe Absatz 8.3).

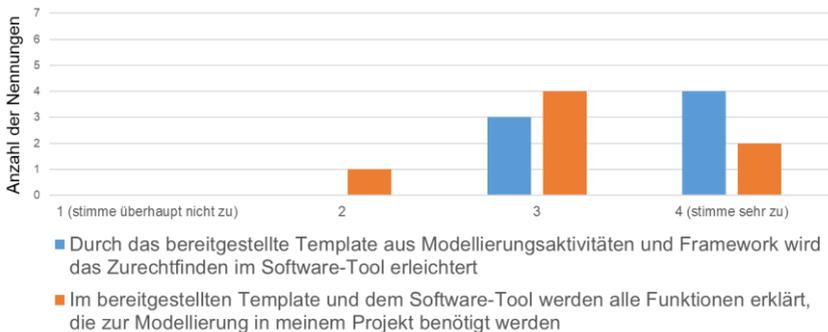


Abbildung 9.4: Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Usability des Modellierungswerkzeugs"

Klares Zielbild und Modellierungsvorgehen

Ein eher geteiltes Bild ergibt sich bei den Fragen nach der Unterstützung der entwickelten MBSE-Methodik zur Etablierung eines klaren Zielbilds und Modellierungsvorgehens. Einerseits stimmten die Studierenden eher zu, dass Ihnen Ziel und Einsatz von MBSE im Projekt klar waren (siehe Abbildung 9.5, blau). Gleichzeitig beschreiben die befragten Systemingenieure/Systemingenieurinnen es jedoch als schwierig, das Zielbild an ihre Teammitglieder zu kommunizieren, die nicht mit Details der MBSE-Methodik beziehungsweise der Modellierung vertraut waren. Zudem stimmten die Studierenden eher nicht zu, dass sie MBSE über alle Phasen des Produktentstehungsprozesses kontinuierlich einsetzen konnten (siehe

Abbildung 9.5, orange). Laut Kommentaren wurden die Modellierung insbesondere in früheren Phasen des Projekts (Konzeptphase und Konkretisierungsphase) und weniger beim Aufbau der Prototypen verwendet. Trotzdem wurden die Modelle teilweise weiterhin als Informationsbasis genutzt, wenn auch nicht weiter ergänzt. Als Fokus und größte Hilfestellung durch die Modellierung wurde die Entwicklung der Systemstruktur genannt. Als schwierig und unklar von der Vorgehensweise wurde die Modellierung (zeitlicher) Abläufe und deren Bezug zur Modellierung der funktionalen Architektur wahrgenommen. Auch wird ein häufiges Anpassen des Modells, beispielsweise basierend auf Ergebnissen einer Vielzahl von durchgeführten Testfällen, als sehr zeitaufwendig beschrieben.

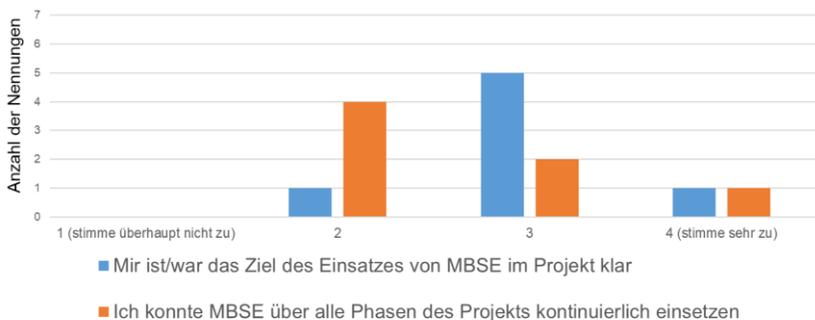


Abbildung 9.5: Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Klares Zielbild und Modellierungsvorgehen"

Ontologie und angemessener Formalisierungsgrad

Ein ähnlich geteiltes Bild ergibt sich hinsichtlich des Handlungsfelds zur Ontologie und einem angemessenen Formalisierungsgrad der MBSE-Methodik. Hier stimmten die befragten Studierenden mehrheitlich zu, dass das Modellieren mit den bereitgestellten und auf der entwickelten Ontologie basierenden Elementen die eindeutige Kommunikation und Modellierung im Team unterstütze (Abbildung 9.6, grau) und nicht behindere (Abbildung 9.6, gelb). Ähnlich wie bei den Beschreibungen zum Template für das Modellierungstool wurde auch hier von der befragten Person mit MBSE-Vorkenntnissen angemerkt, dass dies insbesondere für Einsteiger hilfreich sei, Experten jedoch unter Umständen behindere.

Andererseits konnten/wurden die erstellten Modelle nach Aussage der Befragten nicht oder nur wenig zur Kommunikation im Team (Abbildung 9.6, blau) oder mit Externen (insbesondere Gruppenpaten, zur Präsentation am Meilenstein; Abbildung 9.6, orange) herangezogen. Für die Kommunikation im Team merkten die Befragten

an, dass es schwierig war, den Teammitgliedern erst den Aufbau und die Struktur der zu diskutierenden Viewpoints beziehungsweise Diagramme zu erläutern, bevor auf die eigentlichen Inhalte eingegangen werden konnte. Einige der Befragten schlugen daher vor, neben der Schulung für Systemingenieure auch eine Schulung zu MBSE-Grundlagen an alle Teammitglieder zu geben. Die Befragten gaben jedoch auch an, die Systemmodelle teilweise als Wissensbasis verwendet zu haben. Informationen aus den Systemmodellen seien dann in anderer Form (bspw. Powerpoint), Teammitgliedern oder Externen präsentiert und mit jenen diskutiert worden. So ergab sich jedoch stellenweise auch eine Dopplung von Informationen im Modell und weiteren, von Teammitgliedern erstellten und genutzten, Dokumenten.

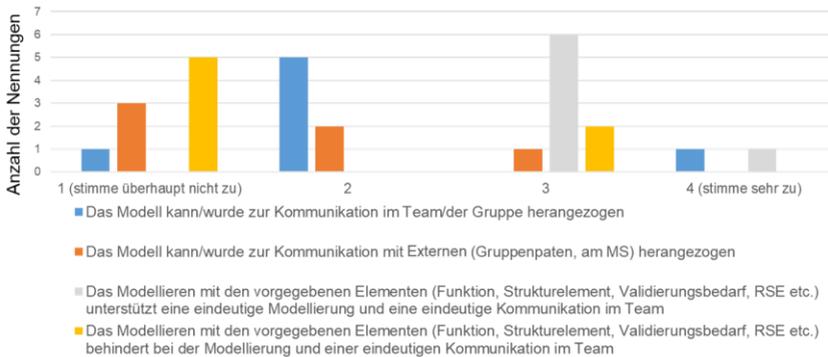


Abbildung 9.6: Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Ontologie und angemessener Formalisierungsgrad"

9.2.2 Handlungsfelder zur organisatorischen Akzeptanz

Aufwand/Nutzen-Verhältnis

Das Aufwand/Nutzen Verhältnis des Einsatzes von MBSE / der entwickelten MBSE-Methodik im Projekt wird von den Befragten neutral bewertet (siehe Abbildung 9.7, blau). Hierbei wird, ähnlich wie beim erkannten Mehrwert von MBSE, das Format von IP hervorgehoben. So wird beschrieben, dass ein Mehrwert für große Projekte, mit vielen vernetzten Projektteilnehmenden gesehen werde.

Zudem merken die Befragten an, es sei schwierig, unterschiedliche Versionen eines Systems im Modell abzubilden. Auch wurde erneut herausgestellt, dass das

Aufwand/Nutzen Verhältnis weiter verbessert hätte werden können, wenn alle Teammitglieder und nicht nur der Systemingenieur/ die Systemingenieurin mit den Systemmodellen gearbeitet hätten. Gleichzeitig stimmen die befragten Studierenden mehrheitlich zu, dass durch die gezielte Hinführung zu Modellierungsaktivitäten und Sichten (Views) in der entwickelten MBSE-Methodik, der Aufwand zur Modellierung gemessen am Gesamtprojekt angemessen gehalten werden könne (siehe Abbildung 9.7, orange). Dies wird im Vergleich auch von der befragten Person angegeben, die ohne die entwickelte MBSE-Methodik Vorerfahrungen in MBSE gesammelt hatte.

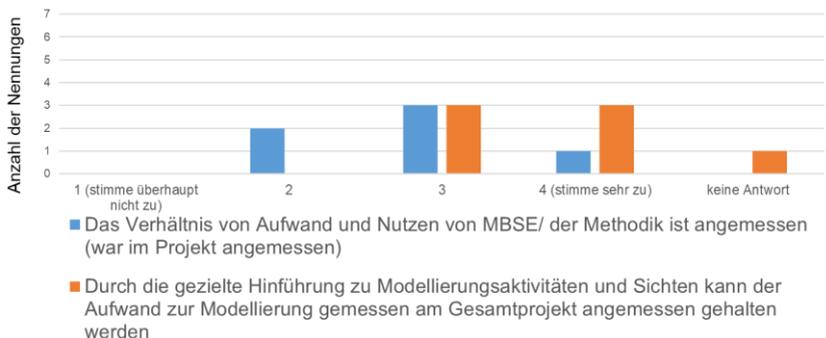


Abbildung 9.7: Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Aufwand/Nutzen-Verhältnis"

Lehr-/Lernbarkeit der MBSE-Methodik

Der Aufbau der Schulung wird von den Befragten als gut nachvollziehbar bewertet (siehe Abbildung 9.8, blau). Auch hierbei wird wiederum angemerkt, dass eine Grundlagenschulung für alle Teammitglieder hilfreich wäre, damit Diskussionen im Team zu Inhalten des Systemmodells nicht erst den Aufbau und Hintergrund der einzelnen Viewpoints oder des Architekturframeworks umfassen müssten. Auch stimmten die Studierenden mehrheitlich zu, dass im Schulungsdokument Informationen, die für eine Fragestellung benötigt werden, auf einfache Weise gefunden werden könnten (siehe Abbildung 9.8, orange). Ein den Studierenden bereitgestelltes Beispielmodell wird als hilfreich bewertet, auch wenn es je nach dem entwickelten Produkt der Studierenden weit entfernt vom eigenen Anwendungsfall der Modellierung sei.

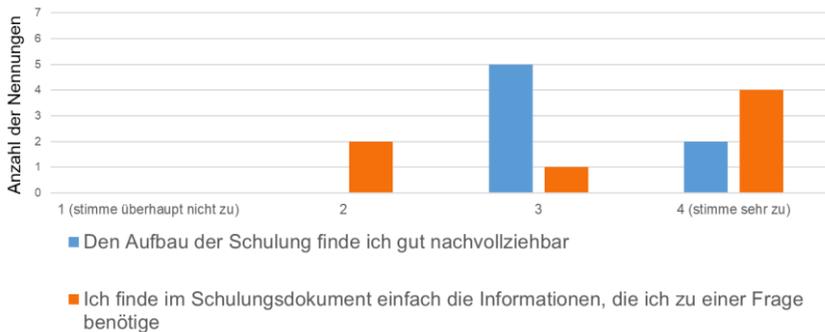


Abbildung 9.8: Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Lehr-/Lernbarkeit der MBSE-Methodik"

Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit

Die Einschätzung der Studierenden bezüglich der Fragen zur Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit der MBSE-Methodik beziehen sich auf zwei Fragebereiche. Einerseits wurden die Studierenden nach ihrer Einschätzung gefragt, ob die MBSE-Methodik durch das Hinzufügen neuer Viewpoints, neuer Modellierungsaktivitäten und die flexible Auswahl gerade zielführender Modellierungsaktivitäten spezifisch auf ihre Bedarfe angepasst werden könnte. Hier stimmten die Studierenden eher zu (siehe Abbildung 9.9, blau). Zwei Studierende gaben zu dieser Frage jedoch keine Einschätzung ab.

Zusätzlich wurde die Unterstützung zur Modellierung von Referenzelementen und der Variationsarten untersucht. So gaben die Studierenden an, das Modell-Template unterstützte bei der Modellierung von Referenzelementen siehe (Abbildung 9.9, orange) sowie bei der Modellierung von Variationsarten (siehe Abbildung 9.9, grau).

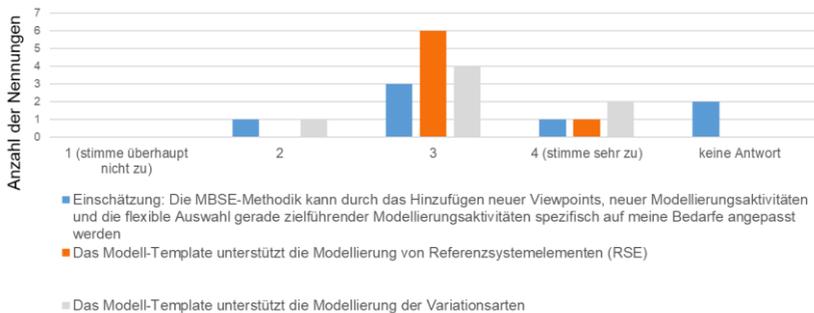


Abbildung 9.9: Auswertung der semistrukturierten Interviews in IP 2021/2022 zum Handlungsfeld "Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit"

Problemorientierung/Unterstützung bei der Modellierung des Problemraums

Das am negativsten bewerte Handlungsfeld ist die Unterstützung bei der Modellierung des Problemraums beziehungsweise Schärfung des Produktprofils. Hier gaben die Studierenden an, dass das Modell so gut wie nicht zur Schärfung des Produktprofils herangezogen wurde. Auch wurde das Modell wenig in Diskussionen mit Gruppenmitgliedern und überhaupt nicht in Diskussionen mit Externen zur Schärfung des Produktprofils herangezogen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Großteil der Arbeiten zur Modellierung des Produktprofils bereits vor der Einführung und Schulung von MBSE im Projekt durchgeführt wurde. Daher lassen sich nur bedingt belastbare Aussagen zum Handlungsfeld aus den Interviews ziehen. Zur Schärfung des Produktprofils wurde eher die bereits aus früheren Projektphasen existierende Beschreibung im dafür vorhergesehen Template (siehe Abbildung 2.3) verwendet. Eine weitere Interpretation hieraus stärkt zudem die bereits beschriebene Rückmeldung einiger Befragten, dass im Team verbreitete MBSE-Kenntnisse oder passende Sichten fehlten, um Modellinhalte mit Teammitgliedern und Externen zu diskutieren.

9.2.3 Methode zur Unterstützung der kontinuierlichen, durchgängigen und nachvollziehbaren Validierung im Produktentstehungsprozess

Der Fokus der Untersuchung in IP lag auf der Evaluation der individuellen und organisatorischen Akzeptanz der entwickelten MBSE-Methodik. Die entwickelte Methode zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess stand bei der

MBSE-Nutzung in IP weniger im Fokus. Nichtsdestotrotz wurden die Modellierungsaktivitäten der MBSE-Methodik zur Formulierung von Validierungsbedarfen, Entwicklung und Beschreibungen von Validierungszielen und Testfällen sowie zur Rückspiegelung von Testergebnissen in IP angewendet und untersucht. Nicht alle der Befragten wendeten diese Modellierungsaktivitäten zur Unterstützung der Validierung in IP 2021/2022 an oder verwendeten nur einige der bereitgestellten Modellierungsaktivitäten.

Wie in Abbildung 9.10 zu sehen, bewerten die Studierenden, die eine Aussage zur Methode machten, die Unterstützung zur Kontinuität (6 Antworten) und Durchgängigkeit beziehungsweise integrierten Entwicklung von Produkt und Validierungssystem (6 Antworten) durch die MBSE-Methodik neutral bis positiv. Insbesondere die Unterstützung bei der Nachvollziehbarkeit wird sehr positiv bewertet (4 Antworten). Auch das Aufwand/Nutzen-Verhältnis des Einsatzes der Methode wird eher positiv gesehen. Einige der Befragten gaben an, sich im Projekt generell wenig mit Validierungsaktivitäten beschäftigt und folglich auch die Modellierung nicht intensiv verfolgt zu haben. Als besonders hilfreich wurde die gezielte Nachvollziehbarkeit (zu Anwendungsfällen, Anforderungen etc.) beim Erkennen und der Herleitung von Validierungsbedarfen und Definition von Testfällen genannt. Eine befragte Person gab an, dass Teammitglieder auch ohne das Modell teilweise auf ähnliche Validierungsbedarfe und die Formulierung ähnlicher Testfälle kamen. Die befragte Person wollte dies jedoch nicht rein als Doppelarbeit, sondern auch als Bestätigung der Hilfe des Systemmodells bei der Herleitung dieser verstanden wissen.

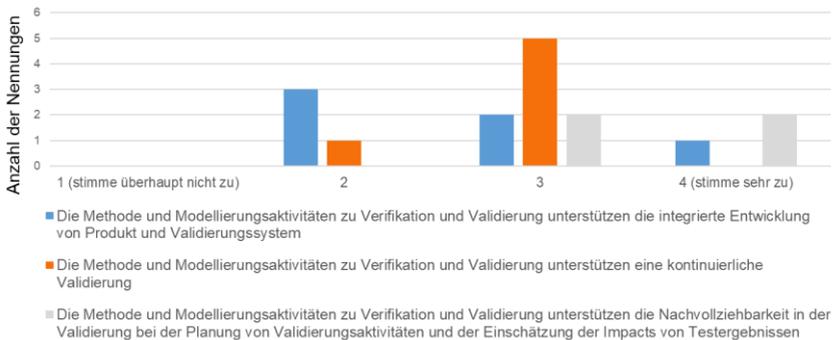


Abbildung 9.10: Untersuchung der Methode zur durchgängigen, kontinuierlichen und nachvollziehbaren Validierung in IP 2021/2022

Einige der Befragten gaben an, Probleme bei der Durchführung der Modellierungsaktivitäten zur Analyse des Impacts der Testergebnisse und der

darauffolgenden Weiterentwicklung des Modells gehabt zu haben. Dies gilt es für zukünftige Schulungen weiter zu detaillieren. Auch beschreibt eine befragte Person, dass es auch für die Methode zur Unterstützung der Validierung schwierig war, die Mehrwerte des Einsatzes von MBSE zu den Teammitgliedern zu tragen, wenngleich diese keine grundsätzliche Abneigung zeigten. Die befragte Person selbst hingegen nahm die methodische Unterstützung als hilfreich wahr.

9.3 Interpretation und Studienfazit

Hinsichtlich der Evaluation der individuellen und organisatorischen Akzeptanz der entwickelten MBSE-Methodik entlang der für diese Dissertation identifizierten Handlungsfelder ergeben die Aussagen der Befragten für den Einsatz im Live-Lab IP 2021/2022 ein überwiegend positives Bild. Dadurch lassen sich starke Signale hinsichtlich des Potenzials der entwickelten MBSE-Methodik und des dafür entwickelten Schulungskonzepts zur Schulung, Einführung und Nutzung von MBSE erkennen.

Auch für die Studie im Live-Lab IP 2021/2022 sei noch einmal betont, dass kein Anspruch auf eine vollständige und quantitative Validierung der entwickelten MBSE-Methodik erhoben wird. Dies liegt insbesondere in der kleinen Stichprobe an Befragten und einer nicht darstellbaren Kontrollgruppe begründet. Trotzdem ergeben sich auch für diese Studie starke Signale zur qualitativen Evaluation der entwickelten MBSE-Methodik. Dies wird durch die Tatsache verstärkt, dass die Teilnehmenden der Studie vorab keine Erfahrung mit der entwickelten MBSE-Methodik und oftmals keine oder nur geringe Vorerfahrungen mit MBSE im Allgemeinen hatten. Somit konnten die Einschätzungen zur MBSE-Methodik rein basierend auf der durchgeführten Schulung und Anwendung in IP aufgenommen werden.

Die von den befragten Studierenden am positivsten bewerteten Handlungsfelder umfassen die intuitive Anwendbarkeit, Flexibilität und Adaptierbarkeit, Usability des Modellierungswerkzeugs und Lehr- und Lernbarkeit der MBSE-Methodik. Die tendenziell weniger positive oder neutrale Bewertung der Handlungsfelder zur organisatorischen Akzeptanz könnten in dem Format von IP begründet liegen. In IP herrscht ein intensiver direkter Austausch kleiner Teams, wodurch viele der Ziele und Mehrwerte, die durch den Einsatz von MBSE angestrebt werden sollen, im Projektumfeld bereits gegeben sind. Auch das Fehlen von Referenzmodellen, beispielsweise von Vorgänger-Generationen, beeinflusst die Bewertung, da somit ein hoher Zeitaufwand durch das initiale Anlegen des Modells notwendig ist.

