

**Einsatz von modellbasiertem Systems Engineering
zur Unterstützung der Entwicklungstätigkeiten
von Satellitenprojekten
– Eine Methodik**

Dipl.-Ing. Emir Gadzo

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Koch
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold-Byhain

Die Dissertation wurde am 09.10.2025 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 13.02.2026 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 02.03.2026 statt.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter von 2021 bis 2025 am Institut für Technische Produktentwicklung der Universität der Bundeswehr München. In dieser außergewöhnlich lehrreichen Zeit erhielt ich die Möglichkeit, spannende wissenschaftliche Fragestellungen aus den Bereichen Systems Engineering und Satellitenentwicklung zu erforschen. Diesen Weg musste ich jedoch nicht allein gehen – viele beeindruckende Menschen haben mich begleitet, und aus vielen dieser Begegnungen sind wertvolle Freundschaften entstanden. Dafür bin ich zutiefst dankbar.

Mein erster und besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Alexander Koch. Die unzähligen wertvollen Gespräche und Diskussionen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Das große Vertrauen, das mir sowohl in wissenschaftlichen Aspekten als auch in der Lehre entgegengebracht wurde, die umfassende fachliche und organisatorische Unterstützung meiner Ideen und Ansätze sowie die stets zielgerichtete Führung haben nicht nur zu meiner fachlichen, sondern auch zu meiner persönlichen Weiterentwicklung beigetragen – was mir sehr viel bedeutet. Weiterhin danke ich Prof. Kristin Paetzold-Byhain für ihre visionären Ideen, die von unschätzbarem Wert für meine Entwicklung und meine Arbeit waren. Sie war auch in turbulenten Lebenszeiten eine verlässliche Stütze – herzlichen Dank dafür!

Dem gesamten Team des SeRANIS-Projektes danke ich für eine spannende Zeit in einem einzigartigen Projekt. Besonderer Dank gilt der Projektleitung Andreas Knopp und Christian Hofmann für die Unterstützung meiner Forschung, die diese Dissertation erst ermöglicht hat.

Ich möchte mich bei meinen hochgeschätzten Kollegen bedanken, die mittlerweile zu guten Freunden geworden sind. Die vielen tiefgreifenden Gespräche und die unvergessliche gemeinsame Zeit am Institut und an der Universität der Bundeswehr München waren bereichernd. Herzlichen Dank an Alexander Atzberger, Martin Denk, Joaquin Montero, Laura Wirths, Simon Nicklas, Sebastian Weber, Alexander Schmidt, Lea Strauß, Michael Ascher, Alexander Schlegel, Florian Günther und Leonhard Kessler. Ebenso danke ich meinen Studenten, die mich im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten unterstützt haben, allen voran Florian Wenger und Prayag Upadhyay. Ein großer Dank geht vor allem an Jan Mehlstäubl, der mich besonders in der Anfangszeit wie ein Mentor begleitet und mir eine große Hilfe beim Zurechtfinden war.

Ganz besonders danke ich meinem Bürokollegen aus Büro 2316 und mittlerweile sehr engem Freund Marvin Michalides. Die zahllosen Gespräche und Diskussionen mit dir waren von unbezahlbarem Wert. Dein Ehrgeiz und deine Zielstrebigkeit waren mir stets ein großes Vorbild, und du hast einen erheblichen Beitrag zum Erfolg dieser Arbeit geleistet. Wir hatten eine unvergessliche Zeit, sowohl am Institut als auch auf den gemeinsamen Konferenzen – herzlichen Dank dafür.

Schließlich danke ich den wichtigsten Menschen in meinem Leben – meiner Familie. Ich danke euch für eure selbstlose Unterstützung und euren immerwährenden Glauben an den Erfolg dieses Vorhabens. Ihr habt mir diesen Werdegang ermöglicht, mich so oft entbehren müssen und mich in den richtigen Momenten positiv abgelenkt. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Die zunehmende Komplexität moderner Satellitensysteme und die damit verbundenen Herausforderungen in der Entwicklung führen dazu, dass herkömmliche dokumentenbasierte Entwicklungsansätze an ihre Grenzen stoßen. Besonders in der Raumfahrtindustrie, die sich zwischen traditionellen Ansätzen und New Space-Philosophien bewegt, entstehen komplexe interdisziplinäre Entwicklungsumgebungen, die von Ambiguität und Unsicherheiten geprägt sind. Während modellbasiertes Systems Engineering (MBSE) als vielversprechender Ansatz zur Bewältigung dieser Herausforderungen gilt, fehlen aufgabenspezifische Methodiken, die systematisch Unsicherheiten in vorhandenen dokumentenbasierten Daten und Informationen identifizieren und reduzieren können.

Zielsetzung des im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeiteten Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer aufgabenspezifischen Methodik für den prozessbegleitenden Aufbau und die Pflege ganzheitlicher Systemmodelle zur Unterstützung der systematischen Weiterentwicklung von Daten und Informationen im Entwicklungsprozess von Satellitenprojekten. Die Methodik soll Entwickler effektiv und effizient bei der Identifikation von Unsicherheiten in bestehenden dokumentenbasierten Daten und Informationen unterstützen. Darüber hinaus soll sie eine modellgestützte Hilfestellung bei der Problemlösung und Ideengenerierung zur Reduzierung identifizierter Unsicherheiten bieten. Zusätzlich soll sie einen positiven Beitrag zur Wissensgenerierung durch systematische Modellbildung und strukturierte Informationsrepräsentation leisten. Die entwickelte ITPE-Methodik basiert auf drei übergeordneten Bausteinen, die das zentrale Ergebnis dieser Arbeit darstellen. Das DT-MBSE Integrationsmodell verbindet Design Thinking mit modellbasiertem Systems Engineering in einem Doppel-Diamant-Prozessmodell und definiert die systematische Zusammenarbeit zwischen Modellierungsteam, Systems-Engineering-Team und domänenspezifischem Entwicklungsteam zur Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten. Der zweite Baustein umfasst fünf spezifische Analysemethoden (Anforderungs-, Systemkontext-, Verhaltens-, Funktions- und Strukturanalyse), die beschreiben, wie Modelle mit SysML für bestimmte Analysezwecke erstellt werden können. Der dritte Baustein beinhaltet ein ontologisches Konzept mit domänenspezifischen Konzepten aus der Satellitenentwicklung sowie eine darauf basierende Elementbibliothek, die dem Modellierungsteam als unterstützendes Werkzeug zur strukturierten Wissensrepräsentation zur Verfügung steht.

Die Validierung der Methodik erfolgte anhand eines Subsystems des wissenschaftlichen Satellitenentwicklungsprojekts SeRANIS der Universität der Bundeswehr München. Dabei wurde ein systematischer Auswahlprozess durchgeführt, um einen geeigneten Anwendungsfall zu identifizieren. Die initiale Validierung orientierte sich an der Design Research Methodology und umfasste sowohl quantitative als auch qualitative Bewertungen. Ein unabhängiges Modellierungsteam von zwei Personen verschiedener akademischer Institutionen sowie ein erfahrener Vertreter aus dem Entwicklungsumfeld führten die Validierung durch. Dabei wurden acht Validierungskriterien qualitativ bewertet, die sich auf die drei Forschungsschwerpunkte der Arbeit bezogen: die Identifikation von Unsicherheiten in dokumentenbasierten Daten und Informationen, die Reduzierung dieser Unsicherheiten durch einen modellgestützten, menschenzentrierten Ansatz und die Unterstützung der Wissensgenerierung.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Abstract

The increasing complexity of modern satellite systems and the associated development challenges lead to conventional document-based development approaches reaching their limits. Particularly in the space industry, which operates between traditional approaches and New Space philosophies, complex interdisciplinary development environments emerge that are characterized by ambiguity and uncertainties. While model-based systems engineering (MBSE) is considered a promising approach to address these challenges, task-specific methodologies that systematically identify and reduce uncertainties in existing document-based data and information are lacking.

The objective of the research project developed within this work is to create a task-specific methodology for the process-accompanying development and maintenance of holistic system models to support the systematic advancement of data and information in satellite project development processes. The methodology shall effectively and efficiently support developers in identifying uncertainties in existing document-based data and information. Furthermore, it shall provide model-based assistance in problem-solving and idea generation for reducing identified uncertainties. Additionally, it shall contribute positively to knowledge generation through systematic model development and structured information representation. The developed ITPE methodology is based on three overarching components that represent the central result of this work. The DT-MBSE integration model combines Design Thinking with model-based systems engineering in a double-diamond process model and defines the systematic collaboration between modeling team, systems engineering team, and domain-specific development team for identifying and reducing uncertainties. The second component comprises five specific analysis methods (requirements, system context, behavior, function, and structure analysis) that describe how models can be created with SysML for specific analysis purposes. The third component includes an ontological concept with domain-specific concepts from satellite development as well as a corresponding element library that serves as a supporting tool for structured knowledge representation for the modeling team.

The methodology validation was conducted using a subsystem of the scientific satellite development project SeRANIS at the University of the Federal Armed Forces Munich. A systematic selection process was performed to identify a suitable application case. The initial validation followed the Design Research Methodology and included both quantitative and qualitative assessments. An independent modeling team of two persons from different academic institutions and an experienced representative from the development environment conducted the validation. Eight validation criteria were qualitatively assessed, relating to the three main areas of research of the work: the identification of uncertainties in document-based data and information, the reduction of these uncertainties through a model-based, human-centered approach, and the support of knowledge generation.

For better readability, this work refrains from the simultaneous use of masculine, feminine, and diverse language forms. All personal designations apply equally to all genders.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit	4
1.3	Aufbau der Arbeit	13
2	Forschungsvorgehen	15
2.1	Design Research Methodology	15
2.2	Forschungskonzept	17
2.3	Definition der Kriterien zur Validierung der Methodik	23
2.4	Schlussfolgerungen zum Forschungsvorgehen	24
3	Begriffliche Grundlagen	26
3.1	Unsicherheiten	26
3.2	Modellbasiertes Systems Engineering	36
3.2.1	Systems Thinking	38
3.2.2	Systems Engineering	42
3.2.3	Modellbasiertes Systems Engineering	46
3.2.4	Modellierungssprachen für Systeme	47
3.2.5	Modellierungswerkzeuge	49
3.3	Requirements Engineering	50
3.4	Design Thinking	53
3.5	Ontologien	55
3.5.1	Begriffsdefinition	56
3.5.2	Bestandteile einer Ontologie	58
3.5.3	Klassifizierung Ontologien	59
3.6	Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung	60
4	Stand der Technik	64
4.1	Modellierungsmethodiken	64
4.1.1	Bestehende Modellierungsmethodiken	65
4.1.2	Fazit	75
4.2	Design Thinking im Systems Engineering	79
4.2.1	Beschreibung bestehender Ansätze	79
4.2.2	Fazit	87
4.3	Ontologien für Satellitenentwicklungsprojekte	88
4.3.1	Definition und Klassifizierung von Satelliten	88

4.3.2	Beschreibung bestehender Ontologien	89
4.3.3	Fazit	93
5	Methodik zur Entwicklungsunterstützung von Satellitenprojekten	95
5.1	Übersicht	95
5.2	Das DT-MBSE Integrationsmodell	97
5.2.1	Grundstruktur und Denkmechanismen	98
5.2.2	Rollenkonzept des DT-MBSE Integrationsmodells	99
5.2.3	Der linke Diamant des DT-MBSE Integrationsmodells	103
5.2.4	Der rechte Diamant des DT-MBSE Integrationsmodells	105
5.2.5	Bewertung und Einordnung des DT-MBSE Integrationsmodells	107
5.3	Anwendungsspezifische Ontologie in der Domäne der Satellitenprojekte	111
5.3.1	Auswahl Entwicklungsmethode	111
5.3.2	Ontologie-Konzept	114
5.3.3	Konzept der Element-Bibliothek	125
5.3.4	Bewertung des ontologischen Konzeptes	127
5.4	Analysemethoden	130
5.4.1	Übersicht Modellierungsmethoden	130
5.4.2	Methode zur Anforderungsanalyse	134
5.4.3	Methode zur Systemkontextanalyse	136
5.4.4	Methode zur Verhaltensanalyse	138
5.4.5	Methode zur Funktionsanalyse	140
5.4.6	Methode zur Strukturanalyse	142
5.4.7	Umsetzung der Unsicherheitsmodellierung	144
6	Validierung der Methodik	148
6.1	Validierungskonzept	148
6.2	Beschreibung des Anwendungsfalls	151
6.3	Validierungsergebnisse	154
6.4	Diskussion	163
7	Zusammenfassung und Ausblick	171
8	Literaturverzeichnis	174
9	Abbildungsverzeichnis	192
10	Tabellenverzeichnis	194
A-1	Interviewstudie	195
A-2	Schaubilder Ontologie	199

Inhaltsverzeichnis

A-3	Schaubilder Profil	209
A-4	Stellungnahme M-T 1	221
B-1	Veröffentlichungen	222
B-2	Betreute studentische Arbeiten	224

1 Einleitung

Das folgende erste Kapitel stellt die Motivation, Zielsetzung und Abgrenzung der vorliegenden Arbeit vor. Dazu wird in Kapitel 1.1 zunächst die übergeordnete Motivation dieser Arbeit beschrieben, indem ausgehend von grundlegenden menschlichen Bedürfnissen und deren Transformation zu spezifischen Kundenbedürfnissen die zunehmende Komplexität moderner Produktentwicklung aufgezeigt wird. Hervorzuheben sind dabei die Herausforderungen im Bereich der Kommunikations- und Informationstechnologien sowie die daraus resultierende Bedeutung welt-raumgestützter Lösungen. In Kapitel 1.2 wird die konkrete Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit vorgestellt. Zur empirischen Fundierung der Forschungsfragen werden bereits hier erste Forschungsergebnisse in Form einer systematischen Interviewstudie mit elf Experten aus der Satellitenentwicklung vorgestellt. Diese methodische Entscheidung folgt dem Prinzip einer evidenzbasierten Forschungsplanung (Peppers et al., 2007, S. 52), bei der die Problemidentifikation durch spezifische empirische Erkenntnisse definiert und deren Wert gerechtfertigt wird. Aus den so gewonnenen Erkenntnissen werden anschließend die drei zentralen Forschungsfragen dieser Arbeit systematisch abgeleitet. Kapitel 1.3 schließt die Einleitung mit einer Übersicht über den strukturellen Aufbau der gesamten Dissertation ab und positioniert die nachfolgenden Kapitel im Gesamtkontext der Forschungsarbeit.

1.1 Motivation

„Das Bedürfnis gilt als die Ursache der Entstehung: In Wahrheit ist es oft nur eine Wirkung des Entstandenen.“ (Friedrich Wilhelm Nietzsche)

Erkennt der Mensch einen Mangel in einem Lebensumstand oder einer Situation, dann entsteht daraus der Antrieb, diesen Mangel zu beheben (Metz-Göckel, 2022). (Hubka, 1973) betrachtet diese subjektiven Empfindungen als menschliche Bedürfnisse, neben denen die (VDI 3780, 2000) auch Bedürfnisse einschließt, die ohne ein solches Mangelerlebnis bleiben, sei es beispielsweise durch kontinuierliche Befriedigung, oder weil sie dem Bewusstsein verborgen bleiben. Gewiss ist jedoch das Streben des Menschen, seine Bedürfnisse zu befriedigen und sein eigenes Potenzial zu entwickeln (Gräßler und Oleff, 2022). In der (VDI 3780, 2000) werden Bedürfnisse im Allgemeinen als der Ausdruck dessen betrachtet, was zur Lebenserhaltung und Lebensentfaltung eines Menschen notwendig ist. Hierbei differenziert die Richtlinie zwischen Wunsch und Bedürfnis, indem das Bedürfnis die Notwendigkeit der Befriedigung einschließt. Einen bedeutenden Beitrag zum Verständnis von menschlichen Beweggründen, Verhalten und Motivation liefert (Maslow, 1943) in seinem Werk zur Theorie der menschlichen Motivation. (Maslow, 1943) postuliert, dass menschliche Bedürfnisse hierarchisch angeordnet sind und in einer bestimmten Reihenfolge zu erfüllen sind. Diese Hierarchie umfasst physiologische Bedürfnisse auf der ersten Ebene, Sicherheitsbedürfnisse, soziale Bedürfnisse, Bedürfnisse nach Wertschätzung und positioniert schließlich die Selbstverwirklichung auf der höchsten Ebene. Eine solche hierarchische Betrachtungsweise zeigt auf, dass Menschen bestrebt sind, ihre Bedürfnisse auf jeder Stufe zu erfüllen, bevor sie zu den höheren Stufen übergehen. Die Betrachtung und Beschreibung von menschlichen Bedürfnissen lassen einen umfassenden interdisziplinären wissenschaftlichen Diskurs zu, ein grundlegender Aspekt steht jedoch bei der Betrachtung von Bedürfnissen außer Frage: Bedürfnisse begleiten den Menschen vom ersten Tag seines Lebens und ein Leben lang, in jeglicher Lebenslage (Brandl, 2020).

Basierend auf diesen Überlegungen zum Konzept der Bedürfnisse, können Kundenbedürfnisse den Ausgangspunkt für die Schaffung neuer, innovativer Produktlösungen darstellen, die darauf abzielen, die erkannten Mängel zu adressieren (Gadzo *et al.*, 2024, S. 2533). Sie spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Optimierung und Weiterentwicklung existierender Angebote. (Ulrich *et al.*, 2020) betonen zudem, dass die Identifizierung von Kundenbedürfnissen und die zügige Entwicklung darauf abgestimmter Produkte essenziell für den Unternehmenserfolg sind. Vor dem Hintergrund, dass sich in der Konsumgüterindustrie Märkte zum Teil zu Erlebnismärkten weiterentwickeln, ist es für die Unternehmen entscheidend, die Erfüllung individueller Kundenbedürfnisse in den Mittelpunkt zu rücken und gleichzeitig individuelle Produkte kostengünstig herzustellen (Feldhusen und Grote, 2013).

Kundenbedürfnisse richten sich immer häufiger nicht nur auf das materielle Produkt selbst, sondern auch auf die dazugehörigen immateriellen Dienstleistungen (Ehrlenspiel und Meerkamm, 2017). In vielen Fällen führt das zu einer Verlagerung des Schwerpunktes des Entwicklungsziels auf diese immateriellen Dienstleistungen, für deren Realisierung oft ein komplexes Netzwerk notwendig ist. (Allen *et al.*, 2021) stellten bereits fest, dass der Einsatz vernetzter und intelligenter Technologien dazu führt, dass zahlreiche neue Produkte nicht länger isolierte Einheiten mit ausschließlich internen und in sich geschlossenen Funktionen darstellen. Vielmehr sind komplexe Netzwerke notwendig, die ihrerseits wiederum aus verschiedenen komplexen Systemen bestehen (Gadzo *et al.*, 2023, S. 520). Diese Systeme arbeiten interaktiv und multidisziplinär zusammen und sind in der Lage, die anspruchsvollen und vielfältigen Bedürfnisse und Wünsche der Nutzer zu erfüllen und gleichzeitig die Interessen der Betreiber solcher Netzwerke zu berücksichtigen (Hick *et al.*, 2019).

Diese zunehmende Kundenorientierung auf Lösungen für spezifische Anforderungen führt jedoch zu einer steigenden Komplexität der Produkte und Systeme (Husung *et al.*, 2022). Die Entwickler solcher Systeme müssen sich heutzutage nicht nur einer wachsenden Komplexität gegenüberstellen (Paetzold und Köbler, 2014). Sie müssen gleichzeitig in einem interdisziplinären Umfeld bestehen, welches geprägt ist von Ambiguität und Unsicherheiten (Sankowski *et al.*, 2021). Besonders deutlich wird diese Entwicklung im Bereich der Kommunikations- und Informationstechnologien, deren schnelle Evolution durch die wachsende Nachfrage nach Geschwindigkeit, Zuverlässigkeit und ubiquitärer Konnektivität angetrieben wird (Aktas *et al.*, 2025, S. 1). Die für die Realisierung immaterieller Dienstleistungen notwendigen komplexen Netzwerke erfordern leistungsfähige Netztechnologien als technologische Grundlage, deren Datenweiterleitung aufgrund der heterogenen, dynamischen und großflächigen Natur dieser Umgebungen zunehmend komplex wird (Aktas *et al.*, 2025, S. 2). Auf dem Gebiet der Netztechnologien stellt sich für die Entwickler neben der steigenden Vielfalt an anspruchsvollen Bedürfnissen und Anforderungen an die immateriellen Dienstleistungen auch die schnell wachsende Zahl an angeschlossenen Nutzern als ernstzunehmende Herausforderung dar (Hofmann, 2021, S. 1). Die Grenzen terrestrischer Infrastrukturen bei der Bereitstellung globaler Konnektivität haben dazu geführt, dass eine nahtlose Integration von terrestrischen, luftgestützten, maritimen und satellitengestützten Segmenten - oft als "3+-Paradigma" bezeichnet - an Bedeutung gewonnen hat, um eine wahrhaft globale Abdeckung zu gewährleisten (Aktas *et al.*, 2025, S. 2).

Vor diesem Hintergrund haben weltraumgestützte Dienste in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen (Bachmann *et al.*, 2024; Kinzel *et al.*, 2022). Sie stellen eine vielversprechende Teillösung zur Überwindung dieser Herausforderungen dar, indem sie globale Abdeckung und eine verbesserte Konnektivität für eine zunehmend vernetzte Welt unterstützen (Burleigh *et al.*,

2019; Cao *et al.*, 2018). Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die Entwicklung neuer Satellitensysteme eine komplexe Aufgabe darstellt, die zahlreiche Facetten umfasst (MacDonald, 2014). Dazu zählen beispielsweise die Integration von 5G-Technologien, die Vereinigung verschiedenster drahtgebundener und drahtloser Technologien, der Einsatz fortschrittlicher Kommunikationsmethoden sowie die raumgestützte Datenerfassung und -verarbeitung (Kodheli *et al.*, 2021). Ebenso kritisch sind Fragen der Kosteneffizienz von Startoptionen, die alle zusammen die vielschichtigen Herausforderungen in diesem Bereich unterstreichen.

Mit herkömmlichen Methoden und Mitteln lassen sich diese Herausforderungen und Aufgaben nur mit großem Aufwand angehen. Die Beherrschung der ständig wachsenden Komplexität der Systeme und Produkte bei gleichzeitiger Fokussierung auf die tatsächlichen Bedürfnisse der Kunden und Stakeholder stellt herkömmliche Entwicklungsansätze vor erhebliche Schwierigkeiten (Sendler, 2013). An dieser Stelle können zwei Klassen von methodischen Ansätzen Abhilfe schaffen, da sie speziell für die interdisziplinäre Entwicklung komplexer multidisziplinärer Systeme entwickelt wurden: Systems Engineering und modellbasiertes Systems Engineering (MBSE) (Viektor und Huth, 2022; Eigner *et al.*, 2014; Weilkiens, 2014). Modellierung trägt hierbei nicht nur zur Erkennung von Komplexität und Verbesserung des Verständnisses bei, sie fördert auch eine effektivere Kommunikation (Holt *et al.*, 2012). Es ist zudem möglich, den grundlegenden Nutzen eines Produktes durch die Befriedigung eines oder mehrerer Bedürfnisse zu definieren, weswegen auch menschenzentrierte Aspekte bei der Entwicklung effizienter und effektiver Ansätze zur Unterstützung der Produktentwicklungsprozesse berücksichtigt werden sollten (Krause und Heyden, 2022).

Die Motivation für ein Projekt leitet sich häufig aus seinem Nutzen ab, also dem Wert oder dem Vorteil, den es für Individuen, Gruppen oder die Gesellschaft als Ganzes schaffen kann. Oftmals ist das erhoffte Eintreten dieses Nutzens der Hauptantrieb für die Initiierung und Durchführung eines Projekts. Die Motivation besteht nun darin, den Nutzen und die Vorteile von MBSE für die Stakeholder-Landschaft, das Endprodukt und den Entwicklungsprozess von komplexen Satellitenprojekten zu fördern. *WAS* dazu auf welche Weise (*WIE*) im Rahmen spezifischer Fragestellungen erfolgen sollte, wird in dieser Arbeit als methodische Vorgehensweise vorgeschlagen. In (Lindemann 2016, S. 408 f.) wird in Bezug auf den Nutzen eines methodischen Vorgehens dargelegt, dass der Vorteil einer systematischen Herangehensweise sich positiv auf die Qualität der Ergebnisse, die tatsächliche Organisation der Arbeit sowie die Entwicklung des einzelnen Mitarbeiters und des gesamten Teams auswirkt, indem es vor allem die Anzahl später, kostenintensiver Änderungen im Entwicklungsprozess reduziert. Dies wird häufig durch die mangelhafte und unvollständige Dokumentation der Produkthanforderungen verursacht. Gemäß (Lindemann, 2016) steigert eine methodische Herangehensweise in der Produktentwicklung die Erfolgchancen bei der Durchführung von Entwicklungsprojekten. Angewandte Methodiken fokussieren für gewöhnlich eine bestimmte Fachrichtung in der Produktentwicklung, wenn sie den Entwicklungsprozess darstellen (Lindemann, 2016; Gericke und Blessing, 2012).

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

“Es gibt zwei Dinge, auf denen das Wohlgelingen in fast allen Verhältnissen beruht. Das eine ist, dass Zweck und Ziel der Tätigkeit richtig bestimmt sind, das andere aber besteht darin, die zu diesem Endziel führenden Handlungen zu finden.” (Aristoteles)

Die Zielsetzung eines Entwicklungsprojekts besteht aus dem harmonischen Zusammenspiel seiner Ausrichtung auf ein bestimmtes zweckgebundenes Ziel und dem dahinterstehenden Bestreben dieses Ziel zu erfüllen sowie dem erzeugten Nutzen, der den Mehrwert darstellt, den es für seine Nutzer und Stakeholder bietet. Ein Produkt oder ein System ist in der Regel ein durch eine gedachte Systemgrenze abgegrenzte Menge von Elementen mit bestehenden Relationen, die einen definierten Zweck erfüllen sollen (VDI 2221, 2018). Aus der Erfüllung dieses Zwecks ergibt sich der Nutzen für die Stakeholder.

Um im Rahmen dieser Arbeit die auf der beschriebenen Motivation basierende Zielsetzung zu definieren und die Motivation zu bekräftigen, wurde eine Interviewstudie durchgeführt. Ziel der Studie war es einerseits, die wahrgenommenen Herausforderungen der Teilnehmer bei der Entwicklung von Satellitenprojekten zu identifizieren und andererseits das Begriffsverständnis in Hinblick auf die Missionsart und die Ausprägung des Systems zu erfragen. Hierzu wurden 11 Interviews geführt, wobei vorab zwei Probe-Interviews durchgeführt wurden, um den Fragenkatalog zu präzisieren. Bei den Interviews handelte es sich um halbstrukturierte Interviews, die im Anschluss für die Inhaltsanalyse transkribiert wurden. (Denzin und Lincoln, 2018) schätzt halbstrukturierte Interviews in den Human- und Sozialwissenschaften heute als besonders weit verbreitet ein, da sie gegenüber stärker strukturierten Interviewformen den Vorteil haben, dass sie das Potenzial eines Gesprächs zur Erkenntnisgewinnung besser ausschöpfen. Dies liegt daran, dass sie den Teilnehmern erheblich mehr Freiraum lassen, um Themen zu vertiefen, die sie für relevant halten, und zudem dem Interviewer die Möglichkeit geben, aktiver und erkennbarer am Wissensgewinnungsprozess teilzunehmen, statt sich lediglich an einen festen Fragenkatalog zu halten (Denzin und Lincoln, 2018). Die Transkripte wurden mittels der qualitativen Inhaltsanalyse nach (Mayring, 2010) ausgewertet, da diese Methode eine systematische und regelgeleitete Textanalyse zur Identifikation zentraler Themenbereiche ermöglicht.

Bei den Interviewteilnehmern handelte es sich entweder um Mitarbeiter aus dem akademischen Bereich (vier Teilnehmer) oder um Mitarbeiter aus dem industriellen Kontext (sieben Teilnehmer). Sechs Teilnehmer hatten zum Zeitpunkt der Befragung mehr als zehn Jahre Berufserfahrung in der Raumfahrt, drei Befragte konnten fünf-zehn Jahre Berufserfahrung aufweisen und zwei Teilnehmer hatten zwischen drei und fünf Jahren Erfahrung auf dem Gebiet der Raumfahrt. Diese erfahrene Zusammenstellung an Teilnehmern bestand zudem aus drei Professoren, die zeitgleich eine leitende Funktion in einem Projekt innehatten, drei Projektleitern, vier System Ingenieuren und einem Spezialisten. Die Interviews fanden im Zeitraum zwischen Juni und August 2023 statt. Die beiden zentralen Fragestellungen behandelten die Herausforderungen der Satellitenentwicklung im Rahmen eines New Space-Ansatzes und die Herausforderungen bei der Entwicklung von konventionellen bzw. traditionellen Satellitenmissionen. Da der Begriff *New Space* in der Literatur noch nicht einheitlich definiert ist und für das Verständnis der spezifischen Herausforderungen eine präzise Begriffsabgrenzung erforderlich war, wurde im Rahmen der Interviewstudie zunächst eine Begriffsklärung durchgeführt. Die Teilnehmer wurden daher gefragt, wie sie den Begriff *New Space* definieren würden. Tabelle 1-1 zeigt die Auswertung der Begriffsdefinition, in welcher die Antworten nach Merkmalen gegliedert und in Abhängigkeit ihrer Häufigkeit dokumentiert sind.

Die Ergebnisse wurden nach der Auswertung mit den Ergebnissen von (Golkar und Salado, 2021) verglichen, die sich ebenfalls in ihrer Arbeit mit der Definition des Begriffes New Space auseinandergesetzt haben und dazu ebenso eine Expertenumfrage mit 20 Teilnehmern aus der Raumfahrt durchgeführt haben.

Tabelle 1-1: "Wie definieren Sie den Begriff New Space?" - Interview Ergebnisse

Merkmal	Häufigkeit
Verschlinkung von Standards bei Protokollen und Prozessen wie z.B. den ECSS-Standards	11
Verschlinkung der Teststrategie und Qualitätssicherung	11
Verschlinkung und Vereinfachung der Entwicklungs- und Produktionsprozesse	11
Höhere Akzeptanz von Risiko und Unsicherheiten	11
Höhere Flexibilität	11
Andere Entwicklungsphilosophie, Herangehensweisen und Mindset → Fehlerkultur (Fail Fast Prinzip) → Nutzung agiler Entwicklungsansätze	11
Verkürzte Entwicklungszeit	11
Verringertes Budget	11
Unabhängig von Satellitengröße	11
Reduzierte Bauteilqualität und Nutzung von Commercial off-the-shelf-Komponenten (COTS) zur Kostensenkung	10
Digitalisierung der Dokumentation	9
Hohe Stückzahl eines ähnlichen Satelliten-Typen/ einer modularen Plattform	8
Kommerzialisierung der Raumfahrt → Engagement von branchenfremden Unternehmen im Weltraumsektor	2

Die in der Tabelle erwähnte Abkürzung ECSS steht für European Cooperation for Space Standardization und stellt eine Kooperation zwischen der Europäischen Weltraumorganisation, nationalen Raumfahrtbehörden und europäischen Industrieverbänden dar. Das Ziel dabei ist die Entwicklung und Pflege gemeinsamer Standards. Die Anforderungen in diesen Standards fokussieren darauf, was erreicht werden soll, anstatt wie die erforderlichen Maßnahmen umgesetzt werden sollen. Dadurch wird es ermöglicht, existierende Organisationsformen und Methoden dort einzusetzen, wo sie wirksam sind und gleichzeitig Raum für die Verbesserung dieser Strukturen und Methoden zu lassen, ohne die Notwendigkeit, die Standards selbst umzuschreiben. Die Standards behandeln unter anderem folgende Themenfelder:

- Space Management - Organisation und Durchführung von Reviews (ECSS, 2008): Diese Richtlinie stellt Werkzeuge zur Verfügung, die zur Identifizierung und Strukturierung aller Aktivitäten und Informationen im Rahmen einer Projektbewertung/Projekt-Reviews notwendig sind.

- Space Engineering – Spezifikation technischer Anforderungen (ECSS, 2009a): Diese Richtlinie bietet eine Übersicht über Zweck und Bedeutung der technischen Anforderungsspezifikation. Sie definiert verschiedene Typen von Anforderungen und definiert die Anforderungen an die technische Anforderungsspezifikation selbst als auch für die darin enthaltenen Anforderungen.
- Space project management – Projektplanung und Durchführung (ECSS, 2009c): Dieser Standard beschränkt sich auf die Kernelemente der Projektplanung und Durchführung, sowie die Identifizierung der übergeordneten Top-Level Anforderungen und Produkte.
- Space project management – Konfigurations- und Informationsmanagement (ECSS, 2009b): Die Bereitstellung von Anforderungen für das Informations-/Dokumentations- und Konfigurationsmanagement von Produkten innerhalb eines Raumfahrtprogramms oder -projekts ist der Umfang dieses Standards.
- Space Engineering – Allgemeine Anforderungen an das Systems Engineering (ECSS, 2017): Dieser Standard definiert die Anforderungen an die Umsetzung des Systems Engineering für Raumfahrtsysteme und Raumfahrtprodukte.

Tabelle 1-1 zeigt dabei vor allem auf, welche Aspekte unter dem Begriff New Space wahrgenommen werden. Alle Interviewteilnehmer verbinden mit dem Begriff das Abweichen von etablierten Prozess- und Vorgehensbeschreibungen, wie sie in den ECSS-Dokumenten enthalten sind. Das Ziel bzw. die Motivation dabei ist die Verschlankeung und Vereinfachung aufwendiger Prozesse und Vorgehen, sowie kostenintensiver Teststrategien. Die Verwendung von Commercial off-the-shelf-Komponenten (COTS) ist dabei eine weitere wichtige Eigenschaft von New Space Entwicklungsprojekten. (Oberndorf, 1998) versteht unter dem Begriff COTS das Akronym, welches grundsätzlich für kommerzielle Produkte verwendet werden kann und sich dabei auf die Art von Produkten bezieht, die direkt „von der Stange“ oder aus dem „Regal“ eines Herstellers erworben werden können. Dabei definiert (Oberndorf, 1998) drei herausragende Eigenschaften von COTS: (1) COTS existieren a priori bei einem kommerziellen Anbieter und sind für die Allgemeinheit verfügbar (2) und käuflich zu erwerben (3). Eine ausführlicher Diskurs zum Begriff COTS und seiner Definition und Klassifizierung wird in (Morisio und Torchiano, 2002) geführt. Weitere Aspekte, die alle Interviewteilnehmer als Bestandteil der New Space Philosophie betrachten, sind eine höhere Risikobereitschaft, verkürzte Entwicklungszeiten, ein geringeres finanzielles Budget, jedoch dafür mehr Flexibilität und Freiraum bei der Entwicklung. Ob ein Satellitenprojekt bzw. eine Satellitenmission im Rahmen eines New Space-Ansatzes entwickelt wird, erachten alle Teilnehmer als unabhängig von der Größe des Satelliten. Darüber hinaus sehen 8 Teilnehmer die Anwendung des New Space-Ansatzes häufig bei modularen Satellitentypen, die in größeren Stückzahlen produziert werden sollen und dabei vielfältige Nutzlasten tragen und somit in der Lage sind, unterschiedliche Aufgaben für unterschiedliche Kunden zu erfüllen. (Golkar und Salado, 2021) schlussfolgern in ihrer Interviewstudie, dass Kundenorientierung, neue Produktentwicklungsansätze und neue Geschäftsmodelle, bei denen private Investoren gegenüber institutionellen Investoren in den Vordergrund rücken, die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale von New Space sind. Ferner stellen die Autoren fest, dass diese Unterscheidungsmerkmale unabhängig von der Art des zu entwickelnden Systems sind und damit unabhängig von Größe, Zweck oder Qualitätsstandard. Ein wesentliches Merkmal von New Space beschreiben die Autoren in den unterschiedlichen Vertragsstrukturen zwischen institutionellen Kunden und privaten Unternehmen. New

Space-Verträge werden meistens als Festpreisvereinbarungen abgeschlossen, bei denen die Projektkosten feststehen und die Zahlungen an das Erreichen von Projektmeilensteinen gekoppelt ist. Weitere Beobachtungen der Autoren sind eine erhöhte Akzeptanz von Fehlern, die Einführung agiler Produktentwicklungsansätze und Effizienzverbesserungen durch den Einsatz von technischen Ansätzen mit einer höheren Risikobereitschaft und der Einsatz von COTS. Die Ergebnisse von (Golkar und Salado, 2021) decken sich daher in vielen Punkten mit den Sichtweisen der befragten Interviewteilnehmer. Zusammenfassend lässt sich unter dem Begriff New Space eine schlankere Prozesslandschaft in der Entwicklung verstehen, die aus einem agilen risikobereitem Mindset besteht, dass auf eine budgetoptimierte verkürzte Entwicklungszeit abzielt. New Space fokussiert sich stärker auf den Kunden und berücksichtigt neue Geschäftsmodelle.

Ein abschließender wichtiger Aspekt, den (Golkar und Salado, 2021) herausgehoben haben, ist dass sie New Space und traditionelle Ansätze nicht als dichotom betrachten, sondern viel mehr eine Reihe von Optionen zwischen alten und neuen Ansätzen für die Entwicklung und den Betrieb von Weltraummissionen. In der durchgeführten Interviewstudie wurden die Teilnehmer ebenfalls gefragt, ob ihrer Meinung nach hybride Ansätze existieren und in einer Folgefrage, ob solche hybriden Ansätze auch zukünftig zum Einsatz kommen. Beide Fragen wurden von allen 11 Teilnehmern mit ja beantwortet, was sich mit der Ausführung von (Golkar und Salado, 2021) vollständig deckt.

Tabelle 1-2 zeigt nun das Ergebnis der Interviews in Bezug auf die wahrgenommenen Herausforderungen bei der Entwicklung von Kleinsatellitenmissionen im Rahmen eines New Space-Ansatzes. Die im Rahmen der Interviewstudie befragten Experten identifizierten das Gewicht beziehungsweise die Masse als primäres Unterscheidungsmerkmal zwischen Groß- und Kleinsatelliten (siehe Anhang A-1). Diese Differenzierung spielt jedoch hinsichtlich der grundlegenden Entwicklungsherausforderungen eine untergeordnete Rolle. Aufgrund dieses Erkenntnis wird in der vorliegenden Arbeit bei der Analyse von Herausforderungen in der Satellitenentwicklung keine explizite Unterscheidung zwischen Groß- und Kleinsatelliten vorgenommen. Stattdessen wird der Begriff 'Satellitenentwicklung' verwendet, um die herausfordernden Aspekte bei der Entwicklung unabhängig von Satellitengröße und -gewicht zu erfassen und ganzheitlich zu betrachten.

Die Befragten stimmen darin überein, dass finanzielle Aspekte aufgrund geringerer Budgets im Vergleich zu konventionellen bzw. traditionellen Missionen eine große Herausforderung darstellen. Ebenso sind sich nahezu alle Teilnehmer (10 von 11) darin einig, dass die Abweichung von etablierten Standards wie beispielsweise ECSS und die Notwendigkeit, neue Herangehensweisen für die Dokumentation zu erarbeiten, eine nennenswerte Herausforderung darstellen. Die Akzeptanz der Kunden für Abweichungen von Standards und Protokollen spielt ebenfalls eine große Rolle. Fast alle Befragten (9 von 11) betrachten die signifikante Verkürzung der Entwicklungszeit, die ein wesentlicher Vorteil des New Space-Ansatzes im Vergleich zum konventionellen/traditionellen Ansatz ist, aufgrund des damit verbundenen erhöhten Zeitdrucks als eine Herausforderung in der Entwicklung. Das Risikomanagement wird aufgrund der höheren Risikobereitschaft bei New Space Missionen im Vergleich zu konventionellen Missionen als eine Herausforderung wahrgenommen, ebenso wie die Schaffung von Akzeptanz beim Kunden für dieses höhere Risiko. Dies wird von 8 der 11 Interviewteilnehmer betont. Für über die Hälfte der Befragten (6 von 11) stellt insbesondere die Balance zwischen Risiko und Kosten eine anspruchsvolle Situation dar, die sorgfältiges Abwägen erfordert und somit eine nennenswerte Herausforderung darstellt. Weiterhin sehen 6 von 11 Befragten die Serienproduktion als eine bisher unbekannte Herausforderung an, die erst durch den New Space-Ansatz entstanden ist. Hierbei wird die Qualitätssicherung und

das Qualitätsmanagement als Schwierigkeit erachtet, da eine große Anzahl von Satelliten oder Plattformen mit gleichbleibender Qualität gefertigt werden soll, wohingegen beim traditionellen Entwicklungsansatz eine Einzelfertigung vorliegt. Dies erfordert unter anderem die Qualifikation neuer, nicht-raumfahrtzertifizierter Bauteile (COTS). Die Auswahl geeigneter Bauteile und die Festlegung der Grenzen für deren Tests, um sicherzustellen, dass sie ordnungsgemäß im Welt-raum funktionieren werden, wird ebenfalls als große Herausforderung wahrgenommen. Hierzu haben jedoch einige der Befragten bislang vielversprechende Ergebnisse bei der Verwendung von Bauteilen aus der Automobilindustrie erzielt.

Tabelle 1-2: Herausforderungen bei der Entwicklung mit einem New Space-Ansatz

Merkmal	Häufigkeit
Preisdruck (kleines Budget)	11
Abweichen von Standards wie z.b. ECSS → Identifikation neuer Dokumentationsansätze → Kundenakzeptanz	10
Verkürzte Entwicklungszeit	9
Erhöhtes Risiko & Akzeptanz des erhöhten Risikos durch Kunden	8
Serienproduktion (hohe Stückzahl) bei gleichbleibender Qualität	6
Qualifikation von neuen Bauteilen → Identifikation geeigneter nicht raumfahrtzertifizierter Bauteile → Ermittlung geeigneter Teststrategien	6
Dualität günstiger Preis vs. erhöhtes Risiko	6
Kostentransparenz	1
Schnittstellen zwischen Plattform und Nutzlast	1
Gestiegene Wettbewerbsdynamik auf dem Markt	1

Bezüglich der Herausforderungen bei konventionellen bzw. traditionellen Missionen zeigt Tabelle 1-3 das ausgewertete Meinungsbild der Interviewteilnehmer. Es geht hervor, dass die Erstellung von Dokumentationen aufgrund des damit verbundenen hohen Zeitaufwandes und der Ressourcenintensität als große Herausforderung im Entwicklungsprozess wahrgenommen wird. Des Weiteren verstärkt der zunehmende Wettbewerb mit Projekten, die im Rahmen eines New Space-Ansatzes entwickelt werden, den Kostendruck für konventionelle Satellitenmissionen. Dieser Aspekt des Wettbewerbs mit New Space Projekten bringt ferner die Herausforderung mit sich, die Kundenbindung zu sichern, da längere Entwicklungszeiten und höhere Kosten entsprechend zu argumentieren sind.

Tabelle 1-3: Herausforderungen bei der Entwicklung mit einem traditionellen Ansatz

Merkmal	Häufigkeit
Dokumentation (dokumentenbasiert)	7
Ansteigender Preisdruck	7
Kundenbindung sichern, um im Wettbewerb mit New Space bestehen zu können	6
Ineffiziente Prozessabläufe	1
Lange Entwicklungszeit, vor allem gegenüber New Space Missionen	1

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass unabhängig von der Art und Weise wie eine Satellitenmission entwickelt wird, welche Größe der Satellit hat, oder ob es sich um eine Mission für eine staatliche Institution oder einen privaten Kundenkreis mit kommerziellem Hintergrund handelt, die *Dokumentation* eine große Herausforderung darstellt. Auch wird der *Wettbewerb* und der damit verbundene *Preisdruck* für die Entwickler als Herausforderung erachtet, unabhängig ob es sich dabei um eine New Space Mission oder eine traditionelle Mission handelt. Des Weiteren spielt der herausfordernde Umgang mit *kürzeren Entwicklungszeiten* ebenfalls eine wichtige Rolle für die Ingenieure. Schließlich betonen die Experten, dass der *Umgang mit Risiko* vor allem in Missionen, die in einer New Space Umgebung entwickelt werden als große Herausforderung wahrgenommen wird. Beide Aspekte spielen auch bei traditionell entwickelten Missionen eine Rolle, da man im Wettbewerb mit New Space Missionen steht.

Es wird nun die These aufgestellt, dass der Einsatz von MBSE entsprechende Vorteile mit sich bringt und bei der Bewältigung dieser Herausforderungen unterstützen kann. Ein allgemeines Statement zu den Vorteilen des Einsatzes von MBSE ist in (INCOSE, 2015) beschrieben. (INCOSE, 2015, S. 189) sieht die Fähigkeiten zum Umgang mit Informationen, die für die Spezifikation eines Produktes von Relevanz sind durch den Einsatz von MBSE verbessert, wodurch die Kommunikation zwischen verschiedenen Akteuren im Entwicklungsprozess gefördert wird. Außerdem wird durch das Bereitstellen eines einheitlichen Systemmodells, das aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden kann, ein Beitrag zur Komplexitätsbeherrschung und Analyse von Systemen geleistet. Ein weiterer wichtiger Vorteil, den der Einsatz von MBSE laut (INCOSE, 2015, S. 189) mit sich bringt, ist die verbesserte Wissenserfassung und die Wiederverwendung von Informationen durch eine standardisierte Erfassung. (Carroll und Malins, 2016; Henderson und Salado, 2021; Campo *et al.*, 2023) haben jeweils im Rahmen einer Literatur-Studie, die in der Literatur beschriebenen Vorteile des Einsatzes von MBSE analysiert. (Carroll und Malins, 2016, S. 45) fassten zusammen, dass die Anwendung eines MBSE-Ansatzes einen nennenswerten Vorteil für die Projektleistung mit sich bringt, womit der Umgang mit Wettbewerb und Preisdruck unterstützt wird. Die Autoren stellten weiterhin fest, dass in der Literatur die Förderung der Effizienz in der Entwicklung durch den Einsatz von MBSE beschrieben wird, was Vorteile beim Umgang mit der Herausforderung der kürzeren Entwicklungszeiten mit sich bringt. Auch wird ein Beitrag zur Vermeidung kostenintensiver Nacharbeit festgestellt, indem durch den Einsatz von MBSE eine frühe Identifikation von Fehlern verbessert wird und somit die Risiken für Kosten, Zeitplan und Mission reduziert werden. (Campo *et al.*, 2023, S. 116) haben im Rahmen ihrer Literatur-Studie festgestellt, dass sieben der zehn wichtigsten Vorteile von (Henderson und Salado, 2021, S. 56 f.) in den

zehn wichtigsten Vorteilen ihrer eigenen Arbeit vorzufinden waren und dabei die folgenden Aspekte dokumentiert. Die dabei adressierten Herausforderungen wurden in Klammern hinter dem jeweiligen Aspekt genannt: Bessere Kommunikation/Informationsaustausch, erhöhte Nachvollziehbarkeit, verbesserte Konsistenz (Dokumentation), bessere Beherrschung der Komplexität, geringere Kosten (Wettbewerb, Preisdruck), geringere Zeit (kürzere Entwicklungszeiten) und geringere Fehler (Wettbewerb, Preisdruck, Risiko). (Henderson und Salado, 2021) haben dazu noch die folgenden drei Vorteile dokumentiert: Verbesserung der Möglichkeit zur Wiederverwendung, die Verbesserung der Systemqualität und die Verringerung des Risikos. Eine verbesserte Kommunikation bzw. Informationsaustausch wirkt sich auf alle fünf wahrgenommenen Herausforderungen positiv aus. Dies begründet sich darin, dass Kommunikation von vitaler Bedeutung für alle Projektbeteiligten in einem Entwicklungsprojekt ist und ineffektive Kommunikation zu unzureichend definierten Aufgaben, kritischen Prozessen und Unsicherheiten bezüglich Verantwortlichkeiten führen kann (Zulch, 2014, S. 1001). (Clifford, 2020, S. 1) hat im Gegensatz dazu eine Umfrage in der Systems-Engineering Gemeinschaft durchgeführt und dabei 240 Personen befragt. Ziel dabei war es unter anderem die spezifischen Vorteile der Integration von MBSE zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden den Teilnehmern drei Fragen bezüglich der Beweggründe der Integration, den wahrgenommenen Vorteilen eines konsistenten Modellmanagements und der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit an Modellen gestellt. Tabelle 1-4 zeigt die sieben häufigsten Nennungen bei der Befragung, sortiert nach der jeweiligen Fragestellung. Es ist erkennbar, dass die Umfrageergebnisse, die in den Literaturstudien identifizierten MBSE-Vorteile und deren Potenzial zur Bewältigung der identifizierten Herausforderungen bestätigen.

Tabelle 1-4: Die sieben häufigsten Nennungen von Vorteilen von MBSE nach Frage aus (Clifford, 2020, S. 8)

Beweggründe für die Integration von MBSE	Vorteile durch konsistentes Modellmanagement	Vorteile durch disziplinübergreifende Zusammenarbeit an Modellen
Reduzierte Kosten (17)	Verbesserte Möglichkeit zur Wiederverwendung (18)	Bessere Kommunikation/Informationsaustausch (13)
Reduzierter Zeitaufwand (17)	Verbesserte Konsistenz (16)	Verbessertes Systemverständnis (10)
Bessere Zugänglichkeit von Informationen (16)	Verbessertes Systemverständnis (9)	Bessere Zugänglichkeit von Informationen (6)
Gesteigerte Effizienz (14)	Reduzierter Zeitaufwand (9)	Verbesserte Konsistenz (13)
Verbesserte Konsistenz (13)	Bessere Kommunikation/Informationsaustausch (7)	Fehlerreduzierung (5)
Verbesserte Rückverfolgbarkeit (11)	Bessere Zugänglichkeit von Informationen (7)	Reduzierter Zeitaufwand (17)
Verbessertes Systemverständnis (10)	Reduzierte Kosten (7)	Verbesserte Möglichkeit zur Wiederverwendung (18)

Damit untermauern die Ausführungen und Ergebnisse der Studien die aufgestellte These, dass die Anwendung von MBSE einen wesentlichen Beitrag zur Bewältigung der bei der Entwicklung von Satellitenprojekten identifizierten Herausforderungen leisten kann, womit auch die Zweckmäßigkeit des Motivationsgedankens bestätigt wird. Auf welche Art und Weise nun die Entwickler durch modellbasiertes Systems Engineering bzw. MBSE bei ihren Entwicklungsaktivitäten in Satellitenentwicklungsprojekten unterstützt werden können, spielt eine wichtige Rolle für die Fragestellungen der vorliegenden Arbeit.

Daraus ergibt sich die zentrale Zielsetzung: Eine methodische Vorgehensweise zu entwickeln, die den aufgabenspezifischen Einsatz von MBSE zur Entwicklungsunterstützung von Satellitenprojekten ermöglicht und somit den Zweck erfüllt, Entwicklern die Vorteile und Mechanismen von MBSE zur Bewältigung der wahrgenommenen Herausforderungen nutzbar zu machen."

(Panusch et al., 2023, S. 1) schlussfolgern aus den Ausführungen von (Walker et al., 2003, S. 8) zu Unsicherheiten, dass im gesamten Entwicklungsprozess technischer Produkte regelmäßig Herausforderungen auftreten, die sich auf Unsicherheiten zurückführen lassen, die aus bewussten oder unbewussten Wissens- oder Definitionslücken entstehen. Die Autoren formulieren auf diesem Gedanken aufbauend ihre Erkenntnis, dass eine Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten eine hohe Relevanz bei der Entwicklung innovativer Produkte hat (Panusch et al., 2023, S. 1). Vor allem Projekte, die zahlreichen unvorhersehbaren Unsicherheiten unterliegen, haben ein hohes Risiko zu scheitern (Lindemann, 2016, S. 176). Aus diesem Grund ist es im Allgemeinen für eine effiziente Entwicklung neuer Produkte eminent, Unsicherheiten frühzeitig zu berücksichtigen (Lindemann, 2016, S. 765). Satellitenmissionen im Speziellen müssen sich in vielen Fällen mit Unsicherheiten auseinandersetzen, was sowohl mit ihrer komplexen Natur zusammenhängt (Feldhacker, 2011, S. 1), als auch dem herausfordernden Kontext, in welchem sie operieren und mit anderen Kontextpartnern interagieren.

Ein entsprechender Fokus auf Unsicherheiten soll auch in der Zielsetzung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methodik manifestiert werden, weswegen die Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten eine zentrale Rolle in der Methodik einnehmen und die aufgabenspezifische Ausrichtung der Methodik definieren. Die Methodik soll die Entwickler effektiv und effizient bei der Aufgabe unterstützen, Unsicherheiten in bestehenden dokumentenbasierten Daten und Informationen zu identifizieren. Darüber hinaus ist das Ziel, den Entwicklern bei der Problemlösung und Ideengenerierung eine modellgestützte Hilfestellung zu geben und sie somit bei der Reduzierung identifizierter Unsicherheiten zu unterstützen. Eine detaillierte Begriffsklärung und Spezifikation, auf welche Unsicherheiten im Speziellen sich die Methodik fokussiert folgt in den Kapiteln 3 und 5. Schließlich soll die Methodik einen positiven Beitrag zur Wissensgenerierung leisten. Sie soll dabei Mechanismen des MBSE und der damit verbundenen systematischen Modellbildung und strukturierten Informations-Repräsentation nutzen, um vernetzte Daten und Informationen verständlich verfügbar zu machen und somit deren Interpretation zu erleichtern. Aus dieser Zielsetzung leiten sich die folgenden drei Forschungsfragen ab:

Forschungsfrage 1: Wie können Unsicherheiten in vorhandenen dokumentenbasierten Daten und Informationen im Entwicklungsprozess von Satellitenprojekten mithilfe eines modellbasierten methodischen Vorgehens identifiziert werden?

Die erste Forschungsfrage beschäftigt sich mit spezifischen Unsicherheiten, die in Daten und Informationen vorkommen, welche aus Dokumenten von Satellitenentwicklungsprojekten

stammen, die mit einem traditionellen dokumentenbasierten Systems Engineering Ansatz erstellt wurden. Hierzu sollen modellbasierte Analysemethoden entwickelt werden, die es ermöglichen, diese Unsicherheiten durch ein systematisches Vorgehen zu identifizieren. Der systematische Transfer von dokumentenbasierten Daten und Informationen in eine modellbasierte Umgebung spielt hierbei eine nennenswerte Rolle.

Forschungsfrage 2: Wie kann in Satellitenentwicklungsprojekten die Reduktion von Unsicherheiten in Daten und Informationen durch einen modellgestützten, menschenzentrierten Ansatz unterstützt werden?

Die zweite Forschungsfrage konzentriert sich auf die Reduktion der identifizierten Unsicherheiten. Im Rahmen dieser Aufgabe spielen Problemlösung und Ideengenerierung eine wichtige Rolle. Ziel ist es, den Entwicklern ein Vorgehensmodell zur Verfügung zu stellen. Dieses Modell soll unter Einbeziehung des zur Identifikation erstellten Systemmodells die schöpferischen Aspekte fördern und dadurch die Reduktion der identifizierten Unsicherheiten unterstützen.

Forschungsfrage 3: Wie kann durch ein modellbasiertes methodisches Vorgehen die Wissensgenerierung im Entwicklungsprozess von Satellitenprojekten unterstützt werden?

Forschungsfrage drei zielt auf die Unterstützung der Wissensgenerierung im Rahmen des Einsatzes der Methodik ab. Unter Wissensgenerierung wird dabei der Prozess der systematischen Erfassung, Strukturierung und Verknüpfung von Informationen verstanden, die im Rahmen des Entwicklungsprozesses verfügbar sind und entstehen. Dies umfasst neben technischen Wissensaspekten über das zu entwickelnde System auch Erkenntnisse über Unsicherheiten in Daten und Informationen, Bedürfnisse und Anforderungen der Stakeholder sowie interdisziplinäre Zusammenhänge. Verschiedene Mechanismen sind hierbei relevant und in der Methodik entsprechend zu berücksichtigen: Zum einen die systematische Modellbildung, zum anderen der Einsatz standardisierter Elemente bei der Modellbildung. Weiterhin sind eine strukturierte Informationsrepräsentation sowie die explizite Beschreibung des betrachteten Gegenstandsbereichs von Bedeutung.

In dieser Arbeit wird eine Methodik entwickelt, die den Aufbau und die Pflege ganzheitlicher Systemmodelle ermöglicht. Diese aufgabenspezifische Methodik konzentriert sich auf die Identifikation und Reduzierung von spezifischen Unsicherheiten, die in vorhandenen dokumentenbasierten Daten und Informationen vorliegen. Die Methodik grenzt sich auf die Domäne der Satellitenprojekte ein. Der Einsatz der Methodik beschränkt sich auf die Entwicklungsphase innerhalb des Produktentstehungsprozesses. Es ist zu beachten, dass die automatisierte Anbindung von Daten und Informationen aus Produktdatenmanagement-Werkzeugen und anderen IT-Strukturen nicht Gegenstand dieser Arbeit ist. Der Grund hierfür ist, dass eine solche Anbindung den Umfang der Arbeit überschreiten würde und bereits in anderen Forschungsprojekten behandelt wird.

Abbildung 1-1 bietet eine prägnante Zusammenfassung von Kapitel 1.2, indem sie den Zweck, die Zielsetzung und die Aufgabenstellungen deutlich macht. Zudem illustriert die Grafik, entnommen aus (Bender und Gericke, 2021, S. 59), die Positionierung im Kontext des Produktlebenszyklus. Die verwendete Grafik zielt grundsätzlich darauf ab, den Produktlebenszyklus anschaulich darzustellen. Sie verdeutlicht die verschiedenen Phasen, die ein Produkt durchläuft - von der ursprünglichen Konzeption über die Entwicklung und Nutzung bis hin zur endgültigen Stilllegung. Anschließend werden auch die Prozesse des Recyclings oder der Wiederverwertung dargestellt (Bender und Gericke, 2021, S. 58).

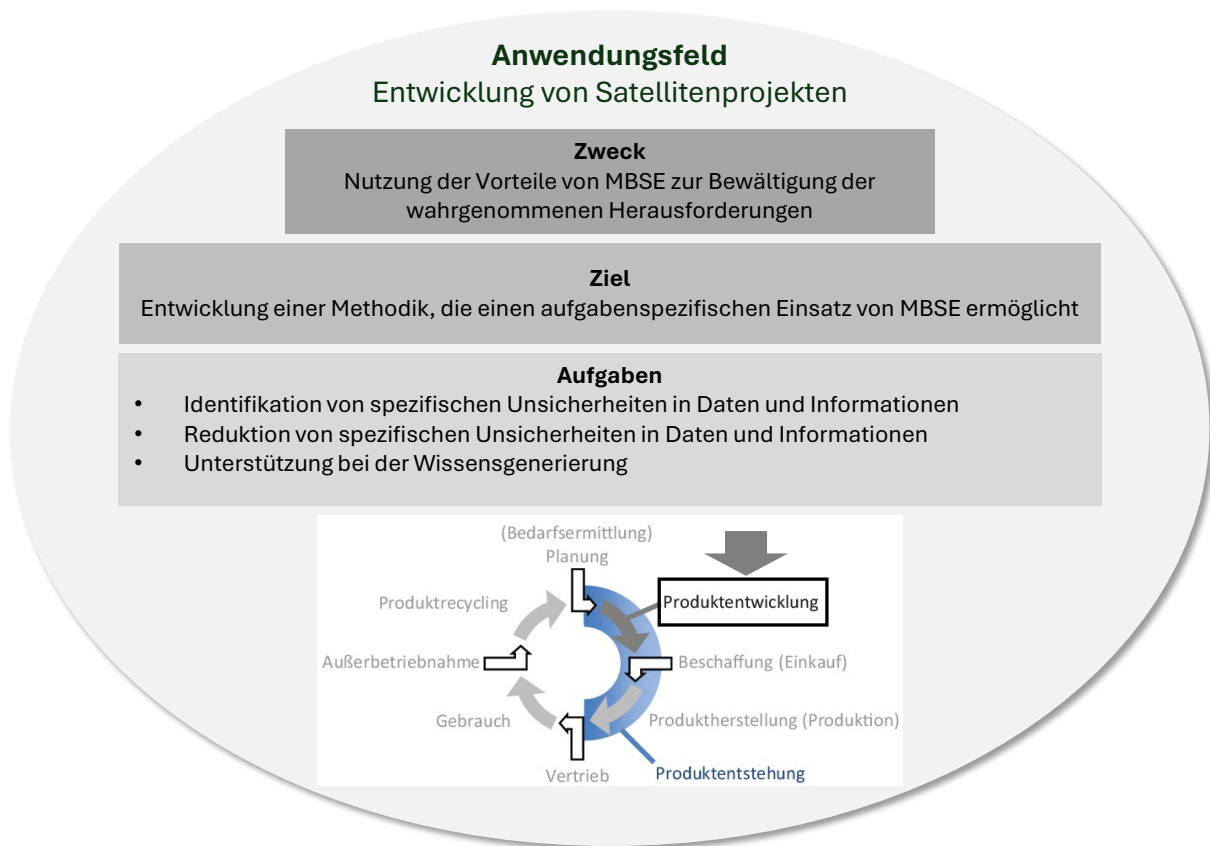


Abbildung 1-1: Zusammenfassung Zielsetzung und Aufgabenstellung

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in sieben Kapitel unterteilt, wozu im Folgenden jeweils ein kurzer inhaltlicher Einblick gegeben wird. Zudem veranschaulicht die Abbildung 1-2 den strukturellen Aufbau der Arbeit und gibt eine allgemeine Übersicht.

Kapitel 1 beschreibt die Motivation und Zielsetzung der Arbeit. Zur Definition der Zielsetzung und Untermauerung der Motivation wird in dem Kapitel das Ergebnis einer Interviewstudie zu den Herausforderungen in der Satellitenentwicklung vorgestellt. Es wird weiterhin eine Abgrenzung der Arbeit beschrieben.

Kapitel 2 präsentiert die der Arbeit zugrundeliegende Forschungsmethodik. Es handelt sich dabei um die Design Research Methodology, kurz DRM, von Blessing und Chakrabarti, die in (Blessing und Chakrabarti, 2009) ausführlich beschrieben wird. Zudem wird in dem Kapitel auf den Einsatz der Forschungsmethodik im Rahmen dieser Arbeit eingegangen, indem das Forschungskonzept vorgestellt wird. Schließlich werden Validierungskriterien und Schlussfolgerungen zum Forschungskonzept beschrieben.

Das *Kapitel 3* beinhaltet die Erläuterung der terminologischen Grundlagen und den Stand der Technik der grundlegenden Mechanismen, die für das Verständnis der beschriebenen Inhalte notwendig sind. Hierbei liegt der Fokus auf den Grundlagen des modellbasierten Systems Engineering bzw. MBSE und den damit verbundenen Disziplinen, des Design Thinking und dem Themenfeld der Ontologien. Das *vierte Kapitel* widmet sich dem aktuellen Forschungsstand in Bezug auf MBSE-Modellierungsmethoden, den Einsatz von Design Thinking im Systems Engineering und Ontologien für Satellitenentwicklungsprojekte. Jeder Themenbereich schließt mit einem Fazit ab, das den Forschungsbedarf aufzeigt und relevante Erkenntnisse hervorhebt.

Kapitel 5 beschreibt die Methodik, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Zunächst wird eine allgemeine Übersicht präsentiert. Darauf folgt die detaillierte Darstellung der einzelnen Komponenten: Das DT-MBSE (Design Thinking-Model-based Systems Engineering) Integrationsmodell, eine anwendungsspezifische Ontologie im Bereich der Satellitenentwicklungsprojekte sowie die entwickelten Modellierungsmethoden, die zur Analyse existierender Daten und Informationen dienen.

Kapitel 6 präsentiert die Validierung der entwickelten Methodik, basierend auf den Kriterien, die in Kapitel 2 definiert werden. Zuerst wird das Konzept der Validierung dargelegt, gefolgt von einer detaillierten Erläuterung des Anwendungsfalls. Dieser bezieht sich auf ein Subsystem eines wissenschaftlichen Satellitenentwicklungsprojekts. Abschließend erfolgt im Rahmen einer Diskussion eine Auswertung der Forschungsergebnisse sowie eine Betrachtung der damit einhergehenden Einschränkungen.

Kapitel 7 fasst schließlich die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und bietet einen Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsaktivitäten.

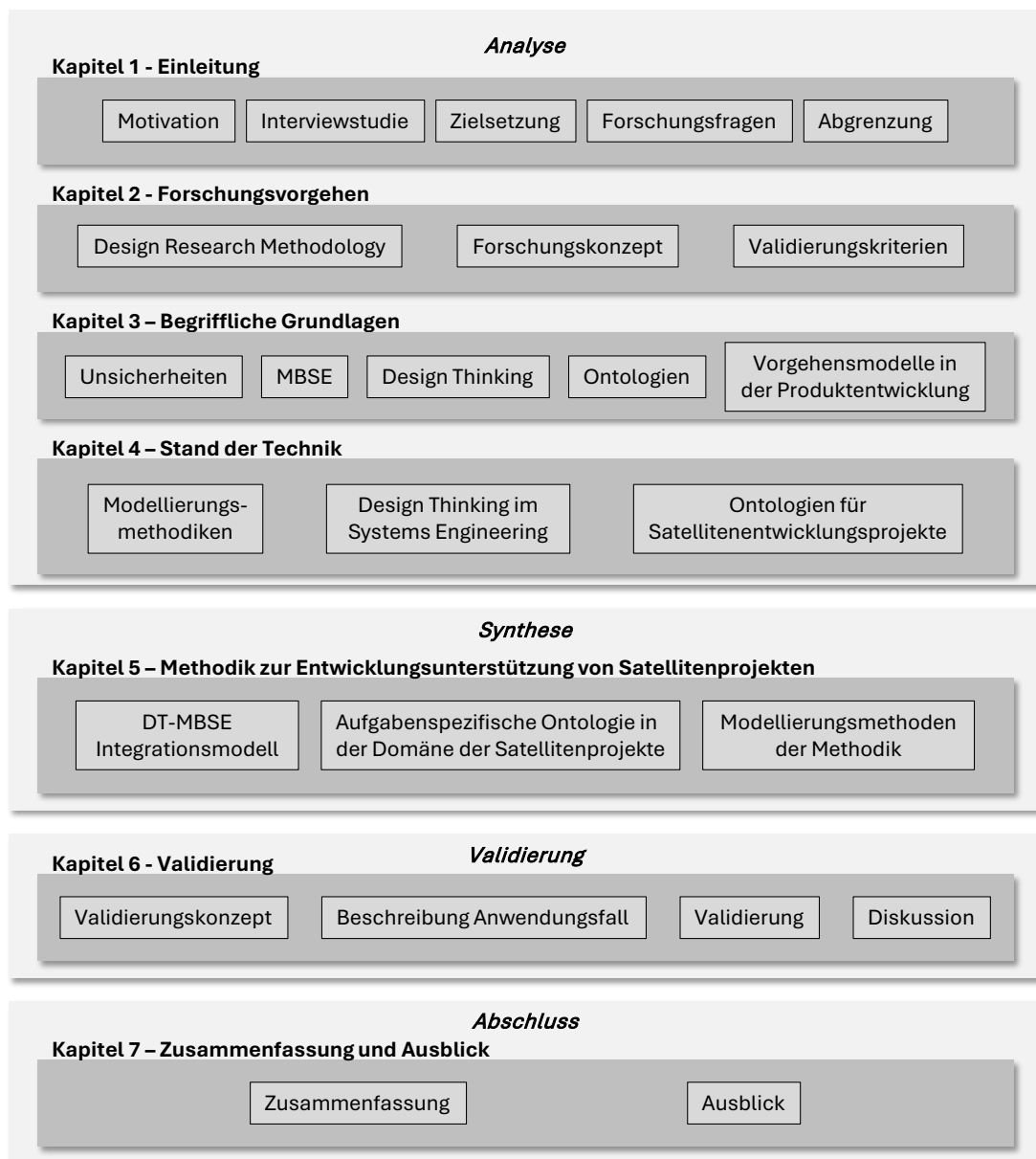


Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit und Übersicht Kapitelinhalt

2 Forschungsvorgehen

Das folgende Kapitel stellt das der Arbeit zugrundeliegende Forschungsvorgehen vor. Zunächst erfolgt eine Erörterung der Design Research Methodology (DRM), an der sich das Vorgehen dieser Arbeit orientiert. Daran anschließend beschreibt das Kapitel das ausgearbeitete Forschungskonzept und zeigt dessen Realisierung auf. Zudem werden die Kriterien, die zur Validierung der entwickelten Methodik herangezogen werden, erläutert.

2.1 Design Research Methodology

Die Design Research Methodology (DRM) von (Blessing und Chakrabarti, 2009) bietet einen umfassenden Rahmen für Forschungsaktivitäten im Bereich der technischen Produktentwicklung. Der Antrieb der Autoren zur Entwicklung dieser Methodik lag in ihrer wachsenden Frustration über das Fehlen einer einheitlichen Terminologie, vergleichbarer Forschungsmethoden und insbesondere einer konsistenten Forschungsmethodik in der Produktentwicklung. Ihr Ziel war es, ein Rahmenwerk zu etablieren, das Forschende in der Produktentwicklung unterstützt ihre Projekte systematisch zu strukturieren und sowohl praktisch umsetzbare als auch theoretisch fundierte Lösungen für Herausforderungen in der Produktentwicklung zu generieren. Abbildung 2-1 zeigt ausgewählte Hilfestellungen, die der Einsatz der DRM bei der Erarbeitung einer methodischen Entwicklungsunterstützung bieten kann. Die DRM wurde als methodische Grundlage gewählt, da sie einen strukturierten Rahmen zur systematischen Erarbeitung von Entwicklungsunterstützungen bietet und insbesondere für Dissertationsprojekte eine wertvolle Hilfestellung ist.



Abbildung 2-1: Hilfestellungen der DRM bei der Erarbeitung einer methodischen Unterstützung

Die DRM ist in vier Hauptphasen gegliedert, die den Forschenden durch den gesamten Prozess leiten, von der Identifikation des Problems bis hin zur Validierung der erarbeiteten Lösungen (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 14 ff.). Hierzu veranschaulicht Abbildung 2-2 unter anderem das grundlegende Prinzip des DRM-Rahmenwerks.

1. *Research Clarification/Klärung des Forschungsziels*: Diese erste Phase zielt darauf ab, den Forschungsgegenstand zu definieren und zu klären sowie ein Verständnis für die Ausgangssituation zu entwickeln. Sie umfasst die Identifikation relevanter Fragestellungen und Probleme und die Festlegung der Forschungsziele. Ein entscheidender Aspekt in dieser Phase ist die Abgrenzung des Forschungsfeldes, um eine fokussierte und handhabbare Untersuchung sicherzustellen.
2. *Descriptive Study I/Deskriptive Studie I*: In dieser Phase wird der Ist-Zustand analysiert. Dabei werden eine umfassende Sammlung und Bewertung existierender Theorien, Modelle, Methoden und empirischer Daten vorgenommen, die zum Verständnis der spezifischen Problemstellung beitragen. Das Ziel besteht darin, Einblicke in vorhandene Praktiken und theoretische Grundlagen zu erhalten, um eine fundierte Basis für die Ausarbeitung neuer Lösungsansätze zu legen. Die Datenerhebung beginnt typischerweise mit einer Recherche in der Fachliteratur und kann, sofern ein Mangel an aussagekräftigen Informationen vorliegt, durch Methoden wie Befragungen ergänzt werden.
3. *Prescriptive Study/Präskriptive Studie*: Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Phase, werden in der präskriptiven Studie neue Artefakte entwickelt. Diese sollen zur Lösung des identifizierten Problems beitragen.
4. *Descriptive Study II/Deskriptive Studie II*: Die letzte Phase dient der Überprüfung und Validierung der entwickelten Lösungen. Ziel ist es hierbei, sowohl die Anwendbarkeit als auch die Nützlichkeit der zuvor entwickelten Unterstützung zu untersuchen. Zu diesem Zweck können beispielsweise empirische Studien, Experimente oder Fallanalysen zur Anwendung kommen.

In der Design Research Methodology (DRM) (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 18 f.) lassen sich sieben unterschiedliche Forschungstypen identifizieren, die je nach Phase in ihrem Umfang variieren. Dies ermöglicht Forschenden, abhängig von den verfügbaren Ressourcen und den zeitlichen Rahmenbedingungen, einen für ihre spezifischen Forschungsziele geeigneten Typ auszuwählen. Die Bearbeitung jeder Phase innerhalb eines Forschungstyps kann auf eine von drei Weisen erfolgen: review-basiert, umfassend oder initial. Hierzu gibt Tabelle 2-1 einen Überblick über die sieben Typen.

Tabelle 2-1: Typen von Forschungsprojekten i.A. an (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 18)

Typ	Klärung Forschungsziel	Deskriptive Studie I	Präskriptive Studie	Deskriptive Studie II
1	Review-basiert	Umfassend		
2	Review-basiert	Umfassend	Initial	
3	Review-basiert	Review-basiert	Umfassend	Initial
4	Review-basiert	Review-basiert	Review-basiert/Initial/Umfassend	Umfassend
5	Review-basiert	Umfassend	Umfassend	Initial
6	Review-basiert	Review-basiert	Umfassend	Umfassend
7	Review-basiert	Umfassend	Umfassend	Umfassend

Review-basierte Studien stützen sich auf die systematische Analyse existierender Literatur, um ein Verständnis für die betrachtete Thematik zu erlangen. Umfassende Studien hingegen erweitern diesen Ansatz durch die Kombination von Literaturanalysen mit eigenständigen Forschungsbeiträgen des Forschenden, etwa durch das Durchführen empirischer Studien oder das Entwickeln und Bewerten einer Entwicklungsunterstützung. Eine initiale Studie bildet schließlich den Abschluss eines Forschungsprojekts. Sie umfasst dabei die ersten Schritte einer bestimmten Phase, um die Auswirkungen der Forschungsergebnisse darzulegen und die Ergebnisse für die Nutzung durch Dritte vorzubereiten. Abbildung 2-2 fasst nochmal kurz die vier Phasen mit den dabei einsetzbaren grundlegenden Mitteln bzw. Methoden und den resultierenden Teilergebnissen der jeweiligen Phase zusammen. Schließlich gilt es zu betonen, dass die DRM nicht als strikter linearer Prozess zu verstehen ist (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 17). Vielmehr stellt sie einen flexiblen Rahmen dar, der iterative Zyklen innerhalb seiner Phasen erlaubt und sogar fördert. Diese Iterationen sollen es den Forschenden ermöglichen, Erkenntnisse, die sie in späteren DRM-Phasen gewinnen, zur Verfeinerung und Anpassung früherer Schritte zu nutzen. Dieser iterative Charakter ist ebenfalls in Abbildung 2-2 verdeutlicht.

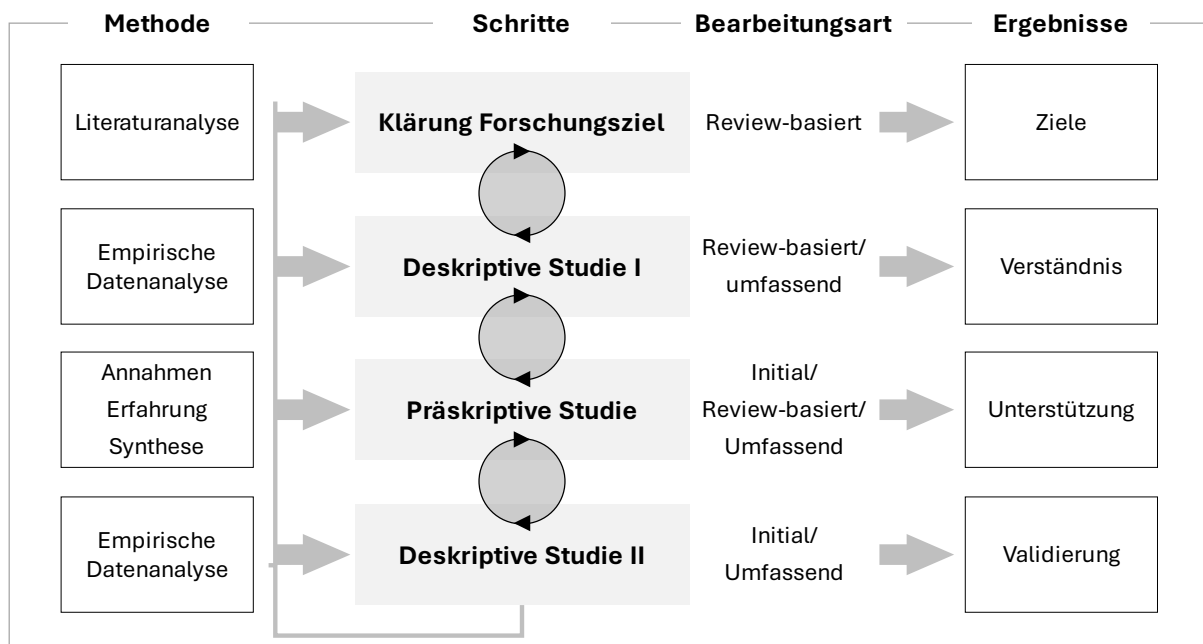


Abbildung 2-2: Das DRM-Rahmenwerk i.A. an (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 15)

2.2 Forschungskonzept

Blessing und Chakrabarti erachten insbesondere die ersten vier Forschungsprojekttypen als gut geeignet für Dissertationen. Viele Promotionsvorhaben zielen jedoch auf die Typen 5 und 6 ab, wobei der erforderliche Zeit- und Ressourcenaufwand häufig unterschätzt wird, sodass diese Projekte meist als Typ 2 oder 3 enden (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 19). Basierend auf dieser Erkenntnis wurde zunächst Typ 3 als realistischer Ausgangspunkt gewählt, der dennoch eine umfassende präskriptive Studie und eine initiale Validierung beinhaltet. Die Analyse ausgewählter Literaturquellen sowie Beobachtungen und Gespräche mit Entwicklern in einem wissenschaftlichen Satellitenentwicklungsprojekt zeigten jedoch auf, dass eine tiefgründigere Untersuchung der Zweckmäßigkeit von MBSE zur Unterstützung der Entwicklung von Satellitenprojekten angebracht ist. Daher wurde entschieden, eine Interviewstudie mit erfahrenen Experten

durchzuführen, um einen Überblick über die Herausforderungen in einem solchen Entwicklungsprojekt zu erhalten und diese Ergebnisse dann mit bereits existierenden Studien zu den Vorteilen von MBSE zu vergleichen. Diese umfassende Betrachtung führte zu einer Anpassung des ursprünglichen Plans: Aus einer anfangs geplanten review-basierten deskriptiven Studie I entwickelte sich eine umfassende deskriptive Studie I. Letztlich orientiert sich das Vorgehen nun an Typ 5, wie in Tabelle 2-1 beschrieben.

Im Rahmen einer initialen Klärung des Forschungsziels wird zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt. Ziel ist es, bestehende MBSE-Methodiken zu analysieren und ein Verständnis für die darin beschriebenen Vorgehensweisen und Mechanismen zu entwickeln. Ergebnisse dieser Recherche sind sowohl dem Stand der Technik in Kapitel 4, als auch (Gadzo *et al.*, 2023) entnehmbar. Darüber hinaus werden Gespräche mit Entwicklern geführt und Beobachtungen in einem wissenschaftlichen Satellitenentwicklungsprojekt gemacht. Das Hauptziel besteht darin, den Forschungsschwerpunkt und das Forschungsfeld zu definieren, einen ersten Überblick über die Forschungsfragen zu gewinnen und den Fokus der Arbeit zu skizzieren. Diese Schritte dienen als Grundlage für tiefgründigere Analysen in der deskriptiven Studie I.

Im Anschluss greift die deskriptive Studie I die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der initialen Klärung des Forschungsziels auf, um anhand dieser eine detaillierte und tiefgründige Untersuchung durchzuführen. Am Ende dieser Phase ist das Ziel der Arbeit klar definiert, die Forschungsfragen sind formuliert, und es sind Kriterien für die Validierung der zu entwickelnden Methodik festgelegt. Zudem wird der Handlungsbedarf für die Entwicklung dieser Unterstützung präzise bestimmt. Die deskriptive Studie I bildet zusammen mit der initialen Klärungsphase die analytische Grundlage der Dissertation. Diese beiden Phasen werden iterativ und nicht nur nacheinander durchlaufen, um die initialen Ergebnisse und Erkenntnisse weiter zu schärfen.

Die bereits im ersten Kapitel beschriebene Interviewstudie zu den Herausforderungen bei der Entwicklung von Kleinsatellitenmissionen wird im Rahmen dieser Phase durchgeführt. Einzelheiten zur Interviewstudie können dem Anhang A-1 entnommen werden. Weiterhin wird eine Literaturrecherche zu Unsicherheiten durchgeführt, mit dem Fokus auf Daten und Informationen und den damit verbundenen relevanten Aspekten. In Kapitel 3.1 erfolgen sowohl eine allgemeine Beschreibung des Begriffs Unsicherheit als auch eine detaillierte Darstellung der verschiedenen Unsicherheitstypen. Basierend auf der Literaturrecherche aus Phase I, welche die MBSE-Methodiken untersucht, den Erkenntnissen aus der Interviewstudie und über Unsicherheiten in Daten und Informationen, ergänzt durch inspirierende Gespräche und Diskussionen mit erfahrenen Wissenschaftlern auf Konferenzen und einem Doktorandenworkshop, wurde der Bedarf für tiefergehende Analysen im Bereich des Einsatzes von Design Thinking im Systems Engineering sowie der Verwendung von Ontologien erkannt. Für beide Themenbereiche wird eine systematische Literaturrecherche durchgeführt, die methodisch an das Vorgehen von (Machi und McEvoy, 2016) angelehnt ist. Für die Untersuchung des Einsatzes von Design Thinking im MBSE wurden die in (Michalides *et al.*, 2023; Nicklas *et al.*, 2023) angewendeten Vorgehen als Orientierungsgrundlage für das Auswahlverfahren herangezogen. Hierzu kommt eine Suchmatrix zum Einsatz, die sich in entsprechende Suchbegriffe umwandeln lässt und in die Scopus-Datenbank eingeht. Die verwendete Suchmatrix ist in Abbildung 2-3 dargestellt. Der Fokus liegt dabei auf den Ingenieurwissenschaften und der Informatik. Die Einbeziehung von Literatur aus der Informatik vermeidet eine vorzeitige Einschränkung des Suchbereichs und dient damit der Vollständigkeit der Literaturrecherche. Die Suche identifiziert insgesamt 264 Artikel, die ein mehrstufiges Verfahren hinsichtlich ihrer inhaltlichen Relevanz durchlaufen. Als relevant gelten Artikel, die einen der folgenden

Bereiche abdecken: Grundlagen des Design Thinking, Methoden des Design Thinking, Integration von Design Thinking in Systems Engineering und MBSE, Kombination von Design Thinking und Systems Thinking sowie den Einsatz von Design Thinking zur Problemlösung. Die erste Auswahlphase überprüft Themen, Schlüsselwörter und Abstracts. Die zweite Phase fokussiert auf Forschungsfragen, Schlussfolgerungen und Lösungsbeschreibungen. Der finale Schritt umfasst einen detaillierten Review der Quellen, ergänzt durch eine rekursive Quellensuche. Dies führt zur Identifizierung von 48 relevanten Arbeiten. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung eines Modells zur Integration von Design Thinking und MBSE und sind im Stand der Technik ausführlich beschrieben sowie unter anderem in (Gadzo et al., 2024) dokumentiert.

ODER	UND		
	Design Thinking	support	MBSE
		enhance	Model-based Systems Engineering
		improve	Systems Engineering
		and	Modelling
		in	

Abbildung 2-3: Suchmatrix für die Literaturrecherche zu Design Thinking und MBSE

Bei der Literaturrecherche zu Ontologien wurden die Arbeiten von (Yang et al., 2019) und (Qaswar et al., 2023) als Inspirationsquellen für die Entwicklung eines Auswahlverfahrens konsultiert, da sich beide Studien ebenfalls einer systematischen Literaturrecherche zum Thema Ontologien widmen. Die Suchmatrix, die in Abbildung 2-4 dargestellt ist, beschreibt die Schlüsselbegriffe der Suchlogik. Diese Matrix lässt sich analog zur Design Thinking Recherche in einen Suchbegriff übersetzen und auf die Scopus-Datenbank anwenden. Die Literaturrecherche beschränkt sich auf die Bereiche Informatik, Ingenieurwissenschaften sowie Erd- und Planetenwissenschaften. Hinsichtlich des Veröffentlichungsdatums erfolgen keine Einschränkungen. Die Suche ermittelt 674 Artikel, die ebenfalls ein mehrstufiges Auswahlverfahren zur Relevanzprüfung für die Forschungsfragen durchlaufen (siehe Abbildung 2-5). Als relevant gelten Artikel, die sich auf eines der folgenden Themengebiete beziehen, wobei Mehrfachzuordnungen möglich sind:

- Beschreibung einer domänenspezifischen Ontologie
- Beschreibung einer domänenübergreifenden Ontologie
- Beschreibung der Verwendung einer Ontologie/von Ontologien
- Beschreibung eines Verfahrens zur Ontologie-Erstellung
- Beschreibung eines Werkzeugs oder Hilfsmittels für die Ontologieentwicklung
- Beschreibung der relevanten Mechanismen für die Ontologieentwicklung
- Beschreibung der Grundlagen der Ontologie

ODER	UND	
	Ontology	satellites
		satellite missions
		satellite development

Abbildung 2-4: Suchmatrix für die Literaturrecherche zu Ontologien in der Satellitendomäne

Im letzten Schritt des Auswahlprozesses wird auch diese Literaturrecherche durch eine Tiefenrecherche ergänzt, bei der die Quellen rekursiv verfolgt werden. Nach dieser Erweiterung des Quellenpools werden 72 Literaturquellen identifiziert, die alle detailliert ausgewertet werden. Die Rechercheergebnisse, die sowohl im Stand der Technik als auch in (Gadzo und Koch, 2025) dokumentiert sind, gliedern sich in drei Hauptkategorien. Die erste Kategorie zielt darauf ab, ein Verständnis für den Begriff 'Ontologien' sowie die dahinterstehenden Mechanismen zu entwickeln, um ein Grundverständnis für die Entwicklung einer Ontologie zu schaffen. Die zweite Kategorie dient der Examinierung bestehender ontologischer Konzepte im Bereich der Satellitenentwicklungsprojekte. Die dritte und letzte Kategorie umfasst Quellen, die bei der Ermittlung einer geeigneten Methode zur Entwicklung einer anwendungsspezifischen Ontologie unterstützen.