Negativere Bewertungen ergeben sich insbesondere hinsichtlich der Handlungsfelder, die die Kommunikation von Modellinhalten mit Teammitgliedern und Externen umfassen („Ontologie und angemessener Formalisierungsgrad“ sowie „Problemorientierung/Unterstützung bei der Modellierung des Problemraums“). Aus Anmerkungen der Befragten ergibt sich der Hinweis darauf, die genutzten Sichten zur Kommunikation noch weiter auszubauen und für Personen, die keine direkten MBSE-Anwendenden sind, noch verständlicher zu gestalten oder eine Schnittstelle zu weiteren genutzten Tools und Dokumenten zu schaffen. Erste Arbeiten hierzu wurden am IPEK bereits durchgeführt (Powelske, Mandel, Albers & Behrendt, 2018). Auch wird vermehrt vorgeschlagen, allen Teammitgliedern eine grundlegende Einführung in MBSE und die entwickelte MBSE-Methodik zu geben, um ein Verständnis dieser aufzubauen und die Kommunikation im Team zu erleichtern. In weiteren Arbeiten gilt es zudem zu untersuchen, wie die Nutzung der Modelle zur kontinuierlichen Betrachtung und Schärfung des Produktprofils beziehungsweise des Problemraums verbessert werden kann.

Bei den Aussagen zur organisatorischen Akzeptanz sind die Untersuchungsumgebung und die Tatsache, dass ausschließlich Studierende befragt wurden zu beachten. Nichtsdestotrotz führen die Studierenden in IP einen Produktentwicklungsprozess in einer realitätsnahen Umgebung durch. So lassen sich für die herausgearbeiteten Handlungsfelder durchaus Erkenntnisse zur organisatorischen Akzeptanz der entwickelten MBSE-Methodik gewinnen.

Hinsichtlich der methodischen Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess lassen sich im Live-Lab IP 2021/2022 nur bedingt Aussagen treffen, da diese von den Studierenden nur teilweise angewendet wurde. Insbesondere die Unterstützung der Nachvollziehbarkeit der Validierung wird positiv hervorgehoben. Eine interessante Aussage eines der Studierenden war, dass Teammitglieder ohne Modellunterstützung auf ähnliche Validierungsbedarfe und Formulierung ähnlicher Testfälle kamen, wie bei Nutzung des Modells. Dies wurde jedoch nicht rein als Doppelarbeit, sondern auch als Bestätigung der Hilfe des Systemmodells bei der Herleitung dieser verstanden. Nach Interpretation des Autors dieser Dissertation kann dies ein Indikator dafür sein, dass die MBSE-Methodik hilfreich dabei sein kann, die oftmals erfahrungsbasierte Identifikation und Beschreibung von Validierungsbedarfen und Testfälle methodisch zu unterstützen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Dissertation werden im folgenden Kapitel nochmal einmal zusammengefasst. Zusätzlich erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse in Bezug zu den formulierten Zielen und Forschungsthesen der Dissertation.

10 Zusammenfassung und Fazit

10.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit

Die in Kapitel 2 dargestellte Analyse des Stands der Forschung zeigt die derzeitige und zukünftige herausragende Stellung der Validierung im Produktentstehungsprozess. Insbesondere für die Entwicklung von Advanced Systems wie System of Systems sind neue Methoden zur Unterstützung der Validierung unabdingbar. Gleichzeitig zeigt die Analyse des Stands der Forschung, dass Advanced Systems Engineering und vor allem modellbasierte Entwicklungsansätze wie MBSE eine vielversprechende, wenn nicht sogar zwingend notwendige Möglichkeit sind, um mit der Komplexität moderner Advanced Systems und den entsprechenden Produktentstehungsprozessen umzugehen (siehe Kapitel 2).

In der Klärung des Forschungsgegenstands (siehe Absatz 2.8) werden für die methodische Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess die drei Handlungsfelder Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit herausgearbeitet. Hinsichtlich des Einsatzes von MBSE für diese methodische Unterstützung ergeben sich jedoch zwei Forschungsbedarfe. Einerseits bieten bestehende MBSE-Ansätze des Stands der Forschung noch wenig Unterstützung für die Validierung, wengleich hierin von verschiedenen Autoren Potenzial gesehen wird. Andererseits finden bestehende MBSE-Ansätze oft keine Akzeptanz in der industriellen Anwendung und sind zu wenig auf die Bedarfe der Nutzenden angepasst beziehungsweise nicht entsprechend der Bedarfe adaptierbar.

Als übergeordneter Forschungsbedarf für diese Arbeit ergibt sich daher die Entwicklung einer methodischen Unterstützung der Durchgängigkeit, Kontinuität und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess (siehe Absatz 3.1). Gleichzeitig wird die Grundannahme formuliert, dass MBSE ein hohes Potenzial besitzt, um die Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit in der Validierung komplexer technischer Systeme methodisch zu unterstützen. Um diesen Forschungsbedarf zu befriedigen, werden zwei Teilziele und Forschungsthesen zu deren Erreichung formuliert (siehe Absatz 3.2). Das erste Teilziel richtet sich dabei an die bislang unzureichende Unterstützung der Validierung in bestehenden MBSE-Ansätzen:

Teilziel 1:

Die zu entwickelnde MBSE-Methodik soll Informationen interdisziplinär und verknüpft verfügbar machen, um eine Entscheidungsgrundlage bei der Planung und Bewertung von Validierungsaktivitäten im Produktentstehungsprozess zu bieten

Zur Erreichung des ersten Teilziels wird Forschungsthese 1 formuliert:

Forschungsthese 1:

Durch eine ganzheitliche MBSE-Methodik auf Grundlage des Modells der SGE kann ein Beitrag zur durchgängigen Modellierung und nachvollziehbaren Darstellung von Informationen im Produktentstehungsprozess geleistet und die kontinuierliche Planung und Bewertung von Validierungsaktivitäten im Produktentstehungsprozess gemäß dem IPEK-XIL-Ansatz unterstützt werden.

Im Verständnis der vorliegenden Dissertation umfasst eine ganzheitliche MBSE-Methodik dabei die Kernbestandteile Modellierungssprache, Modellierungsmethode, Architekturframework und eine passende Tool-Implementierung (siehe Absatz 2.7). Die in dieser Dissertation entwickelte MBSE-Methodik soll dazu beitragen, eine konsistente und interdisziplinäre Informationsbasis zur Entscheidungsunterstützung bei Aktivitäten zur Validierung im Produktentstehungsprozess zu etablieren, um so die Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess zu unterstützen. Ziel ist daher explizit nicht, bestehende domänenspezifische Methoden zur Verifikation und Validierung durch MBSE-Ansätze zu ersetzen. Vielmehr soll deren Anwendung durch die Nutzung konsistenter Modelle auf der interdisziplinären Vernetzungsebene gemäß dem Leitbilds ASE (siehe Abbildung 1.4) unterstützt werden.

Das zweite Teilziel der Arbeit zielt auf die bislang unzureichende Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in der Anwendung:

Teilziel 2:

Bei der Entwicklung der MBSE-Methodik sollen explizit Handlungsfelder zu deren individueller und organisatorischer Akzeptanz berücksichtigt werden, so dass ein Beitrag zu deren Akzeptanz in der (industriellen) Anwendung geleistet wird.

Für die Erreichung des zweiten Teilziels wird Forschungsthese 2 formuliert:

Forschungsthese 2:

Durch die integrierte Bereitstellung von Modellierungssprache, Modellierungsmethode, Architekturframework und Tool-Umsetzung der entwickelten MBSE-Methodik sowie durch die Ermöglichung der bedarfsgerechten und iterativen Anwendung im Produktentstehungsprozess im Verständnis des erweiterten ZHO-Modells kann ein Beitrag zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz der entwickelten MBSE-Methodik geleistet werden.

Zur Bearbeitung der Forschungsthesen werden drei Forschungsfragen (FF) formuliert, welche jeweils Kernbestandteile der ganzheitlichen MBSE-Methodik adressieren:

Forschungsfrage 1 (FF 1):

Welche Klassen von Elementen müssen auf Grundlage des Modells der SGE in der Modellierungssprache der entwickelten MBSE-Methodik enthalten sein, um eine kontinuierliche, durchgängige und nachvollziehbare Validierung im Produktentstehungsprozess zu unterstützen?

Forschungsfrage 1 zielt auf die Entwicklung einer geeigneten Modellierungssprache, um die Modellierung von Informationen des Validierungssystems in einem Systemmodell zu unterstützen. Ergebnis der Beantwortung von Forschungsfrage 1 ist eine entwickelte Ontologie aus Elementen und deren Beziehungen als Grundlage für eine Modellierungssprache im Modell der SGE. Ein Auszug der in Absatz 6.1 beschriebenen Ontologie ist in Abbildung 10.1 dargestellt.

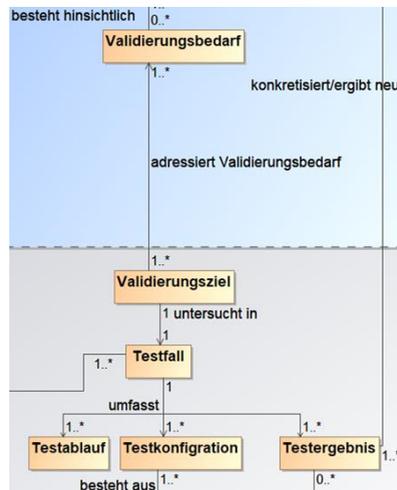


Abbildung 10.1: Auszug aus der entwickelten Ontologie zur Beantwortung von Forschungsfrage 1 (vollständige Ontologie in Absatz 6.1)

Die zweite Forschungsfrage zielt auf die Entwicklung der Modellierungsmethode:

Forschungsfrage 2 (FF 2):

Wie kann für die entwickelte MBSE-Methodik die Analyse und Synthese von MBSE-Systemmodellen methodisch unterstützt werden, um eine Entscheidungsunterstützung bei der Planung und Bewertung von Validierungsaktivitäten im Verständnis des IPEK-XiL-Ansatzes zu liefern?

Ergebnis der Beantwortung von Forschungsfrage 2 ist eine Modellierungsmethode zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess. Der Ablauf der entwickelten Modellierungsmethode ist in Abbildung 10.2 dargestellt und wird in Absatz 6.2 erläutert.

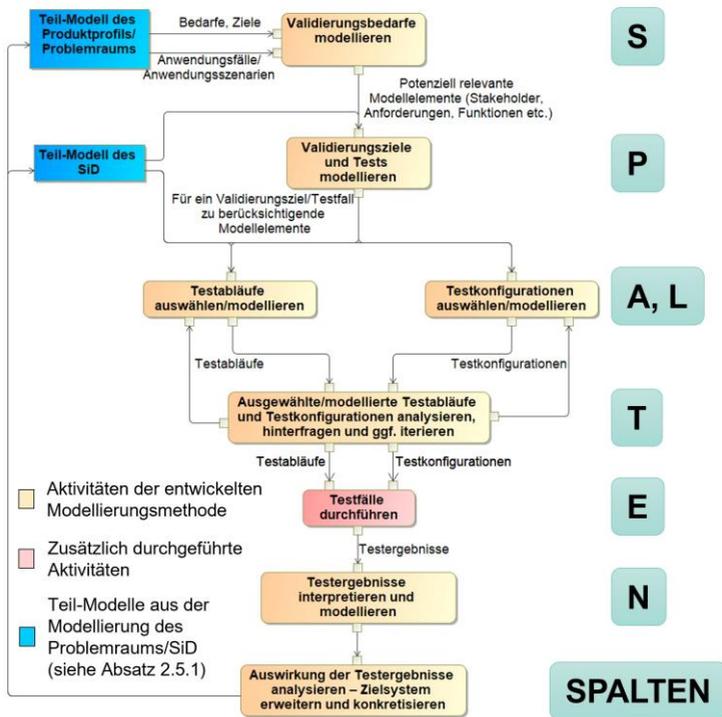


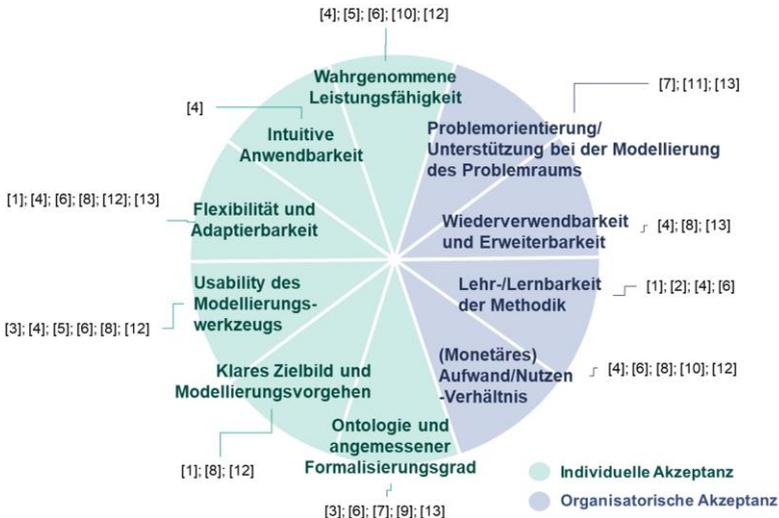
Abbildung 10.2: Entwickelte Modellierungsmethode zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess (siehe Absatz 6.2)

Forschungsfrage 3 adressiert die Umsetzung der MBSE-Methodik in einem Modellierungstool. Gleichzeitig wird die Entwicklung eines Architekturframeworks für die MBSE-Methodik adressiert:

Forschungsfrage 3 (FF 3):

Wie lässt sich für die entwickelte MBSE-Methodik die Analyse und Synthese von Systemmodellen, gemäß dem Verständnis des erweiterten ZHO-Modells, unter Berücksichtigung von Kriterien individueller und organisatorischer Akzeptanz im Rahmen des Produktentstehungsprozess im Modell der SGE in einem Modellierungstool umsetzen?

Für diese Umsetzung der MBSE-Methodik werden Handlungsfelder herausgearbeitet, um einen Beitrag zu deren individueller und organisatorischer Akzeptanz in der (industriellen) Anwendung zu leisten (siehe Abbildung 10.3 und Absatz 5.3).



[1]: Friedenthal, 2019; [2]: Bone und Cloutier, 2010; [3]: Albers und Zingel, 2013; [4]: Lohmeyer et al., 2014; [5]: Matthiesen et al., 2014; [6]: Gausemeier et al. 2015; [7]: Tschirner et al., 2015; [8]: Chami et al., 2018; [9]: Alt, 2019; [10]: Bretz et al., 2019; [11]: Cloutier, 2019; [12]: Dumitrescu et al. 2021; [13]: Scherer, 2021

Abbildung 10.3: Handlungsfelder zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen (übersetzt und adaptiert nach Mandel, Martin & Albers, 2022, S. 7)

Das Forschungsvorgehen ist iterativ angelegt (siehe Kapitel 4). Die initiale Bearbeitung der Forschungsfragen erfolgt dabei zunächst einzeln (siehe Kapitel 5 und Kapitel 6). Eine Ontologie als Basis der Modellierungssprache wird mittels einer systematischen Literaturrecherche sowie unter Ergänzung weiterer Arbeiten aus der KaSPro erarbeitet (Absatz 6.1). Basierend auf der Modellierungssprache wird in Absatz 6.2 die initiale Modellierungsmethode vorgestellt und anhand einer Fallstudie angewendet. Ein initiales Architekturframework sowie eine initiale Tool-Implementierung der entwickelten MBSE-Methodik werden in Absatz 6.3 vorgestellt. Das initiale Architekturframework und die Tool-Implementierung werden zudem im Live-Lab IP 2019/2020 evaluiert.

In Kapitel 7 wird die ganzheitliche und, basierend auf den Erkenntnissen der Entwicklung der Kernbestandteile, weiterentwickelte MBSE-Methodik vorgestellt. Eine zentrale Weiterentwicklung der MBSE-Methodik besteht dabei in der Aufteilung der Modellierungsmethode in einzelne Modellierungsaktivitäten, welche iterativ und agil im Produktentstehungsprozess angewendet werden können, gleichzeitig aber auf der eindeutigen und wiederverwendbaren Struktur eines Architekturframeworks aufbauen. Die ganzheitliche MBSE-Methodik wird als Vorlage in das Modellierungstool Cameo Systems Modeler integriert. Zudem werden Anpassungen am Modellierungstool vorgenommen, um die Anwendung der MBSE-Methodik zu unterstützen (beispielsweise eine Anpassung des Arbeitsbereichs zum Fokus auf für die MBSE-Methodik relevante Bestandteile). Eine Übersicht der Modellierungsaktivitäten zur entwickelten MBSE-Methodik in der Tool-Implementierung ist in Abbildung 10.4 dargestellt. Für detaillierte Informationen sei auf Kapitel 7 verwiesen.

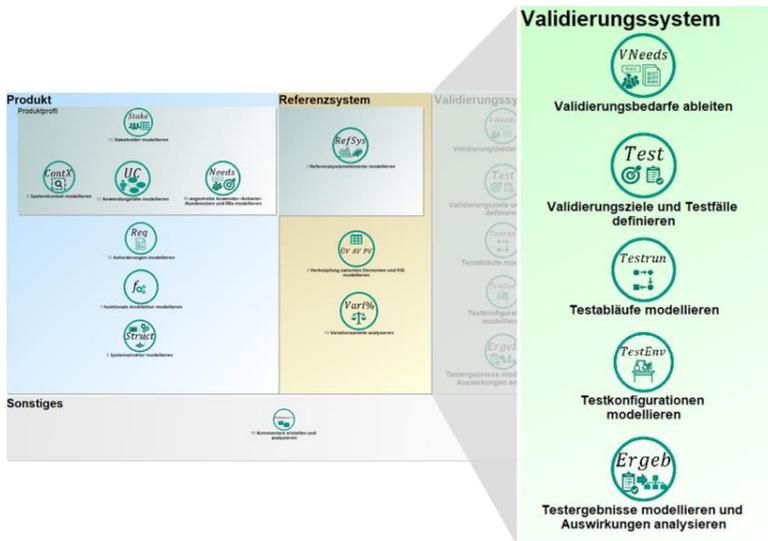


Abbildung 10.4: Darstellung der Modellierungsaktivitäten der ganzheitlichen MBSE-Methodik als Vorlage im Modellierungstool Cameo Systems Modeler

Die Ergebnisse zur ganzheitlichen MBSE-Methodik liefern auf mehreren Ebenen einen Beitrag zur Weiterentwicklung der KaSPo – Karlsruher Schule für Produktentwicklung.

Ontologie und Modellierungssprache

Die entwickelte Ontologie zur Modellierungssprache hilft das Verständnis von in der KaSPro verwendeten Begriffe weiter zu schärfen. Dabei steht weniger die Detaillierung einzelner Definitionen, sondern die Etablierung einer Ontologie von verwendeten Begriffen und insbesondere deren Zusammenhängen im Fokus. Die Ontologie wird ständig in Zusammenarbeit mit weiteren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern erweitert und konkretisiert. So findet am IPEK eine Erweiterung und Spezifizierung der Begriffe zu Verifikation und Validierung hinsichtlich der Detaillierung der Entwicklung von Testumgebungen und der Durchführung von Testfällen statt¹⁸. Schnittstellen ergeben sich zudem zu Begrifflichkeiten im Anforderungsmanagement und zu der Detaillierung des Verständnisses von Bedarfen, Zielen und Anforderungen (Kubin et al., 2023). Unter anderem aufbauend auf Ergebnissen aus dem BMBF-geförderten Projekt I4TP (Fleischer et al., 2022) wird im Projekt MoSys die Ontologie zudem um Begriffe bzw. Klassen zur Unterstützung von Produkt-Produktions-Codesign erweitert (Schäfer et al., 2022). Zuletzt wird die Ontologie hinsichtlich Begrifflichkeiten aus dem Änderungsmanagements erweitert, um ein modellbasiertes Engineering Change Management zu unterstützen (Martin et al., 2022).

MBSE-Methodik als erweiterbares Rahmenwerk

Die ganzheitliche MBSE-Methodik ist bewusst auf Erweiterbarkeit ausgelegt. Somit kann die MBSE-Methodik als ordnendes Rahmenwerk für die Entwicklung und Integration weiterer MBSE-Ansätze auf Grundlage des Modells der SGE dienen. Momentan laufen hierzu bereits Arbeiten zur Unterstützung von Produkt-Produktions-Codesign (Schäfer et al., 2022) sowie eines modellbasierten Engineering Change Managements (Martin et al., 2022). Hierzu kann die Ontologie erweitert und es können neue Viewpoints und Modellierungsaktivitäten eingebracht werden. Zudem bietet die MBSE-Methodik das Potenzial, weitere Methoden, wie beispielsweise die FMEA, einzubringen und modellbasiert zu unterstützen.

MBSE Schulungskonzept

Das basierend auf der MBSE-Methodik entwickelte Schulungskonzept wurde von Teilnehmenden der Schulung im Live-Lab IP 2021/2022 positiv bewertet (siehe

¹⁸ Forschungsgespräche am IPEK (2022): Teilnehmende: Martin, Alex; Kürten, Claas; Wäschle, Moritz; Bause, Katharina; Cortes, Sven; Schwarz, Stefan; Albers, Albert; Mandel, Constantin

Kapitel 9). Das Schulungskonzept ist bewusst modular und flexibel, entlang der zu schulenden Modellierungsaktivitäten und Viewpoints, aufgebaut. Damit kann das Schulungskonzept als Baukasten zur Herleitung individueller Schulungen für unterschiedliche Anwendungsfälle und Anwendungsszenarien (bspw. unterschiedliche Lehrveranstaltungen, Schulungen mit Fokus auf bestimmte Aspekte gemäß Anforderungen von Unternehmenspartnern) dienen. Dank der oben beschriebenen Erweiterbarkeit können auch in Zukunft Erweiterungen der MBSE-Methodik in das Schulungskonzept integriert werden.

10.2 Evaluation und Diskussion der entwickelten MBSE-Methodik

Neben den in Kapitel 6 beschriebenen initialen Untersuchungen und Leitbeispielen zur Evaluation der Teil-Ergebnisse zur Beantwortung der Forschungsfragen, werden in Kapitel 8 und Kapitel 9 Anwendungsfälle mit Partnern aus Industrie und Forschung zur Evaluation der ganzheitlichen MBSE-Methodik vorgestellt.

Zunächst wird die MBSE-Methodik dabei für ein Anwendungsbeispiel eines Automobil-Zulieferers (Kostal) eingesetzt, um die Planung und Durchführung von Validierungsaktivitäten zu unterstützen (siehe Absatz 8.1). Im Fokus der Untersuchung steht dabei der Bezug zu Forschungsthese 1. Dabei zeigt sich das Potenzial der MBSE-Methodik zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess. Durch die Beschreibung der Modellierungsmethode in einzelnen Modellierungsaktivitäten können diese iterativ und kontinuierlich über den Produktentstehungsprozess durchgeführt werden. Beispielsweise können somit Validierungsbedarfe und Validierungsziele sowohl basierend auf einem initialen Zielsystem (im Beispiel der Fallstudie basierend auf durch einen OEM vorgegebenen Zielen und Anforderungen) als auch zu einem späteren Zeitpunkt basierend auf Erkenntnissen aus bereits stattgefundenen Validierungsaktivitäten durchgeführt werden. Im entwickelten Systemmodell werden sowohl Aspekte des Validierungssystems als auch des SiD/des Produkts (beispielsweise zur Konkretisierung des Zielsystems durch Anwendungsfälle oder abgeleitete Systemanforderungen) durchgängig modelliert. Dies zeigt, dass die MBSE-Methodik die Durchgängigkeit bei der Validierung technischer Systeme unterstützen kann. Im Rahmen der Fallstudie ermöglicht die durch die MBSE-Methodik etablierte Nachvollziehbarkeit im Modell die (teil-) automatische Bereitstellung der relevanten Informationen für die Spezifikation von Tests (siehe Abbildung 10.5). Dieser View der Testspezifikation kann als konsistente Informationsbasis als Ausgangspunkt zur Planung und

Durchführung von Testfällen dienen. Die Ergebnisse aus der durchgeführten Fallstudie stützen somit Forschungsthese 1.

Test	Requirement		System Requirement	Test Case		Test Environment	Test Result
	ID	Text		ID	Description		
@test TM_708	@req TM_708	After the customer has activated the timer charging function and set the destination SOC and the departure time, the software of the OBC shall transmit data to the application	SMLK TM_708.1	@test-case TM708.1	activate timer charging, set destination SOC, set departure time. The data is transmitted to the application	SysIT	passed
			SMLK TM_708.2	@test-case TM708.2	don't activate timer charging and destination SOC, set departure time. The data is not transmitted to the application		passed
			SMLK TM_708.3	@test-case TM708.3	activate timer charging, don't set destination SOC, set departure time. The data is not transmitted to the application		passed
			SMLK TM_708.4	@test-case TM708.4	activate timer charging, set destination SOC, don't set departure time. The data is not transmitted to the application		passed

Abbildung 10.5: Mit Hilfe der entwickelten MBSE-Methodik aufgebaute View der Testspezifikation für die Fallstudie bei Kostal (adaptiert nach Wiecher et al., 2024, S. 738)

Die Fallstudie bei Kostal sowie die initiale Fallstudie anhand des Beispiels der Validierung von ADAS in Absatz 6.2 wurden unter Beteiligung des Autors der vorliegenden Arbeit durchgeführt. Es bleibt zu untersuchen, wie die Unterstützung durch die MBSE-Methodik erfolgt, wenn keine Anleitung bei deren Anwendung vorhanden ist und ob sich bei der Anwendung Schwierigkeiten auftun. Darüber hinaus sind die beiden Fallstudien als kontrollierte Untersuchungsumgebungen zu verstehen. Ein weiterer Schritt zur Evaluation der MBSE-Methodik wäre eine zusätzliche und längerfristige Anwendung der MBSE-Methodik in größeren Produktentstehungsprozessen.

Aus der Studie zur Anwendung der initialen Version des Architekturframeworks der MBSE-Methodik im Live-Lab IP 2019/2020 (siehe Absatz 6.3) ergibt sich der Bedarf nach der Kombination aus strukturierten, jedoch eher starrem Architekturframework und iterativ und agil ausführbaren Modellierungsaktivitäten. Das Potenzial dieser Kombination zur Etablierung individuell und organisatorisch akzeptierter MBSE-Ansätze zeigt die Fallstudie im Zielsystemmanagement eines Werkzeugmaschinenherstellers (siehe Absatz 8.2). Ein auf Basis der entwickelten MBSE-Methodik eingeführter Ansatz im Zielsystemmanagement in der agilen Entwicklung zeigt, dass auch beim Werkzeugmaschinenhersteller aus der Untersuchungsumgebung ein positiver Beitrag zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung geleistet werden kann. Insbesondere stellt sich jedoch das Potenzial der Kombination von Architekturframework und Modellierungsaktivitäten zur Steigerung der Akzeptanz

modellbasierter Ansätze dar. Sowohl in einer Datenanalyse als auch in semistrukturierten Interviews wird der entwickelte Ansatz im Zielsystemmanagement von Mitarbeitenden des Werkzeugmaschinenherstellers positiv bewertet (siehe Abbildung 10.6). Somit wird Forschungsthese 2 gestützt.

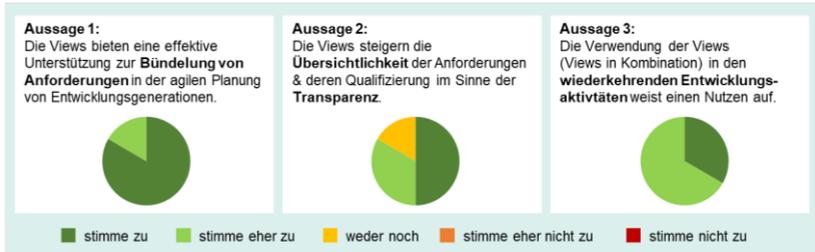


Abbildung 10.6: Auswertung der semistrukturierten Interviews zu Mehrwert und Anwendbarkeit des entwickelten Ansatzes im Zielsystemmanagement in der Untersuchungsumgebung (adaptiert nach Windisch et al., 2022, S. 554)

Der entwickelte und untersuchte Ansatz im Zielsystemmanagement ist jedoch stark auf den Werkzeugmaschinenhersteller der Untersuchungsumgebung zugeschnitten und umfasst lediglich Ausschnitte der entwickelten MBSE-Methodik. Eine tiefgehende Analyse zur Bewertung der MBSE-Methodik hinsichtlich der zweiten Forschungsthese wird im Projekt MoSyS durchgeführt. In MoSyS wird die entwickelte MBSE-Methodik eingebracht, weiterentwickelt und in Form von sieben semistrukturierten Interviews evaluiert. Aus den Interviews ergibt sich eine positive Bewertung der Befragten über alle im Forschungsbedarf etablierten Handlungsfelder zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen durch den Einsatz der entwickelten MBSE-Methodik im Vergleich zu MBSE-Ansätzen, die den Befragten vorab bekannt waren (siehe Absatz 8.3). Die am positivsten bewerteten Handlungsfelder betreffen dabei die Verbesserung der wahrgenommenen Leistungsfähigkeit von MBSE, die Usability des Modellierungstools sowie die Verbesserung der Kommunikation im Team. Hingegen etwas schwächer, aber immer noch mit Mehrwert gegenüber bekannten MBSE-Ansätzen, wurden die Etablierung eines klaren Zielbilds und Modellierungsvorgehens, der Einfluss auf Eindeutigkeit/Unmissverständlichkeit der Modellierung und Kommunikation im Team sowie die Kommunikation mit Externen und die Unterstützung bei der Modellierung/Schärfung des Problemraums bewertet.

Die Teilnehmenden der semistrukturierten Interviews in MoSyS stammen aus unterschiedlichen Industrien und haben unterschiedliche Vorerfahrungen mit MBSE.

Dadurch kann der Bewertung der Handlungsfelder eine hohe Aussagekraft zugesprochen werden.

Die Teilnehmenden der Interviews sind an der Evaluation und Weiterentwicklung der MBSE-Methodik im Projekt MoSyS aktiv beteiligt. Als weitere Untersuchung wird die MBSE-Methodik daher wiederum mittels semistrukturierter Interviews im Live-Lab IP 2021/2022 evaluiert. Hierfür wird ein auf der MBSE-Methodik ausgerichtetes Schulungskonzept entwickelt. Somit stellt die Untersuchung im Live-Lab IP 2021/2022 neben einer weiteren Implementierungsstudie zugleich die im Forschungsvorgehen beschriebene „Education Study“ dar (siehe Absatz 4.1). Die teilnehmenden Studierenden hatten überwiegend wenig bis keine Vorerfahrung mit MBSE und nutzten die entwickelte MBSE-Methodik in einer realitätsnahen Entwicklungsumgebung mit einem Unternehmenspartner. Die Ergebnisse der Untersuchung im Live-Lab IP 2021/2022 hinsichtlich der Bewertung der Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess liefern weitere Hinweise zur Bewertung von Forschungsthese 1. Die Befragten stimmen im Durchschnitt eher zu, dass die MBSE-Methodik ein gutes Aufwand-Nutzen-Verhältnis zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess bietet. Die Unterstützung der Kontinuität und Durchgängigkeit/integrierten Entwicklung von Produkt und Validierungssystem erhält im Durchschnitt eine leicht positive bis neutrale Bewertung. Am meisten Zustimmung erhält die Aussage, dass die MBSE-Methodik die Nachvollziehbarkeit in der Validierung unterstütze. Allerdings stand im Live-Lab die Modellierung zur Unterstützung der Validierung nicht im Fokus und wurde nicht durchgängig von allen Befragten angewendet.

Auch in der Untersuchung im Live-Lab IP 2021/2022 zeigt sich der Beitrag der MBSE-Methodik zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen über unterschiedliche Handlungsfelder. Besonders positiv werden von den Befragten dabei die intuitive Anwendbarkeit, Flexibilität und Adaptierbarkeit, die Usability des Modellierungs- (Software-)Tools sowie die Lehr- und Lernbarkeit bewertet. Somit befindet sich sowohl bei den Studierenden des LiveLabs IP als auch bei den Befragten der Unternehmen aus MoSyS das Handlungsfeld zur Usability des Modellierungstools bei den positivsten Bewertungen. Dies deutet auf eine positive Wahrnehmung der entwickelten Templates und Anpassungen für die entwickelten Softwaretools hin. Verbesserungspotenzial sehen die Studierenden vor allem in der Kommunikation von Modellinhalten zu Teammitgliedern und Externen. Während die Kommunikation von Modellinhalten zu Teammitgliedern von den Befragten in MoSyS noch positiv bewertet wird, besitzt sowohl nach der Untersuchung in MoSyS als auch im Live-Lab IP 2021/2022 die Kommunikation von Modellinhalten zu Externen ein Verbesserungspotenzial. Hier gilt es in weiterführenden Arbeiten zu untersuchen, worin diese Unterschiede in der

Bewertung begründet liegen. Gleichzeitig müssen Lösungen für eine nahtlose und menschorientierte Bereitstellung von Informationen aus dem Modell auch für Personen, die nicht direkt an der Modellierung beteiligt sind, weiterentwickelt werden. Als potenzieller Ansatzpunkt zur Verbesserung werden von den Befragten im Projekt MoSyS dabei die Einführung von Rollen-basierten Filtern im Modellierungstool sowie die Etablierung sichtbarer Quickwins bei der Erstellung der Modelle vorgeschlagen.

Es bleibt zu betonen, dass die im Rahmen der Dissertation durchgeführten Implementierungsstudien und die Lehrestudie als initiale Evaluationen zu verstehen sind. Insbesondere aufgrund der kleinen Stichprobe an Befragten sowie einer, im (zeitlichen) Rahmen der Dissertation, nicht darstellbaren Kontrollgruppe sind die Ergebnisse der Interviews als qualitative Aussagen zu bewerten. Es wird damit nicht der Anspruch einer vollständigen, quantitativen Validierung der entwickelten MBSE-Methodik erhoben. Vor allem eine breite Evaluation im Unternehmenskontext mit Anwendenden aus unterschiedlichen Disziplinen, mit unterschiedlichen Vorkenntnissen und unter Umständen Vorbehalten gegenüber der Einführung neuer Methoden und Ansätze im Produktentstehungsprozess kann in Zukunft weitere wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich der formulierten Forschungsthese liefern. Nichtsdestotrotz lassen sich aus den Antworten der Befragten starke Signale und Hinweise bezüglich potenzieller Mehrwerte der entwickelten MBSE-Methodik aber auch zukünftiger Forschungsbedarfe ableiten.

Die entwickelte MBSE-Methodik ist als Rahmenwerk zu verstehen. Nur in Ausnahmefällen wird eine eins-zu-eins Umsetzung in verschiedenen Anwendungskontexten durchführbar sein. So zeigt sich beispielsweise für die Fallstudie bei Kostal, dass durch die Integration weiterer unternehmensspezifischer Methoden Anpassungen an Ontologie, Architekturframework und Modellierungsaktivitäten notwendig sind. Methoden, um diese Anpassungen zielgerichtet zu unterstützen, sind jedoch nicht Teil der vorliegenden Dissertation und sollten in nachfolgenden Arbeiten untersucht werden.

Zudem muss festgehalten werden, dass die Tool-Implementierung der MBSE-Methodik je nach verwendeter Software im Anwendungskontext variieren kann. Die MBSE-Methodik ist jedoch explizit auf Adaptierbarkeit und Erweiterbarkeit ausgelegt. Die Fallstudie bei Kostal sowie die Umsetzung in MoSyS zeigen das Potenzial zu deren zielgerichteter Anpassung. Dabei ist zu beachten, dass die Anpassungen unterschiedlich komplex sind, je nachdem, welche Kernbestandteile der MBSE-Methodik angepasst werden sollen. Eine Umsetzung der MBSE-Methodik in einem neuen Modellierungstool stellt eine Implementierungsaufgabe dar und ist lediglich durch die Möglichkeiten des verwendeten Modellierungstools

begrenzt. Auch das Hinzufügen neuer Viewpoints und Modellierungsaktivitäten ist, nach entsprechender Anpassung, mit überschaubarem Aufwand realisierbar. Eine Änderung der Ontologie kann jedoch tiefgreifende Anpassungen der Viewpoints und Modellierungsaktivitäten sowie der Tool-Implementierung notwendig machen. Hier ist in Zukunft auf eine weitere Detaillierung und Evaluation der Ontologie zu achten, so dass diese möglichst robust in unterschiedlichen Anwendungskontexten verwendet werden kann.

Zusammenfassend lässt sich ein positives Bild der entwickelten MBSE-Methodik hinsichtlich der für diese Arbeit gestellten Forschungsthese zeichnen. Die Ergebnisse der Arbeit und die durchgeführten Studien stützen die beiden aufgestellten Forschungsthese. Das übergeordnete Ziel, welches für diese vorliegende Dissertation formuliert wurde, lautet:

Ziel

Entwicklung einer MBSE-Methodik auf Grundlage des Modells der SGE zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess unter Berücksichtigung von Handlungsfeldern zu deren Akzeptanz in der Anwendung.

Dieses kann gemäß den obigen Erläuterungen somit als erreicht angesehen werden. Potenzielle weiterführende Arbeiten sowie bereits laufende Arbeiten, die die Nutzung und Weiterentwicklung der Ergebnisse der vorliegenden Dissertation adressieren, werden im folgenden Kapitel anhand eines Ausblicks vorgestellt.

11 Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellte MBSE-Methodik stellt einen Beitrag zum Leitbild des Advanced Systems Engineering und einen Baustein zur KaSPro dar. Es besteht jedoch weiterhin Forschungsbedarf, um die Vision von ASE in der Wertschöpfung von morgen zu verwirklichen. Anwendung und Evaluation der entwickelten MBSE-Methodik bleibt weiterhin ein Bestandteil existierender und zukünftiger Forschungsprojekte wie MoSyS. Zudem bildet ASE ein zentrales Forschungsthema des IPEK, welches in einer eigenen Forschungsgruppe und unterschiedlichen Forschungsfeldern, unter anderem Validierung technischer Systeme und Entwicklungs- und Innovationsmanagement, weiter erforscht wird. Somit werden für die KaSPro zukünftig weitere Bausteine zur Verwirklichung des Leitbilds ASE auf Grundlage des Modells der SGE erforscht werden. Bereits laufende sowie geplante und vorgeschlagene Forschungsaktivitäten unter Nutzung und Weiterentwicklung der Ergebnisse dieser Dissertation werden im Folgenden vorgestellt.

11.1 Integration weiterer Methoden in die MBSE-Methodik

Wie im letzten Kapitel beschrieben, können die Ergebnisse dieser Arbeit als Rahmenwerk für die Integration weiterer (Teil-) Methodiken und Methoden des MBSE dienen. So wird, unter anderem im Projekt MoSyS, die AECIA-Methodik – Advanced Engineering Change Impact Approach – entwickelt und erforscht (Martin et al., 2022). Die AECIA-Methodik zielt auf die modellbasierte Unterstützung der Analyse und Modellierung von im Produktentstehungsprozess auftretenden Änderungen, deren Ausbreitung auf weitere Systemelemente, einer darauf aufbauenden Evaluation alternativer Lösungen zur Bearbeitung der Änderungen sowie eines dazu passenden Kommunikationskonzepts für von der Änderung betroffene Personen. Der Aufbau der AECIA-Methodik folgt dabei dem Aufbau der in dieser Arbeit beschriebenen MBSE-Methodik und integriert sich in diese. So wird zunächst die Ontologie der MBSE-Methodik um Begriffe beziehungsweise Klassen aus dem Änderungsmanagement (bspw. <<change request>> zur Modellierung potenzieller Änderungsanfragen) erweitert. Gleichzeitig werden neue Viewpoints für das Architekturframework definiert. Insbesondere wird die Modellierungsmethode in Form von einzelnen, iterativ anwendbaren Modellierungsaktivitäten beschrieben (siehe Abbildung 11.1). Die AECIA-Methodik lässt sich nahtlos in die Modellierungstool Vorlagen und Templates der in dieser Arbeit beschriebenen MBSE-Methodik integrieren.