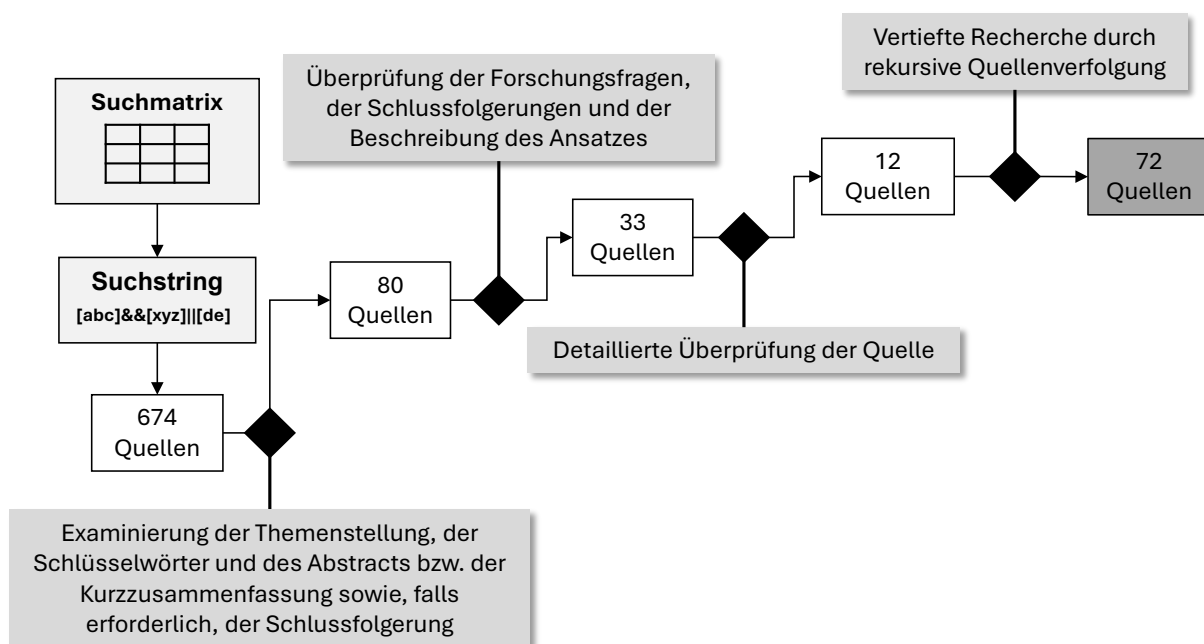


Abbildung 2-5: Prozess der Literatursuche i.A. an (Gadzo und Koch, 2025)

Basierend auf der analytischen Grundlage, die in den ersten beiden Phasen erarbeitet wurde, wird in der präskriptiven Studie eine Methodik für den prozessbegleitenden Aufbau und die Pflege ganzheitlicher Systemmodelle entwickelt. Diese Systemmodelle sollen die Weiterentwicklung von Daten und Informationen im Entwicklungsprozess von Satellitenprojekten unterstützen, indem Unsicherheiten in Daten und Informationen identifiziert und reduziert werden. Die Methodik setzt sich aus drei Kernkomponenten bzw. drei Kernelementen zusammen und repräsentiert den Syntheseschritt der Arbeit. Die entwickelte Unterstützung ist in der Lage, die Forschungsfragen zu beantworten und somit die Zielsetzung der Arbeit zu erfüllen. Zur Beschreibung der Methodik wird auf (Gericke *et al.*, 2022) als Basis zurückgegriffen. Eine prinzipielle Darstellung der Beschreibung der Methodik, basierend auf (Gericke *et al.*, 2017, S. 107), ist in Abbildung 2-6 zu sehen. Detaillierte Ausführungen folgen in Kapitel 5. Die erste Kernkomponente der Methodik ist ein Modell zur Integration von MBSE und Design Thinking. Die zweite Kernkomponente umfasst Analysemethoden zur Untersuchung von dokumentenbasierten Daten und Informationen in einer modellbasierten Umgebung. Das dritte Element bildet eine anwendungsspezifische Ontologie. Diese Sachverhalte werden prägnant in Abbildung 2-7 veranschaulicht.

Die Entwicklung von Analysemethoden ist eng mit der Beantwortung der ersten Forschungsfrage verbunden, da diese Methoden die systematische Identifikation von Unsicherheiten ermöglichen und somit zur Lösung dieser Frage beitragen. Der Fokus liegt auf der Analyse von Kontext, Anforderungen, Verhalten, Struktur und funktionalen Aspekten. Diese fünf Methoden werden in Kapitel 5 detailliert beschrieben. Da Methoden als eine Formalisierung des durch technische Praxis erlangten Wissens betrachtet werden können (Gericke *et al.*, 2022, S. 7), sind sie auch in der Lage, die Wissensgenerierung zu unterstützen und somit maßgeblich zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage beizutragen.

Die Entwicklung einer Ontologie spielt eine bedeutende Rolle bei der Beantwortung der ersten und dritten Forschungsfrage. Sie ermöglicht eine strukturierte Informationsrepräsentation und die explizite Beschreibung des untersuchten Gegenstandsbereichs der Satellitenentwicklung, was besonders die dritte Forschungsfrage betrifft. Zur Unterstützung eines systematischen Modellaufbaus wird eine Elementbibliothek eingesetzt, die auf der Grundlage der Ontologie definiert wird. Dies leistet einen weiteren wesentlichen Beitrag zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage.

Die Entwicklung eines Vorgehensmodells, das Design Thinking und MBSE integriert, trägt im Wesentlichen zur Lösung der zweiten Forschungsfrage bei. Dieses Modell fördert kreative und schöpferische Aspekte durch den Einsatz von Design Thinking und integriert das zur Identifikation von Unsicherheiten erstellte Systemmodell. Zudem werden verschiedene Rollen definiert, die entsprechend im Modell und dem beschriebenen Vorgehen partizipieren.

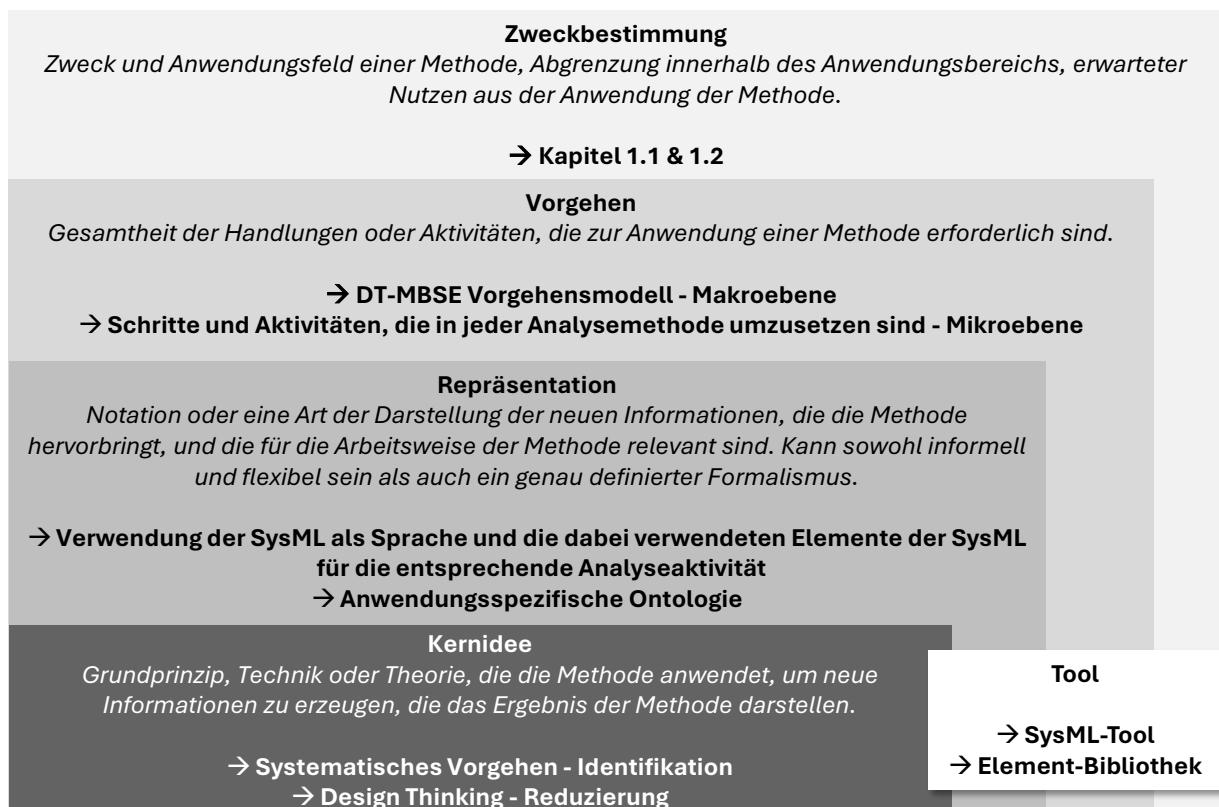


Abbildung 2-6: Elemente der Methodik, i.A. an (Gericke *et al.*, 2017, S. 107)

In der deskriptiven Studie II wird die Methodik initial validiert, entsprechend dem Vorschlag von (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 18) für Typ 5 Forschungsprojekte. Dazu ist laut (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 195) ein Hinweis auf die Anwendbarkeit, Nutzbarkeit und den Nutzen der entwickelten Unterstützung zu erbringen. Weiterhin bedarf es an Anhaltspunkten und Hinweisen auf die Fragestellungen, die einer detaillierten Bewertung bedürfen und eines Vorschlages für einen geeigneten Bewertungsplan. Laut (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 195) ist eine initiale deskriptive Studie II, die sich auf die Anwendungsvalidierung fokussiert, dafür am geeignetsten. Die Verbindung zu messbaren Erfolgskriterien wie der Nützlichkeit kann anschließend anhand der Literatur dargelegt werden. Ein weiterer wertvoller Standpunkt wird in (Kroll und Weisbrod, 2020, S. 109 f.) beschrieben und in (Gericke *et al.*, 2022, S. 15) erwähnt: Methoden sollten hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit, also der Leichtigkeit ihrer Anwendung, der Vermittlung des Verständnisses und der Vorgehenskonformität, sowie ihrer Wirksamkeit bewertet werden. Die spezifischen Bewertungskriterien sollten dabei vom jeweiligen Zweck der Methoden abhängen.

Die initiale Validierung der entwickelten Methodik erfolgt in dieser Arbeit anhand eines Subsystems eines wissenschaftlichen Satellitenentwicklungsprojekts. Dieses Subsystem verkörpert eines der zahlreichen Experimente, die für die geplante wissenschaftliche Mission vorgesehen sind. Für die Validierung werden existierende, dokumentenbasierte Daten und Informationen aus verschiedenen Quellen genutzt. Eine detaillierte Darstellung des Entwicklungsprojekts und des spezifischen Subsystems, das für die Validierung herangezogen wird, ist in Kapitel 6 zu finden.

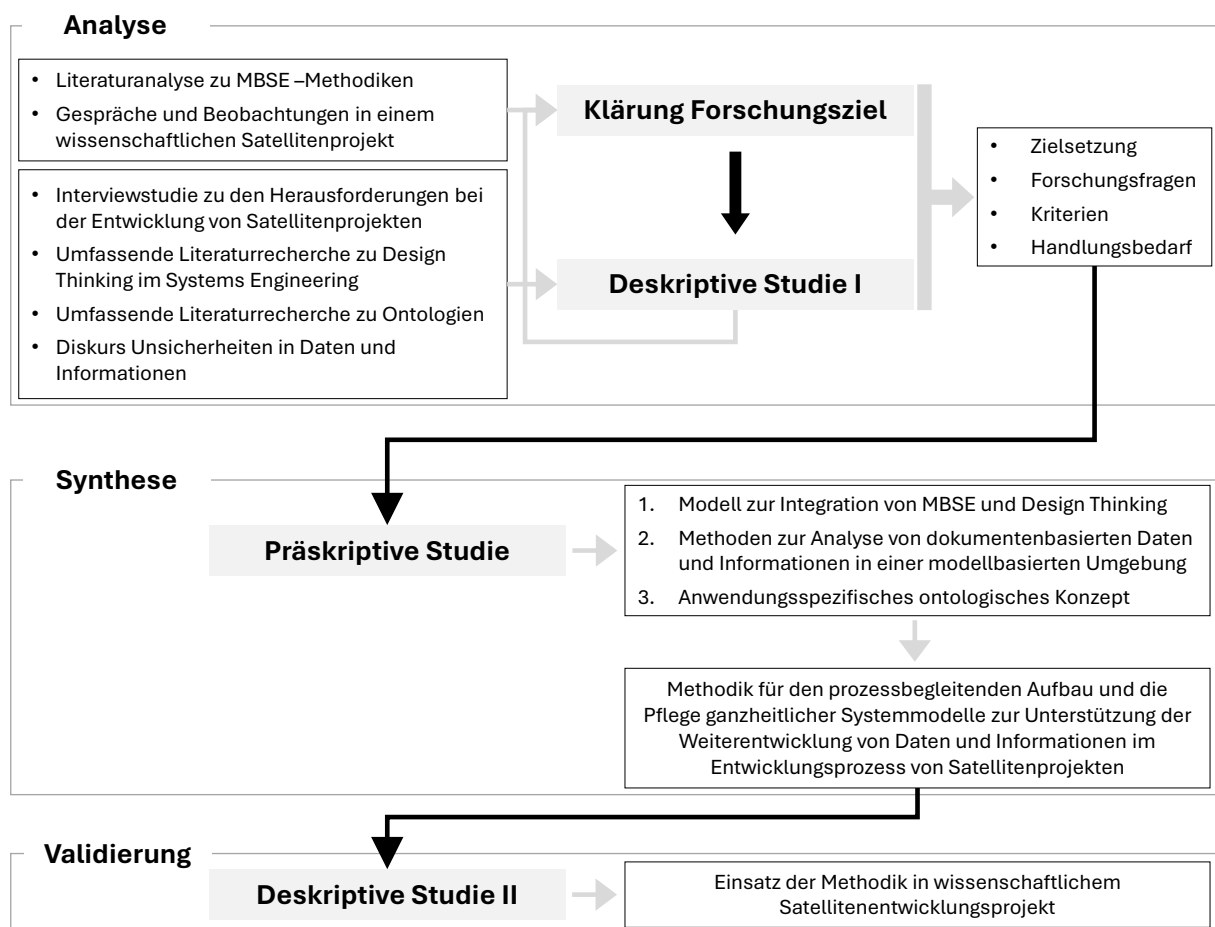


Abbildung 2-7: Übersicht Forschungskonzept

2.3 Definition der Kriterien zur Validierung der Methodik

Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, spielen die Anwendbarkeit, Einfachheit und Wirksamkeit eine wichtige Rolle bei der Entwicklung und Validierung von Methoden (Kroll und Weisbrod, 2020; Gericke *et al.*, 2022), weshalb diese Aspekte bei der Definition der Kriterien berücksichtigt werden. Des Weiteren wird der Aspekt der Nützlichkeit betrachtet, da dies ein relevanter Bestandteil der deskriptiven Studie II ist (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 16). Basierend auf den Erkenntnissen von (Daalhuizen und Cash, 2021) stellen (Cash *et al.*, 2023, S. 4) dar, dass drei Faktoren die Leistungsfähigkeit einer Methode negativ beeinflussen: unvollständige Informationen zum Inhalt, Inkonsistenzen zwischen den Elementen sowie Konflikte zwischen dem Inhalt und dem Nutzungskontext. Diese Einschätzung gründet sich auf der Definition der vier Schlüsseleigenschaften, die von den Autoren als wesentliche Bestandteile guter methodischer Inhalte angesehen werden (Daalhuizen und Cash, 2021, S. 12). Erstens ist es erforderlich, dass die wesentlichen Inhaltselemente einer Methode logisch, vollständig, konsistent und eindeutig beschrieben und somit klar verständlich sind (Nr.1: Definiert). Zweitens muss die Struktur der Methode verständlich und vorhersehbar sein (Nr.2: Vorhersehbar), zugleich dem Entwickler zugänglich und leicht zu verstehen sein (Nr.3: Benutzbar). Schließlich sollte das Ergebnis der Interaktion mit der Methode wertvoll sein (Nr.4: Wünschenswert). Zusammenfassend werden damit die folgenden sieben Aspekte für die Definition der in Abbildung 2-8 dokumentierten Kriterien zugrunde gelegt: Anwendbarkeit, Einfachheit, Konsistenz, Nutzen, Verständlichkeit, Vollständigkeit und Wirksamkeit. Diese decken die wesentlichen Dimensionen zur Bewertung einer Methodik ab.

<i>Übertragbarkeit von Daten und Informationen in eine modellbasierte Umgebung</i>
K1: Für die Übertragung dokumentenbasierter Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojekts aus verschiedenen Quellen in eine modellbasierte Umgebung stehen alle notwendigen methodischen und repräsentativen Elemente zur Verfügung. → Anwendbarkeit und Vollständigkeit
<i>Identifikation von Unsicherheiten in Daten und Informationen</i>
K2: Es stehen alle notwendigen vorgehentechnischen und repräsentativen Elemente zur Verfügung, um ein systematisches Vorgehen bei der Modellbildung zu gewährleisten. → Anwendbarkeit und Vollständigkeit
K3: Es werden durch den Einsatz der Methodik Unsicherheiten in Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojektes identifiziert. → Wirksamkeit
<i>Reduktion von Unsicherheiten in Daten und Informationen</i>
K4: Der Einsatz der Methodik ermöglicht die Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojektes. → Wirksamkeit
<i>Unterstützung der Wissensgenerierung</i>
K5: Die Methodik unterstützt die Wissensgenerierung im Entwicklungsprojekt. → Wirksamkeit
<i>Einfache und korrekte Umsetzung des beschriebenen Vorgehens</i>
K6: Die Methodik ist in Hinblick auf eine einfache und korrekte Verfahrensbefolgung in einem realen Anwendungsfall der Satellitenentwicklungsdomäne einsetzbar. → Einfachheit und Verständlichkeit
<i>Konsistenz</i>
K7: Es besteht eine konsistente Terminologie in der Methodik und ihren Elementen.
<i>Nützlichkeit</i>
K8: Die Methodik erfüllt ihren Zweck.

Abbildung 2-8: Kriterien für die Entwicklung und Validierung der Methodik

2.4 Schlussfolgerungen zum Forschungsvorgehen

In Anlehnung an (Mehlstäubl, 2023, S. 64 f.) wird hier eine kurze Einordnung der Arbeit in das 'DSR Knowledge Contribution Framework' bzw. das DSR-Wissensbeitragsrahmenwerk von (Gregor und Hevner, 2013) vorgenommen. Design Science Research – kurz DSR – stellt dabei ein Forschungsparadigma dar, dessen Ziel es ist, den Entwickler bei der Schaffung neuer Artefakte methodisch zu unterstützen. Er soll in die Lage versetzt werden, durch das von ihm geschaffene Artefakt Antworten auf relevante menschliche Probleme zu finden und somit neues Wissen zum wissenschaftlichen Erkenntniskorpus beizutragen (Hevner und Chatterjee, 2010, S. 5). Die Autoren legen weiterhin folgendes Grundprinzip der DSR fest: Die Erschaffung und die Anwendung eines Artefaktes führen dazu, dass Wissen und Verständnis bezüglich einer entwicklungstechnischen Problemstellung und ihrer Lösung erworben werden kann (Hevner und Chatterjee, 2010, S. 5).

(Hevner und Chatterjee, 2010, S. 3) erachten die Stokes Matrix grundsätzlich als nützliches Instrument zur Analyse der wissenschaftlichen Entwicklung. Sie wurde 1997 von Donald Stokes eingeführt (Stokes, 1997, S. 73) und ist eine 2x2 Matrix. Die vertikale Achse der Matrix zeigt dabei, wie grundlegend das Artefakt und der damit verbundene Wissensgewinn ist, während die horizontale Achse den praktischen Nutzen der Errungenschaft darstellt. Abbildung 2-9 illustriert diese Matrix mit ihren Quadranten anschaulich.

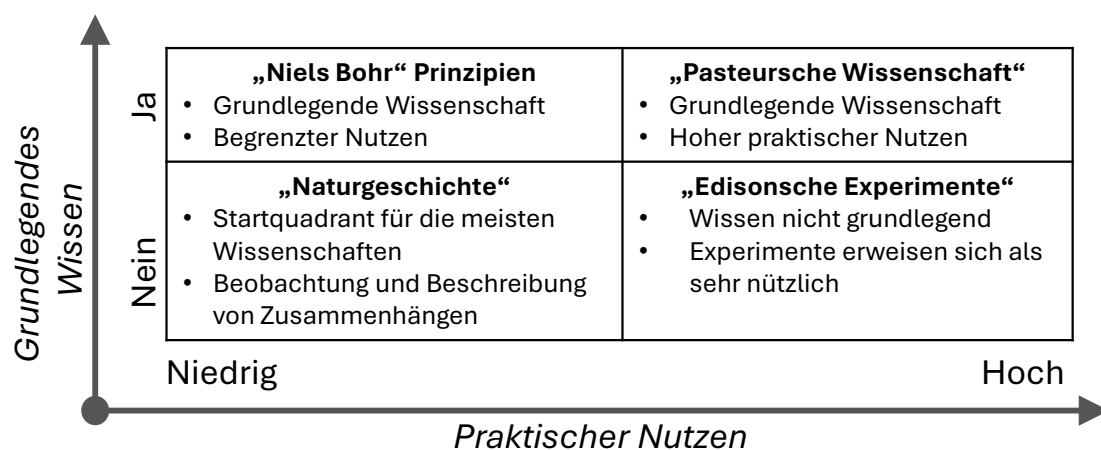


Abbildung 2-9: Stokes Matrix i. A. an die Darstellung aus (Hevner und Chatterjee, 2010, S. 3)

(Gregor und Hevner, 2013, S. 345) erkennen den intuitiven Charakter der Stokes Matrix an, sehen jedoch die Herausforderung darin, die Positionierung eines vorgeschlagenen Projekts innerhalb der Matrix im Voraus zu bestimmen. Das DSR Knowledge Contribution Framework hingegen lenkt die Aufmerksamkeit auf die Ausgangspunkte des Wissens (zum Beispiel Reifegrade) eines Forschungsprojekts, um ein klareres Verständnis der Projektziele und der anzustrebenden neuen Beiträge zu erleichtern. Es fokussiert auf zwei Dimensionen, die auf dem aktuellen Stand des Wissens in den Bereichen des Problems und der Lösung für den untersuchten Forschungsaspekt basieren und ist wie die Stokes Matrix in einer 2x2 Matrix darstellbar. In Abbildung 2-10 ist das DSR Knowledge Contribution Framework und seine Quadranten dargestellt.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik ist als Teil der Forschung in der Produktentwicklung zu betrachten. Sie unterstützt den aufgabenspezifischen Einsatz von Modellbasiertem Systems Engineering bei der Entwicklung von Satellitenprojekten und setzt den Fokus auf die Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen. Damit wird die

bekannte Problemstellung der Nutzung von modellbasiertem Systems Engineering zur Bewältigung von Herausforderungen in der Produktentwicklung durch den Einsatz einer neuartigen Methodik angegangen, die aufgabenspezifisch ausgerichtet ist und Design Thinking zur Förderung schöpferischer Aspekte nutzt und eine anwendungsspezifische neuartige Ontologie verwendet. Das entwickelte Artefakt ist damit im DSR Knowledge Contribution Framework im oberen linken Quadranten zu verorten, womit die Arbeit eine Verbesserung darstellt, und eine Forschungsmöglichkeit darstellt.

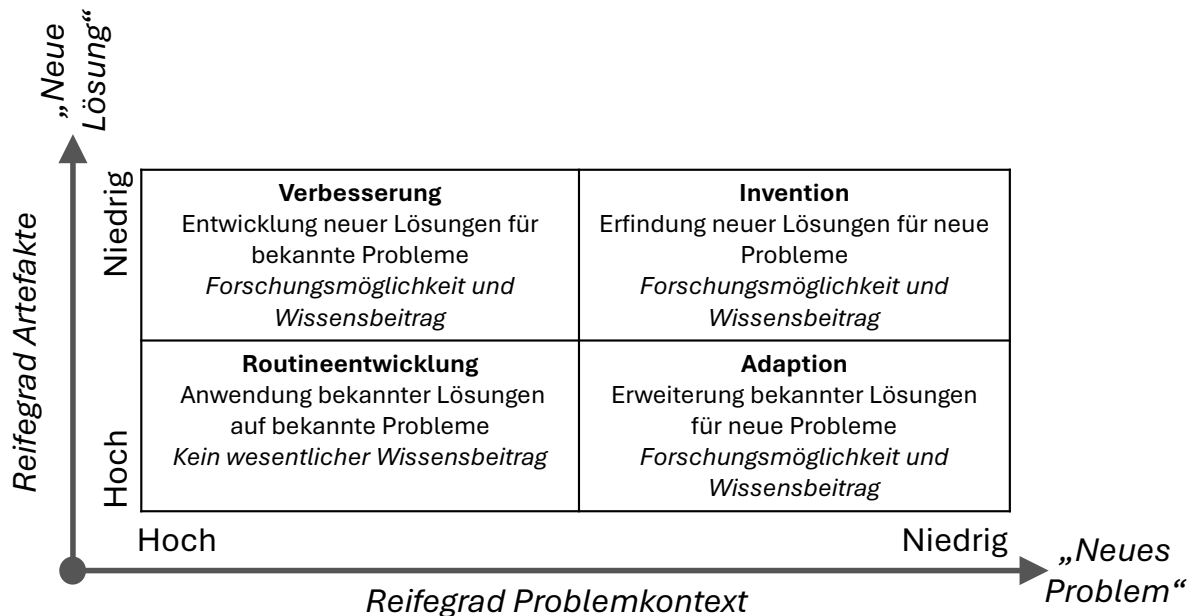


Abbildung 2-10: DSR Knowledge Contribution Framework i.A. an (Gregor und Hevner, 2013, S. 345)

3 Begriffliche Grundlagen

„Der größte Feind des Wissens ist nicht Unwissenheit, sondern die Illusion von Wissen.“
(Stephen Hawking)

Das folgende Kapitel widmet sich den theoretischen und begriffsbezogenen Grundlagen, die für das Verständnis und die methodische Anwendung von modellbasiertem Systems Engineering (MBSE) und Design Thinking relevant sind. Zusätzlich werden die Grundprinzipien von Ontologien erörtert und ein grundlegendes Verständnis über Unsicherheiten, insbesondere im Kontext von Daten und Informationen, vermittelt. Dieses Kapitel dient als Fundament für das Verständnis bisheriger Betrachtungen auf den genannten Feldern und bereitet den Boden für die Entwicklung einer Methodik, die die Unterstützung von Satellitenprojekten verbessern soll.

3.1 Unsicherheiten

Unsicherheit ist ein vielschichtiges Konzept, das in vielen wissenschaftlichen und praktischen Bereichen eine zentrale Rolle spielt. Historisch gesehen hat Unsicherheit die Denkweisen in Disziplinen wie der Ökonomie, Ingenieurwissenschaften und Entscheidungstheorie maßgeblich geprägt (Thunnissen, 2003, S. 1). Der Begriff kann folglich auch auf viele unterschiedliche Arten verwendet werden (De Weck *et al.*, 2007, S. 2), womit sich Unsicherheiten abhängig vom Betrachtungspunkt oder dem spezifischen Kontext, in dem sie analysiert werden, ebenfalls auf verschiedene Weisen klassifizieren lassen. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein komprimierter Ausschnitt dieses weitläufigen wissenschaftlichen Feldes vorgestellt. Es werden zunächst unterschiedliche Definitionen und Perspektiven auf den Begriff Unsicherheit beschrieben, wie sie in der Literatur zu finden sind. Anschließend werden ausgewählte Klassifikationsansätze prägnant erläutert. Ziel ist es, eine Wissensbasis für die Betrachtung von Unsicherheiten im Kontext dieser Arbeit zu schaffen, ohne dabei einen umfassenden Diskurs über Unsicherheiten zu beanspruchen.

Schon früh wurde die Notwendigkeit der Konzeptualisierung von Unsicherheiten erkannt. (Knight, 1921) befasste sich in seinem Werk mit den Konzepten von Risiko, Unsicherheit und Profit im Kontext der Wirtschaftstheorie und der industriellen Organisation. Er untersuchte auch die Auswirkungen von Unsicherheit auf wirtschaftliches Verhalten und die Rolle von Wissen bei der Entscheidungsfindung. Hierbei definierte (Knight, 1921, S. 199) Unsicherheit als das Fehlen vollständiger und perfekter Informationen über ein zukünftiges Ereignis. Diese Definition impliziert, dass Individuen auf der Basis von Teilwissen Meinungen und Urteile mit unterschiedlichem Grad an Fundiertheit und Wert bilden. Laut dem Autor ist Unsicherheit weder durch völlige Unkenntnis noch durch vollständiges Wissen gekennzeichnet, sondern durch ein partielles Verständnis und die Notwendigkeit, Entscheidungen angesichts begrenzter Informationen zu treffen.

(Duncan, 1972, S. 318) griff in seiner Arbeit Knights Definition von Unsicherheit als Ausgangspunkt auf und verfeinerte sie weiter, indem er in einer Umfrage achtzehn Personen bat, den Begriff Unsicherheit zu definieren. Als Ergebnis dieser Umfrage konnte er drei Hauptkomponenten des Begriffs Unsicherheit identifizieren und zusammenfassen:

1. Mangel an Informationen über Umweltfaktoren und deren Einfluss, die mit einer bestimmten Entscheidungssituation verbunden sind.
2. Unkenntnis über die Tragweite einer Entscheidung.

3. Unfähigkeit, Wahrscheinlichkeiten mit einem gewissen Grad an Sicherheit zuzuordnen. Wie wirken sich die Umweltfaktoren auf den Erfolg oder Misserfolg der Entscheidungseinheit bei der Erfüllung ihrer Aufgabe aus?

Um eine grundlegende Erklärung des Begriffs zu liefern und eine allgemeine Definition zu formulieren, die über disziplinäre Grenzen hinausgeht und als taxonomische Grundlage in verschiedenen Bereichen verwendet werden kann, beschreibt (Thunnissen, 2003, S. 2) Unsicherheit als Anfälligkeit für Zufälle oder Unfälle, als Mehrdeutigkeit, als Mangel an Gewissheit sowie als etwas, das unbekannt oder unerkennbar bleibt.

(De Weck *et al.*, 2007, S. 1) wiederum verstehen Unsicherheit als ein schwer fassbares Konzept, das einerseits das Potenzial für fehlerhafte Annahmen während der Entwicklung und andererseits das Vorhandensein unbekannter Faktoren umfasst, deren Einfluss auf den künftigen Erfolg eines Produkts absehbar ist. Die Autoren verbinden mit Unsicherheit sowohl positive als auch negative Auswirkungen. Einerseits kann sie den Markterfolg eines Produkts beeinträchtigen und Herausforderungen bei Anpassungen für zukünftige Produktgenerationen mit sich bringen. Andererseits kann sie auch Innovationen fördern und zur Optimierung von Funktionen beitragen.

Diese Sichtweise, dass Unsicherheiten nicht ausschließlich etwas Negatives darstellen, dass abgeschwächt und reduziert werden sollte, teilen auch (McManus und Hastings, 2005, S. 1). Die beiden Autoren sehen in robusten, vielseitigen und flexiblen Systemen, die Fähigkeit, Unsicherheiten nicht nur abzuschwächen, sondern auch einen zusätzlichen Nutzen für die Benutzer dieser Systeme zu schaffen. Sie definieren Unsicherheiten als Phänomene, die entweder unbekannt sind oder nur ungenau bekannt sind, und deren vielfältige Ursachen unterschiedlicher Natur sein können (McManus und Hastings, 2005, S. 2). Diese können beispielsweise bei statistischen Verfahren Merkmale der Grundgesamtheit umfassen oder Aspekte des Entwurfsprozesses einschließen, wie beispielsweise noch nicht gesammelte Informationen. Viele Unsicherheiten lassen sich messen, einige jedoch nicht, wie beispielsweise zukünftige Ereignisse. Schließlich beschreiben die beiden Autoren Unsicherheiten als wertneutral und daher eben nicht zwangsläufig negativ, sondern sowohl als Ursache von Risiken, aber auch von Chancen, wobei sie Risiken und Chancen wie folgt quantifizieren (McManus und Hastings, 2005, S. 5):

- Risiko = (Wahrscheinlichkeit eines Problems) x (Schwere eines Problems)
- Chance = (Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses) x (Wert eines Ereignisses)

Ein Problem stellt dabei eine unerwünschte Lösung einer Unsicherheit dar. Im Falle einer Chance wird eine Unsicherheit im Rahmen eines Ereignisses auf eine vorteilhafte Weise gelöst.

Schließlich nutzt (Milliken, 1987, S. 136) eine sehr prägnante Definition des Begriffes Unsicherheit in seiner Arbeit. Er sieht Unsicherheit als die von einem Individuum wahrgenommene Unfähigkeit, präzise Vorhersagen zu treffen (Milliken, 1987, S. 136) oder wenn ein Individuum Schwierigkeiten hat, relevante von irrelevanten Daten zu unterscheiden (Gifford *et al.*, 1979, S. 460 f.).

Allen sechs Definitionen und Sichtweisen auf den Begriff der Unsicherheit ist gemein, dass sie Unbekanntheit und Ungewissheit vor allem im Hinblick auf zukünftige Ereignisse oder Zustände mit diesem Begriff in Verbindung bringen.

(Dym *et al.*, 2005, S. 106) formulieren einen weniger abstrakten Gedankengang in Bezug auf Unsicherheit, indem die Autoren sie als Resultat unvollkommener Modelle, unvollständiger Informationen und oft auch unklarer Zielsetzungen in der technischen Planung beschreiben, die sich erheblich auf die Gestaltung neuartiger Produkte und Systeme auswirken können. (Pendzik *et al.*,

2023, S. 2168) betrachten Entwicklungsprozesse als grundsätzlich von Unsicherheit geprägt. Diese Unsicherheit ergibt sich insbesondere daraus, dass Entwicklungsteams oft simultan an verschiedenen, zielgerichteten Artefakten arbeiten, um Entwicklungszeiten einzuhalten, die schließlich zu einer vorteilhaften Gesamtlösung zusammengefügt werden müssen (Paetzold, 2022, S. 202). Ein weiterer Aspekt ist laut (Paetzold, 2022, S. 202) die interdisziplinäre Zusammensetzung der Teams, deren Fachwissen aus unterschiedlichen Domänen stammt und dementsprechend mit einer hohen Arbeitsteilung einhergeht. Diese Arbeitsteilung führt zu zahlreichen Schnittstellen im Entwicklungsprozess, an denen Informationen und Daten übertragen und genutzt werden müssen. Bei der Gestaltung dieser Schnittstellen sind die Interdependenzen zwischen den Aufgaben der Teams zu berücksichtigen, wobei die Verfügbarkeit von Informationen oft von Unsicherheit geprägt ist. (Gifford *et al.*, 1979, S. 460) beobachtet in diesem Kontext eine deutliche inverse Korrelation zwischen Unsicherheit und verfügbarer Information. Aufbauend auf diesen Beobachtungen beschreibt die Konzeptualisierung von (Paetzold, 2022) Unsicherheiten als Diskrepanzen, Lücken, Inkonsistenzen und Unvollständigkeiten innerhalb von Daten und Informationen sowie deren entsprechenden Flüssen.

In seiner Klassifikation von Unsicherheiten differenziert (Milliken, 1987, S. 136 ff.) zwischen drei Arten wahrgenommener Unsicherheit: Zustandsunsicherheit, Unsicherheit über die resultierenden Auswirkungen und Unsicherheit bezüglich der Reaktionen. Zustandsunsicherheit bezieht sich auf das unvollständige Verständnis des aktuellen Zustands und potenzieller Veränderungen in der umgebenden Umwelt. Entscheidungsträger erkennen hierbei oft nicht die Wahrscheinlichkeit oder Art möglicher Veränderungen im Kontext. Unsicherheit über resultierende Auswirkungen beschreibt wiederum die Herausforderung, die Folgen von Ereignissen oder Veränderungen im umgebenden Kontext für eine Organisation vorherzusagen. Diese Form der Unsicherheit, auch als Wirkungsunsicherheit bezeichnet, manifestiert sich in der Unfähigkeit, die spezifischen Auswirkungen zukünftiger Zustände oder Veränderungen im umgebenden Kontext auf die Organisation zu prognostizieren. Die dritte Art wahrgenommener Unsicherheit besteht in der unzureichenden Kenntnis über verfügbare Reaktionsmöglichkeiten sowie der Unfähigkeit, die wahrscheinlichen Auswirkungen einer gewählten Reaktion vorherzusagen.

(Schrader *et al.*, 1993) beschreiben in ihrem Werk über technische Problemstellungen unter Unsicherheit und Mehrdeutigkeit eine alternative Methode zur Klassifikation von Unsicherheit. Sie führen die Unsicherheits-/Ambiguitäts-Matrix ein, die als strukturierter Rahmen dient, um verschiedene Ebenen von Unsicherheit und Mehrdeutigkeit bei der Lösung technischer Probleme zu verstehen und zu visualisieren. In dieser Matrix bezieht sich 'Unsicherheit' auf Situationen, in denen der Problemlöser unsicher über die genauen Merkmale oder Werte, der am Problem beteiligten Variablen ist. 'Mehrdeutigkeit' entsteht, wenn Unzufriedenheit hinsichtlich des Verständnisses der Problemstruktur und des Lösungsprozesses vorliegt und damit relevante Variablen und Beziehungen unbekannt sind. (Schrader *et al.*, 1993, S. 80) führen die zweidimensionale Natur der Matrix darauf zurück, dass Mehrdeutigkeit und Unsicherheit unterschiedliche Konzepte mit verschiedenen Dimensionen darstellen. Um diese zu reduzieren, müssen im Problemlösungsprozess unterschiedliche Aspekte berücksichtigt werden: Für die Reduktion von Mehrdeutigkeit ist es notwendig, relevante Variablen und Parameter zu bestimmen, während bei der Unsicherheitsreduktion die genauen Werte dieser Variablen festgelegt werden müssen. Entsprechend kann laut (Schrader *et al.*, 1993, S. 80) eine Problemstellung sowohl einen hohen Grad an Mehrdeutigkeit als auch einen niedrigen Grad an Unsicherheit aufweisen, oder umgekehrt. Abbildung 3-1 illustriert die verschiedenen Kombinationen von Unsicherheit und Mehrdeutigkeit. Da keine

Gewissheit über die Werte von Variablen möglich ist, ohne die relevanten Variablen zu kennen, existiert die Kombination aus geringer Unsicherheit und Mehrdeutigkeit der Stufe 2 nicht.

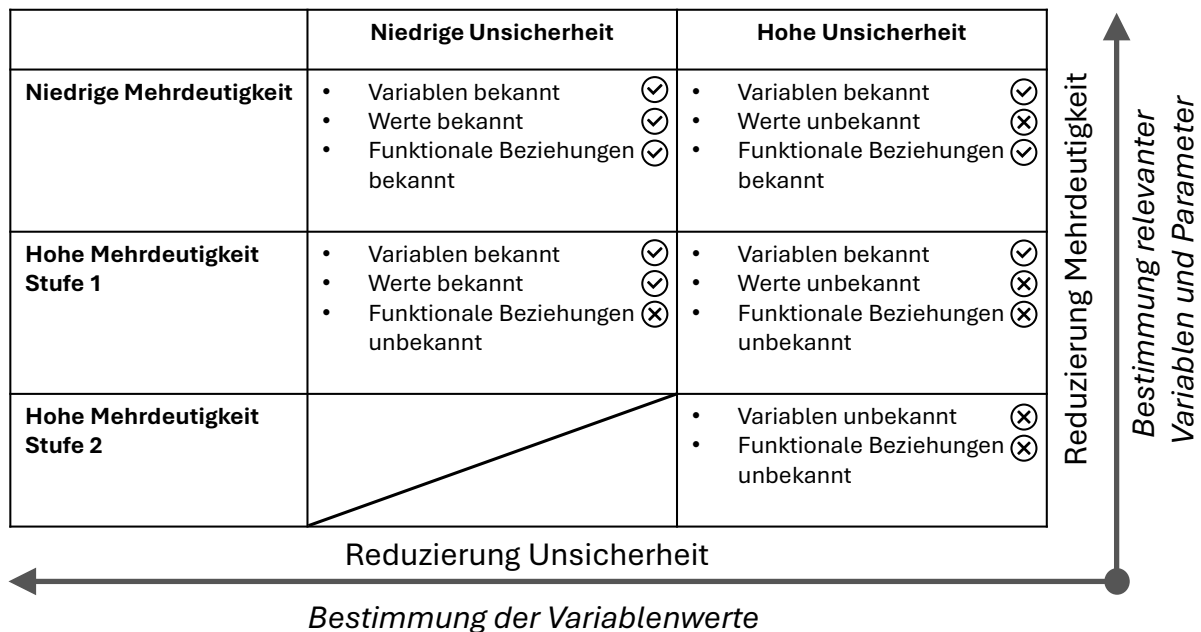


Abbildung 3-1: Unsicherheits-/Mehrdeutigkeitsmatrix i.A. an (Schrader et al., 1993, S. 81)

Im ersten Teil seiner Arbeit über die Klassifikation von Unsicherheit für den Entwurf und die Entwicklung komplexer Systeme erörtert (Thunnissen, 2003) Definitionen und Klassifizierungen von Unsicherheiten, die aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen stammen, darunter die Sozialwissenschaften, Naturwissenschaften und Ingenieurwissenschaften. Er stellt fest, dass die verschiedenen Klassifizierungsansätze sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede in den Definitionen von Unsicherheit aufweisen. Besonders im Ingenieurwesen, vor allem bei der Entwicklung komplexer Systeme, identifiziert (Thunnissen, 2003, S. 15) die Notwendigkeit eines Klassifizierungskonzepts, das sowohl theoretische Stringenz als auch praktische Anwendbarkeit vereint. Da bestehende Klassifizierungen diese Kriterien nicht erfüllen (Thunnissen, 2003, S. 12), präsentiert er im zweiten Teil seiner Arbeit ein neues Klassifizierungsschema. Dieses soll das geforderte Gleichgewicht erreichen und wird in Abbildung 3-2 dargestellt. Die vier Hauptklassen dieser neuen Klassifizierung sind Mehrdeutigkeit, epistemische Unsicherheiten, aleatorische Unsicherheiten und Unsicherheiten aufgrund von Wechselwirkungen.

Obwohl Thunnissen darauf hinweist, dass die Betrachtung von Mehrdeutigkeit als Unsicherheit umstritten ist – siehe beispielsweise oben Ausführungen zu (Schrader et al., 1993) – klassifiziert er Mehrdeutigkeit als eine übergeordnete Klasse von Unsicherheit. Mehrdeutigkeit umfasst laut ihm Ungenauigkeiten in Entwurf, Sprache und Vagheit. Theoretisch ist es möglich, diese Art von Unsicherheit zu reduzieren, jedoch ist der dafür notwendige Aufwand oft ein großes Hindernis. Epistemische Unsicherheiten, die einen Mangel an Wissen oder Information in bestimmten Phasen oder Aktivitäten des Modellierungsprozesses umfassen, werden als reduzierbare, subjektive oder Modellform-Unsicherheiten bezeichnet. Diese resultieren aus unvollständigen Informationen über bestimmte Systemmerkmale oder den umgebenden Kontext (Thunnissen, 2003, S. 13). Der Autor unterteilt epistemische Unsicherheiten weiter in Modell-, phänomenologische und Verhaltensunsicherheiten. Modellunsicherheiten beziehen sich auf die Genauigkeit mathematischer Modelle zur Beschreibung physikalischer Systeme und entstehen durch Näherungsfehler,

numerische Fehler und Programmierfehler. Numerische Fehler entstehen hierbei durch die endliche Genauigkeit der Arithmetik und lassen sich durch den Einsatz von Computern und Software mit höherer Genauigkeit reduzieren. Die Unterklasse der phänomenologischen Unsicherheiten entstehen dann, wenn relevante Informationen zum Zeitpunkt einer Entscheidungsfindung im Entwicklungsprozess unbekannt sind. Sie spielen daher vor allem für neuartige Projekte eine wichtige Rolle und schließen auch die sogenannten „unbekannten Unbekannten“ mit ein. Bei verhaltensbezogenen Unsicherheiten werden Handlungsweisen von Personen oder Organisationen umfasst, die folgende vier Ursachen haben können:

- **Entwurfsunsicherheit:** Der Entwickler hat die direkte Kontrolle über eine Entscheidung, er hat jedoch noch keine Entscheidung getroffen. Diese Art der Unsicherheit ist beseitigt, wenn ein System vollständig ist, da alle Entscheidungen umgesetzt wurden.
- **Anforderungsunsicherheit:** Hierunter sind Variablen zu verstehen, die eine Organisation oder eine Person zunächst unabhängig vom Entwicklungsteam bestimmt.
- **Willensunsicherheit:** Da das Verhalten und die damit verbundenen Handlungen einer Person nicht vorhersehbar sind, entsteht Unsicherheit darüber, was eine Person bzw. ein Subjekt zu einem gewissen Zeitpunkt entscheiden wird. Diese Art von Unsicherheit klassifiziert (Thunnissen, 2003, S. 14) als willensbezogene bzw. volitionale Unsicherheiten.
- **Menschliche Fehler:** Diese Unsicherheiten treten bei der Entwicklung eines Systems aufgrund von Versehen oder Fehlern einer Person oder einer Personengruppe auf.

Die dritte übergeordnete Kategorie, aleatorische Unsicherheiten, werden als inhärente Variationen verstanden, die Werte innerhalb eines festgelegten Bereichs annehmen können, deren exakter Wert jedoch zufällig variiert und als nicht reduzierbar gilt (Thunnissen, 2003, S. 14). Die letzte Klasse umfasst Unsicherheiten aufgrund von Wechselwirkungen und Interaktionen. Sie entstehen durch die unvorhergesehene Interaktion von Ereignissen, von denen jedes einzeln betrachtet vorhersehbar sein könnte. Sie sind in komplexen multidisziplinären Systemen wie Raumfahrzeugen, von Bedeutung. Abbildung 3-2 fasst die beschriebenen Klassifizierungen für den Entwurf und die Entwicklung komplexer Systeme zusammen.

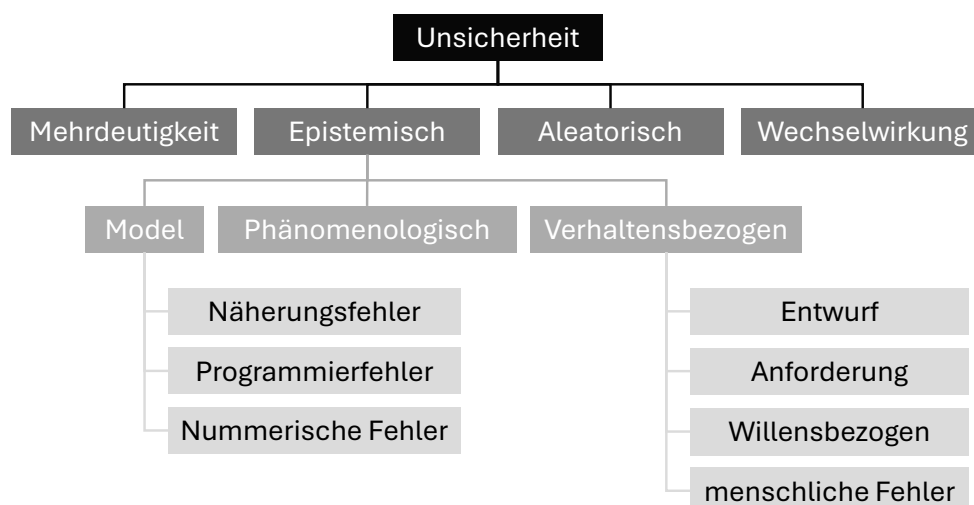


Abbildung 3-2: Unsicherheitsklassifizierung für den Entwurf und die Entwicklung komplexer Systeme i.A. an (Thunnissen, 2003, S. 12)

(De Weck *et al.*, 2007) beschäftigen sich in ihrer Arbeit mit der Klassifizierung von Unsicherheiten für die frühe Phase der Produkt- und Systementwicklung und stellen zudem eine Auswahl an formalen und praktischen Ansätzen für die Unsicherheitsmodellierung vor. Bei der Klassifizierung von Unsicherheiten unterscheiden sie grundsätzlich zwischen endogenen Unsicherheiten, die innerhalb eines bestimmten Produkts selbst entstehen, und exogenen Unsicherheiten, die außerhalb der direkten Kontrolle eines Unternehmens liegen. Die Quellen der Unsicherheit reichen von bekannten bis zu unbekannten Unsicherheiten, abhängig davon, wie gut die Probleme bekannt sind. Viele der bekannten Unsicherheiten sind Eigenschaften des Produkts selbst, die innerhalb der Systemgrenze liegen und vom Entwicklungsteam stärker beeinflusst werden können. Externe Unsicherheiten sind oft schwieriger vorherzusagen und in geringerem Maße beeinflussbar. In vielerlei Hinsicht bilden die exogenen Unsicherheiten den Hintergrund, vor dem die endogenen Unsicherheiten identifiziert und abgemildert werden müssen. Gleichzeitig sind in vielen Fällen endogene Unsicherheiten unabhängig von den exogenen Unsicherheiten. Abbildung 3-3 veranschaulicht die Klassifikation der Unsicherheiten, wie sie in (De Weck *et al.*, 2007, S. 3 ff.) beschrieben sind. Die Autoren definieren fünf Klassen von Unsicherheiten, abhängig vom Kontext, aus dem sie stammen. Endogene Unsicherheiten entstehen im Produkt- und Unternehmenskontext, während exogene Unsicherheiten dem Nutzungskontext, dem Marktkontext sowie dem politischen und kulturellen Kontext eines Produkts zugeordnet werden. Wichtig ist hierbei, dass es Überschneidungen zwischen den Kontexten gibt, was in der Abbildung entsprechend dargestellt wird.

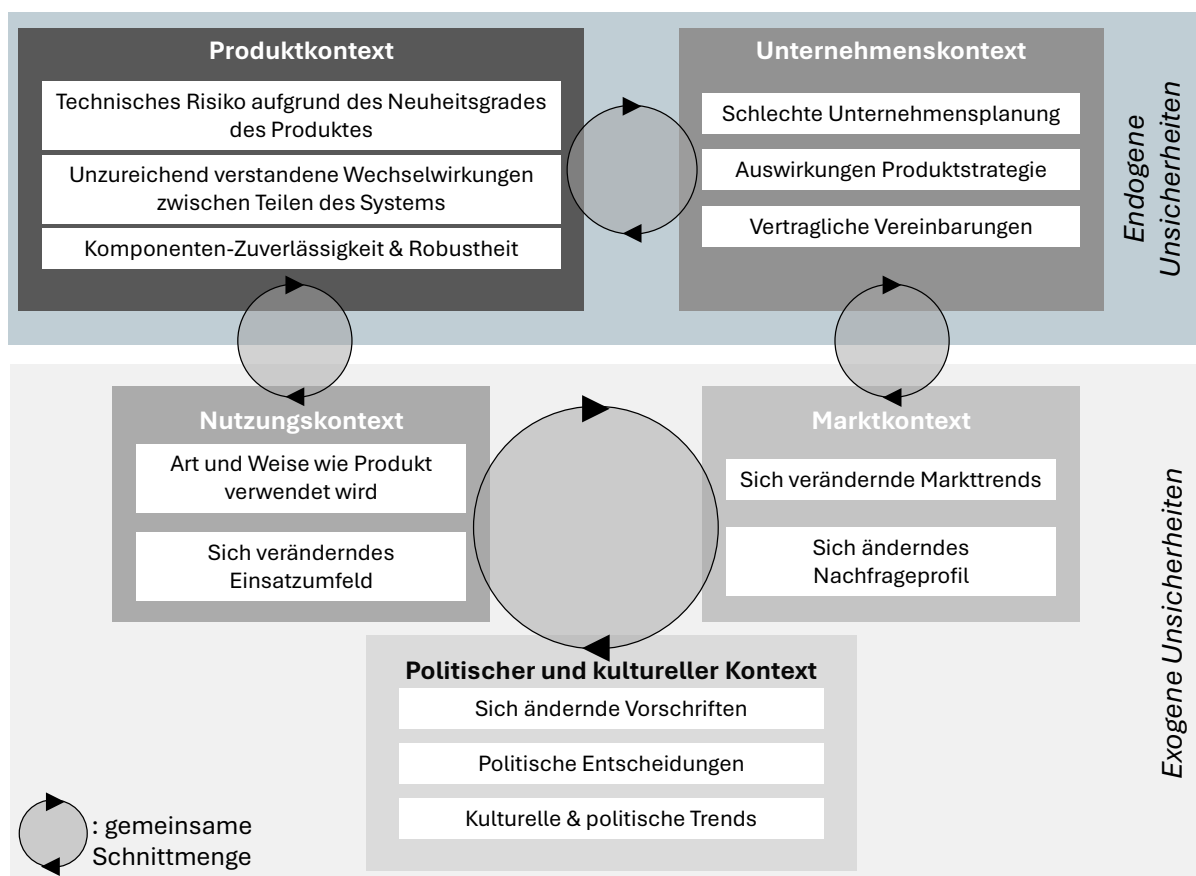


Abbildung 3-3: Unsicherheitsquellen i.A. an (De Weck *et al.*, 2007, S. 4)

(Walker *et al.*, 2003) nehmen einen anderen Betrachtungspunkt auf den Begriff der Unsicherheit ein. Sie fokussieren sich auf die Schaffung eines konzeptionellen Rahmens für die systematische Behandlung von Unsicherheit in der modellgestützten Entscheidungsunterstützung, wie beispielsweise in der Politikanalyse. Es geht den Autoren hauptsächlich darum, den Umgang mit Unsicherheit in Entscheidungsprozessen zu verbessern. Dabei wird in der Arbeit zwischen zwei Sichten auf Unsicherheit unterschieden: der Sicht des Modellierers und der Sicht des Entscheidungsträgers. Die Sicht des Modellierers konzentriert sich auf die Unsicherheiten, die mit den Ergebnissen des Modells und der damit verbundenen Bereitstellung von Informationen zur Unterstützung politischer Entscheidungen einhergehen. Die Sicht des Entscheidungsträgers, beispielsweise eines politischen Entscheidungsträgers, umfasst hingegen die Unsicherheit darüber, wie die Ergebnisse im Hinblick auf ihre Zielsetzungen zu bewerten sind, einschließlich der damit verbundenen Widersprüchlichkeiten in Zielsetzungen, Prioritäten und Interessen (Walker *et al.*, 2003, S. 8). Die Autoren konzentrieren sich dabei vorrangig auf die Unsicherheiten, die der Modellierer wahrnimmt und verwenden zur Beschreibung von Unsicherheit ein dreidimensionales Konzept. Abbildung 3-4 zeigt dieses Konzept mit den jeweiligen Dimensionen und Ausprägungen.

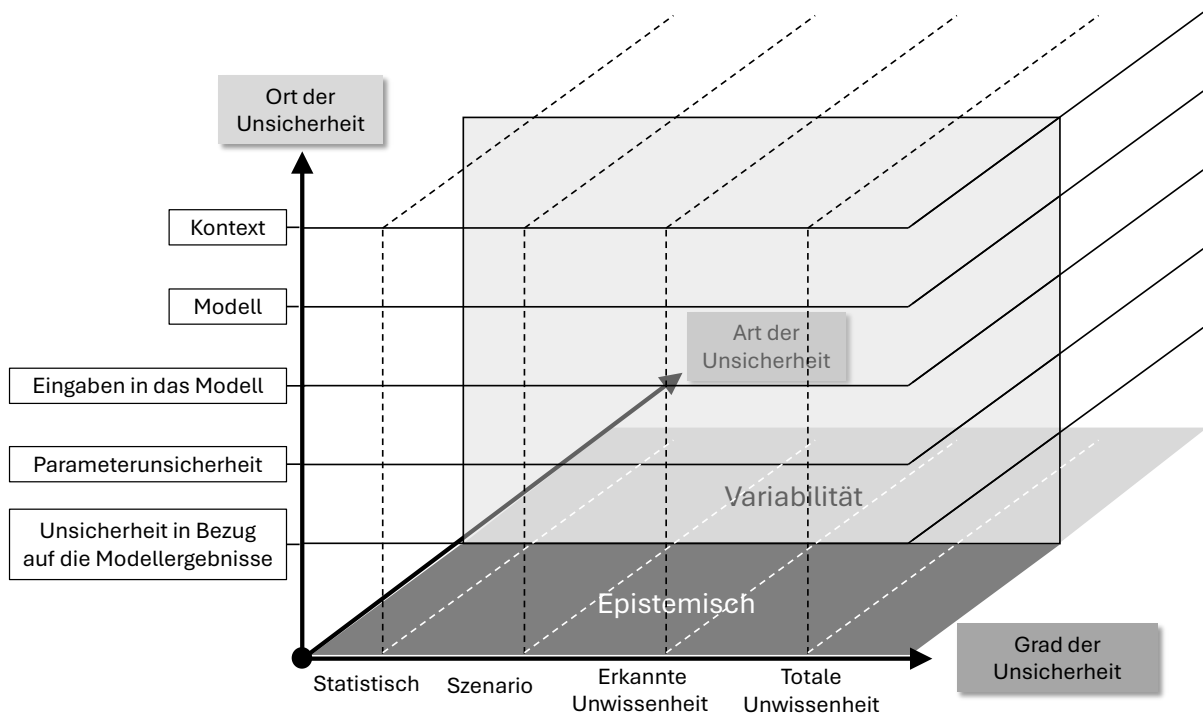


Abbildung 3-4: Dreidimensionales Konzept zur Beschreibung und Klassifikation von Unsicherheit, i.A. an (Walker *et al.*, 2003, S. 9)

Die **erste Dimension** beschreibt den Ort innerhalb eines Modells, in welchem sich die Unsicherheit manifestiert. Das Verständnis des Ortes ist entscheidend, um die mit den Modellergebnissen verbundene Unsicherheit nachvollziehen zu können. (Walker *et al.*, 2003, S. 9 ff.) haben zu diesem Zweck fünf generische Orte im Zusammenhang mit einem Modell identifiziert: den Kontext, das Modell selbst, die Eingaben ins Modell, Unsicherheiten im Zusammenhang mit den verwendeten Parametern und den Modellergebnissen. Der *Kontext* eines Modells bestimmt die Grenzen des zu modellierenden Systems und definiert, welche Teile der realen Welt innerhalb und welche außerhalb dieser Grenzen liegen. Diese Festlegung erfolgt typischerweise während der Problemdefinitionsphase und ist für die Entscheidungsunterstützung von grundlegender Bedeutung. Die *Unsicherheit im Modell* ergibt sich sowohl aus dem konzeptionellen Aufbau, also den Variablen,

die zur Beschreibung des Systems innerhalb des Kontextes gewählt wurden, als auch aus der technischen Implementierung des Modells, was durch das Computermodell realisiert wird. Die Unsicherheit im Zusammenhang mit dem Modellaufbau wird als Modellstruktur-Unsicherheit definiert und fasst damit Unsicherheit in Bezug auf die Form des Modells in den Fokus. Die technische Modellunsicherheit ergibt sich wiederum aus der Unsicherheit im Zusammenhang mit der technischen Implementierung und Umsetzung des erstellten Modells durch den Computer. Die *Eingaben in das Modell*, die aus der Beschreibung des betrachteten Referenzsystems und den externen Einflüssen resultieren, können in kontrollierbare und nicht kontrollierbare Faktoren unterteilt werden, je nachdem, ob der Entscheidungsträger die Möglichkeit hat, diese zu beeinflussen. *Parameterunsicherheit* ist eng mit den Daten und Methoden verbunden, die zur Kalibrierung der Modellparameter herangezogen werden. Schließlich umfasst die Unsicherheit der *Modellergebnisse* alle Unsicherheiten, die mit den Ergebnissen verknüpft sind und für den Entscheidungsträger relevant sind.

Die **zweite Dimension** beschreibt den Grad der Unsicherheit, wozu die Autoren mit einem Idealzustand eines vollständig deterministischen Systems im Ursprung der Abbildung 3-4 beginnen und diesen Zustand als Determinismus bezeichnen (Walker *et al.*, 2003, S. 11). Es folgen die statistische Unsicherheit, Szenario-Unsicherheit, erkannte Unwissenheit und totale Unwissenheit (Walker *et al.*, 2003, S. 12 ff.). Die *statistische Unsicherheit* bezieht sich auf die Variationen oder Abweichungen vom wahren Wert, die innerhalb eines Modells statistisch erfasst werden können. Diese Art der Unsicherheit nimmt an, dass die funktionalen Beziehungen im Modell die zu simulierenden Phänomene adäquat darstellen und dass die zur Kalibrierung des Modells verwendeten Daten repräsentativ sind. Ein klassisches Beispiel für statistische Unsicherheit ist die Messunsicherheit, die aus der Tatsache resultiert, dass Messungen selten den exakten wahren Wert eines gemessenen Objekts erfassen. Diese Unsicherheit kann durch Stichprobenfehler, Ungenauigkeiten oder Messfehler entstehen. Stichprobenfehler beschreiben Abweichungen, die durch eine nicht vollständig repräsentative Stichprobe entstehen, während Ungenauigkeit sich auf die Differenz zwischen einem gemessenen Wert und dem als wahr angenommenen Wert bezieht, was Schwankungen um einen Mittelwert reflektiert (Walker *et al.*, 2003, S. 12). Statistische Unsicherheit kann auch die Unsicherheit bei der Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten in einem stochastischen Modell umfassen.

Im Rahmen politischer Analysen dienen Szenarien als Ansatz zum Umgang mit Unsicherheit in Bezug auf das externe Umfeld eines Systems, also dem Umgang mit Unsicherheit in Bezug auf den Systemkontext. Die *Unsicherheit bei Szenarien* kann auf unterschiedliche Weisen hervortreten. Sie kann sich als Spannweite in den Analyseergebnissen offenbaren, die aufgrund unterschiedlicher zugrunde liegender Annahmen entstehen. Andererseits kann Szenario-Unsicherheit sich als Unsicherheit darüber äußern, welche Veränderungen und Entwicklungen für die relevanten Ergebnisse bedeutsam sind. Schließlich kann sie sich auch als Unsicherheit über das mögliche Ausmaß einer zu berücksichtigenden Veränderung manifestieren.

Die *erkannte Unwissenheit* repräsentiert eine grundlegende Unsicherheit in Bezug auf die Mechanismen in einem Untersuchungsfeld. Es sind dabei weder funktionale Zusammenhänge noch statistische Eigenschaften bekannt, was entsprechend die wissenschaftliche Basis für die Szenarien-Erstellung und -Entwicklung schwächt. Diese Unsicherheit gliedert sich in reduzierbare und nicht reduzierbare Unwissenheit. Reduzierbares Unwissen kann beispielsweise durch die Schaffung eines besseren Verständnisses reduziert werden. Nicht reduzierbares Unwissen bleibt jedoch bestehen, wenn weder Forschung noch Entwicklung ausreichend Aufschluss über kritische

Zusammenhänge geben können, und wird auch als Unbestimmtheit bezeichnet.

Die *vollständige oder totale Unwissenheit* stellt in Abbildung 3-4 das andere Extremum zum Determinismus dar. Hierbei weiß ein Individuum nicht einmal, dass es sich in völliger Unwissenheit befindet, wodurch auch keinerlei Kenntnis über das Ausmaß der Unwissenheit besteht.

Die **dritte Dimension** klassifiziert die Art der Unsicherheit und unterscheidet dabei zwischen epistemischer Unsicherheit und Variabilitätsunsicherheit. Epistemische Unsicherheit resultiert aus der Unvollkommenheit des vorhandenen Wissens eines Individuums oder einer Gruppe und kann durch Maßnahmen der Wissensgenerierung reduziert werden. Diese Art der Unsicherheit ist mit verschiedenen Aspekten der Modellierung verbunden, wie etwa begrenzten und ungenauen Daten, unvollständigem Wissen, unvollkommenen Modellen, Mehrdeutigkeiten, Messfehlern und einem begrenzten Verständnis. Variabilitätsunsicherheit hingegen resultiert aus der inhärenten Variabilität oder Zufälligkeit eines Systems. Die Quellen dieser Unsicherheit umfassen sowohl die natürliche Zufälligkeit als auch die Variabilität im menschlichen Verhalten und gesellschaftliche Variabilität, die sich in sozialer, wirtschaftlicher und kultureller Dynamik manifestieren. Im Gegensatz zur epistemischen Unsicherheit lässt sich die Variabilitätsunsicherheit nicht durch Wissensgenerierung reduzieren

In ihrem Werk zur Verbesserung des Entwicklungsprozesses streben (Clarkson und Eckert, 2005) danach, ein Verständnis für relevante Fragestellungen in den Bereichen Entwicklungsprozesse, -management und -praxis zu entwickeln. Sie diskutieren insbesondere die Rolle von Unsicherheiten als einen bedeutenden Faktor bei der Entstehung von Komplexität (Clarkson und Eckert, 2005, S. 182). Komplexität tritt auf, wenn zu den Merkmalen der Kompliziertheit Dynamik, Unvorhersehbarkeit und Unbeherrschbarkeit hinzukommen (Krause und Gebhardt, 2018, S. 36). Die Kompliziertheit eines Systems resultiert aus der Anzahl, Vielfalt und den Verbindungen der einzelnen Systemelemente sowie deren Zuständen (Krause und Gebhardt, 2018, S. 36). Sie wird als eine Untermenge der Komplexität betrachtet, die sich durch deterministische, sichere und unveränderliche Eigenschaften auszeichnet. Ein kompliziertes System kennzeichnet sich durch eine hohe Anzahl an Elementen und Beziehungen, behält jedoch ein deterministisches Verhalten bei. Der Unterschied zwischen Komplexität und Kompliziertheit wird durch die zeitliche Veränderlichkeit hervorgehoben, welche ein System nicht-deterministisch, unsicher und dynamisch macht (Krause und Gebhardt, 2018, S. 37). (Lindemann, 2009, S. 10) beschreibt vier Merkmale zur Bestimmung der Komplexität eines Systems, die in Abbildung 3-5 dargestellt sind.

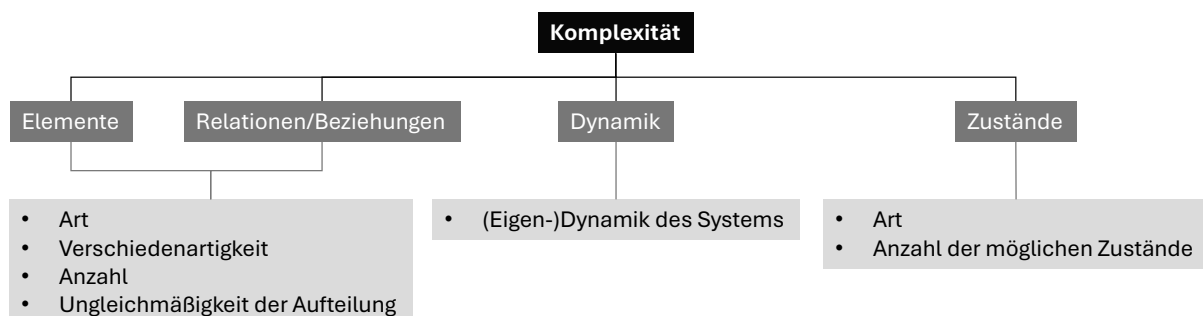


Abbildung 3-5: Vier Merkmale von Komplexität nach (Lindemann, 2009, S. 10)

(Clarkson und Eckert, 2005) identifizieren unterschiedliche Orte, an denen Komplexität auftreten kann. Einerseits ist es möglich, dass dem zu entwickelnden *Produkt* oder *System* in seiner Struktur und in seinem Nutzungsverhalten Komplexität inhärent ist. Gleichzeitig kann der

Entwicklungsprozess eine komplexe Aufgabenstruktur beinhalten, in welcher der *Entwickler* und seine Rolle in der Organisation von Projektteams eine komplexe Menge von Fähigkeiten und Erfahrungen mit einbringt. Schließlich stellen auch die *Nutzer* des Produktes und die durch Lebenszykluseffekte stärker betroffenen Individuen einen komplexen Produkt- bzw. Systemkontext dar (Clarkson und Eckert, 2005, S. 175).

Um ein Verständnis für Komplexität aufzubauen, werden verschiedene Arten von Komplexität beschrieben, die in der Entwicklung auftreten. Beispielsweise kann die Produktstruktur komplex sein, indem während der Entwicklung dem Produkt immer weitere neue Strukturen zugeordnet werden. Die Interaktion zwischen diesen Strukturen stellt die Komplexität dar. Ein weiterer wichtiger Aspekt sind unvorhersehbare emergente Verhaltensweisen, die aus dem Zusammenspiel von Systemelementen und der bereichsübergreifenden Ausbreitung von Effekten entstehen (Clarkson und Eckert, 2005, S. 178 ff.).

Wie bereits erwähnt, stellen Unsicherheiten eine relevante Quelle für Komplexität bei der Entwicklung neuer Produkte dar (Clarkson und Eckert, 2005, S. 185). Die Autoren unterscheiden dabei zwischen *bekannten* und *unbekannten* Unsicherheiten als Grundtypen, die wiederum in den Bereichen *Beschreibungen* und *Daten* auftreten können. Bekannte Unsicherheiten basieren auf der Variabilität in vergangenen Fällen und können durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen charakterisiert werden. Die unbekannte Unsicherheit ist dadurch gekennzeichnet, dass es keine bestimmte Erwartung für ein entsprechendes Ereignis gibt. Diese Unsicherheit kann sowohl eine Ursache innerhalb der Systemgrenzen haben als auch aus dem Systemkontext stammen (Clarkson und Eckert, 2005, S. 182 ff.). Abbildung 3-6 fasst die Arten der Unsicherheiten zusammen und zeigt, welche Attribute jeweils mit den Unsicherheiten in den Beschreibungen und den Daten assoziiert sind.

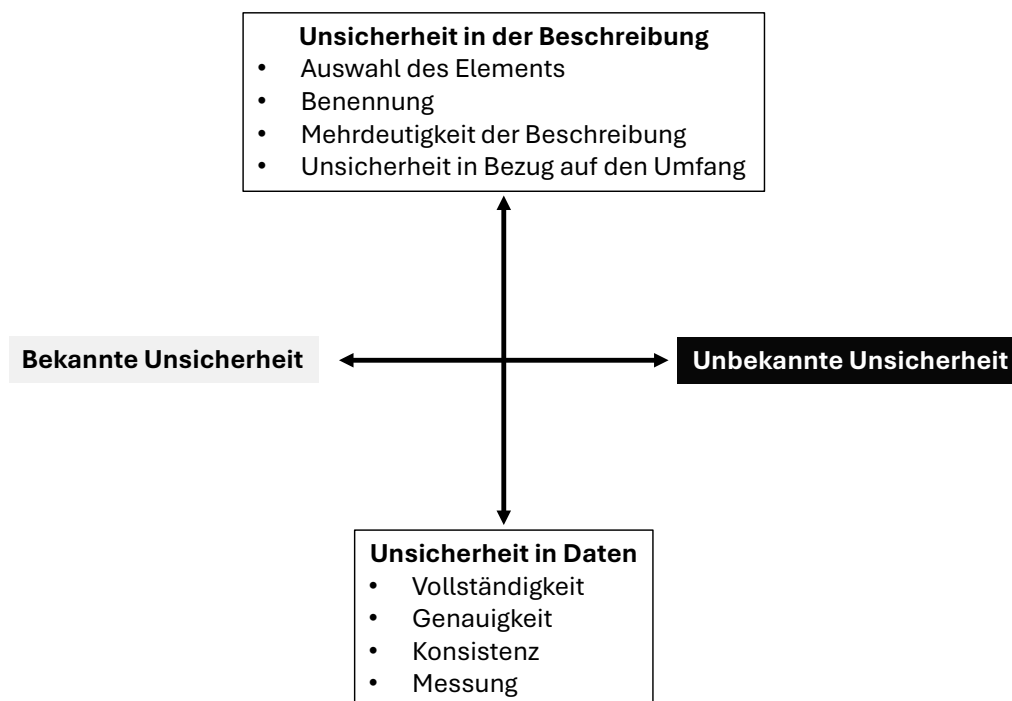


Abbildung 3-6: Arten der Unsicherheit in der Entwicklung, i.A. an (Clarkson und Eckert, 2005, S. 183)

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden als theoretische Grundlage die Arbeiten von (Paetzold, 2022) und (Clarkson und Eckert, 2005) herangezogen. Darauf aufbauend werden Unsicherheiten als Unvollständigkeiten, Ungenauigkeiten, Inkonsistenzen, Diskrepanzen, Mehrdeutigkeiten und Vagheiten innerhalb von Daten und Informationen sowie deren entsprechenden Flüssen verstanden. Eine detaillierte Beschreibung dieser Unsicherheitskonzepte erfolgt in Kapitel 5.3.2 im Rahmen der Unsicherheits-Ontologie.

3.2 Modellbasiertes Systems Engineering

"Alle Modelle sind falsch, aber einige von ihnen sind nützlich." (George Box)

Bevor im folgenden Kapitel das modellbasierte Systems Engineering sowie die zugehörigen Begriffe und Konzepte detailliert behandelt werden, erfolgt zunächst eine Erläuterung der beiden grundlegenden Begriffe *Modell* und *System*. Der Begriff *Modell* leitet sich vom lateinischen Wort 'modulus' ab, das Maß, Regel, Muster und Vorbild bedeutet (Ludewig, 2003, S. 6). (Stachowiak, 1973, S. 56 ff.) sieht in seinem umfassenden Werk über die Modelltheorie den Begriff Modell sowohl als die elementarste Wahrnehmungsgegebenheit als auch die komplizierteste umfassende Theorie und beabsichtigt damit, die Weite der Begrifflichkeit zu umfassen. Das Modell sieht der Autor als vermeintlich objektives Erkenntnisgebilde und gleichzeitig als Gedankenkonstruktion, in welcher die Subjektivität und Perspektivität eine hohe Relevanz besitzen. Zwar schwindet laut Stachowiak die subjektive Komponente bis zu einem gewissen Maß, jedoch verschwindet sie nicht gänzlich. Die (VDI 2206, 2020, S. 4) definiert den Begriff Modell als eine schlüssige und ausreichend detaillierte Abstraktion von Aspekten eines Anwendungsbereichs. Eine Abstraktion versteht sich hierbei als die Unterdrückung von irrelevanten Details, die durch Verallgemeinerung, Auslöschung oder Verzerrung erreicht werden kann (Dickersen und Mavris, 2009, S. 34). Als irrelevant ist dabei der Sachverhalt zu verstehen, dass eine Tatsache *f* für eine andere Tatsache *g* im Kontext einer Menge von Aussagen *M* irrelevant ist, wenn die Wahrheit von *g* unabhängig davon ist, ob *f* wahr oder falsch ist (Subramanian und Genesereth, 1987, S. 418). Das heißt, selbst wenn sich der Wahrheitswert von *f* ändert, bleibt die Wahrheit von *g* unverändert. (Dickersen und Mavris, 2009, S. 34) betrachten im Rahmen des Systems Engineering ein Modell ebenfalls als eine Abstraktion, die ein zu betrachtendes System repräsentiert. Die zur Modellerstellung verwendeten Sprachen, wie die Unified Modeling Language (UML) oder die Systems Modeling Language (SysML), gelten dabei als Technologien. Die Technologie ist hierbei als die praktische Anwendung von Wissen in einem spezifischen Bereich zu verstehen (Merriam Webster, 2024). Durch die Abstraktion und Strukturierung eines zunächst unübersichtlichen Untersuchungsgegenstandes entsteht eine neue Ausgangssituation, die ein besseres Verständnis und eine effektivere Bearbeitung des Gegenstandes ermöglicht. Modelle sind somit zweckorientiert und trennen in ihrer jeweiligen Betrachtung Wesentliches von Unwesentlichem (Ehrlenspiel und Meerkamm, 2017, S. 27). (Ramos *et al.*, 2012, S. 103) erachten Modelle in der modernen Welt als allgegenwärtig und sehen in ihnen die Grundlage für die Entwicklung und den Betrieb von Systemen. Ein Modell ist grundsätzlich durch folgende drei Merkmale gekennzeichnet (Stachowiak, 1973, S. 131 ff.; Ropohl, 2009, S. 84 ff.):

- **Abbildungsmerkmal:** Modelle sind stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen, Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale. Diese können wiederum selbst Modelle sein.
- **Verkürzungsmerkmal:** Generell erfassen Modelle nicht sämtliche Eigenschaften des von ihnen dargestellten Originals, sondern lediglich jene, die für die Ersteller oder Nutzer des Modells von Bedeutung sind.
- **Pragmatisches Merkmal:** Modelle sind nicht automatisch ihren Originalen eindeutig zugeordnet. Stattdessen erfüllen sie eine Ersatzfunktion:
 - Für bestimmte Subjekte, die das Modell erkennend oder handelnd nutzen
 - Innerhalb festgelegter Zeitintervalle
 - Unter Berücksichtigung spezifischer gedanklicher oder praktischer Operationen

Unter dem Begriff *System* versteht man eine Gruppe von Elementen, die so interagieren, dass ein bestimmtes Ziel erreicht wird (Kannengiesser und Gero, 2022, S. 129). Ein System kann seinerseits ein Element eines übergeordneten Systems sein, wodurch es möglich ist, dass ein System mehrere Hierarchieebenen umfasst. In einem solchen Fall spricht man von einem *System von Systemen* (Kannengiesser und Gero, 2022, S. 129; Maier, 1998, S. 268). In den ISO/IEC/IEEE-Normen wird ein System als eine Sammlung von Komponenten definiert, die eine bestimmte Funktion oder eine Reihe von Funktionen erfüllen (ISO/IEC/IEEE, 2023, S. 8; IEEE, 1990, S. 73). Die VDI 2221-Richtlinie betont zusätzlich die Abgrenzung des betrachteten Systems von seiner Umgebung, indem sie ein System als eine durch eine gedachte Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzte Menge von Elementen und den zwischen ihnen bestehenden Relationen definiert, die einen definierten Zweck erfüllen (VDI 2221, 2018, S. 7; siehe u.a. Kapitel 1.2). Hubka und Eder definieren in ihrer Arbeit zur Theorie der Technischen Systeme ein System als eine Menge von miteinander verbundenen Teilen mit den entsprechenden Beziehungen, die diese Teile verbinden (Hubka und Eder, 1984, S. 260). Weiterhin heben (Hubka und Eder, 1984) die Verbindung des betrachteten Systems zur Umgebung hervor. Durch die Auswahl spezifischer Merkmale, Eigenschaften und Verbindungsarten lässt sich die Art und Weise der Verbindungsbeziehungen und die von ihnen befolgten Regelmäßigkeiten aufzeigen, was dazu führt, dass verschiedene Strukturen des Systems erkennbar werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein System als ein zweckgebundenes Kollektiv von Elementen zu verstehen ist, welches durch eine Systemgrenze vom umgebenden Systemkontext getrennt ist. Der Systemkontext stellt den Teil der Systemumgebung dar, der für die Definition und das Verständnis der Anforderungen des betrachteten Systems relevant ist (Rupp, 2014, S. 85). In dieser Konstellation übernimmt die Systemgrenze Funktionen wie die Bereitstellung der Grundlage für die Definition von Schnittstellen und die Klärung der Beziehungen zu anderen Systemen. Sie beschränkt und erweitert die zu betrachtende Gesamtheit und legt den Verantwortungs-, Kompetenz- und Lieferbereich fest (Ehrlenspiel und Meerkamm, 2017, S. 30). Abbildung 3-7 veranschaulicht diese Sichtweise auf den Systembegriff.

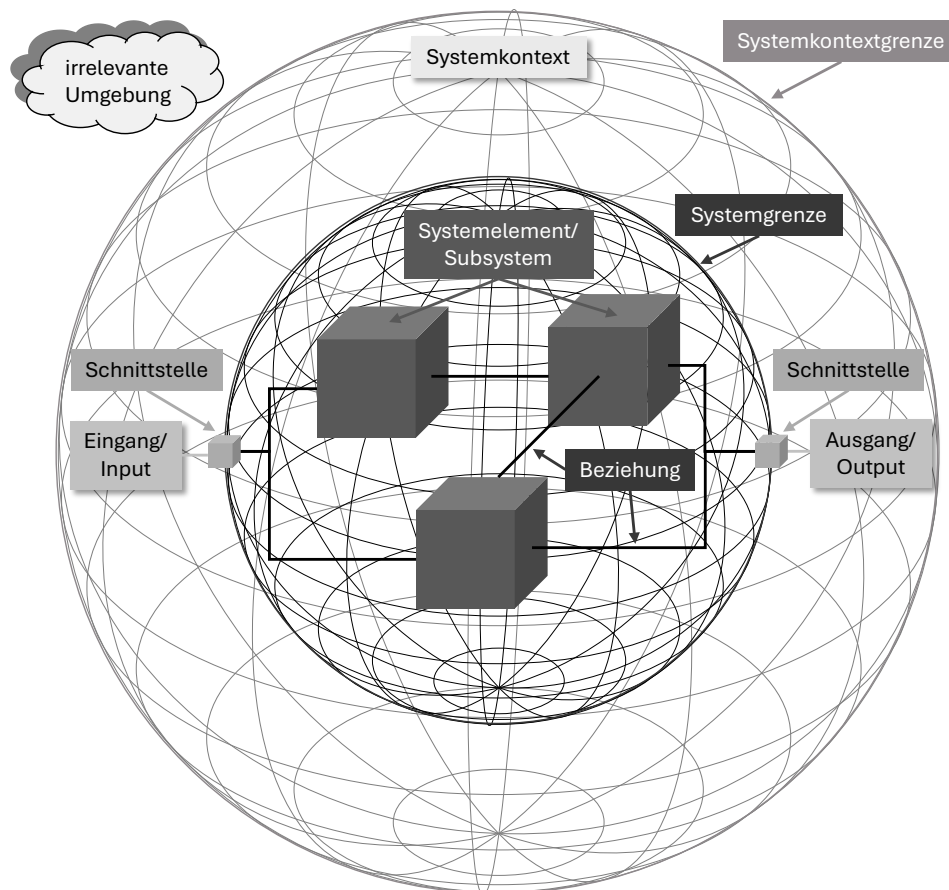


Abbildung 3-7: Systemdarstellung i.A. an (Ehrlenspiel und Meerkamm, 2017, S. 28)

3.2.1 Systems Thinking

(von Bertalanffy, 1968, S. 1) erkannte im Rahmen seiner Arbeit zur allgemeinen Systemtheorie schon früh, dass Systems Thinking in vielen Bereichen, von der Industrie über die Rüstungsindustrie bis hin zu Themen der reinen Wissenschaft, eine herausragende Rolle spielt. Der Begriff Systems Thinking wurde jedoch erst 1987 von Barry Richmond, einem bekannten Wissenschaftler auf dem Gebiet des Systemdenkens und der Systemdynamik, geprägt (Arnold und Wade, 2015, S. 670; Kaur und Craven, 2022, S. 193). Grundsätzlich stellt das Systems Thinking einen Problemlösungsansatz für die Analyse und Synthese von unterschiedlichen Elementen und deren Beziehungen in komplexen Phänomenen dar (Da Costa Junior *et al.*, 2018, S. 67). (Mella, 2012, S. 1) schätzt Systems Thinking als eines der mächtigsten Werkzeuge des Wissens und des Verstehens ein, weil es lehrt, kohärente und sinnvolle Modelle der Welt zu entwickeln, wodurch sich gesamtgesellschaftliche Verbesserungen und Gestaltungsmöglichkeiten ergeben. Systems Thinking ersetzt den Reduktionismus, der den Glauben vertritt, dass alles auf einzelne Teile reduziert werden kann, die Ursache und Wirkung als umweltfreie Erklärungstheorie und den Determinismus durch Expansionismus, welcher das Verständnis fördert, dass ein System immer ein Teilsystem eines größeren Systems sein kann. Weiterhin ersetzt Systems Thinking das probabilistische Denken und die Analyse, bei der das System durch das Verständnis seiner Teile kennengelernt wird, durch die Synthese, die die Rolle des Systems im größeren System erklärt, von dem es ein Teil ist. Die Analyse ist nützlich, um herauszufinden, wie ein System funktioniert, aber die Synthese zeigt, warum ein System genau so funktioniert, wie es funktioniert (Pourdehnad *et al.*, 2011, S. 3; Ackhoff, 1999, S. 5 ff.). Schließlich verdeutlicht das Systems Thinking einen wichtigen Aspekt

einer lernenden Organisation, nämlich dass Menschen sich selbst und ihre Welt aus einer neuen Perspektive betrachten und erkennen, dass sie nicht von der Welt getrennt, sondern mit ihr verbunden sind (Senge, 1996, S. 22). Sie verstehen, dass Probleme nicht ausschließlich durch exogene Mechanismen verursacht werden, sondern erkennen die Bedeutung und den Beitrag ihres eigenen Handelns bei der Entstehung von Problemen (Senge, 1996, S. 22).