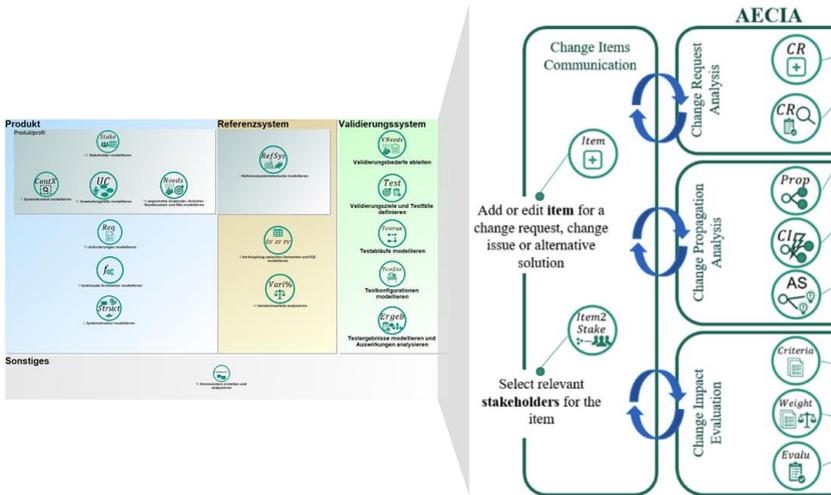


Abbildung 11.1: Übersicht über die Modellierungsaktivitäten der AECIA-Methodik (eigene Darstellung nach Martin et al., 2022)

11.2 Erweiterbarkeit der MBSE-Methodik zur Unterstützung von Produkt-Produktions-Co-Design

PPCD – Produkt-Produktions-Co-Design stellt ein zentrales Forschungsthema am IPEK dar. PPCD ist dabei nach Albers, Lanza et al. (2022) definiert als:

Definition PPCD - Produkt-Produktions-Co-Design

„Produkt-Produktions-Co-Design ist die hoch vernetzte und parallelisierte Entstehung, d.h. Planung, Entwicklung und Realisierung von Produkten und dem zugehörigen Produktionssystem bis hin zum effizienten und effektiven Betrieb der Produktion und der Gestaltung zugehöriger Geschäftsmodelle sowie der strukturierten Außerbetriebnahme der Produkte und Produktionssysteme durch nachhaltige Konzepte im Sinne einer Kreislaufwirtschaft. Die Planung erfolgt dabei zwingend über mehrere Produktgenerationen und die zugehörige Produktionssystemevolution hinweg.“

(Albers et al., 2022, S. 169, eigene Übersetzung)

MBSE-Ansätze zur integrierten Modellierung von Produkt und Produktionssystem werden dabei bereits seit einigen Jahren erforscht. So adressierte das Projekt mecPro² die integrierte modellbasierte Entwicklung cybertronischer Produkte und zugehöriger Produktionssysteme (siehe Absatz 2.6.2). Auch im BMBF-geförderten Projekt I4TP wurden Methoden zur integrierten Modellierung von Produkt und Produktionssystem erforscht (Mandel, Stürmlinger et al., 2020). Die so entstandenen Modelle können als Basis für weitere Methoden, wie eine Produkt-Produktionssystem-übergreifende Auswirkungs- und Risikoanalyse dienen (Fleischer et al., 2022). Aufbauend auf diesen Vorarbeiten wird im Projekt MoSyS derzeit die Integration derartiger Modellierungsansätze in die entwickelte MBSE-Methodik zur Unterstützung von PPCD angestrebt (Schäfer et al., 2022). In Abbildung 11.2 ist ein Ausschnitt eines in MoSyS entwickelten Modells für die Entwicklung und Produktion einer Verbundlenkerachse dargestellt. Es ist modelliert, wie sich eine Schweißbaugruppe („Welding Assembly 1“) aus den physischen Elementen „Flange_Plate_LH“ und „Side_Arm_LH“ sowie des Features einer Schweißnaht („W03: weld seam“) zusammensetzt. Ähnlich wie bei der im letzten Absatz vorgestellten AECIA-Methodik besteht auch für die Methodik zur Unterstützung des PPCD das Ziel, diese durch die Erweiterung der Ontologie, Hinzufügen zusätzlicher Viewpoints, Beschreibung einer Modellierungsmethode in Form von Modellierungsaktivitäten und Integration in ein Software-Template, in das in dieser Arbeit etablierte Rahmenwerk zu einer MBSE-Methodik zu integrieren.

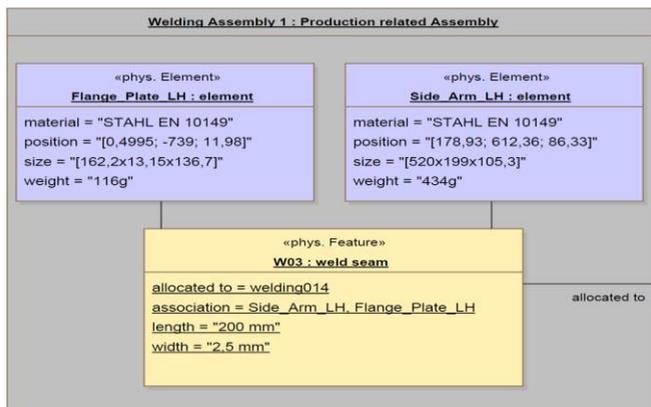


Abbildung 11.2: Ausschnitt eines Systemmodells zur integrierten Beschreibung von Produkt und Produktionssystem gemäß der in MoSyS entwickelten Methodik zur Unterstützung des PPCD (adaptiert nach Schäfer et al., 2022)

11.3 Modell der SGE nach Albers und MBSE-Modellierung

Gemäß dem Modell der SGE nach Albers basiert die Entwicklung neuer Systeme immer auf Elementen eines Referenzsystems, die als Grundlage und Ausgangspunkt der Entwicklung dienen (siehe Absatz 2.1.3). Dementsprechend muss eine MBSE-Methodik auch die Wiederverwendung von (Teil-)Modellen unterstützen. Ansätze zur Wiederverwendung von (Teil-) Modellen sind dabei bereits Gegenstand der Forschung am IPEK (siehe bspw. Hanf, 2019; Mandel, Wolter et al., 2020) und in anderen Forschungseinrichtungen (siehe bspw. Mahboob & Husung, 2022). Gleichzeitig wurde in dieser Arbeit die Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit von Systemmodellen als ein Handlungsfeld zur organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen herausgearbeitet (siehe Absatz 5.3).

Im Zuge des Live-Labs IP 2021/2022 wurden bereits erste Ansätze zur expliziten Modellierung des Referenzsystems und der Variation von Referenzsystemelementen in die in dieser Arbeit vorgestellte MBSE-Methodik integriert¹⁹. So ist in Abbildung 11.3 die Modellierung einzelner RSE in einem MBSE-Systemmodell dargestellt.

#	Name	Quelle RSE	Methode zur Identifikation	Datum Aufnahme ins Referenzsystem
1	 Referenzsystem Bibliothek			
2	 Gesamtsystem			
5	 Ausgabemechanismen			
6	 Trommelförderung			
7	 Transportspirale			18.11.21
8	 Tesla Roadster	Lotus Cars	Wettbewerbsanalyse, strategische Partnerschaft	21.04.06
9	 Kühlsystem			

Abbildung 11.3: Beispielhafte Darstellung der Modellierung von RSE in einem MBSE-Systemmodell

Diese Darstellung lässt sich als View in die entwickelte MBSE-Methodik integrieren. Zusätzlich kann die Variationsart von Modellelementen (bspw. der logischen Architektur, siehe 2.5.1) in Bezug auf die RSE modelliert und somit der Anteil an ÜV, AV und PV einzelner Modellelemente automatisch berechnet werden. Die

¹⁹Modellierungsvorgehen entwickelt in Forschungsgesprächen (2021). Teilnehmende: Martin, Alex; Albers, Albert; Mandel, Constantin

detaillierte Integration der Modellierung von RSE und Variationsarten in die in dieser Arbeit vorgestellte MBSE-Methodik ist jedoch weiterhin Gegenstand aktueller Forschung.

11.4 Beschreibung eines multidimensionalen System of Systems Architekturframeworks

Bei der Modellierung gemäß der in dieser Arbeit entwickelten MBSE-Methodik, der in Absatz 11.1, Absatz 11.2 und Absatz 11.3 beschriebenen aktuellen Forschungsarbeiten zu deren Erweiterung sowie der Analyse bestehender MBSE-Ansätze aus dem Stand der Forschung (siehe Absatz 2.5 und Absatz 2.6) wird eine Vielzahl von Themen und Perspektiven zur Modellierung adressiert. Im Rahmen des Projekts MoSyS werden diese unterschiedlichen Perspektiven für die Modellierung technischer Systeme und insbesondere SoS konsolidiert und darauf aufbauend ein multidimensionales Architekturframework, welches diese Perspektiven integriert, entwickelt (Mandel, Guenther et al., 2022). Das entwickelte Architekturframework soll als Referenz für die Ableitung und Entwicklung bedarfsgerechter Frameworks und Methodiken, unter Berücksichtigung aller für die Entwicklung relevanten Perspektiven dienen. Bei der Entwicklung des SoS Architekturframeworks wurden vier Themenschwerpunkte identifiziert, die bislang noch nicht oder nur unzureichend integriert in bestehenden Frameworks berücksichtigt werden:

- Modellierung unter Berücksichtigung, dass das zu entwickelnde System Teil eines SoS ist oder selbst ein SoS darstellt
- Modellierung unter Berücksichtigung, dass die Entwicklung eines Produktes und seiner einzelnen Inkremente in Generationen erfolgt und immer auf Referenzen basiert
- Integrierte Modellierung von Produkt und Produktionssystem, zur Unterstützung von PPCD
- Integrierte Modellierung von Produkt und Validierungssystem, wie in der vorliegenden Dissertation beschrieben und adressiert

Insgesamt wurden bislang sechs Dimensionen herausgearbeitet und im Architekturframework beschrieben (siehe Abbildung 11.4).

- *System Level*: Systemhierarchieebenen, wie sie beispielsweise im SPES-Framework genutzt werden (siehe Absatz 2.6)
- *System Type*: Unterschiedliche „Layer“, beispielsweise für Produkt-Validierungssystem-Produktionssystem, angelehnt an das iPeM (siehe Absatz 2.2.2)
- *Time*: Eine zeitliche Betrachtung des Systemlebenszyklus
- *PS-RFLP*: Unterschiedliche Abstraktionsebenen, wie sie auch in der MBSE-Methodik in dieser Arbeit beschrieben werden: Problemraum/Produktprofil (PS), Anforderungen (R), Funktionen (F), logische Architektur (L), physische Architektur (P)
- *Croscutting Aspects*: Eine Dimension für zusätzliche, Abstraktions-Ebenen übergreifende Perspektiven, wie beispielsweise „Traceability“ oder „Safety & Reliability“ nach dem MagicGrid (Absatz 2.6.2)
- *Product/System-Engineering-Generation*: Unterschiedliche Entwicklungs- und Systemgenerationen nach dem Modell der SGE (siehe Absatz 2.1.3)

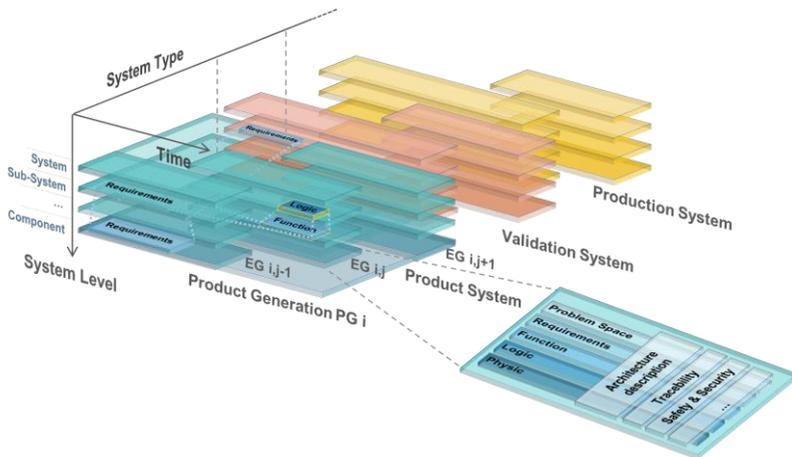


Abbildung 11.4: SoS Architekturframework mit sechs Dimensionen (Mandel, Guenther et al., 2022, S. 225)

Die Evaluation und Weiterentwicklung des SoS-Architekturframeworks sowie Methoden zu dessen bedarfsgerechter Instanziierung in unterschiedlichen Anwendungskontexten sind momentan Gegenstand der Forschung im Projekt MoSyS.

11.5 Schulung der entwickelten MBSE-Methodik außerhalb der Forschungsumgebungen dieser Dissertation

Die in dieser Arbeit entwickelte MBSE-Methodik findet bereits außerhalb der Forschungsumgebungen dieser Dissertation Anwendung. So wurde die angepasste Version der entwickelten MBSE-Methodik aus der Fallstudie mit Kostal (siehe Absatz 8.1) im Rahmen einer Summer School an der Fachhochschule Dortmund mit 11 Studierenden gelehrt und genutzt. Die Master-Studierenden des Studiengangs „Embedded Systems Engineering“ setzten die MBSE-Methodik dabei über eine Woche in drei Projekten ein. Unterstützt wurden die Studierenden bei der Problemeingrenzung und der Tool-Anwendung durch zwei Partner aus dem Projekt MoSyS. Eine direkte Beteiligung des Autors dieser Dissertation fand jedoch nicht statt. Am Ende des Projekts wurde eine Evaluation der MBSE-Methodik entlang der in Absatz 5.3 herausgearbeiteten Handlungsfelder zur individuellen und organisatorischen Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in Form einer Online-Umfrage durchgeführt. Zusätzlich wurden Interviews entlang der Handlungsfelder mit zwei Experten bei Kostal geführt. (Wiecher et al., 2024)

Die Auswertung des Online-Fragebogens und der Interviews zeigt auch für den Einsatz der MBSE-Methodik in den untersuchten Projekten und mit Experten bei Kostal ein positives Bild. So lässt sich unter anderem erkennen, dass die Studierenden zunächst auf Basis einer initialen Modellierung des Problemraums/Produktprofils, Elemente des Produkts und des Validierungssystems (Validierungsbedarfe, Testfälle etc.) modellierten. Es konnte beobachtet werden, dass die Studierenden nach dieser detaillierteren Modellierung von Produkt und Validierungssystem wiederum Elemente des Problemraums/Produktprofils modellierten und dieses konkretisierten und erweiterten. (Wiecher et al., 2024)

Dies kann als weiterer Indikator gesehen werden, dass die entwickelte MBSE-Methodik die Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit in der Validierung unterstützt. Die Erkenntnisse aus der Anwendung der entwickelten MBSE-Methodik außerhalb der Forschungsumgebung dieser Dissertation bestärken weiterhin die Signale hinsichtlich des Potenzials der MBSE-Methodik zur Steigerung der Akzeptanz von MBSE-Ansätzen in der Anwendung.

11.6 Anbindung von Simulationsmodellen an MBSE-Systemmodelle

Wie in Absatz 6.2 beschrieben, werden bereits erste Ansätze zur Anbindung von Validierungsumgebungen an die gemäß der entwickelten MBSE-Methodik erstellten

Systemmodelle untersucht. In zukünftigen Arbeiten gilt es diese Schnittstelle zwischen MBSE-Systemmodellen und geeigneten Validierungsumgebungen weiter zu detaillieren. Einerseits sollte dabei die (teil-) automatische Generierung von Testfällen und (virtueller) Validierungsumgebungen auf Basis des Systemmodells erforscht werden. Andererseits gilt es, die Synchronisation von Ergebnissen aus der Durchführung von Tests in der Validierungsumgebung und in einem MBSE-Systemmodell zu deren Interpretation und Ableitung weiterer Aktivitäten für den Produktentstehungsprozess zu detaillieren. Dies ist bereits ein Untersuchungsthema am IPEK (siehe bspw. Mandel, Wäschle et al., 2021) und wird zudem in weiteren Forschungsarbeiten zu MBSE adressiert (siehe bspw. Husung, Kleiner, Klyashtorny & Lindemann, 2019).

11.7 Modellierung von Unsicherheit

Ein weiteres Forschungsgebiet ist die Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Synthese und Analyse von MBSE-Systemmodellen und deren konsequente Auflösung durch geeignete Validierungsaktivitäten im Produktentstehungsprozess. Dabei spielt insbesondere die explizite Modellierung von Reifegraden von Elementen im Systemmodell eine Rolle. Reifegradbeschreibungen fokussieren bislang vor allem den Abgleich zwischen einem Stand des Objektsystems und des Zielsystems. Reifegradbeschreibungen in der Modellierung des Zielsystems sind noch Stand aktueller Forschung (Richter et al., 2020). In zukünftigen Forschungsarbeiten soll untersucht werden, wie Reifegradbeschreibungen des Zielsystems in eine MBSE-Methodik integriert werden können. Zudem sollen Methoden zur gezielten Ableitung von Testfällen und Testumgebungen basierend auf den Reifegrad-abhängigen Beschreibungen des Zielsystems, untersucht werden. Dabei ist insbesondere die Steigerung des Reifegrads durch geeignete Validierungsaktivitäten Gegenstand der Forschung. Zudem soll untersucht werden, wie sich auch Testfälle und Testfall-Muster als Elemente eines Referenzsystems modellieren und in der Entwicklung einer Systemgeneration wiederverwenden lassen.

11.8 Unternehmensspezifische Implementierung der entwickelten MBSE-Methodik

Wie beschrieben wird die entwickelte MBSE-Methodik im Projekt MoSyS eingebracht und kontinuierlich weiterentwickelt. Zudem wird die entwickelte MBSE-Methodik von den Unternehmenspartnern in MoSyS als Ausgangspunkt für die

Umsetzung unternehmensspezifischer MBSE-Methodiken verwendet. So finden zum Zeitpunkt der Ausarbeitung dieser Dissertation die Entwicklung und Einführung einer MBSE-Methodik bei HARTING Applied Technologies (HARTING AT) statt (Mandel et al., 2023). Bei HARTING AT wird eine Ontologie als Grundlage der Modellierungssprache eingeführt. Zudem werden Modellierungsaktivitäten und dafür zur nutzende Viewpoints/Views definiert. Die beschriebenen Modellierungsaktivitäten dienen bislang insbesondere zur Unterstützung von Analyse- und Syntheseaktivitäten in der Analyse- und Konzeptphase von Projekten. Die Implementierung der MBSE-Methodik erfolgt durch eine Tool-Anpassung in iQUAVIS. Der Auszug einer beispielhaften Modellierungsaktivität für die MBSE-Methodik bei HARTING AT ist in Abbildung 11.5 dargestellt. Die gelben Pfeile repräsentieren dabei die Teilaktivitäten der Modellierungsaktivität. Die weißen Kästen (bspw. „[Worksheet] Listing of the relevant environment impact“) repräsentieren jeweils die Views, die zur Durchführung der einzelnen Teilaktivitäten verwendet werden. (Mandel et al., 2023)

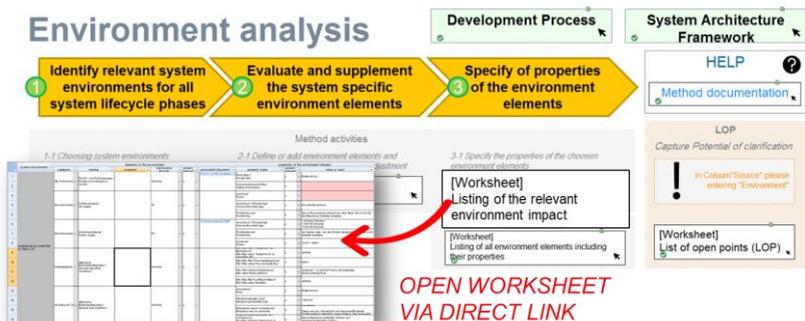


Abbildung 11.5: Ausschnitt einer implementierten Modellierungsaktivitäten der MBSE-Methodik bei HARTING AT im Modellierungstool iQUAVIS (adaptiert nach Mandel et al., 2023, S. 901)

Es zeigt sich damit, dass die entwickelte MBSE-Methodik als Grundlage zur Umsetzung und Einführung unternehmensspezifischer MBSE-Methodiken dient. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten die Weiterentwicklung der MBSE-Methodik bei HARTING AT untersuchen, um Rückschlüsse auf eine Weiterentwicklung der in dieser Arbeit entwickelten MBSE-Methodik zu ziehen. Zudem sind weitere unternehmensspezifische Implementierungen (und gegebenenfalls Adaptionen) der in dieser Arbeit entwickelten MBSE-Methodik in weiteren Unternehmen zu untersuchen.

11.9 Schlussbemerkung

In dieser Dissertation wird eine ganzheitliche MBSE-Methodik zur Unterstützung der Kontinuität, Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit der Validierung im Produktentstehungsprozess entwickelt. Der Bedarf nach einer solchen Unterstützung ergibt sich aus dem Stand der Forschung vor dem Hintergrund der steigenden Komplexität in der Produktentstehung und der herausragenden Stellung der Validierung im Produktentstehungsprozess. Die MBSE-Methodik erweitert dabei einerseits den Stand der Forschung, so dass umfänglich Aspekte zur Modellierung des Validierungssystems in einem MBSE-Ansatz betrachtet werden. Zudem wird gemäß dem Leitbild ASE ein besonderer Fokus auf die Anwendbarkeit beziehungsweise individuelle und organisatorische Akzeptanz der MBSE-Methodik gelegt. Damit wird eine Orientierung am Menschen und dessen Bedarfen als handelnde Person im Produktentstehungsprozess angestrebt. Die Evaluationen zur entwickelten MBSE-Methodik in dieser Dissertation zeigen deren Potenzial zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess unter Berücksichtigung der individuellen und organisatorischen Akzeptanz. Die MBSE-Methodik soll weiterhin als Rahmenwerk dienen, um weitere Anwendungsfälle zu integrieren und somit einen erweiterbaren, flexiblen und individualisierbaren Rahmen für die Anwendung von MBSE bieten. Hierzu laufen derzeit bereits weitere Forschungsarbeiten.

Literaturverzeichnis

- Albers, A. (2010). Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In *Proceedings of the TMCE 2010* (Bd. 12, 343–356).
- Albers, A. (Hrsg.). (2023). *Engineering neu denken und gestalten! Herausforderungen, Anwendungsszenarien und das neue Leitbild Advanced Systems Engineering*. (acatech IMPULS). München.
<https://doi.org/10.48669/aca2023-7>
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S. & Matros, K. (2016). Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 541–569). München: Hanser.
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S., Reiss, N. & Bursac, N. (2017). Agile product engineering through continuous validation in PGE - Product Generation Engineering. *Design Science*, 3. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.5>
- Albers, A. & Bursac, N. (2019, 5. Juli). *IPEK Roundtable: ASD – Agile Systems Design*, Karlsruhe.
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015). Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP* (n.p.). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Albers, A., Dumitrescu, R., Gausemeier, J., Lindow, K., Riedel, O. & Stark, R. (Hrsg.). (2022). *Strategie Advanced Systems Engineering. Leitinitiative zur Zukunft des Engineering- und Innovationsstandorts Deutschland*. München.
- Albers, A., Dumitrescu, R., Gausemeier, J., Riedel, O. & Stark, R. (2018). *Advanced Systems Engineering – Eine Leitlinie zur Stärkung der Innovationskraft (acatech Kooperation)* (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik (IEM), Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) &

IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hrsg.). München.

- Albers, A. & Düser, T. (2010). Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform. In *Automobiles and sustainable mobility: Proceedings of the FISITA 2010 World Automotive Congress* (n.p.). Budapest, Hungary: Gépipari Tudományos Egyesület; Scientific Association for Mechanical Engineering (GTE).
- Albers, A., Fahl, J., Hirschter, T., Endl, M., Erwert, R. & Rapp, S. (2020). Model of PGE – Product Generation Engineering by the Example of Autonomous Driving. In *Procedia Cirp. CIRP Design Conference 2020* (Bd. 91, S. 665–677). Amsterdam, Niederlande: Elsevier.
- Albers, A. & Gausemeier, J. (2010). Von der fachdisziplinorientierten zur vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung. In R. Ruprecht (Hrsg.), *10. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2010. Produktion in Deutschland hat Zukunft*. BMBF-Kongress (S. 248–256).
- Albers, A., Heimicke, J., Spadinger, M., Reiss, N., Breitschuh, J., Richter, T. et al. (2019). A systematic approach to situation-adequate mechatronic system development by ASD - Agile Systems Design. In *Procedia CIRP. CIRP Design Conference 2019* (Bd. 84, S. 1015–1022).
- Albers, A., Heimicke, J., Walter, B., Basedow, G. N., Reiss, N., Heitger, N. et al. (2018). Product Profiles: Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. In *Procedia CIRP. CIRP Design Conference 2018* (Bd. 70, S. 253–258).
- Albers, A., Lanza, G., Klippert, M., Schäfer, L., Frey, A., Hellweg, F. et al. (2022). Product-Production-CoDesign: An Approach on Integrated Product and Production Engineering Across Generations and Life Cycles. In *Procedia CIRP. CIRP Design Conference 2022 - Design in a changing world* (Bd. 109, S. 167–172).
- Albers, A. & Lohmeyer, Q. (2012). Advanced Systems Engineering - Towards a Model-Based and Human-Centred Methodology. In Horváth, Rusák, A. Albers & M. Behrendt (Hrsg.), *Tools and Methods of Competitive Engineering – TMCE 2012* (S. 407–416). Delft University of Technology, Netherlands und KIT, Germany.

- Albers, A., Lohmeyer, Q. & Radimersky, A. (2012). Individuelle und organisatorische Akzeptanz von Methoden des Systems Engineering. Tag des Systems Engineering TdSE 2012, Paderborn. In M. Maurer & S.-O. Schulze (Hrsg.), *Tag des Systems Engineering 2012* (S. 351–360). München: Carl Hanser.
- Albers, A., Matros, K., Behrendt, M. & Jetzinger, H. (2015). Das Pull-Prinzip der Validierung – Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess. *VDI Konstruktion*, (Juni 6-2015), 74–81.
- Albers, A., Pinner, T., Yan, S., Hettel, R. & Behrendt, M. (2016). Koppelsystems: Obligatory Elements within Validation Setups. In *Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference* (S. 109–118).
- Albers, A. & Rapp, S. (2022). Model of SGE: System Generation Engineering as Basis for Structured Planning and Management of Development. In D. Krause & E. Heyden (Hrsg.), *Design Methodology for Future Products* (S. 27–46). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78368-6_2
- Albers, A., Rapp, S., Fahl, J., Hirschter, T., Revfi, S., Schulz, M. et al. (2020). Proposing a generalized description of variations in different types of systems by the model of PGE – Product Generation Engineering. In *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference* (Bd. 1, S. 2235–2244). Cambridge University Press.
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F. et al. (2019a). The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. In Design Society (Hrsg.), *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)* (Bd. 1, S. 1693–1702).
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F. et al. (2019b). Das Referenzsystem im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Vorschlag einer generalisierten Beschreibung von Referenzprodukten und ihrer Wechselbeziehungen. *KIT Scientific Working Papers*, 96. <https://doi.org/10.5445/IR/1000093227>
- Albers, A., Reiss, N., Bursac, N. & Breitschuh, J. (2016). 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. In C. Boks (ed.),

- Proceedings of NordDesign 2016* (S. 411–420). Bristol, United Kingdom: The Design Society.
- Albers, A., Reiss, N., Bursac, N. & Richter, T. (2016). iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering. In *Procedia CIRP. CIRP Design Conference 2016* (Bd. 50, S. 100–105).
- Albers, A., Saak, M., Burkhardt, N. & Schweinberger, D. (2002). Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode. In *47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der Technischen Universität Ilmenau IWK 2002* (S. 83–84).
- Albers, A. & Wintergerst, E. (2014). The Contact and Channel Approach (C&C2-A): Relating a System's Physical Structure to Its Functionality. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations* (S. 151–171). London: Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_8
- Albers, A. & Zingel, C. (2013). Challenges of Model-Based Systems Engineering: A Study towards Unified Term Understanding and the State of Usage of SysML. In M. Abramovici & R. Stark (Hrsg.), *Smart Product Engineering: Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference* (S. 83–92). Springer Berlin Heidelberg.
- Albers, A., Zingel, C. & Behrendt, M. (2012). Advanced Systems Engineering – Forschung an einer innovativen Produktentwicklungssystematik. *Konstruktion*, 11/12-2012, S. 69–70.
- Aleksandraviciene, A. & Morkevicius, A. (2021). *MagicGrid Book of Knowledge. A Practical Guide to Systems Modeling using MagicGrid from Dassault Systèmes* (2nd edition). Kaunas. Verfügbar unter: <https://discover.3ds.com/magicgrid-book-of-knowledge>
- Alt, O. (2019). Modellbasiertes Systems Engineering ohne Anlernaufwand mit den Fundamental Modeling Concepts. In *Tag des Systems Engineering 2019* (S. 205–212).
- Anacker, H., Dumitrescu, R., Kharatyan, A. & Lipsmeier, A. (2020). Pattern based systems engineering – application of solution patterns in the design of intelligent technical systems. In D. Marjanović, M. Storga, S. Skec & T.

Martinez (Hrsg.), *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 2020* (Bd. 1, S. 1195–1204).

Atlassian. (2022, 20. Juni). *R4J - Requirements Management for Jira | Atlassian Marketplace*. Verfügbar unter:

<https://marketplace.atlassian.com/apps/1213064/r4j-requirements-management-for-jira?tab=overview&hosting=cloud>

Atzberger, A., Wallisch, A., Nicklas, S. & Paetzold, K. (2020). Antagonizing Ambiguity – Towards a Taxonomy for Agile Development. In *Procedia Cirp. CIRP Design Conference 2020* (Bd. 91, S. 464–471). Amsterdam, Niederlande: Elsevier.

Badke-Schaub, P., Daalhuizen, J. & Roozenburg, N. (2011). Towards a Designer-Centered Methodology: Descriptive Considerations and Prescriptive Reflections. In H. Birkhofer (Hrsg.), *The Future of Design Methodology* (S. 181–197). London: Springer-Verlag London Limited.

Bernijazov, R., Hillebrand, M., Bremer, C., Kaiser, L. & Dumitrescu, R. (2018). Specification Technique for Virtual Testbeds in Space Robotics. In *Procedia Manufacturing. 4th International Conference on System-Integrated Intelligence* (Bd. 24, S. 271–277).

Birkhofer, H., Kloberdanz, H., Berger, B. & Sauer, T. (2002). Cleaning Up Design Methods - Describing Methods Completely and Standardised. In *DS 30: Proceedings of DESIGN 2002, the 7th International Design Conference* .

Bleicher, K. (1991). *Das Konzept des integrierten Managements*. Frankfurt: Campus Verlag.

Blessing, L. (1994). *A Process-Based Approach to Computer-Supported Engineering Design*. University of Twente, Enschede, the Netherlands: Black Bear Press Ltd, Cambridge.

Blessing, L. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>

Bone, M. & Cloutier, R. (2010). The Current State of Model Based Systems Engineering: Survey Results from the OMG SysML Request for Information

2009. In *8th Conference on Systems Engineering Research - CSER 2010* (n.p.).
- Bremer, C., Hillebrand, M., Hassan, B. & Dumitrescu, R. (2015). Konzept für das ganzheitliche Testen mechatronischer Systeme. In M. Schenk (Hrsg.), *DIGITALES ENGINEERING ZUM PLANEN, TESTEN UND BETREIBEN TECHNISCHER SYSTEME*. 18. IFF Wissenschaftstage .
- Bretz, L., Kaiser, L. & Dumitrescu, R. (2019). An analysis of barriers for the introduction of Systems Engineering. In *Procedia CIRP. CIRP Design Conference 2019* (Bd. 84, S. 783–789).
- Bringmann, E. & Krämer, L. (2008). Model-Based Testing of Automotive Systems. Proceedings of ICST. In *1st International Conference on Software Testing, Verification and Validation* (S. 485–493).
- Buede, D. M. & Miller, W. D. (2016). *The Engineering Design of Systems. Models and Methods*. New York, UNITED STATES: John Wiley & Sons, Incorporated.
- Cantamessa, M. (2003). An empirical perspective upon design research. *Journal of Engineering Design*, 14(1), 1–15.
- Chami, M., Aleksandraviciene, A., Morkevicius, A. & Bruel, J.-M. (2018). Towards Solving MBSE Adoption Challenges: The D3 MBSE Adoption Toolbox. In *28th annual INCOSE International Symposium* (Bd. 28, S. 1463–1477).
- Chaudemar, J.-C. & Saqui-Sannes, P. de (2021). MBSE and MDAO for Early Validation of Design Decisions: a Bibliography Survey. In *SYSCON 2021. The 15th Annual IEEE International Systems Conference* (S. 1–8). Piscataway, NJ: IEEE.
- Clark, K. B. & Fujimoto, T. (1991). *Product Development Performance. Strategy, Organization, and Management in the World Auto Industry*. Harvard Business School Press.
- Cloutier, R. (2011). Introduction to this Special Edition on Model-based Systems Engineering. In *INSIGHT - Special Feature* (S. 7–8). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/SpringerReference_25233

- Cloutier, R. (2019). 2018 Model Based Systems Engineering Survey. Conducted December 2018. In *Proceedings of the 2019 INCOSE MBSE Workshop* .
- Dassault Systèmes. (2022, 18. März). *Cameo Systems Modeler*. Verfügbar unter: <https://www.3ds.com/products-services/catia/products/no-magic/cameo-systems-modeler/>
- Daun, M., Bohn, P., Brings, J. & Weyer, T. (2016). Structured Model-based Engineering of Long-living Embedded Systems: The SPES Methodological Building Blocks Framework. *Softwaretechnik-Trends*, (36), 12–15.
- De Weck, O. (2021, 28. Oktober). *When is complex too complex? Graph energy and its role in proactive complexity management of cyber-physical systems*. Joint work with Dr. Kaushik Sinha and Narek Shougarian. INCOSE EMEA Workshop 2021, Online.
- Delligatti, L. (2014). *SysML distilled. A brief guide to the systems modeling language*. Upper Saddle River, NJ; Munich [u.a.] : Addison-Wesley.
- Di Maio, M., George-Dimitrios Kapos, Niklas Klusmann, Linus Atorf, Ulrich Dahmen, Michael Schluse et al. (2018). Closed-Loop Systems Engineering (CLOSE): Integrating Experimentable Digital Twins with the Model-Driven Engineering Process. In *4th IEEE International Symposium on Systems Engineering ISSE 2018* (pp. 1–8).
- Dörner, D. (1979). *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Zweite Auflage. Stuttgart: Kohlhammer.
- Dresch, A., Lacerda, D. P. & Antunes Jr, J. A. V. (2015). *Design Science Research*. Cham: Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-07374-3>
- Dumitrescu, R., Albers, A., Riedel, O., Stark, R. & Gausemeier, J. (Hrsg.). (2021). *Advanced Systems Engineering - Wertschöpfung im Wandel. Engineering in Deutschland – Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft*. Paderborn. Verfügbar unter: <https://www.advanced-systems-engineering.de>
- Ebel, B. (2015). Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 85).

Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
<https://doi.org/10.5445/IR/1000048334>

Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2013). *Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Hanser.

Eigner, M., Dickopf, T., Schneider, M. & Schulte, T. (2017). mecPro² - A Holistic Concept for the Model-Based Development of Cybertronic Systems. In *DS 87-3 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17)*. Vol. 3: Product, Services and Systems Design (Bd. 3, S. 379–388).

Eigner, M., Roubanov, D. & Zafirov, R. (2014). *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-43816-9>

Eisenbart, B., Gericke, K. & Blessing, L. (2013). An analysis of functional modeling approaches across disciplines. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 27(3), 281–289.
<https://doi.org/10.1017/S0890060413000280>

Eisenbart, B., Qureshi, A., Gericke, K. & Blessing, L. (2013). Integrating Different Functional Modeling Perspectives. In A. Chakrabarti & R. V. Prakash (Eds.), *ICoRD'13. Global Product Development* (Lecture Notes in Mechanical Engineering, S. 85–97). India: Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1050-4_7

Elsevier. (2021, 12. Februar). *Scopus fact sheet*, Elsevier. Verfügbar unter:
https://www.elsevier.com/solutions/scopus?dgcid=RN_AGCM_Sourced_300005030

Emotive GmbH & Co. KG. (2022, 03. Juli). *Open Test Framework*. Verfügbar unter: <https://www.emotive.de/otf-de.html>

Estefan, J. A. (2007). *Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies* (IncoSE MBSE Focus Group 25 (8)). Verfügbar unter:
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.517.219&rep=rep1&type=pdf>

- EuroNCAP. (2015). *European New Car Assessment Programme (Euro NCAP). Test Protocol - AEB systems*. Version 1.1. Verfügbar unter: <https://cdn.euroncap.com/media/17719/euro-ncap-aeb-test-protocol-v11.pdf>
- Femmer, H. & Böhm, W. (2021, 10. November). *SpesML - SysML Workbench for the SPES Methodology*. Tag des Systems Engineering 2021, Online.
- Fowler, M. & Highsmith, J. (2001). The Agile Manifesto. *Software Development*, 9(8), 28–35.
- Friedenthal, S. (2009). SysML: Lessons from Early Applications and Future Directions. *INSIGHT*, 12(4), 10–12. <https://doi.org/10.1002/inst.200912410>
- Friedenthal, S., Davey, C., Nielsen, P., Schreinemakers, P., Oster, C., Sparks, E. et al. (2021). *Systems Engineering Vision 2035. Engineering Solutions for a Better World*. INCOSE. Verfügbar unter: <https://www.incose.org/publications/se-vision-2035>
- Friedenthal, S., Moore, A. & Steiner, R. (2012). *A practical Guide to SysML. The Systems Modeling Language*. Morgan Kaufmann OMG Press.
- Gausemeier, J., Brandis, R., Dorociak Rafal, Müller, A., Nysen, A. & Terfloth, A. (2012). Integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem. In J. Gausemeier, G. Lanza & U. Lindemann (Hrsg.), *Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren. Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung* (1. Aufl., S. 88–125). s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag. Zugriff am 27.05.2022.
- Gausemeier, J., Dumitrescu, R., Steffen, D., Czaja, A., Wiederkehr, O. & Tschirner, C. (2015). *Systems Engineering in industrial practice* (Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn, Faculty of Product Engineering, Fraunhofer Institute for Production Technology IPT – Project Group Mechatronic Systems Design & UNITY AG, Hrsg.). Paderborn. Verfügbar unter: https://www.hni.uni-paderborn.de/fileadmin/Fachgruppen/Seniorprofessur_Gausemeier/systemsen_gineerings/20150706_SE-Studie_enGB_Einzelseiten.pdf
- Gericke, K., Bender, B., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2021). Entwickeln von Wirkstrukturen. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher*

Produktentwicklung (9. Auflage 2019, S. 255–306). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_10

Gericke, K., Eckert, C. M. & Stacey, M. K. (2017). What we need to say about a design method? In *DS 87-3 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17)*. Vol. 3: Product, Services and Systems Design (Bd. 3, S. 101–110).

Gómez-Pérez, A., Fernández-López, M. & Corcho, O. (2004). *Ontological Engineering. with examples from the areas of Knowledge Management, e-Commerce and the Semantic Web* (Advanced information and knowledge processing). London, Berlin, Heidelberg: Springer.

Grady, R. B. (1992). *Practical software metrics for project management and process improvement*. Prentice-Hall, Inc.

Graves, H. & West, M. (Object Management Group (OMG), Hrsg.). (2012). *Current State of ontology in engineering systems*. Verfügbar unter: <https://www.omgwiki.org/MBSE/doku.php?id=mbse:ontology>

Gurbuz, H. G. & Tekinerdogan, B. (2018). Analyzing Systems Engineering Concerns in Architecture Frameworks – A Survey Study. In *4th IEEE International Symposium on Systems Engineering 2018* (n. p.).

Habdank, A. (2023, 03. Oktober). *Tesla ruft mehr als 362.000 Autos wegen eines Softwareproblems zurück, das dazu führen kann, dass sie sich "an Kreuzungen unsicher verhalten*. Verfügbar unter: <https://www.businessinsider.de/wirtschaft/tesla-ruft-mehr-als-362-000-autos-wegen-eines-softwareproblems-zurueck-das-dazu-fuehren-kann-dass-sie-sich-an-kreuzungen-unsicher-verhalten-a/>

Hastings, D. & McManus, H. (2004). A Framework for Understanding Uncertainty and its Mitigation and Exploitation in Complex Systems. In *Engineering Systems Symposium 2004* (n.p.).