Obwohl die Bedeutung von Systems Thinking durchweg anerkannt ist, gibt es in der Literatur keine einheitliche Definition des Begriffes (Arnold und Wade, 2015, S. 670; Kaur und Craven, 2022, S. 193). Die Arbeiten von (Arnold und Wade, 2015, S. 670 ff.), (Dugan *et al.*, 2024, S. 55), (Kaur und Craven, 2022, S. 194), (Monat und Gannon, 2015, S. 12 ff.) und (Mella, 2012, S. 7 ff.) enthalten eine umfassende Sammlung an Definitionen des Begriffes Systems Thinking und bieten verschiedene Perspektiven. Tabelle 3-1 gibt einen Auszug aus diesen Definitionen und beschränkt sich auf vier gängige Definitionen, um ein hinreichendes Verständnis im Rahmen dieser Arbeit zu gewährleisten. (Dugan *et al.*, 2024, S. 54) und (Kaur und Craven, 2022, S. 194) stellten bereits fest, dass es wesentliche Komponenten gibt, die beim Systems Thinking hervorzuheben sind:

- Ganzheitliche Perspektive
- Emergenz
- Verständnis von Beziehungen und Strukturen zwischen Systemteilen
- Berücksichtigung von zeitabhängigen Veränderungen
- Berücksichtigung diverser Perspektiven und mentaler Modelle von Individuen, die zu diesen Perspektiven führen

Tabelle 3-1: Ausgewählte Definitionen des Begriffes Systems Thinking

Quelle	Definition Systems Thinking
(Richmond, 1994, S.6)	Systemdenken ist die Kunst und Wissenschaft, durch die Entwicklung eines immer tieferen Verständnisses der zugrunde liegenden Strukturen zuverlässige Rückschlüsse auf das Verhalten zu ziehen. Diese Kunst und Wissenschaft setzt sich aus Technologie, Sprache, Paradigma, Perspektive, Denkfähigkeiten, Prozessen und Lernmethoden zusammen.
(Senge, 1996, S.15, S.21)	Systems Thinking ist ein konzeptionelles Rahmenwerk, eine Sammlung von Informationen und Instrumenten, um übergreifende Muster klarer zu erkennen und besser zu verstehen, wie sie erfolgreich verändert werden können. Systems Thinking ist die integrative Disziplin, die alle weiteren Disziplinen miteinander verknüpft und sie zu einer ganzheitlichen Theorie und Praxis zusammenfügt.
(Arnold und Wade, 2015, S. 675)	Systemdenken ist eine Reihe von synergetischen analytischen Fähigkeiten, die eingesetzt werden, um die Fähigkeit zu verbessern, Systeme zu erkennen und zu verstehen, ihr Verhalten vorherzusagen und Änderungen an ihnen vorzunehmen, um die gewünschten Effekte zu erzielen. Diese Fähigkeiten arbeiten als System zusammen.
(Woodcock <i>et al.</i> , 2021, S. 129)	Fähigkeit, die in einem System eingebetteten komplexen Strukturen und ihre Verflechtungen zu erkennen und zu würdigen und dabei das zu erreichende Ziel auf höchster Ebene im Auge zu behalten.

Als Emergenz ist eine Eigenschaft zu verstehen, die entsteht, wenn sich eine organisierte Menge von Elementen bildet. Diese neue Eigenschaft existiert nicht auf der Ebene der einzelnen, isoliert betrachteten Teile. Zum Beispiel kann man die Zeit nicht in einem einzelnen Uhrwerk finden, sondern erst, wenn das Gesamtsystem existiert und auf die einzelnen Teile zurückwirken kann, sobald diese Dualität gebildet ist (Morin, 2007, S. 141). Was (Dugan *et al.*, 2024, S. 54) jedoch in den Definitionen feststellen, ist das Fehlen einer expliziten Einbeziehung sozialer Dimensionen in die Definitionen des Systemdenkens. Die Autoren schlagen daher einerseits die Berücksichtigung eines breiten Spektrums an sozialen und technischen Dimensionen vor und andererseits die Einbeziehung von Beziehungen zwischen diesen Dimensionen, insbesondere der Beziehungen zwischen sozialen Dimensionen sowie zwischen sozialen und technischen Dimensionen (Dugan *et al.*, 2024, S. 71).

Um tatsächlich zu verstehen, welche Art von Modellen Systems Thinking ermöglicht und ein Verständnis für die Art von Gegenstandsbereich zu erlangen, die diese Modelle abbilden, ist es notwendig, die Regeln zu betrachten, die die logische Struktur von Systems Thinking ausmachen. (Mella, 2012, S. 9 ff.) hat folgende fünf Regeln identifiziert, die die logische Struktur von Systems Thinking beschreiben und es ermöglichen, Modelle zu entwickeln, mit denen Aspekte der Welt verstanden, erklärt, vorhergesagt, kommuniziert und kontrolliert werden können:

Regel 1 – Betrachten des Gegenstandsbereiches aus unterschiedlichen Perspektiven: Es ist notwendig, sowohl die Ganzheit als auch die Teile der Ganzheit zu betrachten und dabei kontinuierlich zwischen den hierarchischen Ebenen zu wechseln. Dabei sollte die rekursive Struktur berücksichtigt werden, da die Teile der Ganzheit selbst aus weiteren Teilen bestehen, die eigene Ganzheiten bilden. Zudem sind die durch die Teile konstituierten Ganzheiten wiederum Teile von größeren Ganzheiten.

Regel 2 – Fokussieren auf Variablen und Variationen: Um ein umfassendes Verständnis eines betrachteten Gegenstandsbereiches zu erlangen und darauf basierend Vorhersagen treffen zu können, ist es notwendig, aussagekräftige Variablen zu identifizieren und deren Veränderungen über einen bestimmten Zeitraum zu beobachten, anstatt Objekte mit konstantem Verhalten und Zuständen zu untersuchen.

Regel 3 – Identifizieren des Ursache-Wirkung Zusammenhangs der Variablen: Die dritte Regel verfolgt einen kybernetischen Ansatz und besagt, dass zum Verständnis einer Ausgangsvariablen, die als Wirkungsvariable oder abhängige Variable zu verstehen ist, die Ursachen identifiziert werden müssen, die ihre Dynamik hervorrufen. Hierzu sind sowohl die Prozesse und deren Elemente zu untersuchen, die die Variationen erzeugen, als auch die Eingangsvariablen, die als Ursachenvariablen oder unabhängige Variablen zu verstehen sind und diese Prozesse auslösen.

Regel 4 – Identifizieren von Rückkopplungsschleifen: Mittels dieser Regel schreibt das Systems Thinking vor, mögliche wechselseitige Verbindungen zwischen den Variablen zu identifizieren, die als Schleifen verstanden werden können. Der betrachtete Gegenstandsbereich sollte in Form von Kreisläufen und Rückkopplungsschleifen analysiert werden, da Wirkmechanismen zu Ursachen ihrer eigenen Ursachen werden können, wodurch eine zirkuläre Verbindung zwischen Ursache und Wirkung entsteht.

Regel 5 – Definition von Systemgrenzen: Diese abschließende Regel thematisiert die Identifikation und Definition der Variablen, die das System bilden. Variablen, deren Einfluss zu gering ist, um

andere Variablen zu beeinflussen, sollten hingegen ausgeschlossen werden. Dadurch entsteht eine definierte Systemgrenze.

Systems Thinking ist ein wichtiger Bestandteil und Grundsatz des Systems Engineering (Haberfellner *et al.*, 2019, S. 3). Es handelt sich um eine erlernbare Routine (Chechile, 2021, S. 11). Daher werden am Ende dieses Kapitels und in Übereinstimmung mit den fünf Regeln des Systems Thinking die wesentlichen Eigenschaften eines erfolgreichen *System Thinkers* nach (INCOSE, 2015, S. 19 f.) in Tabelle 3-2 zusammengefasst. Um die Übereinstimmung zu den fünf Regeln zu verdeutlichen, zeigt die Tabelle neben der jeweiligen Eigenschaft auch, auf welche Regel sie Bezug nimmt. Mit Ausnahme der fünften Regel, die sich mit der Definition der Systemgrenze befasst, sind alle Aspekte der fünf Regeln vollständig in der Eigenschaftsliste enthalten. Die Umsetzung der fünften Regel sollte jedoch als grundlegende Voraussetzung betrachtet werden.

Tabelle 3-2: Eigenschaften eines System Thinkers nach INCOSE

	Eigenschaften eines System Thinkers nach INCOSE	Entsprechende Regel nach Mella
1	Versucht, das große Ganze zu verstehen.	Regel 1
2	Beobachtet, wie sich die Elemente innerhalb des Systems im Laufe der Zeit verändern, um Muster und Trends zu erkennen.	Regel 2
3	Erkennt, dass die Struktur eines Systemsein spezifisches Verhalten erzeugt.	
4	Erkennt die zirkuläre Natur komplexer Ursache-Wirkungs-Beziehungen.	Regel 4
5	Überprüft Annahmen und stellt sie auf den Prüfstand.	
6	Wechselt die Perspektive, um das Verständnis zu verbessern.	Regel 1
7	Betrachtet ein Thema vollständig und widersteht dem Drang, zu einer schnellen Schlussfolgerung zu kommen.	
8	Überlegt, wie mentale Modelle die aktuelle Realität und die Zukunft beeinflussen.	
9	Nutzt das Verständnis der Systemstruktur, um mögliche Hebelwirkungen zu identifizieren.	
10	Berücksichtigt sowohl kurz- als auch langfristige Folgen von Maßnahmen.	
11	Findet heraus, wo unbeabsichtigte Folgen auftreten.	
12	Erkennt die Auswirkungen von Zeitverzögerungen bei der Untersuchung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen.	Regel 3
13	Überprüft die Ergebnisse und ändert die Maßnahmen bei Bedarf: „Sukzessive Annäherung“.	

3.2.2 Systems Engineering

Um das Systems Engineering bzw. die Systemtechnik hinreichend zu erläutern, werden im Rahmen dieser Arbeit folgende Fragestellungen beantwortet:

1. Was ist Systems Engineering?
2. Warum ist Systems Engineering entstanden?
3. Welchen Zweck erfüllt das Systems Engineering?
4. Welche Prozesse sind mit dem Systems Engineering verbunden?

Was ist Systems Engineering?

Bereits früh erkannte die Menschheit, dass ein systematisches und ganzheitliches Vorgehen wesentlich zur Bewältigung großer Herausforderungen beiträgt (Gräßler und Oleff, 2022, S. 18). Seine Ursprünge fand das Systems Engineering jedoch in den 1940er und 1950er Jahren als ein Ansatz zur Modellierung und Handhabung komplexer und zunehmend multidisziplinärer technischer Systeme und ihres Verhaltens (Husung *et al.*, 2022, S. 227). Das Systems Engineering ist ein vielfältiges technisches Fachgebiet, in dem in den letzten Jahrzehnten zahlreiche spezifische formale Modelle entwickelt wurden (Luzeaux, 2015, S. 133). Tabelle 3-3 enthält eine Auswahl an begrifflichen Definitionen von Systems Engineering. Die genannten Quellen enthalten wiederum selbst eine umfassende Begriffserläuterung, deren Ergebnis die jeweiligen Definitionen darstellen.

Tabelle 3-3: Ausgewählte Definitionen des Begriffes Systems Engineering

Quelle	Definition Systems Engineering
(Eisner, 2002, S. 5)	Systems Engineering ist ein iterativer Prozess der Top-Down-Synthese, Entwicklung und des Betriebs eines realen Systems, der dazu führt, dass das System nahezu optimal alle Anforderungen erfüllt.
(Kossiakoff <i>et al.</i> , 2011, S. 3 f.)	Die Aufgabe des Systems Engineering besteht darin, die Entwicklung komplexer Systeme zu leiten und die traditionellen Ingenieurdisziplinen zu überbrücken. Dabei liegt der Fokus auf dem System als Ganzes; es wird besonders auf seine Gesamtfunktion geachtet. Das Systems Engineering betrachtet das System sowohl von außen, d. h. in seinen Wechselwirkungen mit anderen Systemen und der Umwelt, als auch von innen. Als Disziplin ist das Systems Engineering maßgeblich verantwortlich für die Konzeptentwicklung im Rahmen einer neuen Systementwicklung.
(INCOSE, 2015, S 11 f.)	Systems Engineering ist ein interdisziplinärer Ansatz und ein Mittel, um die Realisierung erfolgreicher Systeme zu ermöglichen. Es werden dabei sowohl geschäftliche als auch technische Aspekte und Anforderungen berücksichtigt und damit die gesamte Bandbreite der Stakeholder-Landschaft berücksichtigt.
(Sillitto <i>et al.</i> , 2019, S. 3)	Systems Engineering ist ein transdisziplinärer und integrativer Ansatz, der die erfolgreiche Realisierung, Nutzung und Ausmusterung von technischen Systemen ermöglicht. Dies geschieht unter Verwendung von Systemprinzipien und -konzepten sowie wissenschaftlichen, technologischen und Managementmethoden.

In dem Systems Engineering Handbuch von INCOSE werden folgende Schlüsselbegriffe mit dem Begriff Systems Engineering in Verbindung gebracht: interdisziplinär, iterativ, soziotechnisch und ganzheitlich, wobei die Sichtweise des Systems Engineering auf dem Systems Thinking basiert (INCOSE, 2015, S. 11). Systems Engineering ist im Grunde als eine eigene Fachdisziplin zu betrachten. Es verbindet die Vorgehensweisen der anderen Fachdisziplinen sinnvoll miteinander und beschränkt sich dabei nicht nur auf die technischen Fachbereiche, sondern adressiert alle Aspekte eines Unternehmens (Lindemann, 2016, S. 156). Schließlich wird ein effektives Systems Engineering nicht durch eine formale, umfangreiche und detailgenaue Dokumentation erreicht. Vielmehr sollte der Fokus darauf liegen, kreative und innovative Talente zu fördern, um einen systemorientierten Ansatz zu ermöglichen, der mit minimaler Managementbelastung auskommt (Lindemann, 2016, S. 178).

Warum ist Systems Engineering entstanden?

Der Übergang von traditionellen Produkten zu komplexen Systemen wird durch die zunehmende Integration von Software und eingebetteter Elektronik in moderne Produkte deutlich. Diese Entwicklung führt dazu, dass heutige Produkte ganz andere Eigenschaften aufweisen als klassische Produkte. Moderne Systeme sind zunehmend offene Systeme, die aktiv Daten austauschen und daher auf eine neue Art und Weise in bestehende Systemlandschaften integriert werden müssen. Im Gegensatz zu konventionellen bzw. klassischen Produkten, die aus einzelnen Bauteilen zusammengesetzt werden, erfordert die Integration dieser komplexen Systeme einen ganzheitlichen Ansatz. Exemplarisch lässt sich dieser Sachverhalt am Vergleich zwischen einer mechanischen Armbanduhr und einer Smartwatch verdeutlichen. Erstere ist ein geschlossenes, rein mechanisches Artefakt ohne nennenswerte externe Schnittstellen; letztere ein vernetztes, eingebettetes System mit Sensorik, Software, Funkmodulen und Einbindung in digitale Ökosysteme (Smartphone- und Cloud-Integration). Daraus ergeben sich charakteristische Systemfähigkeiten wie Interoperabilität, kontinuierliche Software-Updates und datengetriebene Funktionen. Diese Fähigkeiten führen zu erhöhten Anforderungen an Schnittstellen-, Sicherheits- und Lebenszyklusmanagement und machen Systems Engineering zu einem unverzichtbaren Bestandteil der Produktentwicklung (Sendler, 2013, S. 75).

(Ehrlenspiel und Meerkamm, 2017, S. 26 f.) sehen die Wissensexplosion als Ursache für die resultierende Unüberschaubarkeit des Ganzen. Diese entsteht durch die zunehmende Spezialisierung in den Teilgebieten der Wissenschaft, was auch Herausforderungen in der Kommunikation mit sich bringt. Dies fördert das Entstehen domänenspezifischer Sprachen und erschwert die interdisziplinäre Kommunikation. Erkenntnisgewinn wird jedoch nicht ausschließlich in den einzelnen Domänen-Silos generiert, sondern auch zunehmend durch den Ausbau interdisziplinärer Beziehungen im Entwicklungskontext. Hierbei kann das Systems Engineering einen nennenswerten Beitrag leisten durch seine Begriffe, Methoden und Werkzeuge.

Weiterhin sehen (Ehrlenspiel und Meerkamm, 2017) eine übergreifende und abstrakte Systematik als Mittel, um ein Verständnis über die stetig steigende Vielfalt technischer Produkte zu erlangen. Einhergehend mit der steigenden Produktvielfalt stellen Faktoren wie zunehmende Automatisierung und Vernetzung in den Produktionsstätten sowie die zunehmende verteilte Entwicklung ernstzunehmende Herausforderungen dar. Diese erfordern ganzheitliche Betrachtungsweisen und sowohl eine produktneutrale als auch eine produktspezifisch angepasste Arbeitsmethodik, wie sie im Systems Engineering praktiziert wird. Das Systems Engineering erleichtert zudem durch die klare Strukturierung in Teilsysteme mit zugehörigen Input- und Output-Beziehungen die

mathematische Modellierung von Systemen. Schließlich wird durch das Systems Engineering der Mensch als Teil der technischen Systeme berücksichtigt, wodurch Systeme nicht nur als technische, sondern auch als soziotechnische Systeme betrachtet werden.

Während (Ehrlenspiel und Meerkamm, 2017) die Ursachen für die Entstehung des Systems Engineering analysieren, beleuchten (Kossiakoff *et al.*, 2011, S. 5 ff.) unter anderem die historische Entwicklung dieser Disziplin und betonen, dass sich die Ursprünge des Systems Engineering nicht auf ein spezifisches Datum zurückführen lassen, da entsprechende Prinzipien bereits seit dem Bau der Pyramiden angewandt wurden. Als eigenständige Disziplin etablierte sich Systems Engineering jedoch erst als Konsequenz der rasanten technologischen Entwicklung während des Zweiten Weltkriegs und der darauffolgenden Jahrzehnte. Die Entwicklung hochkomplexer militärischer Systeme wie Hochleistungsflugzeuge, Radartechnik, Lenkflugkörper und die Atombombe erforderte revolutionäre Fortschritte in der Anwendung von Energie, Materialien und Information. Diese Systeme kombinierten erstmals multiple technische Disziplinen und stellten die Entwickler vor große Herausforderungen, die durch die kriegsbedingten Zeitbeschränkungen zusätzlich verschärft wurden. Die notwendige Koordination und Effizienz in Programmplanung, technischer Abstimmung und Entwicklungsmanagement führte zur Entstehung des modernen Systems Engineering. Verstärkt wurde diese Entwicklung durch den Kalten Krieg und insbesondere durch die Halbleiterelektronik, die das Informationszeitalter einläutete und die Komplexität von Systemen durch Computersteuerung und Automatisierung qualitativ steigerte. (Kossiakoff *et al.*, 2011, S. 7-10) beschreiben drei grundlegende Faktoren, die das Verhältnis zwischen modernem Systems Engineering und seinen Ursprüngen verdeutlichen: den technologischen Fortschritt mit seinen inhärenten Entwicklungsrisiken, den Wettbewerb, der systemübergreifende Abwägungen zwischen alternativen Lösungsansätzen erfordert, sowie die Spezialisierung, die eine strukturierte Systempartitionierung und striktes Schnittstellenmanagement notwendig macht.

Welchen Zweck erfüllt das Systems Engineering?

(Patzak, 1982, S. 15) sieht den Zweck des Systems Engineering darin, komplexe Probleme effizient zu managen und zu lösen. Das Systems Engineering zielt darauf ab, Systeme so zu gestalten, dass sie ihre vorgesehenen Funktionen vollständig erfüllen, sich optimal in ihre Umgebung einfügen und dass ihre Subsysteme effektiv zusammenarbeiten. Es bietet dafür Methoden und Techniken, um vielfältige Lösungsansätze zu erkunden, besonders in Situationen, wo kein klarer Lösungsweg vorgegeben ist. (Patzak, 1982) betont weiterhin den Zweck des Systems Engineering darin, dass durch interdisziplinäre Zusammenarbeit ein breites Wissensspektrum zugänglich gemacht wird, welches eine optimale Gestaltung von Systemfunktionen ermöglicht. Außerdem wird im Rahmen des Systems Engineering ein rationaler Planungsprozess verfolgt, der zusätzlich emotionale und nicht formalisierte Aspekte berücksichtigt.

Welche Prozesse sind mit dem Systems Engineering verbunden?

Das Systems Engineering erstreckt sich über alle Prozesse, die während der Lebensdauer eines Systems auftreten, von der Entwicklung und Fertigung über logistische Aspekte wie den Transport des Produktes bis hin zur Produktentsorgung am Ende des Lebenszyklus. Dabei umfasst es sowohl technische Prozesse als auch Managementprozesse (Lindemann, 2016, S. 154 ff.). Die (ISO/IEC/IEEE, 2023, S. 18 ff.) bietet eine umfangreiche Palette an wesentlichen Prozessen, die den Rahmen für die Arbeit von Systems Engineers bzw. Systemingenieuren bilden. Diese

Prozesse umfassen sowohl technische Aspekte als auch nichttechnische Elemente wie das Personal- und Portfoliomanagement und sind in Abbildung 3-8 dargestellt. Bezüglich der Reihenfolge der Durchführung der Prozesse gibt es seitens der (ISO/IEC/IEEE, 2023) keine Vorgaben. Des Weiteren ist die Verwendung unternehmensspezifischer bzw. organisationsspezifischer Prozesse möglich und wird nicht von der Norm ausgeschlossen. Eine umfassende Beschreibung der einzelnen Prozesse ist in (ISO/IEC/IEEE, 2023, S. 22 ff.) enthalten.

Ein anschauliches Diagramm, das die Zusammenhänge zwischen Systems Engineering, Systems Thinking und dem im folgenden Unterkapitel vorgestellten modellbasierten Systems Engineering (MBSE) sowie der damit verbundenen Modellierung darstellt, findet sich im Systems Engineering Konzept von (Haberfellner *et al.*, 2019, S. 4). Abbildung 3-9 zeigt eine vereinfachte Version dieses Konzepts, in der Systems Thinking als Bestandteil der Systems Engineering Prinzipien einen Beitrag zum Problemlösungsprozess leistet und MBSE als einsetzbares Werkzeug den Systementwurf unterstützt. Die Aspekte sind in der Darstellung entsprechend hervorgehoben.

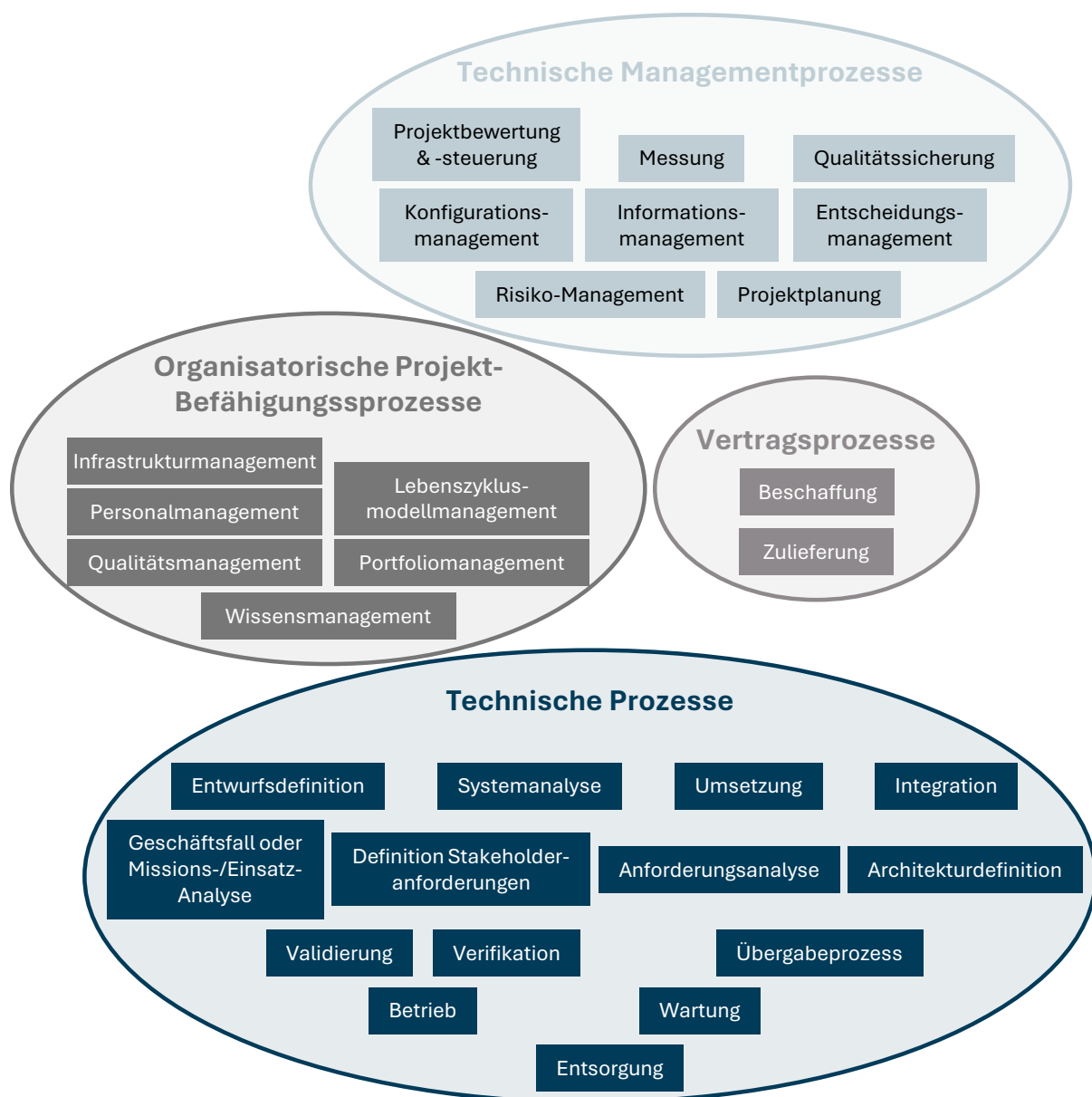


Abbildung 3-8: Die Prozesse der (ISO/IEC/IEEE, 2023, S. 21) i.A. an (Lindemann, 2016, S. 157)

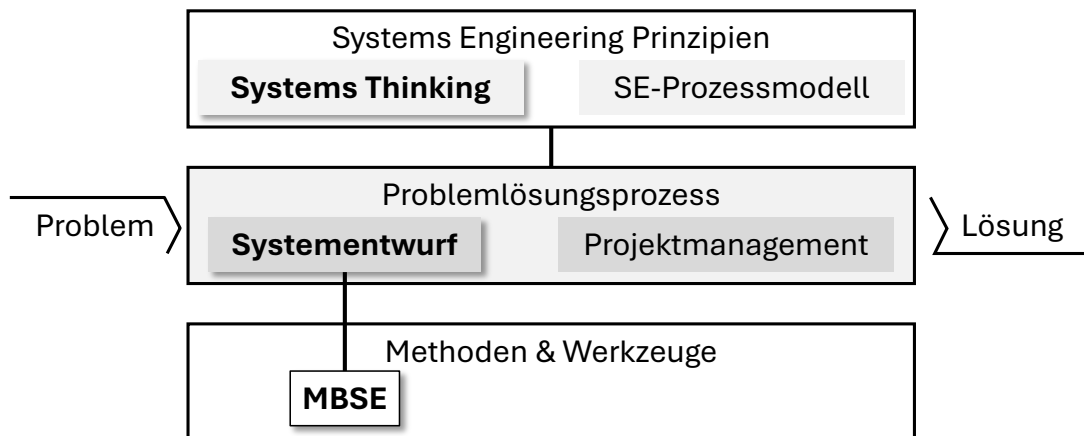


Abbildung 3-9: Das vereinfachte Systems Engineering Konzept. i.A. an (Haberfellner et al., 2019, S. 6)

3.2.3 Modellbasiertes Systems Engineering

Der Begriff des modellbasierten Systems Engineering (MBSE) wurde erstmals 1993 von (Wymore, 1993) eingeführt (Madni et al., 2018, S. 311). MBSE versteht sich als ein Ansatz im Systems Engineering, bei dem das Modell des Systems als primäres Artefakt des Systems Engineering Prozesses fungiert (Friedenthal und Oster, 2017, S. 2). Das Systemmodell beschreibt das System in Bezug auf Spezifikation, Entwurf, Analyse sowie Verifikation und Validierung. Detaillierte Daten und Informationen zum Systementwurf sind jedoch in anderen Modellen enthalten. Das MBSE-Modell bzw. Systemmodell wird während des gesamten Lebenszyklus des Systems verwaltet und aktualisiert. Dies ist entscheidend, um eine genaue und konsistente Systemdefinition zu erreichen, die sich bis auf die Bedürfnisse der Stakeholder und den daraus abgeleiteten Anforderungen zurückführen lässt (Friedenthal und Oster, 2017, S. 2). Das Modell dient als einzige „Quelle der Wahrheit“, da alle systembezogenen Informationen zentral gespeichert sind. Es reflektiert sowohl den Zustand als auch den Status der Systementwicklung und ermöglicht verschiedene Perspektiven auf das zu entwickelnde System (Madni et al., 2018, S. 312). Durch die Darstellung unterschiedlicher Perspektiven können verschiedene Interessensgruppen den aktuellen Status der Systementwicklung einsehen, was positiv auf Entscheidungsprozesse wirkt und das effektive Abrufen relevanter Informationen ermöglicht (Madni et al., 2018, S. 312).

Die allgemein akzeptierte Definition von MBSE ist in (INCOSE, 2015) dokumentiert. (INCOSE, 2015, S. 189) definiert MBSE als formalisierte Anwendung der Modellierung zur Unterstützung von Systemanforderungen, Design, Analyse, Verifikation und Validierung, beginnend in der konzeptionellen Entwurfsphase und fortlaufend über die Entwicklungs- und späteren Lebenszyklusphasen. (Delligatti, 2013) beschreibt die grundlegenden Elemente von MBSE in anschaulicher Weise anhand der folgenden drei Säulen und verdeutlicht damit die Formalisierung: Die erste Säule umfasst eine Sprache, die die im Modell definierbaren Elemente und Beziehungen festlegt. Die zweite Säule, die Methode, beschreibt die Nutzung dieser Sprache zur Erstellung eines Systemmodells. Die dritte Säule, das Werkzeug, bietet eine Benutzerschnittstelle, die den Modellerstellungsprozess rationalisiert und erleichtert. Abbildung 3-10 illustriert diese drei Säulen des MBSE. In den nachfolgenden zwei Unterkapiteln werden die beiden Säulen Modellierungssprachen und Modellierungswerkzeuge eingehend erläutert. Eine passende abschließende und prägnante Aussage zu MBSE ist in (Cornford und Feather, S. 3) formuliert: Bei MBSE dreht sich im Kern alles um Daten und deren Beziehungen.

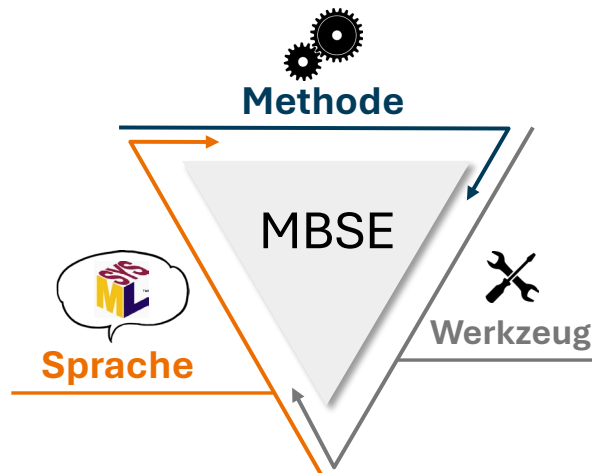


Abbildung 3-10: Die drei Säulen des MBSE i.A. an (Delligatti, 2013)

3.2.4 Modellierungssprachen für Systeme

Modellierungssprachen repräsentieren Modellierungsnotationen, die in der Lage sind, mehrere Systemaspekte darzustellen. Sie erstrecken sich über verschiedene Sichten und verknüpfen diese miteinander (Reichwein und Paredis, 2011, S. 5). Diese Sprachen bestehen aus einer Reihe von Konzepten und Regeln, die es Modellierern ermöglichen, spezifische Sichten auf ein System zu erstellen und zu modifizieren. Durch die festgelegte und eindeutig definierte Bedeutung der Konzepte, Symbole und Regeln minimieren Modellierungssprachen Mehrdeutigkeiten (Reichwein und Paredis, 2011, S. 5). Sie tragen somit zur Reife des MBSE bei und fördern dessen Akzeptanz in verschiedenen Industriezweigen, einschließlich der Luft- und Raumfahrt sowie der Verteidigungsindustrie (Friedenthal und Oster, 2017, S. 2).

Nach (Saqui-Sannes *et al.*, 2022, S. 2) basiert diese Definition, ähnlich wie natürliche Sprachen oder Programmiersprachen, auf der Festlegung von Syntax und Semantik. Die Semantik analysiert die Beziehung zwischen den Ausdrücken einer Sprache und ihrer Bedeutung, ohne Bezugnahme auf die Nutzer der Sprache, während die Syntax die formalen Beziehungen zwischen den Ausdrücken einer Sprache abstrahiert, sowohl von ihrer Bedeutung als auch von den Benutzern der Sprache. Syntax und Semantik einer Sprache haben einen abstrakten Charakter; sie definieren, was als korrekte Verwendung der Sprache anzusehen ist, und stützen eine abstrakte Theorie auf diese Definition, ohne dabei auf die praktische Anwendung der Sprache durch die Nutzer einzugehen (Church, 1943, S. 298). (Saqui-Sannes *et al.*, 2022, S. 4) teilen die Modellierungssprachen in formale, semi-formale und nicht formale Sprachen ein. Abbildung 3-11 veranschaulicht diese Einteilung und beinhaltet Sprach-Beispiele in den jeweiligen Kategorien. (Zahid *et al.*, 2022, S. 1604) beschreiben diese drei Kategorien wie folgt:

- Unter nicht formalen Sprachen versteht man informelle Methoden, die den natürlichen Sprachen ähneln. Sie zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität und Ausdruckskraft aus. Aufgrund der inhärenten Mehrdeutigkeit informeller Methoden erfordern sie einen erheblichen menschlichen Aufwand, was eine Automatisierung äußerst anspruchsvoll macht.
- Semi-formale Sprachen (Semi formal methods, kurz SFM) zeichnen sich durch eine präzise Syntax und gemeinsame Vokabulare aus, was Mehrdeutigkeiten reduziert. Sie erfordern jedoch immer noch einen gewissen menschlichen Aufwand zur Interpretation ihrer Semantik, weshalb eine vollständige Automatisierung ebenfalls sehr herausfordernd ist.

- Formale Sprachen (Formal methods, kurz FM) besitzen eine präzise definierte Syntax und Semantik. Sie werden eingesetzt, um das Prinzip der Korrektheit durch Konstruktion, insbesondere in sicherheitskritischen Kontexten, zu ermöglichen. Dadurch soll das Entstehen von Fehlerquellen so weit wie möglich vermieden und vorhandene Fehlerquellen schnellstmöglich beseitigt werden. Die Einführung und Nutzung formaler Methoden erfordern allerdings spezielles Fachwissen und eine entsprechende Ausbildung. Außerdem sind sie nicht so gut skalierbar wie informelle oder semi-formale Methoden (Zahid *et al.*, 2022, S. 1604; Guttag *et al.*, 1993).

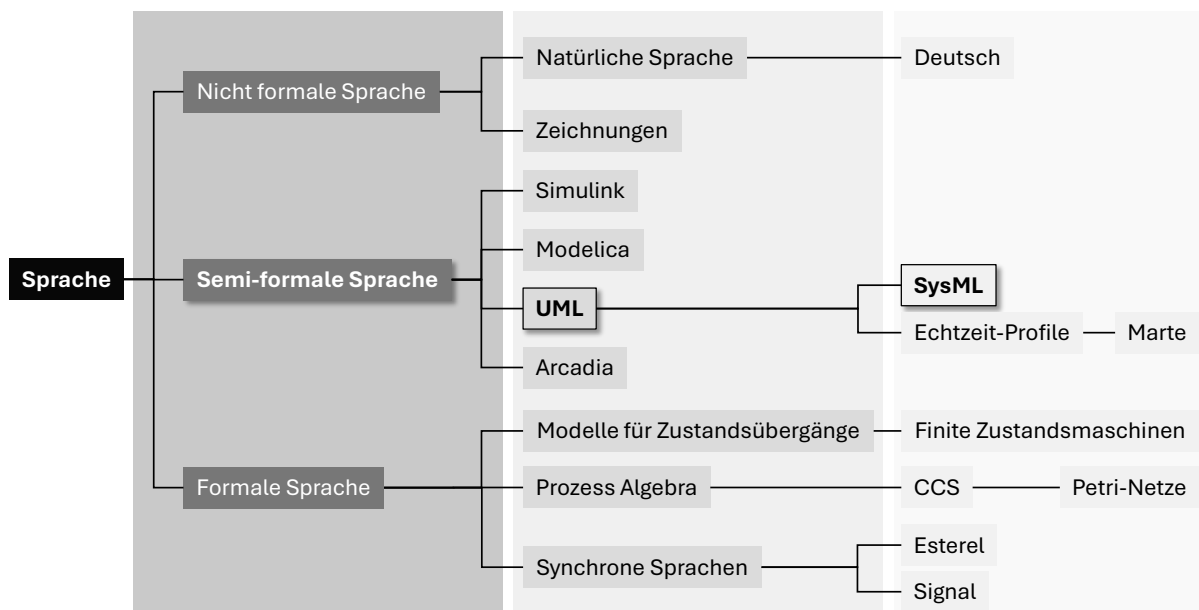


Abbildung 3-11: Einteilung der Modellierungssprachen i.A. an (Saqui-Sannes *et al.*, 2022, S. 4)

Wie in Abbildung 3-11 ersichtlich, wird die Systems Modeling Language (SysML), die in dieser Arbeit verwendet wird, den semi-formalen Sprachen zugeordnet. Sie ist ein Profil der Unified Modeling Language (UML), welches von der Object Management Group (OMG) in Zusammenarbeit mit dem International Council on Systems Engineering (INCOSE) standardisiert wurde (Amyot *et al.*, 2016, S. 1). Die UML ist eine Allzweck-Modellierungssprache, die zur Spezifikation, Visualisierung, Konstruktion und Dokumentation von Softwareartefakten dient. Sie erfasst Entscheidungen und Erkenntnisse, die während der Entwicklungsaktivitäten entstehen (Rumbaugh *et al.*, 1999, S. 3). Während die UML hauptsächlich auf Software fokussiert ist, deckt die SysML auch Systeme ab, die Hardware und Software kombinieren, wie z.B. cyber-physikalische Systeme (CPS) und Systeme von Systemen (SoS).

Die SysML erweitert die UML 2 um Sequenz-, Zustandsmaschine-, Anwendungsfall- und Paketdiagramme und fügt Aktivitäts-, Klassen- und zusammengesetzte Strukturdiagramme hinzu. Zwei neue Diagrammtypen sind parametrische Diagramme und Anforderungsdiagramme (Amyot *et al.*, 2016, S. 1). Abbildung 3-12 bietet eine Übersicht über die Diagrammtypen, die durch die SysML bereitgestellt werden. Umfassende Informationen zur UML und zur SysML, einschließlich ihrer Diagrammtypen, Konzepte und Elemente, finden sich in den Standarddokumentationen der OMG (OMG, 2015, OMG, 2019). Diese Arbeit konzentriert sich auf die Nutzung der SysML, die nach (Hause, 2006, S. 2) als Standardmodellierungssprache für das Systems Engineering zur Analyse, Spezifikation, Entwicklung und Verifikation komplexer Systeme konzipiert wurde.

Informationen zu weiteren Modellierungssprachen sind in den Arbeiten von (Saqui-Sannes *et al.*, 2022) und (Dickopf, 2020) enthalten. Obwohl die SysML Stereotypen und neue Diagrammtypen zur UML hinzufügt, bleibt sie eine Allzweck-Modellierungssprache. Neben solchen Allzweck-Modellierungssprachen existieren zahlreiche domänenspezifische Modellierungssprachen (DSL's), die auf spezifische Systemdomänen zugeschnitten sind. Diese bieten Entwicklern, die über spezifisches Fachwissen verfügen, eindeutige und leicht interpretierbare Sprachen, was die Systemmodellierung erheblich erleichtert (Kerzhner und Paredis, 2009, S. 2). Bei solchen domänenspezifischen Sprachen werden die Allzweck-Modellierungssprachen durch die Definition von Stereotypen um domänenspezifische Begriffe und Konzepte erweitert. Dabei ist es möglich, eine Ontologie als Grundlage für die Entwicklung einer DSL zu verwenden. Durch die Ontologie werden Konzepte und Beziehungen klar definiert, die in der DSL verwendet werden sollen. Die Ontologie stellt sicher, dass die DSL eine konsistente und formale Darstellung der Domäne bietet. In Kapitel 3.5 wird näher auf Ontologien eingegangen.

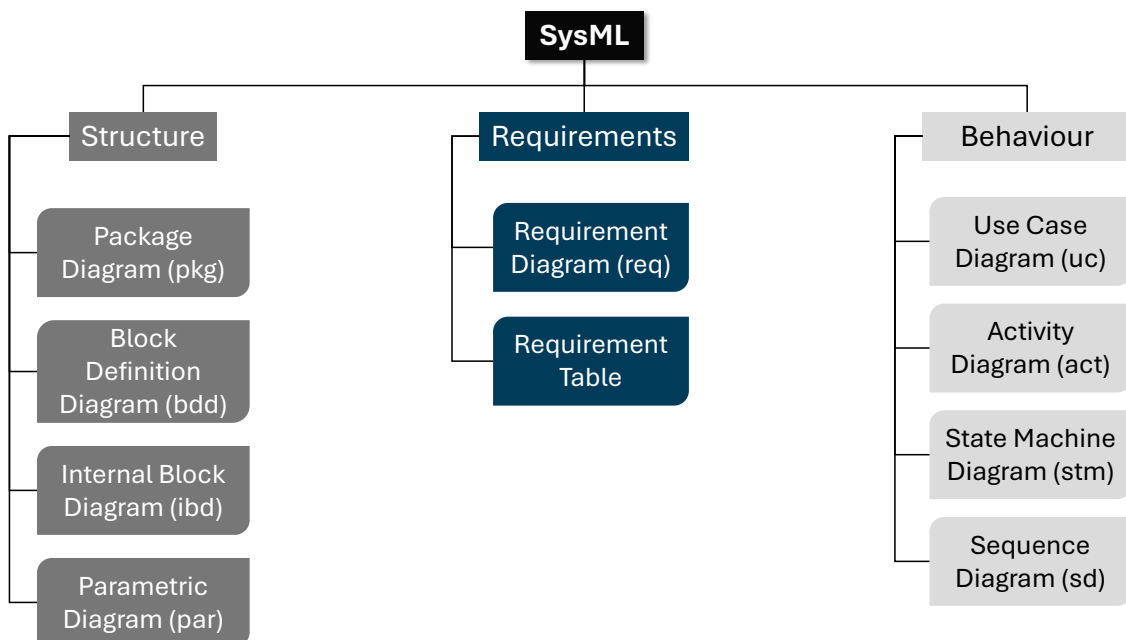


Abbildung 3-12: Diagrammtypen der SysML i.A. an (INCOSE, 2015, S. 187)

3.2.5 Modellierungswerkzeuge

Derzeit gibt es auf dem Markt eine große Auswahl an kommerziellen und nicht-kommerziellen Modellierungswerkzeugen (Dickopf, 2020, S. 20). (Khandoker *et al.*, 2022, S. 13) betrachten die richtige Werkzeugauswahl und die sachgemäße Verwendung des Modellierungswerkzeugs als entscheidenden Aspekt für den erfolgreichen Einsatz von MBSE-Techniken in Organisationen. Die Autoren haben daher ein Rahmenwerk entwickelt, das eine Filtermethode zur Auswahl eines spezifischen MBSE-Tools für einen bestimmten Anwendungsbereich beinhaltet und damit Organisationen bei der richtigen Werkzeugauswahl unterstützt. Tabelle 3-4 zeigt eine Auswahl an bekannten Modellierungswerkzeugen, die unter anderem in dem Rahmenwerk von (Khandoker *et al.*, 2022) berücksichtigt werden. Die Tabelle gibt Aufschluss darüber, ob das jeweilige Modellierungswerkzeug eine werkzeugeigene Methodik beinhaltet, welche Sprache vorrangig mit dem Tool verwendet werden kann und ob es sich bei dem jeweiligen Tool um ein kommerzielles Produkt des jeweiligen Anbieters handelt oder als Open-Source-Programm frei verfügbar ist.

Die Tabelle bietet lediglich einen kleinen Ausschnitt der derzeit verfügbaren und bekannten Modellierungswerkzeuge, um eine hinreichende Übersicht und ein grundlegendes Verständnis im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu gewährleisten. Weiterführende Informationen zu Modellierungswerkzeugen und deren Kategorisierung finden sich in den Arbeiten von (Khandoker *et al.*, 2022) und (Saqui-Sannes *et al.*, 2022).

*Tabelle 3-4: Auswahl an MBSE-Modellierungswerkzeugen i.A. an (Khandoker *et al.*, 2022, S. 8)*

Werkzeug	Methodik	Sprache	Anbieter	Kommerziell
Cameo Systems Modeler	Magic Grid	UML, SysML, BPMN	Dassault Systemes (vormals No Magic)	Ja
IBM Rational Rhapsody	Harmony SE	UML, SysML, BPMN	IBM	Ja
Enterprise Architect	-	UML, SysML, BPMN	Sparx Systems	Ja
Capella	Arcadia	Arcadia, DSML	Eclipse Foundation (vormals Thales)	Nein
Papyrus	-	UML, SysML, BPMN	Eclipse Foundation	Nein
Innoslate	-	LML, SysML	SPEC Innovations	Ja

3.3 Requirements Engineering

(Dickopf, 2020, S. 11) beschreibt das Requirements Engineering (RE) als einen Prozess, der sich mit zukünftigen Situationen und dem damit verbundenen Wandel befasst. Dies umfasst das Sammeln von Informationen, das Abwägen möglicher Optionen und die Identifikation dessen, was entwickelt werden sollte, um bestimmte zukünftige Bedürfnisse zu erfüllen.

(Pohl und Rupp, 2015, S. 4) definieren das Requirements Engineering als einen systematischen und disziplinierten Ansatz zur Spezifikation und Verwaltung von Anforderungen, der zwei Hauptziele verfolgt: Erstens, die relevanten Anforderungen zu identifizieren, einen Konsens unter den Stakeholdern zu erreichen, diese Anforderungen gemäß vorgegebenen Standards zu dokumentieren und systematisch zu verwalten. Zweitens, sowohl die Dokumentation und das Verständnis der Stakeholder-Bedürfnisse als auch die Spezifikation und das Management der Anforderungen zu gewährleisten, um das Risiko zu minimieren, ein System zu entwickeln, das nicht den Bedürfnissen und Wünschen der Stakeholder entspricht.

Die Autoren identifizieren vier Kernaktivitäten im Requirements Engineering, die auf unterschiedliche Abstraktionsebenen wie Stakeholder-Anforderungen, Systemanforderungen oder Komponenten- und Softwareanforderungen anwendbar sind:

- Anforderungsermittlung, einschließlich der Detaillierung und Verfeinerung der ermittelten Bedürfnisse.
- Anforderungsdokumentation, einschließlich der präzisen Beschreibung der Anforderungen.
- Validierung sowie frühe Diskussion und Anpassung der Anforderungen.
- Anforderungsmanagement, das orthogonal zu allen anderen Aktivitäten steht und Maßnahmen umfasst, die notwendig sind, um Anforderungen zu strukturieren, sie für verschiedene Rollen nutzbar zu machen, Konsistenz nach Änderungen zu wahren und ihre Umsetzung zu sichern.

(Dick *et al.*, 2017, S. 9) definieren Requirements-Engineering als Teilmenge des Systems Engineering, das sich mit dem Ermitteln, Entwickeln, Verfolgen, Analysieren, Qualifizieren, Kommunizieren und Verwalten von Anforderungen befasst, die das System auf aufeinanderfolgenden Abstraktionsebenen definieren. (Dick *et al.*, 2017) erweitern damit die vier Kernaufgaben von (Pohl und Rupp, 2015) um wichtige Aufgabenstellungen im Rahmen des Requirements Engineering. Schließlich betont (Dick *et al.*, 2017, S. 11), dass sich das Requirements Engineering aufgrund der Wichtigkeit der Anforderungsanalyse in jeder Phase des Produktentwicklungsprozesses nicht nur auf die frühe Phase beschränken sollte, sondern in jeder Phase des Entwicklungsprozesses durchgeführt werden sollte. Abbildung 3-13 fasst die wichtigsten Aktivitäten zusammen und veranschaulicht die Definition der Abstraktionsebenen nach (Dick *et al.*, 2017).

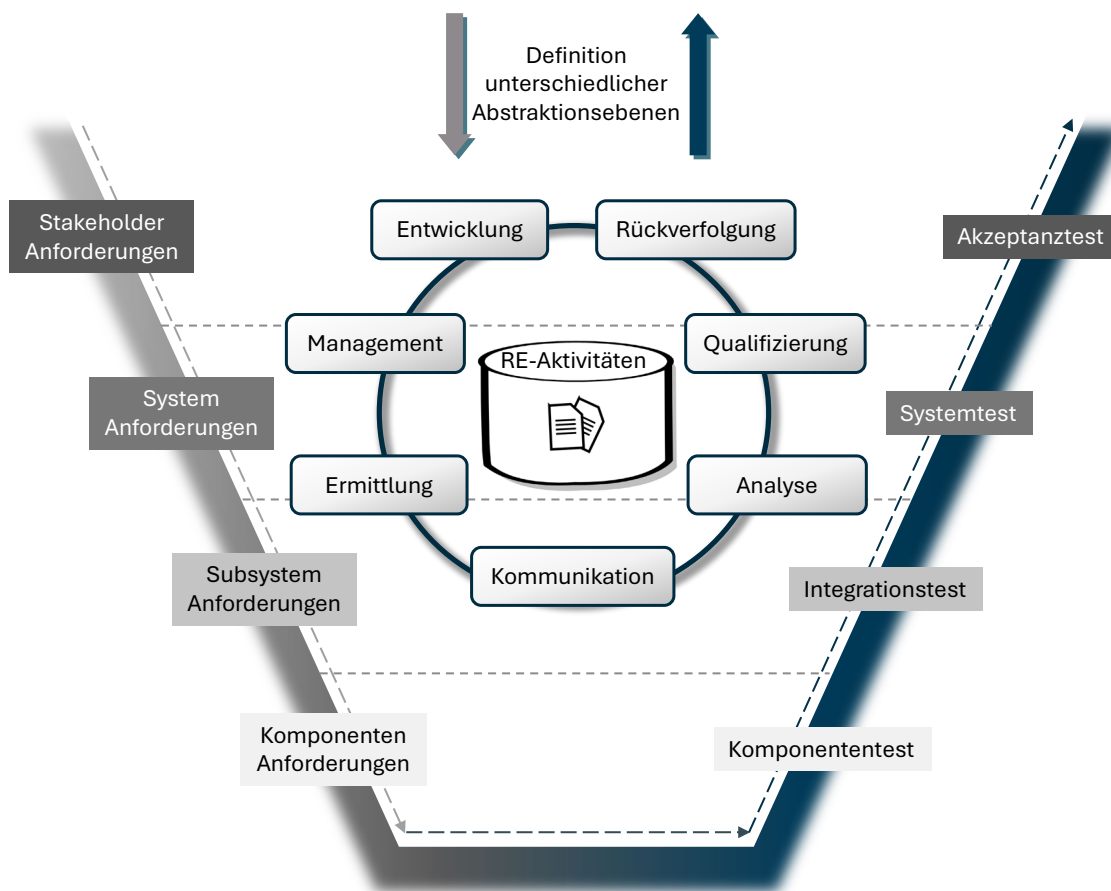


Abbildung 3-13: Aktivitäten und Ebenen des Requirements Engineering i.A. an (Gadzo *et al.*, 2022, S. 3)

In der vorliegenden Arbeit wird für den Begriff der *Anforderung* die Definition der IEEE verwendet, um Konsistenz mit den zuvor herangezogenen Werken zu gewährleisten. Eine Anforderung wird laut (IEEE, 2005, S. 9) als eine Aussage definiert, die ein betriebliches, funktionales oder konstruktives Produkt- oder Prozessmerkmal oder eine Einschränkung identifiziert, die eindeutig, prüfbar oder messbar ist und für die Produkt- oder Prozessakzeptanz durch Verbraucher oder interne Qualitätssicherungsrichtlinien notwendig ist. Weitere Definitionsvarianten des Begriffes sind unter anderem in (Holt *et al.*, 2012, S. 4 ff.) dokumentiert.

Anforderungen können nach ihrer Art differenziert und entsprechend in Gruppen eingeteilt werden (Rupp, 2014, S. 17). (Pohl und Rupp, 2015, S. 8) unterscheiden grundsätzlich zwischen drei Arten von Anforderungen:

1. Funktionale Anforderungen, die sich auf das Ergebnis eines Verhaltens beziehen, das von einer Funktion eines Systems oder einer Komponente bereitgestellt werden soll.
2. Qualitätsanforderungen, die sich auf einen Qualitätsaspekt beziehen, der nicht durch funktionale Anforderungen abgedeckt ist. Qualität wird in der (DIN, 2015, S. 39) als der Grad definiert, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt.
3. Beschränkungen bzw. Einschränkungen, die den Lösungsraum über das hinaus einschränken, was zur Erfüllung der gegebenen funktionalen Anforderungen und Qualitätsanforderungen notwendig ist.

Weitere Beispiele für Einteilungsmöglichkeiten von Anforderungen finden sich in (Rupp, 2014, S. 17 ff.) und in der (ECSS, 2009a, S. 18 ff.). Ein wichtiger Aspekt ist die Qualität, mit der eine Anforderung formuliert wird. (Rupp, 2014, S. 26 ff.) definiert neun Kriterien für eine wohlformulierte Anforderung, die im Folgenden zusammengefasst sind. Zusätzlich stellt (Rupp, 2014) auf diesen Kriterien basierende Schablonen für die Anforderungsformulierung zur Verfügung:

1. *Vollständigkeit*: Die geforderte Funktionalität sollte vollständig beschrieben sein und muss ausreichenden Informationsgehalt bieten, um die Forderungen der Stakeholder wiedergeben zu können.
2. *Notwendigkeit*: Eine Anforderung dient der Erfüllung eines Systemziels, weshalb nur Leistungsaspekte oder Eigenschaften beschrieben werden sollten, die tatsächlich notwendig sind.
3. *Atomar*: Jeder Anforderungssatz sollte genau eine Anforderung enthalten, was bedeutet, dass genau ein Vollverb (Prozesswort) verwendet wird und keine Konjunktionen vorkommen sollten.
4. *Verfolgbarkeit*: Eine Anforderung muss zu ihrer Quelle rückverfolgbar sein, wie beispielsweise einer Stakeholder-Aussage oder einer abstrakteren Anforderung.
5. *Technische Lösungsneutralität*: Eine Anforderung soll ausschließlich eine Forderung beschreiben und dabei keine Aussagen zur Art und Weise der Umsetzung enthalten.
6. *Realisierbarkeit*: Jede definierte Anforderung sollte innerhalb der bekannten Fähigkeiten und der Grenzen des Systems und seiner Umgebung umsetzbar sein.
7. *Konsistenz*: Jede Anforderung muss widerspruchsfrei gegenüber allen anderen Anforderungen sein.
8. *Eindeutigkeit*: Eine Anforderung sollte nur auf eine Art und Weise verstanden werden und keine Mehrdeutigkeiten enthalten.
9. *Prüfbarkeit*: Jede Anforderung sollte so formuliert sein, dass sie testbar und prüfbar ist.

3.4 Design Thinking

Um ein grundlegendes Verständnis von Design Thinking zu schaffen, wird zunächst der englischsprachige Begriff *Design* erörtert, der im Deutschen mit *Entwurf* oder *Konstruktion* übersetzt werden kann (Freibott und Schmalenbach, 1999). Design wird, wie (Adams, 2015, S. 4) beschreibt, als der Prozess definiert, in dem die Architektur, Komponenten, Schnittstellen und andere Merkmale eines Systems oder einer Komponente festgelegt werden. (Ulrich et al., 2020, S. 3) sowie die (VDI 2424, 1986, S. 7) fassen das *Engineering Design* bzw. die Konstruktion und das *Industrial Design* zusammen unter dem Begriff Design. Diese beiden Aspekte werden als komplementär betrachtet, obwohl sie unterschiedliche Schwerpunkte haben. Engineering Design bezieht sich nach (Feldhusen und Grote, 2013, S. 13) auf alle Arbeitsschritte von der Produktidee bis zur Herstellung der Fertigungsmittel, mit einem primären Fokus auf technischen Funktionalitäten, während Industrial Design stärker die Interaktion mit dem Menschen hervorhebt (VDI 2424, 1986, S. 7). (Dym et al., 2005, S. 104) sehen diese beiden Aspekte als Teile des Engineering Designs bzw. der Produktentwicklung, dass sie als einen systematischen, intelligenten Prozess definieren, in dem Entwickler Konzepte für Geräte, Systeme oder Prozesse entwickeln, bewerten und spezifizieren, die sowohl den Zielen des Kunden als auch den Bedürfnissen der Anwender entsprechen und dabei eine Reihe von Randbedingungen erfüllen. Diese konzeptionellen Definitionen sind technisch sehr konkret und daher für das Verständnis im Rahmen von MBSE besonders wertvoll. Um Design Thinking jedoch aus einer ganzheitlicheren Perspektive zu verstehen, wird die abstraktere Definition von (Simon, 1981, S. 95) herangezogen, die Design als die Entwicklung von Handlungsweisen beschreibt, die darauf abzielen, bestehende Situationen in bevorzugte zu verwandeln. Diese Definition betont auch die Verbindung zwischen den Bedürfnissen und dem Design. Der Terminus *Design Thinking* wird in vielen Arbeiten ausführlich diskutiert und unterschiedlich interpretiert (Tekaat et al., 2021, S. 2). (Ney und Meinel, 2019, S. 4) erörtern in ihrer Arbeit ausführlich die Frage, was Design Thinking ausmacht. Die beiden Autoren betrachten Design Thinking als eine dynamische Interaktion heterogener Teams, die Design Thinking in einem Innovationsraum stattfinden lassen und einem Prozess folgen. Sie nutzen dabei die umfassende Interpretation von (Johansson-Sköldberg et al., 2013) als Grundlage. Abbildung 3-14 veranschaulicht eine Zusammenfassung des Konzepts von (Johansson-Sköldberg et al., 2013) und bietet eine prägnante Übersicht der verschiedenen Sichtweisen, die auf zwei unterschiedlichen Diskursen basieren.

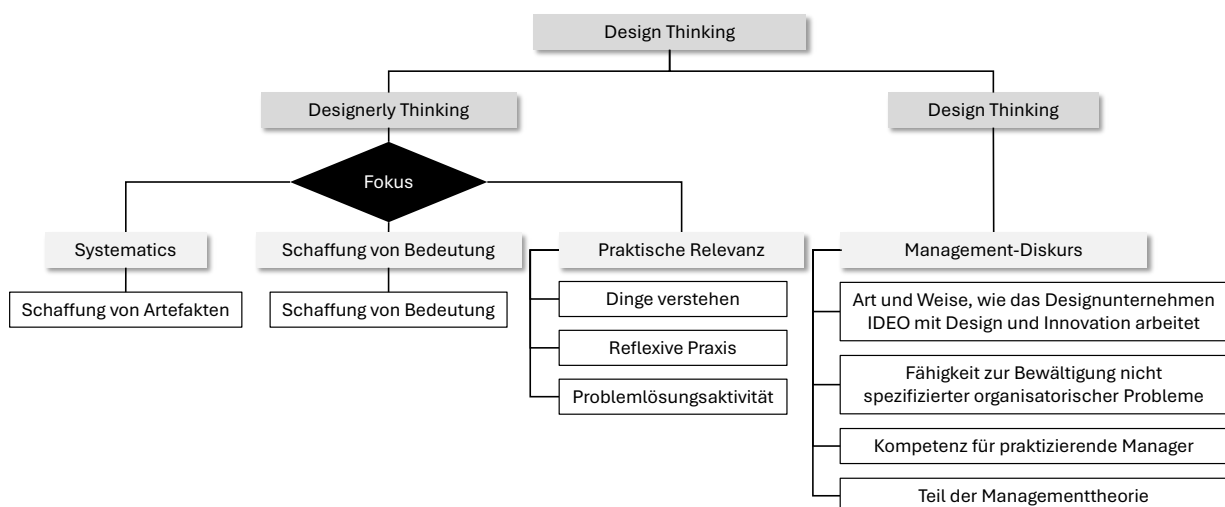


Abbildung 3-14: Design Thinking Sichtweisen nach (Johansson-Sköldberg et al., 2013)

Diese Diskurse unterscheiden sich durch ihre jeweiligen Perspektiven. Tabelle 3-5 enthält die literarischen Quellen zu den jeweiligen Sichtweisen. Der erste Diskurs fokussiert sich auf eine akademische Sichtweise des Design Thinking, für die der Begriff Designerly Thinking bzw. designerisches Denken verwendet wird. Der zweite Diskurs hingegen findet in einem nicht-akademischen Kontext statt und verfügt über keinen nennenswerten wissenschaftlichen Design-Hintergrund. Er beinhaltet die bekannte Beschreibung von Design Thinking in der Arbeit von (Brown, 2008). Darin beschreibt (Brown, 2008, S. 1) Design Thinking eine Methodik, die das gesamte Spektrum der Innovationsaktivitäten mit einem auf den Menschen ausgerichteten Design-Ethos durchdringt. Es ist ein auf den Menschen ausgerichteter, kreativer, iterativer und praktischer Ansatz (Brown, 2008, S. 9), der die Kreativität und Techniken von Designern verwendet, um die Bedürfnisse der Menschen mit den technischen Möglichkeiten und erfolgreichen Geschäftsstrategien zu verbinden. Das Ziel ist es, Produkte zu schaffen, die sowohl nützlich für Kunden sind als auch gute Marktchancen bieten. (Di Russo, 2016, S. 37) hebt hervor, dass der menschenbezogene Aspekt beim Design Thinking eine herausragende Rolle spielt. (Dumitrescu *et al.*, 2021, S. 95) betrachten Design Thinking als eine Kreativitätsstrategie, die dazu dient, originelle Ideen zu entwickeln sowie die Komplexität von Entwicklungsaufgaben zu reduzieren und deren Handhabbarkeit zu erhöhen. Basierend auf diesen Interpretationen lassen sich folgende Eigenschaften des Design Thinking identifizieren, die im Kontext dieser Arbeit relevant sind: Problemlösung, Komplexitätsreduktion, Verstehen, Beobachten, Menschenzentriertheit und, nach (Camacho, 2018, S. 631), Systemorientierung.

Zusammenfassend lässt sich Design Thinking im Kontext der vorliegenden Arbeit wie folgt verstehen: Design Thinking ist ein menschenzentrierter, iterativer und mit Empathie verbundener Problemlösungsansatz. Es werden kreative und systematische Denk- und Arbeitsweisen von Entwicklern genutzt und gefördert, um komplexe Entwicklungsaufgaben handhabbar zu machen, wobei die Bedürfnisse und Sichtweisen der Nutzer auf das Produkt in den Mittelpunkt gestellt werden.

Tabelle 3-5: Übersicht Quellen der Sichtweisen

Sichtweise	Quelle
Designerly Thinking	
Schaffung von Artefakten	(Simon, 1981)
Schaffung von Bedeutung	(Krippendorff, 2005)
Dinge verstehen	(Lawson, 2005; Cross, 2006, 2023)
Reflexive Praxis	(Schön, 1994)
Problemlösungsaktivität	(Buchanan, 1992)
Design Thinking	
Art und Weise, wie das Designunternehmen IDEO mit Design und Innovation arbeitet	(Kelley und Littman, 2001, 2005; Brown, 2008; Brown und Katz, 2009)
Fähigkeit zur Bewältigung nicht spezifizierter organisatorischer Probleme	(Dunne und Martin, 2006; Martin, 2009)
Kompetenz für praktizierende Manager	(Dunne und Martin, 2006; Martin, 2009)
Teil der Managementtheorie	(Boland und Collopy, 2004)

3.5 Ontologien

Um die Rolle von Ontologien in der Strukturierung, Verwaltung und Bearbeitung von Daten und Informationen zu verstehen, ist es zunächst notwendig, den Begriff *Wissen* zu betrachten, der den grundlegenden Baustein darstellt, auf dem Ontologien aufbauen und operieren. Die Definition des Begriffs Wissen ist jedoch nicht so trivial, wie es möglicherweise den Anschein macht. Es gibt weder eine allgemein anerkannte Auffassung des Begriffs noch ein allgemeines Verständnis seines Inhalts. Aus diesem Grund führen (Amelingmeyer, 2004, S. 40 ff.) und (Frey-Luxemburger, 2014, S. 13 ff.) jeweils einen wissenschaftlichen Diskurs zur Klärung des Begriffs Wissen und haben zu diesem Zweck eine umfassende Auswahl an Definitionsbeispielen dokumentiert. Tabelle 3-6 zeigt das Ergebnis des jeweiligen Diskurses in Form der resultierenden Eigendefinition des Wissensbegriffes der beiden Autoren. Die Definition von (Frey-Luxemburger, 2014) schließt dabei zusätzlich die Begriffe Daten und Informationen mit ein und orientiert sich an den Ausführungen von Seiler und Reinmann in (Reinmann und Mandl, 2004).

Tabelle 3-6: Definitionen des Begriffsfeldes Wissen

Autor	Definition
(Amelingmeyer, 2004, S. 43)	Wissen ist jede Form der Repräsentation von Teilen der realen oder gedachten Welt in einem körperlichen Trägermedium.
(Frey-Luxemburger, 2014, S. 20)	Wissen ist zu unterscheiden in personales und öffentliches Wissen. Personales Wissen kann Handlungswissen, intuitives Wissen und begriffliches Wissen sein. Öffentliches Wissen ist Wissen, das in Sprache gefasst ist und so als Information zwischen Wissensträgern ausgetauscht werden kann. Expliziertes, mit Hilfe von Zeichen abbildbares Wissen kann in Form von Daten gespeichert werden. Über das in Sprache gefasste Wissen hinaus kann Wissen auch in Form von Bildern oder Bildsequenzen (Videos) gespeichert und damit zwischen Sender und Empfänger ausgetauscht werden.

(Amelingmeyer, 2004, S. 43) betrachtet Wissen auf Grundlage ihrer Definition als das Ergebnis eines Erkenntnisprozesses, wobei Daten und Informationen als Teilmengen des Wissens angesehen werden. Daten entstehen aus Zeichen, die durch entsprechende Syntaxregeln zusammengesetzt werden (Probst *et al.*, 2006, S. 16). Um Daten in Informationen umzuwandeln, ist es notwendig, einen Bezug herzustellen und die Daten in einen Bedeutungskontext zu setzen (North, 2002, S. 38). Aufbauend auf diesen Überlegungen zu Daten und Informationen definiert (North, 2002, S. 39) Wissen als die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Personen zur Lösung von Problemen einsetzen. Dies umfasst sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Wissen stützt sich dabei auf Daten und Informationen, ist jedoch im Gegensatz zu diesen immer an Personen gebunden. (North, 2002) sieht Wissen als den Prozess der zweckdienlichen Vernetzung von Informationen. Diese Sichtweise auf den Wissensbegriff dient als Grundlage für die Betrachtungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit. Schließlich beschreiben (Gasevic *et al.*, 2006, S. 11), dass Menschen unterschiedliche Arten von Wissen nutzen, was auf die Fähigkeit des Menschen hindeutet, Wissen strukturiert zu

organisieren und effizient im Rahmen der Problemlösung einzusetzen. Basierend auf den Ausführungen von (Gasevic *et al.*, 2006, S. 12 ff.), sind im Folgenden die wichtigsten Wissenstypen zusammengefasst, die der Mensch nutzt:

- *Verfahrensbezogenes Wissen*: Umfasst Problemlösungsstrategien und Regelwerke. Hierbei geht es darum, wie etwas zu tun ist.
- *Deklaratives Wissen*: Bezieht sich auf Wissen, das über eine Themen- oder Problemstellung bekannt ist.
- *Metawissen*: Wird verwendet, um zu entscheiden, welches Wissen für die Lösung einer Problemstellung am geeignetsten ist und welches andere Wissen irrelevant ist und daher nicht berücksichtigt werden sollte. Es handelt sich um Wissen über Wissen.
- *Heuristisches Wissen*: Beinhaltet Faustregeln, die den Problemlösungsprozess auf der Grundlage früherer Erfahrungen, individueller Intuition und Fähigkeiten leiten.
- *Strukturelles Wissen*: Bezieht sich auf mentale Modelle und die Organisation von Problemen, Lösungen und deren jeweiligen Räumen.
- *Ungenaues und unsicheres Wissen*: Bezieht sich auf Problemstellungen und Situationen, in denen Informationen von Natur aus ungenau, nicht verfügbar, unvollständig, zufällig oder mehrdeutig sind.
- *Common-Sense Wissen*: Wird für den Typus Wissen verwendet, der gemeinhin eine große Menge an menschlichem Wissen darstellt, welches nicht einfach in Form von präzisen Theorien formuliert werden kann.
- *Ontologisches Wissen*: Ergänzt das Wissen über einen bestimmten Bereich. Ontologisches Wissen beschreibt die Kategorien und Begriffe der Dinge in einem betrachteten Gegenstandsbereich, die Menschen verwenden, um über sie zu kommunizieren.

3.5.1 Begriffsdefinition

Der Begriff *Ontologie* wurde in zahlreichen Werken ausführlich behandelt und umfassend beschrieben. Die Frage, was genau eine Ontologie ausmacht, bleibt jedoch ein Diskussionspunkt. Die Arbeit von (Schmalenbach, 2013) liefert eine detaillierte Herleitung des Begriffs, während (Mizoguchi, 2004) verschiedene Definitionen zusammenfasst und dem Leser Einblicke aus unterschiedlichen Perspektiven bietet. Ebenso führt (Guarino, 1997) einen tiefgreifenden Diskurs darüber, was Ontologien sind, und analysiert sowie interpretiert verschiedene Definitionen des Begriffs. Das *Handbook on Ontologies* von (Staab und Studer, 2009) ist ebenfalls als relevantes Grundlagenwerk zu erwähnen, in dem neben der Ontologie auch die Konzeptualisierung als Begriff und Korpus diskutiert wird. In der vorliegenden Arbeit wird das Konzept der Ontologie auf der Grundlage der genannten Arbeiten erläutert, um ein solides Verständnis zu ermöglichen und die Leser in die Lage zu versetzen, die Ergebnisse der Arbeit sinnvoll zu interpretieren. Der erste Schritt besteht darin, eine prägnante philosophische Sichtweise des Konzepts zu erläutern. Diese Sichtweise, obwohl abstrakt, ermöglicht ein Verständnis der Ontologie, das über einen anwendungsorientierten Kontext hinausgeht. Eine Ontologie umfasst die Lehre über das Wesen und die inhärenten Eigenschaften des Seins, wie von (Schmalenbach, 2013, S. 49) auf Grundlage von (Dígel, 1992) beschrieben, sie ist die Lehre von den Eigenschaften, die die Dinge aufgrund ihrer Natur haben, und hat das folgende Ziel (Guarino, 1997):

- Erkennen der grundlegenden Beziehungen der Wirklichkeit
- Beschreiben der strukturellen Beziehungen dieser Zusammenhänge in Form von Entitäten wie Personen, Objekten, Eigenschaften oder Prozessen

In Übereinstimmung mit (Schmalenbach, 2013, S. 52) wird daraus die Zielsetzung abgeleitet, dass das Erkennen dieser Zusammenhänge das Entstehen eines Verständnisses impliziert, das anschließend formalisiert und explizit artikuliert werden kann. Diese Art von Verständnis ermöglicht es, eine Brücke zwischen der philosophischen Perspektive und ihrer pragmatischen Anwendung zu schlagen. Dies führt zur Darstellung einer Weltanschauung, die sich auf einen bestimmten Wissensbereich bezieht und eine Zusammenstellung von Begriffen, ihren Definitionen und ihren Wechselbeziehungen innerhalb dieses Bereichs umfasst – eine Manifestation einer Ontologie. Abbildung 3-15 veranschaulicht die Beschreibung kurz und prägnant, wie sie von (Gruber, 1993b, S. 1) in der wohl am häufigsten zitierten Definition von Ontologie formuliert wird:

"Eine Ontologie ist eine explizite Spezifikation einer Konzeptualisierung."

In diesem Zusammenhang beschreibt (Gruber, 1993b, S. 1) eine Konzeptualisierung als eine gestraffte, zielgerichtete und vereinfachte Darstellung der Realität. Je nach Fokus dieser Konzeptualisierung kann zwischen Anwendungsontologien, Domänenontologien, generischen Ontologien und Repräsentationsontologien unterschieden werden (Guarino, 1997, S. 300). Ontologien repräsentieren in jedem Fall kontrollierte Vokabulare, die vereinbarte Mengen von explizit aufgeführten, eindeutigen und nicht redundanten Begriffen, Beziehungen und Einschränkungen umfassen (Gruber, 1993a, S. 5; Sievers, 2023, S. 24). Diese sind essenziell für die Erstellung und Interpretation von Modellen. Nach (Portelli et al., 2019, S. 4) lassen sich Ontologien in mehrere Ebenen einteilen. Ontologien der oberen Ebene verkörpern einen abstrakten Referenzrahmen, der unabhängig von einer bestimmten Anwendungsdomäne ist, während Ontologien der mittleren Ebene ein auf bestimmte Anwendungsdomänen zugeschnittenes Vokabular liefern und Ontologien der unteren Ebene, auch als Domänenontologien bekannt, ein für einzelne Anwendungsfälle spezifisches Vokabular bieten. Dieses Konzept fördert die Wiederverwendbarkeit der einzelnen Ontologien.

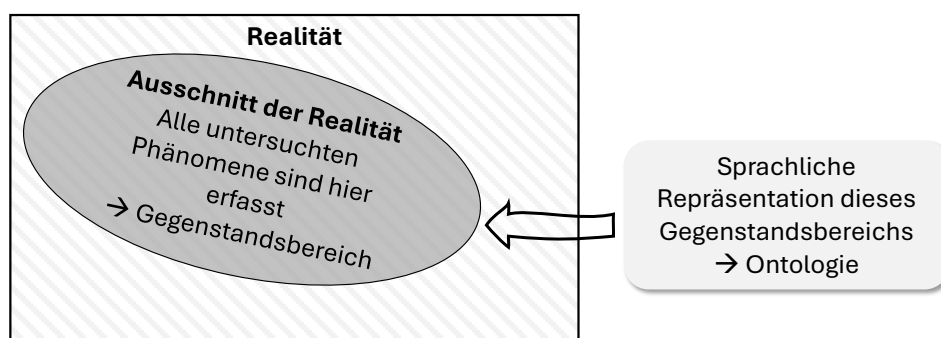


Abbildung 3-15: Veranschaulichung des Begriffes Ontologie, basierend auf (Schmalenbach, 2013)

Um den Begriff Ontologie anschaulicher zu beschreiben, werden die damit verbundenen Elemente *Konzept* (Klasse), *Eigenschaft* (Attribut) und *Beziehung* im Folgenden anhand eines einfachen Beispiels einer Fahrzeug-Ontologie erläutert: Die Ontologie definiert die *Klasse Fahrzeug* als Oberkonzept mit den *Unterklassen PKW* und *LKW* (Is a Beziehung). Jede Klasse besitzt spezifische Attribute: Ein Fahrzeug hat beispielsweise eine Höchstgeschwindigkeit und eine Anzahl an Rädern, während ein LKW zusätzlich eine Nutzlast definiert. Zwischen den Klassen bestehen zudem

Beziehungen: Ein Fahrzeug hat einen Motor und besteht aus Komponenten. Die Ontologie ermöglicht es, konkrete Informationen formal zu repräsentieren, beispielsweise dass ein konkreter *BMW 5er* eine *Instanz* der Klasse PKW ist, 4 Räder hat und eine Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h erreicht. Durch diese formale Struktur ist es unter anderem möglich, dass Maschinen logische Schlussfolgerungen ziehen und Wissen automatisiert verarbeiten. So lässt sich beispielsweise ableiten, dass ein BMW 5er auch ein Fahrzeug ist (Vererbung) oder welche Komponenten zu welchem Fahrzeug gehören. Abbildung 3-16 stellt dieses Beispiel grafisch dar.

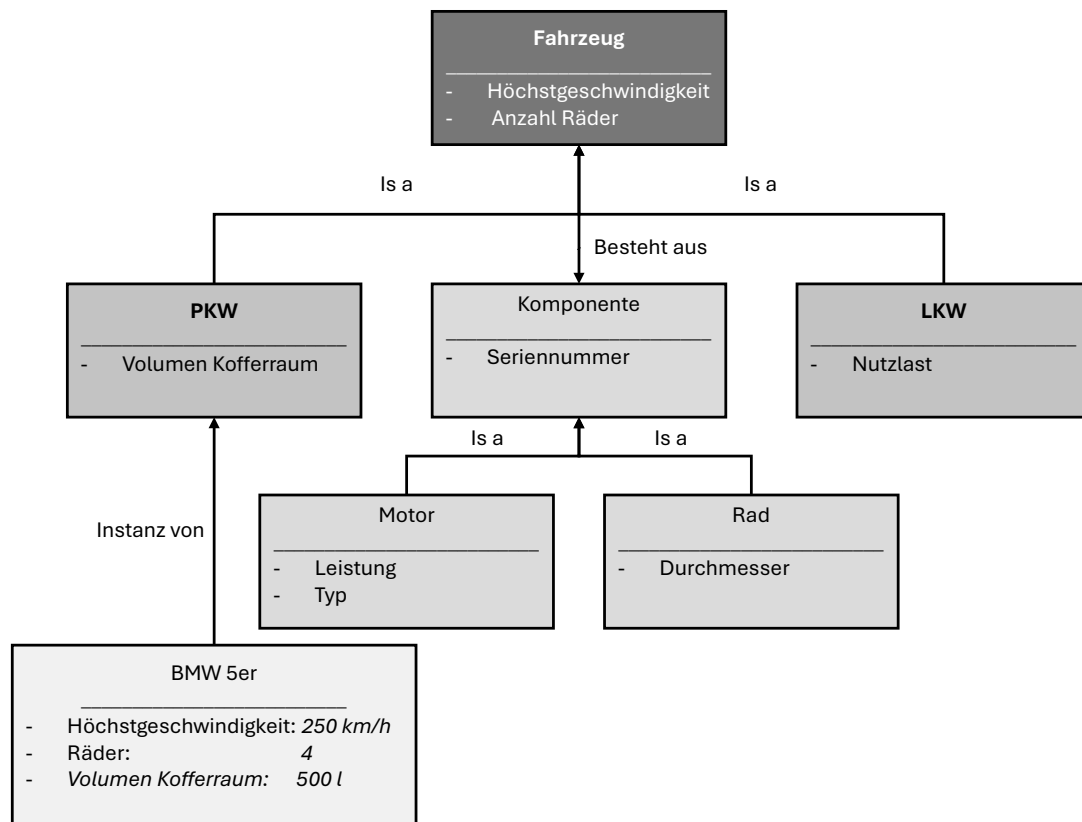


Abbildung 3-16: Grafische Darstellung einer beispielhaften Fahrzeug Ontologie

3.5.2 Bestandteile einer Ontologie

Die Bestandteile einer Ontologie können je nach Anwendungsbereich und Komplexität variieren. Eine ausführliche Beschreibung der Bestandteile einer Ontologie ist in (Gomez-Perez *et al.*, 2003, S. 9 ff.) dokumentiert. Im Allgemeinen umfassen Ontologien die folgenden grundlegenden Elemente, wie von (Schmalenbach, 2013, S. 52 ff.) beschrieben:

Klassen/Konzepte

Diese sind die Hauptbestandteile einer Ontologie und repräsentieren Gruppen oder Kategorien von Objekten innerhalb des Domänenbereichs. Klassen können in einer hierarchischen Struktur organisiert sein, wobei Oberklassen allgemeinere Konzepte und Unterklassen spezifischere Konzepte darstellen.

Instanzen/Individuen

Dies sind die konkreten Objekte oder Exemplare der Klassen. Zum Beispiel könnte in einer Ontologie über Weltraumobjekte die Klasse *Satellit* Instanzen wie *Kommunikationssatellit* und *Erdbeobachtungssatellit* haben.

Attribute/Eigenschaften

Attribute beschreiben die Eigenschaften oder Merkmale, die die Mitglieder einer Klasse haben können. Zum Beispiel könnte die Klasse *PKW* Attribute wie Farbe, Hersteller und Baujahr haben.

Relationen/Beziehungen

Beziehungen definieren die Art der Beziehungen zwischen den Klassen oder Instanzen. Beispielsweise könnte eine Relation *ist ein/Is a* oder *hat/has* sein, die angibt, wie Objekte oder Klassen miteinander in Beziehung stehen.

Einschränkungen/Regeln

Einschränkungen spezifizieren die Bedingungen oder Regeln, die für Klassen oder die Beziehungen zwischen Klassen gelten. Sie können verwendet werden, um die Datenintegrität zu gewährleisten oder logische Schlussfolgerungen zu ermöglichen.

3.5.3 Klassifizierung Ontologien

(Jannidis *et al.*, 2017, S. 165) erörtern in ihrem Buch zwei mögliche Ansätze zur Klassifizierung von Ontologien. Zum einen kann die Klassifizierung von Ontologien nach ihrem Allgemeingrad erfolgen, wobei (Guarino, 1998, S. 7) eine Unterteilung in vier Klassen vorschlägt:

- *Top-Level-Ontologien*, die sehr allgemeine Konzepte wie Raum, Zeit, Materie, Objekt, Ereignis und Aktion beschreiben, die unabhängig von einem spezifischen Problem oder einer spezifischen Domäne sind.
- *Domänen-Ontologien*, die das Vokabular für eine spezifische Domäne, wie beispielsweise die Domäne der Weltraumobjekte oder die Domäne der PKWs, beschreiben. Diese Ontologien spezifizieren die von einer Top-Level-Ontologie eingeführten Begriffe weiter.
- *Aufgabenspezifische Ontologien*, die ebenfalls Top-Level-Ontologien detaillieren und spezifizieren, jedoch mit einem spezifischen Bezug zu einer Aufgabe oder Tätigkeit.
- *Anwendungsontologien*, die Konzepte beschreiben, die sowohl von einer bestimmten Domäne als auch von einer spezifischen Aufgabe abhängen und somit diese beiden Ontologieklassen zusammenführen. Diese Konzepte entsprechen oft den Rollen, die Domäneneinheiten bei der Durchführung einer bestimmten Aktivität spielen.

Abbildung 3-17 veranschaulicht diese Einteilung in Abhängigkeit der beiden Dimensionen Allgemeinheit und Bezugsaspekt, wobei die dargestellten Pfeile Spezialisierungsbeziehungen verkörpern. Der zweite Klassifizierungsansatz, den (Jannidis *et al.*, 2017, S. 166) beschreiben, bezieht sich auf den Grad der Ausdruckskraft und der Formalisierung einer Ontologie. Dieses Spektrum erstreckt sich von weniger formalisierten Ansätzen, die hauptsächlich Taxonomien umfassen, bis hin zu Ontologien, die die Domäne auf eine tiefere Weise modellieren und mehr Einschränkungen bezüglich der Domänensemantik enthalten. Diese werden als *leichtgewichtige* bzw. *schwergewichtige Ontologien* bezeichnet. Leichtgewichtige Ontologien umfassen Konzepte, Konzepttaxonomien, Beziehungen zwischen Konzepten und Eigenschaften, die Konzepte beschreiben. Schwergewichtige Ontologien fügen diesen leichtgewichtigen Ontologien Axiome und Beschränkungen hinzu, die die beabsichtigte Bedeutung der in der Ontologie erfassten Begriffe klären, wie (Gomez-Perez *et al.*, 2003, S. 8) erläutern.

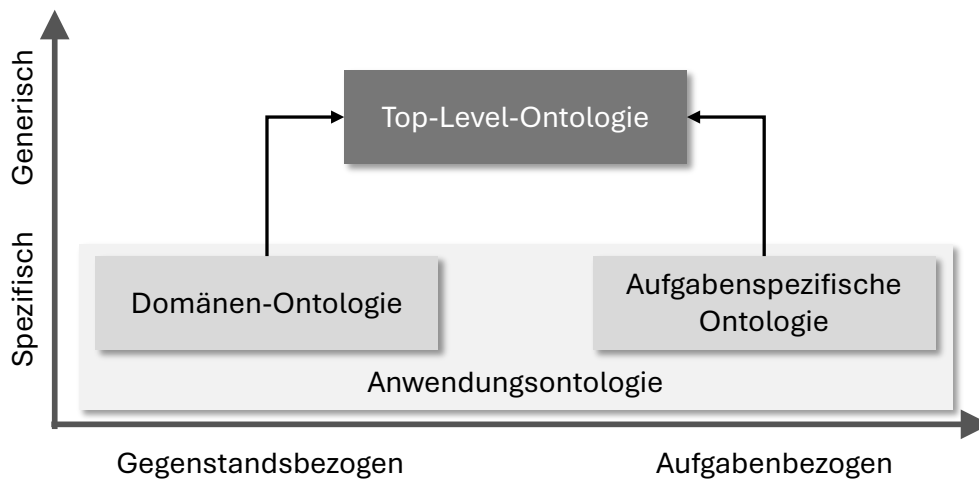


Abbildung 3-17: Ontologie-Klassifizierung in Abhängigkeit der Allgemeinheit und dem Bezugsaspekt i.A. an (Jannidis et al., 2017, S. 165)

3.6 Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung

Strukturierte und planbare Prozesse spielen eine tragende Rolle in der Produktentwicklung. Um Projekte erfolgreich zu gestalten, müssen verschiedene Aspekte sichergestellt sein: eine effektive Aufgabenbearbeitung, die Einhaltung von Qualitätsstandards, der zielführende Einsatz von Methoden und Hilfsmitteln sowie die reibungslose Zusammenarbeit aller am Entwicklungsprozess beteiligten Akteure (Lindemann, 2016, S. 404). Prozessmodelle bieten hierfür wertvolle Unterstützung und ermöglichen die effektive Koordination komplexer Entwicklungsprozesse (Lindemann, 2016, S. 404). Aufgrund ihrer Relevanz für die Produktentwicklung sind Prozessmodelle Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten und werden aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet und analysiert. Aus dieser fundierten Wissensbasis greift die vorliegende Arbeit zentrale Aspekte heraus, um dem Leser ein grundlegendes Verständnis zu vermitteln. Für eine tiefergehende Auseinandersetzung wird an den entsprechenden Textpassagen auf weiterführende Literatur verwiesen, die Prozessmodelle und Vorgehensmodelle detaillierter und umfassender behandelt. Die folgenden drei Fragestellungen dienen dazu, dieses weitläufige Forschungsfeld prägnant zu strukturieren:

Was sind Prozess- und Vorgehensmodelle?

Vorgehensmodelle sind, wie alle Modelle, zweckorientierte und informationsreduzierte Abbilder der Realität (Lindemann, 2009, S. 37 f.). In Anlehnung an das Rahmenwerk von (Wynn und Clarkson, 2018) werden Vorgehensmodelle in dieser Arbeit, als eine von vier Arten von Prozessmodellen betrachtet. Sie dienen als Leitfaden für reale Situationen und haben einen präskriptiven Charakter (Wynn und Clarkson, 2018, S. 164). Doch was genau ist ein *Prozessmodell*? (Eckert und Stacey, 2010, S. 2) bieten eine umfassende Antwort auf diese Frage und beleuchten unterschiedliche Sichtweisen, sowohl aus wissenschaftstheoretischer Perspektive als auch im Kontext der industriellen Prozessmodellierung. Allgemein lässt sich ein *Prozess* als eine organisierte Gruppe zusammenhängender Aktivitäten definieren, die gemeinsam ein wertvolles Ergebnis erzeugen (Browning, 2010, S. 317). (Eckert und Stacey, 2010, S. 2) weisen darauf hin, dass der Begriff *Prozess* auf zwei unterschiedliche Weisen verwendet werden kann: Einerseits beschreibt er die Summe der tatsächlichen Aktivitäten, die z.B. zur Entwicklung eines Produkts oder einer Komponente durchgeführt werden bzw. durchgeführt werden sollten. Andererseits kann der Begriff

Prozess auch eine abstraktere und allgemeinere Konzeptualisierung dessen darstellen, was getan wird oder getan werden sollte, um ein Produkt zu entwickeln. Ein Prozessmodell drückt einen Prozess als abstrakte Konzeptualisierung im Rahmen eines idealisierten und abstrakten Modells aus, mit der Zielsetzung, einen Prozess zu verstehen, ihn zu planen indem festgelegt wird, was zu tun ist und um vorherzusagen, wie sich ein Prozess verhalten wird, beispielsweise durch Simulationen (Eckert und Stacey, 2010, S. 2).

Was ist der Zweck von Prozessmodellen?

Die Beantwortung der Frage nach dem Zweck von Prozessmodellen bleibt herausfordernd. Auch nach Jahrzehnten der Anwendung und Forschung ist nicht abschließend geklärt, welche Aspekte in Prozessmodellen abgebildet werden können und wie diese Modelle optimal genutzt und interpretiert werden sollten (Eckert und Stacey, 2010, S. 1). Generell erfüllen Modelle in der Produktentwicklung vielfältige Zwecke (Albers und Braun, 2011, S. 8). Sie dienen beispielsweise der visuellen Darstellung von Produkten oder Prozessen, unterstützen die Ideenfindung, Problemlösung und Bewertung von Lösungsansätzen und fördern die Interaktion und Kommunikation innerhalb von Entwicklungsteams (Eckert und Stacey, 2010, S. 1). (Browning, 2010, S. 322) ermittelte in seiner Arbeit fünf Kategorien von Anwendern von Prozessmodellen und identifizierte 28 Möglichkeiten, wie diese Modelle durch die Anwender nutzbringend eingesetzt werden können. Tabelle 3-7 zeigt einen Ausschnitt der identifizierten Zwecke von Prozessmodellen und gibt einen praxisnahen Einblick, welchen Zweck entsprechende Prozessmodelle für einen spezifischen Anwender haben können. In Bezug auf die Unterkategorie der Vorgehensmodelle, lässt sich feststellen, dass präskriptive Modelle nicht danach streben, die Realität bis ins kleinste Detail abzubilden. Ihr primärer Zweck liegt darin, den Anwendern aufzuzeigen, welche Schritte zu einem erfolgreichen Prozess führen können (Eckert und Stacey, 2010, S. 4).

Tabelle 3-7: Ausschnitt aus den identifizierten Prozessmodell-Zwecken nach (Browning, 2010, S. 322)

Anwender	Zweck
Prozessverantwortlicher	Definition und Dokumentation von standardisierten Aktivitäten Visualisierung, Verständnis, Analyse und Verbesserung von Prozessen
Projektplaner	Anpassung des standardisierten Prozesses an spezifische Projektanforderungen Verknüpfung von Prozessen mit Elementen der Projektstrukturplanung
Projektmanager	Überwachung des Projektstatus Zuweisung von Aufgaben und Verantwortlichkeiten
Entwickler	Zugang zu Wissen über Aktivitäten, Tools und Ergebnisse Erfahrungen hinterlegen (lessons learned)
Prozessprüfer & Gutachter	Überblick über Aktivitäten, die durch eine Norm gefordert werden Leistungs- und Ergebnisbestätigung

Welche Art von Prozessmodellen gibt es?

(Wynn und Clarkson, 2018) definieren in ihrem umfassenden Rahmenwerk zwei Dimensionen, in welche Prozessmodelle nach ihrem Umfang und ihrem Typ unterteilt werden können. Beide Dimensionen beinhalten dabei mehrere Kategorien, womit das Rahmenwerk einen anschaulichen Überblick über die Arten von existierenden Prozessmodellen bereitstellt. Die erste Dimension berücksichtigt den Umfang des Modells auf Grundlage seines Anwendungsbereiches und ist in die folgenden drei Kategorien unterteilt:

1. Modelle auf Mikroebene: Diese Modelle fokussieren sich auf einzelne Prozessschritte und deren Zusammenhänge im unmittelbaren Kontext.
2. Modelle auf Mesoebene: Mesomodelle bilden den Ablauf von Aufgaben über mehrere Schritte hinweg ab („Ende-zu-Ende“). Sie können Aufschluss darüber geben, wie sich die Art der Arbeit im Verlauf der Entwicklung ändert.
3. Modelle auf Makroebene: Makromodelle betrachten Projektstrukturen und/oder den gesamten Entwurfsprozess in einem größeren Kontext.

Die erste Dimension fasst Modelle in die entsprechende Kategorie zusammen, die auf ähnliche Situationen abzielen. Die zweite Dimension hingegen gruppiert die Prozessmodelle in Abhängigkeit ihres Gesamtzweckes und beinhaltet folgende vier Kategorien:

1. Vorgehensmodelle: Diese Modelle vermitteln bewährte Praktiken und dienen als Leitfaden für reale Situationen.
2. Analytische Modelle: Analytische Modelle liefern situationsspezifische Einblicke und unterstützen die Prozessverbesserung, indem sie Details einer bestimmten Prozessinstanz abbilden.
3. Abstrakte Modelle: Abstrakte Modelle vermitteln Theorien und konzeptionelle Erkenntnisse über Prozesse. Sie bieten Inspiration und Denkanstöße für pragmatischere Ansätze, haben aber keinen direkten Praxisbezug.
4. Modelle aus dem Bereich Management Science/Operations Research (MS/OR): Diese Modelle nutzen mathematische und computergestützte Verfahren, um repräsentative oder synthetische Fälle zu analysieren und so allgemeingültige Erkenntnisse für Fragestellungen des Design und Development Process (DDP) zu gewinnen.

Abbildung 3-18 veranschaulicht diese Kategorisierung von Prozessmodellen und bietet einen prägnanten Überblick über das Rahmenwerk der Autoren. Im Folgenden sind ein paar Beispiele bekannter Prozessmodelle und deren Zuweisung im Rahmenwerk genannt. Auf der Makroebene finden sich Vorgehensmodelle wie das V-Modell und das Stage-Gate-Modell. Das V-Modell bietet eine strukturierte Herangehensweise zur Entwicklung technischer Systeme (VDI 2206, 2020). Das Stage-Gate-Modell von (Cooper, 1990) unterteilt den Entwicklungsprozess in Phasen, die jeweils durch Entscheidungspunkte getrennt sind. Auf der Mesoebene ist das VDI 2221 Phasenmodell (VDI 2221, 2018) verortet, das einen systematischen Ansatz zur Produktentwicklung bietet und die Entwicklung in klar definierte Phasen unterteilt. Ein abstraktes Entwurfsmodell stellt beispielsweise das Function-Behavior-Structure (FBS)-Rahmenwerk von (Gero und Kannengiesser, 2004) dar. Für die Analyse und Visualisierung von Interaktionen und Aufgabenabhängigkeiten können unter anderem Design Structure Matrizen (DSM) verwendet werden (Browning, 2001). Auf der Mikroebene sind schließlich Prozesse wie der PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act) verortet, der einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess fördert und in kleinen, iterativen Schritten

umgesetzt wird (Deming, 1982; Moen und Clifford, 2009). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Prozessmodelle strukturierte und planbare Prozesse abbilden, die zur effektiven Gestaltung von Projekten beitragen. Sie unterstützen die Optimierung von Aufgabenbearbeitung, Qualitätssicherung und Zusammenarbeit und ermöglichen die effiziente Koordination komplexer Entwicklungsprozesse. Je nach Anwendungsbereich und Zielsetzung lassen sich Prozessmodelle gezielt auswählen und anpassen. Für einen tieferen Einblick in die Vielfalt prozessorientierter Ansätze in der Produktentwicklung wird an dieser Stelle das Werk von (Wynn und Clarkson, 2024) empfohlen. Das Buch präsentiert und diskutiert einen breiten Querschnitt von Prozessmodellen, Theorien und Ansätzen und erweitert das Rahmenwerk von (Wynn und Clarkson, 2018) um eine weitere Dimension, indem es zusätzlich zwischen Beiträgen, die sich mit allgemeinen Überlagerungen befassen und Beiträgen, die sich mit spezifischen Themen befassen, unterscheidet.

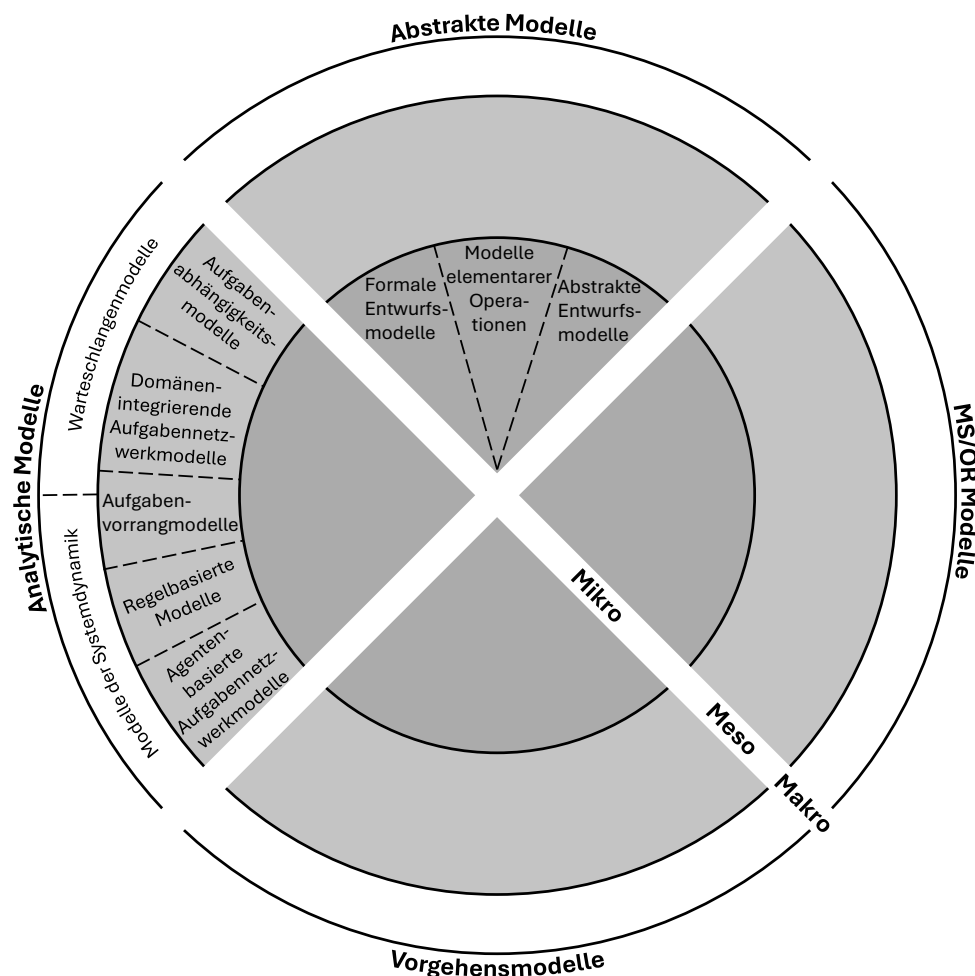


Abbildung 3-18: Kategorisierung von Prozessmodellen nach (Wynn und Clarkson, 2018, S. 165)

4 Stand der Technik

Dieses Kapitel beschreibt den aktuellen Forschungsstand in Bezug auf die Themenstellung der Arbeit. Die grundlegenden Mechanismen der relevanten Themenfelder wurden bereits in Kapitel 3 erläutert. Sie bilden eine solide Wissensbasis für das Verständnis der einzelnen Aspekte. Dieses Kapitel fokussiert sich auf drei zentrale Bereiche, die zur Beantwortung der Forschungsfragen untersucht wurden. Jedes dieser Forschungsfelder wird in einem separaten Unterkapitel mit einem beschreibenden Teil und einem abschließenden Fazit behandelt. Jedes Fazit diskutiert den spezifischen Forschungsbedarf, der anschließend im präskriptiven Teil der Arbeit in Kapitel 5 weiter vertieft wird.

Die Struktur des aktuellen Standes der Technik orientiert sich an den drei Forschungsfragen. Dies gewährleistet die Nachvollziehbarkeit des Inhalts und die thematische Konsistenz. Die in Kapitel 5 vorgestellte Methodik kann die Forschungsfragen erst als ganzheitliches Konzept umfassend beantworten. Dies liegt an der Interdependenz der einzelnen Problemstellungen und Lösungsansätze, die erst durch den integrativen Schritt zu einer gesamthaften Methodik hinreichend berücksichtigt werden können. Dennoch konzentriert sich jedes der folgenden Felder auf eine spezifische Forschungsfrage und damit auf einen wesentlichen Baustein der Methodik. Tabelle 4-1 stellt die drei Forschungsfragen (FF) mit ihren Schwerpunkten dem jeweiligen Fokus des aktuellen Forschungsstandes in den Unterkapiteln gegenüber.

Tabelle 4-1: Zuordnung der Forschungsschwerpunkte zur Struktur des Kapitels 4

FF	Schwerpunkt der FF	Fokus des Standes der Technik	Unterkapitel
1	Identifikation von Unsicherheiten mithilfe eines modellbasierten methodischen Ansatzes	Bestehende MBSE-Methodiken	4.1
2	Reduktion von Unsicherheiten durch einen modellbasierten menschenzentrierten Ansatz	Design Thinking Prozessmodelle & Design Thinking im SE	4.2
3	Unterstützung der Wissensgenerierung	Ontologien	4.3

4.1 Modellierungsmethodiken

Im Folgenden werden die zentralen Begriffe *Methode* und *Methodik* erläutert, um ein grundlegendes Verständnis für die weitere Ausarbeitung einer MBSE-Methodik zu schaffen. (Lindemann, 2009, S. 57 ff.) beschreibt eine Methode als ein regelbasiertes, planmäßiges Vorgehen, das festlegt wie bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen. Methoden zeichnen sich durch ihre präskriptive Natur und ihre klare Zielorientierung auf die Lösung eines Problems oder einer Aufgabe aus. Eine Methodik hingegen versteht Lindemann als eine Kombination von Methoden. (Mordecai, 2023, S. 5) definiert den Begriff *Methode* ähnlich als einen Weg, wie man eine Aufgabe ausführt oder ein Ergebnis erzielt. Der Fokus liegt dabei auf der Durchführung bestimmter Tätigkeiten. Beispielsweise stellt der modellbasierte Entwurf eine Methode zur Erstellung eines Lösungsentwurfs auf Basis eines Modells dar. Eine *Methodik* hingegen

beschreibt (Mordecai, 2023, S. 5) als die Lehre von einer Methode, die über die reine Definition hinausgeht und Aspekte wie die formale Spezifikation, die Klassifizierung relevanter Fälle, die Anwendung der Methode auf verschiedene Fälle und Probleme, die Analyse der Methodenleistung, den Vergleich mit anderen Methoden oder die Integration mit anderen Methoden umfasst. Er nennt das dokumentenbasierte Systems Engineering als Beispiel für eine Methodik, die die Verwendung von Textdokumenten als Artefakte des Systems Engineerings vorschreibt.

(Estefan und Weilkiens, 2023, S. 49) differenzieren neben den Begriffen *Methode* und *Methodik* zusätzlich die Begriffe *Prozess* und *Werkzeug*. In Anlehnung an (Martin, 1997) definieren sie einen *Prozess* als eine logische Abfolge von Aufgaben, die zur Erreichung eines bestimmten Ziels durchgeführt werden. Ein Prozess definiert *WAS* zu tun ist, ohne festzulegen, *WIE* eine entsprechende Aufgabe ausgeführt wird. Eine *Methode* hingegen besteht aus Techniken zur Ausführung einer Aufgabe und definiert somit das *WIE*. Jede Methode stellt gleichzeitig einen Prozess mit einer Abfolge von Aufgaben dar, die für diese spezifische Methode ausgeführt werden müssen. Das bedeutet, dass das *WIE* auf einer Abstraktionsebene auf der nächstniedrigeren Ebene zum *WAS* wird. *Werkzeuge* verstehen (Estefan und Weilkiens, 2023, S. 49) als Instrumente, die durch ihre Anwendung auf eine bestimmte Methode die Effizienz der Aufgabenbewältigung steigern können. Der Zweck eines Werkzeugs liegt somit in der Erleichterung der Durchführung der *WIE*-Fragestellungen. Eine Methodik beschreiben sie als eine Sammlung zusammenhängender Prozesse, Methoden und Werkzeuge – ein „Rezept“ zur Anwendung auf eine Klasse von Problemen mit gemeinsamen Merkmalen.

Basierend auf dieser Definition stellt eine *MBSE-Methodik* eine Sammlung verwandter Prozesse, Methoden und Werkzeuge dar, die zur Unterstützung der Disziplin des Systems Engineerings in einem modellbasierten oder modellgetriebenen Kontext verwendet werden (Estefan und Weilkiens, 2023, S. 49). Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Definition als Verständnisgrundlage für den Begriff MBSE-Methodik herangezogen.

4.1.1 Bestehende Modellierungsmethodiken

Der Stand der Technik in diesem Unterkapitel bezieht sich auf Methodiken, die das *WAS* und *WIE* der Verwendung von MBSE in der Produktentwicklung beschreiben. Im Wesentlichen bilden alle Modellierungsansätze den linken Zweig des V-Modells gemäß VDI 2206 (VDI 2206, 2020) für Entwicklungsprozesse ab, wobei es auch individuelle Ansätze oder Methodiken für Erweiterungen, d. h. für die Abbildung von Varianten, gibt (Husung et al., 2021, S. 3372). Das vorliegende Kapitel stellt zunächst die etablierten MBSE-Methodiken vor und anschließend Modellierungs-Ansätze im Zusammenhang mit Unsicherheiten.

Etablierte MBSE-Methodiken

(Estefan, 2008) bietet in seiner Arbeit einen detaillierten Überblick über die damals führenden MBSE-Methodiken. Diese Arbeit ist bis heute ein grundlegendes und vielzitiertes Werk, da viele der beschriebenen Methodiken weiterhin eine wichtige Rolle in der Systemmodellierung spielen. Die Arbeit beinhaltet die Ergebnisse einer ersten umfassenden Umfrage zu MBSE-Methodiken, die 2007 von der MBSE-Fokusgruppe des International Council of Systems Engineering (INCOSE) durchgeführt und 2008 aktualisiert wurde (Estefan und Weilkiens, 2023, S. 50). Auf zusätzliche Methodiken, die seit 2008 als Lücken identifiziert wurden, wird in der in der Folgearbeit (Estefan und Weilkiens, 2023) eingegangen. (Estefan und Weilkiens, 2023) enthält eine ausgewählte Teilmenge aus diesen identifizierten MBSE-Methodiken, die zu Veranschaulichungszwecken aus

folgenden Gründen ausgewählt wurden: Unabhängigkeit von einem Produktanbieter, Sichtbarkeit innerhalb der INCOSE-Gemeinschaft oder internationalen Normungsausschüssen und ausreichende Literatur zur Unterstützung der Anwendung. Dabei werden die SYSMOD-Methodik, die anhand eines Beispiels ausführlich erläutert wird, und die ISE&PPOOA-Methodik genauer betrachtet. Tabelle 4-2 listet die in den beiden Arbeiten beschriebenen MBSE-Methodiken auf und gliedert sie in vier Spalten: Neben der abgekürzten Bezeichnung der jeweiligen Methodik, enthält die Tabelle die ausführliche Bezeichnung, den Entwickler der Methodik und, falls vorhanden, die Literaturquelle des Entwicklers mit einer umfassenden Beschreibung und einer Anleitung zur Verwendung. Falls keine Quelle mit einer umfassenden Anleitung und Beschreibung der Methodik im Rahmen der Recherche verfügbar war, ist dies in der Tabelle mit „n.v.“ (nicht verfügbar) gekennzeichnet. War der Entwickler nicht eindeutig identifizierbar, ist dies mit „n.e.d.“ (nicht eindeutig definiert) dokumentiert. Die Tabelle spiegelt die Liste der führenden Methodiken wider, die sowohl aktuell als auch ausgereift sind und in MBSE-Lehrbüchern sowie in der Fachliteratur ausführlich beschrieben werden (Estefan und Weilkiens, 2023, S. 81).

Tabelle 4-2: Identifizierte MBSE-Methodiken aus (Estefan, 2008) & (Estefan und Weilkiens, 2023)

Abkürzung	Bezeichnung	Entwickler	Quelle
Im INCOSE-Bericht 2008 untersuchte Methodiken			
Harmony SE	Harmony for Systems Engineering	IBM Corporation	(Hoffmann, 2010)
OOSEM	Object-Oriented Systems Engineering Method	INCOSE	(Friedenthal <i>et al.</i> , 2012)
RUP SE	Rational Unified Process for Systems Engineering for Model-Driven Systems Development	IBM Corporation	(Kruchten, 2004)
Vitech	Vitech Model-Based System Engineering (MBSE) Methodology	Vitech Corporation	n.v.
JPL SA	JPL State Analysis JPL: Jet Propulsion Laboratory	NASA	n.v.
OPM	Dori Object-Process Methodology	Dov Dori	(Dori, 2002)
Seit der INCOSE-Umfrage 2008 als Lücken identifizierte Methodiken			
SYSMOD	Systems Modeling Process	Tim Weilkiens	(Weilkiens, 2014)
ISE&PPOOA	Integrated Systems Engineering and Pipelines of Processes in Object-Oriented Architectures	n.e.d.	(Fernandez und Hernandez, 2019)
PBSE	Pattern-Based Systems Engineering	n.e.d.	(Schindel, 2023)
ARCADIA	Architecture Analysis & Design Integrated Approach	Thales	(Voirin <i>et al.</i> , 2018)

Die dritte wichtige Quelle, die sich umfassend mit dem Stand der Technik bestehender MBSE-Methodiken zur Systemmodellierung auseinandersetzt, ist die Arbeit von (Dickopf, 2020). Der Autor stellt darin eine ganzheitliche Methodik für die Entwicklung cybertronischer Systeme im Kontext des Internets der Dinge vor. Diese Methodik umfasst ein methodisches Verfahren zur modellbasierten Spezifikation einer interdisziplinären Systemarchitektur und des entsprechenden Verhaltens unter Verwendung der Modellierungssprache SysML und unter Berücksichtigung der Prinzipien des Systemdenkens. Zu diesem Zweck verfolgt der Autor einen zweistufigen Entwicklungsansatz, der aus einer Makro-Methodik für den gesamten Entwicklungsprozess und einer Mikro-Methodik für die zugehörigen Phasen besteht. Unter Makro-Methodiken der Systementwicklung, die auch als Prozessmodelle bezeichnet werden können, fasst der Autor Entwurfsansätze aus verschiedenen technischen Bereichen zusammen. Beispiele hierfür sind das Vorgehensmodell der VDI 2221 (VDI 2221, 2018), das Münchner Modell der Produktkonkretisierung nach (Lindemann, 2009, S. 44 ff.) sowie die RUP-Methodik aus der Softwareentwicklung. Die Mikro-Methodik hingegen beschreibt die detaillierten Merkmale des konzeptionellen Systementwurfs durch einen allgemeinen Problemlösungszyklus. Sie soll den Systemingenieur sowohl bei der Bearbeitung vorhersehbarer Teilaufgaben als auch bei der Lösung unerwartet auftretender Probleme unterstützen (Dickopf, 2020, S. 62).

Im Rahmen seiner Analyse bestehender Ansätze identifiziert Dickopf verschiedene Methodiken, die in Tabelle 4-3 aufgelistet sind. Diese stehen im Zusammenhang mit der Verwendung von SysML oder verwandten Sprachen zur Entwicklung eines konzeptionellen Systementwurfs. Darunter befinden sich Methoden, Prozesse, Richtlinien und Rahmenwerke, die entweder zur Unterstützung der SysML-basierten Modellierung entwickelt wurden, von SysML beeinflusst sind oder unabhängig von der Sprache entwickelt wurden, aber eine Erweiterung zur Verwendung mit SysML aufweisen. Dickopf strukturiert die Ansätze anhand ihrer Herkunft in fünf Kategorien: Forschung und Wissenschaft, Werkzeug-/Tool-Anbieter, Industrie, Beratung und gemeinnützige Organisationen. Es zeigen sich wie in Tabelle 4-3 ersichtlich Überschneidungen mit den Ergebnissen der Arbeiten von (Estefan, 2008) und (Estefan und Weilkiens, 2023).

Grundsätzlich lassen sich MBSE-Methodiken an die spezifischen Verfahren und Systems Engineering-Praktiken der jeweiligen Organisation anpassen (Estefan, 2008, S. 15). Da die in den Tabellen 4-2 und 4-3 aufgeführten MBSE-Methodiken bereits in den Quellen (Estefan, 2008; Estefan und Weilkiens, 2023) und (Dickopf, 2020) ausführlich beschrieben sind, werden im Folgenden nur ausgewählte Beispiele näher beleuchtet.

Die Unterschiede zwischen den Methodiken zeigen sich beispielsweise im zugrundeliegenden Ansatz. **Harmony SE** verfolgt einen serviceorientierten, schrittweisen Top-Down-Ansatz. Ziel ist es, die erforderliche Systemfunktionalität sowie die damit verbundenen Systemzustände und -modi zu identifizieren und diese anschließend einer physischen Architektur zuzuordnen (Estefan, 2008, S. 15 ff.). Die **Vitech-Methodik** hingegen basiert auf vier primären, parallel ablaufenden SE-Aktivitäten: Verhaltensanalyse, Architektur, Validierung und Verifizierung sowie Anforderungsanalyse. Diese Aktivitäten sind im Kontext der zugehörigen Domänen miteinander verknüpft und werden in einem gemeinsamen Systemdesign-Repository verwaltet (Estefan, 2008, S. 30 ff.). **JPL** setzt auf eine modell- und zustandsbasierte Steuerungsarchitektur. Dabei repräsentiert der Zustand die aktuelle Situation eines sich entwickelnden Systems, während Modelle die Zustandsentwicklung beschreiben (Estefan, 2008, S. 37). **OPM** ist eine Objektprozessmethodik, die formale Objektprozessdiagramme mit einer auf natürlicher Sprache basierenden Objektprozesssprache kombiniert. Letztlich wird alles entweder als Objekt oder als Prozess dargestellt.

Tabelle 4-3: Überblick der in (Dickopf, 2020) identifizierten SysML-bezogenen Ansätze i.A. an (Dickopf, 2020, S. 64)

Forschung & Wissenschaft	Tool-Anbieter	Industrie	Beratung	Gemeinnützige Organisation
SE-VPE Method (Gilz, 2014)	Harmony SE Tab. 4-2	Alt, Oliver (Alt, 2012)	SYSMOD Tab. 4-2	OOSEM Tab. 4-2
SPES Modeling Framework (Pohl et al., 2012)	Magic Grid (Aleksandravi- ciene und Morkevicius, 2021)	SysCARS (Piques, 2014)	VAMOS (Weilkiens, 2016)	
CONSENS (Gausemeier et al., 2012)	ARCADIA Tab. 4-2		MBSEAF (Holt und Perry, 2019)	
mecPro ² Architecture Framework (Eigner Walter und Koch Christian, 2017)			FAS Method (Lamm und Weilkiens, 2010)	
FAS4M n.v.		ICONIX n.v.		

Neben den unterschiedlichen Ansätzen gibt es auch Unterschiede in der Schwerpunktsetzung. **RUP-SE** beispielsweise konzentriert sich auf die Geschäftsmodellierung. Die Methodik ist aus der Rational Unified Process Methodik abgeleitet, die in der Softwareentwicklung weit verbreitet ist (Estefan, 2008, S. 23). Die **ARCADIA** Modellierungsmethodik basiert auf drei miteinander verbundenen Aktivitäten: (1) Anforderungsanalyse, (2) Bedarfsanalyse und -modellierung und (3) Architekturgestaltung. Im Gegensatz zu den meisten anderen etablierten Ansätzen umfasst ARCADIA neben einer Methodik auch eine domänenspezifische Sprache, die stark von UML und SysML beeinflusst ist (Dickopf, 2020, S. 79).

SYSMOD versteht sich als allgemeine Methodik zur Erstellung von Anforderungs- und Architekturspezifikationen und kann auch als Toolbox betrachtet werden. Der Schwerpunkt liegt auf aktualisierten und neuen Produkten. SYSMOD bietet drei Kern-Artefakt-Typen: (1) SYSMOD-Produkte in Form von Artefakten für die Systementwicklung (z. B. Anforderungen oder Architekturbeschreibungen), (2) SYSMOD-Methoden als Best Practices für die Erstellung eines SYSMOD-Produkts und (3) SYSMOD-Rollen, die Arbeitsbeschreibungen einer Person definieren (Estefan und Weilkiens, 2023, S. 58 ff.).

Besonders hervorzuheben sind **OOSEM** und **MagicGrid**, zwei der am weitesten verbreiteten und am besten definierten Ansätze, die auch durch zahlreiche industrielle Fallstudien gestützt werden (Pietruszewicz, 2019, S. 7). **OOSEM** wurde 1998 als hybrider Ansatz eingeführt, der objektorientierte Techniken und Systems Engineering-Grundlagen kombiniert, um sowohl mit neuen Technologien als auch mit sich ändernden Systemanforderungen Schritt halten zu können und die Entwicklung flexibler und erweiterbarer Systeme zu ermöglichen (Dickopf, 2020, S. 86). Abbildung 4-1 zeigt die Aktivitäten und Modellierungsartefakte der OOSEM-Methodik. Die **MagicGrid**-Methodik, basierend auf Erfahrungen aus zahlreichen MBSE-Einführungsprojekten, bietet eine

Sammlung bewährter Verfahren, die an spezifische Kundenanforderungen angepasst und erweitert werden können. Sie konzentriert sich auf die technischen Prozesse der (ISO/IEC/IEEE, 2023) und führt Anwender mithilfe einer matrixartigen Struktur durch den Modellierungsprozess. Diese Matrix ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Die Spalten der Matrix repräsentieren neben den vier Säulen der SysML auch den Aspekt Sicherheit und Zuverlässigkeit (S & Z), während die Zeilen in einen Problemraum und einen Lösungsraum unterteilt sind. Der Problemraum wird aus zwei Perspektiven betrachtet: einer Black-Box-Perspektive und einer darauffolgenden White-Box-Perspektive. Zur genaueren Spezifikation unterschiedlicher Systemebenen teilt die Methodik den Lösungsraum in mehrere Unterebenen ein. Die Festlegung der physischen Anforderungen im Implementierungsbereich markiert den Abschluss des MagicGrid-Ansatzes (Aleksandraviciene und Morkevicius, 2021, S. 12).

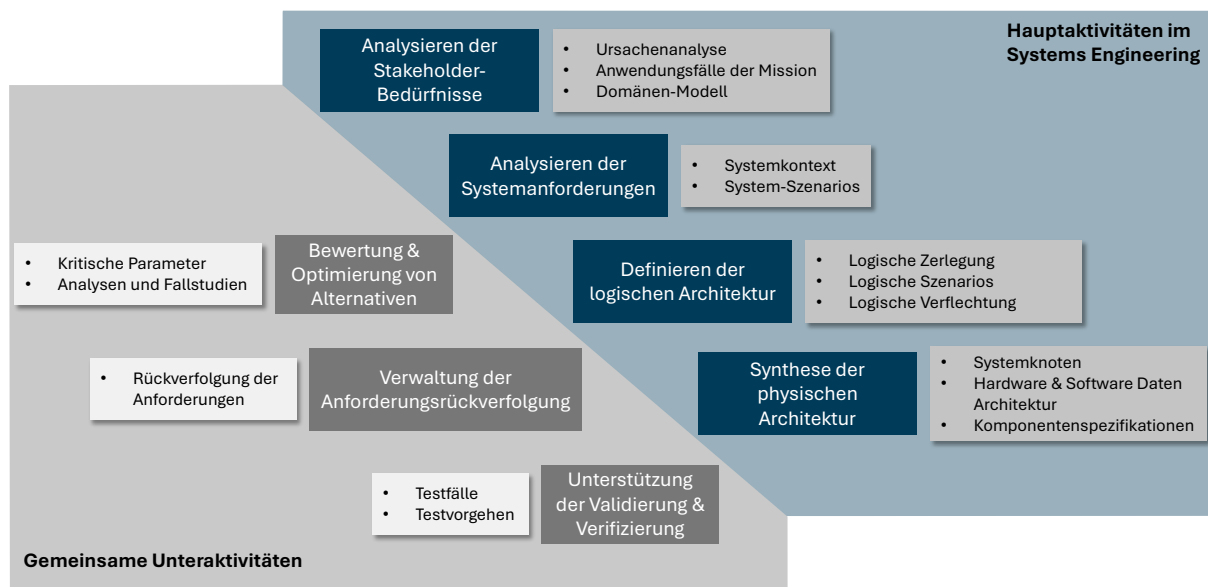


Abbildung 4-1: OOSEM Aktivitäten und Modellartefakte i.A. an (Estefan und Weilkiens, 2023, S. 52)

MBSE-Modelle bieten durch die darin enthaltenen Daten und Informationen ein noch größeres Potenzial für den Einsatz in der Produktentwicklung (Husung *et al.*, 2021, S. 3372). Zahlreiche Beispiele in der Literatur belegen ihren Einsatz zur Unterstützung spezifischer Problemstellungen und Aufgaben. So nutzten (Chen *et al.*, 2018) MBSE-Modelle für die methodische Anforderungsanalyse, Funktionsaufschlüsselung und Architekturerstellung bei der Konstruktion von EMU-Zügen. (Chamas und Paetzold, 2018) hingegen setzten ein methodisches Konzept zur Modellierung von Wirkungsketten ein, um die Entwicklung funktionaler Anforderungen in der Konzeptphase modellbasiert zu unterstützen. Ein weiteres Beispiel ist die Nutzung von MBSE-Modellen und ihrer Analyse- und Rückverfolgbarkeitspotenziale im Bereich der Nachhaltigkeit, beispielsweise zur Unterstützung von Strategien der Kreislaufwirtschaft (Lipšinić *et al.*, 2024). Einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der MBSE-Praxis bietet die Studie von (Huldt und Stenius, 2019).

	Säule						
Domäne			Anforderungen	Struktur	Verhalten	Parameter	S & Z
	Problem	Black-Box	Stakeholder- Bedürfnisse	Systemkontext	Anwendungsfälle	MoEs	FMEA
		White-Box		Konzeptionelle Subsysteme	Funktionale Analyse	MoEs für Subsysteme	
	Lösung		Systemebene				
			Subsystemebene				
			Komponentenebene				
	Implementierung		Implementierungs- anforderungen				

Abbildung 4-2: Veranschaulichung der Matrix der MagicGrid-Methodik i.A. an (Aleksandraviciene und Morkevicius, 2021, S. 12)

Aktuelle Forschungsfragen im Zusammenhang mit MBSE-Modellen im Bereich der Luft- und Raumfahrt beschäftigen sich unter anderem mit der modellbasierten Integration von Zuverlässigkeitsanalysen in den Systementwurf. (Chong *et al.*, 2023) entwickelten beispielsweise im Rahmen ihres Konferenzbeitrags ein integriertes Rahmenwerk, das auf einer modellbasierten methodischen Vorgehensweise basiert. Dieses Rahmenwerk ermöglicht die direkte Erstellung von Zuverlässigkeitsanalysen wie der Fehlerbaumanalyse (FTA) oder der Fehler-Möglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) aus einem einheitlichen SysML-Modell. Das Ziel der Forscher ist es, die isolierte Betrachtung von Systementwurf und Zuverlässigkeitsanalysen zu überwinden. Dadurch soll die Konsistenz zwischen Systemmodell und Zuverlässigkeitsmodell erhöht, die Notwendigkeit manueller Analysen reduziert und somit Unsicherheiten in den Analyseergebnissen verringert werden. Zu diesem Zweck wird ein spezifisches Profil in der SysML-Umgebung erstellt, durch welches Zuverlässigkeitsinformationen explizit im Systemmodell definiert werden.

(Badra *et al.*, 2023) stellen einen Bottom-Up-Ansatz zur Modellierung von Missionen für unbemannte Luftfahrzeuge (UAV) vor. Die Autoren nutzen die ARCADIA-Methodik, um eine detaillierte Analyse und Modellierung der UAV-Missionen durchzuführen. Der Fokus liegt auf der Entwicklung einer Top-Level-Missionsarchitektur, beginnend mit einem Simulink Stateflow-Modell, gefolgt von operationalen, funktionalen und logischen Analysen. Stateflow ist eine Komponente von Simulink, die hierarchische Zustandsautomaten bereitstellt. Die Arbeit zeigt, wie MBSE die Skalierbarkeit von UAV-Missionen unterstützt, indem es eine strukturierte Vorgehensweise zur Erfassung und Analyse der Missionsanforderungen ermöglicht. Die operationale Analyse fokussiert sich auf die Beschreibung der Mission, der beteiligten Akteure und der operationellen Szenarien. Die funktionale Analyse zerlegt die Mission in eine Hierarchie von Funktionen, die darauf abzielen, die Anforderungen der Stakeholder zu erfüllen. Die logische Analyse unterstützt die Aufteilung des Systems in logische Elemente, die zusammen eine kohärente Systemarchitektur bilden.

(Slobin *et al.*, 2024) untersuchen im Rahmen einer Fallstudie die Anwendung von MBSE zur Optimierung der Schnittstellen von Satelliten und Nutzlasten in frühen Missionsphasen. Die Forschung konzentriert sich auf die Anwendung von MBSE unter Verwendung des Software-Werkzeugs Cameo Systems Modeler® während der A/B1-Phasen einer Erdbeobachtungssatellitenmission, die von Airbus durchgeführt wird. Die Phasen 0, A und B eines Raumfahrtprojektes befassen sich mit der grundlegenden Projektdefinition und -planung. In diesen Phasen werden die funktionalen und technischen Anforderungen des Systems detailliert ausgearbeitet und passende Systemkonzepte entwickelt, die mit dem Leitbild im Einklang stehen. Dabei werden die Vorgaben und Einschränkungen des Projektinitiators und des Auftraggebers berücksichtigt. Ein weiterer Schwerpunkt in diesen Phasen liegt auf der Identifizierung aller Aktivitäten und Ressourcen, die für die Entwicklung der Weltraum- und Bodensegmente des Projekts benötigt werden. Parallel dazu erfolgen erste Bewertungen der technischen und programmatischen Risiken. Schlussendlich werden in diesen Phasen die Vorentwicklungsaktivitäten eingeleitet, um die Machbarkeit der definierten Konzepte zu überprüfen und erste Prototypen zu entwickeln (ECSS, 2009c, S. 20). Die Autoren beschreiben detailliert, wie MBSE verwendet wird, um elektrische Schnittstellenkontrolldokumente (EICDs) zu automatisieren und die Entwicklung elektrischer Schnittstellen zu steuern. Die Ergebnisse der Fallstudie betonen die Vorteile von MBSE. Zu diesen zählen die verbesserte Kommunikation unter den Stakeholdern, ein besseres Systemverständnis durch die Darstellung von Verbindungen, Nachvollziehbarkeit und Transparenz von Entwurfsentscheidungen sowie eine insgesamt konsistente Informationshaltung. Diese vermeidet veraltete Informationen und dient als Single Source of Truth, also als zentrale und einzige Quelle der Wahrheit in Bezug auf projektbezogene Daten und Informationen für alle Projektbeteiligten.

Modellierungs-Ansätze im Zusammenhang mit Unsicherheiten

Vor dem Hintergrund, dass traditionelle Systems Engineering-Ansätze Schwierigkeiten haben, die Vollständigkeit und Konsistenz von Informationen zu gewährleisten, die über unterschiedliche Werkzeuge und Dokumente verteilt sind, untersuchten bereits (Waseem und Sadiq, 2018) im Rahmen einer Fallstudie an einem Fernerkundungssatelliten den Nutzen eines MBSE-Ansatzes. Ziel war es, bestehende Prozesse und Praktiken des Systems Engineering für aktuelle und zukünftige Weltraummissionen zu unterstützen. Die Autoren verwendeten einen auf der OOSEM-Methodik basierenden MBSE-Ansatz, um ein systematisches Modell zu entwickeln. Dieses Modell sollte in der Lage sein, Informationen in Bezug auf den Systementwurf konsistent zu dokumentieren und eine Grundlage für automatisierte Systems Engineering-Prozesse, wie die Dokumentengenerierung und die Systemverhaltenssimulation, zu schaffen. Als Schlussfolgerung wurde der modellbasierte Ansatz als vielversprechend für die Reduktion von Entwicklungsrisiken, die Verbesserung der Qualität und die Steigerung der Produktivität erachtet. Gleichzeitig betonten die Autoren jedoch die Bedeutung einer gründlichen Einarbeitung in die Methodik sowie die Notwendigkeit, die Risiken eines MBSE-Einsatzes durch umfassende Schulung und praktische Anwendung zu minimieren.

(Zhang *et al.*, 2016b) untersuchten die modellbasierte Berücksichtigung von Unsicherheiten auf einer höheren Abstraktionsebene. Die Autoren beschäftigten sich mit der inhärenten Unsicherheit in cyber-physikalischen Systemen (CPS) und der Notwendigkeit, diese während des Betriebs zu verstehen und zu handhaben. Zu diesem Zweck entwickelten sie das U-Modell (Uncertainty-Modell). Dieses konzeptionelle Modell, zusammen mit einem entsprechenden UML-Profil, dient der Darstellung von Unsicherheit speziell in CPS.

Das U-Modell umfasst drei untergeordnete Teilmodelle: das Glaubensmodell, das Unsicherheitsmodell und das Messmodell. Es soll universell zur Definition von Unsicherheit in UML einsetzbar sein. *Glaube* ist darin ein abstraktes Konzept, das sich durch explizite Glaubensaussagen konkretisieren lässt. *Unsicherheit* liegt vor, wenn ein Glaubensagent nicht vollständig von einem vertretenen Glauben überzeugt ist. Unsicherheit stellt somit ein subjektives Konstrukt dar. Ursachen für Unsicherheit können vielfältig sein, beispielsweise Informationsmangel, inhärente Variabilität des Themas, Unwissenheit oder physikalische Phänomene (Zhang et al., 2018, S. 574). Unsicherheit kann nach Auffassung der Autoren auf drei Ebenen auftreten:

1. *Anwendungsebene*: Die Unsicherheit ist bedingt durch Ereignisse, die aus der Anwendung des CPS selbst stammen.
2. *Infrastrukturebene*: Die Unsicherheit auf der Infrastrukturebene resultiert aus Interaktionen zwischen den physischen Einheiten, der Netzwerkinfrastruktur und/oder der Cloud-Infrastruktur.
3. *Integrationsebene*: Diese Ebene umfasst Unsicherheiten, die aus den Interaktionen zwischen den Unsicherheiten der ersten beiden Ebenen entstehen, oder aus den Interaktionen zwischen Anwendungs- und Infrastrukturebene.

Primäres Ziel des U-Modells ist es, ein umfassendes und systematisches Verständnis von Unsicherheit in CPS zu ermöglichen. Es soll Forschern und Praktikern helfen, Unsicherheiten in CPS zu verstehen, zu klassifizieren und zu modellieren. Abbildung 4-3 zeigt das Kern-Unsicherheitsmodell des U-Modells nachmodelliert in SysML.

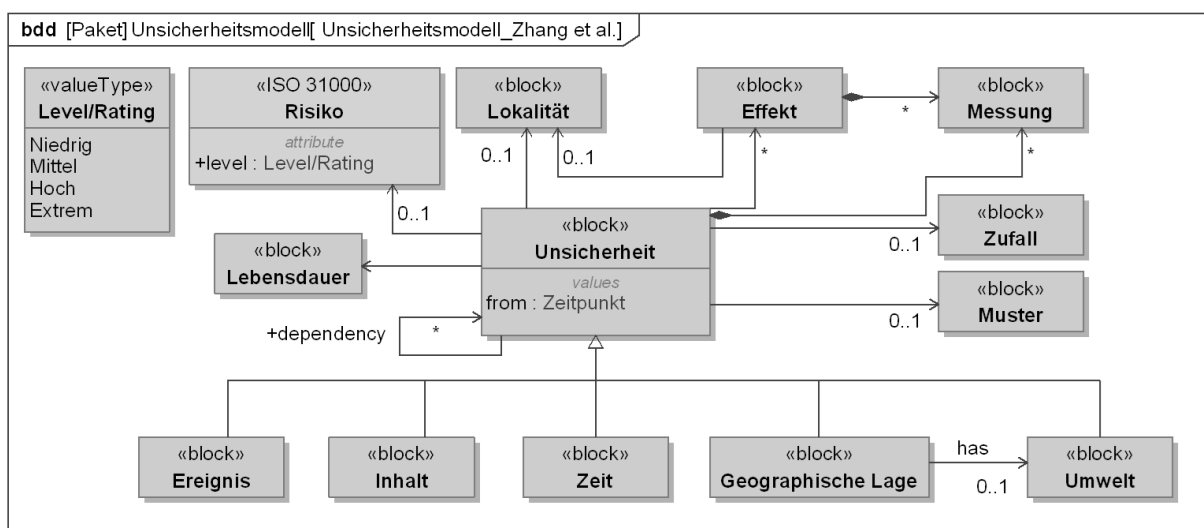


Abbildung 4-3: Das Kern-Unsicherheitsmodell dargestellt in SysML, i.A. an (Zhang et al., 2016a, S. 255)

Aufbauend auf dem U-Modell entwickelten (Zhang et al., 2018) eine Methodik zur Unterstützung der Anwendungsfall-Modellierung. Diese beinhaltet eine Vorlage und 26 Beschränkungsregeln. Entwickler sollen damit Unsicherheiten, mit denen das zu entwickelnde System konfrontiert wird, direkt in den Anforderungen erfassen und dokumentieren können. Die präzise Formulierung und Definition von Anwendungsfällen sollen gleichzeitig die Anforderungen klar beschreiben und inhärente Unsicherheiten identifizieren und adressieren.

Die Arbeiten von Zhang et al. liefern wertvolle Konzepte für die Beschreibung und den Umgang mit Unsicherheit als Querschnittsthema. Basierend auf diesen Konzepten haben (Bandyszak et al.,

2020) sogenannte orthogonale Unsicherheitsmodelle (OUM) entwickelt. Diese Modelle zielen darauf ab, Unsicherheiten, die während des Betriebs von CPS auftreten können, systematisch zu erfassen und zu analysieren. Die Kernidee des OUM besteht darin, Informationen, die die Unsicherheit beschreiben, in dedizierten Artefakten zu dokumentieren, welche von den „traditionellen“ technischen Artefakten getrennt sind. Der Ansatz von (Bandyszak *et al.*, 2020) ermöglicht die Dokumentation der Unsicherheit selbst, ihrer Quelle, ihres Auftretens-Zeitpunktes und möglicher Wege, sie während der Laufzeit zu erkennen und zu mindern. Das Hauptziel von OUM besteht darin, dieses Wissen zu dokumentieren und dadurch Unsicherheiten offenzulegen sowie Diskussionen und Verhandlungen mit Stakeholdern zu fördern.

Auf Grundlage einer Ontologie entwickelten die Autoren eine domänenspezifische Modellierungssprache, die die Erstellung von OUM ermöglicht. Die Ontologie definiert die grundlegenden Konzepte und Beziehungen, die für das Verständnis und die Handhabung von Unsicherheiten in CPS notwendig sind. Sie umfasst Definitionen von Unsicherheitselementen, deren Ursachen und Auswirkungen sowie die Beziehungen zu anderen Entwicklungsartefakten. Die Modellierungssprache, implementiert als UML/SysML-Profil, dient dazu, die in der Ontologie definierten Konzepte in die Praxis umzusetzen. Sie ermöglicht es Entwicklern, die in der Ontologie beschriebenen Unsicherheiten in ihren Modellen zu repräsentieren und zu verarbeiten. Durch spezielle Stereotypen und Notationen ermöglicht die Modellierungssprache die direkte Integration der ontologischen Konzepte in die Modellierungssoftware und schafft somit eine nahtlose Verbindung zwischen theoretischem Rahmenwerk und praktischer Anwendung.

Im Rahmen ihrer Forschungsarbeit identifizieren (Gräßler *et al.*, 2021) Forschungsdefizite im Bereich der Unsicherheiten und des Risikomanagements bei Anforderungsänderungen. Mit dem Ziel, die effiziente Entwicklung komplexer interdisziplinärer Systeme zu verbessern, präsentieren die Autoren ein dreistufiges Vorgehen. Zunächst werden verschiedene Arten von Unsicherheiten klassifiziert. Darauf aufbauend entwickeln die Autoren ein deskriptives Modell, das die Ergebnisse der ersten Phase integriert. Schließlich werden Maßnahmen zum Risikomanagement abgeleitet, die in einem vierschrittigen Prozess definiert sind. Dieser umfasst die Identifikation von Unsicherheiten, ihre Analyse, die Einführung spezifischer Gegenmaßnahmen und die Überwachung ihrer Wirksamkeit. Tabelle 4-4 bietet eine Übersicht der von den Autoren ermittelten Mittel zur Identifizierung von Unsicherheiten im Requirements Engineering. Für die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Methodik interessante Aspekte wurden hervorgehoben.

Die Arbeit von (Inkermann, 2022) untersucht die Integration von Model-based Systems Engineering (MBSE) und Life Cycle Assessment (LCA), um Unsicherheiten und Varianten in frühen Entwicklungsphasen von Produkten zu handhaben. LCA ist eine systematische, analytische Methodik zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Produktsystemen über den gesamten Lebenszyklus – von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zum Ende des Lebenszyklus (Inkermann, 2022, S. 2). Der Autor ordnet den bei der Durchführung einer LCA auftretenden Unsicherheiten jeweils eine Methode des MBSE zur Handhabung zu. Der Fokus liegt dabei hauptsächlich auf kontextbezogenen Unsicherheiten des Produkts und Unsicherheiten in der Modellstruktur.

Tabelle 4-4: Mittel zur Identifizierung von Unsicherheiten im Requirements Engineering, i.A. an (Gräßler et al., 2021, S. 1693)

Unsicherheit	Mittel zur Identifizierung von Unsicherheit
Datenunvollständigkeit	• <i>Innerhalb einer Anforderung:</i> Software zur automatischen Qualitätssicherung • <i>Fehlende Anforderungen:</i> Anforderungserhebungstechniken (Fragetechniken, Kreativitätstechniken, dokumentenzentrierte Techniken, Beobachtungstechniken, unterstützende Techniken)
Datenungenauigkeit	• <i>Erste Erhebung:</i> Dokumentationsrichtlinien/-tools: Vorlagen, Qualitätskriterien für Anforderungen • <i>Überprüfung und Verbesserung:</i> Software zur automatischen Qualitätssicherung
Datenvarianz	• <i>Erste Erhebung:</i> Reflexion durch komplementäre Stakeholdergruppen • <i>Innerhalb einer Anforderung:</i> Annäherung durch stochastische Aussagen
Kontextungenauigkeit	• Simulationen (z. B. in VR), Kundenbewertungen, Prototyping, Anwendungsfälle, Mock-ups, Systemabgrenzung/Kontextabgrenzung, Stakeholder-Analyse, User Stories, Personas, Szenariotechnik • Anforderungserhebungstechniken
Interaktionsungenauigkeit	• <i>Interaktion mit Stakeholdern:</i> Vergleich von Kontextungenauigkeit • <i>Interaktion mit dem Entwicklungsteam:</i> Kommunikationsstrategien, Modellierung des System of Interest/Ziels (Struktur und Verhalten), Glossar
Entwicklungsunsicherheit	• Anwendung von Prozessmodellen, Methoden und Tools aus der Entwurfsmethodik • Überprüfung auf Inkonsistenzen • Agiler Ansatz, schnelle Produktentwicklung, Experience Design-Testen (Machbarkeit oder Erfüllungsgrad)
Modellierungsunsicherheit	• Verwendung von Modellierungsmethoden (z. B. SYSMOD oder OOSEM) • Verwendung von Modellierungssprachen (UML, SysML) • Verwendung von Modellierungstools (Inkonsistenzdetektion, Statusdarstellung, Aktualität)

(Mandel et al., 2023) entwickeln im Rahmen ihrer Forschungsaktivitäten eine methodische Unterstützung, die darauf abzielt, den Reifegrad von Zielsystemen durch die systematische Wiederverwendung von Wissen in Kombination mit gezielten Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten zu erhöhen. Das Zielsystem wird in (Albers und Braun, 2011, S. 12) in diesem Zusammenhang als die mental antizipierten und geplanten Eigenschaften des Objektsystems und enthält alle Informationen, die für die Prozessdurchführung erforderlich sind. Neben den relevanten Zielen für das

Produkt und den Prozess werden auch deren Abhängigkeiten und Randbedingungen dargestellt. Das Zielsystem umfasst dabei verschiedene Klassen von Zielen. Eine Klasse sind beispielsweise die Anforderungen. Zusätzlich zu den Anforderungen beinhaltet das Zielsystem Informationen zur Entstehung der Anforderungen, wie beispielsweise Informationen darüber was benötigt wird und weswegen eine Entscheidung für die Notwendigkeit gefallen ist. Das Objektsystem wiederum enthält alle Dokumente und Elemente, die Lösungen darstellen, die mit dem Zielsystem übereinstimmen. Dazu gehören nicht nur marktfähige Produkte, sondern auch die Dokumentation aller Zwischenergebnisse des Entwurfsprozesses (Albers und Braun, 2011, S. 13).

Im Ansatz von (Mandel *et al.*, 2023, S. 1) spielt die Identifizierung und Reduzierung von Unsicherheiten im Zusammenhang mit der Erhöhung des Reifegrades des Zielsystems eine wichtige Rolle. Es werden zu diesem Zweck zwei Mittel zur Reduzierung der Unsicherheit und damit zur Erhöhung des Reifegrads des Zielsystems in den Mittelpunkt gestellt. Einerseits die systematische Wiederverwendung von Wissen aus etablierten Systemen und andererseits der systematische Aufbau von Wissen durch Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten. Die erfassten Informationen dienen als Grundlage für die Abfrage der Erkenntnisse, die in einem Wissensgraphen dokumentiert sind, um somit potenzielle Fehler zu ermitteln.

Fehlende Informationen im Modell des Zielsystems sowie (modellierte) Unsicherheiten sind der Ausgangspunkt für die Identifizierung relevanter Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten. Diese Unsicherheiten können Wissenslücken oder Definitionslücken sein. Nachdem diese Unsicherheiten identifiziert wurden, können modellbasierte Ansätze die zielgerichtete Identifizierung und Analyse von Testfällen unterstützen. Ein modellbasierter Ansatz zur Unterstützung der Planung und Bewertung von Verifikations- und Validierungsaktivitäten in der mechatronischen Produktentwicklung wurde bereits 2021 in (Mandel *et al.*, 2021) vorgestellt.

4.1.2 Fazit

Der bisher vorgestellte Stand der Technik bietet eine umfassende Grundlage für die Entwicklung einer methodischen Unterstützung, die zur Beantwortung der Forschungsfragen beiträgt. Für eine klare Struktur wird der Stand der Technik aus drei Perspektiven betrachtet:

1. Relevanz der Themenstellung: Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird die Relevanz der Themenstellung und der damit verbundenen Forschungsfragen verdeutlicht.
2. Relevante Erkenntnisse: Diese Perspektive fokussiert sich auf Erkenntnisse aus dem Stand der Technik, die im Rahmen der Entwicklungsarbeit der präskriptiven Studie relevant sind.
3. Definition des Forschungsbedarfs: Dieser Blickwinkel beleuchtet den spezifischen Forschungsbedarf und leitet zu den Folgekapiteln 4.2 und 4.3 über.

Relevanz der Themenstellung

Die Ausführungen zu Modellierungsansätzen im Zusammenhang mit Unsicherheiten verdeutlichen die Aktualität der Frage, wie mit exogenen und endogenen Unsicherheiten in Entwicklungsprojekten umgegangen werden kann. Aktuelle Forschungsbestrebungen beschäftigen sich sowohl mit der frühzeitigen Identifizierung von Unsicherheiten als auch mit ihrer Explikation und systematischen Berücksichtigung in Modellen. Sowohl (Gräbler *et al.*, 2021) als auch (Inkermann, 2022) heben dabei das Potenzial von MBSE-Methoden, -Sprachen und -Werkzeugen hervor. Auch (Husung *et al.*, 2021, S. 3374) betonen die Möglichkeit, Ungereimtheiten in der Systembeschreibung durch den Einsatz definierter Analysemethoden aufzudecken. Diese Ausführungen

verdeutlichen die hohe Relevanz der Forschungsfragen und der Thematik der vorliegenden Arbeit im Kontext aktueller Herausforderungen in Entwicklungsprojekten und unterstreichen damit die Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit. Der beschriebene Einsatz von MBSE-Ansätzen in der Raumfahrt verdeutlicht deren Bedeutung für Entwickler und Forscher bei der Bewältigung aktueller Problemstellungen in dieser Domäne.

Relevante Erkenntnisse

In Bezug auf grundlegende Modellierungsaspekte bieten die etablierten Methodiken eine fundierte Wissensbasis für die Entwicklung spezifischer Analysemethoden. Insbesondere detailliert beschriebene Methodiken wie OOSEM, SYSMOD und MagicGrid zeigen, wie verschiedene SysML-Elemente und Diagrammtypen in einem methodischen Ansatz eingesetzt werden können. Die MagicGrid-Methodik zeichnet sich dabei durch ihre pragmatische Struktur der Hauptbereiche eines Systemmodells in einer matrixartigen Anordnung aus. Sie verwendet Ansichtsspezifikationen, die verschiedene Perspektiven im Modell ermöglichen, wobei eine Ansicht einen bestimmten Modellinhalt darstellt, der unter anderem in einem SysML-Diagramm visualisiert werden kann. Nach (ISO/IEC/IEEE, 2011, S. 2) ist eine Ansicht als das Arbeitsergebnis zu verstehen, das die Architektur eines Systems aus der Perspektive spezifischer Systemaspekte ausdrückt. Es ist zu beachten, dass die Verwendung unterschiedlicher Sichten und spezifischer SysML-Elemente kein Alleinstellungsmerkmal von MagicGrid ist, sondern auch in anderen MBSE-Methodiken wie OOSEM und SYSMOD Anwendung findet. Dennoch bietet die MagicGrid Methodik durch ihren strukturierten und pragmatischen Ansatz gute Voraussetzungen als Adaptiongrundlage. Eine weitere relevante Erkenntnis ist die mögliche Entwicklung von Modellbibliotheken als Werkzeug zur Bereitstellung wiederverwendbarer Konstrukte (Friedenthal *et al.*, 2012, S. 339). Die Literatur zu etablierten Methodiken stellt damit wichtige Erkenntnisse zur Nutzung von SysML-Elementen und -Diagrammen als Werkzeuge in Analysemethoden bereit, die zur Identifikation von Unsicherheiten in dokumentenbasierten Daten und Informationen eingesetzt werden können. Zudem kann das Verständnis für Problemstellungen durch ansichtsbasierte Darstellungen von Inhalten unterstützt werden, was zur Reduktion identifizierter Unsicherheiten beitragen kann. Die Arbeit von (Gräßler *et al.*, 2021) bietet relevante Erkenntnisse zu Methoden der Unsicherheitsidentifikation, welche in Tabelle 4-4 zusammengefasst sind. Kreativitätsfördernde Aspekte spielen dabei ebenso eine wichtige Rolle wie systematische Ansätze, beispielsweise der Einsatz modellbasierter Werkzeuge und Techniken sowie von Prozessmodellen. Die Anwendung dieser Mittel führt auch zu einer Reduzierung von Unsicherheiten, womit sie gleichzeitig entsprechende Gegenmaßnahmen darstellen (Gräßler *et al.*, 2021, S. 1692). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Entwicklung eines Vorgehensmodells, welches sowohl kreative als auch systematische Aspekte berücksichtigt, die Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten fördern kann. Im Kontext der Modellierungsansätze im Zusammenhang mit Unsicherheiten stellt die Arbeit von (Inkermann, 2022) MBSE-Methoden und SysML-Elemente vor. Diese bieten in Kombination mit etablierten Methoden eine Ausgangsbasis für die Entwicklung zielführender Analysemethoden. (Mandel *et al.*, 2023) betrachtet die systematische Wiederverwendung und den systematischen Aufbau von Wissen sowie den damit verbundenen Einsatz von Ontologien, unterstützt durch Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten, als Mittel zur Reduzierung von Unsicherheit. Demnach unterstützt der Einsatz von Ontologien den Wissensaufbau und die -wiederverwendung und trägt zur Reduzierung von Unsicherheiten bei, was für alle drei Forschungsfragen eine relevante Erkenntnis darstellt.

Definition des Forschungsbedarfs

Die etablierten Methodiken bieten wie eben festgestellt eine fundierte Wissensbasis. In Bezug auf die methodische Vorgehensweise sind diese Methodiken für den allgemeinen Einsatz ausgelegt. Sie zielen darauf ab, die Neuentwicklung komplexer Systeme mithilfe von MBSE zu unterstützen und anzuleiten. Die grundlegende Rolle von Methoden im MBSE-Kontext wurde in Kapitel 3.2.3 erläutert. Dabei geht es primär um die Organisation von Systems Engineering-Aktivitäten und die dazugehörige Unterstützung der damit verbundenen Aufgaben durch die Nutzung von Modellierungssprachen. Die Methodiken stellen somit allgemeine Rahmenwerke für die modellbasierte Systementwicklung dar und sind domänenunabhängig und damit für spezifische Entwicklungsprojekte nicht konkretisiert. Sie bieten zwar strukturierte Anleitungen für bestimmte Modellierungsaufgaben, beziehen sich aber nicht auf spezifische Aufgabenstellungen, die im Rahmen der Produktentwicklung auftreten können. Um die Forschungsfragen beantworten zu können, ist eine aufgabenspezifische Methodik notwendig, die sich auf die Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten in bestehenden Daten und Informationen fokussiert. Diese Methodik muss zudem speziell auf die Domäne der Satellitenentwicklung ausgerichtet sein. Es bedarf daher einer neuartigen Methodik, die sich im Rahmen der Satellitenentwicklungsdomäne auf, die in Kapitel 1.2 definierten Aufgaben spezialisiert, die im Folgenden nochmals genannt werden:

1. Identifikation von spezifischen Unsicherheiten in Daten und Informationen
2. Reduktion von spezifischen Unsicherheiten in Daten und Informationen
3. Unterstützung bei der Wissensgenerierung

Stellt man die in Kapitel 2.3 definierten Kriterien zur Bewertung der zu entwickelnden Methodiken den hier im Stand der Technik beschriebenen etablierten Methodiken gegenüber, dann lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen, die die vorangegangene Aussage stützen und ergänzende Aspekte hinzufügen.

K1 – Für die Übertragung dokumentenbasierter Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojekts aus unterschiedlichen Quellen in eine modellbasierte Umgebung stehen alle notwendigen methodischen und repräsentativen Elemente zur Verfügung.

Wie im Fazit bereits diskutiert, bieten die etablierten Methodiken zwar eine umfassende Sammlung an Werkzeugen, die im Rahmen der jeweiligen Modellierungssprache (meist SysML) die Übertragung von Daten und Informationen unterstützen können. Allerdings liegt ihr Fokus primär auf der Unterstützung der Neuentwicklung von Systemen, nicht auf der methodischen Begleitung der Datenübertragung selbst. Daher erfüllen sie das Kriterium der Unterstützung der Datenübertragung nur teilweise. Es fehlt ihnen einerseits an Elementen zur methodischen Unterstützung der definierten Aufgabe und andererseits an domänenspezifischen Elementen, die eine konkrete Hilfestellung bei der Aufgabenerfüllung bieten.

K2 – Es stehen alle notwendigen vorgehentechnischen und repräsentativen Elemente zur Verfügung, um ein systematisches Vorgehen bei der Modellbildung zu gewährleisten.

Etablierte Methodiken erfüllen dieses Kriterium aufgrund ihres Reifegrades und ihrer langjährigen, stetigen Weiterentwicklung. Allerdings ist dieses Kriterium insbesondere bei der Bewertung neuartiger Methodiken in Hinblick auf ihre Anwendbarkeit relevant, da es für alle einsatzfähigen Methodiken grundsätzlich erfüllt sein muss.

K3 – Es werden durch den Einsatz der Methodik Unsicherheiten in Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojektes identifiziert.

Da sich dieses Kriterium direkt auf die erste Aufgabenstellung bezieht, ähnelt die Schlussfolgerung jener zu Kriterium K1. Die Methodiken bieten zwar grundsätzlich modellbasierte Werkzeuge zur Unterstützung der Identifikation von Unsicherheiten, jedoch fehlt es an methodischer Anleitung und einer domänenspezifischen, ontologischen Unterstützung des Modellaufbaus. Daher können die etablierten Methodiken dieses Kriterium höchstens teilweise erfüllen.

K4 – Der Einsatz der Methodik ermöglicht die Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojektes.

Analog zu K3 zeigt sich auch hier die Diskrepanz zwischen der Verfügbarkeit von Werkzeugen und dem Fehlen methodischer Anleitung sowie einer domänenspezifischen, ontologischen Unterstützung. Zusätzlich berücksichtigen die Methodiken kaum kreative und schöpferische Aspekte in ihren Vorgehensmodellen, die zur Reduzierung identifizierter Unsicherheiten beitragen könnten. Der Fokus liegt stattdessen auf systematischen Aspekten. Zwar geht die SYSMOD rudimentär auf Techniken zur Lösung komplexer Problemstellungen mit kreativen und innovativen Ideen ein (Weilkiens, 2014, S.43-46), allerdings nicht als festen Bestandteil eines Vorgehensmodells. Da, wie bereits erwähnt, Mittel zur Identifikation von Unsicherheiten gleichzeitig zu deren Reduzierung beitragen können, erfüllen die etablierten Methodiken dieses Kriterium zumindest teilweise.

K5 – Durch den Einsatz der Methodik wird die Wissensgenerierung unterstützt.

Die etablierten Methodiken weisen keine explizite Zielsetzung in Bezug auf dieses Kriterium auf. Ihr primärer Fokus liegt, wie bereits dargelegt, auf der Unterstützung und Anleitung bei der Neuentwicklung komplexer Systeme mittels MBSE. Gleichwohl fördert das in diesen Methodiken jeweils beschriebene strukturierte Vorgehen indirekt die Wissensgenerierung. Folglich lässt sich konstatieren, dass dieses Kriterium von den etablierten Methodiken eher teilweise erfüllt wird.

K6 – Die Methodik ist in Hinblick auf eine einfache und korrekte Verfahrensbefolgung in einem realen Anwendungsfall der Satellitenentwicklungsdomäne einsetzbar.

K7 – Es besteht eine konsistente Terminologie in der Methodik und ihren Elementen.

K8 – Die Methodik erfüllt ihren Zweck.

Die etablierten Methodiken erfüllen K6 und K7 grundsätzlich. Allerdings dienen diese Kriterien primär dazu, die Anwendbarkeit neuartiger Methodiken zu bewerten, und liefern daher wenig Aufschluss über den konkreten Forschungsbedarf. Dies gilt auch für das Nützlichkeits-Kriterium K8. Eine Aussage in Bezug auf K8 würde einen Einsatz der betrachteten Methodiken voraussetzen.

Aufbauend auf der vorherigen Aussage und den gewonnenen relevanten Erkenntnissen wird der Forschungsbedarf nun abschließend definiert. Um die Forschungsfragen zu beantworten und die definierten Kriterien zu erfüllen, bedarf es einer anwendungsspezifischen neuartigen Methodik mit Fokus auf die Domäne der Satellitenentwicklungsprojekte. Die Berücksichtigung kreativer und schöpferischer Aspekte im methodischen Vorgehen sowie die Integration einer domänenspezifischen, ontologischen Unterstützung ergänzen den Forschungsbedarf. In den beiden folgenden Kapiteln wird der Stand der Technik in Bezug auf diese beiden Aspekte untersucht.

4.2 Design Thinking im Systems Engineering

4.2.1 Beschreibung bestehender Ansätze

Design Thinking Prozessmodelle

Ein grundlegender Aspekt der Anwendung von Design Thinking ist die Denkweise innerhalb eines definierten und meist iterativen Prozesses. (Dorst, 2011) untersucht, wie unterschiedliche Denkweisen in der formalen Logik beschrieben werden, um den Kern des Design Thinking zu erfassen. Er beschreibt die Denkmuster der Induktion, Deduktion und zwei Formen des abduktiven Denkens, illustriert anhand einer Gleichung, in der ein gewünschter Wert die Summe aus dem angewandten Arbeitsprinzip und einem Subjekt darstellt. Abduktives Denken, ein von Charles Sander Pierce im 19. Jahrhundert beschriebenes Konzept, spielt eine wichtige Rolle in der Wahrnehmung und ermöglicht es, in neuen Perspektiven und über zukünftige Möglichkeiten nachzudenken (Tschimmel, 2012). Das abduktive Denken lässt sich nach (Reichert, 2016, S. 131 f.) als eine Art von Schlussfolgerung verstehen, die auf drei Komponenten basiert: einer bekannten Größe (dem Resultat) und zwei unbekannten Größen (der Regel und dem Fall). Es kann als mentaler, nicht willentlich herbeiführbarer Prozess verstanden werden, der unerwartet auftritt und dabei Aspekte in Relation bringt, die vermeintlich keinen kausalen Zusammenhang haben, also Dinge, die nicht den Anschein hatten, zusammenzugehören. Die Abduktion zielt auf die Entdeckung von Neuem ab (Reichert, 2013, S. 111) und ihr Ergebnis ist eine sprachliche Hypothese. Dieses Ergebnis stellt jedoch nicht zwangsläufig die beste Erklärung dar (Reichert, 2016, S. 132). Im Gegensatz dazu geht die Deduktion von einer bekannten Regel aus und zielt darauf ab, diesen allgemeinen Zusammenhang in einer betrachteten Datenquelle wiederzufinden (Reichert, 2013, S. 18). Die Induktion hingegen unterscheidet sich von der Abduktion dahingehend, dass sie von zwei bekannten Größen (Resultat und Regel) auf die unbekannte Größe des Falls schließt. Sie ermöglicht eine Schlussfolgerung auf Grundlage qualitativer Merkmale einer Stichprobe auf das Vorhandensein anderer Merkmale. Um die Unterschiede zwischen Deduktion, Induktion und Abduktion verständlicher zu machen, bedient sich (Reichert, 2016) metaphorischer Mittel und beschreibt diese in seinem Werk wie folgt:

„Eine Deduktion vorzunehmen ist zu vergleichen mit dem Einhängen eines Karabinerhakens in einen anderen. Auf diese Weise kann man gut belastbare Ketten (Beweisketten) konstruieren. Die qualitative Induktion ist dagegen zu vergleichen mit dem Flechten eines Bandes aus vielen Bändern mit unterschiedlicher Länge und aus unterschiedlichem Material. Wie belastbar dieses Band jedoch ist, weiß man nicht wirklich, glaubt aber aufgrund von Erfahrungen davon ausgehen zu können, dass es wahrscheinlich gewissen Belastungen standhält. Die Abduktion ist zu vergleichen mit einem Sprung ins Dunkle. Man weiß nicht wirklich, was einen erwartet: die Leere oder fester Boden.“ (Reichert, 2016, S. 138)

Ein weiteres zentrales Prinzip ist die Kombination von konvergentem und divergentem Denken (Brenner und Uebornickel, 2016, S. 8). Der Design Thinking-Doppeldiamant des British Design Council aus dem Jahr 2005, vorgestellt in (Hehn et al., 2020), basiert auf dem Divergenz-Konvergenz-Modell von (Banathy, 1996) und verdeutlicht das Zusammenspiel dieser Denkweisen. Dabei öffnet divergentes Denken einen weiten Raum für die Erkundung von Nutzerbedürfnissen und Umgebung, um eine breite Basis für Problemdefinition und Lösungsfindung zu schaffen. Konvergentes Denken hingegen verdichtet die gesammelten Informationen zu umsetzbaren Lösungen

für identifizierte Bedürfnisse (Hehn *et al.*, 2020). Abbildung 4-4 veranschaulicht das Doppel-Diamant-Prozessmodell.

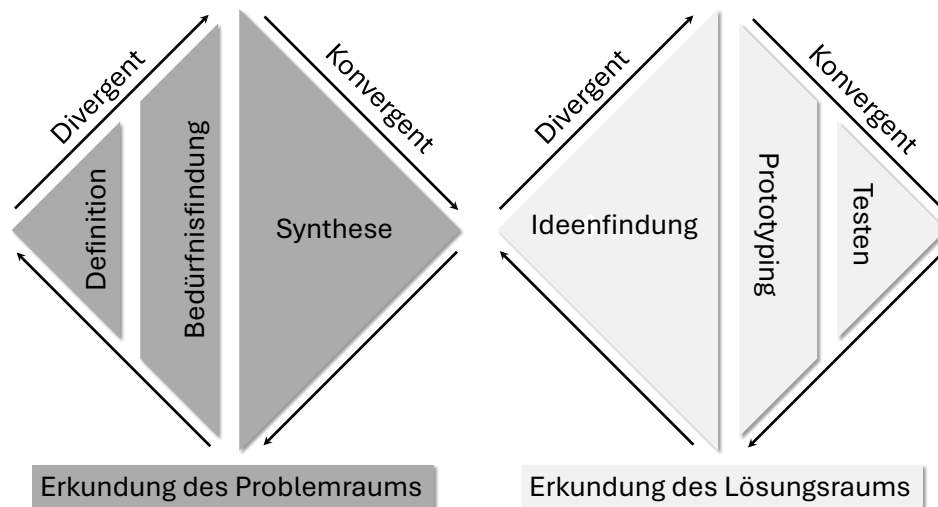


Abbildung 4-4: Doppel-Diamant-Prozessmodell i.A. an Darstellung in (Hehn *et al.*, 2020, S. 26)

(Tellioglu, 2016, S. 2) beschreibt neben dem Doppel-Diamant-Prozessmodell weitere Design-Thinking-Ansätze wie das 3-I-Modell, das HCD-Modell von IDEO, das Modell des Hasso-Plattner-Instituts sowie das Service Design Thinking (SDT)-Modell von Stickdorn und Schneider, welches die vier Phasen Erkundung, Erschaffung, Reflexion und Implementierung umfasst. Das 3-I-Modell von IDEO umfasst die Phasen Inspiration, Ideation und Implementation. In der Inspirationsphase wird die Problemstellung identifiziert, Gestaltungsvorgaben ausgearbeitet und das Verhalten der Zielgruppe beobachtet. In der Ideationsphase synthetisiert ein interdisziplinäres Team die gesammelten Beobachtungen, um neue Lösungen oder Anpassungsmöglichkeiten zu entwickeln. Die Implementationsphase beinhaltet die Umsetzung der besten Ideen in einen Aktionsplan, wobei Prototyping eine zentrale Rolle spielt, um Ideen zu testen zu iterieren und zu verbessern. Abbildung 4-5 veranschaulicht die drei Phasen des 3-I-Modells.

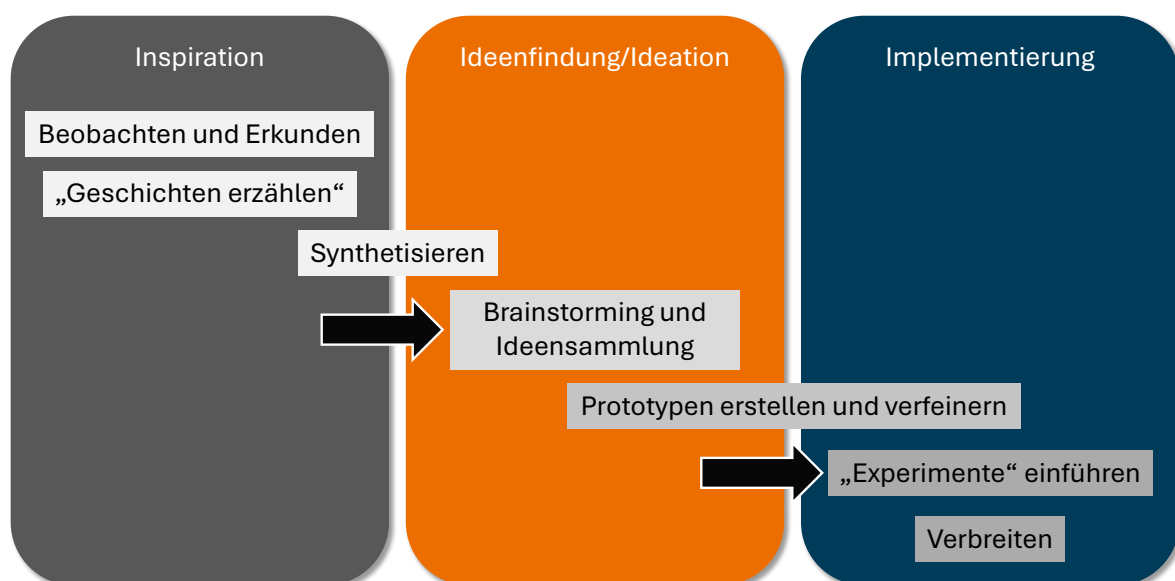


Abbildung 4-5: Das Design Thinking 3-I-Modell von IDEO i.A. an (Tschimmel, 2012, S. 6)

Das HCD (Human-Centered Design) Modell von IDEO wurde speziell für Nichtregierungsorganisationen und sozial ausgerichtete Unternehmen entwickelt, die mit benachteiligten Gemeinschaften arbeiten. Es umfasst die drei Phasen Hören, Erschaffen und Liefern (Hearing, Creating, Delivering) und ist im Vergleich zum 3-I-Modell deutlich komplexer und umfassender (Tschimmel, 2012, S. 7). Diese Phasen unterstützen einen partizipativen Entwurfsprozess, der darauf abzielt, Nutzerbedürfnisse tiefgehend zu verstehen und innovative, finanziell nachhaltige Lösungen zu entwickeln. Das Modell wird durch verschiedene Techniken und Werkzeuge unterstützt, die in einem frei verfügbaren Toolkit bereitgestellt werden.

Das Design Thinking-Modell der d-school des Hasso-Plattner-Instituts in Potsdam visualisiert den Design Thinking-Prozess in sechs Schritten (Weinberg, 2024). Die Schritte sind durch gekrümmte Linien verbunden, um den iterativen Charakter des Modells zu verdeutlichen, bei dem jeder Schritt in Schleifen durchlaufen werden kann. Das Modell beginnt mit der Phase "Verstehen", in der durch Literatur- und Dokumentenanalyse Informationen zum Thema gesammelt werden. Die zweite Phase, "Beobachten", basiert auf einem qualitativen Forschungsansatz mit Interview- und Beobachtungstechniken, um tiefe Einblicke in die Bedürfnisse der Nutzer zu gewinnen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in der dritten Phase, "Sichtweise definieren", zusammengeführt und im Entwicklungsteam synthetisiert. Die vierte Phase, "Ideen finden", fokussiert, ähnlich wie im 3-I-Modell, auf die Entwicklung einer Vielzahl von Ideen (Tschimmel, 2012, S. 8). Aspekte wie Umsetzbarkeit, Potenzial und Vision fließen in die Bewertung der generierten Ideen ein. In der fünften Phase, "Prototypen entwickeln", werden die ausgewählten Ideen konkretisiert. Hierbei können Entwickler auf verschiedene Hardware- und Software-basierte Werkzeuge und Hilfsmittel zurückgreifen. In der letzten Phase, "Testen", werden grundlegende Funktionen, die Umsetzbarkeit und die intuitive Nutzbarkeit des Prototyps überprüft. Abbildung 4-6 visualisiert die sechs Schritte des Design Thinking-Innovationsprozesses dieses Modells.

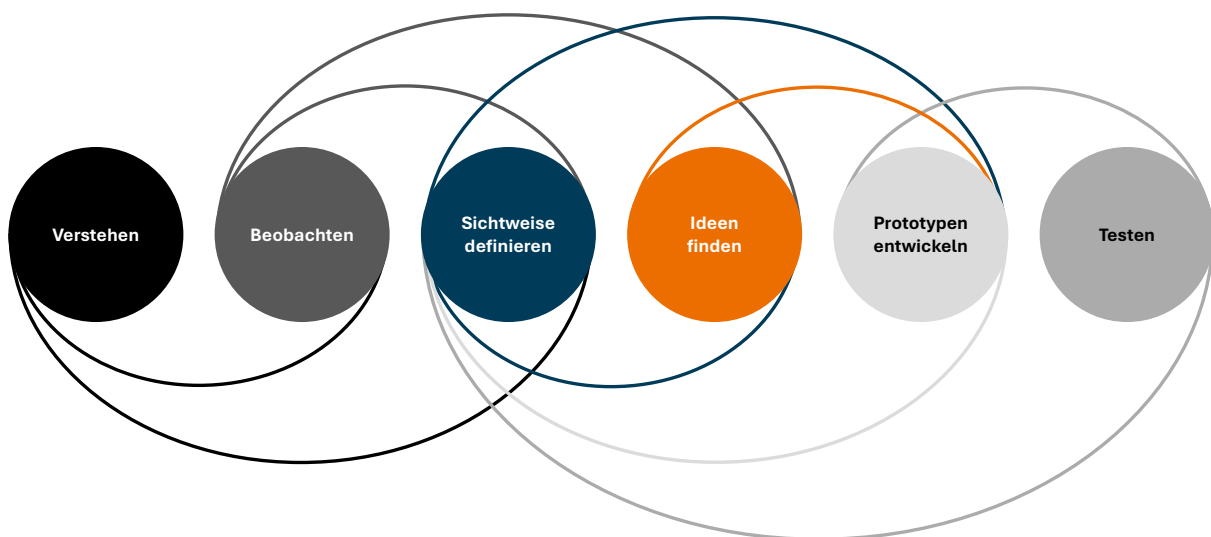


Abbildung 4-6: Design Thinking-Modell der d-school des Hasso-Plattner-Instituts in Potsdam i.A. an (Plattner, 2011, S. 220)

Das aktuelle Modell des Hasso-Plattner-Instituts für Design in Stanford (Alhazmi und Huang, 2020, S. 3) beschreibt den Design Thinking-Prozess ähnlich wie das Modell der d-school des Hasso-Plattner-Instituts in Potsdam und stellt eines der bekanntesten Design Thinking-Modelle dar. Abbildung 4-7 veranschaulicht das Modell des Stanford-Instituts und verdeutlicht die Ähnlichkeit zwischen den beiden Modellen aus Potsdam und Stanford. Im Gegensatz zum

sechsstufigen Modell der d-school in Potsdam gliedert dieses Modell den Prozess in fünf Hauptphasen (Plattner, 2010): Einfühlen (Empathize), Definieren (Define), Ideen entwickeln (Ideate), Prototypen entwickeln (Prototype) und Testen (Test). Ziel ist es, durch tiefes Nutzerverständnis und iteratives Testen von Prototypen innovative Lösungen zu entwickeln.

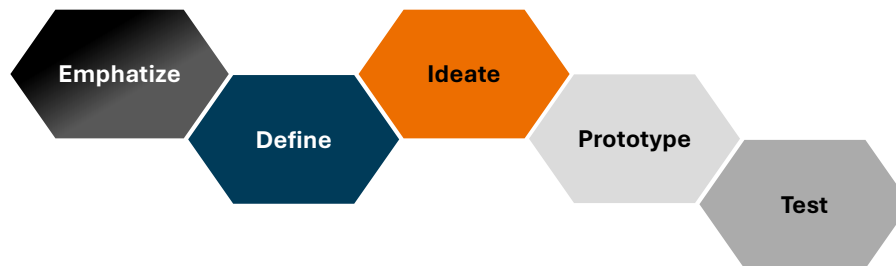


Abbildung 4-7: Fünf-Phasen-Modell des Hasso-Plattner-Instituts für Design in Stanford i.A. an (Plattner, 2010)

In der Empathie-Phase wird ein grundlegendes Verständnis für die Nutzer und ihre Bedürfnisse geschaffen. Darauf aufbauend wird in der Definitionsphase das Problem präzise formuliert. In der Ideenentwicklungsphase werden kreative Lösungsansätze generiert, die anschließend in der Prototypenphase schnell und kostengünstig umgesetzt und getestet werden. Die Testphase dient dazu, die Lösungen anhand von Nutzerfeedback zu verbessern und sicherzustellen, dass sie den Nutzerbedürfnissen gerecht werden.