Hildebrandt, C., Kocher, A., Kustner, C., Lopez-Enriquez, C.-M., Muller, A. W., Caesar, B. et al. (2020). Ontology Building for Cyber-Physical Systems: Application in the Manufacturing Domain. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(3), 1266–1282. <https://doi.org/10.1109/TASE.2020.2991777>

- Holt, J. & Perry, S. (2018). *SysML for Systems Engineering: A Model-Based Approach* (Computing and networks, vol. 20, Third edition). Stevenage: Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/PBPC020E>
- Husung, S., Kleiner, S., Klyashtorny, I. & Lindemann, G. (2019). Frühzeitige Verifikationen im Entwicklungsprozess. *Digital Engineering Magazin*, 02/2019, 40–41. Verfügbar unter: <https://www.digital-engineering-magazin.de/model-based-systems-engineering-fruehes-verifizieren-der-entwicklung/>
- Husung, S., Lindemann, G., Korobov, S., Hamester, M. & Kleiner, S. (2018). Use Case driven Model-based Systems Engineering for industrial applications. In *Tag des Systems Engineering / EMEASEC 2018* (n.p.).
- IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). (2021). *IPEK inside 1/2021* (Präsident Professor Dr.-Ing. Holger Hanselka, Hrsg.). Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Verfügbar unter: https://www.ipek.kit.edu/downloads/IPEK_inside_2021.pdf
- IPG Automotive GmbH. (2019, 11. März). *CarMaker*. Verfügbar unter: <https://ipg-automotive.com/de/produkte-services/simulation-software/carmaker/>
- Isaksson, O., Eckert, C., Borgue, O., Hallstedt, S. I., Hein, A. M., Gericke, K. et al. (2019). Perspectives on Innovation: The Role of Engineering Design. In Design Society (Hrsg.), *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)* (S. 1235–1244).
- ISO/IEC, 25010:2011-03-01 (2011). *Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - System and software quality models (ISO/IEC 25010:2011)*.
- ISO/IEC/IEEE, 15288:2015-05-15 (2015). *System and software engineering – Systems life cycle processes (ISO/IEC/IEEE 15288:2015)*.
- ISO, 42010:2022-11 (2022). *Systems and software engineering -- Architecture description (ISO/IEC/IEEE 42010:2022)*. Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Johannaber, M., Schwartzkopff, T., Schulmeister, U. & Boumans, M. (2021). Engineering Method for Future Cross Domain Automotive Systems. In *9th Int. Symposium on Development Methodology* (n.p.).

- Junker, M. (2018, 9. August). *Getting Started With the SPES System Modeling Framework*. Verfügbar unter: <https://www.qualicen.de/getting-started-spes-system-modeling-framework/>
- Kleiner, S. & Kramer, C. (2013). Model Based Design with Systems Engineering based on RFLP Using V6. In R. S. Michael Abramovici, M. Abramovici & R. Stark (Hrsg.), *Smart Product Engineering: Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference* (pp. 93–102). Springer Berlin Heidelberg.
- Knecht, J. (2022, 20. Juni). *Serviceaktion für den VW Golf 8*. Verfügbar unter: <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/vw-golf-8-serviceaktion-rueckruf-software-update-werkstatt/>
- Krause, B. (2022, 22. April). *Was ist OPC UA? Die wichtigsten Begriffe im Überblick*. Verfügbar unter: <https://www.opc-router.de/was-ist-opc-ua/>
- Lamm, J. G. & Weikiens, T. (2014). Method for Deriving Functional Architectures from Use Cases. *Systems Engineering*, 17(2), 225–236. <https://doi.org/10.1002/sys.21265>
- Le Lann, G. (1996). *The Ariane 5 Flight 501 Failure - A Case Study in System Engineering for Computing Systems*. Verfügbar unter: <https://hal.inria.fr/inria-00073613/>
- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Lohmeyer, Q., Albers, A., Radimersky, A. & Breitschuh, J. (2014). Individual and Organizational Acceptance of Systems Engineering Methods - Survey and Recommendations. In I. Horváth & Z. Rusák (Hrsg.), *Proceedings of TMCE 2014* (S. 1531–1540).
- Mahboob, A. & Husung, S. (2022). A Modelling Method for Describing and Facilitating the Reuse of Sysml Models During Design Process. In *Proceedings of the Design Society. International Design Conference – DESIGN 2022* (Bd. 2, Bd. 2, S. 1925–1934).
- Maier, M. W. (1998). Architecting principles for systems-of-systems. *Systems Engineering*, 1(4), 267–284. [https://doi.org/10.1002/\(SIC\)1520-6858\(1998\)1:4<267::AID-SYS3>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SIC)1520-6858(1998)1:4<267::AID-SYS3>3.0.CO;2-D)

- Marxen, L. (2014). A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 74). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000045823>
- Marxen, L. & Albers, A. (2012). Supporting Validation in the Development of Design Methods. In D. Marjanović (Hrsg.), *DS 70: Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference* (DS, Bd. 70, S. 1009–1018). Zagreb: Fac. of Mechanical Engineering and Naval Architecture.
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung – Prozess und Methoden. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Auflage 2019, S. 397–465). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_13
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Bremer, F. & Nowoseltschenko, K. (2019). Product models in embodiment design: an investigation of challenges and opportunities. *SN Applied Sciences*, 1(9), n.p. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1115-y>
- Matthiesen, S., Schmidt, S., Moeser, G. & Munker, F. (2014). The Karlsruhe SysKIT Approach – A Three-step SysML Teaching Approach for Mechatronic Students. In *Procedia CIRP. CIRP Design Conference 2021* (Bd. 21, S. 385–390). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.136>
- McKinsey (Statista, Hrsg.). (2021, 25. Juli). *Wie hoch sind die Entwicklungskosten für verschiedene Stufen des autonomen Fahrens? (in Millionen US-Dollar). Graph.* Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1294457/umfrage/umfrage-autonomes-fahren-entwicklungskosten/>
- Modelica Association. (2021, 2. Februar). *Modelica® Language Specification version 3.5. A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling.* Modelica Association. Verfügbar unter: <https://specification.modelica.org/maint/3.5/MLS.pdf>
- Moeser, G. (2016, 26. Februar). *Kurzversion FAS4M Methodenguideline. Methodisches Vorgehen im FAS4M-Ansatz.* Kurzversion der 24-seitigen

Methodenguideline (konkrete Handlungsanleitungen) zur Veröffentlichung.
Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000056208>

Moeser, G., Grundel, M., Weilkiens, T., Kümpel, S., Kramer, C. & Albers, A. (2016). Modellbasierter mechanischer Konzeptentwurf. Ergebnisse des FAS4M-Projektes. In *Tag des Systems Engineering* (S. 419–428).

Morkevicius, A., Aleksandraviciene, A., Mazeika, D., Bisikirskiene, L. & Strolia, Z. (2017). MBSE Grid: A Simplified SysML-Based Approach for Modeling Complex Systems. *INCOSE International Symposium*, 27(1), 136–150. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2017.00350.x>

Nielsen, C., Larsen, P., Fitzgerald, J., Woodcock, J. & Peleska, J. (2015). Systems of Systems Engineering: Basic Concepts, Model-based Techniques, and Research Directions. *ACM Computing Surveys*, 48, 1–41. <https://doi.org/10.1145/2794381>

Object Management Group. (2017, 9. Dezember). *SysML v2 Request For Proposal (RFP)*. *OMG Document: ad/2017-12-02*. Verfügbar unter: <https://www.omg.org/cgi-bin/doc.cgi?ad/2017-12-2>

Object Management Group. (2019, 1. November). *OMG Systems Modeling Language SysML 1.6*. Verfügbar unter: <https://www.omg.org/spec/SysML/About-SysML/>

Pahl, G., Beitz, W., Gericke, K., Bender, B., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2021). Grundlagen technischer Systeme. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Auflage 2019, S. 9–25). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Paulweber, M., Lebert, K., List, A. V. & Kiel, F. H. (2014). *Mess- und Prüfstandstechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Phoenix Integration. (2019, 07. März). *Phoenix Integration ModelCenter*. Verfügbar unter: <https://www.phoenix-int.com/>

Pohl, K. (2007). *Requirements Engineering Grundlagen, Prinzipien, Techniken*. Heidelberg: dpunkt.verlag GmbH.

- Pohl, K., Broy, M., Daembkes, H. & Hönninger, H. (2016). *Advanced Model-Based Engineering of Embedded Systems*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-48003-9>
- PROVALIS research. (2022, 13. Februar). *WORDSTAT. Content analysis and text mining software for fast and precise processing of large amounts of unstructured information*. Verfügbar unter: <https://provalisresearch.com/products/content-analysis-software/>
- Richter, T., Felber, A., Troester, P. M., Albers, A. & Behdinar, K. (2020). Visualization of requirements engineering data to analyse the current product maturity in the early phase of product development. In *Procedia Cirp. CIRP Design Conference 2020* (Bd. 91, S. 271–277). Amsterdam, Niederlande: Elsevier.
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe 2009. Verfügbar unter: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000011529>
- Roth, S. & Scheithauer, A. (2016, Juni). *Mechanics Modeling Language (MechML) Specification v1.0*. Verfügbar unter: <http://fasform.de/content/ergebnisse/>
- Sanduka, I., Hornickel, G., Hofmann, P., Chahin, A. & Giltz, T. (2018). Systems Engineering as an Enabler in the Automotive Industry - Challenges and Concept of Integrating MBSE. In *Tag des Systems Engineering / EMEASEC 2018* (n.p.).
- Scheithauer, D. & Forsberg, K. (2013). V-Model Views. In *INCOSE International Symposium 2013* (Bd. 23, S. 502–516).
- Schnitzler, J. & Lutter, T. (2020). Efficient Automotive On-Board Chargers for the Volume Ramp-up of E-Mobility. In M. Wahl (ed.), *Automotive meets electronics: Beiträge der 11. GMM-Fachtagung* (GMM-Fachbericht, vol. 95, S. 154–159). Berlin: VDE VERLAG GMBH.
- Schumpeter, J. (1927). The Explanation of the Business Cycle. *Economica*, (21), 286–311. <https://doi.org/10.2307/2548401>
- Schwaber, K. & Sutherland, J. (2022). *The Scrum Guide. The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game*. Verfügbar unter: <https://scrumguides.org/>

Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. (2024, 6. Juli). *Software Quality Assurance, Software QA and Testing, QA Software Testing, A Testing Software, test management, test management tools - Polarion QA*. Verfügbar unter: <https://polarion.plm.automation.siemens.com/products/polarion-qa>

Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer Verlag.

Studer, R. & Sure-Vetter, Y. (Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik (insb. Prozesse und Systeme), Universität Potsdam, Hrsg.). (2019, 12. März). *Ontologien. Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik Online Lexikon*. Verfügbar unter: <https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/daten-wissen/Wissensmanagement/Wissensmodellierung/Wissensrepräsentation/Semantisches-Netz/Ontologien/index.html>

Stützel, B. & Paul, A. (2021). *Systems Engineering in Deutschland - Studie 2021. Die deutsche Unternehmenslandschaft im Vergleich* (Prozesswerk GmbH, Hrsg.). Verfügbar unter: https://www.prozesswerk.eu/site/assets/files/1179/se_studie_studie.pdf

Thomke, S. & Reinertsen, D. (1998). Agile Product Development: Managing Development Flexibility in Uncertain Environments. *California Management Review*, (41), 8–30. <https://doi.org/10.2307/41165973>

Tschirner, C., Dumitrescu, R., Bansmann, M. & Gausemeier, J. (2015). Tailoring Model-Based Systems Engineering concepts for industrial application. In *Proceedings of the 9th Annual IEEE International Systems Conference (SysCon 2015)* (S. 69–76). Piscataway, NJ: IEEE.

TwoPillars. (2022, 18. März). *iQUAVIS*. Verfügbar unter: <https://www.two-pillars.de/iquavis/>

Utting, M., Pretschner, A. & Legard, B. (2012). A taxonomy of model-based testing approaches. *Software testing, verification and reliability*, 22(5), 297–312. <https://doi.org/10.1002/stvr.456>

VDA QMC Working Group 13 / Automotive SIG. (2017, 1. November). *Automotive SPICE®. Process Reference Model, Process Assessment Model*. Version 3.1 (656 Aufl.). VDA-Verband der Automobilindustrie e.V.; QMC - Quality Management in the Automotive Industry.

- VDI-Richtlinie, 2221:2019-11-00 Blatt 1 (November 2019). *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung (VDI 2221:2019 Blatt 1)*.
- VDI-Richtlinie, 2221:2019-11-00 Blatt 2 (November 2019). *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse (VDI 2221:2019 Blatt 2)*.
- VDI-Richtlinie, 2206:2021-11-00 (2021). *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme (VDI/VDE 2206:2021)*: Beuth Verlag GmbH.
- Walden, D. D., Roedler, G. J., Forsberg, K. J., Hamelin, R. D. & Shortell, T. M. (2015). *SYSTEMS ENGINEERING HANDBOOK - A GUIDE FOR SYSTEM LIFE CYCLE PROCESSES AND ACTIVITIES* (Fourth Edition). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Walter, B., Albers, A., Haupt, F. & Bursac, N. (2016). Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor – Konzipierung und Implementierung eines Live-Lab. In *27. DfX-Symposium* (S. 283–295).
- Wäschle, M., Behrendt, M., Xing, K., Shi, H. & Albers, A. (2021). Contract-based methods and activities in the validation of interfaces for System of Systems. In *16th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)* (S. 102–107).
- Weber, C. (2005). What is “Complexity”? In *DS 35: Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design: Engineering Design and the Global Economy* (Bd. 35, S. 1785–1796).
- Weber, C. & Husung, S. (2016). Solution Patterns - Their Role in Innovation, Practice and Education. In D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic, N. Bojetic & S. Skec (Hrsg.), *Proceedings of DESIGN 2016* (S. 99–108).
- Weilkiens, T. (2014). *Systems Engineering mit SysML/UML. Anforderungen, Analyse, Architektur* (3., überarb. und aktualisierte Aufl.). Heidelberg: dpunkt.verl.
- Weilkiens, T., Lamm, J. G., Roth, S. & Walker, M. (2015). *Model-Based System Architecture*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. Verfügbar unter: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781119051930>

- Wiecher, C., Greenyer, J. & Korte, J. (2019). Test-Driven Scenario Specification of Automotive Software Components. In *Proceedings of 2019 ACM/IEEE 22nd International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C)* (S. 12–17). Piscataway, NJ: IEEE.
- Wilson-Smith, M. & Kibler, A. (2016). A truly testing experience - how Model Based Systems Engineering can help to ensure that you build the right product and build the product right. In *26th Annual INCOSE International Symposium 2016* (Bd. 26, S. 1331–1346).
- Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F. & Singer, C. (2015). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (SpringerLink : Bücher, 3., überarb. u. erg. Aufl. 2015). Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3>
- Wynn, D. C. & Clarkson, P. J. (2018). Process models in design and development. *Research in Engineering Design*, 29(2), 161–202. <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0262-7>
- Yan, S., Nickel, D., Behrendt, M. & Albers, A. (2018). Methodischer Ansatz zur Bewertung und Auswahl einer Validierungsumgebung. In *28. DfX-Symposium* (S. 283–294).
- Zingel, C. (2013). Basisdefinition einer gemeinsamen Sprache der Produktentwicklung im Kontext der Modellbildung technischer Systeme und einer Modellierungstechnik für Zielsystem und Objektsystem technischer Systeme in SysML auf Grundlage des ZHO-Prinzips. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 70). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000037421>
- Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor co-betreut wurden:**
- Böning, J. (2020). *Eine modellbasierte Validierungsmethode für anforderungs- und funktionsgetriebene Systemarchitekturen in der frühen Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Hanf, M. M. (2019). *Entwicklung eines Ansatzes zur Wiederverwendung von interdisziplinären Architekturmodellen im Kontext des MBSE und der PGE*. Unveröffentlichte Masterarbeit. IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Scherer, D. (2021). *Untersuchung möglicher Potenziale von Ansätzen des (Model-Based) Systems Engineering für den Einsatz in Entwicklungsprojekten im Unternehmenskontext und Identifikation von Herausforderungen bei der Einführung*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Techanitisawad, A. (2020). *Integration unterschiedlicher Sichten für die Digitalisierung in der Produktentwicklung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Windisch, E. (2021). *Ansatz zur Modellbasierten Zielsystementwicklung zur Planung von Entwicklungsgenerationen in der agilen Entwicklung mechatronischer Systeme*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Zeng, B. (2020). *Entwicklung und Implementierung eines durchgängigen Model-Based Engineering Ansatzes für die Validierung technischer Systeme am Beispiel Fahrerassistenzsysteme*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Forschungsarbeit entstanden sind:

Albers, A., Mandel, C., Yan, S. & Behrendt, M. (2018). SYSTEM OF SYSTEMS APPROACH FOR THE DESCRIPTION AND CHARACTERIZATION OF VALIDATION ENVIRONMENTS. In *DS92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference* (S. 2799–2810).

Albers, A., Stürmlinger, T., Mandel, C., Wang, J. [Jiaying], Baneres, M. & Behrendt, M. (2019). Identification of potentials in the context of Design for Industry 4.0 and modelling of interdependencies between product and production processes. In *Procedia CIRP. CIRP Design Conference 2019* (Bd. 84, S. 100–105).

Ammersdorfer, T., Inkermann, D., Müller, J., Mandel, C., Albers, A., Tekaas, J. et al. (2023). SUPPORTING SYSTEMS ENGINEERING ACTIVITIES BY

- ARTIFACT-ORIENTED DESCRIPTION AND SELECTION OF METHODS. In *Proceedings of the Design Society. ICED23: The 24th International Conference on Engineering Design*. Design in a complex world (Bd. 3, S. 3245–3254). Cambridge University Press (CUP).
- Chen, S., Bause, K., Erdmann, K., Mandel, C. & Albers, A. (2021). Modellierung und Bewertungsansatz für das tribologische Systemverhalten zur Vorhersage der Schaltqualität der Kegelkupplung in elektrifizierten Antriebssträngen. In *Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2021. Auslegung - Systemverhalten - Lösungen* (VDI-Berichte, Bd. 2382, S. 145–158). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Eisenbart, B., Mandel, C., Gericke, K. & Blessing, L. (2015). INTEGRATED FUNCTION MODELLING: COMPARING THE IFM FRAMEWORK WITH SYMML. Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED15). In *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED15)* .
- Fleischer, J., Albers, A., Ovtcharova, J., Becker, J., Lanza, G., Zhang, W. et al. 2022. *Final Report Sino-German Industry 4.0 Factory Automation Platform - Project I4TP* (Fleischer, J., ed.). Karlsruhe Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000143693>
- Gönzheimer, P., Kimmig, A., Mandel, C., Stürmlinger, T., Yang, S., Schade, F. et al. (2019). Methodical approach for the development of a platform for the configuration and operation of turnkey production systems. In *Procedia CIRP. CIRP Design Conference 2019* (Bd. 84, S. 880–885).
- Heimicke, J., Roebenack, S., Frobieter, C., Tihlarik, A., Albert, B., Bramato, L. et al. (2021). Evaluation of Challenges in the Implementation of Scrum in a large German Plant Engineering Company: Derivation of Hypotheses for an Improved Introduction of Agile Approaches into the Processes of Physical Product Development. In *R&D Management Conference 2021. Innovation in an Era of Disruption* (n.p.).
- Hellweg, F., Brückmann, H., Beul, T., Mandel, C. & Albers, A. (2022). Knowledge graph for manufacturing cost estimation of gear shafts-a case study on the availability of product and manufacturing information in practice. In *Procedia CIRP. CIRP Design Conference 2022 - Design in a changing world* (Bd. 109, S. 245–250).