Einsatz von Design Thinking im Systems Engineering

(Pereira *et al.*, 2021) untersuchen den Einsatz von Design Thinking im Requirements Engineering und stellen fest, dass Design Thinking die Anforderungserhebung und -spezifikation positiv beeinflusst und das Verständnis für die Bedürfnisse der Nutzer fördert. Auch (Hehn und Ueberrickel, 2018) sehen in Design Thinking das Potenzial, die gängigen Praktiken des Requirements Engineering zu unterstützen und eine symbiotische Beziehung zwischen beiden Ansätzen zu ermöglichen. Im Systems Engineering ist die korrekte Erfassung von Anforderungen essenziell (Holt *et al.*, 2012, S. 1). Daher wird im gesamten Bereich des Systems Engineering großer Wert daraufgelegt, Anforderungen umfassend zu verstehen. Das Requirements Engineering stellt somit eine wichtige Phase innerhalb des gesamten Systems Engineering-Prozesses dar (Dick *et al.*, 2017, S. 9). Da Design Thinking nachweislich das Requirements Engineering positiv beeinflusst und dieses wiederum eine essenzielle Phase des Systems Engineering darstellt, erscheint es vielversprechend, die Nutzung von Design Thinking innerhalb des Systems Engineering zu erforschen.

(Greene, 2019) entwickelte ein integriertes Rahmenwerk für Systems Engineering, Systems Thinking und Design Thinking. Dieses Rahmenwerk verdeutlicht, dass Systemingenieure einen menschenzentrierten Ansatz zur Entwicklung komplexer Systeme verfolgen, während Produktdesigner systematisch und analytisch vorgehen. Das "Systems Design Thinking Framework" verdeutlicht das komplementäre Verhältnis von Design Thinking und Systems Engineering und liefert grundlegende Erkenntnisse für die Erforschung des gemeinsamen Einsatzes beider Ansätze. (Teeka *et al.*, 2021) beschreiben Systems Design Thinking als interdisziplinären und kollaborativen Ansatz, der divergente und konvergente Denkstrategien kombiniert. Durch Empathie und Kreativität werden Kundenbedürfnisse integriert und gleichzeitig ein systematischer und methodischer Systems Thinking-Ansatz zur Strukturierung und Bearbeitung von Inhalten genutzt. (Durantin *et al.*, 2016) sehen Design Thinking als hilfreich für die Systemvorstellung, während Systems

Engineering die Systembegründung liefert. Beide Methoden sind komplementär und können nebeneinander angewendet werden. Design Thinking eignet sich besonders, um divergentes Denken zu fördern und zu erweitern, während es ihm an Werkzeugen zur Sammlung und Strukturierung von Ergebnissen mangelt. Umgekehrt profitiert Systems Engineering von der Strukturierung von Inhalten, verfügt aber nicht über die Mittel, um vielfältige und alternative Inhalte zu integrieren.

(Tekaat *et al.*, 2019) entwickelten ein Modell zur Integration von Design Thinking in das *Automotive Systems Engineering (ASE)*. Hierbei ist unter dem Begriff *Automotive Systems Engineering* ein ganzheitlicher, interdisziplinärer Ansatz zur Fahrzeugentwicklung zu verstehen, der auf dem Systems Engineering aus der Luft- und Raumfahrt basiert. ASE adaptiert dieses Konzept für die Automobilindustrie und nutzt das V-Modell als zentrale Orientierung für den Entwicklungsprozess (Tekaat *et al.*, 2019, S. 2884 f.). Die Arbeit untersucht dabei, welche Elemente von Design Thinking sich in das *Automotive Systems Engineering* integrieren lassen, um Sicherheitsherausforderungen (Safety und Security) zu adressieren. Zu diesem Zweck wird ein Integrationsansatz entwickelt, der auf der Design Thinking-Interpretation von (Brenner und Uebernickel, 2016) basiert, welche wiederum auf dem Fünf-Phasen-Modell des Hasso-Plattner-Instituts für Design in Stanford aufbaut (siehe Abbildung 4-7). Die ersten beiden Phasen des iterativen Prozesses konzentrieren sich auf den Problemraum, die folgenden drei Phasen auf den Lösungsraum des Integrationsmodells. Das Modell berücksichtigt explizit die Aspekte des divergenten und konvergenten Denkens. Eine Einschränkung des Ansatzes besteht darin, dass er lediglich die Systementwurfsphase innerhalb des V-Modells für die sicherheitsorientierte Fahrzeugentwicklung betrachtet (Tekaat *et al.*, 2019).

(Camacho, 2018) betont in ihrer Arbeit über ein integratives Modell des Design Thinking, dass schöpferische Fähigkeiten nicht nur kreatives und divergentes, sondern auch analytisches und konvergentes Denken erfordern. Der zunehmende Einsatz von Design Thinking zur Problemlösung in komplexen Kontexten macht ein tiefgehendes Verständnis des Zusammenspiels von kreativem und analytischem Denken unerlässlich. Das Problemlösungsmodell von Anders Skoe (1997) bietet hierfür eine neurokognitive Perspektive (Camacho, 2018, S. 637). Skoes Modell basiert auf der traditionellen Zuordnung von kreativen und divergenten Prozessen zur rechten Gehirnhälfte und analytischen und konvergenten Prozessen zur linken Gehirnhälfte. Da sich der Mensch jedoch nur auf eine dieser Aktivitäten bewusst konzentrieren kann, empfiehlt Skoe, beim divergenten Denken die linke Gehirnhälfte zu "isolieren". So kann die rechte Gehirnhälfte uneingeschränkt kreative Mechanismen ohne den analytischen Einfluss der linken Hemisphäre entfalten. Vor dem Übergang zur analytischen Phase ist ebenfalls eine bewusste Unterbrechung der Tätigkeit sinnvoll, um eine strukturierte Analyse der generierten Ideen zu ermöglichen. Skoes Modell basiert auf dem Doppel-Diamant-Prozessmodell (siehe Abbildung 4-4) und ergänzt dieses um sogenannte "Sub-Diamanten" innerhalb der einzelnen Phasen. Diese verdeutlichen den Wechsel zwischen analytischem (konvergentem) und kreativem (divergentem) Denken. Abbildung 4-8 veranschaulicht den Problemlösungsprozess nach Anders Skoe und die Aktivitäten in den jeweiligen divergenten und konvergenten Phasen.

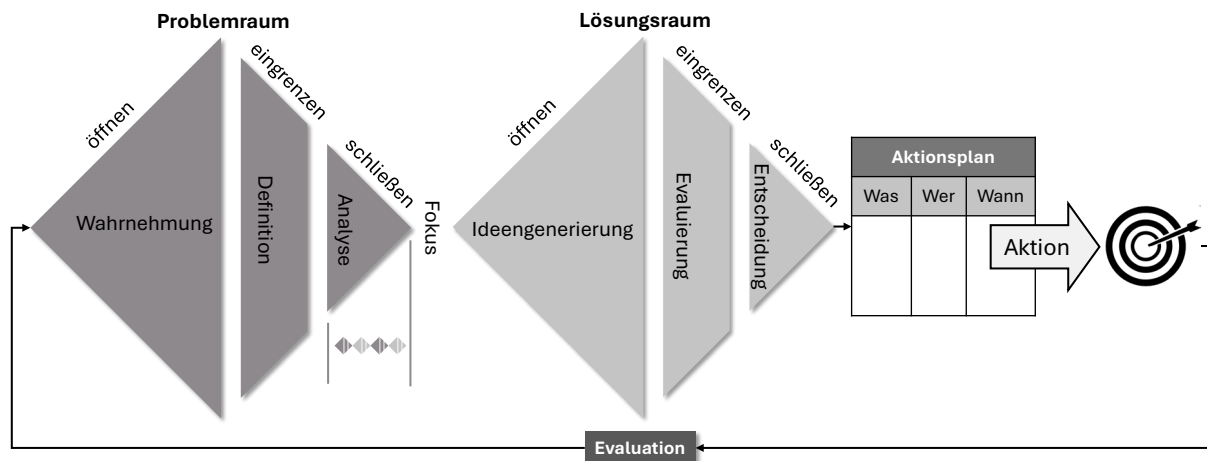


Abbildung 4-8: Problemlösungsmodell nach Anders Skoe. i.A. an(Camacho, 2018, S. 638)

Die Arbeit von (Tomita et al., 2017) befasst sich mit der Entwicklung des *Structured Design Thinking* (strukturiertes Design Thinking) Frameworks. Ziel des Rahmenwerks ist es, einen Beitrag zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit von Denkprozessen zu leisten, die bei der Lösung von Problemen mit Hilfe von Design Thinking ablaufen, um somit auch den Nutzen des Ergebnisses zu steigern. Der Ansatz ist eine Erweiterung des Daten-Informationen-Wissen-Weisheit-Modells (DIKW-Modell), welches in (Rowley, 2007) beschrieben und erläutert ist und stellt die Integration des explorativen jedoch unstrukturierten Design Thinking-Prozesses und des ganzheitlichen, systematischen und strukturierten Systems Engineering-Prozesses in den Mittelpunkt. Die Autoren schlagen den Einsatz des Rahmenwerks vor allem in der Phase der Umwandlung von Informationen in Wissen vor. Eine wichtige Rolle bei dem Ansatz spielt das Konzept eines Leitfadens für das Denken, auf dessen Grundlage bei den Denkprozessen abgewogen wird, wann strukturiert und wann nicht strukturiert vorgegangen werden soll, wobei die Vorteile des jeweiligen Ansatzes genutzt werden. Die Autoren berücksichtigen dabei das Konzept der Einsicht, dass eine Komponente des strukturierten Design Thinking-Rahmenwerks ist. Als Einsicht definieren die Autoren neue Wahrnehmungen und wichtige Erkenntnisse, die als Ausgangspunkte für die nächste Aktivität im Rahmen der Entwicklung innovativer Lösungen dienen (Tomita et al., 2017, S. 6). Die Autoren beziehen sich dabei auf die Aussage von (Plattner, 2010, S. 3), dass Einsichten das Denken und die Aktivitäten vorantreiben und sich insbesondere auf Entdeckungen beziehen, die von niemandem sonst hätten gefunden werden können. Einsichten entstehen in jeder Phase des Denkprozesses und in vielen Fällen während der Diskussion der Ergebnisse, was sich auf die Entstehung von Iterationen auswirkt. Abbildung 4-9 veranschaulicht das strukturierte Design Thinking-Rahmenwerk (SDTF) mit seinen Teilprozessen.

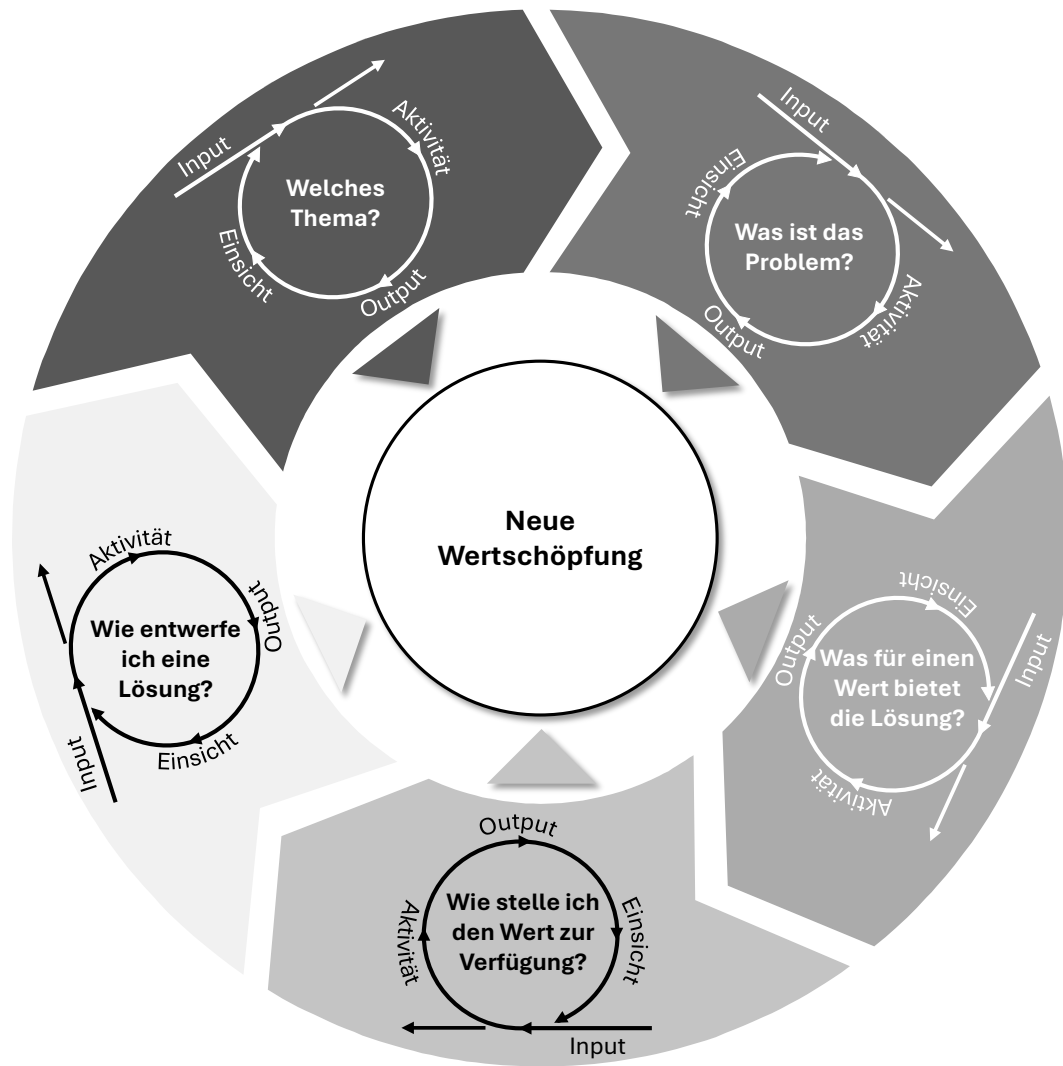


Abbildung 4-9: Das strukturierte Design Thinking Framework i.A. an (Tomita et al., 2017, S. 7)

Das SDTF besteht aus fünf Teilprozessen, die nicht linear angeordnet sind: *Thema*, *Problemdefinition*, *Nutzenversprechen*, *Ideenfindung* und *Lösung*. Diese Teilprozesse sind durch Befähiger- und Verwerter-Beziehungen miteinander verbunden. Dies ermöglicht es den Anwendern, an jedem Punkt des Systems einzusteigen und den Denkprozess flexibel zu gestalten. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 4-5 durch die zyklische Darstellung des Rahmenwerks hervorgehoben. Innerhalb jedes Prozesses können verschiedene Aktivitäten durchgeführt werden, wobei der Benutzer nicht nur die Aktivität auswählt, sondern auch über den Denkmodus (divergent oder konvergent) entscheidet. Diese Wahl beeinflusst maßgeblich den Output der jeweiligen Aktivität. Der in jedem Teilprozess stattfindende Mikroprozess besteht wiederum aus den vier Elementen: *Input*, *Aktivität*, *Output* und *Einsicht*. Abbildung 4-9 veranschaulicht ebenfalls den zyklischen Charakter des Mikroprozesses.

Schließlich adressiert die Arbeit von (Bursac et al., 2022) die Herausforderung, MBSE effektiv in Problemlösungsprozessen der Produktentwicklung einzusetzen. Die Autoren entwickeln einen menschenzentrierten Ansatz, der die Vorteile von MBSE im Problemlösungsprozess aufzeigt. Zu diesem Zweck erweitern sie den SPALTEN-Problemlösungsansatz von (Albers et al., 2005) um eine Ebene für die Analyse und Synthese von MBSE-Modellen im Verlauf eines Lösungsprozesses. SPALTEN beschreibt eine universelle Vorgehensweise zur Behandlung von Problemen mit

unterschiedlichen Randbedingungen und Komplexitätsgraden, die sowohl bei zukünftigen (geplanten) als auch bei spontan auftretenden (ungeplanten) Problemen angewendet werden kann (Albers und Braun, 2011, S. 15). Abbildung 4-10 zeigt den aus sieben Schritten bestehenden „atmenden“ SPALTEN-Prozess, der zwischen Informationsgenerierung und -reduktion wechselt.

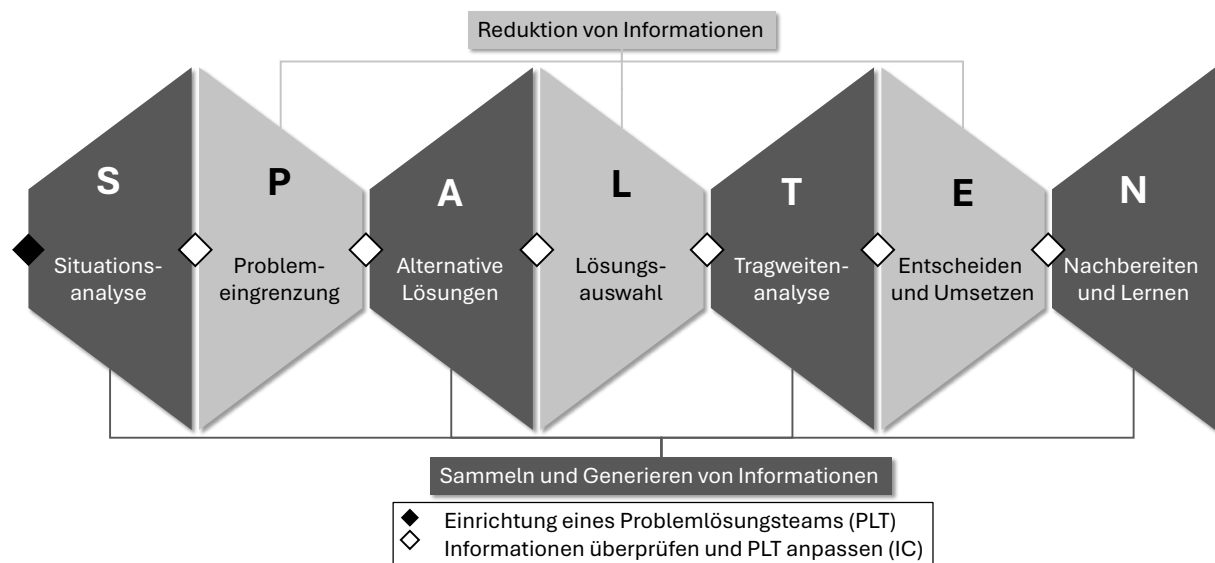


Abbildung 4-10: Das "atmende" SPALTEN-Prozessmodell i.A. an (Bursac et al., 2022, S. 4)

Darüber hinaus wird der SPALTEN-Problemlösungsansatz um zwei zusätzliche Elemente erweitert: die Visualisierung des Lösungsraums und die Erweiterung des kontinuierlichen Ideenspeichers zu einer kontinuierlichen Informationsspeicherung. Die Visualisierung gibt dem Benutzer zusätzlich zum Wissen über den Atmungsprozess eine Rückmeldung über die Informationsmenge und damit über die angestrebte MBSE-Nutzung. Die kontinuierliche Informationsspeicherung umfasst ein Referenzsystem, Referenzsystemelemente und Informationselemente, die die Grundlage für den Einsatz von MBSE bilden. Neben dem SPALTEN-Problemlösungsansatz basiert der Ansatz von (Bursac et al., 2022) auf den folgenden theoretischen Grundlagen: Erstens liefert das Modell der PGE-Produktgenerationsentwicklung von (Albers et al., 2015) die konzeptionelle Basis für die kontinuierliche Informationsspeicherung. Dieses Modell besagt, dass Produktentwicklung stets auf einem Referenzsystem basiert, das mit verschiedenen Referenzsystemelementen gefüllt ist und als Grundlage für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration dient. Zweitens stellt das Konzept des schnellen und langsamen Denkens von (Kahneman, 2017) einen wichtigen Aspekt dar, da es die Bedeutung einer Mischung aus schnellem (intuitivem) und langsamem (analytischem) Denken für effektive Problemlösung betont (Bursac et al., 2022, S. 2). Die Kernkonzepte des Ansatzes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Integration von MBSE in den Problemlösungsprozess
- Unterscheidung zwischen Analyse- und Syntheseaktivitäten in der Modellierung
- Berücksichtigung des menschlichen Faktors in der Modellierung, da Ingenieurwesen nach wie vor eine kreative Tätigkeit ist

Im Rahmen der Arbeit von (Bursac et al., 2022) wurden fünf Anwendungsfälle der Systemmodellierung aus der Automationsentwicklung und aus Forschungsaktivitäten analysiert. Die Modellanalyse- und Syntheseaktivitäten wurden den Schritten der SPALTEN-Methode zugeordnet. Die Haupteckdaten sind:

- MBSE-Modelle sind besonders nützlich in den Phasen der Situationsanalyse, Problemeingrenzung und Konsequenz-Analyse.
- Die Synthese von MBSE-Modellen kann in frühen Phasen problematisch sein und sollte erst nach einer Problemdefinition erfolgen.
- Eine Mischung aus schnellem und langsamem Denken ist für effektive Problemlösung notwendig.

4.2.2 Fazit

Der Stand der Technik zeigt, dass sich eine vielversprechende Entwicklung hin zur Integration von Design Thinking im Systems Engineering abzeichnet. Die Verbindung beider Paradigmen erweist sich als aktives und vielversprechendes Forschungsfeld mit hoher Relevanz. Hinsichtlich der Entwicklung eines integrativen Vorgehensmodells lassen sich folgende Erkenntnisse aus dem Stand der Technik ableiten:

- *Komplementarität der Ansätze:* Design Thinking und Systems Engineering ergänzen sich und können parallel eingesetzt werden (Greene *et al.*, 2017; Greene, 2019). Während Design Thinking divergentes Denken fördert, mangelt es ihm an Werkzeugen zur Sammlung und Strukturierung von Ergebnissen. Umgekehrt profitiert Systems Engineering von strukturierten Inhalten, bietet aber nicht die Möglichkeit, vielfältige und alternative Inhalte zu integrieren.
- *Anwendungsspezifische Integrationsansätze:* Es existieren bereits konkrete Integrationsmodelle, wie beispielsweise die Arbeit von (Tekaats *et al.*, 2019) zur Integration von Design Thinking in Automotive Systems Engineering. Solche Ansätze dienen als Inspirationsquelle für die Entwicklung eigener Modelle.
- *Aktivität vs. Denkprozess:* Das in (Camacho, 2018) vorgestellte Problemlösungsmodell basiert auf einem etablierten Design Thinking-Modell und ordnet dabei Aktivitäten den Denkprozessen zu, um damit sowohl die Effizienz, als auch die Effektivität bei der Problemlösung zu steigern.
- *Beitrag zur Wissensgenerierung:* Die Integration von Design Thinking und Systems Engineering in einem Vorgehensmodell kann die Wissensgenerierung fördern (Tomita *et al.*, 2017). Insbesondere das Structured Design Thinking-Rahmenwerk unterstützt diesen Prozess, indem es die Sammlung und Strukturierung von Erkenntnissen in jeder Phase des Denkprozesses ermöglicht.
- *Aufgabenspezifischer Einsatz von Modellierung:* (Bursac *et al.*, 2022) betonen die Notwendigkeit, moderne Modellierungstechniken gezielt und aufgabenspezifisch einzusetzen. Dabei sollte der menschliche Faktor berücksichtigt werden, da Ingenieurwesen stets auch eine kreative Tätigkeit bleibt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Der Stand der Technik bietet zwar eine fundierte Grundlage für die Entwicklung eines Integrationsmodells, das sowohl kreative als auch analytische Aspekte berücksichtigt. Es fehlt jedoch an einem Vorgehensmodell, das den Fokus gezielt auf die Identifizierung und Minderung von Unsicherheiten in Daten und Informationen legt und gleichzeitig die genannten Mechanismen integriert und deren Nutzbarkeit fördert.

4.3 Ontologien für Satellitenentwicklungsprojekte

4.3.1 Definition und Klassifizierung von Satelliten

Ein Satellit ist ein Objekt, das ein anderes Objekt im Weltraum umkreist. Man unterscheidet zwischen natürlichen und künstlichen Satelliten (Manning, 2018). Natürliche Satelliten sind zum Beispiel Planeten wie die Erde, die die Sonne umkreist oder der Mond, der die Erde umkreist. Künstliche Satelliten hingegen sind menschengemachte Objekte, die in den Weltraum transportiert werden und dort die Erde oder andere Himmelskörper umkreisen. Bekannte Beispiele für künstliche Satelliten sind das Hubble-Weltraumteleskop und die Internationale Raumstation (ISS). Künstliche Satelliten gibt es in verschiedenen Formen und Größen, ausgestattet mit unterschiedlichen Instrumenten und Subsystemen, um vielfältige Aufgaben und Funktionen im Weltraum zu erfüllen (Manning, 2018).

Eine einheitliche Taxonomie für Satelliten, basierend auf Masse und Größe, wird von (Bothelo und Xavier, 2019) vorgeschlagen. Diese Taxonomie berücksichtigt aktuelle Trends, die sich aus dem fortschreitenden technologischen Fortschritt in der Raumfahrt ergeben. Die Taxonomie definiert zehn Satellitenklassen, die je nach Masse und Größe weiter in verschiedene Typen unterteilt sind (Bothelo und Xavier, 2019, S. 67 ff.). Tabelle 4-5 zeigt einen Ausschnitt der vorgeschlagenen Klassifikation von Satelliten und anderen Raumfahrzeugen, die auf den Attributen Masse und Größe basieren.

Tabelle 4-5: Ausschnitt aus der Klassifikation von Satelliten aus (Bothelo und Xavier, 2019, S. 68)

Klasse		Subklasse		Größe
Name	Masse [Kg]	Typ	Masse [Kg]	
Mega	>1.000.000	-	-	Ultra very large
....				
Prototyps	10.000-1.000	Heavy	10.000-6.000	Large
		Intermediary	6.000-3.000	
		Light	3.000-1.000	Medium
Minisatellite	1.000-100	Heavy	1000-500	
		Intermediary	500-180	Small
		Light	180-100	
Microsatellite	100-10	Heavy	100-60	
		Intermediary	60-25	
		Light	25-10	
Nano	10-1	...	...	
....				
Gram	<0,01			Ultra very small

4.3.2 Beschreibung bestehender Ontologien

Im Bereich der Ontologie-Forschung haben sich zahlreiche Arbeiten im Rahmen von Literaturrecherchen mit Ontologien befasst. Diese Bemühungen sind oft aufgaben- oder domänenspezifisch motiviert, wie beispielsweise Studien von (Qaswar *et al.*, 2023) und (Yang *et al.*, 2019) oder Arbeiten wie die von (Karabulut *et al.*, 2024), die Ontologien im Kontext digitaler Zwillinge beleuchten. Die Darstellung und Analyse der Ergebnisse variieren dabei von der Kategorisierung der Literaturquellen nach Domänen bis hin zur ingenieurwissenschaftlichen Untersuchung der Ontologien selbst.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Identifizierung und Analyse existierender Ontologien im Bereich der Satellitenentwicklung. Zu diesem Zweck wurden die Literaturquellen in sieben Themenbereiche kategorisiert, die in Kapitel 2.2 bereits vorgestellt wurden. Die Ergebnisse dieser Kategorisierung sind in Abbildung 4-11 dargestellt. Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, sind Mehrfachzuordnungen zu Fachbereichen möglich, daher entspricht die Gesamtzahl der Zuordnungen nicht zwangsläufig der Anzahl der identifizierten Literaturquellen. Bevor im weiteren Verlauf detailliertere Einblicke gegeben werden, wird zunächst die allgemeine Zusammensetzung der identifizierten Literaturquellen erörtert.

Über die Hälfte der berücksichtigten Quellen (38 Artikel) entfallen auf Konferenzbeiträge. Die zweitgrößte Gruppe bilden Journal-Beiträge mit 18 Artikeln (knapp 30%), gefolgt von Büchern und Buchkapiteln mit 8 Beiträgen (11%). Darüber hinaus wurden zwei Dissertationen, zwei Standards und ein Workshop-Dokument als relevant für die Forschungsfragen erachtet und einbezogen.

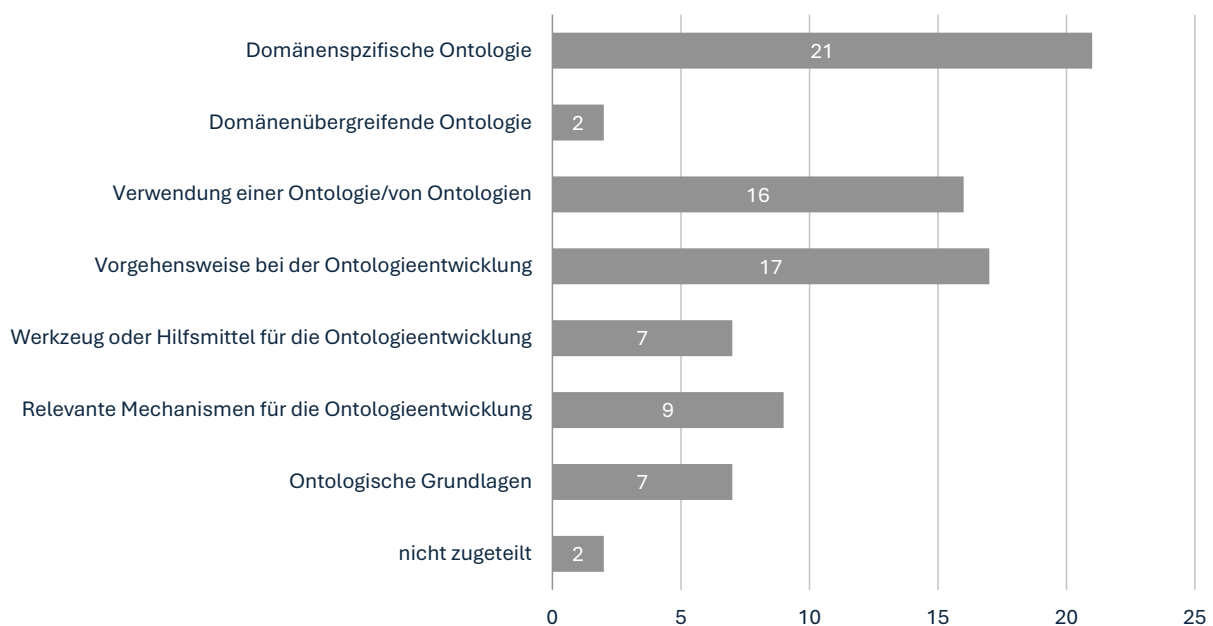


Abbildung 4-11: Verteilung der Beiträge nach Themenbereich

Abbildung 4-11 zeigt die Verteilung der identifizierten Quellen aus zwei Gruppen: Zeitschriftenartikel und Konferenzbeiträge. Buchbeiträge und die beiden Dissertationen von (Schmalenbach, 2013) und (Glas, 2013) wurden aufgrund ihres umfassenden Charakters, der sich naturgemäß mit mehreren Themenbereichen befasst, in der Darstellung nicht berücksichtigt. Auch die Normen (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2022) und (DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2023) wurden in der Darstellung weggelassen. (Gasevic *et al.*, 2006), (Staab und Studer, 2009) sowie (Paliouras, 2011) befassen sich ausführlich mit den ontologischen Grundlagen und

beschreiben Mechanismen und Methoden für die Ontologieentwicklung. Ein Mechanismus wird in diesem Zusammenhang als eine Art Prozess, Verfahren oder Werkzeug verstanden, das zur Erzielung eines bestimmten Ergebnisses eingesetzt wird und sich durch seine deterministische und vorhersehbare Natur auszeichnet. (Sievers, 2023) behandelt ebenfalls die Grundlagen der Ontologie und bietet einen Best-Practice-Ansatz sowie einen Entwicklungsprozess. (Henderson-Sellers, 2012) hingegen konzentriert sich auf mathematische Aspekte der Modellierung und untersucht Werkzeuge und Mechanismen der Ontologieentwicklung, wie zum Beispiel das Power-Type-basierte Framework, eine Erweiterung der UML-Typen. Diese Erweiterung ermöglicht die Beschreibung der Objektklassifizierung und -instanziierung. Die Arbeit von (Herre, 2010) beschreibt eine domänenübergreifende Ontologie und skizziert Prinzipien der Ontologieentwicklung, die in verschiedenen Domänen anwendbar sind.

Die Mehrzahl der identifizierten Journal- und Konferenzbeiträge beschäftigt sich mit der Beschreibung domänenspezifischer Ontologien, was mit der definierten Suchmatrix und dem Ziel der Literaturrecherche übereinstimmt. Innerhalb dieser Gruppe sind Doppelzuweisungen zu verzeichnen. Unter einer Doppelzuweisung wird dabei verstanden, dass ein Beitrag mindestens ein weiteres Themenfeld behandelt, welches im Rahmen der Literaturrecherche als relevant identifiziert wurde. Von den 21 Artikeln, die sich mit domänenspezifischen Ontologien befassen, weisen 11 solche Doppelzuweisungen auf. Tabelle 4-6 stellt die Häufigkeit dar, mit der weitere relevante Themenfelder in diesen Artikeln behandelt wurden.

Tabelle 4-6: Häufigkeit weiterer Themenbereiche in Beiträgen zu domänenspezifischen Ontologien

Verwendung Ontologie	Vorgehensweise Onto- logieentwicklung	Hilfsmittel für Ontologieentwicklung	Relevante Mechanismen
3	5	2	1

Innerhalb der Teilmenge der Journalbeiträge ist die Arbeit von (Jiang *et al.*, 2010) wegen ihres Schwerpunkts auf der Integration von Wissen im Kontext kollaborativer Produktfertigungsumgebungen hervorzuheben. Die Autoren streben danach, die Integration heterogenen Produktwissens in verschiedenen kollaborativen Unternehmen mithilfe eines ontologiebasierten Rahmens zu optimieren und so die unternehmensübergreifende Zusammenarbeit zu fördern. (Zhao *et al.*, 2020) stellen ein ontologisches System vor, das Satelliten-Domänenwissen zusammenfasst, sowie eine Methode für den Zugriff auf Wissen zur Ausführung von Aufgabenplänen. Begleitet wird dies von einer Architektur zur Konfiguration von Satellitenclustern auf der Grundlage von abgeleitetem Wissen. Beide Artikel erläutern domänenspezifische Ontologien und ihre praktische Anwendung.

Unter den Konferenzbeiträgen im Bereich der domänenspezifischen Ontologien stechen (Halvorson *et al.*, 2022) mit ihrer Ontologie für das prognostische Zustandsmanagement in der Raumfahrzeug-Avionik hervor. Die Arbeit bietet Einblicke in die Geschichte der Ontologie, Begriffsdefinitionen und erläutert die Verwendung der Weltraumobjekt-Ontologie (Space Object Ontology, SOO) durch (Alexander P. Cox *et al.*, 2016) bei der Charakterisierung von Beziehungen zwischen verschiedenen Raumfahrzeugkomponenten und ihren Funktionen. Angesichts der Relevanz der SOO für die vorliegende Arbeit sind die Ergebnisse von Halvorsons Arbeit relevant.

Darüber hinaus beschreiben (Hening *et al.*, 2016) die Entwicklung und Anwendung einer

Ontologie für die Gestaltung von Weltraumsystemen, die als OWL 2 (Ontology Web Language) Ergänzung zu bestehenden Systemdatenbanken dient. Sie plädieren für eine kombinierte Nutzung von SysML- und OWL-Modellen, wobei erstere für das modellbasierte Systems Engineering und letztere für die Verbesserung der semantischen Genauigkeit bei der Anwendung von Betriebswissen eingesetzt werden. (Huang *et al.*, 2023) bieten ein anschauliches Beispiel für eine domänenspezifische Ontologie, die mit der Methode *Ontology 101* von (Noy und McGuinness, 2001) entwickelt wurde und darauf abzielt, virtuelle Konstellationen in der Fernerkundung zu empfehlen. Auf Methoden zur Ontologieentwicklung wird in Kapitel 5 näher eingegangen.

(van Ruijven, 2015) stellt eine Ontologie für das Systems Engineering als Grundlage für MBSE vor, bei der sogenannte *RDF*-benannte Graphen verwendet werden, um einzelne Teilmodelle zu einer Ontologie zusammenzuführen. *RDF* (Resource Description Framework), das auf Subjekt-Prädikat-Objekt-Tripeln basiert, die einfachen Sätzen in natürlicher Sprache ähneln, wird in van Ruijvens Beitrag ausführlich erläutert. Eine weitere relevante Ontologie, auf die im Fazit näher eingegangen wird, ist die MBSE-Ontologie von (Holt und Perry, 2019). Die Autoren zielen mit ihrem Buch darauf ab, einen umfassenden und praxisorientierten Leitfaden für die erfolgreiche Implementierung von MBSE unter Verwendung der SysML bereitzustellen. Sie bieten einerseits praktische Anleitungen zur Anwendung von SysML in MBSE-Projekten und behandeln andererseits fortgeschrittene Konzepte für das Anforderungsmanagement, die Architekturmodellierung und das Kompetenzmanagement. Die darin beschriebene MBSE-Ontologie ist Bestandteil des *Rahmens bzw. Frameworks*, welches eines der drei Schlüsselemente des präsentierten MBSE-Ansatzes darstellt.

Schließlich sind auch die Beiträge von (Cranefield und Purvis, 1999), (Wang *et al.*, 2001) sowie (Iribarne *et al.*, 2011) zu erwähnen, die sich mit der Nutzung von UML in der Ontologie-Modellierung befassen. (Cranefield und Purvis, 1999) untersuchen das Potenzial objektorientierter Standards für die Ontologie-Modellierung, insbesondere UML und die dazugehörige OCL (Object Constraint Language), und stellen einen Formalismus für die Ontologie-Darstellung als UML-Teilmenge in Verbindung mit der OCL vor. (Wang *et al.*, 2001) schlagen einen Modellierungsansatz für Ontologien in UML vor, der die Zuordnung von Wissen zu Softwaremodellen erleichtert.

Tabelle 4-7 bietet einen prägnanten Überblick über ausgewählte Quellen aus den anderen Themenbereichen, die für die Erweiterung des Verständnisses im Zusammenhang mit Ontologien relevant sind. Es werden dabei Quellen, die sich explizit mit Verfahren und Methoden zur Entwicklung von Ontologien befassen, in der Zusammenfassung ausgelassen, da sie in Kapitel 5 im Zusammenhang mit der Entwicklung einer anwendungsspezifischen Ontologie näher erläutert werden. Es ist zu beachten, dass Tabelle 4-7 ausschließlich Quellen enthält, die als Journal- oder Konferenzbeiträge kategorisiert sind.

Tabelle 4-7: Zusammenfassung der Beiträge aus anderen Themenbereichen

Referenz	Themenbereiche	Beitrag
(Ford <i>et al.</i> , 1993) Journal	- Grundlagen zu Ontologien - Mechanismen für die Ontologieentwicklung	- Explikation von Wissen - Erwerb von Wissen - Wissensrepräsentation
(Gruber, 1993b) Journal	- Grundlagen zu Ontologien - Verwendung einer Ontologie	- Grundlegende Erkenntnisse - Kriterien für eine Ontologie
(Borst <i>et al.</i> , 1997) Journal	Domänenübergreifende Ontologie	- PhysSys-Ontologie, die als Grundlage für eine Bibliothek wiederverwendbarer Komponenten dient - Hierarchische Struktur für Ontologien
(Guarino, 1997) Journal	- Grundlagen zu Ontologien - Mechanismen für die Ontologieentwicklung - Verwendung einer Ontologie	- Grundlegende Erkenntnisse - Begriffsdefinitionen
(Devedzic, 2002) Konferenz	- Grundlagen zu Ontologien - Mechanismen für die Ontologieentwicklung	- Erläuterungen zur Metamodellierung - Informationen zu Programmiersprachen für die Implementierung von Ontologien
(Mizoguchi, 2004) Journal	Verwendung einer Ontologie	Ontologie für die Funktionalitätsmodellierung
(Albers <i>et al.</i> , 2011) Journal	Verfahren zur Ontologieentwicklung	- Ontologieentwicklung - Klassifikation von Ontologien - Grundlagen des Wissensbegriffs
(Ernadote, 2015) Konferenz	Verwendung einer Ontologie	Gemischter Ansatz zur Unterstützung von MBSE-Projekten durch ein Standard-Metamodell und Ontologien
(Schmit <i>et al.</i> , 2016) Konferenz	Mechanismen für die Ontologieentwicklung	Verwendung einer Ontologie zur Verbesserung von Komponentenmodellbibliotheken
(Shani <i>et al.</i> , 2016) Konferenz	Verwendung einer Ontologie	- Verwendung von Ontologien zur Überwindung der Einschränkungen von MBSE-Tools - Verbesserung der Interoperabilität zwischen verschiedenen MBSE-Tools durch semantische Vermittlung
(Portelli <i>et al.</i> , 2019) Konferenz	- Grundlagen zu Ontologien - Vorgehen zur Ontologieentwicklung	Ontologie für die wissensbasierte Entwicklung von Satellitenmissionen

4.3.3 Fazit

Es gibt zwar Ontologien für den Bereich der Weltraumobjekte, doch sind diese nicht explizit darauf ausgelegt, die Aufgabe der Identifizierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen sowie deren Flüssen im Entwicklungsprozess eines Satellitenprojektes zu unterstützen. Ausgehend von der Themenstellung der Arbeit besteht das übergeordnete Ziel darin, eine Methodik zur Erstellung ganzheitlicher Systemmodelle mit besonderem Schwerpunkt auf Unsicherheiten zu entwickeln. Die Zielsetzung für die angestrebte Ontologie leitet sich aus dieser Themenstellung ab und zeigt die Notwendigkeit auf, eine domänenspezifische Ontologie mit entsprechendem Aufgabenschwerpunkt zu entwickeln. Obwohl es keine Ontologie gibt, die sich direkt mit dieser Thematik befasst, wurden bereits existierende Ontologien identifiziert, die als Basis für die Entwicklung einer zielgerichteten Ontologie dienen können. Hierbei gilt es Ziele (Z) zu definieren, die diese Basis erfüllen sollte. Vor diesem Hintergrund wurde die folgende Zielsetzung formuliert:

- Z-1: Die Ontologie soll relevante Konzepte und Beziehungen aus dem Bereich der Weltraumobjekte bereitstellen.
- Z-2: Die Ontologie soll auf einer Top-Level-Ontologie basieren, um die Wiederverwendbarkeit zu fördern und Insellösungen zu vermeiden.
- Z-3: Die Ontologie soll Konzepte und Beziehungen bereitstellen, die auf das SysML-Metamodell abgestimmt sind, da sie in SysML erstellt und im Kontext von SysML-Modellen genutzt wird.
- Z-4: Die Ontologie soll relevante Konzepte und Beziehungen aus den Bereichen Systems Engineering und modellbasiertes Systems Engineering bereitstellen.
- Z-5: Die Ontologie soll ein Konzept zur Verwendung von Ontologien und Elementbibliotheken einführen, um eine effektive Modellierung zu unterstützen und die Konsistenz zwischen den Modellierungselementen und der Ontologie sicherzustellen.

Als Ergebnis wurden insgesamt vier Ontologien identifiziert, die zusammen die ermittelten Ziele erfüllen. Die Space Object Ontology (SOO) von (Alexander P. Cox *et al.*, 2016) ist die erste Ontologie, die als Grundlage identifiziert wurde, da sie Z-1 und Z-2 erfüllt. Die SOO wurde entwickelt, um die Charakterisierung von Weltraumobjekten zu verbessern, unterschiedliche Datensätze aus verschiedenen Quellen in einem erweiterbaren Rahmen zu integrieren und die Verfolgung von Entitäten zu erleichtern (Z-1). Die SOO basiert auf der Basic Formal Ontology (BFO) auf der oberen Ebene und den Common Core Ontologies (CCO) auf der mittleren Ebene und erweitert damit eine Ontologie der obersten Ebene (Z-2). Sie umfasst über 700 Klassen, die verschiedene Arten von Entitäten im Weltraum darstellen, darunter natürliche und künstliche Weltraumobjekte (RSOs), Raumfahrzeugkomponenten, Funktionen, Prozesse, Zeitintervalle und räumliche Regionen. Die SOO bietet eine standardisierte Sprache für die Kommentierung von Daten und ermöglicht die Darstellung von Weltraumobjekten, einschließlich Satelliten, ihrer Prozesse, Umgebungen und Interaktionen mit anderen Objekten im Weltraum. Darüber hinaus bietet die SOO die notwendige Flexibilität für Erweiterungen und Anpassungen, um spezifischen Aufgabenanforderungen gerecht zu werden. Diese Ontologie wird im Rahmen der Ontologieentwicklung der präskriptiven Studie als grundlegende Ressource für domänenspezifische Aspekte herangezogen.

Im Zuge der Untersuchung des Stands der Technik wurden zwei Ontologien identifiziert, die die Ziele Z-3 und Z-4 erfüllen können: die MBSE-Ontologie von (Holt und Perry, 2019) und die Systems Engineering-Ontologie von (van Ruijven, 2012a, 2012b, 2015). Van Ruijvens Ontologie basiert auf der ISO 15926-11 und umfasst verschiedene Informationsmodelle für die Definition von Stakeholder-Anforderungen, die Systemanforderungsanalyse, Betrieb und Wartung, Verifikationsprozesse sowie das Risikomanagement (Z-4). Die MBSE-Ontologie hingegen zielt darauf ab, Systemkonzepte und -beziehungen standardisiert und formal darzustellen. Dies soll eine konsistente Kommunikation und ein einheitliches Verständnis zwischen Ingenieuren und Stakeholdern ermöglichen und dient als domänenspezifische Sprache für MBSE-Aktivitäten (Z-4). Laut (Holt und Perry, 2019, S. 22) ist die MBSE-Ontologie essenziell für MBSE-Vorhaben und findet bei verschiedenen Aktivitäten Anwendung, beispielsweise bei der Definition von Konzepten und Begriffen. Sie dient als Ausgangspunkt für die Erstellung und Anpassung von Ontologien für individuelle MBSE-Aktivitäten und unterstützt somit das Ziel, Aspekte aus mehreren Ontologien zu integrieren.

Da beide Ontologien speziell für MBSE entwickelt wurden, sind sie grundsätzlich mit dem SysML-Metamodell kompatibel (Z-3). Erweiterungen und Anpassungen können durch Mechanismen wie Stereotypen und Profile realisiert werden, um spezifische Anforderungen oder Bereiche abzubilden, die nicht direkt von Standard-SysML-Elementen und -Beziehungen abgedeckt sind. Für die weitere Arbeit wird die MBSE-Ontologie bevorzugt, da sie in (Holt und Perry, 2019) detailliert definiert und erläutert wird und somit eine wertvolle Hilfestellung bei der Entwicklung einer anwendungsspezifischen Ontologie bietet.

Um Z-5 zu adressieren, wurden (Borst *et al.*, 1997) und die darin beschriebene domänenübergreifende Ontologie PhysSys identifiziert. PhysSys dient als Basis für die OLMECO-Bibliothek, eine Sammlung wiederverwendbarer technischer Modellkomponenten. Diese Bibliothek enthält verschiedene Modellfragmente und Komponenten für die Modellierung und Simulation physikalischer Systeme. Die PhysSys-Ontologie beschreibt die Zusammensetzung von Modellen aus Komponenten der OLMECO-Bibliothek. Diese Interaktion mit der Elementbibliothek fördert die Wiederverwendung von Modellkomponenten und steigert die Effizienz bei der Modellierung technischer Systeme, wodurch Z-5 erfüllt wird. Dieses Konzept dient als Inspiration für die Entwicklung einer entsprechenden Lösung im Rahmen der vorliegenden Themenstellung und unterstützt die Motivation für die Entwicklung einer Elementbibliothek, wie sie bereits von (Friedenthal *et al.*, 2012) vorgeschlagen wurde (siehe Kapitel 4.1.2).

Damit wurde sowohl der Forschungsbedarf für die Entwicklung einer anwendungsspezifischen, ontologischen Unterstützung identifiziert, als auch die Grundlage für deren Entwicklung herausgearbeitet. Die Methodik zur Entwicklung dieser Ontologie wird im fünften Kapitel im Rahmen der präskriptiven Studie detailliert erläutert.

5 Methodik zur Entwicklungsunterstützung von Satellitenprojekten

Das folgende Kapitel beschreibt in vier Unterkapiteln den präskriptiven Teil der Arbeit. Dazu wird zunächst eine Gesamtübersicht der Methodik zur Entwicklungsunterstützung von Satellitenprojekten gegeben, anschließend werden die einzelnen Bausteine der Methodik detailliert erläutert. Aufbau und Struktur orientieren sich dabei am vorangegangenen Kapitel zum Stand der Technik und bauen auf den dort beschriebenen Fazits auf. Um weiterhin die Nachvollziehbarkeit des Inhalts und die thematische Konsistenz zu gewährleisten, wird Tabelle 4-1 aus Kapitel 4 um die Inhalte des folgenden Kapitels ergänzt und entsprechend angepasst. Tabelle 5-1 stellt diese Erweiterung dar, indem sie neben den drei Forschungsfragen (FF) mit ihren Schwerpunkten nun die Betrachtung der Fragestellungen im Rahmen der präskriptiven Studie gegenüberstellt. Während der Stand der Technik in chronologischer Reihenfolge der Recherchen präsentiert wurde, folgt die Beschreibung der Artefakte der präskriptiven Studie einer thematischen Ordnung. Dies dient einem besseren Verständnis des Gesamtergebnisses und erklärt die unterschiedliche Reihenfolge.

Tabelle 5-1: Zuordnung der Forschungsschwerpunkte zur Struktur des Kapitels 5

FF	Schwerpunkt der FF	Fokus präskriptive Studie	Unterkapitel Stand der Technik	Unterkapitel präskriptive Studie
1	Identifikation von Unsicherheiten mithilfe eines modellbasierten methodischen Ansatzes	Entwicklung von Modellierungsmethoden zur Analyse	4.1	5.4
2	Reduktion von Unsicherheiten durch einen modellbasierten menschenzentrierten Ansatz	Entwicklung eines Vorgehensmodells	4.2	5.2
3	Unterstützung der Wissensgenerierung	Entwicklung eines ontologischen Konzepts	4.3	5.3

5.1 Übersicht

Die hier vorgestellte aufgabenspezifische Methodik – im Folgenden auch als ITPE-Methodik bezeichnet – verfolgt das Ziel, die prozessbegleitende Entwicklung und Pflege von ganzheitlichen Systemmodellen zu unterstützen. Diese Systemmodelle dienen der Weiterentwicklung von Daten, Informationen und deren Flüssen im Entwicklungsprozess von Satellitenprojekten. Wie bereits in Kapitel 1.2 beschrieben, zielt die Methodik darauf ab, das Entwicklungsteam bei der Identifikation von Unsicherheiten in bestehenden dokumentenbasierten Daten und Informationen zu unterstützen, eine modellgestützte Hilfestellung bei der Problemlösung und Ideengenerierung bereitzustellen sowie bei der Reduktion identifizierter Unsicherheiten zu unterstützen. Ein weiteres Ziel ist die Erleichterung der Wissensgenerierung während des Entwicklungsprozesses.

Die Methodik basiert zu diesem Zweck auf drei übergeordneten Bausteinen. Der erste Baustein ist das DT-MBSE Integrationsmodell (Kapitel 5.2), ein Vorgehensmodell, das die grundlegende Rolle der Systemmodellierung und ihren Einsatz in einem Design Thinking-getriebenen Ansatz definiert und modellbasierte Systematik mit menschenzentrierter Kreativität verbindet. Weiterhin beschreibt dieses Vorgehensmodell, welche Aktivitäten von welcher Rolle zur Aufgabenbewältigung durchgeführt werden, was ein Zusammenarbeitskonzept der definierten Rollen einschließt. Der nächste Baustein (Baustein III) umfasst das der Methodik zugrundeliegende ontologische Konzept (Kapitel 5.3), welches sowohl domänenspezifische Konzepte und Beziehungen aus der Domäne der Satellitenentwicklung beinhaltet als auch Konzepte und Beziehungen aus dem Systems Engineering. Eine auf dem ontologischen Konzept basierende Elementbibliothek, die dem Modellierer als unterstützendes Werkzeug zur Verfügung steht, ist ein weiterer Bestandteil dieses Bausteins. Schließlich umfasst Baustein II (Kapitel 5.4) eine Methodensammlung, die Beschreibungen liefert, wie Modelle mit der Sprache SysML für bestimmte Analysezwecke erstellt werden können. Abbildung 5-1 fasst die verschiedenen Rollen dieser Bausteine anschaulich zusammen. Bezüglich des Einsatzzeitpunkts der Methodik in einem Entwicklungsprojekt ist keine zeitliche Eingrenzung vorgesehen. Die meisten Ingenieurdisziplinen, zu denen auch das modellbasierte Engineering (MBE) gehört, verfügen in ihren Anwendungsbereichen über angemessene Werkzeuge, die auch in späteren Phasen eines Projektes zum Einsatz kommen können (Stoewer, 2023, S. 1316). Ein zu entwickelndes System weist zwar besonders in den frühen Phasen der Systementwicklung zahlreiche Unsicherheiten hinsichtlich des späteren Entwurfs und der Implementierung auf (Cederbladh *et al.*, 2024, S. 5). (Dickersen und Mavris, 2009, S. 46) vertreten jedoch die Ansicht, dass logische Modelle zu jedem Zeitpunkt eines dokumentenbasierten Systementwicklungsprozesses eingeführt werden können. Die Autoren betrachten die Einführung der präzisen logischen Modellierung als leistungsstark und attraktiv, unabhängig vom Zeitpunkt im Entwicklungsprozess. Diese Aussage unterstützt den der Methodik zugrundeliegenden Ansatz ihrer zeitlich flexiblen Einsetzbarkeit in Satellitenprojekten. Wenngleich ein Einsatz in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses vorteilhafter ist, ermöglicht der aufgabenspezifische Charakter der Methodik ihre Anwendung zu jedem Zeitpunkt.

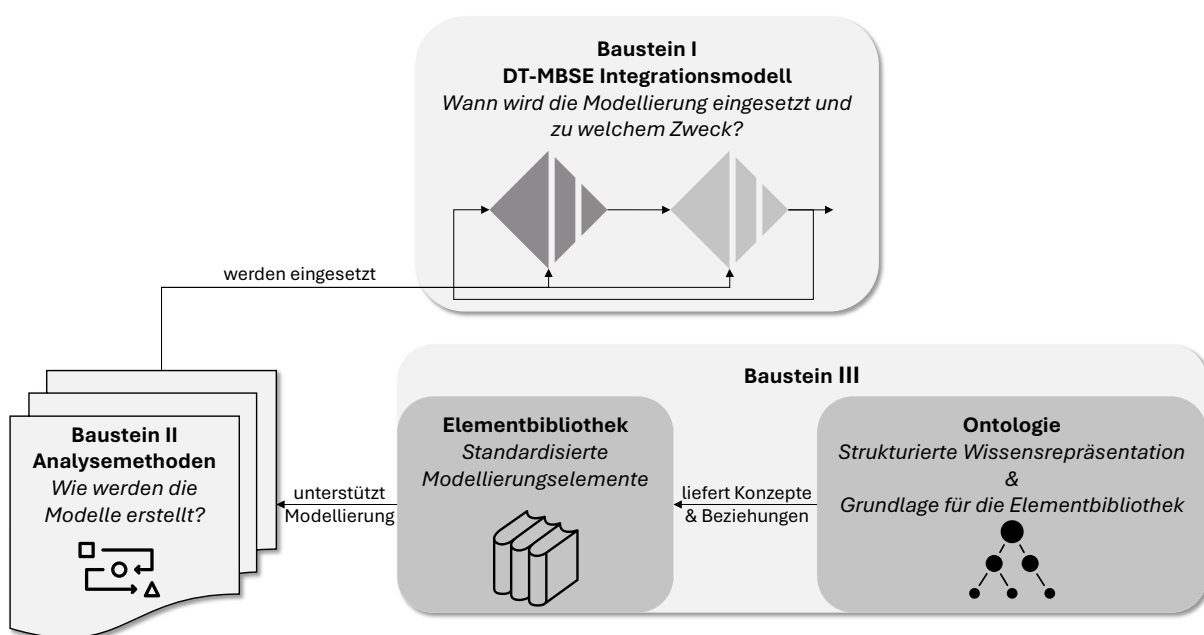


Abbildung 5-1: Die drei Bausteine der aufgabenspezifischen Methodik

5.2 Das DT-MBSE Integrationsmodell

„Man wählt im Leben nicht den richtigen Weg. Man wählt einen Weg und dann macht man den gewählten Weg zum richtigen Weg.“ (Elliott Hulse)

Das DT-MBSE Integrationsmodell ist der erste Baustein der entwickelten Methodik und stellt ein zentrales Element zur Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen dar. Der Ansatz verbindet dabei modellbasierte Systematik mit menschenzentrierter Kreativität. DT steht im Modell als Abkürzung für den Begriff Design Thinking. Die Konzeption des Modells basiert auf den systematischen Analysen im Rahmen der Literaturrecherche, deren Erkenntnisse und identifizierter Bedarf in den Kapiteln 4.1.2 und 4.2.2 dokumentiert sind und die Grundlage für die nachfolgende Entwicklung bilden. Das Modell integriert sowohl kreative als auch systematische Aspekte, um die Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen zu unterstützen. Als Teil der Gesamtlösung stellt das DT-MBSE Integrationsmodell ein auf Design Thinking basierendes Vorgehensmodell dar. Der Zweck des Modells besteht darin, das Vorgehen für Entwickler innerhalb der Methodik auf einer Makroebene zu skizzieren, weswegen dieser Baustein als erstes beschrieben wird. Entsprechend der in Kapitel 2.2 (Forschungskonzept) dargestellten Abbildung 2-6 beschreibt es die Gesamtheit der Handlungen und Aktivitäten auf der Makroebene, die für die Anwendung der Methodik erforderlich sind. Das Modell ist dabei bewusst unabhängig von spezifischen Modellierungssprachen und -werkzeugen konzipiert. Die Grundlage des Integrationsmodells ist ein Doppel-Diamant-Prozessmodell in Anlehnung an das Problemlösungsmodell von Anders Skoe, (siehe Abbildung 4-8 in Kapitel 4.2.1). Die gesamthafte Darstellung des Integrationsmodells ist in Abbildung 5-2 visualisiert.

Im Folgenden wird das DT-MBSE Integrationsmodell systematisch vorgestellt, beginnend mit der Grundstruktur und einer Beschreibung der zugrundeliegenden Denkmechanismen, das Rollenkonzept und den entsprechenden Aufgaben und notwendigen Fähigkeiten, bis hin zu den beiden Hauptphasen der Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen. Den Abschluss bilden eine Bewertung und Diskussion des Vorgehensmodells sowie dessen Einordnung in das Rahmenwerk für Prozessmodelle in Entwurf und Entwicklung nach (Wynn und Clarkson, 2024), welches in Kapitel 3.6 erläutert wurde.

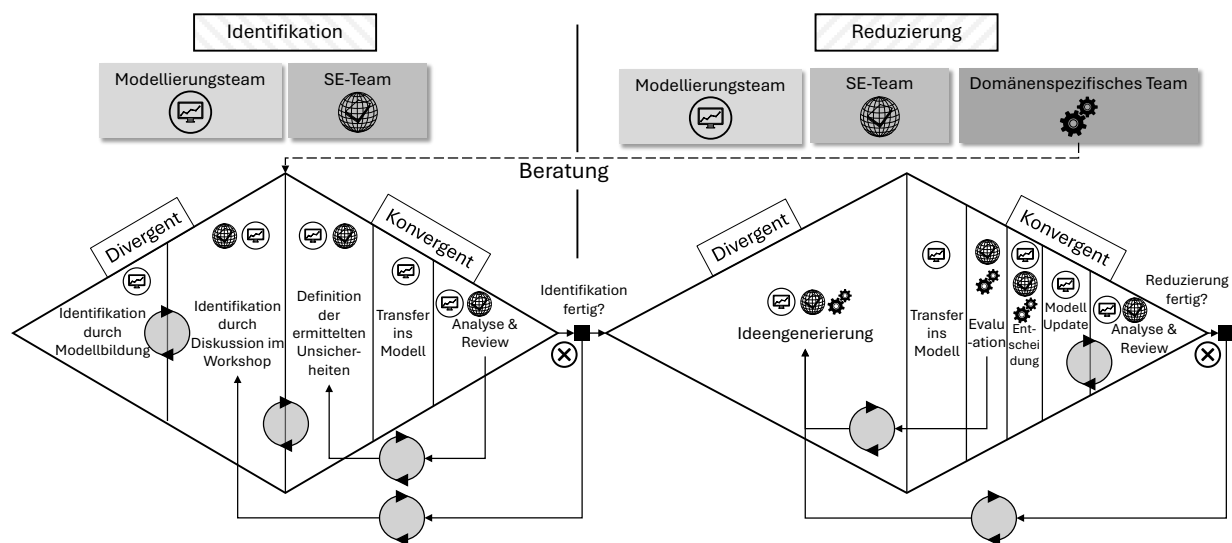


Abbildung 5-2: Das DT-MBSE Integrationsmodell

5.2.1 Grundstruktur und Denkmechanismen

Die Grundstruktur des Modells gliedert sich in die zwei Hauptphasen der Identifikation und der Reduzierung. Jede dieser Hauptphasen folgt dem Prinzip des eines Diamanten des Doppel-Diamanten mit divergenten und konvergenten Denkphasen, wodurch sowohl kreative als auch systematische Aspekte der Entwicklung berücksichtigt werden. Der erste Diamant des Integrationsmodells konzentriert sich auf die Identifizierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen, während der zweite Diamant darauf abzielt, diese identifizierten Unsicherheiten zu reduzieren. Beide Phasen verfügen über Iterationsmöglichkeiten, dargestellt durch Iterations-Schleifen, die eine kontinuierliche Verbesserung der Entwicklungsartefakte ermöglichen. In Abbildung 5-2 sind diese Iterations-Schleifen durch Pfeilkreise dargestellt, die angeben, welche Schritte in einer Iterationsschleife abgedeckt werden. Weiterhin ermöglichen Entscheidungspunkte am Ende jeder Phase (markiert durch X in Kreisen) die Implementierung einer abschließenden Qualitätsprüfung der Artefakte und sehen somit eine Qualitätssicherung der Ergebnisse nach der jeweiligen Hauptphase vor. An dieser Stelle wird auf die Abbildungen 5-4 und 5-5 verwiesen. Sie veranschaulichen jeweils den linken und rechten Diamanten separat und dienen als Beschreibungsgrundlage der beiden Hauptphasen. In diesen Abbildungen sind die verwendeten Symbole einfacher zu erkennen.

Die beiden Denkmechanismen des divergenten und konvergenten Denkens wurden bereits in Kapitel 4.2.1 eingeführt und werden im Folgenden zum besseren Verständnis der Funktionsweise des Integrationsmodell näher beleuchtet. J.P. Guilford prägte in seinem Werk (Guilford, 1968) die Unterscheidung zwischen divergentem und konvergentem Denken als zwei fundamentale kognitive Prozesse bei der Problemlösung. Das divergente Denken zeichnet sich dadurch aus, dass es bei offenen Fragestellungen multiple valide Lösungsansätze generiert, wobei die finale Lösung nicht von vornherein durch die Ausgangssituation determiniert ist. Die Stärke des divergenten Denkens liegt in der Fähigkeit, eine Vielzahl von alternativen, auch unkonventionellen und kreativen Wegen zu erschließen (Carayannis, 2013, S. 546 f.). Das divergente Denken legt den Schwerpunkt auf eine breitere, tiefere und originellere Erkundung und auf die Identifikation relevanter und bisher unbekannter Problemstellungen der Stakeholder (Rhea, 2003, S. 150). In der praktischen Anwendung im Rahmen des Integrationsmodells öffnet das divergente Denken einerseits einen Raum für die umfassende Erkundung und Erfassung der Systemumgebung sowie aller interagierenden Entitäten. Eine Entität kann sowohl als Kontextpartner in einem spezifischen Systemkontext verstanden werden, etwa in Form eines künstlichen oder natürlichen Systems, als auch als menschlicher Akteur, der mit dem zu entwickelnden System interagieren soll. Das divergente Denken spielt eine wichtige Rolle bei der Schaffung einer breiten Basis für die Problemdefinition und Lösungsfindung. Darüber hinaus erweist sich dieser Denkmechanismus als besonders wertvoll für die Ermittlung und Analyse der Nutzerbedürfnisse und der daraus resultierenden Systemanforderungen. Dieser Aspekt gewinnt insbesondere beim Einsatz der Methodik in der frühen Entwicklungsphase eines Projektes an Bedeutung. Diese Phase ist durch einen chronischen Informationsmangel und ein hohes Maß an Unsicherheit gekennzeichnet (Lindemann und Lorenz, 2008, S. 178) und weist damit ein hohes Maß an *unbekannten Unbekannten* auf. Gleichzeitig besitzt die frühe Phase eines Entwicklungsprozesses eine hohe Bedeutung, da die Kosten eines zu entwickelnden Produktes und Systems schon früh im Entwurfsprozess festgelegt werden (Ullman, 2010, S. 145). Folglich ist es umso wichtiger, so früh wie möglich belastbare und sichere Daten und Informationen über das entstehende System zu ermitteln und zu dokumentieren. Vor diesem Hintergrund nimmt eine umfassende Erkundung, Ermittlung und Analyse der Bedürfnisse

und Anforderungen an das zu entwickelnde System eine wichtige Rolle ein (Lindemann, 2016, S. 600), wozu das divergente Denken einen nennenswerten Beitrag leistet.

Während das divergente Denken den Betrachtungsraum öffnet, charakterisiert sich konvergentes Denken durch die zielgerichtete Suche nach der einen korrekten Lösung für ein klar umrissenes Problem. Dieser Denkprozess basiert auf der systematischen Analyse von Informationen und der Anwendung logischer Regeln, um zu einer eindeutigen, vorab definierten Lösung zu gelangen (Carayannis, 2013, S. 547). Im Kontext des DT-MBSE Integrationsmodells dient das konvergente Denken der Verdichtung der gesammelten Daten und Informationen. Es stellt einen wichtigen Mechanismus für die Definition und Strukturierung der ermittelten Unsicherheiten dar. Eine ausführliche Darstellung beider Denkmechanismen findet sich in (Carayannis, 2013) und der darin dokumentierten weiterführenden Literatur.

5.2.2 Rollenkonzept des DT-MBSE Integrationsmodells

Das DT-MBSE Integrationsmodell definiert drei zentrale Teams: das Modellierungsteam, das Systems Engineering-Team (SE-Team) und das domänenspezifische Entwicklungsteam, deren Mitglieder jeweils spezifische Rollen innehaben. Diese Teams bilden in ihrer Gesamtheit das Entwicklungsteam, das für die Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen verantwortlich ist. Dabei ist zu betonen, dass diese organisatorischen Teams klar von den systembezogenen Entitäten zu unterscheiden sind, die mit dem zu entwickelnden System interagieren und Teil des definierten Systemkontextes sein können. Der gewählte Ansatz zielt darauf ab, durch den gezielten Einsatz der beteiligten Akteure sowohl die Effizienz als auch die Effektivität des Vorgehens zu optimieren. Dies soll nicht nur zur Akzeptanz der entwickelten Methodik beitragen, sondern auch die generelle Anwendung von MBSE als Entwicklungsunterstützung fördern. Das DT-MBSE Integrationsmodell spezifiziert dabei die Partizipation der einzelnen Teams in den jeweiligen Prozessschritten. Die visuelle Darstellung dieser Zuordnung erfolgt im Vorgehensmodell durch spezifische Symbole, die in Abbildung 5-2 den entsprechenden Teams zugeordnet sind. Während diese Abbildung eine Gesamtübersicht bietet, ermöglichen die Abbildungen 5-4 und 5-5 durch ihre separate Darstellung der beiden Hauptphasen eine visuell einfachere Erkennbarkeit der Team-Beteiligung. Tabelle 5-2 fasst die spezifischen Aufgaben und erforderlichen Kompetenzen der Teammitglieder in ihren jeweiligen Rollen zusammen. Jedes Kompetenzprofil gliedert sich in die drei Bereiche: grundlegende Fähigkeiten, soziale Kompetenzen und fachliche Kompetenz. Diese Strukturierung orientiert sich an etablierten Kompetenzmodellen der Bildungsforschung. Der Deutsche Qualifikationsrahmen (Arbeitskreis Deutscher Qualifikationsrahmen, 2013, S. 12 ff.) unterscheidet zwischen Fachkompetenz (Wissen und Fertigkeiten) und personaler Kompetenz (Sozialkompetenz und Selbstständigkeit) als zentrale Kompetenzkategorien. (Prenzel *et al.*, 2008, S. 18) definieren auf Grundlage von (Weinert, 2014, S. 27 f.) Kompetenzen als kognitive Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften zur erfolgreichen Problemlösung. (Klieme und Leutner, 2006, S. 880) betonen dabei die Notwendigkeit, kognitive und sozial-motivationale Aspekte differenziert zu erfassen. Diese dreigliedrige Struktur aus Fach-, Sozial- und Methodenkompetenz ist etabliert in der Bildungs- und Berufspädagogik (Prenzel *et al.*, 2008, S. 20).

Die Verteilung dieser Kompetenzen folgt dem T-Shaped-Kompetenzmodell nach (Delicado *et al.*, 2018), welches als Orientierungsrahmen für die beteiligten Rollen dient. Die Wahl dieses Modells begründet sich darin, dass Unsicherheiten in komplexen Systemen sowohl innerhalb einzelner Fachdisziplinen als auch an deren Schnittstellen entstehen können und daher sowohl

fachspezifische Tiefenkompetenz als auch interdisziplinäres Verständnis erfordern. Das T-Shaped-Konzept verkörpert dabei den grundlegenden Ansatz der komplementären Kompetenzverteilung im Team und adressiert potenzielle Defizite in sozio-technischen Aspekten des Systems Engineering, die das Problemverständnis und die Lösungsfindung negativ beeinflussen können (Delicado *et al.*, 2018, S. 534).

Für die Rollen SE-Teammitglied und Modellierungsteammitglied ist dabei die grundlegende Fähigkeit des Systemdenkens (Systems Thinking) essenziell. Kapitel 3.2.1 beschreibt detailliert den Begriff Systems Thinking und stellt die Regeln vor, die dessen logische Struktur bilden. Das Verständnis dieser Regeln ist für beide Rollen zentral, da sie die Eigenschaften eines erfolgreichen Systemdenkers definieren und als Grundlage für den Aufbau dieser Kompetenz dienen. Des Weiteren wird für diese beiden Rollen ein grundlegendes Verständnis im Umgang mit Unsicherheiten und Unsicherheiten in Daten und Informationen vorausgesetzt. Kapitel 3.1 bietet eine fundierte Beschreibung der relevanten Aspekte in diesem Kontext. Auf spezifische Aspekte der Methodik im Zusammenhang mit Unsicherheiten wird im Rahmen der Unsicherheits-Ontologie in Kapitel 5.3.1 eingegangen.

Empathie ist sowohl für das SE-Teammitglied als auch für das Modellierungsteammitglied eine notwendige soziale Kompetenz, da die Identifikation von Unsicherheiten bezüglich Stakeholder-Bedürfnissen, Anforderungen und den Systemkontext ein tiefes Verständnis für die Perspektiven und Erwartungen der beteiligten Akteure erfordert. (Tschimmel, 2012, S. 12) betrachtet Empathie und intensive Beobachtung als Grundlage eines menschenzentrierten Entwicklungsansatzes. Nur so lässt sich das Wesen einer Aufgabe oder eines Problems erfassen und ein möglichst breites Spektrum an Informationen über die Nutzer des zu entwickelnden Systems gewinnen. Auch (Zhao, 2015, S. 9) betont die Bedeutung der Empathie als Design Thinking-Prinzip, insbesondere bei der Ermittlung von Nutzerbedürfnissen, Anforderungen und Systemfunktionen. Außerdem benötigen Problemlöser ein Bewusstsein und Einfühlungsvermögen für die Erfahrungen und Emotionen der Menschen, ihre Werte und Handlungen sowie deren Bedeutung im betrieblichen Kontext (Zhao und Jensen, 2022, S. 6). Diese Kompetenz ist besonders beim Einsatz der Methodik in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses wichtig, da ein hohes Maß an Unsicherheit in Bezug auf die Bedürfnisse der Stakeholder besteht.

Darüber hinaus stellen Kreativität und Kommunikation zentrale Fähigkeiten dar, die für alle drei Rollen von hoher Relevanz sind. Kommunikation spielt insbesondere bei Aktivitäten, die die aktive Beteiligung mehrerer Rollen erfordern, eine entscheidende Rolle für die erfolgreiche Aufgaben- und Problembewältigung. Unter Kommunikation ist grundsätzlich ein Prozess des Sendens und Empfangens von intendierten Bedeutungen zu verstehen, welcher sich auf die Verwendung verschiedener Zeichensysteme und gemeinsam etablierter Interpretationsregeln stützt. Diese Zeichensysteme können dabei visueller, auditiver, somatischer (körperlich), olfaktorischer (geruchswahrnehmend) oder gustativer (geschmackswahrnehmend) Natur sein, wobei die menschliche Sprache ein besonders komplexes Beispiel eines solchen Interpretationssystems darstellt (Schmidt *et al.*, 2017, S. 538). Kreativität hingegen ist vor allem im divergenten Teil des zweiten Diamanten von Bedeutung in dem Lösungsoptionen zur Reduzierung der identifizierten Unsicherheiten entwickelt werden. In dieser Phase ist eine zielführende Ideengenerierung essenziell, um identifizierte Unsicherheiten zu reduzieren. In dieser Arbeit wird die Definition von Kreativität nach (Hubka, 1976, S. 70) herangezogen, wonach Kreativität als der Prozess der Verknüpfung von Gedanken verstanden wird, der zu einem Ergebnis führt, welches zumindest für das denkende Individuum neuartig ist und eine potenzielle Lösung für eine spezifische Problemstellung

darstellt. Die charakteristischen Merkmale der Kreativität umfassen somit die Neuartigkeit des Resultats sowie des Lösungsprozesses, der vom Problem zur Lösung führt (nicht primär zum Produkt selbst). Kreatives Denken kann folglich als die umfassende Nutzung gespeicherter Wahrnehmungsinhalte und deren Rekombination zu einer neuartigen Einheit verstanden werden. (Os-kam, S. 5) betont die Relevanz von Kompetenzen im Bereich des kreativen Denkens und der Kommunikation für eine effektive Zusammenarbeit in interdisziplinären Entwicklungs- und Forschungsteams. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der Integration dieser Kompetenzen in alle drei Kompetenzprofile.

Wie Abbildung 5-3 veranschaulicht, verfügt ein T-Shaped-Teammitglied über eine vertikale Schicht grundlegender fachspezifischer Arbeitskompetenzen. Aufbauend darauf wurden die Kompetenzprofile der einzelnen Rollen in Tabelle 5-2 um eine vertikale, fachliche Kompetenz erweitert. Ziel dieser Erweiterung ist es, gemäß (Boehm und Mobasser, 2015, S. 333), sicherzustellen, dass jedes T-Shaped-Teammitglied – abhängig von seiner Rolle – über eine fachliche Tiefe in mindestens einem relevanten Aspekt verfügt. Dies kann beispielsweise eine Expertise im Bereich des Systems selbst (domänenspezifisches Teammitglied), des Systems Engineering (SE-Teammitglied) oder der Systemmodellierung (Modellierungsteammitglied) sein. Gleichzeitig soll jedes Teammitglied über ein solides Grundverständnis in einer angemessenen Anzahl weiterer Systemaspekte oder benachbarter Disziplinen verfügen.

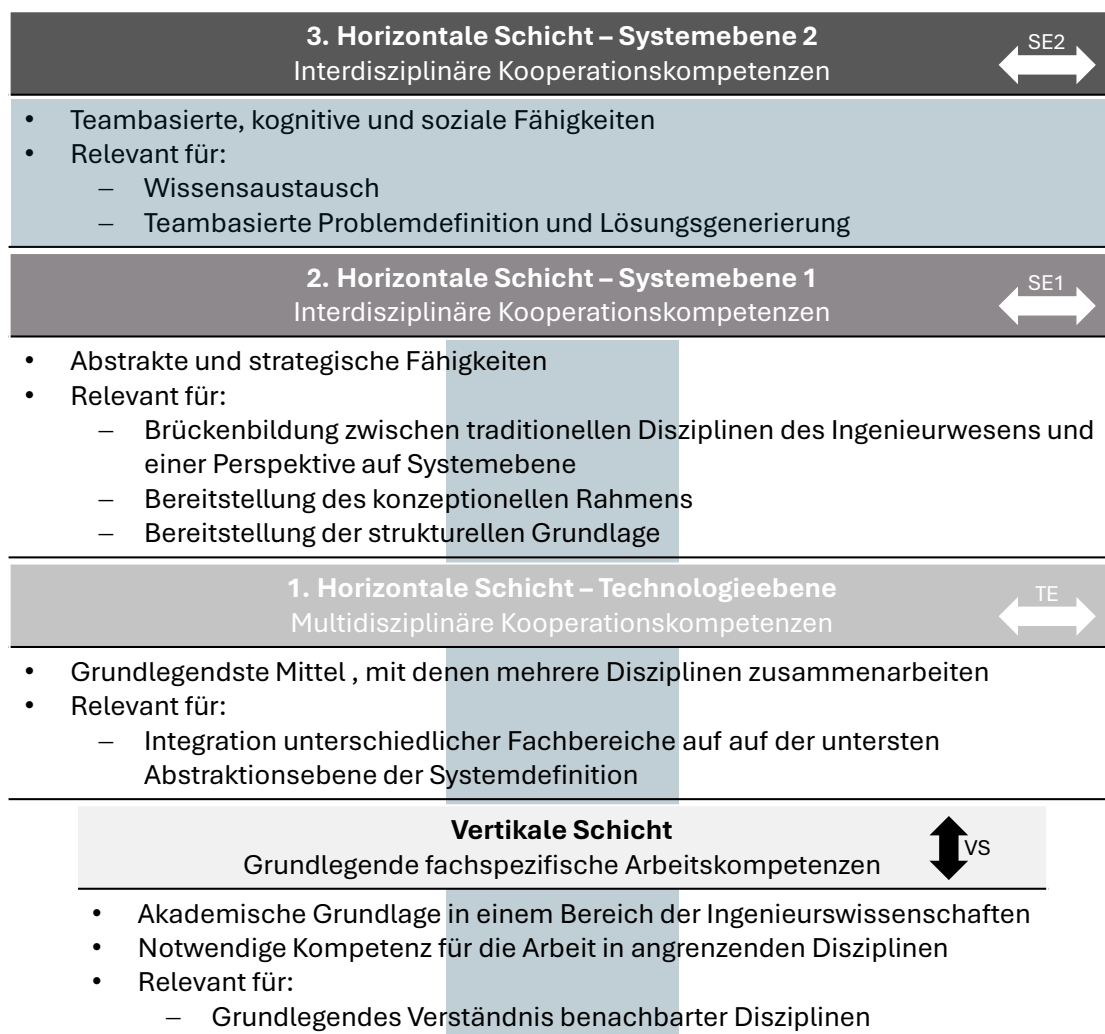


Abbildung 5-3: T-Shaped-Kompetenzmodell i.A. an (Delicado et al., 2018, S. 545)

Tabelle 5-2: Kompetenzprofile jeweiligen Rollen des DT-MBSE Integrationsmodells

Rolle:	SE-Teammitglied
Art:	T-Shaped
Aufgabe:	Kollaboration bei der Identifizierung und Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen und deren Flüssen
<i>Grundlegende Fähigkeiten:</i>	• Systems Thinking • Kreativität • Verständnis in Hinblick auf Unsicherheiten und Unsicherheiten in Daten und Informationen und deren Flüssen
<i>Soziale Kompetenzen:</i>	• Empathie • Kommunikation
<i>Fachliche vertikale Kompetenz:</i>	• Expertise in mindestens einem relevanten Bereich des Systems Engineering
Rolle:	Modellierungsteammitglied
Art:	T-Shaped
Aufgabe:	Modellaufbau und Pflege
<i>Grundlegende Fähigkeiten:</i>	• Systems Thinking • Kreativität • Verständnis in Hinblick auf Unsicherheiten und Unsicherheiten in Daten und Informationen und deren Flüssen
<i>Soziale Kompetenzen:</i>	• Empathie • Kommunikation
<i>Fachliche vertikale Kompetenz:</i>	• Beherrschen von: – geeigneter Modellierungssprache – geeignetem Modellierungstool
Rolle:	Domänenspezifisches Teammitglied
Art:	T-Shaped
Aufgabe:	Auflösung von identifizierten Unsicherheiten
<i>Grundlegende Fähigkeiten:</i>	• Kreativität
<i>Soziale Kompetenzen:</i>	• Kommunikation
<i>Fachliche vertikale Kompetenz:</i>	• Fundiertes Fachwissen in mindestens einem relevanten Bereich der Domäne

Weiterführende Ausführungen zum Konzept des T-Shaped-Entwicklers finden sich unter anderem bei (Rogers und Freuler, 2015), (Delicado *et al.*, 2018) und (Boehm und Koolmonojwong, 2019). Einen allgemeinen Rahmen für Systems Engineering-Kompetenzen bietet (INCOSE, 2010). Dieser Rahmen beschreibt Kompetenzen in Verbindung mit Prozessen, Organisationen und systemischen Grundfähigkeiten, die zu erfolgreichen Systems Engineering-Anwendungen führen sollen. Ziel des Rahmens ist es, eine verständliche Hilfestellung zu bieten, die beschreibt, welche Anforderungen Einzelpersonen und Teams erfüllen müssen, um Systems Engineering erfolgreich zu betreiben. Ebenfalls an dieser Stelle erwähnenswert ist das Werk *Applied Space Systems Engineering* von (Wiley *et al.*, 2009). Dieses Werk bietet Systemingenieuren während des Entwicklungsprozesses und später auch im Betrieb ein Hilfsmittel, das auf der Grundlage einer vollständigen und strengen Reihe von Kompetenzen für Systemingenieure erstellt wurde und damit einen Beitrag zur Stärkung des definierten Kompetenzprofils leisten kann.

Nachdem die Kompetenzen der einzelnen Rollen vordefiniert und beschrieben sind, lassen sich die spezifischen Aufgaben den jeweiligen Rollen entsprechend deren Kompetenzen zuordnen. Diese Aufgaben orientieren sich an den jeweiligen Kernkompetenzen und sind auf die übergeordnete Zielsetzung des DT-MBSE Integrationsmodells ausgerichtet. Die Hauptaufgabe des Modellierungsteams besteht in der Erstellung und kontinuierlichen Pflege des Systemmodells. Dabei nutzt das Team seine spezifischen Kompetenzen in der Systemmodellierung, um die identifizierten Unsicherheiten und deren Zusammenhänge systematisch zu erfassen und zu dokumentieren. Die Modellierungsexperten fungieren dabei als Bindeglied zwischen den abstrakten Systemkonzepten und deren konkreter Repräsentation im Modell. Das SE-Team übernimmt primär die Aufgabe der methodischen Führung und Koordination des Gesamtprozesses. Mit ihrer Expertise im Systems Engineering und dem ausgeprägten Systemdenken sind sie verantwortlich für die ganzheitliche Betrachtung des Systems und die Integration der verschiedenen Perspektiven. Sie stellen sicher, dass die Identifikation und Analyse von Unsicherheiten systematisch und methodisch fundiert erfolgt. Die domänenspezifischen Entwickler spielen aufgrund ihres umfassenden Fachwissens in einer bestimmten technischen Domäne eine entscheidende Rolle bei der Reduzierung der identifizierten Unsicherheiten. Folglich sind sie die Hauptakteure im Mitigationsprozess im rechten Diamanten des Prozesses. Ihre tiefgehende fachliche Expertise ermöglicht es ihnen, konkrete Lösungsansätze für identifizierte Unsicherheiten zu entwickeln und diese im Kontext ihrer spezifischen Domäne zu validieren. Darüber hinaus nehmen sie bereits in der Identifikationsphase eine wichtige beratende Funktion ein und stellen ihr domänenspezifisches Fachwissen zur Verfügung, um potenzielle technische Unsicherheiten frühzeitig zu erkennen und deren Relevanz einzuschätzen.

5.2.3 Der linke Diamant des DT-MBSE Integrationsmodells

Die divergente Phase des linken Diamanten besteht aus zwei iterativen Schritten, wie in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Abbildung visualisiert neben dem Prozessablauf drei zentrale Aspekte: Erstens wird die iterative Natur des Vorgehens durch kreisförmige Pfeile zwischen den Prozessschritten verdeutlicht. Zweitens zeigt die Abbildung in welchen Schritten die Systemmodellierung zum Einsatz kommt und hebt diese Aktivitäten in den Abbildungen 5-4 und 5-5 farblich hervor, was sowohl in der divergenten als auch in der konvergenten Phase erfolgt. Drittens wird die Integration von Design Thinking-Methoden im divergenten Teil des Diamanten hervorgehoben, durch welche insbesondere die kollaborativen Aspekte des Prozesses methodisch unterstützt werden.