- Hirschter, T., Heitger, N., Haug, F., Fahl, J., Mandel, C., Marthaler, F. et al. (2018). Zukunftsorientierte PGE-Produktgenerationsentwicklung: Ein Ansatz zur systematischen Überführung von Szenarien in Produktprofile in der Frühen Phase der PGE. In J. Gausemeier, W. Bauer & R. Dumitrescu (Hrsg.), *Vorausschau und Technologieplanung. 14. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung* (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 385). Paderborn: Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut.
- Kleiner, S., Husung, S., Mandel, C., Albers, A. & Behrendt, M. (2017). (Model-Based) Systems Engineering für die Digitalisierung der Produktentwicklung. In S.-O. Schulze, C. Tschirner & R. Kaffenberger (Hrsg.), *Tag des Systems Engineering. Paderborn, 8.-10. November 2017* (135-144). München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Kubin, A., Wagenmann, S., Reichert, F., Mandel, C. & Albers, A. (2023). Stakeholder Needs in Systems Engineering: A Proposal for a Formal Definition. In IEEE (Hrsg.), *SYSCON 2023. The 17th Annual IEEE International Systems Conference* (1-8).
- Mandel, C., Behrendt, M. & Albers, A. (2021). Nutzer- und Aufgabengerechte Unterstützung von Modellierungsaktivitäten im Kontext des MBSE-Model-Based Systems Engineering. In R. Stelzer & J. Krzywinski (Hrsg.), *EEE2021 - Entwerfen Entwickeln Erleben* (S. 727–736).
- Mandel, C., Böning, J., Behrendt, M. & Albers, A. (2021). A Model-Based Systems Engineering Approach to Support Continuous Validation in PGE - Product Generation Engineering. In *7th IEEE ISSE International Symposium on Systems Engineering 2021* (1-8).
- Mandel, C., Guenther, M., Martin, A., Windisch, E., Bursac, N., Rapp, S. et al. (2022). Towards a System of Systems Engineering Architecture Framework. In IEEE (Hrsg.), *17th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)* (n.p.).
- Mandel, C., Kaspar, J., Heitmann, R., Horstmeyer, S., Martin, A. & Albers, A. (2023). Implementation and Assessment of a Comprehensive MBSE Methodology with Regard to User Acceptance in Practice. In *Procedia CIRP. CIRP Design Conference 2023* (Bd. 119).
- Mandel, C., Lutz, S., Rau, O., Behrendt, M. & Albers, A. (2019). Model-Based Engineering für die Automatisierung von Validierungsaktivitäten am Beispiel

Fahrerassistenzsysteme. In R. Stelzer & J. Krzywinski (Hrsg.), *EEE-Entwerfen Entwickeln Erleben 2019* (S. 221–238).

Mandel, C., Martin, A. & Albers, A. (2022). Addressing Factors for User Acceptance of Model-Based Systems Engineering. In L. Bitetti, I. Bitran, S. Conn, J. Fishburn, E. Huizingh, M. Torkkeli et al. (Hrsg.), *Proceedings of the XXXIII ISPIM Innovation Conference "Innovating in a Digital World"* (n.p.). LUT Scientific and Expertise Publications. Verfügbar unter: https://www.conferencesubmissions.com/ispim/copenhagen2022/documents/1232749706_Paper.pdf

Mandel, C., Schwarz, S., Brix, T., Albers, A. & Husung, S. (2023). Improving system of objectives maturity through systematic reuse of knowledge using ontology-based knowledge representations. In *Engineering for a Changing World: Proceedings; 60th ISC, Ilmenau Scientific Colloquium* (n.p.).

Mandel, C., Stürmlinger, T., Yue, C., Behrendt, M. & Albers, A. (2020). Model-Based Systems Engineering Approaches for the integrated development of product and production systems in the context of Industry 4.0. In IEEE (Hrsg.), *SysCon 2020. 14th Annual IEEE International Systems Conference* .

Mandel, C., Wäschle, M., Lutz, S. & Behrendt, M. (2021). A Model-Based approach for automation and traceability of validation activities – clarified for Advanced Driver Assistance Systems. In *9th Int. Symposium on Development Methodology* (n.p.).

Mandel, C., Wolter, K., Bause, K., Behrendt, M., Hanf, M. M. & Albers, A. (2020). Model-Based Systems Engineering methods to support the reuse of knowledge within the development of validation environments. In IEEE (Hrsg.), *SysCon 2020. 14th Annual IEEE International Systems Conference* .

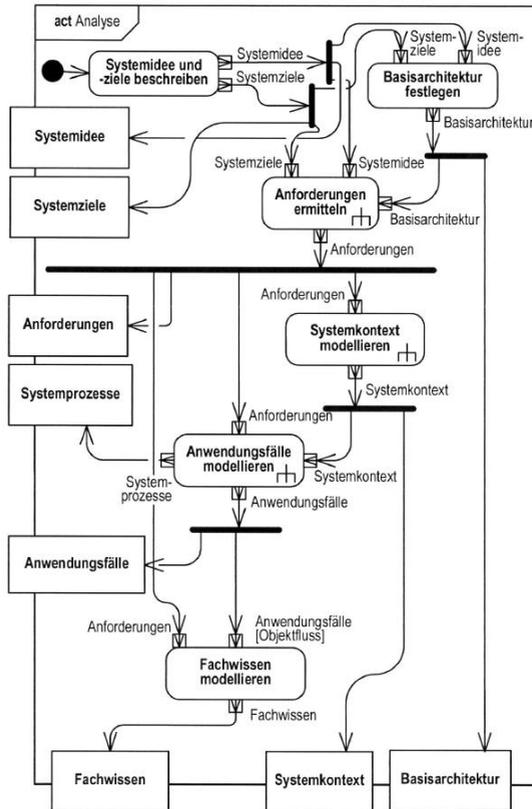
Martin, A., Kaspar, J., Pfeifer, S., Mandel, C., Rapp, S. & Albers, A. (2022). Advanced Engineering Change Impact Approach (AECIA) – Towards a model-based approach for a continuous Engineering Change Management. In IEEE (Hrsg.), *IEEE ISEE 2022. 8th International Symposium on Systems Engineering* (n.p.).

Powelske, J., Mandel, C., Albers, A. & Behrendt, M. (2018). The role of helper plug-ins to efficiently support modelling and improve the acceptance of MBSE. In *Proceedings of Tag des Systems Engineering / EMEASEC 2018* .

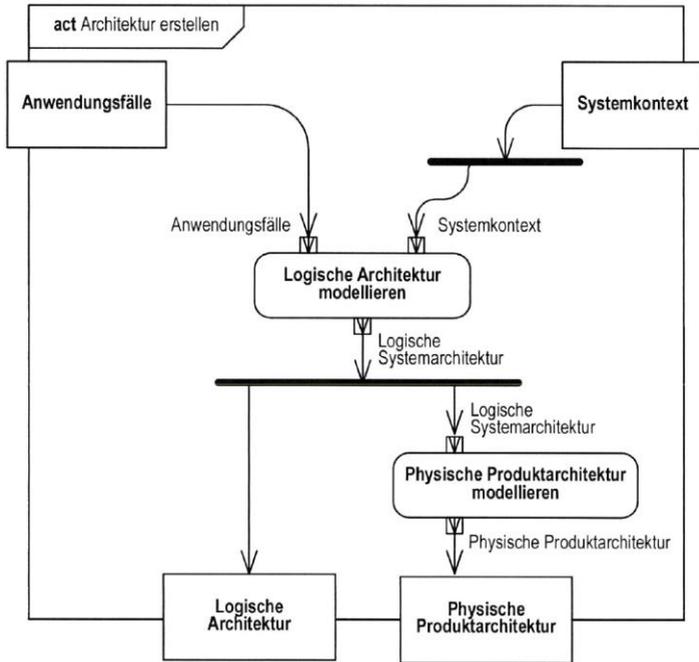
- Reinemann, J., Hirschter, T., Mandel, C., Heimicke, J. & Albers, A. (2018). Methodische Unterstützung zur Produktvalidierung in AR-Umgebungen in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In D. Krause (Hrsg.), *29. DfX-Symposium* (S. 307–320).
- Schäfer, L., Guenther, M., Martin, A., Lüpfer, M., Mandel, C., Rapp, S. et al. (2022). Systematics for an Integrative Modelling of Product and Production System. In *Procedia CIRP. CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, CIRP ICME* (Bd. 118, 104-109).
- Stürmlinger, T., Jost, D., Mandel, C., Behrendt, M. & Albers, A. (2020). Impact and risk analysis in the integrated development of product and production system. *Procedia CIRP, Vol. 91*, 627–633.
- Wäschle, M., Timucin, M., Radimersky, A., Mandel, C., Fahl, J. & Hirschter, T. (2021). Vorgehen zur systematischen Verknüpfung von Produktanforderungen und Systemarchitektur unter Berücksichtigung der PGE. In H. Binz, B. Bertsche, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2021 : Stuttgart, 20. Mai 2021, Wissenschaftliche Konferenz* (Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, Bd. 6). Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.
- Wiecher, C., Mandel, C., Günther, M., Fischbach, J., Greenyer, J., Greinert, M. et al. (2024). Model-based analysis and specification of functional requirements and tests for complex automotive systems. *Systems Engineering, (27)*, 728–744. <https://doi.org/10.1002/sys.21748>
- Windisch, E., Mandel, C., Rapp, S., Bursac, N. & Albers, A. (2022). Approach for model-based requirements engineering for the planning of engineering generations in the agile development of mechatronic systems. In *Procedia CIRP. CIRP Design Conference 2022 - Design in a changing world* (Bd. 109, S. 550–555).
- Yan, S., Mandel, C., Behrendt, M. & Albers, A. (2019). Dokumentation von Erfahrungswissen in der Entwicklung von vernetzten Validierungsumgebungen. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, O. Riedel, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019* (S. 173–182).

Anhang A: Darstellung der Modellierungsaktivitäten nach SYSMOD

Anhang A1: Modellierungsaktivitäten zur Analyse nach SYSMOD (Weilkiens, 2014, S. 39)



Anhang A2: Modellierungsaktivitäten zur Architekturentwicklung nach SYSMOD (Weilkiens, 2014, S. 40)



Anhang B: Details zur Data Mining Analyse zur Untersuchung des Stands der Forschung an der Schnittstelle zwischen MBSE und Validierung im Produktentstehungsprozess

Anhang B1: Liste der untersuchten Veröffentlichungen in der Data Mining Analyse

- INCOSE International Symposium von 2011 bis 2021
- INCOSE Systems Engineering Journal von 2011 bis 2021
- CIRP Design Conference von 2012-2021
- IEEE ISSE – International Symposium on Systems Engineering von 2015-2020
- IEEE SYSCON - International Systems Conference von 2018 – 2021
- IEEE SoSE – System of Systems Engineering Conference von 2020-2021
- Tag des Systems Engineering von 2012 bis 2019
- Design Society Konferenzen von 1995 bis 2019
 - Proceedings of the WDK Workshop on Product Structuring (1995, 1996, 1998)
 - Third International Seminar and Workshop Engineering Design in Integrated Product Development 2002
 - International Conference on Engineering Design ICED (2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2019)
 - International Design Conference – Design (2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018)
 - INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND PRODUCT DESIGN EDUCATION (2004, 2006, 2008, 2009, 2010, 2012, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016)
 - INTERNATIONAL DESIGN STRUCTURE MATRIX CONFERENCE, DSM (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015)
 - NordDesign (2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016)
 - AEDS Workshop (2004, 2005, 2006, 2007)
 - INTEGRATED PRODUCT DEVELOPMENT WORKSHOP IPD (2006, 2006, 2010)

Anhang B2: Liste der Veröffentlichung aus Data Mining Analyse 4: Schnittmenge der Wortgruppen zu Validierung und MBSE in Absätzen von Veröffentlichungen in ausgewählten Journals/ Konferenzen

- International Conference on Design Creativity – ICDC (2010, 2012, 2015)
- International Conference on Research into Design (2009, 2011)
- International Seminar and Workshop Engineering Design in Integrated Product Development 2004
- DESIGN METHODS FOR PRACTICE 2007
- Modelling and Management of Engineering Processes-Concepts, Tools and Case Studies 2012
- International Conference on Advanced Design Research and Education 2014 ICADRE14
- 10TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON INTEGRATED DESIGN ENGINEERING – IDE Workshop 2014
- A-DEWS 2015: Design Engineering in the Context of Asia, Asian Design Engineering workshop 2015

Anhang B2: Liste der Veröffentlichung aus Data Mining Analyse 4: Schnittmenge der Wortgruppen zu Validierung und MBSE in Absätzen von Veröffentlichungen in ausgewählten Journals/ Konferenzen

- Sanduka, I., Hornickel, G., Hofmann, P., Chahin, A. & Gilz, T. (2018). Systems Engineering as an Enabler in the Automotive Industry - Challenges and Concept of Integrating MBSE. *In Tag des Systems Engineering / EMEASEC 2018* (n.p.).
- Gebreyohannes, S., Karimoddini, A., & Homaifair, A. (2020). Applying Model-Based Systems Engineering to the Development of a Test and Evaluation Tool for Unmanned Autonomous Systems. *In 2020 IEEE International Systems Conference (SysCon)* (S. 1-7).
- Di Maio, M., George-Dimitrios Kapos, Niklas Klusmann, Linus Atorf, Ulrich Dahmen, Michael Schluse et al. (2018). Closed-Loop Systems Engineering (CLOSE): Integrating Experimentable Digital Twins with the Model-Driven Engineering Process. *In 4th IEEE International Symposium on Systems Engineering ISSE 2018* (S. 1–8).
- Wäschle, M., Behrendt, M., Xing, K., Shi, H. & Albers, A. (2021). Contract-based methods and activities in the validation of interfaces for System of Systems. *In 16th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)* (S. 102–107).

- Taha, J., Salehi, V., & Abraham, F. (2018, October). Development of a low powered wireless IoT sensor network based on MBSE. In *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)* (S. 1-8).
- Aromaa, S., Leino, S. P., & Viitaniemi, J. (2013). Are companies ready for the revolution in design – Modelling maturity for virtual prototyping. In *DS 75-9: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13), Design for Harmonies*, (Bd. 9: Design Methods and Tools, S. 297-304)
- Kühn, A., Bremer, C., Dumitrescu, R., & Gausemeier, J. (2014). Feature models supporting trade-off decisions in early mechatronic systems design. In *DS 81: Proceedings of NordDesign 2014* (Bd. 81, S. 835-844)
- Intrigila, B., & Mazzucchelli, L. (2018, October). Engineering Complex Safety Critical Software Systems: Abstraction and Concreteness. In *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)* (n.p.).
- Mazeika, D., & Butleris, R. (2020, June). Identifying Security Issues with Mbse while Rebuilding Legacy Software Systems. In *2020 IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)* (S. 83-86).
- Gräßler, I., Wiechel, D., & Roesmann, D. (2021). Integrating human factors in the model based development of cyber-physical production systems. In *Procedia CIRP 100. CIRP Design Conferenc 2021*, (Bd. 100, S. 518-523).
- Scheithauer, D. & Forsberg, K. (2013). V-Model Views. In *INCOSE International Symposium 2013* (Bd. 23, S. 502–516).
- Friedland, B., Malone, R., & Herrold, J. (2016). Systems engineering a model based systems engineering tool suite: The Boeing approach. In *INCOSE International Symposium* (Bd. 26(1), S. 386-398).
- Kass, N., & Kolozs, J. (2016, July). Getting started with MBSE in product development. In *INCOSE International Symposium* (Bd. 26(1), S. 526-541).
- Nastov, B., Chapurlat, V., Dony, C., & Pfister, F. (2016). Towards V&V suitable domain specific modeling languages for MBSE: A toolled approach. In *INCOSE International Symposium* (Bd. 26(1), S. 556-570).

Anhang B2: Liste der Veröffentlichung aus Data Mining Analyse 4: Schnittmenge der Wortgruppen zu Validierung und MBSE in Absätzen von Veröffentlichungen in ausgewählten Journals/ Konferenzen

- Wilson-Smith, M., & Kibler, A. (2016). A truly testing experience—how Model Based Systems Engineering can help to ensure that you build the right product and build the product right. In *INCOSE International Symposium* (Bd. 26(1), S. 1331-1346).
- Baker, J., Ferraioli, P., Pereira, L. R., & Hudson, A. (2016). Systems Architecting for a Retrofittable Subsea System Application. In *INCOSE International Symposium* (Bd. 26 (1), S. 1932-1946).
- Morkevcicius, A., Aleksandraviciene, A., Mazeika, D., Bisikirskiene, L., & Strolia, Z. (2017). MBSE Grid: A Simplified SysML-Based Approach for Modeling Complex Systems. In *INCOSE International Symposium* (Bd. 27(1), S. 136-150).
- Liu, Z., Chen, Q., Xia, N., Yang, M., Du, Q., & Lu, J. (2018). An MBSE tool to support architecture design for spacecraft electrical power system. In *INCOSE International Symposium* (Bd. 28(1), S. 64-78).
- Hecht, M., & Chen, J. (2021). Verification and Validation of SysML models. In *INCOSE International Symposium* (Bd. 31(1), S. 599-613).
- Chaudemar, J. C., & de Saqui-Sannes, P. (2021). Mbse and Mdao for Early Validation of Design Decisions: a Bibliography Survey. In *2021 IEEE International Systems Conference (SysCon)* (n.p.).
- Shainee, M., Haskins, C., Ellingsen, H., & Leira, B. J. (2012). Designing offshore fish cages using systems engineering principles. *Systems Engineering*, 15(4), 396-406.
- Mitchell, S. W. (2014). Transitioning the SWFTS program combat system product family from traditional document-centric to model-based systems engineering. *Systems Engineering*, 17(3), 313-329.

Anhang C: Weiterführende Informationen zur systematischen Literaturrecherche zu verwendeten Begriffen für die Beschreibung der Validierung technischer Systeme

Anhang C1: Verwendete Datenbanken für die systematische Literaturrecherche (Fokus Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik, Technitisawad, 2020)²⁰

- KIT-Bibliothek (<https://www.bibliothek.kit.edu/index.php>)
- Reserachgate (<https://www.researchgate.net/>)
- Google Scholar (<https://scholar.google.com/>)
- Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>)
- Springer Link (<https://link.springer.com/>)
- IEEEExplore (<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/>)
- ASME Literaturdatenbank (<https://asmedigitalcollection.asme.org/>)
- Web of Science (<https://webofscience.com>)
- IPEK-Literaturdatenbank (ilit)
- Perinorm Normdatenbank (<https://www.perinorm.com/>) – abgelöst durch Nachfolgesystem Nautos (<https://www.nautos.de/>)

²⁰ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Anhang C2: Liste der am relevantesten bewerteten Veröffentlichungen aus der systematischen Literaturrecherche (Technitisawad, 2020)²¹

- DIN EN ISO 9000:2015-11-00, Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015)
- DIN EN 60300-3-4:2018-04-00, Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-4: Anwendungsleitfaden - Anleitung zum Festlegen von Zuverlässigkeitsanforderungen (IEC 56/1726/CD:2017)
- IEEE 1012:2016-00-00, IEEE Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation (IEEE 1012:2016)
- VDI 2206:2004-06-00, Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (VDI 2206:2004)
- VDI/VDE 3517:2003-05-00 Blatt 2, Validierung in der Prozessleittechnik - Abwicklung von qualifizierungspflichtigen PLT-Projekten (Prospektive Validierung) (VDI/VDE 3517:2003 Blatt 2)
- Walden, D. D.; Roedler, G. J.; Forsberg, K. J.; Hamelin, R. D.; Shortell, T. M. (2015): SYSTEMS ENGINEERING HANDBOOK - A GUIDE FOR SYSTEM LIFE CYCLE PROCESSES AND ACTIVITIES. Fourth Edition. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Maropoulos, P. G.; Ceglarek, D. (2010): Design verification and validation in product lifecycle. In: CIRP Annals 59 (2), S. 740–759. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.005.
- Albers, Albert; Behrendt, Matthias; Klingler, Simon; Matros, Kevin (2016): Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In Udo Lindemann (Ed.): Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser, pp. 541–569.
- Engel, Avner (2013): Verification, validation, and testing of engineered systems. Hoboken, NJ: Wiley (Wiley Series in Systems Engineering and Management, 84).
- Albers, A., Behrendt, M. & Ott, S. (2010). Validation – Central Activity to Ensure Individual Mobility. In *Automobiles and sustainable mobility: Proceedings of the FISITA 2010 World Automotive Congress*. (Bd. 30, n.p.)