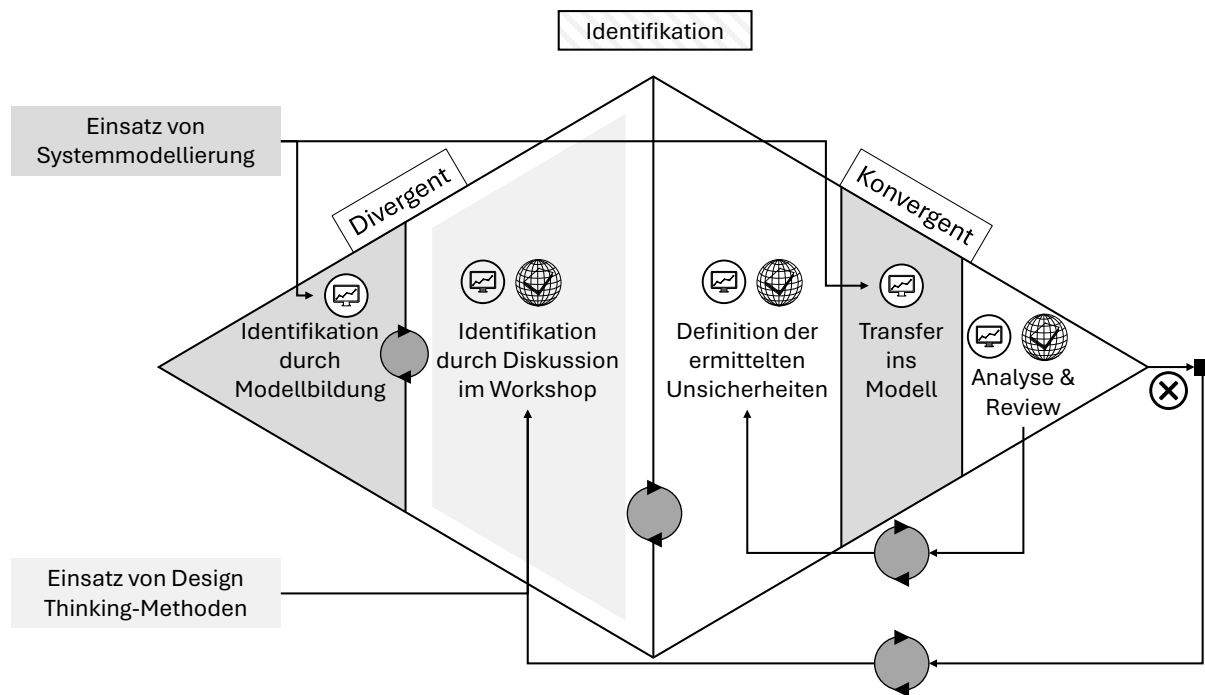


Abbildung 5-4: Der linke Diamant des DT-MBSE Integrationsmodells

Der erste Schritt fokussiert sich auf die systematische Identifikation von Unsicherheiten durch die initiale Modellerstellung. Das Modellierungsteam überführt dabei dokumentenbasierte Daten und Informationen in ein MBSE-Modell. Dieser Prozess erfordert eine ganzheitliche Systembetrachtung unter Einbeziehung systematischer und analytischer Aspekte. Die methodische Vorgehensweise unterstützt dabei die strukturierte Aufdeckung von Unsicherheiten. Kreative Denkmechanismen sind in diesem Schritt relevant, da sie sowohl zum Problemverständnis als auch zur Entwicklung neuer Artefakte beitragen. Die Integration dieser kreativen Komponente ist besonders wichtig, da sie die Grundlage für innovative Lösungsansätze in späteren Prozessschritten bildet. Zur methodischen Unterstützung dieses Prozesses wurden fünf spezifische Analysemethoden entwickelt: die Systemkontext-Analyse, die Anforderungs-Analyse, die der Verhaltens- und Operationselemente, der Funktionselemente sowie die Systemstruktur-Analyse. Diese unterstützen eine systematische Identifikation von Unsicherheiten. Die detaillierte Beschreibung dieser Analysemethoden erfolgt in Kapitel 5-4.

Der zweite Schritt umfasst einen Workshop unter Beteiligung des SE-Teams und des Modellierungsteams. In Anlehnung an (Tekaar *et al.*, 2019) zielt dieser Workshop primär darauf ab, eine gemeinsame Wissensbasis bezüglich der Ausgangssituation zu etablieren und im Sinne des Design Thinking eine empathische Perspektive zu entwickeln. Die empathische Betrachtung der Stakeholder-Bedürfnisse aus verschiedenen Blickwinkeln ermöglicht die Identifikation zusätzlicher Unsicherheiten. Dabei werden die domänenspezifischen Entwickler in beratender Funktion einbezogen, um ihre fachspezifische Expertise bei der Identifikation technischer Unsicherheiten zu nutzen. Die Effektivität dieser Workshopphase kann durch den gezielten Einsatz spezifischer Design Thinking-Methoden signifikant gesteigert werden, wie sie in den Arbeiten von (Tellioglu, 2016), (Chasanidou *et al.*, 2015) sowie (Alves und Jardim Nunes, 2013) und (Wynn und Clarkson, 2024, S. 208 ff.) dokumentiert sind. Diese Methoden unterstützen unter anderem die kreative Exploration und die systematische Erfassung verschiedener Stakeholder-Perspektiven.

Die konvergente Phase umfasst drei aufeinanderfolgende Schritte. Im ersten Schritt erfolgt die Definition der ermittelten Unsicherheiten, wobei die Erkenntnisse aus dem Workshop systematisch aufbereitet und strukturiert werden. Der zweite Schritt beinhaltet den Transfer dieser definierten Unsicherheiten in das MBSE-Modell, eine Aktivität, die das Modellierungsteam durchführt. Im dritten Schritt findet die Analyse und Überprüfung des Modells statt, wobei die Ergebnisse iterativ wieder in den Definitionsschritt einfließen. Dieser iterative Prozess führt zu einer sukzessiven Verfeinerung der Definitionen der Unsicherheiten in den Daten und Informationen. Der erste Diamant wird solange durchlaufen, bis eine zufriedenstellende Definition der identifizierten Unsicherheiten im MBSE-Modell erreicht ist und ein Konsens zwischen den Teams über diese Definition besteht.

Der beschriebene Prozess des linken Diamanten resultiert dabei in mehreren Ergebnissen: Erstens wird durch die systematische Modellierung und kreative Exploration eine fundierte Grundlage für die Entwicklung neuer Artefakte (z. B. Anforderungsspezifikationen, Schnittstellendefinitionen, funktionale Beschreibungen oder konzeptionelle Ideen) geschaffen. Zweitens etabliert der kollaborative Workshopansatz eine gemeinsame Wissensbasis bezüglich der Ausgangssituation unter allen beteiligten Teams. Drittens ermöglicht die Integration von Design Thinking-Methoden ein tiefgreifendes Verständnis und Einfühlen in die spezifische Problemsituation. Diese Aspekte münden schließlich in einer verfeinerten Definition der Unsicherheiten in Daten und Informationen, die als Ausgangspunkt für den nachfolgenden Mitigationsprozess im rechten Diamanten dient.

Der Prozess des linken Diamanten weist methodische Parallelen zu den von (Hubka und Eder, 1992, S. 74 ff.) beschriebenen Methoden der Konstruktionswissenschaft zur Gewinnung neuer Erkenntnisse auf. Deren Ansatz basiert ebenfalls auf einem initialen induktiven Prozess zur Integration bereichsspezifischen Wissens, gefolgt von einer synthetischen Modellbildung. Diese Vorgehensweise korrespondiert mit den ersten beiden Schritten des Integrationsmodells. Die von (Hubka und Eder, 1992) beschriebene anschließende Modellprüfung durch Analyse und Deduktion findet ihre Entsprechung in der konvergenten Phase des linken Diamanten. Auch die nachfolgende Anreicherung des Modells mit domänenspezifischem Wissen und praktischen Erfahrungen zeigt methodische Übereinstimmungen.

5.2.4 Der rechte Diamant des DT-MBSE Integrationsmodells

Der rechte Diamant des Integrationsmodells fokussiert sich auf die systematische Reduzierung der zuvor identifizierten Unsicherheiten in Daten und Informationen. Auch hier lassen sich, analog zum linken Diamanten, Parallelen zu der von (Hubka und Eder, 1992) beschriebenen zweiten Phase der Konstruktionswissenschaft erkennen: Die Integration praxisbezogenen Wissens zur Modellverfeinerung. Diese Wissensbasis wird im Integrationsmodell primär durch das domänenspezifische Team eingebracht.

Die divergente Phase des rechten Diamanten ist durch einen kollaborativen Ideengenerierungsprozess charakterisiert. Hierbei kommen wiederum Design Thinking-Methoden zum Einsatz, die den kreativen Prozess der Lösungsfindung systematisch unterstützen. Die Ideengenerierung erfolgt dabei unter aktiver Beteiligung aller Teams, wobei das domänenspezifische Team aufgrund seiner fachlichen Expertise eine zentrale Rolle einnimmt. Abbildung 5-5 veranschaulicht diesen Sachverhalt. Wie bereits in Abbildung 5-4 sind der Einsatz der Systemmodellierung und von Design Thinking Methoden auch in Abbildung 5-5 hervorgehoben.

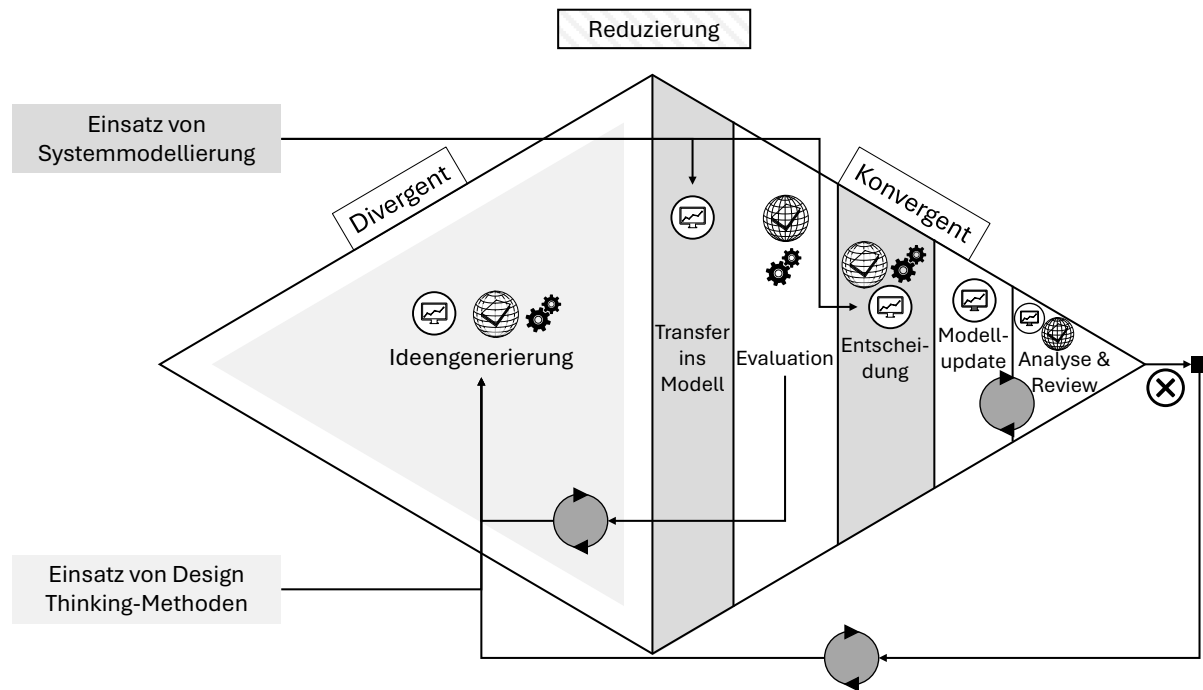


Abbildung 5-5: Der rechte Diamant des DT-MBSE Integrationsmodells

Die konvergente Phase gliedert sich in mehrere aufeinanderfolgende Schritte: Nach dem Transfer der generierten Ideen in das MBSE-Modell erfolgt deren systematische Evaluation. Basierend auf den Evaluationsergebnissen werden Entscheidungen über die Umsetzung getroffen. Evaluation und Entscheidung sind dabei bewusst in zwei unterschiedliche Aktivitäten unterteilt, da bei der Evaluation Analysen und systematische Bewertungen der Lösungsalternativen im Vordergrund stehen und von den Teams auf operativer Ebene umgesetzt werden können. Die anschließende Entscheidung darüber, welche Alternative zur Auflösung einer Unsicherheit weiterverfolgt wird, bedarf unter Umständen einer Entscheidung durch ein Steuergremium, weswegen eine klare Trennung der Aktivitäten an dieser Stelle sinnvoll erscheint. Auch liegt der Fokus der Iteration auf den Aktivitäten der Evaluation und Ideengenerierung, da das Ziel darin besteht, stichhaltige Evaluationsergebnisse zu erhalten, die die Entscheidungsfindung in der darauffolgenden Aktivität vereinfachen. Der fünfte Schritt sieht schließlich ein Modellupdate durch das Modellierungsteam auf Grundlage des Entscheidungsergebnisses vor. In der abschließenden Analyse- und Review-Aktivität wird eine Verifikation des Modells durchgeführt. Hierbei überprüfen das SE-Team und das Modellierungsteam das Modell auf Korrektheit, Konsistenz und Vollständigkeit. Dieser Vorgang erfolgt kollaborativ und kann durch technische Hilfsmittel und Werkzeuge entsprechend unterstützt werden. Wie in Abbildung 5-5 dargestellt, ist der Prozess des rechten Diamanten ebenfalls durch mehrere Iterationsschleifen gekennzeichnet, womit eine kontinuierliche Verfeinerung und Optimierung der Artefakte vorgesehen ist.

Der Prozess des rechten Diamanten resultiert in zwei zentralen Ergebnissen: Erstens entsteht ein mit domänenspezifischem Fachwissen angereichertes MBSE-Modell, in dem die zuvor identifizierten Unsicherheiten systematisch reduziert wurden. Zweitens werden durch den iterativen Prozess der Ideengenerierung und -evaluation Entwicklungsartefakte entwickelt, die den definierten Anforderungen entsprechen, die identifizierten Unsicherheiten adressieren und für die im Team Konsens über deren Reife besteht.

5.2.5 Bewertung und Einordnung des DT-MBSE Integrationsmodells

Die Bewertung des entwickelten Vorgehensmodells erfolgt anhand von Anforderungen für Prozessmodelle im Kontext der Unsicherheitsbehandlung. (Lindemann und Lorenz, 2008) haben im Rahmen ihrer Arbeit zum Umgang mit Unsicherheiten in der integrierten Produktentwicklung einen Anforderungskatalog entwickelt, der auf der systematischen Analyse existierender Produktentwicklungsmodelle sowie empirischer Untersuchungen basiert. Der Fokus ihrer Arbeit liegt auf der Entwicklung eines Ansatzes zur Unterstützung von Innovationsprojekten, die sich mit Unsicherheiten aus dem Markt- und Technologiebereich auseinandersetzen. Die Autoren leiten in diesem Zusammenhang fünf zentrale Anforderungen an Vorgehensmodelle zur Unterstützung von Projekten unter Unsicherheiten ab, die in Tabelle 5-3 dokumentiert sind.

Das DT-MBSE Integrationsmodell unterstützt das Entwicklungsteam bei der systematischen Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen. Damit zielt es auf denselben Problembereich ab, für den (Lindemann und Lorenz, 2008) ihre Anforderungen entwickelt haben. Da das Modell einen Beitrag zum Umgang mit Unsicherheiten in der Produktentwicklung leistet, stellt eine Bewertung anhand dieser Anforderungen einen adäquaten Ansatz zur Diskussion des Modells dar. Im Folgenden wird daher das DT-MBSE Integrationsmodell unmittelbar nach der erfolgten detaillierten Beschreibung in diesem Kapitel, anhand der Kriterien aus Tabelle 5-3 in einem ersten Schritt aus einer theoretischen Perspektive heraus bewertet, um die konzeptionellen Eigenschaften des Modells zu diskutieren. In Kapitel 6 erfolgt in einem zweiten Schritt im Rahmen der Validierung der Gesamtmethodik eine praxisbezogene Betrachtung, wobei das Integrationsmodell dann nicht als isoliertes Artefakt, sondern als integraler Bestandteil der ITPE-Methodik diskutiert wird.

Tabelle 5-3: Anforderungen an Vorgehensmodelle zur Unterstützung von Projekten unter Unsicherheiten nach (Lindemann und Lorenz, 2008, S. 178)

Nr.	Anforderung	Beschreibung
A1	Flexible Prozessgestaltung	Das Vorgehensmodell berücksichtigt Iterationen, Wechsel und Sprünge und bietet gleichzeitig eine übergreifende Führung und Unterstützung.
A2	Front-Loading	Das Vorgehensmodell unterstützt die Verlagerung wichtiger Analysen und Entscheidungen in die frühe Phase.
A3	Einbettung von Optionen	Das Vorgehensmodell unterstützt die systematische Generierung mehrerer möglicher Lösungen zur Erweiterung des Lösungsraums und Verbesserung des Problemverständnisses.
A4	Interdisziplinäre Arbeitsweise	Das Vorgehensmodell unterstützt die Integration aller technischen und nicht-technischen Funktionen mit simultaner statt sequenzieller Behandlung von Unsicherheiten beider Bereiche.
A5	Unterstützung durch Werkzeuge und Methoden	Das Vorgehensmodell integriert die Nutzung von Werkzeugen und Methoden zur Anleitung und Verbesserung der funktions- und teamübergreifenden Kommunikation und Entscheidungsfindung.

- A1 – Flexible Prozessgestaltung: Das DT-MBSE Integrationsmodell sieht in beiden Diamanten ein iteratives Vorgehen sowie die Möglichkeit zur bedarfsgerechten Wiederholung einzelner Prozessschritte vor, wodurch eine flexible Prozessgestaltung gewährleistet wird. Gleichzeitig bietet das Modell durch seine klare Strukturierung der Aktivitäten und die definierten Rollenkonzepte die erforderliche prozessuale Führung.
- A2 – Front-Loading: Diese Anforderung bezieht sich vordergründig auf Vorgehensmodelle, die mehrere Phasen des Entwicklungsprozesses einschließen und dabei die Verlagerung wichtiger Analysen und Entscheidungen in die frühe Phase der Entwicklung vorsehen. Das DT-MBSE Integrationsmodell stellt kein phasenübergreifendes Vorgehensmodell dar, welches Aufgaben und Aktivitäten in Hinblick auf die unterschiedlichen Phasen des Entwicklungsprozesses plant und festlegt, weswegen es diese Anforderung aufgrund seines aufgabenspezifischen Charakters nicht vollumfänglich adressiert. Dennoch plant das DT-MBSE Integrationsmodell in seinem spezifischen Kontext analytische Aktivitäten zu Beginn des Prozesses im linken Diamanten. Die Integration der fünf Analysemethoden (Systemkontextanalyse, Anforderungsanalyse, Verhaltensanalyse, Funktionsanalyse, Systemstrukturanalyse) unterstützt dabei eine strukturierte Erfassung von Unsicherheiten zu Beginn des Prozesses. Die Workshop-basierte Vorgehensweise und die beratende Funktion der Domänenexperten tragen dazu bei, dass wichtige Erkenntnisse bereits zu Beginn des Prozesses gewonnen werden und für die spätere Entscheidungsfindung zur Verfügung stehen.
- A3 – Einbettung von Optionen: Die divergente Phase im rechten Diamanten ist explizit auf die Generierung verschiedener Lösungsalternativen ausgerichtet. Das Vorgehensmodell definiert dafür im rechten Diamanten einen strukturierten Prozess von der Ideengenerierung über die systematische Evaluation bis zur Entscheidungsfindung. Durch seine iterative Struktur unterstützt es die kontinuierliche Präzisierung des Lösungsraums. Damit erfüllt das DT-MBSE Integrationsmodell diese Anforderung hinreichend.
- A4 – Interdisziplinäre Arbeitsweise: Die interdisziplinäre Zusammenarbeit ist ein Schlüsselement im DT-MBSE Integrationsmodell. Aus diesem Grund besitzt das Modell ein eindeutiges Rollenkonzept mit definierten Kompetenzprofilen, wodurch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit unterstützt und diese Anforderung somit ebenfalls vom Modell erfüllt wird. Die Workshop-Aktivitäten in den divergenten Phasen beider Diamanten sowie die kollaborativen Analyse- und Review-Aktivitäten in den konvergenten Phasen fördern zudem die Integration unterschiedlicher Perspektiven.
- A5 – Unterstützung durch Werkzeuge und Methoden: Das Modell integriert verschiedene methodische Ansätze. Die fünf spezifischen Analysemethoden unterstützen den strukturierten Aufbau und die Pflege des MBSE-Modells, das als zentrale, dokumentierte Informationsquelle dient. Die Integration von Design Thinking-Methoden ergänzt den methodischen Rahmen. Durch die Kombination dieser Werkzeuge und Methoden erfüllt das Modell die Anforderung nach methodischer Unterstützung hinreichend.

Die Bewertung und Diskussion des DT-MBSE Integrationsmodells anhand der von (Lindemann und Lorenz, 2008) definierten Anforderungen zeigt, dass das Modell die wesentlichen Anforderungen eines Vorgehensmodells zur Unterstützung von Projekten unter Unsicherheiten erfüllt. Die Stärken des Modells liegen in der flexiblen Prozessgestaltung durch die Berücksichtigung iterativer Elemente bei gleichzeitiger prozessualer Führung durch die klare Definition von

Aktivitäten. Das Modell unterstützt die interdisziplinäre Zusammenarbeit durch ein klares Rollenkonzept mit definierten Kompetenzprofilen. Weiterhin bietet das DT-MBSE Integrationsmodell eine strukturierte Integration von Methoden, die aktivitätsspezifisch vom Entwicklerteam eingesetzt werden können. Aufgrund seines aufgabenspezifischen Charakters adressiert das Vorgehensmodell nicht alle Aspekte der Front-Loading-Anforderung (A2), wobei diese Anforderung hauptsächlich an phasenübergreifende Vorgehensmodelle adressiert ist, die den gesamten Entwicklungsprozess berücksichtigen und damit auf einer höheren Betrachtungsebene im Kontext der Produktentwicklung angesiedelt sind. (Lindemann und Lorenz, 2008) fokussieren dabei auf die bewusste Verlagerung von Aktivitäten sowohl auf der Markt- als auch auf der Technikseite in die frühe Phase bzw. das Front-End, um Unsicherheitsfelder zu definieren und anschließend durch Optionen zu erkunden. Um im Rahmen eines Entwicklungsprojektes diese Anforderung zu erfüllen, wäre der Einsatz der Methodik und in diesem Zusammenhang des DT-MBSE Integrationsmodells und der darin beschriebenen Aktivitäten in einer frühen Phase notwendig. Dessen Einsatz würde den Vorgang der Definition von Unsicherheiten und die anschließende Erkundung von Lösungsoptionen unterstützen. Abschließend lässt sich feststellen, dass das DT-MBSE Integrationsmodell, insbesondere bei seinem Einsatz in der frühen Phase eines Entwicklungsprojektes, einen wertvollen Beitrag zur Behandlung von Unsicherheiten in der Produktentwicklung leisten kann. Es unterstützt dabei die Ideenfindung, Problemlösung und Bewertung von Lösungsansätzen und fördert gleichzeitig die Interaktion und Kommunikation innerhalb von Entwicklungsteams. Damit leistet es einen wichtigen Beitrag zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage, die sich auf die Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen durch einen modellgestützten, menschenzentrierten Ansatz konzentriert. Diese Eigenschaften stehen auch im Einklang mit den in Kapitel 3.6 beschriebenen Zwecken von Prozess- und Vorgehensmodellen. Darüber hinaus erfüllt das Modell durch seine visuelle Darstellung den allgemeinen Zweck, einen Prozess anschaulich abzubilden.

Bei der kritischen Betrachtung des Modells sind neben der bereits diskutierten eingeschränkten Adressierung der Front-Loading-Anforderung (A2) auch weitere Limitationen zu berücksichtigen: Das Modell bietet keine methodische Unterstützung zur systematischen Definition von Reifekriterien für Entwicklungsartefakte oder Abbruchkriterien für Iterationen. Die Festlegung dieser Kriterien obliegt dem Entwicklungsteam ohne strukturierte Anleitung durch das Modell. Zudem ist der Workshop-basierte, iterative Charakter des Modells potenziell ressourcenintensiv, wobei die Effektivität von der Kompetenz der beteiligten Teammitglieder und der Qualität der Moderation abhängen kann. Der Ressourcenaspekt wird in der praktischen Validierung in Kapitel 6 näher betrachtet.

Im Folgenden wird das DT-MBSE Integrationsmodell in das Rahmenwerk von (Wynn und Clarkson, 2018) eingeordnet, um es im Kontext etablierter Vorgehensmodelle der Produktentwicklung zu positionieren. Die erste Dimension des Rahmenwerks berücksichtigt den Umfang des Modells auf Grundlage seines Anwendungsbereiches und beinhaltet, wie in Kapitel 3.6 beschrieben die drei Kategorien, Mikroebene, Mesoebene und Makroebene. Die zweite Dimension gruppiert die Prozessmodelle in Abhängigkeit ihres Gesamtzweckes. Dabei wird zwischen Vorgehensmodellen, analytischen Modellen sowie abstrakten Modellen und Modellen aus dem Bereich Management Science/Operations Research (MS/OR) unterschieden.

Das DT-MBSE Integrationsmodell beschreibt die Aktivitäten, die durchzuführen sind, um die beiden Aufgaben der Identifizierung und Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen zu bewältigen. Da Mesomodelle nach (Wynn und Clarkson, 2018) den Ablauf von Aufgaben

über mehrere Schritte hinweg abbilden und sich auf End-to-End-Aktivitätsflüsse konzentrieren, lässt sich das Modell in Bezug auf die erste Dimension in diese Kategorie einordnen. (Wynn und Clarkson, 2024, S. 201 ff.) befassen sich im Rahmen der Diskussion von Modellen für empfohlene Denkweisen, Methoden und Prozesse auch mit den Denkweisen des Design Thinking, Systems Thinking und des Systems Engineering und den damit verbundenen Methoden. Diese werden als Mikro-Level Ansätze klassifiziert, wohingegen Prozessmodelle wie das Doppel-Diamant-Prozessmodell (siehe Abbildung 4-4, Kapitel 4.2.1) und das Fünf-Phasen-Modell des Hasso-Plattner-Instituts (siehe Abbildung 4-7, Kapitel 4.2.1) als Meso-Level Ansätze klassifiziert werden (Wynn und Clarkson, 2024, S. 212 ff.). Da das Doppel-Diamant-Prozessmodell als Grundlage für das DT-MBSE Integrationsmodell dient, untermauert dieser Sachverhalt die Kategorisierung des DT-MBSE Integrationsmodells als Meso-Level Ansatz. Eine Einordnung als Makro-Level Modell wäre nicht angemessen, da sich das Modell nicht primär auf Projektstrukturen oder den Entwurfsprozess im breiteren organisatorischen Kontext konzentriert.

In Bezug auf die zweite Dimension ist das DT-MBSE Integrationsmodell als Vorgehensmodell zu verstehen, da es als eine Art Leitfaden für die Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen dient. Auch diese Kategorisierung deckt sich mit der Sichtweise in (Wynn und Clarkson, 2024, S. 138), in welcher Denkweisen wie Design Thinking und Systems Thinking bestimmte Herangehensweisen an Situationen bieten, haben Methoden und Prozesse einen prozeduralen Schwerpunkt. So bieten beispielsweise Entwurfsmethoden Schritte zur Unterstützung bestimmter Aufgaben, die während des Entwurfs auftreten. Dies gilt eindeutig auch für das DT-MBSE Integrationsmodell.

5.3 Anwendungsspezifische Ontologie in der Domäne der Satellitenprojekte

„Das erste Geschäft einer jeden Theorie ist das Aufräumen der durcheinander geworfenen und ineinander verworrenen Begriffe und Vorstellungen, und erst, wenn man sich über Namen und Begriffe verständigt hat, darf man hoffen, in der Betrachtung der Dinge mit Klarheit und Leichtigkeit vorzuschreiten.“ (Carl von Clausewitz)

Die anwendungsspezifische Ontologie bildet den dritten zentralen Baustein der vorgestellten Methodik. Wie in Abbildung 5-1 dargestellt, umfasst dieser Baustein sowohl das Ontologie-Konzept als auch eine Elementbibliothek. Die Beschreibung dieses Bausteins erfolgt vor der Erörterung der Analysemethoden, die den zweiten Baustein darstellen und in Kapitel 5.4 beschrieben werden. Diese Reihenfolge wurde gewählt, da die Ontologie die für die Modellierung relevanten Konzepte und Beziehungen definiert, die bei der Anwendung der Analysemethoden zum Einsatz kommen. Die Struktur dieses Kapitels gliedert sich wie folgt: Zunächst wird in Kapitel 5.3.1 die Auswahl der Methode zur Entwicklung des ontologischen Konzepts erläutert und begründet. Anschließend wird in Kapitel 5.3.2 das ontologische Konzept selbst detailliert dargelegt. Schließlich wird in Kapitel 5.3.3 das Konzept der Elementbibliothek vorgestellt und dessen Rolle innerhalb der Gesamtmethodik erörtert, bevor in Kapitel 5.3.4 das gesamthafte ontologische Konzept bewertet und diskutiert wird.

Im Folgenden wird der in der Ontologie-Literatur etablierten Terminologie gefolgt, wonach von *Wissen* und *Wissensrepräsentation* gesprochen wird. Dabei bezeichnet *Wissen* im technischen Sinne formalisierte, maschinenlesbare semantische Strukturen – im Unterschied zur in Kapitel 3.5 dargelegten Definition von Wissen als zweckdienliche Vernetzung von Informationen, die immer an Personen gebunden ist.

5.3.1 Auswahl Entwicklungsmethode

Für die Auswahl einer geeigneten Methode zur Entwicklung des Ontologie-Konzeptes wurden die Literaturübersichten von (Fernández-López und Gómez-Pérez, 2002), (Gomez-Perez *et al.*, 2003, S. 107 ff.) sowie (Jones *et al.*, 2007) herangezogen, die jeweils eine Beschreibung und Zusammenfassung der Methoden für die Ontologieentwicklung enthalten. Im Folgenden wird auf die wichtigsten Methoden zur Entwicklung von Ontologien kurz eingegangen. U&K (Uschold und King, 1995) verfolgen einen strukturierten Ansatz, der sich auf eine klare Definition des Zwecks und des Umfangs der Ontologie konzentriert. Ein wesentliches Merkmal bei der anschließenden Erstellung der Ontologie ist die Integration bestehender Ontologien, um die Interoperabilität zu fördern und den Arbeitsaufwand zu verringern. Der Ansatz zeichnet sich durch ein stark strukturiertes Vorgehen aus. Bei besonders komplexen Domänen kann der Ansatz ressourcenintensiv sein. Der KACTUS-Ansatz, beschrieben in (Gomez-Perez *et al.*, 2003, S. 124 f.) ist ein wiederverwendungsorientierter Ansatz zur Erstellung von Ontologien, der insbesondere in technischen Domänen eingesetzt wird. Diese Methode zeichnet sich durch ihren iterativen Prozess aus, der darauf abzielt, Ontologien auf der Grundlage der Erfahrungen und Anforderungen aus konkreten Anwendungsprojekten kontinuierlich zu verbessern und zu verfeinern. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes ist die Wiederverwendung anderer Ontologien, um effizientere Entwicklungszyklen zu ermöglichen.

Die SENSUS-Methode basiert auf der Verwendung der SENSUS-Ontologie, einer bestehenden Wissensbasis, die als Grundgerüst für die Entwicklung von domänenspezifischen Ontologien dient (Fernández-López und Gómez-Pérez, 2002, S. 140). Der Ansatz nutzt die Wiederverwendung

und Anpassung bestehender Strukturen, was die Entwicklungseffizienz steigern kann. Ein besonderes Merkmal ist laut den Autoren die breite Abdeckung mit allgemeinem Wissen, was die Integration in die jeweilige Anwendungsdomäne erleichtert. Während die beschleunigte Entwicklung durch Wiederverwendung ein wesentlicher Vorteil ist, ergeben sich zwei potenzielle Nachteile: Zum einen eine mögliche Kompliziertheit der resultierenden Struktur, zum anderen die Notwendigkeit, umfangreiche Anpassungen für spezifische Anforderungen vorzunehmen. Der Ansatz beginnt mit der Spezifikation der Ziele und des Anwendungsbereichs, gefolgt von einer Konzeptualisierung, bei der ein konzeptionelles Modell erstellt wird. Dieses Modell wird dann in eine formale Sprache formalisiert, mit Hilfe von Ontologie-Editoren implementiert und schließlich wird die Ontologie gepflegt. Diese Methode zeichnet sich durch eine klare Dokumentation und die Berücksichtigung von Prototyping und Evaluation aus, wodurch eine umfassende Entwicklung und Pflege ermöglicht wird. Ein weiterer möglicher Nachteil dieses Ansatzes ist der hohe Aufwand, der mit der Durchführung der einzelnen Schritte verbunden ist.

Die TOVE-Methode von (Grüninger und Fox, 1995) konzentriert sich auf die präzise Modellierung von Geschäftsprozessen und Unternehmensdomänen durch eine Reihe von Schritten, die von der konzeptionellen Modellierung bis zur formalen Validierung reichen. Diese Methode zeichnet sich durch die Verwendung einer axiomatischen Basis aus, um klare und präzise Definitionen von Konzepten zu gewährleisten. Der Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit, Ontologien zu erstellen, die nicht nur reichhaltig und detailliert sind, sondern auch einer formalen Validierung unterzogen werden können. Ein Nachteil könnte jedoch der erhöhte Aufwand sein, der mit der formalen Spezifikation und der Verwendung von Axiomen verbunden ist.

Die CYC-Methode zielt darauf ab, eine umfassende Wissensbasis mit allgemeinem Verständnis zu schaffen, indem Common-Sense-Wissen in der Sprache CycL gesammelt und modelliert wird (Fernández-López und Gómez-Pérez, 2002, S. 131). Durch den Einsatz einer Inferenzmaschine werden aus dem vorhandenen Wissen neue Erkenntnisse abgeleitet, was eine breite Anwendbarkeit und die Fähigkeit ermöglicht, komplexe Schlussfolgerungen zu ziehen. Trotz der Vorteile wie Vielseitigkeit und Unterstützung anspruchsvoller Inferenzprozesse stellt die CYC-Methode eine Herausforderung dar, die sich aus dem hohen anfänglichen Aufwand für den Wissenserwerb und der Komplexität der Pflege und Weiterentwicklung ergibt.

(Ahmed *et al.*, 2007) verfolgen einen strukturierten, sechsstufigen Prozess, der darauf abzielt, genaue und anwendbare Ontologien zu entwickeln. Der Ansatz beginnt mit der Identifizierung und Erstellung relevanter Taxonomien, gefolgt von ihrer Prüfung in spezifischen Anwendungen. Ein wichtiger Schritt ist die Erstellung eines Thesaurus, der die Integration und Verfeinerung der Taxonomie unterstützt. Schließlich wird die gesamte Methode evaluiert, um ihre Wirksamkeit zu gewährleisten. Diese Methode zeichnet sich durch ihren empirischen Forschungsansatz aus, der die Entwicklung von Ontologien ermöglicht, die sowohl in der Forschung als auch in der Industrie nützlich sind. Der systematische Ansatz ermöglicht eine Anpassung an die spezifischen Bedürfnisse der technischen Entwicklung, kann aber aufgrund seines detaillierten und mehrstufigen Ansatzes zeitaufwändig sein und erfordert ein tiefes Verständnis des betrachteten Bereichs.

Die METHONTOLOGY stellt eine umfassende Methode zur Ontologieentwicklung dar, die sich in Projektmanagement-, Entwicklungs- und unterstützende Aktivitäten gliedert. Die Entwicklungsaktivitäten umfassen Spezifikation, Konzeptualisierung, Formalisierung, Implementierung und Pflege, während unterstützende Aktivitäten Wissenserwerb, Bewertung, Integration, Dokumentation und Konfigurationsmanagement einschließen. Basierend auf einem Lebenszyklus mit sich entwickelnden Prototypen, beginnt der Prozess mit der Spezifikation und dem parallelen

Wissenserwerb, gefolgt von Konzeptualisierung, Formalisierung und Implementierung. Die METHONTOLOGY betont die Wichtigkeit der gleichzeitigen Durchführung von Kontroll-, Qualitätssicherungs- und anderen unterstützenden Aktivitäten während des gesamten Entwicklungsprozesses. Die Methode berücksichtigt zudem Interdependenzen zwischen verschiedenen Ontologien und hat sich in der Entwicklung mehrerer Ontologien in diversen Bereichen bewährt. Durch die Gliederung der durchzuführenden Aktivitäten in die Bereiche Projektmanagement, Entwicklung und Unterstützung bietet diese Methode einen guten Leitfaden für den Entwicklungsprozess einer Ontologie. Die Methode berücksichtigt außerdem alle wichtigen Aspekte der Ontologieentwicklung, was zu einem umfassenden Verständnis des Ontologieentwicklungsprozesses beiträgt. Andererseits kann die Anwendung der METHONTOLOGY, insbesondere für kleinere Projekte oder Einsteiger, mit einem nennenswerten Aufwand verbunden sein, da sie eine Vielzahl von Aktivitäten und Schritten beinhaltet. Trotz ihres umfassenden Charakters bietet METHONTOLOGY jedoch die Flexibilität, an verschiedene Projektgrößen und -anforderungen angepasst zu werden. Sie wird in (Gomez-Perez *et al.*, 2003, S. 125 ff.) und in (Fernandez *et al.*, 1997) beschrieben. Die *Ontology Development 101* Methode von (Noy und McGuinness, 2001) bietet einen strukturierten, iterativen Ansatz zur Ontologieentwicklung. Der Prozess besteht aus sieben Schritten und umfasst die Definition der Domäne und des Umfangs, die Evaluation bestehender Ontologien zur möglichen Wiederverwendung, die Auflistung wichtiger Begriffe und die Entwicklung einer Klassenhierarchie mittels Top-Down-, Bottom-Up- oder kombinierter Ansätze. Zentrale Schritte sind die Definition von Klasseneigenschaften (Slots) und deren Facetten, einschließlich Kardinalität/Multiplizität, Wertetypen, Domänen und Bereiche. Abschließend werden konkrete Instanzen erstellt. Die *Ontology Development 101* Methode ermöglicht eine flexible Anpassung an verschiedene Anwendungsfälle, während sie einen robusten Rahmen für die systematische Ontologieentwicklung bietet. Die Autoren unterstreichen, dass es keine singular korrekt Modellierungsmethode gibt, was die Anpassungsfähigkeit der Methode an verschiedene Kontexte hervorhebt.

Um eine passende Methode zur Entwicklung des ontologischen Konzeptes zu identifizieren, wurden sechs Kriterien als Bewertungsgrundlage definiert. Diese Kriterien wurden aus den spezifischen Anforderungen der Ontologieentwicklung im Rahmen dieser Arbeit abgeleitet. Es wird zwischen den folgenden Erfüllungsgraden unterschieden: "Trifft zu", "Trifft teilweise zu", "Trifft nicht zu". Das Ergebnis der Bewertung ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Die zugrundeliegenden Kriterien lauten wie folgt:

- K1: Die Methode soll vorhandene Ontologien berücksichtigen
- K2: Die Methode sollte für Einsteiger in die Ontologieentwicklung geeignet sein
- K3: Die Methode sollte keine Sprachabhängigkeit aufweisen
- K4: Die Methode sollte die Verwendung von Elementbibliotheken berücksichtigen
- K5: Die Methode soll nachvollziehbar strukturiert sein
- K6: Der Fokus der Methode sollte nicht nur auf der Erweiterung oder Verbesserung einer bestehenden Ontologie liegen

	U&K	KACTUS	SENSUS	TOVE	CYC	Ahmed et. al	METHONTOLOGY	Ontology 101
K1	●	●	●	◐	●	●	●	●
K2	◐	◐	◐	○	○	◐	◐	●
K3	●	●	●	●	●	●	●	●
K4	◐	●	●	○	●	●	●	◐
K5	●	◐	◐	●	◐	●	●	●
K6	●	○	○	●	●	●	●	●

● = trifft zu ◐ = trifft teilweise zu ○ = trifft nicht zu

Abbildung 5-6: Bewertung der Methoden zur Ontologieentwicklung

Basierend auf der durchgeführten Bewertung erweisen sich METHONTOLOGY, *Ontology Development 101* und die Methode von *Ahmed et al.* als besonders geeignete Kandidaten für die Entwicklung des ontologischen Konzepts, da diese drei Methoden die definierten Kriterien weitgehend erfüllen. Trotz der Stärken der *Ahmed et al.* Methode wurde die Entscheidung getroffen, eine Kombination aus METHONTOLOGY und *Ontology Development 101* zu verwenden. Diese Wahl begründet sich wie folgt: METHONTOLOGY bietet einen umfassenden, in der Praxis bewährten Rahmen für den gesamten Entwicklungsprozess. Diese Methode liefert einen ganzheitlichen Überblick über den gesamten Ontologieentwicklungsprozess und kann dementsprechend als Leitfaden auf einer übergeordneten Makroebene herangezogen werden. Auf der anderen Seite bietet die *Ontology Development 101* Methode konkrete, leicht verständliche Schritte für die eigentliche Entwicklung der Ontologie. Die Methode gewährleistet dadurch insbesondere für Einsteiger eine gute Zugänglichkeit. Die Kombination der Anwendung der beiden Methoden auf unterschiedlichen Ebenen gewährleistet die Erfüllung aller definierten Kriterien.

5.3.2 Ontologie-Konzept

Das Ontologie-Konzept basiert auf einer modularen Grundstruktur und umfasst drei Hauptkomponenten: die *General Ontology* (Allgemeine Ontologie, siehe Abbildung 5-8), die *Structure Ontology* (Strukturontologie, siehe Abbildung 5-10) und die *Uncertainty Ontology* (Unsicherheitsontologie, siehe Abbildung 5-14). Diese drei Hauptkomponenten der Ontologie werden durch die Elementbibliothek ergänzt. Die Ontologie wurde in englischer Sprache entwickelt, da dies sowohl der etablierten Fachterminologie der Raumfahrttechnik entspricht als auch die internationale Anschlussfähigkeit und Wiederverwendbarkeit gewährleistet. Abbildung 5-7 veranschaulicht sowohl diesen Zusammenhang als auch die Beziehungen zwischen den Ontologie-Hauptkomponenten und der Elementbibliothek. Die Implementierung der Ontologie erfolgte in SysML anstelle von traditionellen Ontologieentwicklungssprachen wie OWL. Diese Entscheidung basiert auf der primären Zielsetzung, die Unterstützung des menschlichen Verständnisses und der Wissensstrukturierung zu priorisieren, während die Maschinenlesbarkeit der Ontologie im Rahmen der Methodik eine untergeordnete Rolle spielt. Die Verwendung von SysML erleichtert zudem die Integration der Ontologie in den Modellierungsprozess und schafft eine einheitliche Sprache zwischen der Ontologie und den zu entwickelnden Systemmodellen, was die Anwendbarkeit und Akzeptanz im Entwicklungsteam fördert.

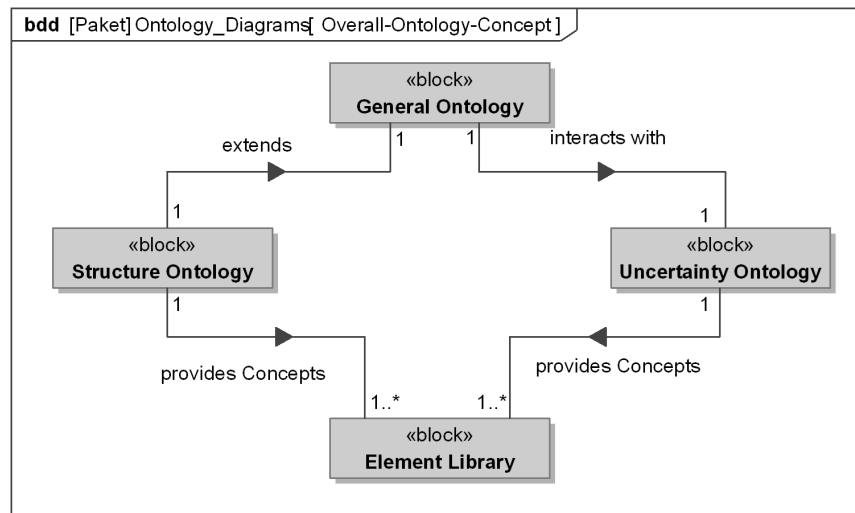


Abbildung 5-7: Gesamtaufbau des ontologischen Konzepts, i.A. an (Gadzo und Koch, 2025)

Die Allgemeine Ontologie, im Folgenden als General Ontology bezeichnet, fungiert als zentrales Element des Konzepts und bietet eine formale Spezifikation von Konzepten sowie deren Beziehungen zur Analyse von Unsicherheiten in dokumentenbasierten Daten und Informationen. Ihre Aufgabe ist es, zur Verringerung von Inkonsistenzen, Ungenauigkeiten, Diskrepanzen und Mehrdeutigkeiten beizutragen. Sie stellt dem Modellierungsteam die notwendigen Konzepte und deren Zusammenhänge zur Verfügung, um bei der Modellerstellung verschiedene kritische Aspekte zu gewährleisten. Dazu gehören eine klare Definition der Anforderungen an das betrachtete System, eine präzise Darstellung des Systemverhaltens, eine genaue Modellierung verschiedener Architekturen des betrachteten Systems sowie eine explizite Darstellung von Systemkontexten. Inspiriert von der MBSE-Ontologie (Holt und Perry, 2019) verkörpert die General Ontology einen neuartigen ontologischen Ansatz, der in die Bereiche *Requirements Section* (Anforderungsbereich), *Behavior Section* (Verhaltensbereich) und *System of Interest Section* (Bereich des Systems von Interesse) unterteilt ist, wobei die *Function* (Funktion) als zentrales verbindendes Element fungiert. Abbildung 5-8 stellt die General Ontology dar und visualisiert dabei die Beziehungen zwischen den drei Hauptbereichen der Ontologie. Diese Darstellung verdeutlicht, wie die Bereiche Anforderungen, Verhalten und System von Interesse miteinander verknüpft sind und ein kohärentes Ganzes bilden. In der Requirements Section werden Konzepte wie *Need* (Bedürfnis), *Goal* (Ziel), *Mission-Need* (Missionsbedürfnis), *Mission-Goal* (Missionsziel), *High-Level Requirement* (Übergeordnete Anforderung), *System-Requirement* (Systemanforderung), *Functional-Requirement* (Funktionale Anforderung) und *Non-Functional-Requirement* (nicht-funktionale Anforderung) hierarchisch auf drei Ebenen strukturiert. In Abbildung 5-8 ist dies in allen drei Bereichen der General Ontology durch eine unterschiedliche Farbgebung der Konzepte veranschaulicht, wobei eine absteigende hierarchische Positionierung mit einer helleren Farbgebung einhergeht. Der Zweck dieser hierarchischen Definition ist es, eine eindeutige Erfassung und Verfolgung der Konzepte von der obersten Ebene – im Falle der Requirements Section von *Need* und *Goal* – bis hin zu spezifischen Konzepten wie den funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen auf der untersten hierarchischen Ebene bereitzustellen. Der Modellierer kann somit auf Konzepte auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen zurückgreifen, was präzisere und flexiblere Modellierung ermöglicht. Des Weiteren ist es dem Modellierer möglich, bei der Modellerstellung sowohl übergeordnete Zusammenhänge als auch spezifische Details berücksichtigen und je nach Bedarf zwischen verschiedenen Detailgraden wechseln.



Im Rahmen der Behavior Section (Verhaltensbereich) stehen Konzepte und deren Beziehungen zur Beschreibung des Systemverhaltens zur Verfügung. Auf höchster Ebene ist es möglich, *Use Cases* (Anwendungsfälle) zu modellieren, die auf Grundlage des *Concepts of Operations* (Betriebskonzept) definiert werden. Der Einsatz des *Activity* Konzepts erlaubt dem Modellierer, diese Anwendungsfälle zu verfeinern. Hierbei stehen einerseits standardisierte Aktivitäten zur Verfügung, wie beispielsweise grundlegende, systemunabhängige Aktivitäten (z.B. "Sende Daten"). Diese standardisierten Aktivitäten sind in der Elementbibliothek enthalten und stehen dem Modellierer somit direkt zur Verfügung, was den Modellierungsprozess vereinfacht. Andererseits kann der Modellierer systemspezifische Aktivitäten definieren und verwenden, die explizit im Rahmen der Entwicklung des betrachteten Systems existieren. Ein zentraler Aspekt dieser Struktur ist die Beziehung zwischen Aktivitäten und Funktionen: Eine oder mehrere Aktivitäten (SysML Darstellung: 1..*) können einer oder mehreren Funktionen (SysML Darstellung: 1..*) des Systems zugewiesen werden und beschreiben somit die konkrete Umsetzung der funktionalen Anforderungen. Diese Verknüpfung ermöglicht eine durchgängige Nachverfolgbarkeit von den Anforderungen über die Funktionen bis hin zum konkreten Systemverhalten.

Die System of Interest Section umfasst das betrachtete System selbst sowie dessen funktionale, logische und physische Architekturen. Jede dieser Architekturen bietet eine spezifische Perspektive auf das System. Die *Functional Architecture* beschreibt beispielsweise die funktionalen Aspekte und wird durch das Konzept des *Functional Interface* ergänzt, welches durch eine "hat"-Beziehung direkt mit dem Konzept der Funktion verbunden ist und zur Modellierung funktionaler Schnittstellen herangezogen wird. Dieses Konzept wird wiederum durch das Konzept des *Logical Interface* realisiert. Die *Logical Architecture* repräsentiert die logische Struktur des Systems, während die *Physical Architecture* die konkrete physische Umsetzung darstellt. In Abbildung 5-8 ist dargestellt, wie die Architektur-, Schnittstellen- und Systemelementkonzepte miteinander in Beziehung stehen. Zusätzlich werden im Rahmen der System of Interest Section die Konzepte *System Context* und *System Context Element* eingeführt, die zur Modellierung des Systemkontextes zur Verfügung stehen und für die Beschreibung der Einbettung des Systems in seine Umgebung zur Verfügung stehen.

Ein entscheidender technischer Aspekt ist die Definition von Multiplizitäten, die die Wechselwirkungen zwischen Konzepten präzise spezifizieren. Multiplizitäten geben an, wie viele Instanzen eines Elements mit wie vielen Instanzen eines anderen Elements in Beziehung stehen können. Zum Beispiel muss eine funktionale Anforderung durch mindestens eine Funktion (1..) erfüllt werden, während mehrere Funktionen (1..) durch das System of Interest (1) realisiert werden. Das System von Interesse (1) wird durch funktionale, logische und physische Architekturen (jeweils 1) dargestellt und interagiert innerhalb eines oder mehrerer definierter Systemkontexte (1..*). Diese genaue Spezifikation trägt zur Entwicklung aussagekräftiger analytischer Modelle bei. In Verbindung mit den Analysemethoden und dem Vorgehensmodell der Methodik entsteht ein umfassender Rahmen, der Modellierer bei der Erstellung von Modellen für die jeweilige Aufgabe anleitet und eine konsistente, ganzheitliche Betrachtung des Systems ermöglicht.

Die Strukturontologie – im Folgenden als Structure Ontology bezeichnet – erweitert als integraler Bestandteil des ontologischen Konzepts der General Ontology um domänenspezifische Komponenten und Informationen. Dadurch entsteht ein flexibles Werkzeug zur Modellerstellung, das sowohl für Teilsysteme des Satellitensystems als auch für das gesamte Raumsegment anwendbar ist. Jedes Element ist mit relevanten Attributen ausgestattet, die für die Analyse essenzielle Eigenschaften repräsentieren, wobei die konkreten Werte projektspezifisch definiert und in der

Elementbibliothek gepflegt werden. Die Erweiterung der General Ontology durch die Structure Ontology wird technisch mittels des Stereotyps *Structural Element* realisiert. Für alle Konzepte in der General Ontology, auf die dieser Stereotyp angewendet wird, können entsprechende Konzepte aus der Structure Ontology herangezogen werden.

Die Entwicklung der Strukturontologie folgte den METHONTOLOGY-Richtlinien durch einen iterativen Prozess unter Einbeziehung von Domänenexperten zur Validierung der Artefakte. Dieser Prozess entspricht der in METHONTOLOGY definierten Entwicklungsaktivität der Konzeptualisierung sowie den Unterstützungsaktivitäten des Wissenserwerbs und der Evaluierung, wie in Abbildung 5-9 visualisiert.

In der Konzeptualisierungsphase wurden systematisch die relevanten Konzepte des Raumfahrtssystems identifiziert und ihre Beziehungen zueinander definiert. Dieser Schritt umfasst die Erstellung einer Konzepthierarchie, die Definition von Beziehungen zwischen den Konzepten, die Festlegung von Attributen für jedes Konzept sowie die Formulierung von Axiomen, die die Logik und Regeln innerhalb der Domäne beschreiben. Hierzu wurde unter anderem die Definition von Stereotypen eingesetzt und ein umfassendes Profil für die Structure Ontology erstellt. Die Einbeziehung von Domänenexperten war hierbei essenziell, um die Vollständigkeit und Korrektheit der identifizierten Konzepte und ihrer Beziehungen sicherzustellen.

Als primäre Literaturquellen für den Wissenserwerb dienten das "Handbuch der Raumfahrttechnik" (Ley *et al.*, 2019), "Space Mission Engineering: The New SMAD" (Wertz *et al.*, 2011) und das "International Handbook of Space Technology" (MacDonald, 2014). Diese Quellen bildeten die Grundlage für die initiale Konzeptidentifikation, welche anschließend durch das Expertenwissen verfeinert und validiert wurde.

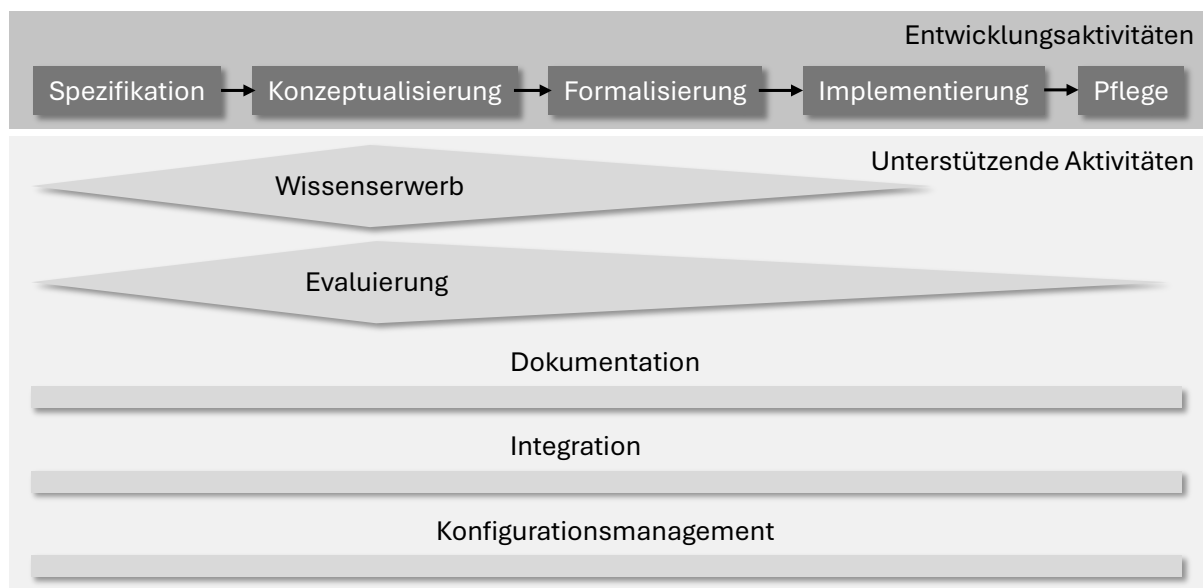


Abbildung 5-9: Aktivitäten der METHONTOLOGY i.A. an (Lopez *et al.*, 1999, S. 39)

Im Kontext des DRM-Rahmenwerks ist dieser Entwicklungsschritt vergleichbar mit der Unterstützungsbewertung (Support Evaluation) (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 176-177). Die Structure Ontology basiert grundlegend auf der Space Object Ontology (SOO) von (Alexander P. Cox *et al.*, 2016). Abbildung 5-10 präsentiert einen Ausschnitt der domänenspezifischen Structure Ontology, fokussiert auf die Top-Level-Konzepte und deren Beziehungen.

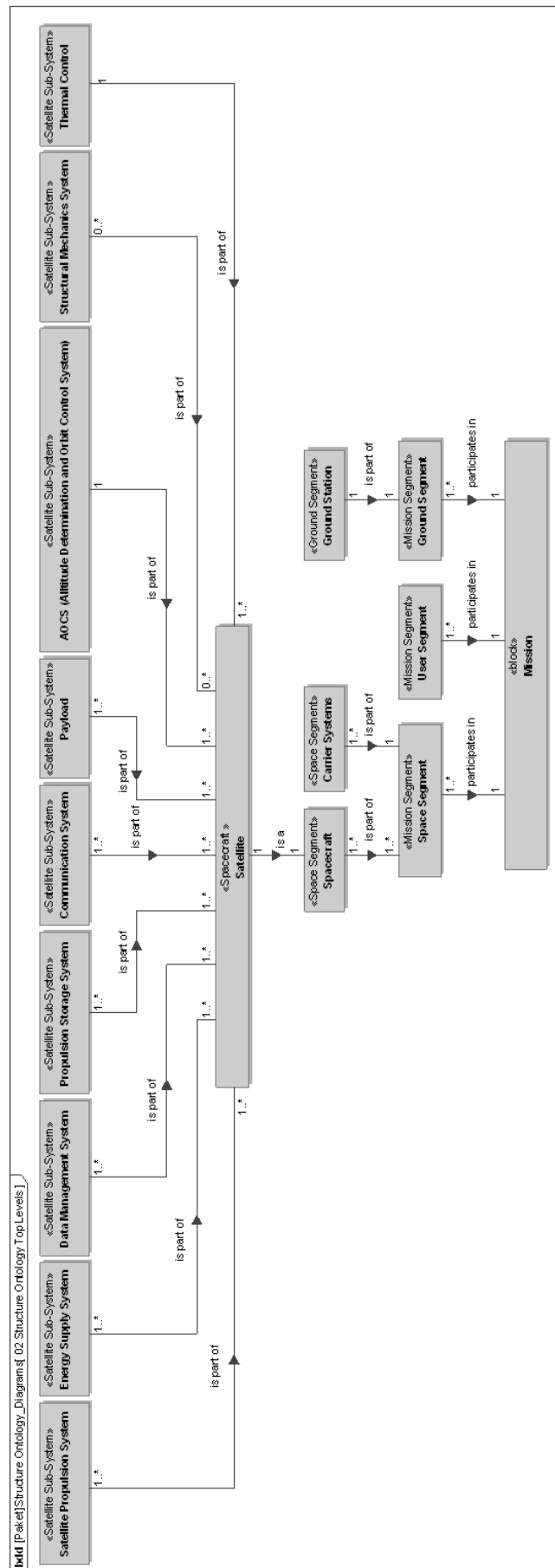


Abbildung 5-10: Die obersten Ebenen der Structure Ontology in SysML i.A. an (Gadzo und Koch, 2025)

Die vollständige Ontologie erstreckt sich bis zur Komponentenebene von Satellitenprojekten, wobei eine detaillierte Darstellung der einzelnen Segmente im Anhang A-2 dokumentiert ist. Die Elementbibliothek fungiert als Repository für alle in der Structure Ontology definierten Konzepte und stellt den Modellierern die relevanten domänenspezifischen Elemente zur Verfügung. Informationen über deren Beziehungen sind über die Ontologien abrufbar, was eine kohärente und fundierte Modellierung ermöglicht und den manuellen Aufwand bei der Modellerstellung reduziert. Auf das Konzept der Elementbibliothek wird im Kapitel 5.3.3 näher eingegangen. Die Structure Ontology trägt somit wesentlich zur Identifizierung und Minderung von Unsicherheiten bei, da der Modellierer unvollständige Informationen während der Modellkonstruktion erkennen kann. Dadurch werden unbekannte Unbekannte in definierte bekannte Unbekannte umgewandelt. Ein zentrales Element des ontologischen Konzepts ist das Profil der Methodik, welches die relevanten Stereotypen zur Modellierung enthält. In der Systemmodellierung dient ein Profil als Erweiterungsmechanismus zur Anpassung der Modellierungssprache an spezifische Domänen oder Anwendungsfälle, indem es als Container für Stereotypen fungiert (Friedenthal *et al.*, 2012, S. 346). Der Stereotyp ist dabei der primäre Mechanismus zur Erstellung von Profilen, die zur Erweiterung des Metamodells dienen. Er wird durch die Erweiterung einer Metaklasse definiert und anschließend auf die entsprechenden Modellelemente im Benutzermodell angewendet (OMG, 2019, S. 199). Das Profil der vorgestellten Methodik besteht hauptsächlich aus den zwei folgenden zwei Komponenten:

1. Ein umfassendes Profil für die Konzepte der Structure Ontology
2. Ein Profil für die Konzepte der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen der General Ontology

Neben dem Profil der Methodik gibt es ein zweites Profil, das auf den in ECSS-E-ST-10-06C (ECSS, 2009a) definierten Richtlinien basiert, die verschiedene Typen von Anforderungen sowie Anforderungen an die Anforderungsspezifikation selbst definieren. Durch den Einsatz des ECSS-Anforderung/Requirement-Profiles können Anforderungen ausschließlich unter Berücksichtigung dieser Richtlinien definiert werden, was einen Beitrag zur Reduzierung von Unsicherheiten bei der Anforderungsdefinition leisten soll.

Das Profil der Structure Ontology enthält dieselben Elemente wie die Structure Ontology selbst. Hierdurch stehen alle Konzepte der Ontologie dem Modellierungsteam als Stereotypen zur Verfügung. Das Modellierungsteam kann beim Modellaufbau je nach Bedarf Instanzen der verfügbaren Stereotypen erstellen. Typischerweise entscheidet das Modellierungsteam, ob ein Stereotyp eingesetzt wird oder nicht. Das Profilentwicklungsteam hingegen hat das Ziel, dass auf jedes Modellelement einer bestimmten Metaklasse ein Stereotyp angewendet wird (Friedenthal *et al.*, 2012, S. 345).

Das Profil enthält zudem für alle definierten Stereotypen die entsprechenden Attribute. Diese werden im Profil über die SysML-Beziehung *Generalization* von übergeordneten Elementen an untergeordnete Elemente vererbt. Anhand dieser Attribute kann das Modellierungsteam feststellen, ob in den vorhandenen Daten und Informationen alle relevanten Aspekte definiert bzw. berücksichtigt sind. Die spezifische Definition der Werte und der dazugehörigen Einheiten erfolgt durch das Modellierungsteam und kann somit projektspezifisch festgelegt werden. In Abbildung 5-12 sind die jeweiligen Attribute der dargestellten Stereotypen erkennbar. Die Beziehung zwischen der Structure Ontology und dem Structure Profile sowie die Interaktion ihrer Elemente lässt sich formal durch die folgende Gleichung (1) ausdrücken:

$$P_{struct} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\} \text{ mit } S_i \in O_{struct}, \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (1)$$

Hierbei repräsentiert P_{struct} das Structure Profile, S_i die einzelnen Stereotypen und O_{struct} die Menge aller Elemente der Structure Ontology. Abbildung 5-12 visualisiert den übergeordneten Top-Level-Bereich des Structure Profils, während Abbildung 5-11 das Zusammenspiel von Structure Ontology und Structure Profile veranschaulicht und darauf eingeht, wie die Elemente zueinander in Beziehung stehen. Das Profildiagramm in Abbildung 5-12 stellt die hierarchische Struktur für die Modellierung von Satellitensystemen dar.

Es basiert auf dem grundlegenden Stereotyp «Block», von dem alle weiteren Stereotypen abgeleitet sind. Die Hauptkategorien umfassen «Spacecraft», «Carrier System» und «Spacecraft Mission», wobei jede dieser Kategorien weiter untergliedert ist. Der «Spacecraft»-Stereotyp wird in «Satellite» und anschließend in «Satellite Sub-System» spezialisiert. Dabei werden spezifische Attribute wie Orbithöhe, Betriebslebensdauer, Größe und Masse definiert. Die Missionsstruktur wird durch den «Spacecraft Mission»-Stereotyp repräsentiert, der sich in verschiedene Segmente wie Raum-, Nutzer- und Bodensegment aufteilt. Besondere Aufmerksamkeit wird den Satellitensubsystemen gewidmet. Das Profil definiert eine Reihe von spezifischen Subsystemen, darunter Datenmanagement, Kommunikation, Antrieb, Strukturmechanik, Thermalkontrolle, Nutzlast, Energieversorgung und Lageregelung. Jedes dieser Subsysteme ist als eigenständiger Stereotyp dargestellt und kann spezifische Attribute aufweisen. Beispielsweise enthält das Satellitenantriebssystem Attribute wie Durchflussrate, Leistungsaufnahme und spezifischer Impuls. Die Vererbungsbeziehungen zwischen den Stereotypen sind durch Pfeile gekennzeichnet, was die hierarchische Struktur des Profils verdeutlicht. Die vorgestellte Struktur ermöglicht eine modulare Herangehensweise an die Satellitenmodellierung, indem sie definierte Subsysteme und Segmente bereitstellt. Diese formale Darstellung des ontologischen Konzepts und seiner Profile zielt darauf ab, eine hinreichende Grundlage für die weitere Ausarbeitung und Anwendung in der Systemmodellierung zur Verfügung zu stellen. Die Integration von standardisierten Richtlinien wie ECSS-E-ST-10-06C in Verbindung mit den flexiblen Erweiterungsmöglichkeiten durch SysML-Profile soll zur präzisen und domänenspezifischen Modellierung beitragen. Die detaillierte Darstellung des gesamten Profils ist im Anhang A-3 dokumentiert.

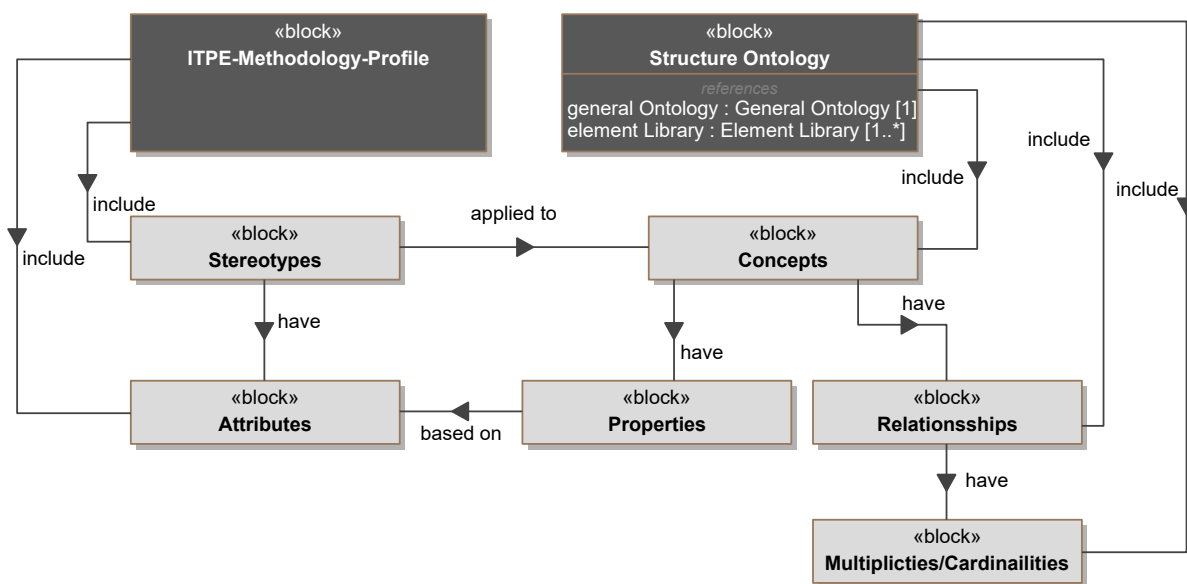


Abbildung 5-11: Zusammenwirken von Profil und Structure Ontology

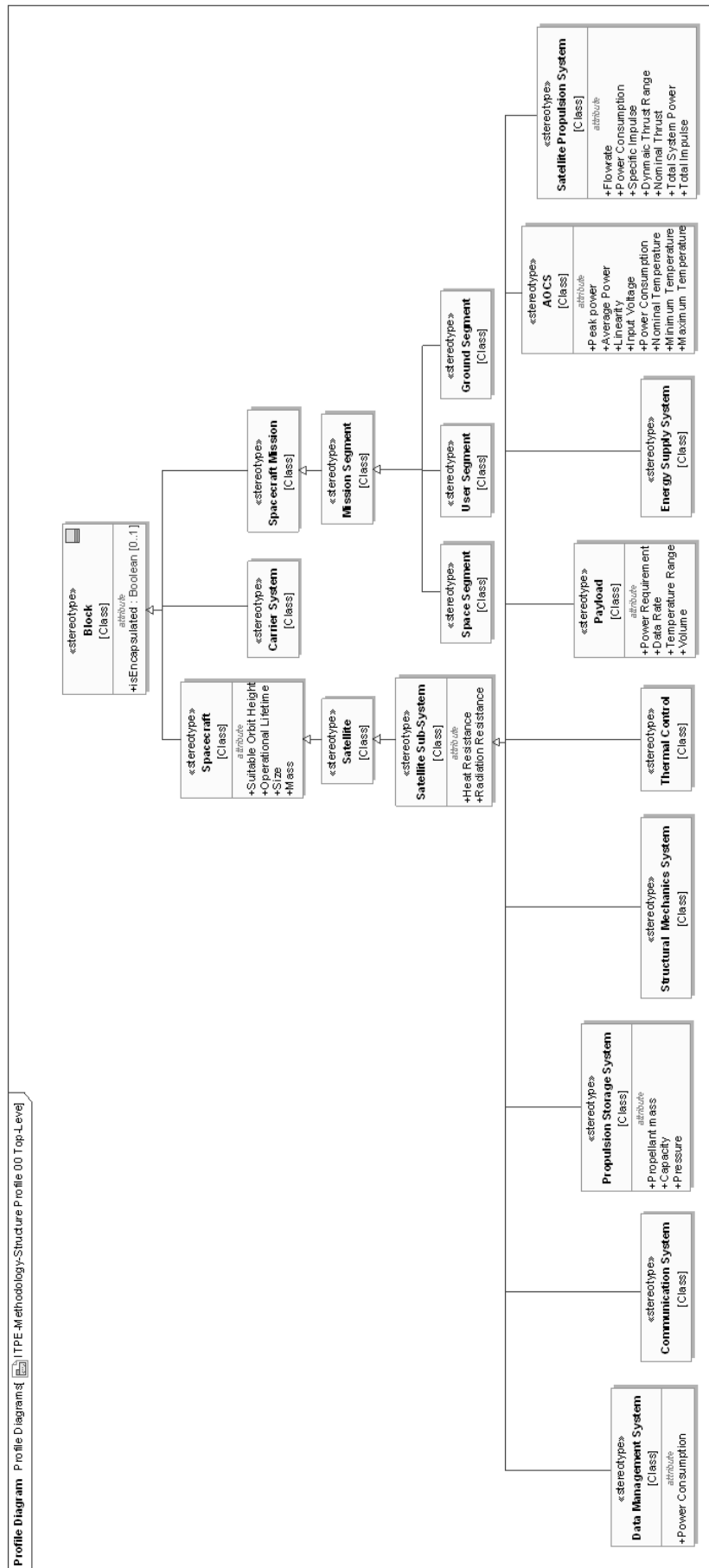


Abbildung 5-12: Structure Profile Top-Level

Die Unsicherheits-Ontologie, im Folgenden als Uncertainty Ontology bezeichnet, bildet den letzten Baustein des ontologischen Konzepts. Sie ermöglicht es, die identifizierten Unsicherheiten zu kategorisieren und systematisch im weiteren Entwicklungsprozess zu berücksichtigen. Abbildung 5-13 veranschaulicht die Struktur der Uncertainty Ontology und zeigt die im Rahmen der Methodik berücksichtigten Unsicherheitskonzepte. Um den Einsatz bei der Modellerstellung eindeutig zu gestalten, wurde für diese Konzepte ebenfalls ein Profil mit entsprechenden Stereotypen erstellt. Dies gewährleistet eine konsistente und präzise Anwendung der Unsicherheitskonzepte im Modellierungsprozess. Die theoretische Grundlage der Uncertainty Ontology basiert auf den Arbeiten von (Paetzold, 2022) und (Clarkson und Eckert, 2005), die in Kapitel 3.1 ausführlich beschrieben sind.

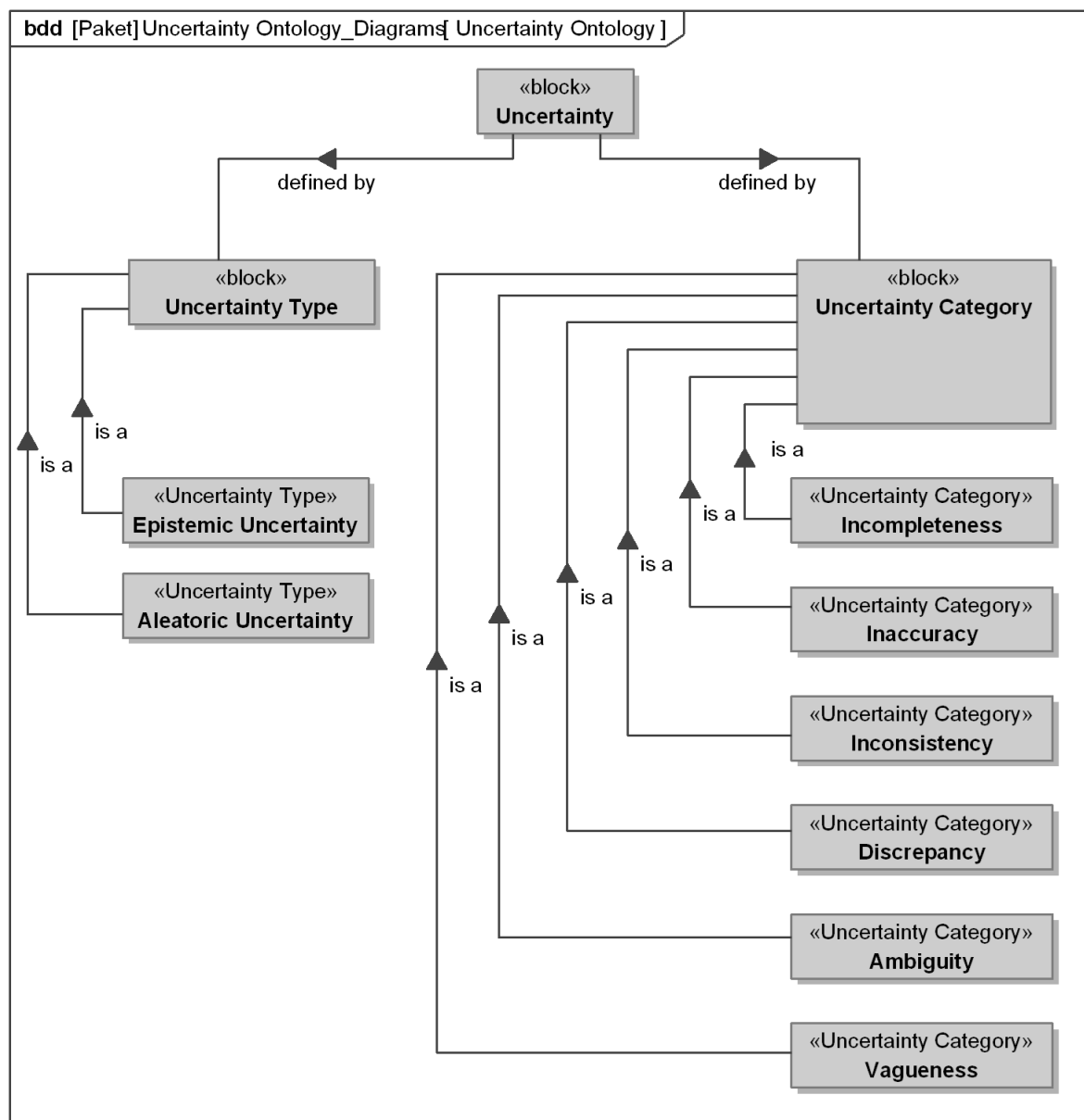


Abbildung 5-13: Die Uncertainty Ontology i.A. an (Gadzo und Koch, 2025)

Im Folgenden werden die sechs Unsicherheitskategorien aus einer anwendungsorientierten Perspektive erläutert. Jede Kategorie wird kurz beschrieben und durch ein anschauliches Beispiel ergänzt, um ein tiefgreifendes Verständnis der betrachteten Unsicherheiten zu ermöglichen:

1. **Unvollständigkeit/Incompleteness:** Unvollständigkeit bezieht sich auf fehlende Informationen oder Lücken in den dokumentierten Daten und Informationen, die für ein vollständiges Verständnis oder eine korrekte Implementierung erforderlich wären.
Beispiel: Ein fehlendes Attribut eines Systemelementes kann als Unvollständigkeit verstanden werden, ebenso wie eine unvollständige Operationsbeschreibung oder lückenhafte Schnittstellendefinitionen, bei denen Schnittstellenflüsse nicht vollständig definiert sind.
2. **Ungenauigkeit/Inaccuracy:** Ungenauigkeit bezieht sich auf Informationen in Dokumenten und anderen Informationsquellen, die zwar vorhanden sind, jedoch nicht präzise genug oder möglicherweise fehlerhaft sind. Dies kann zu Abweichungen zwischen Dokumentation und Realität führen.
Beispiel: In einer Anforderung oder einem Spezifikationsdokument ist die Leistung einer Komponente mit „ca. 10 W“ angegeben, was einer ungenauen Definition entspricht.
3. **Inkonsistenz/Inconsistency:** Inkonsistenz tritt auf, wenn beispielsweise innerhalb eines Dokuments oder zwischen verschiedenen Dokumenten widersprüchliche Informationen vorliegen.
Beispiel: Die Leistungsangabe einer Komponente ist mit 10 W in einem Spezifikationsdokument definiert, während die Verbrauchsangabe derselben Komponente in einer anderen Informationsquelle mit 8 W angegeben ist.
Weiteres Beispiel: Die inkonsistente Verwendung von Einheiten, wie z.B. [°C] in einer Informationsquelle und [K] in einem anderen für denselben Parameter.
4. **Diskrepanz/Discrepancy:** Diskrepanz bezieht sich auf Unterschiede zwischen dokumentierten Informationen und der tatsächlichen Realität, die durch empirische Beobachtungen oder Tests festgestellt werden.
Beispiel: In der technischen Dokumentation wird die maximale Betriebstemperatur einer Komponente mit 320 K angegeben, während experimentelle Untersuchungen zeigen, dass die Komponente bereits bei 300 K Probleme entwickelt.
5. **Mehrdeutigkeit/Ambiguity:** Mehrdeutigkeit tritt auf, wenn ein Begriff oder eine Aussage in einer Informationsquelle mehrere plausible Interpretationen zulässt, was zu Missverständnissen und Fehlinterpretationen führen kann.
Beispiel: In einer Anforderung ist folgender Satz dokumentiert: " Die Software muss mit der neuesten Version kompatibel sein." Hierbei bleibt unklar, ob die neueste Version der Software selbst oder eines anderen Systems gemeint ist.
Weiteres Beispiel: In einer Anforderung ist folgender Satz dokumentiert "Das Gerät soll leicht sein." Der Begriff "leicht" könnte sich sowohl auf das Gewicht oder die Bedienbarkeit der Komponente beziehen.
6. **Vagheit/Vagueness:** Vagheit bezieht sich auf Informationen und Begrifflichkeiten in Dokumenten, denen keine präzise Definition zugrunde liegt. Dies resultiert in einer ungenauen Informationsextraktion, was unterschiedliche Interpretationen der Information begünstigt.
Beispiel: Die Verwendung von Begriffen wie "aktuell", "ausreichend", "angemessen" oder "zeitnah" in technischen Spezifikationen ohne weitere Quantifizierung oder Kontextdefinition.

Die beschriebenen Kategorien decken ein breites Spektrum möglicher Unsicherheiten in Daten und Informationen ab, die in der Produktentwicklung und vor allem bei der Entwicklung komplexer Systeme, wie es Satellitenmissionen sind, auftreten können. Sie ermöglichen eine präzise Unterscheidung zwischen verschiedenen Arten von Unsicherheiten. Dies spielt eine wichtige Rolle, da jede Art von Unsicherheit unterschiedliche Herangehensweisen zu ihrer Bewältigung

erfordert. Die klare Kategorisierung kann zudem die Kommunikation über Unsicherheiten in interdisziplinären Teams, wie sie typischerweise in Satellitenentwicklungsprojekten vorkommen, erleichtern. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Unsicherheitskategorien nicht immer trennscharf sind und in der Praxis oft gleichzeitig oder in Kombination auftreten können.

5.3.3 Konzept der Element-Bibliothek

Das Konzept der Element-Bibliothek stellt im Rahmen der Methodik ein Werkzeug zur Unterstützung der Modellierungstätigkeiten im Rahmen der Identifizierung und Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen dar. In ihrer Rolle als Werkzeug stellt sie, wie in Abbildung 2-6 (Kapitel 2.2) dargestellt, ein konstitutives Element der Methodik dar, das vor allem in der praktischen Anwendung eine wichtige Unterstützung darstellt. Der primäre Nutzen dieser Bibliothek besteht darin, zur Qualität des aufzubauenden Modells einen positiven Beitrag zu leisten und zu einer effizienten Modellierung beizutragen. In diesem Zusammenhang zielt die Elementbibliothek darauf ab, Unsicherheiten bei der Modellbildung zu reduzieren und dadurch die Entstehung von Fehlern im Modell zu verringern. Des Weiteren soll durch die Verfügbarkeit der Elementbibliothek der Modellaufbau erleichtert werden, wodurch es dem Modellierungsteam ermöglicht wird, den Fokus auf die SysML-basierte Umsetzung der notwendigen Aktivitäten zu legen. Die Elementbibliothek folgt einer Kategorisierung der Elemente, die jeweils eine hierarchische Struktur besitzen, was eine vereinfachte Navigation innerhalb der Elementbibliothek gewährleisten soll. Abbildung 5-14 zeigt den schematischen Aufbau der Bibliothek. Wie in der Abbildung ersichtlich, besitzt die Bibliothek sechs übergeordnete Kategorien: Verhaltenselemente, Schnittstellenelemente, Anforderungen, Strukturelemente, Unsicherheitselemente und Flusselemente. Die Tiefe der jeweiligen hierarchischen Struktur hängt dabei vom Umfang der jeweiligen Kategorie ab. Die Verhaltenskategorie gliedert sich in vier Subkategorien: standardisierte Aktivitäten, spezifische Aktivitäten, standardisierte elementare Aktionen (wie beispielsweise "Turn On" und "Turn Off") sowie systemspezifische Aktionen. Die standardisierten und spezifischen Aktivitäten setzen sich aus mehreren elementaren Aktionen zusammen. Alle vier Subkategorien können vom Modellierer zur Wiederverwendung bei der Modellerstellung herangezogen werden. Die Kategorie der Flusselemente ist untergliedert in Datenflüsse, physische Flüsse und Signalflüsse. Zur Modellierung von Schnittstellen bietet die Bibliothek – analog zur General Ontology – die drei Subkategorien: funktionale Schnittstellen, logische Schnittstellen und physische Schnittstellen. In jeder Subkategorie steht dem Modellierer bzw. dem Modellierungsteam ein Diagramm und eine entsprechende Schnittstellen-Block-Vorlage zur Verfügung. Im Diagramm können die Schnittstellenelemente der jeweiligen Typen erstellt und strukturiert werden. Durch die visuelle Darstellung in einem Diagramm wird vor allem beim Modellaufbau durch ein Modellierungsteam ein Beitrag zur Reduktion der Generierung von doppelten Elementen und Inkonsistenzen geleistet. Die Subkategorie der Anforderungen besteht aus den zwei untergeordneten Subkategorien: *Template Repository* (Vorlagen-Ablageort) und *Modelling Repository* (Modellierungs-Ablageort). Dieses Konzept ist ein Kernkonzept der Bibliothek, das vor allem bei den Strukturelementen zum Einsatz kommt. Der Ansatz besteht darin, in der Template Repository dem Modellierungsteam alle Elemente aus der Ontologie mit der korrekten Stereotypisierung zur Verfügung zu stellen. Diese Elemente können dann bedarfsgesteuert in die Modelling Repository kopiert werden und im Modell eingesetzt werden. Damit ist das Modelling Repository der Arbeitsbereich, in welchem sich die Elemente zur Modellerstellung befinden. Das Template Repository dient als Vorlagenquelle, durch welche dem Modellierer alle relevanten Konzepte aus der Ontologie mit der korrekten Stereotypenzuweisung zur Verfügung

stehen. Die Kategorie der Anforderungen stellt zudem dem Modellierer Werkzeuge in Form von sogenannten Importkarten und einer entsprechenden Ordnerstruktur zur Verfügung, um Anforderungen automatisiert aus tabellarischen Dokumenten für die Analyse in das Modell zu importieren.

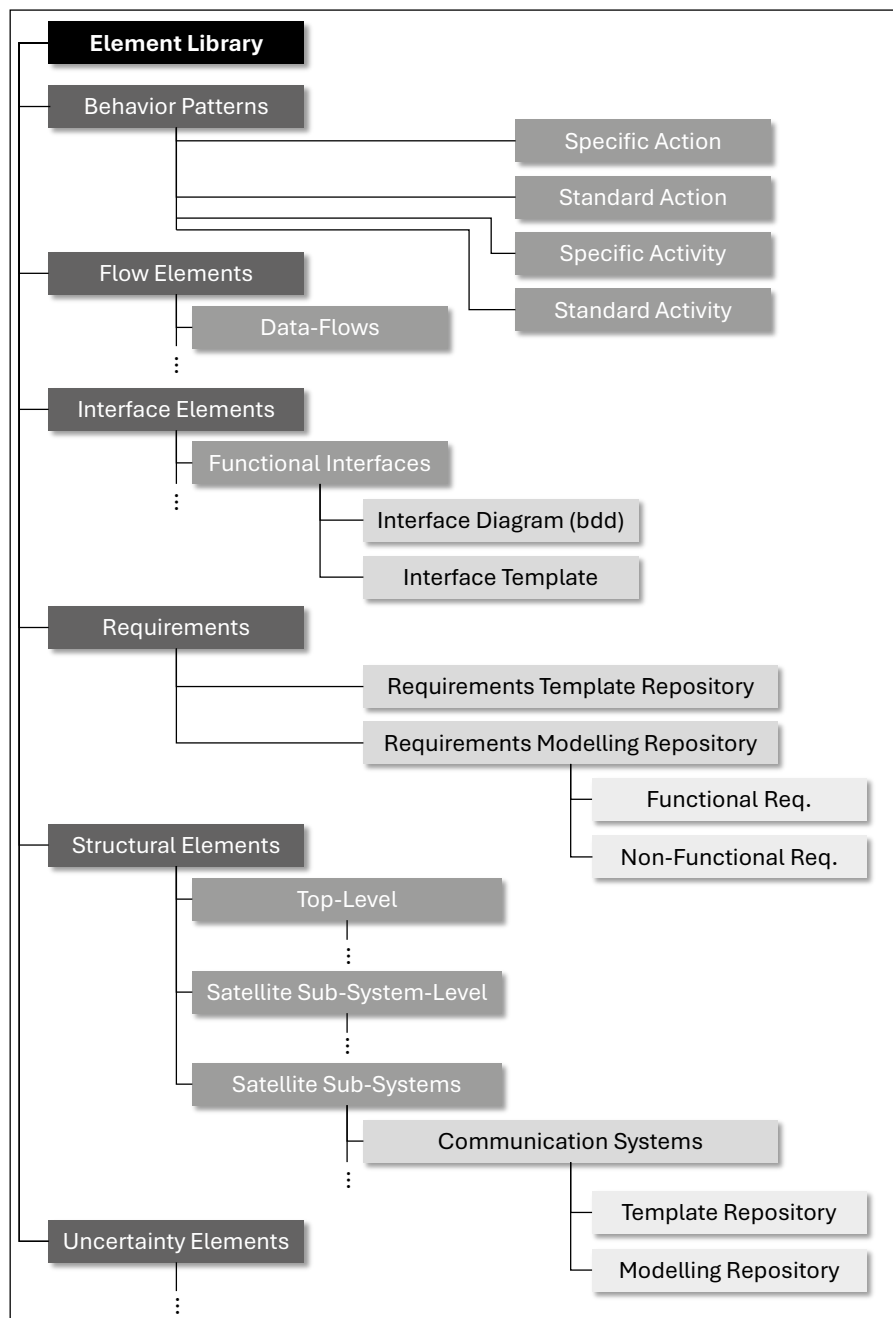


Abbildung 5-14: Schematische Teildarstellung des Aufbaus der Element-Bibliothek

Die umfangreichste Kategorie ist die Kategorie der Strukturelemente, die in ihrer obersten Ebene in Top-Level-Elemente, Satelliten-Subsystem-Elemente und die Kategorie der Satelliten-Subsysteme selbst unterteilt ist. Die Satelliten-Subsystem-Kategorie spiegelt die Structure Ontology bis zur untersten Ebene wider. Dadurch stehen auf allen Systemebenen bereits vorstrukturierte Modellierungs-Repositoryn und Vorlagen zur Verfügung. Schließlich ist es dem Modellierungsteam möglich, in den Modellierungs-Repositoryn spezifische Elemente zu definieren, wodurch dem Modellierungsteam Flexibilität gewährleistet werden soll.

5.3.4 Bewertung des ontologischen Konzeptes

Analog zur Bewertung des DT-MBSE Integrationsmodells in Kapitel 5.2.5 wird an dieser Stelle eine theoretische Diskussion des entwickelten Methodik-Bausteins 3 durchgeführt, die der praxisbezogenen Validierung im Rahmen der Gesamtmethodik vorausgeht. Für diese Bewertung und Diskussion werden die von (Staab und Studer, 2009) zusammengefassten Kriterien zur Evaluation von Ontologien herangezogen. Tabelle 5-4 zeigt eine Übersicht dieser Bewertungskriterien.

Tabelle 5-4 Qualitätskriterien für Ontologien nach (Staab und Studer, 2009, S. 294, ff.)

Nr.	Kriterium	Beschreibung
K1	Korrektheit	Die Korrektheit einer Ontologie bezieht sich auf die präzise und akkurate Repräsentation des Fachwissens sowie relevanter Aspekte der realen Welt innerhalb des definierten Domänenbereichs.
K2	Anpassungsfähigkeit	Die Anpassungsfähigkeit einer Ontologie beschreibt ihre Fähigkeit, flexibel auf zukünftige Anforderungen zu reagieren, monotone Erweiterungen zu ermöglichen und robust gegenüber kleineren Änderungen zu sein, ohne die Integrität der bestehenden Struktur zu kompromittieren.
K3	Klarheit	Die Klarheit einer Ontologie manifestiert sich in der effektiven Kommunikation der intendierten Bedeutung definierter Begriffe durch objektive, kontextunabhängige und gut dokumentierte Definitionen, die die Verständlichkeit für Benutzer maximieren.
K4	Vollständigkeit	Die Vollständigkeit einer Ontologie wird durch ihre umfassende Abdeckung des Interessenbereichs, die Fähigkeit zur Beantwortung definierter Kompetenzfragen und die Einbeziehung aller relevanten Konzepte und deren lexikalischer Repräsentationen charakterisiert.
K5	Berechnungseffizienz	Die Berechnungseffizienz einer Ontologie bemisst sich an der Leichtigkeit und Geschwindigkeit, mit der Reasoning-Systeme grundlegende Operationen wie Erfüllbarkeitsüberprüfungen, Instanz-Klassifikationen und Abfragen durchführen können.
K6	Prägnanz	Die Prägnanz einer Ontologie zeigt sich in der Vermeidung irrelevanter oder redundanter Axiome, der Einhaltung minimaler ontologischer Verpflichtungen und der Spezifikation der schwächstmöglichen Theorie unter Berücksichtigung nur essenzieller Begriffe.
K7	Konsistenz	Die Konsistenz einer Ontologie umfasst sowohl die logische Widerspruchsfreiheit ihrer Axiome als auch die Übereinstimmung zwischen formaler Spezifikation und informeller Dokumentation, bei minimaler Verzerrung durch Kodierungsaspekte.
K8	Organisatorische Eignung	Die organisatorische Eignung einer Ontologie bemisst sich an ihrer Implementierbarkeit innerhalb einer Organisation, ihrer Kompatibilität mit bestehenden Werkzeugen und Ontologien, der Einhaltung relevanter Verfahren und rechtlicher Anforderungen sowie ihrer Zugänglichkeit und Akzeptanz bei potenziellen Interessengruppen.

- K1 – Korrektheit: Die Entwicklung der Methodik basiert auf einer systematischen Literaturrecherche und einer methodisch fundierten Auswahl etablierter Quellen als Entwicklungsgrundlage. Der Wissenserwerb für die Strukturontologie wurde durch die Integration weiterer anerkannter Literaturquellen und anschließender Verfeinerung durch Expertenwissen realisiert. Das gesamte Entwicklungsvorgehen folgte einem stringenten methodischen Ansatz, was zur Korrektheit der Ontologie beiträgt.
- K2 – Anpassungsfähigkeit: Der modulare Aufbau der Ontologie, wie in Kapitel 5.3.2 erläutert, ermöglicht sowohl grundlegende Umgestaltungen einzelner Module ohne tiefgreifende Auswirkungen auf das Gesamtkonzept als auch die flexible Anwendung in anderen Domänen. Die klare Struktur des ontologischen Konzepts erleichtert kleinere Anpassungen und deren transparente Zuordnung zu spezifischen Modulen oder Sektionen.
- K3 – Klarheit: Das ontologische Konzept umfasst ein detailliertes Profil sowie ein Glossar mit präzisen Definitionen aller relevanten Begrifflichkeiten. Dies fördert die Verständlichkeit und reduziert potenzielle Mehrdeutigkeiten für die Anwender.
- K4 – Vollständigkeit: Die methodisch geleitete Entwicklung unter Einbeziehung etablierter Literaturquellen und Expertenbeurteilungen trägt zur umfassenden Abdeckung des Interessensbereichs bei. Es wird jedoch anerkannt, dass insbesondere die Structure Ontology und die Uncertainty Ontology Erweiterungspotenzial aufweisen, welches im Zuge des fortlaufenden Methodik-Einsatzes realisiert werden kann.
- K5 – Berechnungseffizienz: Dieses Kriterium, primär für maschinenlesbare Ontologien konzipiert, ist für die vorliegende SysML-basierte Ontologie von untergeordneter Bedeutung. Der Fokus liegt hier auf der Unterstützung menschlicher Entwickler beim Aufbau von Systemmodellen, wodurch klassische Berechnungseffizienz Aspekte in den Hintergrund treten.
- K6 – Prägnanz: Das ontologische Konzept konzentriert sich auf die essenziellen Konzepte und Beziehungen im Kontext der Satellitensystementwicklung, der Unsicherheiten in Daten und Informationen sowie des modellbasierten Systems Engineering. Durch iterative Entwicklung und Experteneinbindung wurde die Aufnahme irrelevanter Elemente vermieden. Die Balance zwischen Vollständigkeit (K4) und Prägnanz wurde unter Berücksichtigung der von (Staab und Studer, 2009, S.295) erwähnten potenziellen Widersprüchlichkeit angestrebt.
- K7 – Konsistenz: Trotz fehlender automatisierter Konsistenzprüfungen in SysML wurde durch manuelle Überprüfungen und Expertenreviews die Konsistenz der Ontologie, einschließlich des Profils und der zugehörigen Stereotypen, sichergestellt. Die Verwendung von SysML ermöglicht eine direkte Repräsentation in der Sprache der Systemmodellierung, was potenzielle Kodierungsverzerrungen minimiert.
- K8 – Organisatorische Eignung: Das ontologische Konzept verwendet etablierte Ontologien wie die Space Object Ontology (SOO) von (Alexander P. Cox *et al.*, 2016) und die MBSE Ontology von (Holt und Perry, 2019) als Entwicklungsgrundlage, was die Anschlussfähigkeit an bestehende Wissensstrukturen in der Raumfahrtindustrie fördert. Die Verwendung von SysML erleichtert die Integration in etablierte Entwicklungswerkzeuge und Modellierungsprozesse. Die integrierte Elementbibliothek erhöht die praktische Anwendbarkeit und unterstützt eine konsistente Modellierung. Bezüglich rechtlicher Anforderungen und spezifischer Verfahren ist

anzumerken, dass diese im Rahmen der Ontologieentwicklung nicht explizit adressiert wurden. Die Ontologie fokussiert primär auf technische und organisatorische Aspekte sowie praktische Anwendbarkeit in der Satellitensystementwicklung. Für eine kommerzielle Anwendung oder Integration in hochregulierte Umgebungen wären weitere Schritte zur Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung an spezifische rechtliche und prozedurale Anforderungen erforderlich, was einen wichtigen Aspekt für zukünftige Weiterentwicklungen darstellen könnte.

Die Analyse und Diskussion des ontologischen Konzepts anhand der in (Staab und Studer, 2009) dokumentierten Kriterien zeigt eine überwiegend positive Erfüllung. Insbesondere in den Bereichen Korrektheit, Anpassungsfähigkeit, Klarheit und organisatorische Eignung werden die Anforderungen weitgehend erfüllt. Die methodisch fundierte Entwicklung und der modulare Aufbau leisten hierbei einen wesentlich Beitrag zur Qualität und Flexibilität. Die Prägnanz und Vollständigkeit wurden angemessen balanciert, wobei Erweiterungspotenziale, insbesondere in der Structure Ontology und Uncertainty Ontology, vorhanden sind. Die Verwendung von SysML erweist sich als vorteilhaft für die Integration in bestehende Entwicklungsprozesse, stellt jedoch Herausforderungen hinsichtlich automatisierter Konsistenzprüfungen dar. Da die Entwicklung und Validierung im akademischen Umfeld erfolgte, bieten Aspekte der rechtlichen und prozeduralen Anforderungen für hochregulierte Umgebungen Ansatzpunkte für zukünftige Weiterentwicklungen. Die Erfüllung wichtiger Aspekte wie Korrektheit, Vollständigkeit, Klarheit und Konsistenz durch das ontologische Konzept bildet eine essenzielle Grundlage zur Unterstützung der Wissensgenerierung. Dadurch leistet das Konzept einen signifikanten Beitrag zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage, die auf die Förderung der Wissensgenerierung im Entwicklungsprozess von Satellitenprojekten abzielt.

Es ist zu beachten, dass Ontologien oft eng mit spezifischen Anwendungen verknüpft sind und nicht isoliert betrachtet werden können, weswegen Benutzer in der Regel nicht direkt mit der Ontologie interagieren, sondern über eine Anwendung (Staab und Studer, 2009, S. 307). Daher ist es wichtig, die Ontologie im Kontext ihrer Anwendung zu evaluieren und als integralen Bestandteil des Gesamtsystems zu betrachten. Die hier durchgeführte theoretische Bewertung bildet eine wichtige Grundlage, muss jedoch durch eine praktische Validierung im Rahmen der Gesamtmethodik ergänzt werden. Diese Validierung wird in Kapitel 6 behandelt und wird die Effektivität und Praxistauglichkeit des ontologischen Konzepts in einem realen Anwendungsszenario der Satellitenentwicklung und als Bestandteil der aufgabenspezifischen Methodik untersuchen. Die für die Validierung der ITPE-Methodik herangezogenen Kriterien wurden in Kapitel 2.3 dargelegt und fokussieren in diesem Zusammenhang die drei Forschungsfragen dieser Arbeit.

5.4 Analysemethoden

„Wenn man die Daten lange genug quält, gestehen sie alles.“ (Ronald Coase)

Die Analysemethoden bilden, wie in Abbildung 5-1 dargestellt, den zweiten Baustein der Methodik und schließen die Beschreibung der aufgabenspezifischen Methodik ab. Die Methodik umfasst fünf distinkte Analysemethoden, die jeweils einen relevanten Analyse-Bereich adressieren. Diese Methoden repräsentieren durch ihre definierten Schritte und Aktivitäten die Mikroebene der Handlungen zur Anwendung der Methodik. Die Vorstellung der Analysemethoden erfolgt in sieben Unterkapiteln: Einer einleitenden Übersicht, gefolgt von fünf Unterkapiteln, die jeweils eine spezifische Analysemethode prägnant beschreiben. Die einleitende Übersicht erläutert unter anderem das Zusammenwirken der Methoden mit dem DT-MBSE Integrationsmodell und dem ontologischen Konzept, wodurch die Integration der verschiedenen Methodik-Bausteine verdeutlicht wird. Abschließend wird im siebten Unterkapitel der Ansatz zur Modellierung von Unsicherheiten vorgestellt.

5.4.1 Übersicht Modellierungsmethoden

Die fünf Analysemethoden fokussieren sich auf die systematische Untersuchung der Anforderungen, des Systemkontexts, des beschriebenen Verhaltens sowie auf die Durchführung einer Funktions- und Strukturanalyse. Prinzipiell erfolgt die Anwendung der Methoden sequenziell, wobei die Option besteht, die initialen beiden Analysemethoden – die Anforderungsanalyse und die Systemkontextanalyse – parallel zu implementieren, da erst ab der Verhaltensanalyse Erkenntnisse aus den vorhergehenden Analysen erforderlich sind. Die Analysemethoden dienen als methodische Leitlinien für die initiale Modellerstellung und die Transformation dokumentenbasierter Daten und Informationen in ein strukturiertes Modell. Ihre primäre Anwendung findet im linken Diamanten des DT-MBSE Integrationsmodells statt, wobei die einzelnen Phasen dieses Diamanten in die jeweiligen Analysemethoden integriert sind. Diese Integration ermöglicht eine kohärente Verbindung zwischen dem übergeordneten Prozessmodell und den spezifischen Analyseschritten. Abbildung 5-15 bietet eine schematische Übersicht über die Analysemethoden und visualisiert die empfohlene Reihenfolge ihrer Anwendung, während gleichzeitig die Möglichkeit des iterativen Einsatzes betont wird.

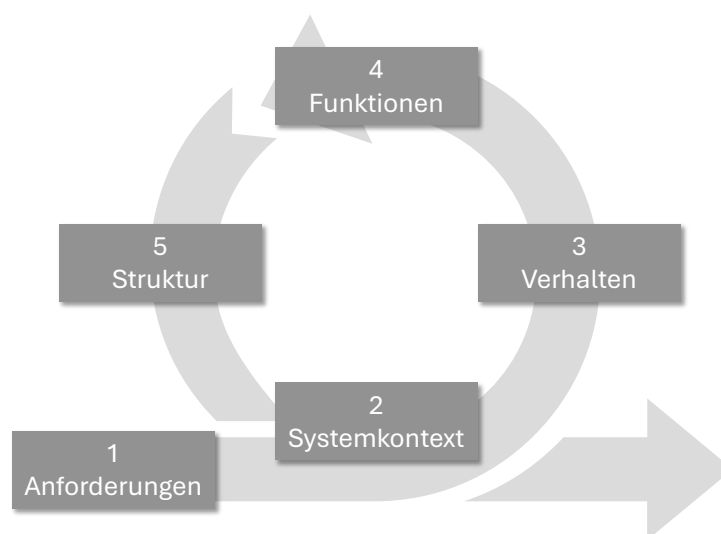


Abbildung 5-15: Übersicht über die Analysemethoden der ITPE-Methodik

Die systematische Verknüpfung der Analysemethoden und die Beziehungen zwischen den untersuchten Elementen sind in der General Ontology expliziert, die in Kapitel 5.3.2, Abbildung 5-8, detailliert dargestellt ist. Dabei umfasst die Requirements Section die Konzepte und Beziehungen der Anforderungsanalyse, die Behavior Section jene der Verhaltensanalyse und die System of Interest Section vornehmlich jene der Systemkontext- sowie Strukturanalyse.

Die Identifikation durch eine workshopartige Diskussion wird in den Methoden mittels eines sogenannten *Checkpoints* dokumentiert. In einem *Checkpoint* werden durch die Modellierung identifizierte Unsicherheiten mit dem SE-Team evaluiert und erörtert, was den zweiten und dritten Schritt des linken Diamanten umfasst. Abbildung 5-16 veranschaulicht diesen Zusammenhang. Die Entscheidung über die Frequenz und den Umfang dieser Checkpoints obliegt dem Modellierungs- und SE-Team, wobei sowohl regelmäßige Einzeldiskussionen als auch umfassendere Workshops möglich sind. Die konsensuell vereinbarten Erkenntnisse werden anschließend in das Modell übertragen, was dem vierten Schritt im DT-MBSE Integrationsmodell entspricht. Es ist hervorzuheben, dass, wie bereits in Abbildung 5-2 in Kapitel 5.2 dargestellt, domänenspezifische Entwickler in den Checkpoints bedarfsgesteuert beratend hinzugezogen werden können. Diese Option ermöglicht nicht nur die Integration fachspezifischer Expertise in den Prozess der Unsicherheitsidentifikation und -analyse, sondern bietet auch die Möglichkeit, identifizierte einfache Unsicherheiten direkt zu reduzieren.

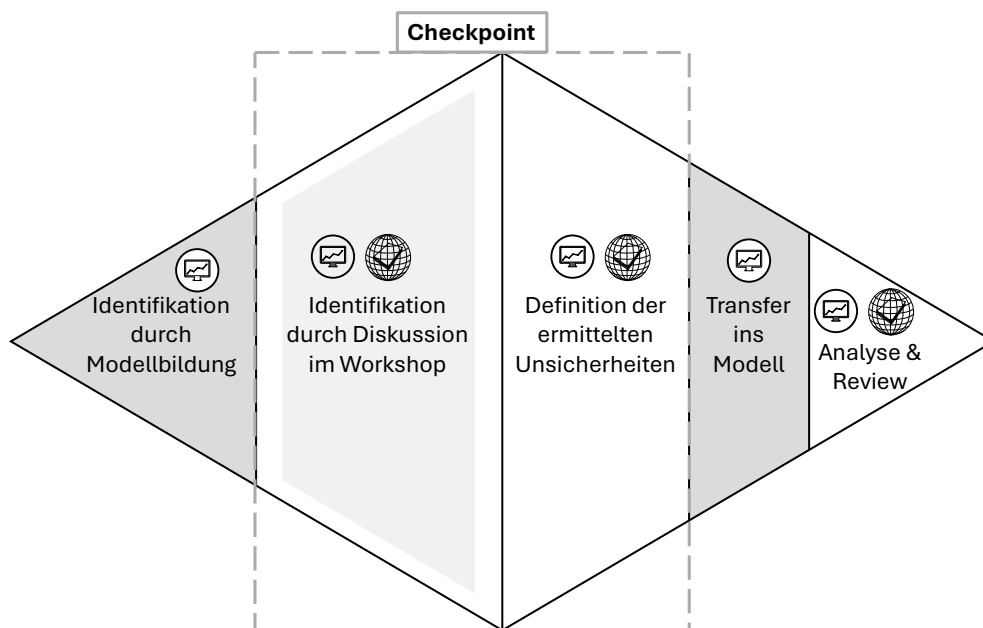


Abbildung 5-16: Zusammenhang zwischen Checkpoints und dem DT-MBSE Integrationsmodell

Nach Abschluss jeder einzelnen Analysemethode sowie nach Durchführung aller fünf Methoden ist ein finaler gemeinsamer Review durchzuführen, der dem fünften Schritt des linken Diamanten entspricht. Die Frequenz potenzieller Iterationen, die im DT-MBSE Integrationsmodell vorgesehen sind, wird ebenfalls vom Modellierungs- und SE-Team bestimmt. Im rechten Diamanten fokussieren sich die Modellierungsaktivitäten primär auf den Transfer von Erkenntnissen in das bestehende Modell sowie dessen Wartung, was fallspezifisch und ohne explizite methodische Anleitung erfolgt. Die für die jeweiligen Teammitglieder erforderlichen Kompetenzen sind im Kompetenzprofil der Methodik in Kapitel 5.2.2 definiert.

Das Zusammenspiel zwischen DT-MBSE Integrationsmodell und den fünf Analysemethoden ist flexibel konzipiert und bietet den Anwendern Gestaltungsspielraum bei der Umsetzung. Diese Flexibilität ermöglicht eine Anpassung der definierten Aktivitäten an unterschiedliche Projektanforderungen und Entwicklungsbedingungen. Hinsichtlich der Prozessabfolge stehen verschiedene Implementierungsoptionen zur Verfügung. Es ist möglich, für jede einzelne Analysemethode beide Diamanten sequenziell zu durchlaufen. Alternativ kann zunächst die Identifikation von Unsicherheiten in Daten und Informationen im Rahmen des linken Diamanten für alle Analysemethoden durchgeführt werden, bevor mit der Unsicherheitsreduzierung im rechten Diamanten begonnen wird. Ebenso ist ein hybrides Vorgehen realisierbar, das Elemente beider Ansätze kombiniert und situativ anpasst. Der Einsatz von Iterationen ist flexibel gestaltet und kann wie bereits beschrieben, sowohl innerhalb der einzelnen Schritte des DT-MBSE Integrationsmodells als auch methodenübergreifend erfolgen. Diese Flexibilität ermöglicht bedarfsgesteuerte Wiederholungen und Anpassungen, insbesondere wenn Erkenntnisse aus einer Analysemethode Auswirkungen auf andere Bereiche haben. Dadurch wird ein rekursiver Prozess unterstützt, der die Integration neuer Einsichten und Erkenntnisse in bereits durchgeführte Analysen erlaubt. Abbildung 5-17 verdeutlicht diesen adaptiven Ansatz und veranschaulicht das flexible Zusammenspiel zwischen dem DT-MBSE Integrationsmodell und den fünf Analysemethoden.

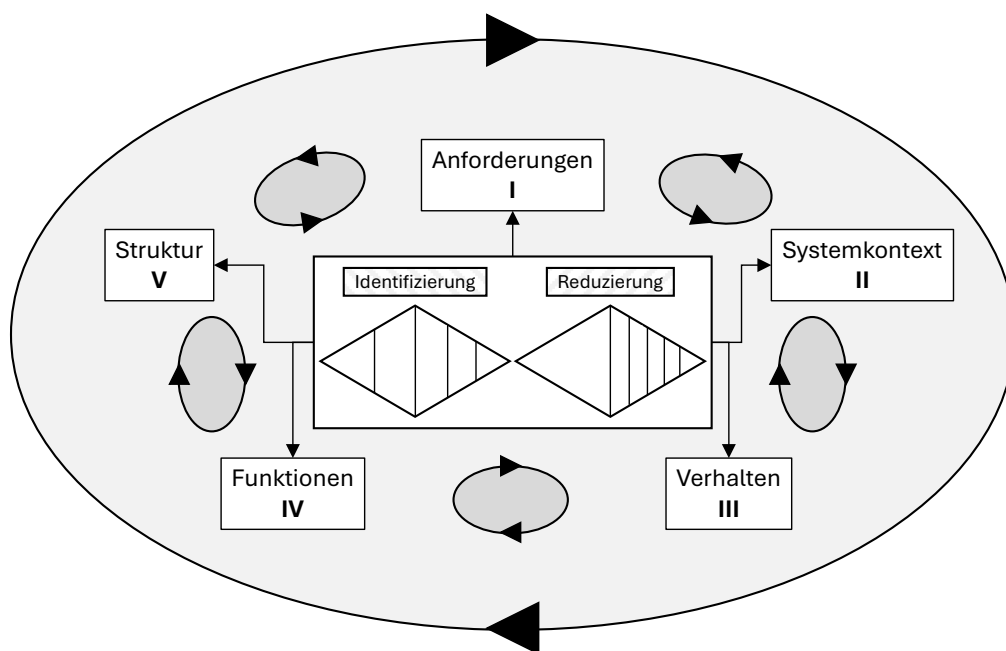


Abbildung 5-17: Zusammenspiel DT-MBSE Integrationsmodell und Analysemethoden, i.A. an (Gadzo et al., 2024, S. 2542)

Im Folgenden wird kurz auf die Umsetzung der übergeordneten Struktur der ITPE-Methodik im SysML-Tool eingegangen. Die Methodik gliedert sich in vier Hauptsektionen: die *Glossary Section*, die *Method Section*, die *Modelling Section* und die *Ontology Section*. Die *Glossary Section* dient als terminologische Referenz und enthält Definitionen aller relevanten Begriffe. Die *Method Section* umfasst detaillierte Anleitungen zur Umsetzung der fünf Analysemethoden und ist entsprechend in fünf Unterabschnitte gegliedert. In der *Ontology Section* sind die Ontologien und Profile der Methodik samt ihrer visuellen Repräsentationen sowie alle verwendeten Konzepte und Beziehungen strukturiert hinterlegt. Die *Modelling Section* fungiert als primärer Arbeitsbereich des Modellierungsteams. Sie beinhaltet für die Analyse von Unsicherheiten in Daten und Informationen

relevante SysML-Diagramme, die in den jeweiligen Ordnern der Analysemethoden abgelegt sind. Zusätzlich umfasst sie unterstützende Dokumente und Informationen, wie spezifische Literaturquellen, die als Hilfestellung bei der Analyse dienen. Ein integraler Bestandteil der Modelling Section ist die bereits vorgestellte *Element Library* bzw. Element-Bibliothek mit ihren Template- und Modelling-Repositories. Abbildung 5-18 bietet eine zusammenfassende Darstellung und Visualisierung dieser übergeordneten Struktur der ITPE-Methodik.

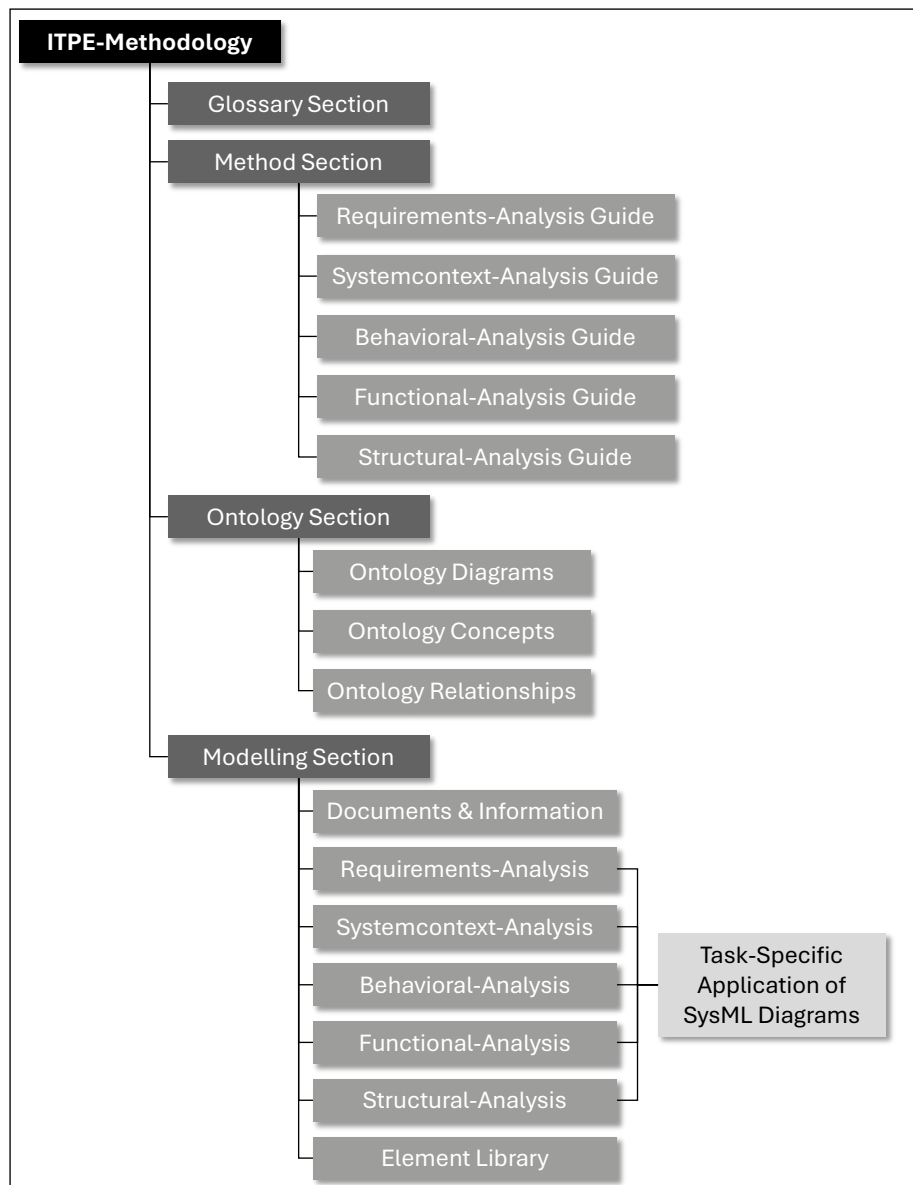


Abbildung 5-18: Übergeordnete Struktur der ITPE-Methodik - Schematische Darstellung der Umsetzung im SysML-Tool

Die Beschreibung der Analysemethoden folgt einem standardisierten Schema, das durch SysML-Aktivitätsdiagramme dargestellt wird. Diese Diagramme sind in sogenannte *Swimlanes* unterteilt, um verschiedene Aspekte und Akteure des Prozesses zu differenzieren. Diese Darstellungsweise umfasst mehrere Aspekte, die dem Modellierungsteam als Orientierung dienen: Erstens zeigt sie die Verfügbarkeit von Modellierungselementen aus der Modeling Section, einschließlich Elementvorlagen (Templates) und spezifischer Diagrammtypen, die für die jeweiligen Aktivitäten des Modellierungsteams relevant sind. Zweitens stellt sie dar, welche Informationen aus der

Ontologie und zusätzlichen Informationsquellen der Modeling Section dem Modellierungsteam für die jeweilige Aktivität zur Verfügung stehen. Drittens bilden die Aktivitätsdiagramme die Interaktion zwischen dem Modellierungsteam und dem SE-Team an definierten Checkpoints ab. Diese Darstellungsart visualisiert die Entscheidungspunkte und Verantwortlichkeiten im Analyseprozess. Die strukturierte und visuelle Darstellung zeigt den Ablauf der Analysemethoden, die Integration verschiedener Ressourcen und die Zusammenarbeit innerhalb der ITPE-Methodik auf. Abbildung 5-19 veranschaulicht prägnant die allgemeine Struktur der Aktivitätsdiagramme der Analysemethoden mit den Verantwortlichkeiten der verschiedenen Akteure und deren Interaktionen im Modellierungsprozess. Die Abbildung zeigt zudem, wie Checkpoints in den Analyseanleitungen allgemein dargestellt werden.

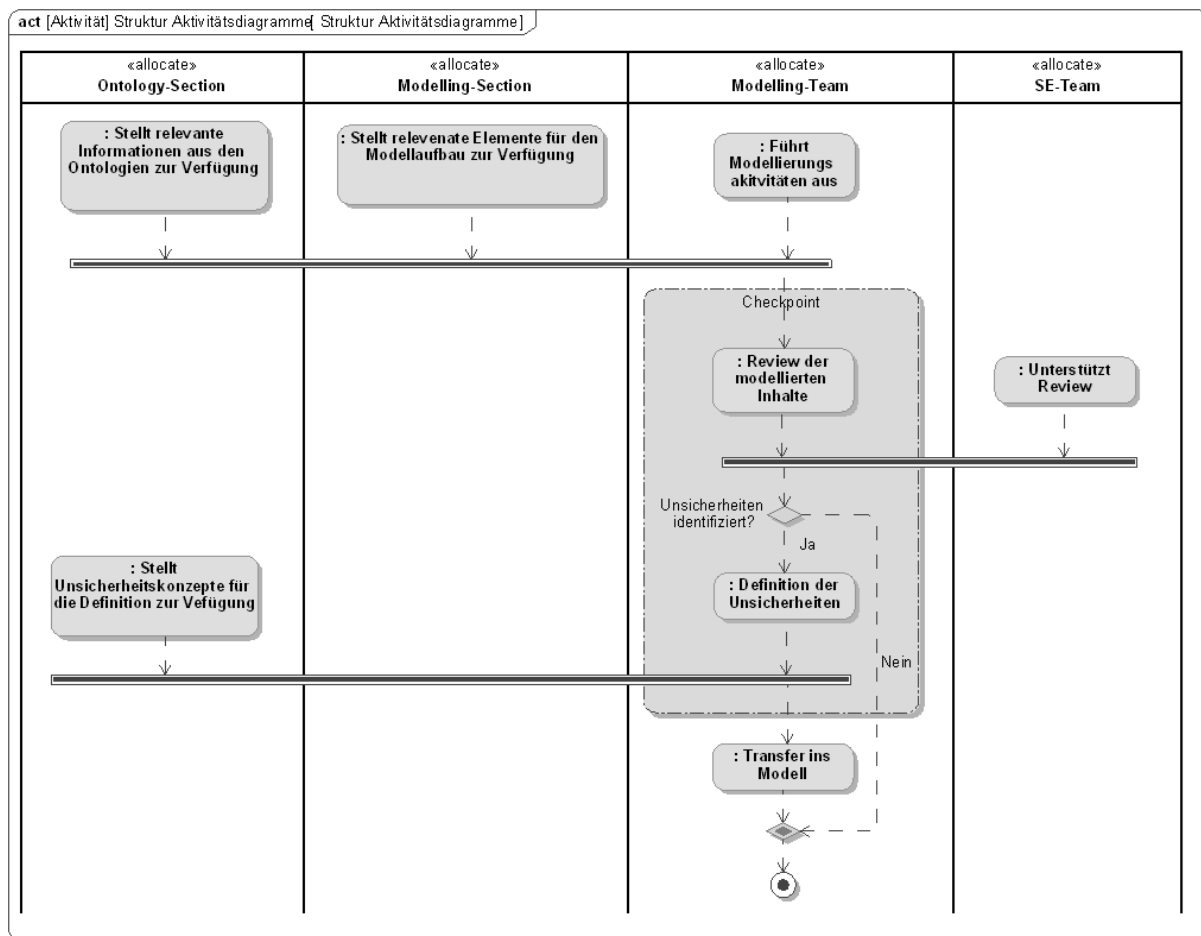


Abbildung 5-19: Allgemeine Struktur der Aktivitätsdiagramme der Analysemethoden

5.4.2 Methode zur Anforderungsanalyse

Die Anforderungsanalyse im Rahmen der ITPE-Methodik umfasst fünf zentrale Aktivitäten, die durch spezifische SysML-Werkzeuge unterstützt werden. Tabelle 5-5 gibt einen prägnanten Überblick über die Aktivitäten und die entsprechenden SysML-Werkzeuge. Bei diesen Werkzeugen handelt es sich hauptsächlich um SysML-Diagramme. Sie ermöglichen eine spezifische Sicht auf die Daten und Informationen und dienen in diesem Sinne als Hilfsmittel. Der Prozess beginnt mit der Vorbereitung und dem Import der dokumentenbasierten Anforderungen, wofür sogenannte Importkarten (*Importmap*) zum Einsatz kommen. Zunächst ist es notwendig, dass die dokumentenbasierten Anforderungen in tabellarischer Form als Excel/CSV-Datei zur Verfügung stehen.

Tabelle 5-5: Übersicht Aktivitäten und SysML-Werkzeuge in der Anforderungsanalyse

	Aktivität	SysML-Werkzeug	Typ
1	Vorbereitung & Import der dokumenten-basierten Anforderungen	<i>Importmap</i>	-
2	Sortierung in funktionale und nicht-funk-tionale Anforderungen	<i>Requirements-Table</i>	<i>table</i>
3	Modellierung der Beziehungen	<i>Requirements-Diagram</i> <i>Requirements-Relationship-Matrix</i>	<i>req</i> <i>matrix</i>
4	Review der Beziehungen & Eigenschaften		
5	Review der textuellen Inhalte		

In dieser Form kann mittels der Importkarten eine strukturierte Zuweisung und Überführung von bestehenden Daten und Informationen in die Modellierungsumgebung zu vordefinierten Eigenschaften im Anforderungsprofil der Methodik vorgenommen werden. Im zweiten Schritt erfolgt eine Sortierung der Anforderungen in funktionale und nicht-funktionale Kategorien unter Verwendung einer Anforderungstabelle (Requirements-Table). Diese Klassifizierung dient der Organisation der Anforderungen und ist für die spätere Verwendung der Anforderungen im Rahmen der Funktionsanalyse und der Strukturanalyse relevant. Die dritte Aktivität fokussiert sich auf die Modellierung der Beziehungen zwischen den Anforderungen. Hierfür werden zwei komplementäre SysML-Werkzeuge eingesetzt: das Anforderungsdiagramm (Requirements-Diagram) zur visuellen Darstellung der Beziehungen und die Anforderungs-Beziehungsmatrix (Requirements-Relationship-Matrix) für eine tabellarische Übersicht der Verknüpfungen. Diese beiden Sichten unterstützen die Analyse der Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen den Anforderungen. Die abschließenden zwei Schritte des Prozesses umfassen Review-Aktivitäten, die jeweils im Rahmen eines Checkpoints durchgeführt werden. Zunächst werden die modellierten Beziehungen und Eigenschaften der Anforderungen überprüft, gefolgt von einer Evaluation der textuellen Inhalte. Für die Analyse der textuellen Inhalte stehen entsprechende Literaturquellen zur Verfügung und können als Hilfsmittel herangezogen werden. Abbildung 5-20 veranschaulicht die Umsetzung der Werkzeugauswahl für die Anforderungsanalyse im Rahmen der ITPE-Methodik-Vorlage in SysML.

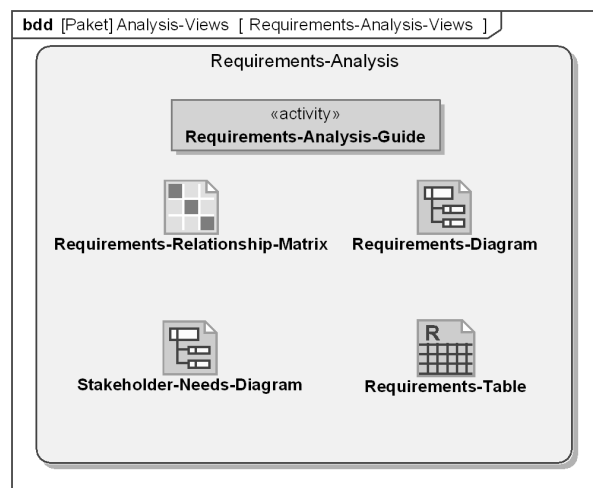


Abbildung 5-20: Werkzeugauswahl für die Anforderungsanalyse in SysML

Das in Abbildung 5-20 dargestellte Stakeholder-Bedürfnis-Diagramm (Stakeholder-Needs-Diagramm) bietet eine optionale zusätzliche Sicht. Insbesondere in frühen Phasen der Entwicklung kann dieses Diagramm herangezogen werden, um vage formulierte Kundenbedürfnisse zu modellieren und zu analysieren. Die Bedürfnisse werden hierbei als Anforderungen im Diagramm erfasst. Dadurch können Unsicherheiten in den Formulierungen frühzeitig expliziert und definiert werden, was eine systematische Berücksichtigung und Reduktion im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses ermöglicht. Die Entscheidung über den Einsatz dieses Diagramms obliegt dem Modellierungs- und SE-Team und hängt primär vom Reifegrad des Entwicklungsprojekts ab.

5.4.3 Methode zur Systemkontextanalyse

Die Systemkontextanalyse umfasst vier übergeordnete Modellierungsaktivitäten, denen jeweils eine Review-Aktivität folgt. Diese Aktivitäten werden durch fünf SysML-Diagrammtypen unterstützt. Tabelle 5-6 bietet eine Übersicht über die Aktivitäten und SysML-Werkzeuge in der Systemkontextanalyse.

Tabelle 5-6: Übersicht Aktivitäten und SysML-Werkzeuge in der Systemkontextanalyse

	Aktivität	SysML-Werkzeug	Typ
1	Vollständigkeitsanalyse der berücksichtigten Systemkontexte	<i>Systemcontext-Analysis-Content-Diagram</i> <i>Systemcontext-Structure-Diagram</i>	<i>pkg</i> <i>bdd</i>
2	Review Vollständigkeitsanalyse		
3	Vollständigkeitsanalyse der definierten Systemkontexte in Hinblick auf Systemkontextpartner	<i>Systemcontext-Structure-Diagram</i>	<i>bdd</i>
4	Review Systemkontextpartner-Analyse		
5	Analyse der Objektflüsse zwischen betrachteten System und Systemkontextpartnern	<i>Systemcontext-Analysis-Diagram</i>	<i>bdd</i>
6	Review Objektfluss-Analyse		
7	Schnittstellen Analyse System - Systemkontext	<i>Systemcontext-ibd</i> <i>Systemcontext-Interface-Definition</i>	<i>ibd</i> <i>bdd</i>
8	Review Schnittstellen-Analyse		

Der Prozess beginnt mit einer Vollständigkeitsanalyse der berücksichtigten Systemkontexte, bei der überprüft wird, ob alle relevanten Systemkontexte des betrachteten Systems einbezogen wurden. Da ein System häufig in mehreren Kontexten mit verschiedenen Partnern interagiert, ist es erforderlich, im Laufe seines Lebenszyklus unterschiedliche Kontexte zu berücksichtigen. Die ITPE-Methodik definiert standardmäßig sieben verschiedene Systemkontexte, die sich an den Lebenszyklusphasen eines Systems orientieren: Entwurf & Entwicklung (*Design & Development*), Produktion (*Production*), Start (*Launch*), Nutzung & Wartung (*Usage & Maintenance*) – welche die Inbetriebnahmephase (*Commissioning Phase*) und Betriebsphase (*Operational Phase*)

beinhaltet, Unterstützung (*Support*) und Entsorgung (*Disposal*). Diese Aufteilung ermöglicht eine umfassende Betrachtung des Systems von der anfänglichen Konzeption bis zur endgültigen Außerbetriebnahme. Die betrachteten Systemkontexte können im Inhaltsdiagramm der Systemkontextanalyse (*Systemcontext-Analysis-Content-Diagram*) angelegt und dokumentiert werden. Sie stehen dem Modellierungsteam als Ablageordner in der Methodik-Vorlage zur Verfügung und können für die entsprechenden Analysen der Systemkontextpartner und der Objektflüsse mit den dafür vorgesehenen SysML-Hilfsmitteln gefüllt werden. Die Definition der Systemkontexte basiert auf den Lebenszyklus Definitionen von INCOSE, welche in (Lindemann, 2016, S. 171) anschaulich beschrieben sind, sowie der NASA (National Aeronautics and Space Administration, 2016, S. 18). Für die Modellierung eines Systemkontextes steht das Systemkontext-Struktur-Diagramm (*Systemcontext-Structure-Diagram*) zur Verfügung.

Die zweite übergeordnete Modellierungsaktivität beinhaltet eine weitere Vollständigkeitsanalyse, diesmal fokussiert auf die definierten Systemkontexte in Hinblick auf Systemkontextpartner. Ziel ist es, sicherzustellen, dass alle relevanten Systemkontextpartner in den jeweiligen Systemkontexten berücksichtigt wurden, wozu wiederum das Systemkontext-Struktur-Diagramm eingesetzt wird. Es stellt eine deskriptive Sicht auf die Kontextpartner dar und dient im späteren Analyseverlauf als Grundlage für die Modellierung des Systemkontext-ibd-Diagramms (internes Blockdiagramm). Anschließend werden die Objektflüsse zwischen dem betrachteten System und den Systemkontextpartnern für alle identifizierten Systemkontexte analysiert. Hierfür kommt das Systemkontext-Analyse-Diagramm (*Systemcontext-Analysis-Diagram*) zum Einsatz.

Schließlich umfasst die letzte übergeordnete Modellierungsaktivität eine Schnittstellenanalyse zwischen betrachtetem System und seinen Systemkontexten, wofür das *Systemcontext-ibd* (internal block diagram) verwendet wird. Hierbei werden die dokumentenbasierten Daten und Informationen in Bezug auf die Schnittstellen analysiert und modelliert. Im ibd werden die Schnittstellen zwischen betrachtetem System und seinen Kontextpartnern dargestellt. Diese Schnittstellen werden zuvor im Systemkontext-Schnittstellendiagramm (*Systemcontext-Interface-Definition*) als Schnittstellenblöcke (Interfaceblocks) definiert und können somit systematisch im ibd angewendet werden. Abbildung 5-21 veranschaulicht die Umsetzung der Werkzeugauswahl für die Systemkontextanalyse im Rahmen der ITPE-Methodik-Vorlage in SysML.

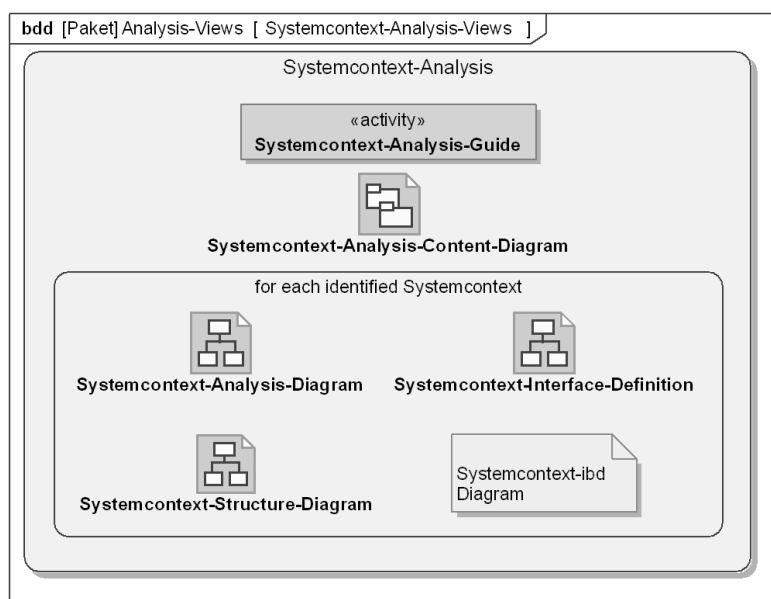


Abbildung 5-21: Werkzeugauswahl für die Systemkontextanalyse in SysML

5.4.4 Methode zur Verhaltensanalyse

Die Verhaltensanalyse repräsentiert die dritte Analysemethode im Rahmen des zweiten Bausteins der ITPE-Methodik. Im Mittelpunkt dieser Methode zur Verhaltensanalyse stehen die Identifikation und Verfeinerung von Anwendungsfällen (Use-Cases). Diese beschreiben die Funktionalität des betrachteten Systems in Bezug darauf, wie die Nutzer das System verwenden, um bestimmte Ziele zu erreichen (Friedenthal et al., 2012, S. 270). (Weilkiens, 2014, S. 90) definiert Anwendungsfälle als Repräsentationen von Systemdienstleistungen, die den Zweck eines Systems definieren. Ein Anwendungsfall kann dabei eine Vielzahl an Szenarien umfassen, die unterschiedliche Pfade durch diesen Anwendungsfall mit jeweils anderen Umständen darstellen (Friedenthal et al., 2012, S. 272). Tabelle 5-7 bietet eine Übersicht über die Aktivitäten und SysML-Werkzeuge in der Verhaltensanalyse.

Tabelle 5-7: Übersicht Aktivitäten und SysML-Werkzeuge in der Verhaltensanalyse

	Aktivität	SysML-Werkzeug	Typ
1	Identifizieren & Bestimmen von Anwendungsfällen	<i>Use-Case-Determination-Diagram</i>	<i>uc</i>
2	Beschreibung der identifizierten Anwendungsfälle		
3	Review Identifikation & Beschreibung		
4	Erstellen & Zuweisen der essenziellen Aktivitäten	<i>Use-Case-Determination-Diagram</i>	<i>uc</i>
5	Einbettung der Anwendungsfälle in die Systemkontexte	<i>Use-Case-n-Diagram</i>	<i>uc</i>
6	Modellierung der Anwendungsfallprozesse → Detaillierte Modellierung der Szenarien	<i>Use-Case-n-Main Flow-Diagram</i> <i>Use-Case-n-Alternative Flow-Diagram</i>	<i>act</i> <i>act</i>
7	Review der Anwendungsfallprozesse		

Der Analyseprozess beginnt mit der Identifikation von Anwendungsfällen in den vorhandenen Daten und Informationen, unterstützt durch das Anwendungsfall-Bestimmungs-Diagramm (*Use-Case-Determination-Diagram*). Anschließend werden die identifizierten Anwendungsfälle detailliert beschrieben. Die Beschreibung der Anwendungsfälle umfasst mehrere definierte Aspekte und orientiert sich an den Anwendungsfall-Beschreibungen von (Friedenthal et al., 2012) und (Weilkiens, 2014):

1. *Systemkontexte*: Die Kontexte, in denen der Anwendungsfall ausgeführt wird
2. *Vorbedingungen*: Bedingungen, die für den Start des Anwendungsfalls erfüllt sein müssen
3. *Auslöser*: Ereignis, das den Anwendungsfall startet
4. *Nachbedingungen*: Zustand des Systems nach erfolgreicher Ausführung
5. *Essenzielle Aktivitäten*: Kurze Zusammenfassung der Hauptaktivitäten

6. *Primärer Ablauf*: Beschreibung des am häufigsten eintretenden Szenarios
7. *Alternative Abläufe*: Beschreibung weniger häufiger oder nicht-nominaler Szenarien
8. *Ausnahme Abläufe*: Beschreibung von Ausnahmesituationen

Nach einem Review der Identifikation und Beschreibung folgt die Erstellung und Zuweisung der essenziellen Aktivitäten, wiederum unter Verwendung des Anwendungsfall-Bestimmungs-Diagramms. Die Anwendungsfälle werden dann in die Systemkontexte eingebettet, wofür das Anwendungsfall-n-Diagramm (*Use-Case-n-Diagram*) zum Einsatz kommt. Die detaillierte Modellierung der Anwendungsfallprozesse erfolgt mittels des Anwendungsfall-Primärablauf-Diagramms (*Use-Case-n-Main Flow-Diagram*) für den Hauptablauf und des Anwendungsfall-Alternativablauf-Diagramms (*Use-Case-n-Alternative Flow-Diagram*) für alternative Abläufe. Diese Diagramme ermöglichen eine präzise Darstellung der verschiedenen Szenarien innerhalb eines Anwendungsfalles. Abschließend wird ein Review der modellierten Anwendungsfallprozesse durchgeführt. Abbildung 5-22 veranschaulicht die Umsetzung der Werkzeugauswahl für die Verhaltensanalyse im Rahmen der ITPE-Methodik-Vorlage in SysML. Im Rahmen der ITPE-Methodik werden die beiden Aktivitätsdiagramme (Anwendungsfall-Primärablauf-Diagramm und Anwendungsfall-Alternativablauf-Diagramm) zur detaillierten Modellierung spezifischer Anwendungsfälle eingesetzt. Da diese Diagramme individuell für jeden modellierten Anwendungsfall erstellt werden, sind sie in Abbildung 5-22 nicht als eigenständige Elemente, sondern als Kommentare zur Vervollständigung der Übersicht dargestellt.

Es ist hervorzuheben, dass in der späteren Funktionsanalyse (Kapitel 5.4.5) ein Vergleich des modellierten Systemverhaltens mit den aus funktionalen Anforderungen abgeleiteten Funktionen durchgeführt wird. Dieser Vergleich ist besonders wertvoll, wenn die ursprünglichen Anforderungen nicht durch ein methodisches Vorgehen mit expliziten Anwendungsfall-Definitionen entwickelt wurden. In solchen Fällen kann diese Analyse zur Identifikation von Unsicherheiten beitragen und potenzielle Diskrepanzen zwischen den Anforderungen und dem modellierten Verhalten aufdecken.

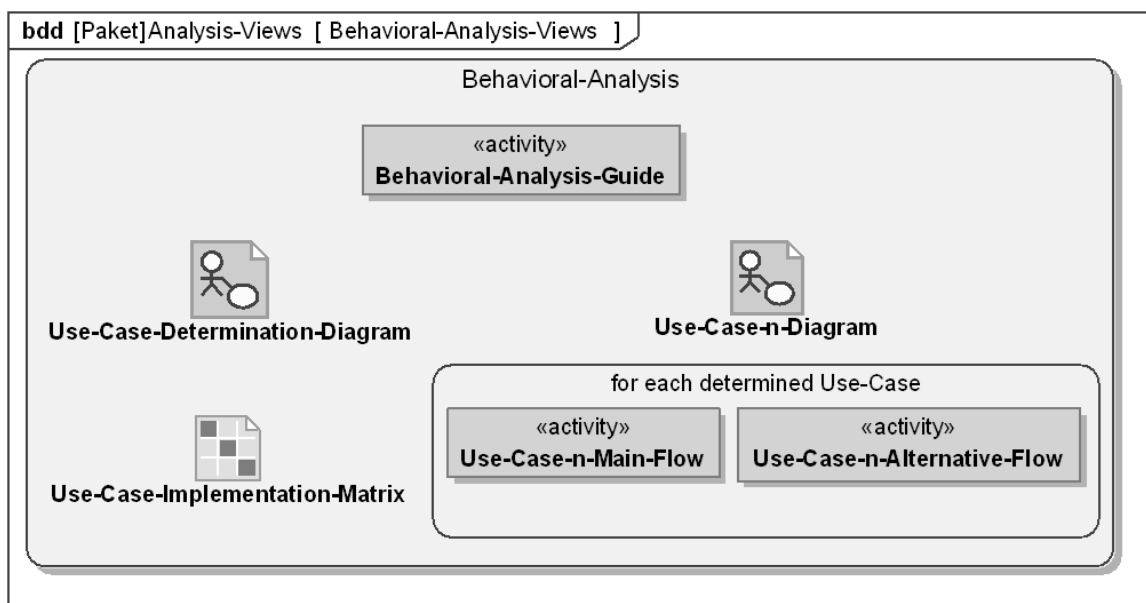


Abbildung 5-22: Werkzeugauswahl für die Verhaltensanalyse in SysML

5.4.5 Methode zur Funktionsanalyse

Die Funktionsanalyse der ITPE-Methodik umfasst zwölf Aktivitäten, die durch spezifische SysML-Werkzeuge unterstützt werden. Tabelle 5-8 bietet eine Übersicht über diese Aktivitäten und die korrespondierenden SysML-Werkzeuge, während Abbildung 5-23 die Umsetzung der Werkzeugauswahl für die Funktionsanalyse in SysML visualisiert. In der Funktionsanalyse werden erstmalig Daten- und Informationsflüsse aus mehreren Analysemethoden zusammengeführt, insbesondere aus der Anforderungs- und Verhaltensmodellierung, wie bereits in Kapitel 5.4.4 angedeutet. Des Weiteren wird im Rahmen der Funktionsanalyse wichtige Vorarbeit geleistet und Input für Review-Aktivitäten der Strukturanalyse vorbereitet. Die zentrale Rolle des Funktionskonzepts innerhalb der ITPE-Methodik, die bereits in der General Ontology (siehe Abbildung 5-8, Kapitel 5.3.2) dargestellt wurde, manifestiert sich erneut in der Funktionsanalyse. Die General Ontology veranschaulicht dabei die Beziehungen des Funktionskonzepts zu allen drei Sektionen: der Anforderungs-Sektion, der Verhaltens-Sektion und der System-of-Interest-Sektion.

Der analytische Prozess dieser Methode startet mit der Identifizierung von Funktionen aus den funktionalen Anforderungen. Subsequenziell erfolgt die Modellierung dieser Funktionen und ihrer "Satisfy"-Beziehungen zu den korrespondierenden Anforderungen. Hierfür kommen das Funktions-Anforderungs-Zufriedenstellungs-Diagramm (*Function-Requirement-Satisfy-Diagram*) und die Funktions-Anforderungs-Mapping-Matrix (*Function-Requirement-Mapping-Matrix*) zum Einsatz, die dem Modellierungsteam sowohl eine visuelle als auch eine matrixbasierte Darstellung der Zusammenhänge im SysML-Werkzeugkasten offerieren. Nach der Identifizierung existierender Daten und Informationen in Bezug zur funktionalen Architektur erfolgt die Modellierung selbiger mittels des Funktions-Architektur-Struktur-Diagramms (*Functional-Architecture-Structure-Diagram*). Bei der Modellierung der funktionalen Architektur finden Kompositions- und Aggregationsbeziehungen Anwendung, um die Hierarchie zu repräsentieren. Als oberstes Element der Hierarchie fungiert ein Block "*Funktionale Architektur*", der als Container für die gesamte funktionale Architektur dient. Ein kritischer Schritt in diesem Prozess ist die Definition von Schnittstellenblöcken für alle funktionalen Schnittstellentypen. Dieser Schritt umfasst die Identifikation relevanter Objektflüsse für jede Funktion, die Definition entsprechender Schnittstellenblöcke und die Spezifikation von Flusseigenschaften in diesen Blöcken. Die Modellierung des internen Blockdiagramms der funktionalen Architektur (*Functional Architecture ibd*) stellt einen weiteren Kernaspekt dar. Der Prozess umfasst die Erstellung von Proxy Ports, die Typisierung dieser Ports mittels modellierter Schnittstellenblöcke sowie die Definition von Objektflüssen zwischen den Funktionen. Proxy Ports fungieren dabei als Stellvertreter für ihren übergeordneten Block oder dessen interne Teile und definieren, welche Features des Blocks durch externe Verbindungen nach außen sichtbar sind. Sie werden stets durch Interface Blocks typisiert (OMG, 2019, S. 81).

Der siebte Schritt der Funktionsanalyse markiert den ersten Checkpoint, in dem ein Review der funktionalen Anforderungen und der dokumentenbasierten Daten und Informationen in Bezug auf die funktionale Architektur durchgeführt wird. Hierbei wird die Konsistenz zwischen den funktionalen Anforderungen und den modellierten Funktionen evaluiert, wobei zu diesem Zeitpunkt mehr Informationen aus dem Modell zur Verfügung stehen, um inhaltliche Aspekte hinsichtlich Inkonsistenzen, Unvollständigkeiten, Genauigkeit und anderer Unsicherheiten zu beurteilen. Die Zuweisung von Aktivitäten zu Funktionen erfolgt mittels des Funktions-Aktivitäts-Zuweisung-Diagramms (*Function-Activity-Allocation-Diagram*), das die Erstellung von Swimlanes für jede Funktion, die Zuweisung von Aktivitäten zu diesen Funktionen sowie die Modellierung von Objekt- und Kontrollflüssen ermöglicht. Im zehnten Schritt wird ein Review der funktionalen Abdeckung

durchgeführt. In diesem Review wird evaluiert, inwieweit die auf funktionalen Anforderungen basierenden Funktionen das beschriebene Verhalten des betrachteten Systems (dargestellt durch die Aktivitäten) abdecken. Hierbei stellen insbesondere Lücken und Inkonsistenzen potenzielle Unsicherheitsarten dar. Während des Reviews wird die Funktionsabdeckung jedoch auf sämtliche Arten von Unsicherheiten geprüft. Abschließend erfolgen Reviews der Objektflusskonsistenz zwischen den Flüssen in Aktivitäten und der funktionalen Architektur sowie der funktionalen Schnittstellen und Übergänge zwischen Funktionen. Hierfür stehen das interne Blockdiagramm der funktionalen Architektur und das Funktions-Aktivitäts-Zuweisung-Diagramm zur Verfügung.

Tabelle 5-8: Übersicht Aktivitäten und SysML-Werkzeuge in der Funktionsanalyse

	Aktivität	SysML-Werkzeug	Typ
1	Identifizieren von Funktionen aus funktionalen Anforderungen		
2	Modellierung der Funktionen und „Satisfy“-Beziehungen zu den entsprechenden Anforderungen	<i>Function-Requirement-Satisfy-Diagram</i> <i>Function-Requirement-Mapping-Matrix</i>	<i>bdd</i> <i>matrix</i>
3	Identifizieren existierende Daten & Informationen in Bezug zur funktionalen Architektur		
4	Modellierung der funktionalen Architektur	<i>Functional-Architecture-Structure -Diagram</i>	<i>bdd</i>
5	Definieren der Schnittstellenblöcke für alle funktionalen Schnittstellentypen	<i>Functional-Interfaces-Diagram</i>	<i>bdd</i>
6	Modellierung des internen Blockdiagramms der funktionalen Architektur	<i>Functional-Architecture ibd</i>	<i>ibd</i>
7	Review der funktionalen Anforderungen		
8	Review der Daten & Informationen in Bezug zur funktionalen Architektur		
9	Zuweisung der Aktivitäten zu den Funktionen	<i>Function-Activity-Allocation-Diagram</i>	<i>act</i>
10	Review der funktionalen Abdeckung		
11	Review der Objektflusskonsistenz zwischen Flüssen in Aktivitäten und Flüssen in funktionaler Architektur	<i>Functional-Architecture ibd</i> <i>Function-Activity-Allocation-Diagram</i>	<i>ibd</i> <i>act</i>
12	Review der funktionalen Schnittstellen und Übergänge zwischen Funktionen	<i>Functional-Architecture ibd</i> <i>Function-Activity-Allocation-Diagram</i>	<i>ibd</i> <i>act</i>

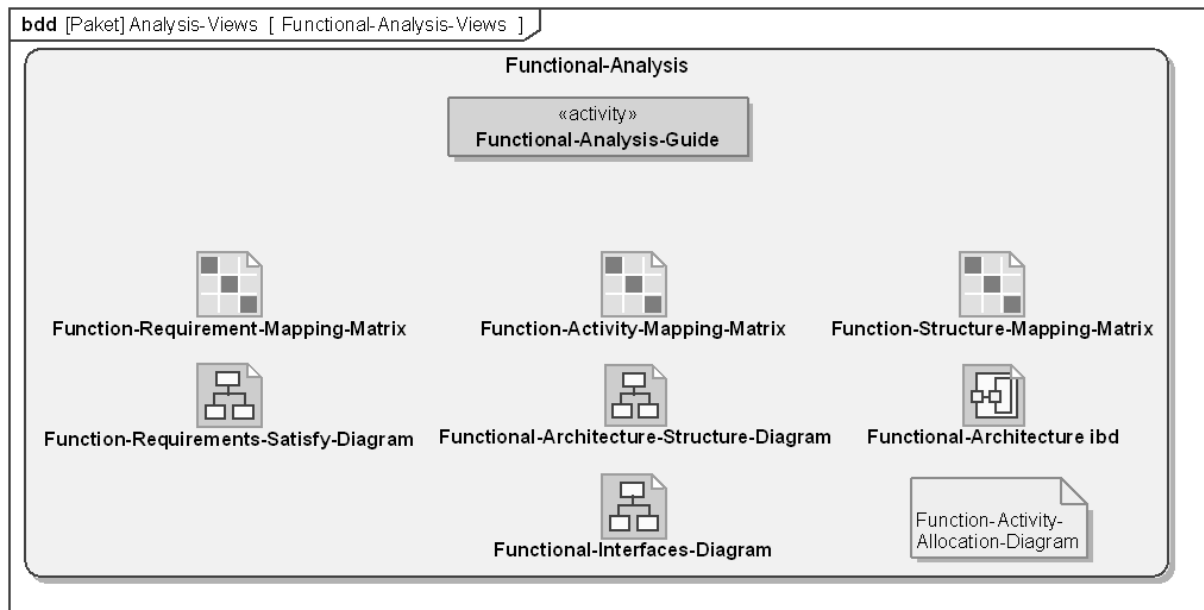


Abbildung 5-23: Werkzeugauswahl für die Funktionsanalyse in SysML

5.4.6 Methode zur Strukturanalyse

Bei der Methode zur Strukturanalyse wird der grundsätzliche Ansatz von (Weilkiens, 2014, S. 172-174) verfolgt. Hierbei beschreibt die logische Architektur die technischen Konzepte und Prinzipien des Systems, während die konkreten Bausteine Teil der physischen Produktarchitektur sind. Bis auf die Abstraktionsebene unterscheiden sich die beiden Architekturen nicht wesentlich. Dies führt dazu, dass in der ITPE-Methodik keine strikte Trennung zwischen diesen beiden Architekturtypen vorgenommen wird. Die General Ontology beschreibt die allgemeinen Zusammenhänge zwischen den Architekturtypen und den entsprechenden Elementen, um ein grundsätzliches Verständnis zu ermöglichen. Es obliegt jedoch dem Modellierungs- und SE-Team, eine situationsgerechte Definition vorzunehmen. In Abhängigkeit von der Entwicklungsphase ist es möglich, entweder die logische oder die physische Architektur heranzuziehen oder auch eine Mischform zu verwenden, in der beide Architekturformen nicht explizit getrennt werden. In einer sehr frühen Entwicklungsphase sind tendenziell eher logische Elemente einsetzbar, da eine Konkretisierung der logischen Elemente durch physische Elemente noch aussteht. In einer späten Phase kann direkt mit physischen Elementen oder einer Mischform gearbeitet werden, da eine Konkretisierung bereits stattgefunden hat. Daher wird im Folgenden zusammenfassend von "Struktur" gesprochen und die Entscheidung, ob eine logische, physische oder gemischte Architektur verwendet werden soll, dem Modellierungs- und SE-Team überlassen.

Der Prozess beginnt mit der Identifizierung von Daten und Informationen in vorhandenen Dokumenten über das System of Interest (SOI). Dieser initiale Schritt schafft die Informationsbasis für die nachfolgende Modellierung. Im zweiten Schritt erfolgt die Modellierung der Systemstruktur des SOI und der entsprechenden Subsysteme mittels des Systemstruktur-Diagramms (Systemstructure-Diagramm). Dieses Diagramm bildet die Grundlage für die weitere Detaillierung des Strukturmodells. Der dritte Schritt umfasst die Modellierung der Eigenschaften der identifizierten Strukturelemente, die in den dokumentenbasierten Daten und Informationen hinterlegt sind, gefolgt von einem Review dieser Struktureigenschaften im vierten Schritt. Im fünften Schritt wird das Systemstruktur-ibd-Diagramm (Systemstructure-ibd) modelliert, dass die internen

Beziehungen der Systemkomponenten visualisiert. Der sechste Schritt beinhaltet einen Review der Daten und Informationen aus Dokumenten hinsichtlich der Objektflüsse zwischen untergeordneten Elementen. Hierbei werden explizit die Objektflüsse aus der Funktionsanalyse und der Verhaltensanalyse berücksichtigt, was die Konvergenz der verschiedenen Analyseperspektiven unterstützt. Die Modellierung von Daten und Informationen aus Dokumenten in Bezug auf logische und physische Schnittstellen innerhalb des SOI erfolgt im siebten Schritt, wiederum unter Verwendung des Systemstructure-ibd. Anschließend werden im achten Schritt die modellierten Daten und Informationen hinsichtlich dieser Schnittstellen innerhalb des SOI einem Review unterzogen. Der neunte Schritt umfasst die Zuordnung von Funktionen des SOI zu strukturellen Unterelementen mittels des Funktion-Struktur-Realisierungs-Diagramms (Function-Structure-Realization-Diagramm). Hierbei ist zu beachten, dass Funktionen einerseits Subsystemen zugewiesen werden können, andererseits kann es erforderlich sein, dass das SOI als Einheit für die Realisierung einer Funktion notwendig ist. Im zehnten Schritt erfolgt ein Review dieser Zuordnung. Die abschließenden Schritte umfassen die Zuweisung nicht-funktionaler Anforderungen zum SOI mittels des Systemstructure-Diagramm im elften Schritt und den Review der Erfüllung nicht-funktionaler Anforderungen unter Verwendung des Parameter-Diagramms (Parametric-Diagramm) im zwölften Schritt.

Tabelle 5-9: Übersicht Aktivitäten und SysML-Werkzeuge in der Strukturanalyse

	Aktivität	SysML-Werkzeug	Typ
1	Identifizieren von Daten & Informationen in vorhandenen Dokumenten über das SOI		
2	Modellierung der Systemstruktur des SOI und der entsprechenden Subsysteme	<i>Systemstructure-Diagramm</i>	<i>bdd</i>
3	Definieren der Struktureigenschaften, die in den Dokumenten dokumentiert sind		
4	Review der Struktureigenschaften		
5	Modellierung des Struktur ibd-Diagramms	<i>Systemstructure-ibd</i>	<i>ibd</i>
6	Review der Daten & Informationen aus Dokumenten hinsichtlich der Objektflüsse zwischen untergeordneten Elementen		
7	Modellierung der Daten & Informationen aus Dokumenten in Bezug auf Schnittstellen innerhalb des SOI	<i>Systemstructure-ibd</i>	<i>ibd</i>
8	Review der modellierten Daten & Informationen hinsichtlich der Schnittstellen innerhalb des SOI		
9	Zuordnung von Funktionen des SOI und zu strukturellen Unterelementen des SOI	<i>Function-Structure-Realization-Diagramm</i>	<i>bdd</i>
10	Review der Zuordnung		
11	Zuweisung nicht-funktionaler Anforderungen zum SOI	<i>Systemstructure-Diagramm</i>	<i>bdd</i>
12	Review der Erfüllung nicht-funktionaler Anforderungen	<i>Parametric-Diagramm</i>	<i>par</i>

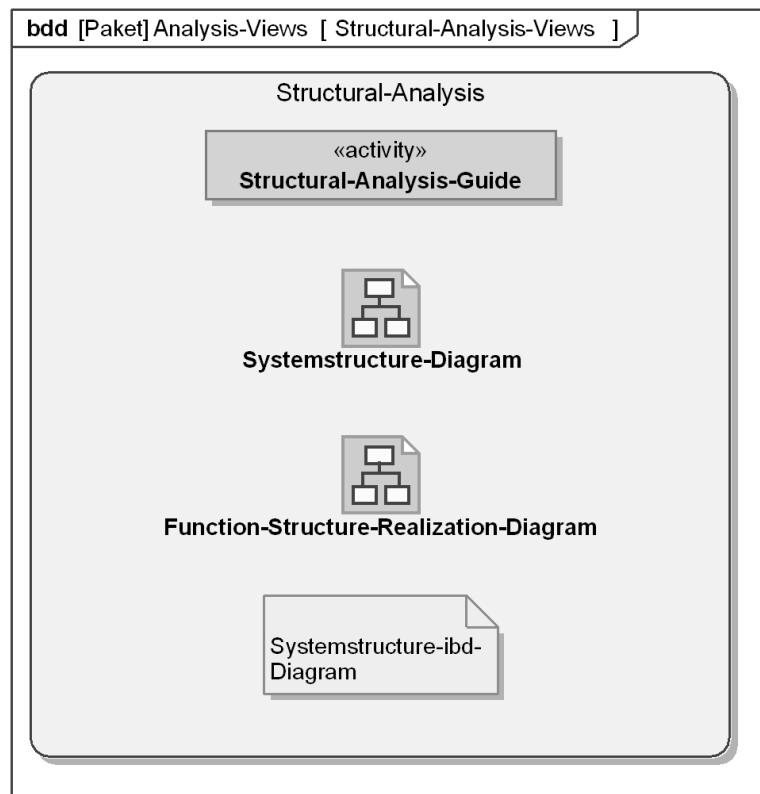


Abbildung 5-24: Werkzeugauswahl für die Strukturanalyse in SysML

5.4.7 Umsetzung der Unsicherheitsmodellierung

Für die Unsicherheitsmodellierung stellt die ITPE-Methodik dem Modellierungsteam unterschiedliche Werkzeuge zur Verfügung, die eine systematische Erfassung und Dokumentation von Unsicherheiten ermöglichen. Während des ersten Schritts des DT-MBSE Integrationsmodells, der Identifikation durch Modellbildung, kann das Modellierungsteam identifizierte Unsicherheiten mittels des SysML-Elements *Kommentar* dokumentieren. Die Methodik bietet hierfür in der Elementbibliothek entsprechende stereotypisierte Elemente, die auf der Uncertainty Ontology basieren. Das zugehörige Profil auf Basis der SysML-Metaklasse *Comment* ist im Anhang A-3 dokumentiert. Die konzeptionelle Ausrichtung dieser Modellierungsstrategie folgt mehreren Prinzipien: Sie soll einen niederschweligen Zugang bieten, um die Dokumentation identifizierter Unsicherheiten während der Modellerstellung so effizient wie möglich zu gestalten. Durch die Minimierung des Dokumentationsaufwands wird sichergestellt, dass die Dokumentation identifizierter Unsicherheiten den Modellierungsprozess nicht unverhältnismäßig belastet. Dieser pragmatische Ansatz schafft eine fundierte Grundlage für den zweiten Schritt des DT-MBSE Integrationsmodells, in welchem die identifizierten Unsicherheiten im Rahmen der jeweiligen Modell-Reviews – die in den Analysemethoden-Anleitungen durch Checkpoints definiert sind – in kollaborativen Workshops unter Beteiligung des SE-Teams und einer bedarfsgesteuerten Unterstützung durch domänenspezifische Entwickler diskutiert und evaluiert werden.

Abbildung 5-25 visualisiert die strukturelle Organisation der Elemente zur Unsicherheitsmodellierung in der Elementbibliothek. Die hierarchische Gliederung zeigt die Hauptkomponenten: spezifische Unsicherheitselemente (*Uncertainty Custom Elements*), Vorlagen für standardisierte Unsicherheitselemente (*Uncertainty Template Repository*) mit der Bereitstellung von Block- und Kommentar-Element-Vorlagen sowie das Modellierungs-Repository (*Uncertainty Modelling*

Repository), in welchem die im Modell identifizierten Unsicherheiten abgelegt werden. Das Modellierungs-Repository ist entsprechend der fünf Analysemethoden strukturiert, was eine analysespezifische Zuordnung der identifizierten Unsicherheiten ermöglicht. Das methodische Vorgehen zur Anwendung dieser Elemente umfasst mehrere Schritte: Die stereotypisierten Kommentare werden aus dem Unsicherheiten-Vorlagen-Repository in den entsprechenden Ordner des Unsicherheiten-Modellierungs-Repositorys transferiert, anschließend im relevanten Diagramm integriert und mit einer textuellen Beschreibung der Unsicherheit versehen. Dieses Verfahren bietet neben der unkomplizierten Dokumentation identifizierter Unsicherheiten den signifikanten Vorteil, dass Kommentare in sämtlichen Diagrammtypen an alle SysML-Elemente flexibel angeheftet werden können. Diese universelle Anwendbarkeit unterstützt die durchgängige Dokumentation von Unsicherheiten über alle Modellierungsphasen und Systemaspekte hinweg. Abbildung 5-26 illustriert ein exemplarisches Anwendungsszenario der Kommentarelemente zur Unsicherheitsmodellierung im Kontext der Anforderungsanalyse. In diesem Beispiel wird demonstriert, wie zwei distinkte Unsicherheitskategorien – Unvollständigkeit und Vagheit – zur Dokumentation eingesetzt werden. Die stereotypisierten Kommentare *Incompleteness Uncertainty* und *Vagueness Uncertainty* sind an eine beispielhafte Anforderung angeheftet und beschreiben die identifizierten Unsicherheiten.

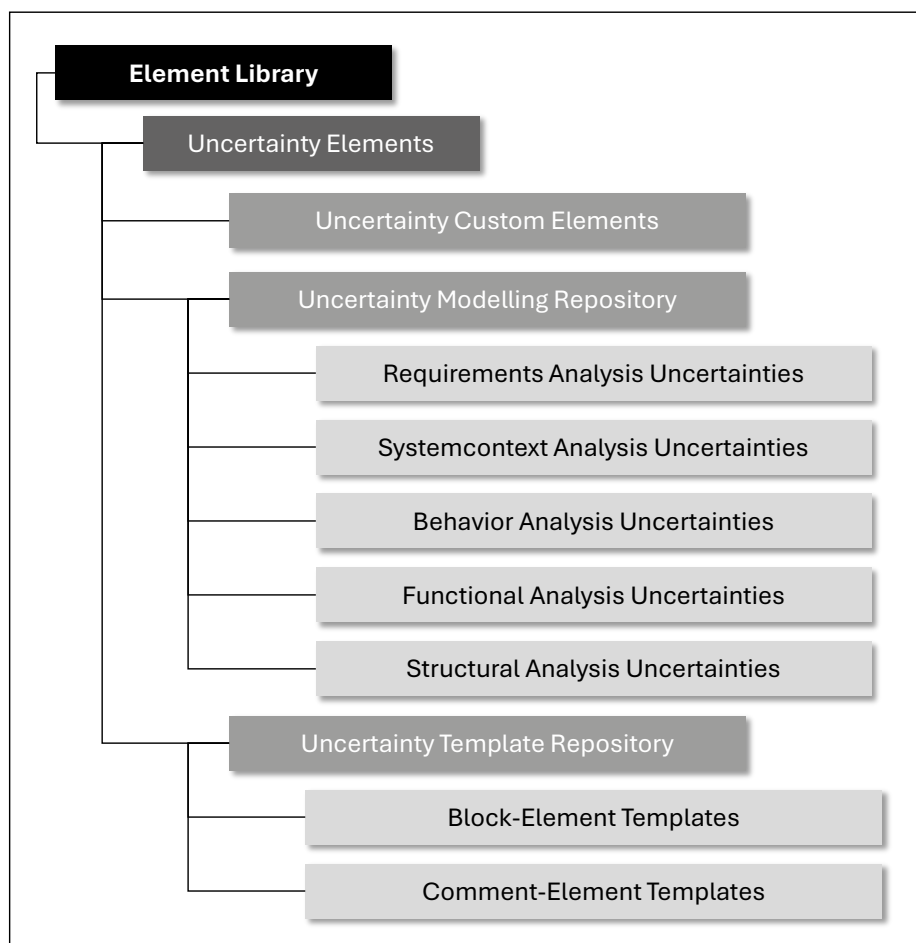


Abbildung 5-25: Struktur der Unsicherheitsmodellierung in der Elementbibliothek

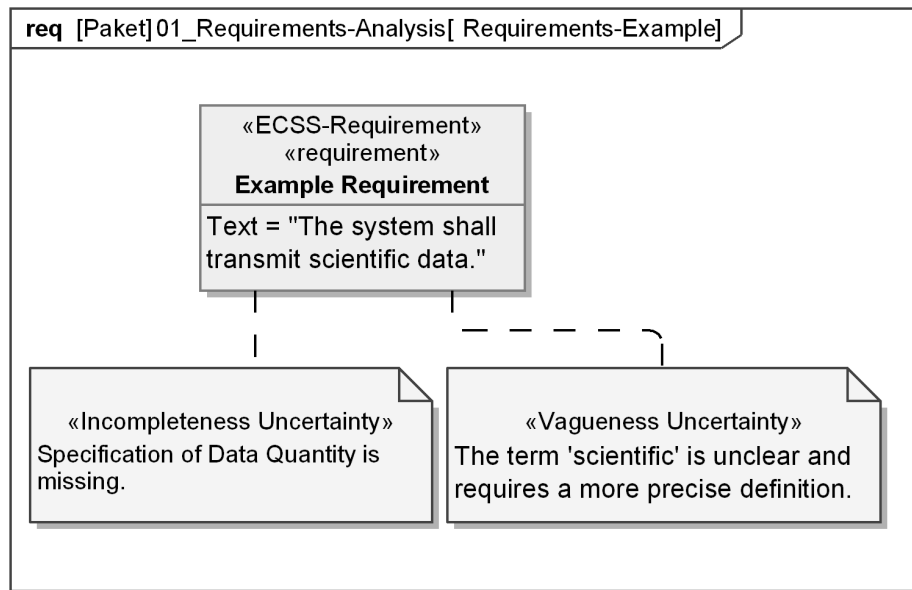


Abbildung 5-26: Beispiel für den Einsatz der Kommentarelemente zur Unsicherheitsmodellierung

Nach Abschluss von Schritt 2 und 3 des DT-MBSE Integrationsmodells, die Bestandteile des Checkpoints sind, stehen dem Modellierungsteam für den Transfer der definierten und konsolidierten Unsicherheiten ins Modell im Rahmen von Schritt 5 stereotypisierte Blöcke zur Verfügung. Diese erweiterte Modellierungsoption ermöglicht eine präzisere und strukturiertere Erfassung von Unsicherheiten. Abbildung 5-27 illustriert ein Beispiel für den Einsatz der Blockelemente zur Unsicherheitsmodellierung. Das methodische Vorgehen zum Einsatz dieser Blockelemente umfasst mehrere systematische Schritte: Zunächst erfolgt das Kopieren der entsprechenden Unsicherheits-Vorlage aus dem Vorlagen-Repository in das Modellierungs-Repository. Anschließend erfolgt die Benennung analog zum Kommentar, der mit dem unsicherheitsbehafteten Element verbunden ist. Hierbei werden der Checkpoint, in welchem die Unsicherheit behandelt wurde, die Art der Unsicherheit sowie eine Laufnummer vergeben und dokumentiert, was eine eindeutige Identifikation und Nachverfolgbarkeit gewährleistet. Das Einfügen des Unsicherheitsblocks erfolgt dann in das Diagramm, in welchem die Unsicherheit identifiziert wurde und in dem bereits der entsprechende Kommentar enthalten ist. Der Kommentar wird durch den Block ersetzt. Die Unsicherheit kann nun in der Dokumentation des Blocks textuell beschrieben werden. Bei Unsicherheiten mit einer numerischen Problemstellung besteht die Möglichkeit, den entsprechend fehlenden oder ungenauen Wert als sogenannte Wert-Eigenschaft (*Value-Property*) im Unsicherheitsblock anzulegen und zu spezifizieren. Anschließend erfolgt die Zuweisung des Unsicherheitsblocks mittels der Zuweisungs-Beziehung (*Allocate*) zum entsprechenden Element. Als finaler Schritt kann der Unsicherheitsblock in das Unsicherheits-Diagramm (*Uncertainty-Diagram*) eingefügt werden, um eine Übersicht über alle Unsicherheiten des entsprechenden Analysebereiches zu erhalten. Diese zusätzliche Sicht stellt ein komplementäres Hilfsmittel der ITPE-Methodik dar, das darauf abzielt, die Generierung neuer Erkenntnisse in Bezug auf die Unsicherheiten und potenzielle Beziehungen und Zusammenhänge zwischen verschiedenen Unsicherheiten zu unterstützen.

Bei der Verhaltensanalyse ist diese Vorgehensweise aufgrund der Spezifika von Aktivitätsdiagrammen nicht direkt umsetzbar, da Blöcke nicht in Aktivitätsdiagramme eingefügt werden können. Zur Lösung dieser methodischen Herausforderung wird für die Zuweisung von Verhaltensunsicherheiten ein zusätzliches Aktivitätsdiagramm bereitgestellt (*Behavioral Analysis*

Uncertainties Allocation). In diesem können durch den Einsatz von Swimlanes die entsprechenden Verhaltenselemente in die jeweiligen Swimlanes eingefügt werden. Den Swimlanes werden dann die jeweiligen Unsicherheitsblöcke zugewiesen. Abbildung 5-28 veranschaulicht diesen Sachverhalt anhand eines Beispiels. Durch dieses differenzierte Vorgehen wird dem Modellierungsteam ermöglicht, die definierten Unsicherheiten eindeutig im Modell den betroffenen Elementen zuzuweisen und eine konsistente Nachverfolgung über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg zu gewährleisten. Die Integration von Kommentar- und Blockelementen schafft ein umfassendes Werkzeug zur Unsicherheitsmodellierung, das sowohl eine einfache initiale Erfassung als auch eine strukturierte Dokumentation und Analyse von Unsicherheiten unterstützt.