²¹ Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

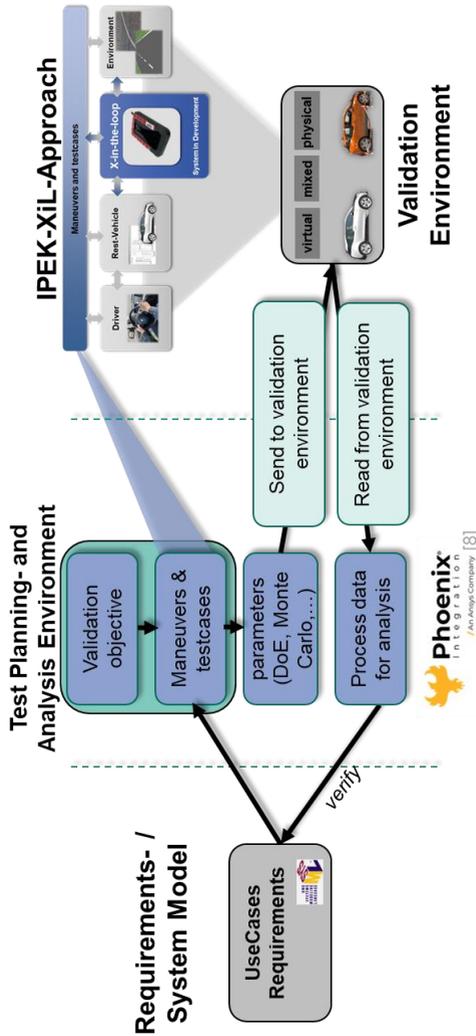
- Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Boehm, B. W. (1984): Verifying and Validating Software Requirements and Design Specifications. In: *IEEE software*, 1 (1), S. 75–88. DOI: 10.1109/MS.1984.233702.
- Iqbal, Danish; Abbas, Assad; Ali, Mazhar; Khan, Muhammad Usman Shahid; Nawaz, Raheel (2020): Requirement Validation for Embedded Systems in Automotive Industry Through Modeling. *IEEE Access*, 8, S. 8697–8719. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2963774.
- Carvajal-Arango, Ricardo; Zuluaga-Holguín, Daniel; Mejía-Gutiérrez, Ricardo (2016): A systems-engineering approach for virtual/real analysis and validation of an automated greenhouse irrigation system. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 10 (4), S. 355–367. DOI: 10.1007/s12008-014-0243-2.
- Ott, S., & Winzer, P. (2006). Anforderungsmanagement-Ein Alter Hut im Neuen Gewand?. *Konstruktion*, 10, 75-77.
- Tahera, Khadija; Wynn, David C.; Earl, Chris; Eckert, Claudia M. (2019): Testing in the incremental design and development of complex products. *Research in Engineering Design*, 30, 291–316. DOI: 10.1007/s00163-018-0295-6.

Anhang D: Weiterführende Abbildungen zur entwickelten Modellierungsmethode

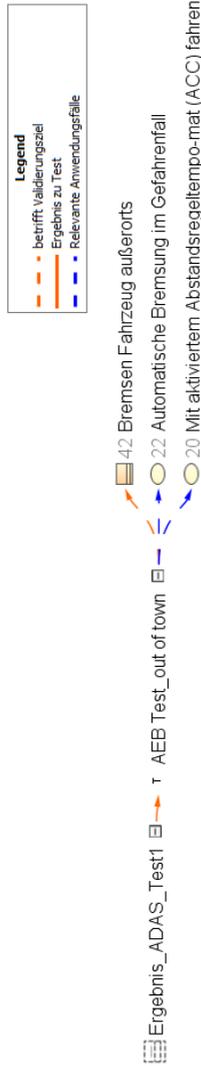
Anhang D1: Darstellung zur Priorisierung und Status einzelner Validierungsbedarfe

#	Name	Text	Priorisierung	Adressierte Elemente	Potenziell relevante Elemente	Status
1	Automatisches Bremsen bei ACC-Fahrten-gerade Landstraße	Kann eine Kollision mit einem vorausfahrenden Fahrzeug vermieden werden, wenn während des ACC-Fahrens auf einer geraden Landstraße eine automatische Bremsung aufgrund weiterer Verkehrsteilnehmer erfolgt?	hoch	²⁸ Automatisches Bremsen	21	nicht validiert
2	Neu			²⁹ Erkennungswarnung	16	

Anhang D2: Entwickeltes modellbasiertes Framework zur Unterstützung der Automatisierung und Nachvollziehbarkeit von Validierungsaktivitäten am Beispiel ADAS (Mandel, Wäschle et al., 2021, S. 6)



Anhang D3: Analyse der von einem Testergebnis betroffenen Modellelemente



Anhang E: Fragebogen zur Online-Umfrage zur Evaluation des initialen Architekturframeworks im Live-Lab IP 2019/2020

- Haben Sie im Rahmen des IP Projektes die Rolle als Systemingenieur eingenommen?
- Sind Sie dennoch mit dem Cameo Modell in Kontakt gekommen?
- Wie standen Sie mit dem Cameo Modell in Kontakt?
- Bitte vervollständigen Sie folgende Aussage: Die Modellierung empfinde ich eher als...
 - [Nachdokumentation des Produktentwicklungsprozesses]
 - [hilfreiches Entwicklungswerkzeug, um zielsicherer voranzukommen]
 - [hilfreiches Entwicklungswerkzeug, um schneller voranzukommen]
 - [Sonstiges/Kommentar]
- Wie groß ist der Zeitaufwand der Modellierung gemessen am Gesamtumfang der IP-Tätigkeiten?
- Der notwendige Zeitaufwand ist ...
- Erkennen Sie die Bedeutung des MBSE Ansatzes für die Produktentwicklung?
- Hilft Ihnen das bereitgestellte SysML Framework bei dem Verständnis des Modellierungsansatzes?
- Hilft Ihnen das bereitgestellte SysML Framework bei dem Verständnis des Modellierungsansatzes?
 - [Kommentar]
- Folgende zwei Übersichten wurden in dem Framework zur Verfügung gestellt. Bitte beantworten Sie folgende Fragen:
 - [Mit welcher Übersicht haben Sie während der Modellierung hauptsächlich gearbeitet?]

- [Welche Übersicht hat zum Verständnis der vermittelten SysML Methode hauptsächlich beigetragen?]
- Womit haben Sie besonders gerne modelliert?
 - [Diagramme]
 - [Matrizen]
 - [Tabellen]
- Welche Modellierungsansätze waren hilfreich für Sie?
 - [Aktivitätsmodellierung]
 - [Anwendungsfallmodellierung]
 - [Funktionsmodellierung]
 - [Produkteigenschaftenmodellierung]
 - [Produktprofilmodellierung]
 - [Stakeholder-Anforderungsmodellierung]
 - [Systemanforderungsmodellierung]
 - [Systemgestaltsmodellierung]
 - [Systemumfeldmodellierung]
 - [Zustandsmodellierung]
- Welche konkreten Modellierungsmöglichkeiten im Framework waren besonders hilfreich für Sie?
- Wurde das Modell zur Kommunikation mit Kollegen oder Projektpartnern verwendet?
- Aus welchen Gründen wurde das Modell nicht zur Kommunikation verwendet?
- Konnte das Modell Ihre Gruppe bei Entscheidungsprozessen unterstützen?
- Haben Sie in Ihrem Modell Referenzsystemelemente modelliert?
- Erscheint Ihnen die Modellierung und Verknüpfung von Referenzsystemen sinnvoll?
- Erscheint Ihnen die Modellierung und Verknüpfung von Referenzsystemen sinnvoll?
 - [Kommentar]
- Wie ist Ihre Einschätzung: Kann das Modell als Teil des Referenzsystems für zukünftige Produktgenerationen sinnvoll verwendet werden?

- Wie ist Ihre Einschätzung: Kann das Modell als Teil des Referenzsystems für zukünftige Produktgenerationen sinnvoll verwendet werden?
 - [Kommentar]
- Wie ist Ihre Einschätzung: Können Sie Teile des Modells in zukünftigen Produktmodellierungen wiederverwenden und erweitern?
- Wie ist Ihre Einschätzung: Können Sie Teile des Modells in zukünftigen Produktmodellierungen wiederverwenden und erweitern?
 - [Kommentar]
- Wie zufrieden sind Sie mit der Betreuung von Seiten des IPEKs während der Systemmodellierung?
 - [Kommentar]
- Hilft das Schulungsdokument bei dem Verständnis der SysML Methode?
- Bitte tragen Sie hier weitere Kommentare ein

Anhang F: Fragebogen der semistrukturierten Interviews in MoSyS

1. Einführung

Ziel und Zweck der Umfrage werden erläutert

Frage: ist ein Aufzeichnen des Interviews ok?

Branche des Unternehmens?

Wie sind Ihre Vorerfahrungen mit (MB)SE? (von 1 (gar keine) bis 5 (Experte))

Mit welchen MBSE-Sprachen, Methoden, Frameworks und Tools haben Sie schon gearbeitet?

Einführung Skalen (-2 bis +2) im Vergleich zu bekannten MBSE-Sprachen, Methoden, Frameworks und Tools

-2 (viel schlechter)

-1 (etwas schlechter)

0 (gleich)

1 (etwas besser)

2 (viel besser)

Information: Wenn im Folgenden von der MBSE-Methodik gesprochen wird meint dies, das Zusammenspiel aus der entwickelten Ontologie, Viewpoints/Views, Modellierungsaktivitäten und Implementierung im Tool. Mit „Referenz“ werden die persönlich bekannten MBSE-Sprachen, Methoden, Frameworks und Tools bezeichnet

2. Bekannte/verwendete MBSE-Ansätze

Welche MBSE-Ansätze verwenden/kennen Sie?

Was sind aus Ihrer Sicht die größten Probleme/Schwierigkeiten bei den Ihnen bekannten/verwendeten MBSE-Ansätzen?

4. Wahrgenommene Leistungsfähigkeit MBSE durch die Methodik im Vergleich zur Referenz

Wahrgenommener Mehrwert von MBSE durch die Anwendung der MBSE-Methodik im Vergleich zur Referenz (-2 bis +2)?

Auffinden/Navigation zu genau den Sichten/Aktivitäten bei denen MBSE im Projekt hilfreich sein kann (-2 bis +2)?

5. Wie intuitiv ist die Methodik im Vergleich zur Referenz

Finden eines schnellen Einstiegs in die Modellierung (-2 bis +2)

- Offene Frage: Hilft dabei eher das Framework oder die Modellierungsaktivitäten

Gezieltes Auffinden der Modellierungstätigkeiten und Diagramme, die für meinen Modellierungszweck/Problemstellung relevant sind (-2 bis +2)

- Offene Frage: Hilft dabei eher das Framework oder die Modellierungsaktivitäten

6. Flexibilität und Adaptierbarkeit der Methodik

Flexible, iterative, agile Durchführung von Modellierungsaktivitäten (-2 bis +2)

7. Usability des Modellierungswerkzeugs

Zurechtfinden im Software-Tool erleichtert (-2 bis +2)

8. Klares Zielbild und Modellierungsvorgehen

Festlegen/Klarmachen des Ziels des Einsatzes von MBSE im Projekt (-2 bis +2)

Kontinuierlicher Einsatz von MBSE über alle Phasen des Projekts (-2 bis +2)

- Offene Frage: Wo wird der Fokus gesehen (Phase/Ziel)?

9. Ontologie und angemessener Formalisierungsgrad

Kommunikation im Team (-2 bis +2)

- Offene Frage: Wie/wozu insbesondere
- Offene Frage: Warum nicht?

Kommunikation mit Externen (Kunden, Zulieferer) (-2 bis +2)

- Offene Frage: Wie/wozu insbesondere
- Offene Frage: Warum nicht?

Eindeutige Modellierung und eindeutige Kommunikation im Team (-2 bis +2)

- Offene Frage: an welcher Stelle/ zu welchem Thema besonders?

10. Aufwand/Nutzen-Verhältnis

Verhältnis von Aufwand und Nutzen von MBSE (-2 bis +2)

- Offene Frage: Extrem über-/untererfüllt?

11. Lehr-/Lernbarkeit der Methodik

Lehr-/Lernbarkeit der Methodik (-2 bis +2)?

- Offene Frage: Unterstützung eines modularen Schulungskonzepts durch Aufbau entlang der Viewpoints/Modellierungsaktivitäten?

12. Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit

Spezifische Anpassung/Erweiterung auf eigene Bedarfe (durch Hinzufügen neuer Viewpoints, neuer Modellierungsaktivitäten und flexible Auswahl gerade zielführender Modellierungsaktivitäten) (-2 bis +2)

Wiederverwendbarkeit von (Teilen von) erstellten Modellen (-2 bis +2)

13. Problemorientierung/Unterstützung bei der Modellierung des Problemraums

Schärfung des Problemraums/Problemorientierung (-2 bis +2)

Anhang G: Fragebogen der semistrukturierten Interviews im Live-Lab IP 2021/2022

1. Einführung

Ziel und Zweck der Umfrage

Ist ein Aufzeichnen des Interviews ok?

Was studieren Sie?

In welchem Team sind Sie?

Wie sind Ihre Vorerfahrungen mit (MB)SE? (von 1 (gar keine) bis 5 (Experte))

Einführung Skalen (1-4)

Ich stimme der Aussage zu:

1 (überhaupt nicht)

2

3

4 (sehr)

2. Wahrgenommene Leistungsfähigkeit MBSE

Ich erkenne einen Mehrwert von MBSE für mein Projekt (Skala 1-4).

Hilft Ihnen die bereitgestellte Methodik dabei, zu genau den Sichten/Aktivitäten zu navigieren, bei denen MBSE in Ihrem Projekt hilfreich sein kann (Skala 1-4)?

Optionale offene Fragen:

- Offene Frage: Welche Modellierungsaktivitäten wurden am häufigsten durchgeführt
- Offene Frage: Welche Modellierungsaktivitäten waren am hilfreichsten

- Offene Frage: Welche Views wurden am häufigsten verwendet
- Offene Frage: Welche Views waren am hilfreichsten?
- Offene Frage: Mussten zusätzliche Diagramme angelegt werden?

3. Wie intuitiv ist die Methodik

Das entwickelte Schulungskonzept und die Anwendung des Frameworks helfen einen schnellen Einstieg in die Modellierung zu finden (Skala 1-4).

- Offene Frage: Hilft dabei eher das Framework oder die Modellierungsaktivitäten

Wie oft musste das Handbuch herangezogen werden?

Bei der angewandten Methodik kann ich schnell und gezielt die Modellierungstätigkeiten und Diagramme finden, die für meinen Modellierungszweck/Problemstellung relevant sind (Skala 1-4).

- Offene Frage: Hilft dabei eher das Framework oder die Modellierungsaktivitäten

4. Flexibilität und Adaptierbarkeit der Methodik

Die Modellierungsaktivitäten können/habe ich während des PEP flexibel/iterativ/ohne „Wasserfall-Reihenfolge“ durchgeführt werden und unterstützen somit eine zielorientierte Modellierung (Skala 1-4).

5. Usability des Modellierungswerkzeugs

Durch das bereitgestellte Template aus Modellierungsaktivitäten und Framework wird das Zurechtfinden im Software-Tool erleichtert (Skala 1-4).

Im bereitgestellten Template und dem Software-Tool werden alle Funktionen erklärt, die zur Modellierung in meinem Projekt benötigt werden (Skala 1-4).

- Offene Frage: Welche nicht?
- Offene Frage: Wurde bei der Modellierung eher das Framework oder die Aktivitäten verwendet
- Offene Frage: Hat sich das während des Projekts geändert?

6. Klares Zielbild und Modellierungsvorgehen

Mir ist/war das Ziel des Einsatzes von MBSE im Projekt klar (Skala 1-4).

Ich konnte MBSE über alle Phasen des Projekts kontinuierlich einsetzen (Skala 1-4).

- Offene Frage: Wo lag der Fokus (Phase/Ziel)?
- Offene Frage: Warum/wo nicht?

7. Ontologie und angemessener Formalisierungsgrad

Das Modell kann/wurde zur Kommunikation im Team/der Gruppe herangezogen (Skala 1-4).

- Offene Frage: Wie/wozu insbesondere
- Offene Frage: Warum nicht?

Das Modell kann/wurde zur Kommunikation mit Externen (Gruppenpaten, am MS) herangezogen (Skala 1-4).

- Offene Frage: Wie/wozu insbesondere
- Offene Frage: Warum nicht?

Das Modellieren mit den vorgegebenen Elementen (Funktion, Strukturelement, Validierungsbedarf, RSE etc.) unterstützt eine eindeutige Modellierung und eine eindeutige Kommunikation im Team (Skala 1-4).

- Offene Frage: an welcher Stelle/ zu welchem Thema besonders?

Das Modellieren mit den vorgegebenen Elementen (Funktion, Strukturelement, Validierungsbedarf, RSE etc.) behindert bei der Modellierung und einer eindeutigen Kommunikation im Team (Skala 1-4).

- Offene Frage: an welcher Stelle/ zu welchem Thema besonders?

8. Aufwand/Nutzen-Verhältnis

Das Verhältnis von Aufwand und Nutzen von MBSE/ der Methodik ist angemessen (war im Projekt angemessen) (Skala 1-4).

- Offene Frage: Extrem über-/untererfüllt?

Durch die gezielte Hinführung zu Modellierungsaktivitäten und Sichten kann der Aufwand zur Modellierung gemessen am Gesamtprojekt angemessen gehalten werden (Skala 1-4).

9. Lehr-/Lernbarkeit der Methodik

Den Aufbau der Schulung finde ich gut nachvollziehbar (Skala 1-4).

Wie oft musste das Schulungsdokument zusätzlich zum Modell herangezogen werden

Ich finde im Schulungsdokument einfach die Informationen, die ich zu einer Frage benötige (Skala 1-4).

- Offene Frage: Ich habe das Beispielmodell in Cameo angeschaut

Falls ja: Das Beispielmodell war hilfreich (Skala 1-4).

- Offene Frage: Eher in Cameo oder im Schulungsdokument angeschaut?

10. Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit

Einschätzung: Die Methodik ist durch das Hinzufügen neuer Viewpoints, neuer Modellierungsaktivitäten und die flexible Auswahl gerade zielführender Modellierungsaktivitäten spezifisch auf meine Bedarfe angepasst werden (Skala 1-4).

Referenzsystemmodellierung:

Haben Sie das Modell-Template zur Modellierung von Referenzsystemelementen genutzt?

Wenn nein, warum nicht?

Das Modell-Template unterstützt die Modellierung von Referenzsystemelementen (RSE) (Skala 1-4).

Das Modell-Template unterstützt den Zugriff auf die Informationen einzelner Referenzelemente und ermöglicht eine einfache Änderung der Daten (Skala 1-4).

Haben Sie das Modell verwendet um Variationen (ÜV, AV, PV) am Produkt (SiD) zu modellieren?

Wenn nein, warum nicht?

Das Modell-Template unterstützt die Modellierung der Variationsarten (Skala 1-4).

Die automatisierte Berechnung der Variationsanteile im Modell-Template war hilfreich (Skala 1-4).

11. Problemorientierung/Unterstützung bei der Modellierung des Problemraums

Konnten/wurden Inhalte des Modells bei Diskussionen zur Schärfung des Produktprofils herangezogen (werden) (Skala 1-4)?

Das Modell wurde zur Unterstützung bei Diskussionen in der Gruppe herangezogen/kann herangezogen werden, um das Produktprofil zu verstehen (Skala 1-4).

- Offene Frage: Wobei genau
- Offene Frage: Warum nicht?

Das Modell wurde zur Unterstützung bei Diskussionen mit den Teampartnern/Unternehmen herangezogen/kann herangezogen werden, um das Produktprofil zu verstehen (Skala 1-4).

- Offene Frage: Wobei genau
- Offene Frage: Warum nicht?

12. Spezifische Fragen

Methode Verifikation und Validierung

Wurden Modellierungsaktivitäten zur Unterstützung der Validierung angewendet

- Offene Frage: Wozu / Warum nicht?

Die Methode und Modellierungsaktivitäten zu Verifikation und Validierung unterstützen die integrierte Entwicklung von Produkt und Validierungssystem (Skala 1-4).

Die Methode und Modellierungsaktivitäten zu Verifikation und Validierung unterstützen eine kontinuierliche Validierung (Skala 1-4).

Die Methode und Modellierungsaktivitäten zu Verifikation und Validierung unterstützen die Nachvollziehbarkeit in der Validierung bei der Planung von Validierungsaktivitäten und der Einschätzung der Impacts von Testergebnissen (Skala 1-4).

Optional:

Die Modellierungsmethode zur Unterstützung der Validierung hat ein gutes Nutzen/Aufwand-Verhältnis

- Offene Frage: Extrem über-/untererfüllt?

Optionale offene Fragen

- Offene Frage: Welche Modellierungsaktivität(en) waren am hilfreichsten?
- Offene Frage: Welche Sichten waren am hilfreichsten?

Änderungsmanagement

Mussten Sie im Laufe des Projektes Änderungen am Modell vornehmen?

Es war einfach Änderungen einzupflegen und mögliche Auswirkungen mithilfe des Modells abzuschätzen (Skala 1-4)

Hatten Sie im Laufe des Projektes mehrere Lösungsalternativen modelliert?

Es war einfach mehrere parallele Alternativlösungen in einem Modell zu analysieren (Skala 1-4)