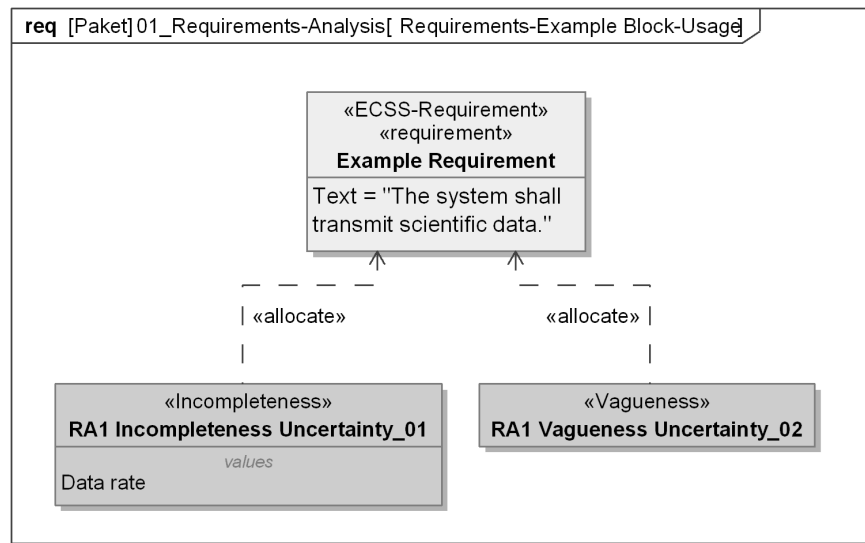


Abbildung 5-27: Beispiel für den Einsatz der Blockelemente zur Unsicherheitsmodellierung

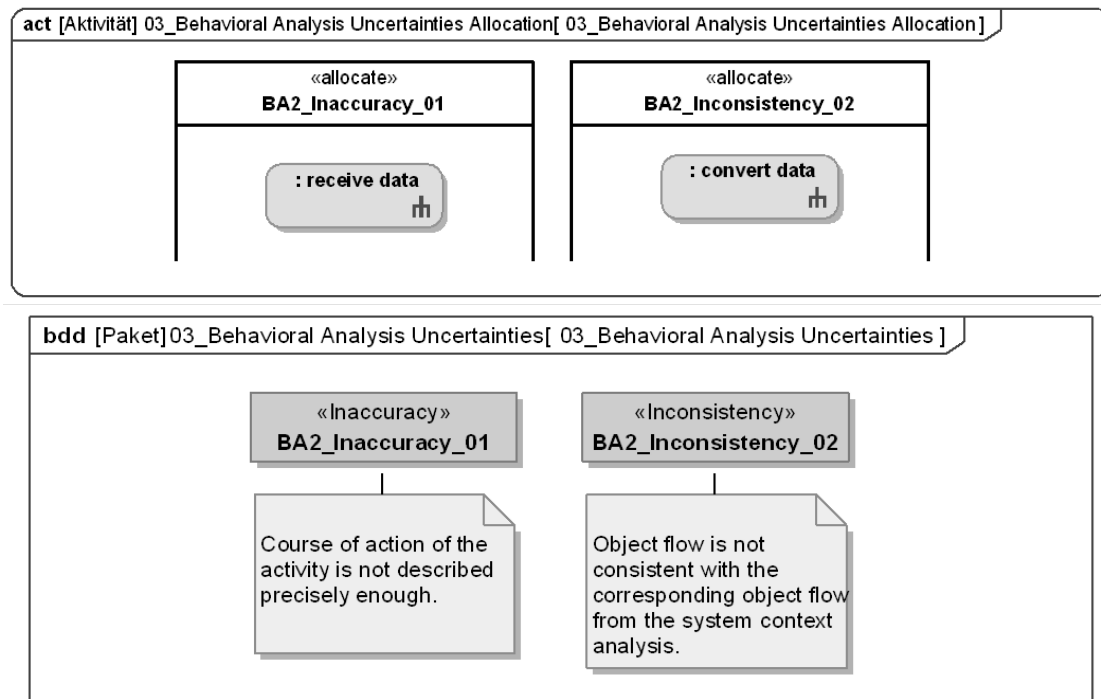


Abbildung 5-28: Beispiel für die Zuweisung von Unsicherheitsblöcken in der Verhaltensanalyse

6 Validierung der Methodik

Die Validierung der ITPE-Methodik wird in den folgenden vier Unterkapiteln vorgestellt und verkörpert die abschließende deskriptive Studie II der Arbeit. Kapitel 6.1 präsentiert das Validierungskonzept, dessen methodische Grundlagen bereits im Forschungskonzept in Kapitel 2.2 dargelegt wurden. In Kapitel 6.2 wird der spezifische Anwendungsfall beschrieben, in welchem die Methodik zum Einsatz kommt. Die Ergebnisse der durchgeführten Validierung werden detailliert in Kapitel 6.3 dargestellt. Abschließend erfolgt in Kapitel 6.4 eine Diskussion der Ergebnisse, die deren wissenschaftliche Bedeutung und Implikationen beleuchtet.

6.1 Validierungskonzept

Methodische Grundlage der Validierung

Im Rahmen der deskriptiven Studie II wird die ITPE-Methodik einer initialen Validierung unterzogen. Dieses Vorgehen entspricht dem Vorschlag von (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 18) für Forschungsprojekte des Typs 5. Wie bereits im Forschungskonzept (Kapitel 2.2) dargelegt, verfolgt die initiale Validierung zwei Ziele: Erstens soll ein Hinweis auf die Anwendbarkeit, Nutzbarkeit und den Nutzen der entwickelten Unterstützung gegeben werden. Zweitens sollen Anhaltspunkte für Fragestellungen identifiziert werden, die einer detaillierten Bewertung bedürfen, sowie ein Vorschlag für einen geeigneten Bewertungsplan erarbeitet werden. Das übergeordnete Vorgehen orientiert sich am systematischen DS-II-Prozess von (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 196), der die folgenden Schritte umfasst: die Analyse bestehender Dokumentationen zur Unterstützung, die Festlegung des Bewertungsfokus, die Ausarbeitung eines Bewertungsvorgehens, die Durchführung der Evaluation und die Ableitung von Schlussfolgerungen. Der letzte Schritt wird in Kapitel 6.4 (Diskussion) ausgeführt.

Bestehende Dokumentation

Für die Validierung steht die Dokumentation der ITPE-Methodik einschließlich ihrer drei Bausteine in Form eines umfassenden SysML-Modells zur Verfügung. Dieses Modell enthält an den entsprechenden Stellen detaillierte Beschreibungen und dient als Grundlage für die Evaluation. Neben der Methodik-Dokumentation wurde ein Validierungsvorgehen entwickelt, das in Abbildung 6-1 visualisiert ist. Zusätzlich stehen die Ergebnisse der theoretischen Bewertung und Diskussion der beiden Bausteine I und III aus der präskriptiven Studie sowie die in Kapitel 2.3 vorgestellten Kriterien zur Verfügung.

Da die ITPE-Methodik eine aufgabenspezifische Methodik darstellt, existiert kein klassisches Referenzmodell, das eine vergleichbare Aufgabenstellung adressiert und als Benchmark herangezogen werden könnte. Referenzobjekte können jedoch in unterschiedlichen Formen auftreten (Larsen et al., 2025, S. 7). Besonders aussagekräftige Vergleiche sind konservativ, das heißt, sie basieren auf dem besten verfügbaren Wissensstand, dem modernsten Artefakt oder der fortschrittlichsten Vorgehensweise (Larsen et al., 2025, S. 7). Im Rahmen der initialen Validierung wurden daher spezifische Kriterien definiert, die auf einer fundierten Wissensbasis etablierter Quellen zur Validierung von Methoden basieren. Neben der DRM als übergeordnetem methodischen Rahmen wurden die Arbeiten von (Kroll und Weisbrod, 2020), (Daalhuizen und Cash, 2021), (Eisenmann et al., 2021), (Gericke et al., 2022), (Cash et al., 2023) und (Larsen et al., 2025) für die Definition der Validierungskriterien herangezogen.

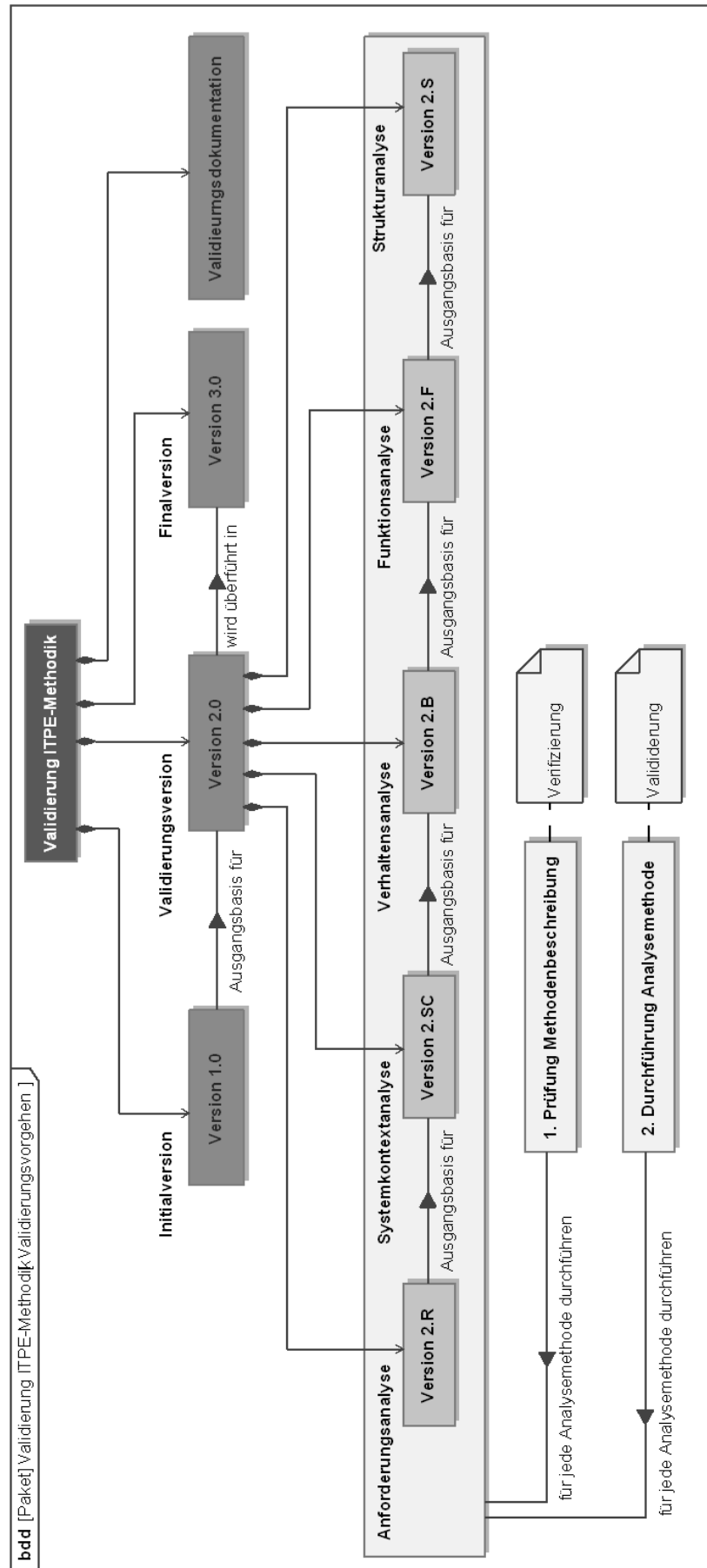


Abbildung 6-1: Visualisierung des Validierungsvorgehens der ITPE-Methodik

Übertragbarkeit von D & I in eine modellbasierte Umgebung → Grundlegendes Anwendungskriterium
K1: Für die Übertragung dokumentenbasierter Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojekts aus verschiedenen Quellen in eine modellbasierte Umgebung stehen alle notwendigen methodischen und repräsentativen Elemente zur Verfügung. → Anwendbarkeit und Vollständigkeit
Identifikation von Unsicherheiten in Daten und Informationen → Forschungsfrage 1
K2: Es stehen alle notwendigen vorgehentechnischen und repräsentativen Elemente zur Verfügung, um ein systematisches Vorgehen bei der Modellbildung zu gewährleisten. → Anwendbarkeit und Vollständigkeit
K3: Es werden durch den Einsatz der Methodik Unsicherheiten in Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojektes identifiziert. → Wirksamkeit
Reduktion von Unsicherheiten in Daten und Informationen → Forschungsfrage 2
K4: Der Einsatz der Methodik ermöglicht die Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojektes. → Wirksamkeit
Unterstützung der Wissensgenerierung → Forschungsfrage 3
K5: Die Methodik unterstützt die Wissensgenerierung im Entwicklungsprojekt. → Wirksamkeit
Einfache und korrekte Umsetzung des beschriebenen Vorgehens → Übergreifendes Anwendungskriterium
K6: Die Methodik ist in Hinblick auf eine einfache und korrekte Verfahrensbefolgung in einem realen Anwendungsfall der Satellitenentwicklungsdomäne einsetzbar. → Einfachheit und Verständlichkeit
Konsistenz → Grundlegendes Anwendungskriterium
K7: Es besteht eine konsistente Terminologie in der Methodik und ihren Elementen.
Nützlichkeit → Erfolgskriterium
K8: Die Methodik erfüllt ihren Zweck.

Abbildung 6-2: Kriterien für die Validierung der ITPE-Methodik, analog Abbildung 2-8

Bewertungsfokus

Hinsichtlich des Bewertungsfokus empfehlen (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 195), bei der Durchführung einer initialen Deskriptiven Studie II den Schwerpunkt auf die Anwendungsvalidierung zu legen. Die bereits in Kapitel 2.2 beschriebenen sieben zentralen Aspekte – Anwendbarkeit, Einfachheit, Konsistenz, Nutzen, Verständlichkeit, Vollständigkeit und Wirksamkeit – wurden aus den genannten Quellen abgeleitet und bilden die Grundlage für die Kriterienentwicklung. Da die initiale Validierung darauf abzielt, Hinweise auf die Anwendbarkeit, Nutzbarkeit und den Nutzen der entwickelten Methodik zu liefern, liegt die Zielsetzung nicht darin, ein umfassendes SysML-Modell des betrachteten Untersuchungsgegenstandes zu erstellen. Stattdessen konzentriert sich die Validierung auf die Evaluation der Methodik anhand der definierten Kriterien. Abbildung 6-2 zeigt die Kriterien und visualisiert deren Verbindung zu den drei Forschungsfragen der Arbeit (Kapitel 1.2 & 2.3). Diese Darstellung verdeutlicht, dass sich die Evaluation auf die wesentlichen Aspekte der Methodik konzentriert, die für die Forschungsfragen von zentraler Bedeutung sind, wie es von (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 201) empfohlen wird.

Bewertungsvorgehen

Der Bewertungsplan beginnt mit der systematischen Auswahl eines geeigneten Anwendungsfalls, der in Kapitel 6.2 ausführlich beschrieben wird. Anschließend wird die ITPE-Methodik innerhalb des Anwendungsfalls gemäß dem in Abbildung 6-1 dargestellten Validierungsvorgehen eingesetzt. Dieses Vorgehen umfasst eine initiale Version der Methodik, eine Validierungsversion, die den fortlaufenden Stand der Methodik in Abhängigkeit von den jeweiligen Phasen dokumentiert, und eine abschließende Version, die alle während der Validierung vorgenommenen Anpassungen integriert. Der iterative Prozess ist in fünf Phasen gegliedert, die jeweils eine Analysemethode untersuchen. Jede Phase besteht aus zwei Schritten: Im ersten Schritt wird eine Verifikation der Methodenbeschreibung durchgeführt und die logische Konsistenz analysiert. Erkenntnisse aus diesem Schritt werden in die jeweilige Methode eingearbeitet und im SysML-Modell dokumentiert. Im zweiten Schritt wird die Analysemethode angewendet und validiert. Innerhalb jeder Phase können mehrere Iterationsschleifen erfolgen, in denen Ergebnisse diskutiert und eingearbeitet werden. Die Anzahl der Iterationen richtet sich nach den identifizierten Verbesserungsbedarfen und wird bis zur Erreichung eines konsensuellen Zustands fortgeführt. Eine umfassende Dokumentation aller Aktivitäten, Änderungen und Anmerkungen erfolgt tabellarisch und bildet die Grundlage für die abschließende Bewertung der Methodik.

Durchführung

In Hinblick auf die Durchführung der Validierung wird von (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 209) empfohlen, zusätzliche Teilnehmer einzubeziehen. Daher wird ein Modellierungsteam einbezogen, das nicht an der Entwicklung der Methodik beteiligt war. Das Team besteht aus zwei Personen von unterschiedlichen akademischen Institutionen, die über verschiedene Kenntnisse in Bezug auf das in Kapitel 5.2.2 vorgestellte Kompetenzprofil verfügen, jedoch fundierte Kenntnisse in Bezug auf den Einsatz von SysML haben. Die Rolle des Systems Engineering-Teams und der domänenspezifischen Entwickler wird durch eine erfahrene Person aus dem Entwicklungsumfeld des Untersuchungsgegenstands repräsentiert, was der gängigen Organisationsstruktur im Entwicklungsprojekt entspricht. Dadurch sollen Verzerrungseinflüsse minimiert und aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Der Entwickler der Methodik nimmt an allen Workshops teil, die im Rahmen der Iterationen durchgeführt werden.

6.2 Beschreibung des Anwendungsfalls

Als Anwendungsfall für die initiale Validierung der entwickelten Methodik wird, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, ein Subsystem eines wissenschaftlichen Satellitenmissionsentwicklungsprojekts herangezogen. Hierbei handelt es sich um das *SeRANIS*-Projekt (Seamless Radio Access Network for Internet of Space), eine satellitengestützte Forschungsmission der Universität der Bundeswehr München, deren Start für Ende 2026 geplant ist. Ziel des Projekts ist es, innovative Technologien und Methoden unter realen Weltraumbedingungen zu testen und deren technische Reife zu demonstrieren. Der Kleinsatellit *ATHENE-1* dient dabei als zentrale Plattform, um Experimente aus den Bereichen Satellitenkommunikation, Navigation, Künstlicher Intelligenz, Internet der Dinge (Internet of Things) und Erdbeobachtung durchzuführen. Das Projekt verbindet traditionelle Ansätze der Raumfahrt mit New Space-Philosophien (siehe Kapitel 1.2 zum Begriff New Space), um eine agile und ressourceneffiziente Entwicklung zu ermöglichen. Neben der

Erforschung neuer Technologien bietet die Mission auch eine Demonstrationsplattform für Industrie und Start-ups. Der ATHENE-1-Satellit wird in einer niedrigen Erdumlaufbahn (**Low Earth Orbit**) in einer Höhe von etwa 500 bis 600 Kilometern operieren und hat ein Gesamtgewicht von rund ca. 390 Kilogramm. Weiterführende Informationen zum SeRANIS-Projekt finden sich in (Kinzel *et al.*, 2022) und (Bachmann *et al.*, 2024). Zur Identifikation eines geeigneten Untersuchungsgegenstandes für die Validierung der entwickelten Methodik wurde ein systematischer, zweistufiger Auswahlprozess durchgeführt. Im ersten Schritt wurde ein Expertengremium konstituiert, das aus drei erfahrenen Systemingenieuren des Satellitenentwicklungsprojekts, beiden Mitgliedern des Modellierungsteams sowie dem Entwickler der Methodik bestand. Das Gremium führte eine initiale Bewertung aller verfügbaren Nutzlast-Experimente des Satellitenentwicklungsprojekts hinsichtlich ihrer Eignung für eine initiale Validierung im Dissertationskontext durch. Als primäres Auswahlkriterium wurde die Verfügbarkeit ausreichender Daten und Informationen definiert. Durch einen systematischen Abstimmungsprozess identifizierte das Expertengremium drei Experimente für die weitere Evaluation. Die drei vorausgewählten Experimente wurden anschließend mittels eines vom Expertengremium entwickelten Kriterienkatalogs systematisch evaluiert. Die sieben Bewertungskriterien basieren auf den grundlegenden Anforderungen zur Durchführbarkeit einer initialen Validierung der entwickelten Methodik und gliedern sich in zwei Kategorien: Kriterien, die den Umfang und die organisatorischen Rahmenbedingungen des Experiments betreffen (C1-C2), und solche, die sich auf die Verfügbarkeit und Qualität von Daten und Informationen beziehen (C3-C7). Für die Informationsverfügbarkeitskriterien (C3-C7) wird „angemessen“ als die Mindestmenge an Informationen definiert, die zur Durchführung der in der Methodik spezifizierten Analyseschritte im Rahmen einer initialen Validierung erforderlich ist. Damit soll sichergestellt werden, dass der Fokus auf der Validierung der Methodik liegt. Die Kriterien im Einzelnen:

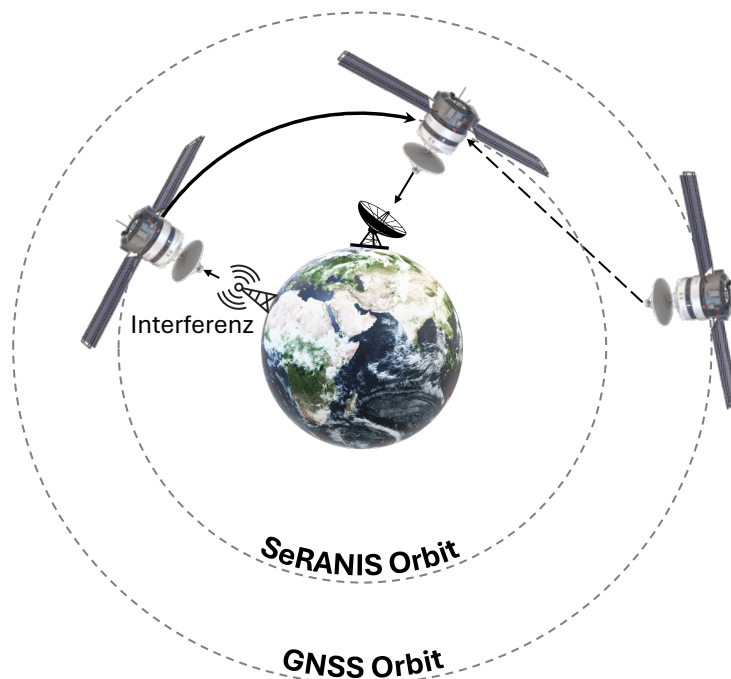
- **C1:** Der Umfang des Experiments sollte für eine initiale Validierung im Rahmen einer deskriptiven Studie II nach (Blessing und Chakrabarti, 2009) geeignet sein.
- **C2:** Das Experiment sollte relevante Kommunikationspartner bereitstellen (Systems Engineering und domänenspezifische Expertise).
- **C3:** Das Experiment sollte dokumentenbasierte Daten und Informationen zur Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten enthalten.
- **C4:** Das Experiment sollte einen angemessenen Satz von Anforderungen bereitstellen.
- **C5:** Das Experiment sollte angemessene Informationen über die Struktur des enthaltenen Subsystems liefern.
- **C6:** Das Experiment sollte angemessene Informationen über das Betriebskonzept des enthaltenen Subsystems liefern.
- **C7:** Das Experiment sollte angemessene Schnittstelleninformationen zur Verfügung stellen.

Die systematische Bewertung erfolgte anhand einer dreistufigen Skala, die zwischen den Werten "Erfüllt", "Teilweise erfüllt" und "Nicht erfüllt" unterscheidet. Die Ergebnisse der Experimentenbewertung sind in Tabelle 6-1 dokumentiert. Basierend auf dieser Analyse wurde Experiment 06 des Satellitenentwicklungsprojektes als geeigneter Untersuchungsgegenstand identifiziert, da es als einziges Experiment alle definierten Kriterien vollständig erfüllt. Die beiden anderen Experimente wiesen insbesondere bei den Kommunikationsaspekten (C2) Defizite auf.

Tabelle 6-1: Ergebnisse der Experimentenbewertung zur Auswahl eines Anwendungsfalls

	Experiment 01	Experiment 03	Experiment 06
C1	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt
C2	Teilweise Erfüllt	Nicht erfüllt	Erfüllt
C3	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt
C4	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt
C5	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt
C6	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt
C7	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt

Experiment 06 untersucht die Detektion, Geolokalisierung und Charakterisierung von Störsignalen in GNSS-Frequenzbändern aus dem Orbit. GNSS (Global Navigation Satellite System) stellt die PNT-Funktionen bereit: Positionierung, Navigation und Timing. „Timing“ bezeichnet die hochgenaue Zeitbestimmung auf Basis synchronisierter Satellitenuhren und der aus den Signallaufzeiten geschätzten Navigationslösung; sie dient sowohl der Bord-Synchronisation als auch der Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung. Auf dem LEO Satelliten Athene1 des Projekts SeRANIS wird hierfür ein weltraumtauglicher GNSS Empfänger eingesetzt, der kontinuierlich Position, Geschwindigkeit und Zeit des Satelliten bestimmt (Bandagadde *et al.*, 2024, S. 44). Ziel des Experiments ist es, terrestrische Interferenzen in den GNSS Bändern im Orbit zu detektieren, ihren Ursprung zu geolokalisieren und ihre Signalcharakteristika zu analysieren. Abbildung 6-3 zeigt eine schematische Gesamtübersicht des Experimentes.

Abbildung 6-3: Schematische Gesamtübersicht des Experiments 06 i.A. an (Hebzibah *et al.*, 2022, S. 2)

Dabei unterscheidet man grundsätzlich zwischen dem sogenannten Jamming und Spoofing von GNSS Signalen. Bei Jamming Angriffen handelt es sich um Störaussendungen, mit dem Ziel, GNSS Signale zu überlagern und somit den GNSS Empfang für Empfänger zu stören, wodurch dieser keine Positions-, Geschwindigkeits- oder Zeitlösung berechnen kann. Beim sogenannten

Spoofing von GNSS Signalen geht es darum, gezielt authentische GNSS Signale zu imitieren, mit dem Ziel, einen Integritätsverlust der Positions-, Geschwindigkeits- und Zeitinformation herbeizuführen (Bandagadde *et al.*, 2024, S. 44). Die weltraumbasierte Interferenz-Überwachung mittels LEO Satelliten bietet gegenüber terrestrischen Empfängern einen einzigartigen Blickwinkel mit globaler Perspektive auf Interferenzmuster in hoher Auflösung. Das System besteht aus einem GNSS Empfänger, einer Nadir (zur Erde gerichteten) - sowie Zenit (vom Erdmittelpunkt weg gerichteten) - orientierten Antenne, und einer zentralen GNSS Signalaufzeichnungseinheit für das Aufnehmen von Interferenzsignalen im L1 (Frequenzband bei 1575,42 MHz) und L5 (Frequenzband bei 1176,45 MHz) Band mit einer Bandbreite von jeweils 20 MHz über die Nadir Antenne. Parallel dazu können über die Zenit-Antenne GNSS Signale aufgezeichnet werden, um im Post-Processing (nachträgliche Datenverarbeitung) eine Positions-, Geschwindigkeits- und Zeitlösung des Satelliten zu erhalten (Bandagadde *et al.*, 2024, S. 46). Die Zenit-orientierte Antenne besteht aus einer L1/L5-Patch-Antenne mit einer Bandbreite von 20 MHz und einer -3 dB-Strahlbreite von 90°, die zur Optimierung der Empfangseffizienz bei breiter GNSS Konstellationsabdeckung entwickelt wurde. Parallel dazu erfasst eine Nadir-orientierte Antenne mögliche Störsignale von der Erdoberfläche (Duetsch *et al.*, 2024, S. 4). Das System tastet die HF-Eingangssignale ab und speichert die IQ-Daten im internen Speicher. Nach einer definierten Aufzeichnungszeit werden die wissenschaftlichen Rohdaten über den X-Band Downlink zur Bodenstation übertragen und mittels spezialisierter Softwaretools des Instituts weiterverarbeitet, um detektierte Störquellen mit Hilfe von Methoden der Laufzeitmessung und Dopplerfrequenzverschiebung der Signale auf dem Weg zwischen Emitter und Satelliten anzuwenden. Ziel hierbei ist es, Rückschlüsse auf den Ort der Störquelle zu geben und darüber hinaus die Signaleigenschaften weiter zu charakterisieren. Weiterführende Informationen sind in (Duetsch *et al.*, 2022; Hebzibah *et al.*, 2022; Bandagadde *et al.*, 2024; Duetsch *et al.*, 2024) zu finden, die verschiedene technische Aspekte und Anwendungsbereiche des Experiments detailliert beschreiben.

6.3 Validierungsergebnisse

Die Ergebnisse der Validierung werden im Folgenden aus zwei Perspektiven vorgestellt. In einem ersten Schritt werden quantitative Validierungsergebnisse präsentiert. Hierbei wird aufgezeigt, welche Anzahl und Art von Unsicherheiten durch den Einsatz der Methodik in den untersuchten dokumentenbasierten Daten und Informationen in den verschiedenen Analysephasen identifiziert und im Rahmen der initialen Validierung reduziert werden konnten. Die zweite Perspektive beinhaltet die Darstellung der qualitativen Validierungsergebnisse. Diese umfassen die Bewertung der acht Validierungskriterien (K1-K8) durch das Modellierungsteam und den SE- & Domänen-Spezialisten. Dabei gibt jede beteiligte Rolle eine Bewertung mittels einer fünfstufigen Likert-Skala zu den Kriterien ab, zu welchen sie aussagefähig ist. Ergänzend zu den numerischen Bewertungen werden die schriftlichen Kommentare der Anwender zum Einsatz der Methodik vorgestellt. Das Erfolgskriterium (K8) wird vom SE- & Domänen-Spezialisten bewertet, da dieser als Vertreter des Untersuchungsgegenstandes eine Kundenperspektive einnimmt und somit beurteilen kann, inwiefern die Methodik die Vorteile von MBSE zur Bewältigung der wahrgenommenen Herausforderungen im Entwicklungsprozess des betrachteten Subsystems nutzbar macht.

Quantitative Validierungsergebnisse

Entsprechend dem in Abbildung 6-1 dargestellten Validierungsvorgehen wurde die ITPE-Methodik in einem fünfphasigen Prozess angewendet. Die systematische Anwendung erfolgte durch das Modellierungsteam unter Begleitung des SE- & Domänen-Spezialisten, wobei jede der fünf Analysemethoden gemäß dem zweistufigen Vorgehen aus Verifikation und Validierung untersucht wurde. Die initiale Validierung umfasste drei Workshops sowie acht ergänzende Iterationssitzungen. Der erste Workshop diente der Einführung der Beteiligten in die ITPE-Methodik und der Etablierung der kooperativen Arbeitsumgebung zwischen Methodik Entwickler, Modellierungsteam und SE- & Domänen-Spezialist. Im zweiten Workshop wurden die ersten Ergebnisse der systematischen Unsicherheitsidentifikation behandelt, die durch die initiale Modellerstellung entstanden waren. Im Rahmen dieses Workshops wurden die Checkpoints der Anforderungsanalyse und der Systemkontextanalyse abgearbeitet. Im dritten Workshop wurden die Checkpoints der Verhaltensanalyse, Funktionsanalyse und Strukturanalyse behandelt. Die zwischen den Workshops durchgeführten Iterationssitzungen gewährleisteten eine kontinuierliche Klärung Methodik-spezifischer Fragen des Modellierungsteams und waren ein wesentlicher Bestandteil der Methodik-Verifikation. Die systematische Anwendung der ITPE-Methodik in den untersuchten dokumentenbasierten Daten und Informationen führte über alle fünf Analysephasen zur Identifikation von insgesamt 113 Unsicherheiten, deren Aufschlüsselung in Tabelle 6-2 dargestellt ist. Die Tabelle enthält eine detaillierte Aufschlüsselung der Unsicherheitstypen wie Unvollständigkeit, Ungenauigkeit, Inkonsistenz, Diskrepanz, Ambiguität/Mehrdeutigkeit und Unklarheit/Vagheit in den Bereichen Anforderung, Systemkontext, Verhalten, Funktion und Struktur. Die beiden Kreisdiagramme in den Abbildungen 6-4 und 6-5 bieten eine visuelle Darstellung der quantitativen Ergebnisse. Abbildung 6-4 zeigt die Verteilung der Unsicherheiten in Abhängigkeit der durchgeführten Analysemethode. Abbildung 6-5 ist eine visuelle Darstellung des Anteils der jeweiligen identifizierten Unsicherheitsart an der Gesamtzahl an identifizierten Unsicherheiten.

Tabelle 6-2: Übersicht über identifizierte Unsicherheiten

	Anforderungs- analyse	Systemkontext- analyse	Verhaltens- analyse	Funktions- analyse	Struktur- analyse	Σ
Unvollständigkeit	10	15	15	5	26	71
Ungenauigkeit	3	0	1	0	0	4
Inkonsistenz	1	3	1	0	2	7
Diskrepanz	0	1	3	0	0	4
Ambiguität	6	5	1	0	4	16
Vagheit	5	5	0	0	1	11
Gesamt	25	29	21	5	33	113

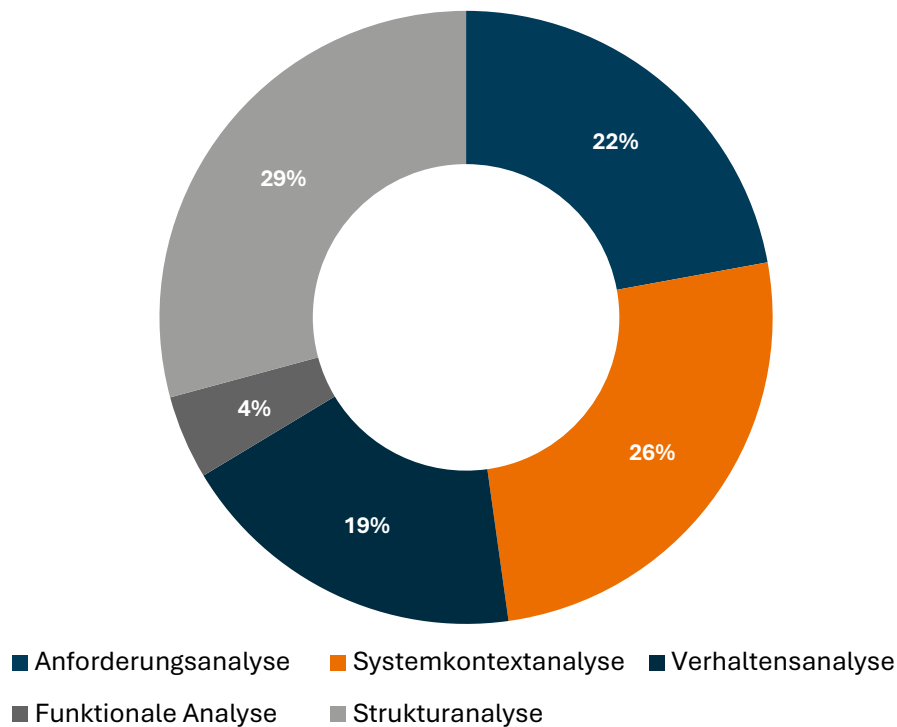


Abbildung 6-4: Verteilung der Unsicherheiten in Abhängigkeit der Analysemethode

Die in Abbildung 6-4 dargestellte Verteilung verdeutlicht, dass im Rahmen der Strukturanalyse mit 29 % aller identifizierten Unsicherheiten der höchste Anteil ermittelt wurde, gefolgt von der Systemkontextanalyse mit 26 % aller Unsicherheiten. Die Anforderungsanalyse weist mit 22 % den dritthöchsten Anteil auf, während die Verhaltensanalyse mit 19 % im mittleren Bereich angesiedelt ist. Deutlich abgesetzt zeigt die funktionale Analyse mit lediglich 4 % den geringsten Anteil identifizierter Unsicherheiten. Damit lässt sich bis auf die Funktionsanalyse eine weitgehend ausgeglichene Verteilung in Abhängigkeit der Analysemethode festhalten. Die in Abbildung 6-5 dargestellte Verteilung in Abhängigkeit der Unsicherheitstypen zeigt eine deutliche Dominanz der Unvollständigkeit, die mit 63 % den weitaus größten Anteil aller identifizierten Unsicherheiten ausmacht. Mit nennenswerten Abstand folgen Ambiguität mit 14 % und Vagheit mit 10 % der Gesamtunsicherheiten. Die verbleibenden Unsicherheitstypen zeigen folgende Verteilung: Ungenauigkeit mit 6 %, Diskrepanz mit 4 % und Inkonsistenz mit 3 % bilden die kleineren Kategorien der identifizierten Unsicherheiten.

Im Folgenden wird zum Verständnis der präsentierten Ergebnisse auf den Umfang der Betrachtungen im Rahmen der durchgeführten Validierung eingegangen. In der ersten Analysephase der Anforderungsanalyse umfasste die Datengrundlage sämtliche Anforderungen an das betrachtete Experiment, die im Datenmanagement-Werkzeug des Projektes und den Schnittstellen-Kontroll-Dokumenten (Interface Control Document, ICD) enthalten waren. Ergänzt wurde diese Sammlung um experimentübergreifende Anforderungen, wodurch zwei Anforderungen aus einem weiteren Experiment des Projektes identifiziert wurden. Von 25 identifizierten Unsicherheiten konnten 22 durch Ideenfindungssitzungen im zweiten Workshop reduziert werden. Im Rahmen der zweiten Phase, der Systemkontextanalyse, werden, wie bereits in Kapitel 5.4.3 beschrieben, sieben Arten von Systemkontexten durch die Methodik standardmäßig vordefiniert. Für die durchgeführte initiale Validierung wurde der Schwerpunkt auf die Analyse des Betriebskontextes gelegt, da für diesen Systemkontext in der Dokumentation eine große Menge an Daten und Informationen für die Modellierung verfügbar war.

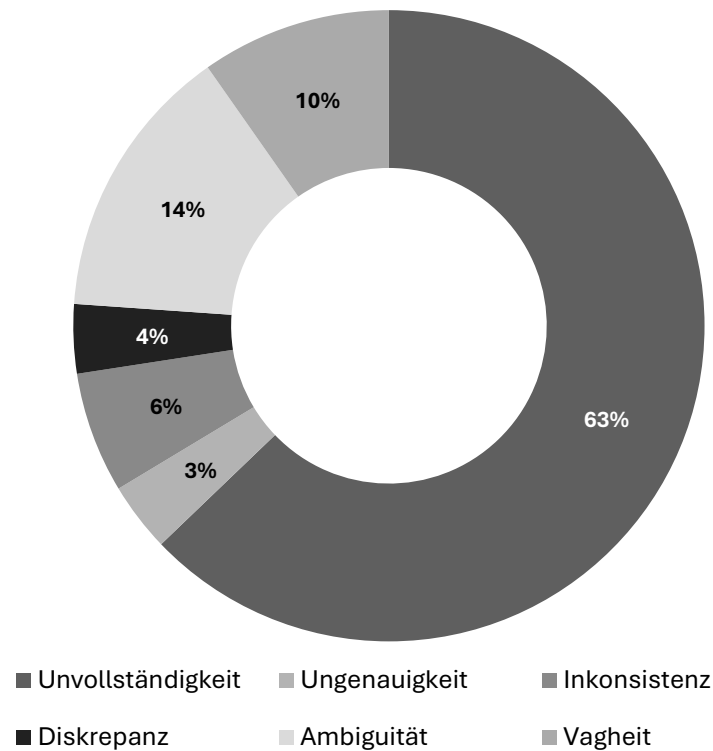


Abbildung 6-5: Verteilung der Unsicherheiten in Abhängigkeit der Art der Unsicherheit

Eine Untersuchung aller vordefinierten Systemkontexte hätte den Rahmen der geplanten Validierung nennenswert überschritten. Insgesamt wurden 29 Unsicherheiten identifiziert, von denen fünf während des Workshops reduziert werden konnten. In der dritten Analysephase, der Verhaltensanalyse, erfolgte nach Identifikation von acht Anwendungsfällen aus den vorhandenen dokumentenbasierten Daten und Informationen eine Vertiefung des Anwendungsfalls "Detection of GNSS interface sources" bzw. "Erkennung von GNSS-Schnittstellenquellen" durch acht spezifizierte Aktivitäten. Von den 21 identifizierten Unsicherheiten konnten sechs Unsicherheiten reduziert und zwei identifizierte Unsicherheiten an externe Parteien delegiert werden. Die vierte Analysephase – die Funktionsanalyse – war durch das vollständige Fehlen einer funktionalen Architektur in der bestehenden Dokumentation geprägt. Diese kritische Unsicherheit wurde durch die Entwicklung eines funktionalen Strukturdiagramms in einer Ideenfindungssitzung mit dem Experiment adressiert. Die Nichtverfügbarkeit von funktionalen Schnittstelleninformationen limitierte die weitere Analyse im Rahmen der initialen Validierung, sodass nur fünf Unsicherheiten identifiziert wurden, von denen zwei reduziert werden konnten. In der fünften Analysephase der Strukturanalyse wurden an einem ausgewählten Subsystem, dem L1/L5-GNSS-Zenitantennen-Subsystem, 33 Unsicherheiten im Systemstrukturdiagramm identifiziert, von denen acht reduziert und drei externen Parteien zugewiesen werden konnten. Abbildung 6-6 zeigt exemplarisch die Definition von zwei Unsicherheiten der Kategorie Unvollständigkeit, die im Rahmen der Strukturanalyse identifiziert wurden, im ibd-Diagramm des L1/L5-GNSS-Zenitantennen-Subsystems. Die linke Unsicherheit (SA3) dokumentiert fehlende Informationen in Bezug auf die Definition der Verbindung zweier Elemente. Die rechte Unsicherheit (SA4) bezieht sich auf das Fehlen von expliziten Werten im Rahmen der Beschreibung der thermischen Schnittstelle. Bei der Abbildung handelt es sich um einen Ausschnitt des modellierten ibd-Diagramms des betrachteten Subsystems.

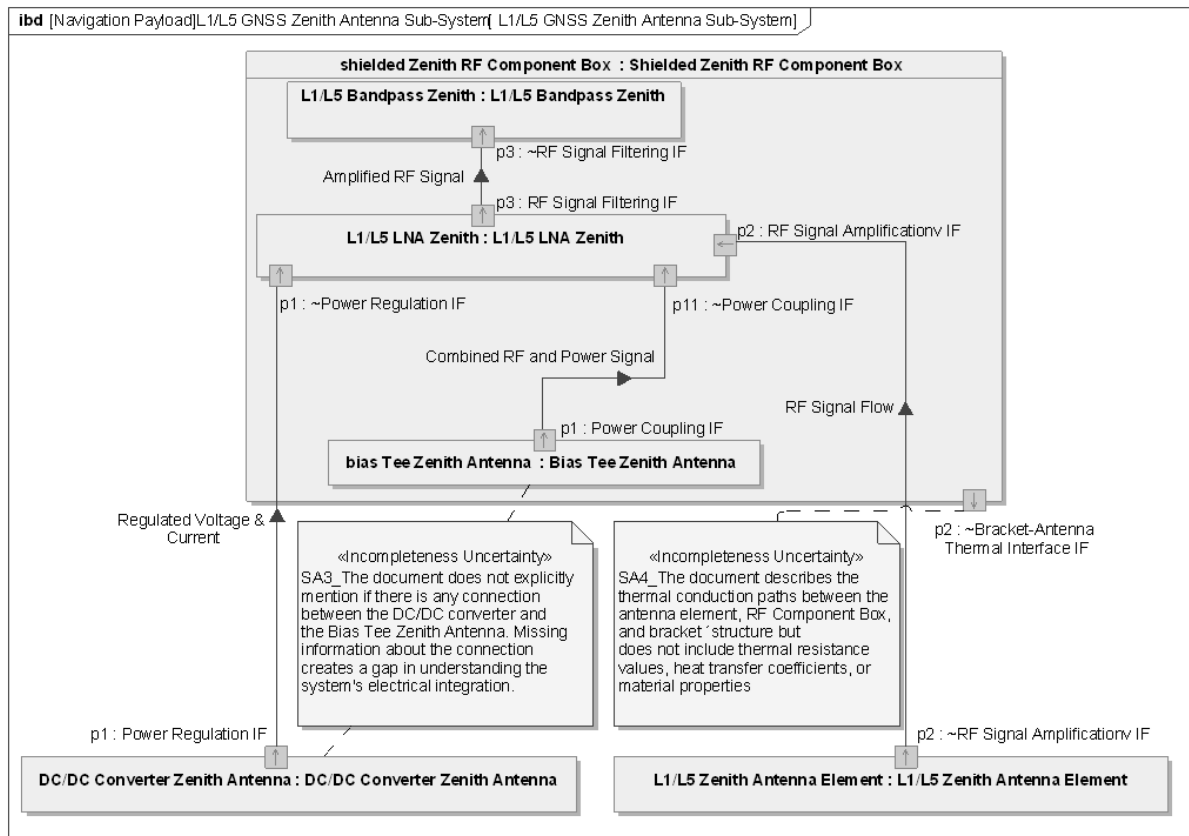


Abbildung 6-6: Ausschnitt aus dem ibd des L1/L5-GNSS-Zenitantennen-Subsystems

Abschließend wird die in Tabelle 6-3 dokumentierte Bilanz der reduzierten und zugewiesenen Unsicherheiten betrachtet, welche zeigt, dass von den 113 identifizierten Unsicherheiten 43 durch entsprechende Maßnahmen reduziert (38 %) und 5 zur Lösung an externe Parteien delegiert werden konnten. Dies entspricht einer Reduktionsrate von 43 % der durch den Einsatz der Methodik identifizierten Unsicherheiten in den untersuchten dokumentenbasierten Daten und Informationen. Die in Abbildung 6-7 dargestellte phasenspezifische Aufschlüsselung zeigt Reduktionsraten von 88 % in der Anforderungsanalyse, 33 % in der Strukturanalyse, 17 % in der Systemkontextanalyse, 38 % in der Verhaltensanalyse und 40 % in der Funktionsanalyse.

Tabelle 6-3: Bilanz der reduzierten und zugewiesenen Unsicherheiten

	Anforderungs-analyse	Systemkontext-analyse	Verhaltens-analyse	Funktions-analyse	Struktur-analyse	Σ
Unsicherheiten identifiziert	25	29	21	5	33	113
Unsicherheiten reduziert	22	5	6	2	8	43
Unsicherheiten zugewiesen	0	0	2	0	3	5

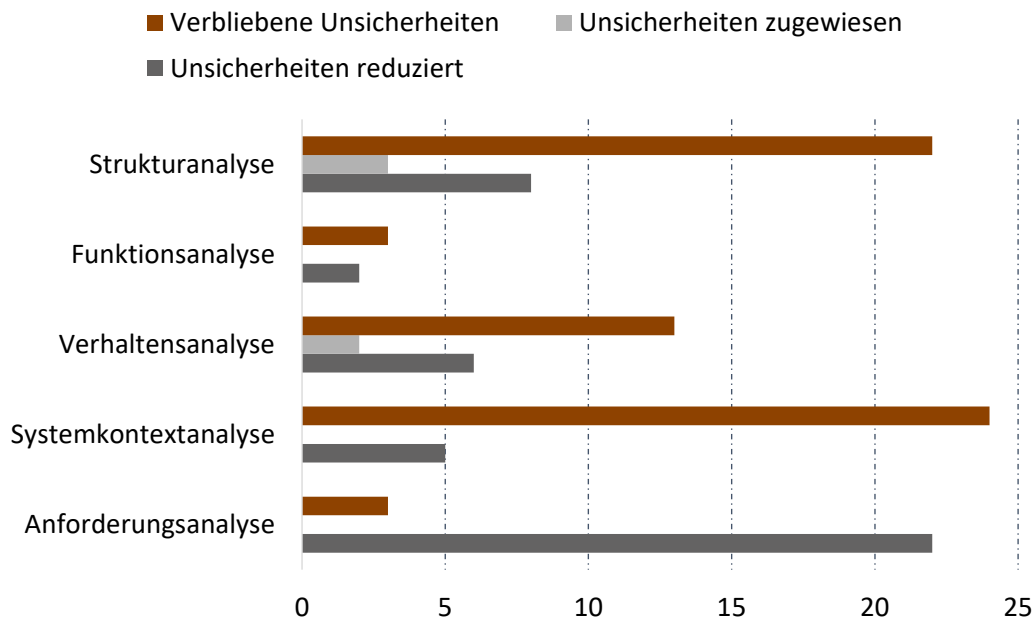


Abbildung 6-7: Reduktion und Zuweisung von Unsicherheiten in Abhängigkeit des Analysegegenstandes

Qualitative Validierungsergebnisse

Im Folgenden werden die qualitativen Ergebnisse der initialen Validierung präsentiert. Zunächst wird in Tabelle 6-4 die Bewertung der Validierungskriterien auf Basis einer 5-Punkte-Likert-Skala durch die Teilnehmer präsentiert. Hierbei gibt jede beteiligte Rolle eine Bewertung zu den Kriterien ab, zu welchen sie aussagefähig ist. Dabei stehen die Abkürzungen M-T 1/2 für die beiden Modellierungsteammitglieder und SE & D-T für den SE- & Domänen-Spezialisten. Anschließend werden die schriftlichen Kommentare der Anwender zum Methodik-Einsatz vorgestellt.

Tabelle 6-4: Ergebnisse der Kriterienbewertung

Übertragbarkeit von D & I in eine modellbasierte Umgebung → Grundlegendes Anwendungskriterium					
K1: Für die Übertragung dokumentenbasierter Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojekts aus verschiedenen Quellen in eine modellbasierte Umgebung stehen alle notwendigen methodischen und repräsentativen Elemente zur Verfügung. → Anwendbarkeit und Vollständigkeit					
M-T 1	5	4	3	2	1
M-T 2	5	4	3	2	1
Identifikation von Unsicherheiten in Daten und Informationen → Forschungsfrage 1					
K2: Es stehen alle notwendigen vorgehenstechnischen und repräsentativen Elemente zur Verfügung, um ein systematisches Vorgehen bei der Modellbildung zu gewährleisten. → Anwendbarkeit und Vollständigkeit					
M-T 1	5	4	3	2	1
M-T 2	5	4	3	2	1

K3: Es werden durch den Einsatz der Methodik Unsicherheiten in Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojektes identifiziert. → Wirksamkeit					
M-T 1	5	4	3	2	1
M-T 2	5	4	3	2	1
SE & D-T	5	4	3	2	1
Reduktion von Unsicherheiten in Daten und Informationen → Forschungsfrage 2					
K4: Der Einsatz der Methodik ermöglicht die Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojektes. → Wirksamkeit					
M-T 1	5	4	3	2	1
M-T 2	5	4	3	2	1
SE & D-T	5	4	3	2	1
Unterstützung der Wissensgenerierung → Forschungsfrage 3					
K5: Die Methodik unterstützt die Wissensgenerierung im Entwicklungsprojekt. → Wirksamkeit					
M-T 1	5	4	3	2	1
M-T 2	5	4	3	2	1
SE & D-T	5	4	3	2	1
Einfache und korrekte Umsetzung des beschriebenen Vorgehens → Übergreifendes Anwendungskriterium					
K6: Die Methodik ist in Hinblick auf eine einfache und korrekte Verfahrensbefolgung in einem realen Anwendungsfall der Satellitenentwicklungsdomäne einsetzbar. → Einfachheit und Verständlichkeit					
M-T 1	5	4	3	2	1
M-T 2	5	4	3	2	1
Konsistenz → Grundlegendes Anwendungskriterium					
K7: Es besteht eine konsistente Terminologie in der Methodik und ihren Elementen.					
M-T 1	5	4	3	2	1
M-T 2	5	4	3	2	1
Nützlichkeit → Erfolgskriterium					
K8: Die Methodik erfüllt ihren Zweck.					
SE & D-T	5	4	3	2	1

Definition Skala:

5 (Grün) = vollständig erfüllt - Kriterium wird umfassend und effektiv erfüllt

4 (Hellgrün) = weitgehend erfüllt - Kriterium wird gut erfüllt, kleinere Verbesserungen möglich

3 (Gelb) = teilweise erfüllt - Kriterium wird grundsätzlich erfüllt, aber mit Einschränkungen

2 (Orange) = kaum erfüllt - Kriterium wird nur ansatzweise erfüllt, erhebliche Mängel

1 (Rot) = nicht erfüllt - Kriterium wird nicht oder völlig unzureichend erfüllt

Stellungnahme Modellierungsteammitglied 1 (M-T1), übersetzt aus dem Englischen:

(Im Anhang A-4 ist der englische Originaltext dokumentiert.)

Die Bewertung der Methodik anhand der definierten Kriterien zeigt ihre Anwendbarkeit und Wirksamkeit im Kontext von Satellitenentwicklungsprojekten. Das erste Kriterium ist vollständig erfüllt, da die Methodik alle erforderlichen Methoden und Werkzeuge bereitstellt, um Informationen aus verschiedenen Dokumenten in eine modellbasierte Umgebung zu übertragen. Dadurch wird sichergestellt, dass Daten und Informationen reibungslos und zuverlässig übertragen werden. Das zweite Kriterium ist weitgehend erfüllt, da die verfahrenstechnischen Aspekte vollständig und robust sind. Allerdings gibt es eine kleine Lücke bei den repräsentativen Elementen, insbesondere im Bereich der Ontologie. Dieser Teil muss weiter ausgearbeitet werden, um alle relevanten Konzepte und Beziehungen in der Satellitenentwicklung abzudecken. Das dritte Kriterium, das sich auf die Ermittlung von Unsicherheiten bezieht, ist vollständig erfüllt. Die Methodik hat sich als 100 % wirksam erwiesen, um Unsicherheiten in der gesamten Projektdokumentation systematisch aufzudecken. Ebenso wurde das vierte Kriterium, das sich auf die Verringerung dieser Unsicherheiten konzentriert, vollständig erfüllt. Während der Workshop-Sitzungen ermöglichte die Methodik dem Team, die identifizierten Unsicherheiten erfolgreich zu mindern und damit die Projektdaten und -informationen zuverlässiger zu machen. In Bezug auf das fünfte Kriterium unterstützte die Methodik die Wissensgenerierung innerhalb des Teams in hohem Maße. So ermöglichte sie beispielsweise während der Funktionsanalyse die Entwicklung einer funktionalen Architektur auf der Grundlage der verfügbaren Anforderungen, was zu neuen Ideen und Erkenntnissen führte. Das sechste Kriterium, das sich auf die Benutzerfreundlichkeit und Klarheit der Methodik in der praktischen Anwendung bezieht, ist ebenfalls vollständig erfüllt. Die Methodik wurde erfolgreich im SeRANIS-Satellitenentwicklungsprojekt angewendet, wo sie es dem Team ermöglichte, zahlreiche Unsicherheiten effizient zu identifizieren und zu mindern. Das siebte Kriterium, die konsistente Verwendung von Terminologie, ist ebenfalls vollständig erfüllt. Durch mehrere interne Überprüfungssitzungen wurden terminologische Problemstellungen identifiziert und gelöst, wodurch die Methodik klar und konsistent wurde. Schließlich erfüllt die Methodik ihren beabsichtigten Zweck vollständig. Ihre Anwendung in einem realen Satellitenentwicklungsprojekt hat gezeigt, dass sie die Identifizierung und das Management von Unsicherheiten sowie die Generierung von Wissen unterstützen kann und damit zum Erfolg des Projekts beiträgt.

Stellungnahme Modellierungsteammitglied 2 (M-T2):

Die angewandte Methodik ermöglicht eine erfolgreiche Identifikation von Unsicherheiten in den Daten und Informationen von Satellitenprojekten. Sie schafft einen strukturierten Rahmen, um erkannte Unsicherheiten gezielt zu adressieren und entsprechende Maßnahmen zur Risiko-

minderung einzuleiten. Die Durchführung der Methodik ist mit einem erhöhten Arbeitsaufwand verbunden, insbesondere wenn die Anwender keine ausgewiesenen Experten in der Methodenumsetzung sind. Dies legt nahe, dass eine gezielte Schulung oder Anleitung zur Anwendung der Methodik den Implementierungsaufwand reduzieren und die Effektivität steigern kann. Die klare und korrekte Zuordnung der Rollen vor der Anwendung der Methodik ist essenziell für eine effektive Anwendung. Die verschiedenen definierten Kontrollpunkte innerhalb der Methodik sollten so gestaltet sein, dass die Doppelbesetzung einer Rolle zu keinem Außerkraftsetzen der Methodik führen kann. Die Auswahl und der Umfang der zur Analyse herangezogenen Dokumente und Informationen sollten vorab gemeinsam mit den Projektpartnern abgestimmt und festgelegt werden. Zusätzlich sollte nicht ausschließlich auf formale Dokumentation zurückgegriffen werden, sondern auch bereichsspezifisches Expertenwissen in mündlicher Form systematisch integriert werden. Die Methodik sollte daher einen Mechanismus zur Validierung und Einbindung informeller Informationen vorsehen. Die Erfahrungen und fachlichen Hintergründe der beteiligten Personen prägen maßgeblich die Ausgestaltung der Unsicherheitsanalyse. Es ist daher sinnvoll, die Methodik so anzuwenden, dass die fachliche Spezialisierung des Domänenexperten und des Modellierers eine hohe Übereinstimmung aufweist (z.B. beide aus dem Maschinenbau oder aus der Softwareentwicklung). Diese fachliche Kongruenz fördert einen effektiven Informationsaustausch und gewährleistet eine präzise Systemabbildung durch gemeinsame Terminologie und Problemverständnis. Die praktische Anwendung der Methodik demonstriert eine bemerkenswerte Adaptionsfähigkeit, die auch eine erfolgreiche Implementierung in bereits fortgeschrittenen Projektphasen ermöglicht. Nach einer initialen Anpassungsphase konnte die Methodik erfolgreich in ein laufendes Projekt integriert werden, wobei sie nachweislich zur Stärkung des systemischen Denkansatzes beitrug. Diese Beobachtung unterstreicht das Potenzial der Methodik für verschiedene Projektgrößen und Implementierungszeitpunkte, was eine erhebliche Vereinfachung der praktischen Anwendung ermöglichen könnte. Die in der Dokumentation beschriebenen Möglichkeiten zur methodischen Anpassung bieten grundsätzlich eine gute Flexibilität für verschiedene Anwendungskontexte. In der praktischen Umsetzung zeigt sich jedoch Optimierungspotenzial bei der klaren Anwendungsanleitung, welche Methodenschritte als Kernelemente und welche als optionale Erweiterungen zu verstehen sind. Diese Unsicherheit führt zu einem erhöhten Arbeitsaufwand, weil entweder mühsam geklärt werden muss, ob der Schritt weggelassen werden kann, oder alle Schritte vollständig durchgeführt werden.

Stellungnahme SE- & Domänen-Spezialist (SE & D-T):

Die Methode zur modellbasierten Erfassung des Experiments 6 „GNSS-SDR“ konnte erfolgreich und vollumfänglich angewandt werden. So konnten die verschiedenen Arten von Unsicherheiten in den Daten und Information klar identifiziert und durch Nachbearbeitung/Umformulierung beseitigt, und somit die Güte der Informationen zur Beschreibung des Experiments nachhaltig gesteigert werden. Dies wurde eindrücklich bei der Anforderungsanalyse herausgestellt, in welcher die Anforderungsbeschreibung zu unspezifisch, mehrdeutig oder unvollständig war. Des Weiteren unterstützt die Methodik die Wissensgenerierung in dem Forschungsprojekt, indem durch systematisches Vorgehen mögliche Unsicherheiten in der Beschreibung (z. B. einer funktionalen Experimenteigenschaft) aufgedeckt und damit konkrete Fragen zur Klärung und Bearbeitung aufgeworfen wurden. Auch Zusammenhänge zwischen verschiedenen z. B. funktionalen Blöcken können mit Hilfe der Methodik identifiziert und klar benannt werden. Eindrucksvoll konnte die Methode den operationellen Kontext in verschiedenen Segmenten aufzeigen, die in Interaktion mit

dem Experiment stehen. So konnten Einheiten wie z. B. „Ground Segment“ im Sinne von erdgebundenen GNSS-Interferenzen oder „Observation Payload“ im Sinne von in Bodenrichtung orientierter Antenne zur Erfassung von Interferenzen benannt und somit die Informationsflussrichtungen zwischen Einheiten zielgerichtet erfasst werden. Dieses Vorgehen ermöglicht es weitere Unsicherheiten aufzudecken und durch eine gezieltere Beschreibung und Formulierung zu minimieren. Insgesamt konnte durch Anwenden der Methodik auf das Experiment eine deutliche Verbesserung in der Experimentbeschreibung festgestellt werden. Die Methodik kann zielführend auf Satellitenprojekte angewandt werden und stellt dem Experimentator ein sehr nützliches Werkzeug zur Verfügung, um das Experiment modellbasiert, eindeutig und widerspruchsfrei zu erfassen. Durch regelmäßige Feedback-Runden zwischen dem Experimentator und Modellierungsteam können iterativ offene Punkte geklärt und anhand von agilen Projektmanagementmethoden bearbeitet werden, sodass der Reifegrad des Experiments kontinuierlich im Lauf der Projektphase gesteigert wird. Deshalb erfüllt die Methodik vollumfänglich ihren Zweck.

6.4 Diskussion

Die folgende Diskussion reflektiert die Ergebnisse der initialen Validierung der ITPE-Methodik aus unterschiedlichen Blickwinkeln. Dabei wird zunächst das Validierungsvorgehen selbst kritisch beleuchtet, bevor die Beantwortung der drei Forschungsfragen analysiert wird. Anschließend werden die Zweckerfüllung und der Nutzen der Methodik bewertet. Abschließend erfolgt eine kritische Auseinandersetzung mit den Einschränkungen der Methodik.

Schlussfolgerung zum Validierungsvorgehen

Die Anwendung des systematischen DS-II-Prozesses gemäß (Blessing und Chakrabarti, 2009) als methodische Grundlage ermöglichte eine strukturierte und nachvollziehbare Evaluation der Methodik. Dieser etablierte Rahmen stellte eine wichtige methodische Unterstützung dar, da er einen strukturierten Leitfaden zur Verfügung stellte und dadurch wesentliche Betrachtungspunkte für die Durchführung einer erfolgreichen Validierung definierte. Das in Kapitel 6.1 beschriebene Validierungsvorgehen sah vor, dass jede Analysemethode in einem iterativen Prozess zunächst verifiziert und anschließend validiert wird, wodurch das gesamte Validierungsvorgehen in fünf aufeinander aufbauende Phasen gegliedert war. Das Vorgehen umfasste eine systematische Dokumentation aller relevanten Aspekte, die vor allem Anwendung, Vollständigkeit und Konsistenz der Methodik betrafen und während der Validierungsdurchführung identifiziert wurden. Diese Dokumentation erfolgte sowohl tabellarisch als auch durch die Versionierung der einzelnen Modellstände und gewährleistet somit die vollständige Nachvollziehbarkeit aller vorgenommenen Änderungen. Durch diesen strukturierten Ansatz konnten einerseits bereits während der initialen Validierung kontinuierliche Verbesserungen an der Methodik vorgenommen werden. Andererseits bietet die umfassende Dokumentation eine fundierte Ausgangsbasis für weiterführende Entwicklungstätigkeiten an der Methodik. Das strukturierte Vorgehen ermöglichte nicht nur die Schaffung quantitativer Ergebnisse zur Bestätigung der Wirksamkeit der Methodik, sondern versetzte die Teilnehmer durch die intensive, geführte Auseinandersetzung mit der Methodik auch in die Lage, eine fundierte qualitative Bewertung anhand der definierten Kriterien vorzunehmen. Diese qualitative Betrachtungsebene der Entwicklungsunterstützung stellt insbesondere bei einer Methodik, in welcher der Anwender eine zentrale Rolle spielt, eine relevante Erkenntnisquelle dar. Sie liefert wichtige Einsichten sowohl bezüglich des wahrgenommenen Nutzens der

Methodik als auch für zukünftige Entwicklungsaktivitäten. Besonders hervorzuheben ist die Einbeziehung externer Teilnehmer durch das unabhängige Modellierungsteam und den SE- & Domänen-Spezialisten, wodurch Verzerrungseffekte minimiert und die Objektivität der Bewertung erhöht wurde. Der Methodik-Entwickler nahm in den Workshops bewusst eine beobachtende Rolle ein, mit Ausnahme des ersten Workshops, in welchem eine Einführung in die Methodik erfolgte. An den Iterationsschleifen, die primär der kontinuierlichen Methodik-Verbesserung dienten, beteiligte sich der Entwickler hingegen aktiv inhaltlich.

Kritisch anzumerken ist jedoch die begrenzte Reichweite der durchgeführten Validierung, die sich auf ein einzelnes Subsystem eines Satellitenentwicklungsprojektes beschränkte. Während dieser Ansatz für eine initiale Validierung angemessen ist, schränkt er die Aussagefähigkeit bezüglich der Generalisierbarkeit der Ergebnisse ein. Zukünftige Validierungsstudien sollten eine breitere Anwendung über mehrere Projekte und verschiedene Institutionen umfassen. Dabei könnte auch der Einsatz in Projekten unterschiedlicher Entwicklungsphasen eine sinnvolle Erweiterung des Validierungsportfolios darstellen. Auch eine Variation der jeweiligen Teamgröße der drei Rollen stellt eine sinnvolle Erweiterung des Testfeldes dar. Eine solche umfassende Validierungsstudie und die damit einhergehende Weiterentwicklung der Methodik wird in Kapitel 7 im Ausblick dieser Arbeit nochmals thematisiert.

Forschungsfrage 1: Identifikation von Unsicherheiten

Die erste Forschungsfrage beschäftigt sich mit spezifischen Unsicherheiten, die in Daten und Informationen vorkommen, welche mit einem traditionellen dokumentenbasierten Systems Engineering-Ansatz erstellt wurden. Die Frage lautet: *Wie können Unsicherheiten in vorhandenen dokumentenbasierten Daten und Informationen im Entwicklungsprozess von Satellitenprojekten mithilfe eines modellbasierten methodischen Vorgehens identifiziert werden?* Die Entwicklung eines methodischen Ansatzes stellt somit grundsätzlich eine Möglichkeit dar, diese Frage zu beantworten. Um als Methodik eine Antwort auf die erste Forschungsfrage zu verkörpern und durch den Einsatz der Methodik Unsicherheiten in Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojektes zu identifizieren (K3), ist es notwendig, dass die dafür entwickelte Methodik alle notwendigen vorgehenstechnischen und repräsentativen Elemente zur Verfügung stellt, um ein systematisches Vorgehen bei der Modellbildung zu gewährleisten (K2). Die entwickelte Methodik soll des Weiteren für die Übertragung dokumentenbasierter Daten und Informationen eines Satellitenentwicklungsprojekts aus verschiedenen Quellen in eine modellbasierte Umgebung alle notwendigen methodischen und repräsentativen Elemente zur Verfügung stellen (K1). Die ITPE-Methodik demonstrierte ihre Wirksamkeit durch die Identifikation von insgesamt 113 Unsicherheiten über alle fünf Analysephasen hinweg und erfüllt damit K3. Die quantitativen Ergebnisse belegen, dass die Methodik die Fähigkeit besitzt, die systematische Identifikation von Unsicherheiten in Daten und Informationen einer bestehenden Projektdokumentation zu unterstützen. Auch die Bewertung der Methodik durch die Teilnehmer untermauert die vollständige Erfüllung dieses Kriteriums. Alle Teilnehmer haben dieses Kriterium als vollständig erfüllt bewertet. Es wurden dabei ebenfalls unterschiedliche Arten von Unsicherheiten erfasst, wobei die Dominanz der Kategorie Unvollständigkeit mit 63% aller identifizierten Unsicherheiten auf ein systematisches Problem in der traditionellen dokumentenbasierten Entwicklung hinweist, bei dem wichtige Informationen häufig implizit bleiben oder unvollständig dokumentiert werden. Die Gewährleistung des systematischen Transfers von dokumentenbasierten Daten in eine modellbasierte Umgebung ist eine grundlegende Anwendbarkeitsanforderung an die Methodik und spielt eine

relevante Rolle für eine erfolgreiche Unsicherheitsidentifikation. Die Bewertung dieses Kriteriums durch die Teilnehmer sieht dieses als grundsätzlich bis vollständig erfüllt an. Durch den Einsatz der Methodik war die Schaffung einer strukturierten Repräsentation in SysML durch eine methodische Anleitung möglich, unterstützt durch das entwickelte ontologische Konzept. Das Modellierungsteam war in der Lage, während des Modellaufbaus bereits unbekannte Unbekannte aufzudecken und Lücken in der Dokumentation zu identifizieren und zu explizieren, die aufgrund impliziter Informationsverfügbarkeit in der Domäne entstanden sind. Wie Modellierungsteammitglied M-T2 schildert, schafft die Methodik einen strukturierten Rahmen, um erkannte Unsicherheiten gezielt zu adressieren und entsprechende Maßnahmen zur Risikominderung einzuleiten. Auch das zweite Kriterium, welches ebenfalls die Anwendbarkeit aber auch die Vollständigkeit adressiert, wurde als grundsätzlich bis weitgehend erfüllt bewertet.

Wie das Modellierungsteammitglied M-T1 schildert, wird das zweite Kriterium weitgehend erfüllt, da die verfahrenstechnischen Aspekte vollständig und robust sind. Der Teilnehmer sieht jedoch eine kleine Lücke bei den repräsentativen Elementen, insbesondere im Bereich des ontologischen Bausteins der Methodik. Hierbei ist die Erkenntnis zu berücksichtigen, dass es unwahrscheinlich ist, dass eine Ontologie perfekt sein wird (Sievers, 2023, S. 31). (Gruber, 1993b, S. 2) beschreibt in diesem Zusammenhang, dass das Bekenntnis zu einer gemeinsamen Ontologie zwar eine Garantie für Konsistenz ist, jedoch nicht für Vollständigkeit in Bezug auf Abfragen und Aussagen, die das in der Ontologie definierte Vokabular verwenden. Beim ontologischen Konzept der Methodik ist daher ebenfalls von einer kontinuierlichen Aktualisierung, Erweiterung und Bereinigung obsoleter Konzepte auszugehen, um alle relevanten Konzepte und Beziehungen in der Satellitenentwicklung abzudecken und den aktuellen Stand der Technik stetig widerzuspiegeln. Weiterhin ist kritisch anzumerken, dass die Durchführung der Methodik zumindest teilweise (M-T2) mit einem erhöhten Arbeitsaufwand verbunden war. Zusätzlich wurde vom Teilnehmer M-T2 angemerkt, dass Optimierungspotenzial bei der Anwendungsanleitung identifiziert wurde. Konkret sollte geschärft werden, welche Methodenschritte als Kernelemente und welche als optionale Erweiterungen zu verstehen sind – ein Aspekt, der ebenfalls in einem umfassenden Schulungskonzept zu berücksichtigen wäre. Diese Wahrnehmung deckt sich gut mit der Aussage, dass eine angewandte Methode grundsätzlich als soziotechnisches Konstrukt zu betrachten ist, dass sowohl die Anwender als auch deren sozialen Kontext einbezieht. Die Anwendung hängt damit sowohl von den Personen ab, die den Prozess durchführen, als auch von dem Kontext, in dem der Prozess stattfindet (Stacey *et al.*, 2025, S. 20). Dies legt nahe, dass zukünftige Bestrebungen zur Weiterentwicklung der Methodik ein umfassendes Schulungs- und Einführungskonzept entwickeln und den Anwender noch stärker in den Fokus stellen sollten. Hierbei wäre unter anderem denkbar, das Kompetenzprofil der Methodik weiter auszudetaillieren und auf dessen Grundlage gezielte Schulungskonzepte mit individualisierten Inhalten je nach Rolle zu entwickeln und einzusetzen. Ziel wäre es schließlich, durch ein vertieftes Verständnis der verfügbaren methodischen, verfahrenstechnischen und repräsentativen Elemente den wahrgenommenen Mehraufwand zu reduzieren und die Anwendungseffizienz zu steigern. Auch würde dadurch ein Beitrag zur Akzeptanz des Einsatzes der Methodik im Speziellen und von modellbasiertem Systems Engineering im Allgemeinen geleistet werden. Abschließend kann die Beantwortung der ersten Forschungsfrage basierend auf den quantitativen und qualitativen Validierungsergebnissen eindeutig positiv bewertet werden.

Forschungsfrage 2: Reduktion von Unsicherheiten

Im Rahmen der zweiten Forschungsfrage geht es um den Einsatz der Methodik zur Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen im Rahmen eines Satellitenentwicklungsprojektes (K4). Hierzu soll den Entwicklern ein Vorgehensmodell bereitgestellt werden, das Problemlösung und Ideengenerierung systematisch unterstützt. Das Vorgehensmodell integriert das zuvor erstellte Systemmodell, um schöpferische Aspekte zu fördern und gezielt zur Reduktion der identifizierten Unsicherheiten beizutragen. Die Forschungsfrage lautet explizit: *Wie kann in Satellitenentwicklungsprojekten die Reduktion von Unsicherheiten in Daten und Informationen durch einen modellgestützten, menschenzentrierten Ansatz unterstützt werden?* Auch hier zeigen die quantitativen Validierungsergebnisse, dass die entwickelte Methodik mit ihren drei Bausteinen eine Antwort auf diese Modalfrage darstellt. Durch den Einsatz der Methodik im ausgewählten Experiment konnten 43 % der identifizierten Unsicherheiten reduziert werden, und das bereits in einem verhältnismäßig kurzen Zeitraum im Rahmen einer initialen Validierung. Die Methodik besitzt mit dem ersten Baustein, dem DT-MBSE Integrationsmodell, ein Element, welches unterschiedliche Denkmechanismen unterstützt und vor allem bei der Analyse der Nutzerbedürfnisse und der Erfassung menschlicher Akteure menschenzentrierte Aspekte berücksichtigt. Ein weiterer Aspekt des DT-MBSE Integrationsmodells betrifft die Flexibilität bei der Reduzierung von Unsicherheiten im rechten Diamanten. Die einzelnen Schritte des Modells lassen sich dabei an vorhandene projektspezifische Prozesse der entwickelnden Institution sowie an Randbedingungen wie den Projektumfang anpassen. In diesem Zusammenhang hat das Modellierungsteammitglied M-T2 die Beobachtung gemacht, dass die Methodik das Potenzial besitzt, für verschiedene Projektgrößen und Implementierungszeitpunkte eingesetzt zu werden. Somit ist es möglich, vor allem bei der Reduzierung von Unsicherheiten, die einen längeren Zeitraum in Anspruch nehmen und eine Abhängigkeit zu ausstehenden Entwicklungsartefakten besitzen, sich in einen bestehenden Projektplan einzubetten und bestehende Prozesse zu nutzen. Dies betrifft vor allem die drei Schritte Ideengenerierung, Evaluation und Entscheidung. Die Schritte, die im Zusammenhang mit der Modellierung und Modellpflege stehen, lassen sich unabhängig von prozessualen Einschränkungen aus dem Entwicklungsprozess vom Modellierungsteam umsetzen. Insgesamt zeigte die Kombination aus systematischer Modellierung und kreativen Problemlösungssitzungen, dass die Methodik erfolgreich die schöpferischen Aspekte fördert, was sich auch in der Bewertung durch die Teilnehmer widerspiegelt. Die Erfüllung des Kriteriums K4 wurde als vollständig erfüllt wahrgenommen, was die Wirksamkeit der Methodik unterstreicht. Nichtsdestotrotz wäre im Rahmen möglicher zukünftiger umfassender Validierungen eine systematische Beobachtung der Einbettung in bestehende Prozesse sowie der damit einhergehenden Einschränkungen und Herausforderungen für die Weiterentwicklung der Methodik von großem Wert.

Forschungsfrage 3: Unterstützung der Wissensgenerierung

Wie bereits in Kapitel 1.2 ausgeführt und im Kriterium K5 festgehalten, zielt die dritte Forschungsfrage auf die Unterstützung der Wissensgenerierung im Rahmen des Einsatzes der Methodik ab. Die modale Fragestellung lautet: *Wie kann durch ein modellbasiertes methodisches Vorgehen die Wissensgenerierung im Entwicklungsprozess von Satellitenprojekten unterstützt werden?* Dabei umfasst Wissensgenerierung die systematische Erfassung, Strukturierung und Verknüpfung von Informationen aus dem Entwicklungskontext. Dies beinhaltet sowohl technische Systemkenntnisse als auch Einsichten zu Unsicherheiten in verfügbaren Daten und Informationen,

Stakeholder-Bedürfnissen und Anforderungen und interdisziplinären Wechselwirkungen. Durch den Einsatz der ITPE-Methodik, die ein modellbasiertes methodisches Vorgehen verkörpert, konnte ein nennenswerter Beitrag zur Wissensgenerierung im Experiment geleistet werden. Die Validierungsergebnisse bezüglich des fünften Kriteriums zeigen, dass die Teilnehmer das Kriterium als weitgehend bis vollständig erfüllt erachten und damit die Wirksamkeit der Methodik bestätigen. Hervorzuheben ist die Aussage des Modellierungsteammitglieds M-T1, dass die Methodik die Entwicklung einer funktionalen Architektur auf Grundlage verfügbarer Anforderungen ermöglichte, was zu neuen Ideen und Erkenntnissen führte. Die Stellungnahme des SE- & Domänen-Spezialisten unterstreicht diese Wirksamkeit. Der Teilnehmer nahm wahr, dass durch das systematische Vorgehen Unsicherheiten in der Beschreibung funktionaler Experimenteigenschaften aufgedeckt und damit konkrete Fragen zur Klärung aufgeworfen wurden. Dieses Aufwerfen von Fragen wurde als relevanter Mechanismus bei der Generierung neuer Wissensartefakte wahrgenommen. Einerseits war es möglich, durch die modellbasierte Verfügbarkeit von Informationen und deren Flüssen, stillschweigendes Wissen zu identifizieren und durch die systematische Nutzung der Modellierung darauf aufbauend neue Informationen zu erzeugen. Als stillschweigendes Wissen ist dabei Wissen zu verstehen, dass genutzt werden kann, ohne vollständig zu verstehen, was oder wie es gewusst wird und das möglicherweise nur in bestimmten Situationen zur Verfügung steht. Im Gegensatz dazu steht das Wissen über Dinge, von denen wir genaue mentale Repräsentationen haben, die uns bewusst sind (Stacey *et al.*, 2025, S. 18). Andererseits wurden durch die Identifikation von Unsicherheiten und die anschließende Reduktion identifizierter Unsicherheiten neue Informationen generiert, die dem Team für die weiterführende Generierung von Wissensartefakten zur Verfügung standen, was ebenfalls einen Beitrag zur Wissensgenerierung darstellt. Schließlich stellte die Verwendung standardisierter SysML-Elemente aus der Elementbibliothek eine konsistente Sprache und Struktur für die Beschreibung von Systemzusammenhängen bereit (K7). Das Entwicklungsteam konnte auf darin enthaltene Konzepte zurückgreifen und bestehende Wissenslücken schließen. Diese konsistente Struktur unterstützte den Modellaufbau in den verschiedenen Analyseperspektiven und trug zu verbessertem Systemverständnis bei (SE & D-T). Dieses Kriterium (K7) wurde ebenfalls als weitgehend bis vollständig erfüllt gewertet. Es ist jedoch anzumerken, dass mehrere interne Überprüfungssitzungen zur Auflösung terminologischer Problemstellungen im ontologischen Konzept erforderlich waren (M-T1). Abschließend wird die Aussage von (Stacey *et al.*, 2025, S. 2) aufgegriffen, dass Methoden selbst einen wichtigen Bestandteil von Ingenieurwissen darstellen. Methodenwissen kann aus verschiedenen Perspektiven betrachtet werden: als Wissen über die Methode selbst, als Fähigkeit zur Handlungsausführung oder als in die Methode eingebettetes Wissen (Stacey *et al.*, 2025, S. 16). Dies untermauert die grundsätzliche Fähigkeit einer Methodik, einen Beitrag zur Schaffung neuen Wissens zu leisten.

Zweckerfüllung der ITPE-Methodik

Der definierte Zweck der ITPE-Methodik besteht, wie in Kapitel 1.2 geschildert, die Nutzung der Vorteile von MBSE zur Bewältigung der wahrgenommenen Herausforderungen in der Satellitenentwicklung zu ermöglichen. Diese Herausforderungen umfassen Dokumentationsprobleme, Wettbewerbsdruck, Preisdruck, kürzere Entwicklungszeiten und den Umgang mit Risiko. Die Validierungsergebnisse belegen, dass die Methodik diesen Zweck vollständig erfüllt. Die Bewältigung von *Dokumentations*-Problemen lässt sich als zentrale Stärke der ITPE-Methodik formulieren, da sich insbesondere die erste und zweite Forschungsfrage mit Unsicherheiten in

bestehenden dokumentenbasierten Daten und Informationen befassen. Die systematische Identifikation von 113 Unsicherheiten in der bestehenden Projektdokumentation und deren anschließende Reduktion in einem begrenzten Zeitraum um 43 % demonstriert die Wirksamkeit der Methodik bei der Verbesserung der Dokumentationsqualität. Die strukturierte Übertragung in eine modellbasierte Umgebung schafft eine konsistente und eindeutige Informationsbasis (SE- & Domänen-Spezialist SE & D-T), wodurch die ITPE-Methodik die Vorteile von MBSE gegenüber traditionellen dokumentenbasierten Ansätzen nutzbar macht. In Bezug auf *Wettbewerbsvorteile* trägt die ITPE-Methodik durch systematische Unsicherheitsreduktion und Unterstützung der Wissensgenerierung zur Verbesserung des Reifegrades bei (SE- & Domänen-Spezialist SE & D-T). Die explizite Erfassung und Strukturierung systembezogener Informationen ermöglicht eine verlässliche Grundlage für fundierte Entscheidungen. Dies reduziert das Risiko kostspieliger Änderungen in späteren Entwicklungsphasen und leistet damit einen Beitrag zur Bewältigung von *Preisdruck*. Ein Indikator für diese Fähigkeit ist die hohe Rate reduzierter Unsicherheiten (88 %) in der Anforderungsanalyse, da Anforderungsänderungen in späteren Phasen hohe Kosten verursachen können. Die systematische Strukturierung von Informationen und explizite Erfassung von Unsicherheiten können zu einer Reduktion von Iterationsschleifen beitragen und damit positiv auf die Entwicklungseffizienz und damit auf die *Entwicklungszeiten* wirken. Hinsichtlich eines verbesserten *Risikomanagements* trägt die systematische Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten direkt zur Risikominderung bei, womit die ITPE-Methodik auch bei dieser Herausforderung die Vorteile der MBSE-basierten Systemmodellierung nutzbar macht.

Darüber hinaus manifestiert sich der Nutzen der ITPE-Methodik in der Förderung von Systemdenken, wie die Stellungnahme des zweiten Modellierungsteammitglieds (M-T2) hervorhebt, wonach die Methodik "nachweislich zur Stärkung des systemischen Denkansatzes beitrug". Ein weiterer zentraler Nutzen liegt in der Wissensexplizierung: Die Methodik unterstützt dabei, implizites Wissen explizit und strukturiert verfügbar zu machen. Der SE- & Domänen-Spezialist (SE & D-T) bestätigt, dass Zusammenhänge zwischen verschiedenen funktionalen Blöcken mit Hilfe der Methodik identifiziert und klar benannt werden können. Zusätzlich erleichtert die Verwendung einer standardisierten Modellierungssprache (SysML) die interdisziplinäre Kommunikation zwischen verschiedenen Fachdisziplinen und reduziert Missverständnisse. Schließlich ermöglicht die iterative Natur der ITPE-Methodik eine kontinuierliche Verfeinerung der Systemmodelle und leistet damit einen positiven Beitrag zur stetigen Qualitätssteigerung über den Projektverlauf.

Einschränkungen der ITPE-Methodik

Trotz der positiven Validierungsergebnisse sind mehrere Einschränkungen der ITPE-Methodik zu berücksichtigen. Die Validierung beschränkte sich auf ein einzelnes Subsystem eines Projekts, was, wie bereits eingangs beschrieben, die Aussagekraft bezüglich der Skalierbarkeit und Anwendbarkeit auf größere Systeme einschränkt. Zukünftige Studien sollten die Methodik an vollständigen und vernetzten Systemen sowie verschiedenen Projekttypen und -größen evaluieren. Ein weiterer kritischer Aspekt ist die Subjektivität der Bewertung bei den qualitativen Validierungsergebnissen, da die Kriterienbewertung primär auf subjektiven Einschätzungen und Wahrnehmungen der Beteiligten basiert. Obwohl objektive Metriken für die Kernaspekte (Unsicherheitsidentifikation und -reduktion) vorliegen, basiert die Bewertung qualitativer Aspekte wie Anwendbarkeit, Einfachheit und Verständlichkeit primär auf subjektiven Einschätzungen. Die Ressourcenintensität stellt eine zusätzliche Herausforderung dar, wie die Stellungnahme des

zweiten Modellierungsteammitglieds M-T2 zeigt, die auf einen "erhöhten Arbeitsaufwand" hinweist, "insbesondere, wenn die Anwender keine ausgewiesenen Experten in der Methodenumsetzung sind". Dies könnte die Akzeptanz und Verbreitung der Methodik in der Praxis limitieren. Darüber hinaus erfolgte die Validierung unter Verwendung einer für eine initiale Validierung geeigneten Dokumentationsqualität, weshalb die Fähigkeiten der ITPE-Methodik bei unterschiedlichen Dokumentationsqualitäten noch nicht untersucht wurden. Die Domänenspezifität stellt eine weitere Einschränkung dar, da die Methodik zwar für die Satellitenentwicklung konzipiert wurde, ihre Übertragbarkeit auf andere Domänen jedoch noch nicht untersucht wurde. Obgleich die ITPE-Methodik modular aufgebaut ist und die beschriebenen Möglichkeiten zur methodischen Anpassung laut Modellierungsteammitglied M-T2 "grundsätzlich eine gute Flexibilität für verschiedene Anwendungskontexte" bietet, müsste dieser Sachverhalt in zukünftigen Arbeiten näher untersucht werden. Schließlich erfasste die Validierung nur den unmittelbaren Anwendungszeitraum, während Langzeiteffekte der Unsicherheitsreduktion und die Nachhaltigkeit der Verbesserungen noch nicht untersucht sind. Darüber hinaus wurde die Integrationsfähigkeit in bestehende organisationsspezifische Entwicklungsprozesse noch nicht untersucht.

Beitrag zur Forschung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine aufgabenspezifische Methodik für den Einsatz von modellbasiertem Systems Engineering zur Entwicklungsunterstützung von Satellitenprojekten entwickelt. Der Fokus der Methodik liegt auf der Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen. Während die etablierten Methodiken, wie in Kapitel 4.1.2 ausgeführt, grundsätzlich eine fundierte Wissensbasis bieten, sind sie für den allgemeinen Einsatz ausgelegt und zielen darauf ab, die Neuentwicklung komplexer Systeme mithilfe von MBSE zu unterstützen. Sie bieten strukturierte Anleitungen für bestimmte Modellierungsaufgaben, beziehen sich jedoch nicht auf spezifische Aufgabenstellungen der Produktentwicklung. Als umfassende Rahmenwerke adressieren sie nicht die systematische Identifikation und Dokumentation von Unsicherheiten in bestehenden dokumentenbasierten Entwicklungsdaten. Sie bieten keine expliziten Verfahren zur messbaren Unsicherheitsreduktion und integrieren keine kreativen Problemlösungsansätze in den modellbasierten Entwicklungsprozess, da sie sich auf das systematische Vorgehen bei der Entwicklung und Modellierung neuer Systeme fokussieren. Darüber hinaus verfügen die etablierten Methodiken aufgrund ihrer generalistischen Natur über keine anwendungsspezifischen ontologischen Konzepte, die eine konsistente Wissensrepräsentation für die Unsicherheitsbehandlung in komplexen domänenspezifischen Entwicklungsprojekten ermöglichen. Die ITPE-Methodik hingegen unterstützt den aufgabenspezifischen Einsatz von modellbasiertem Systems Engineering bei der Entwicklung von Satellitenprojekten mit Fokus auf die Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten in Daten und Informationen. Damit wird die bekannte Problemstellung der Nutzung von MBSE zur Bewältigung von Herausforderungen in der Produktentwicklung durch eine aufgabenspezifisch ausgerichtete Methodik angegangen. Die wissenschaftlichen Beiträge der ITPE-Methodik umfassen mehrere innovative Komponenten: Das entwickelte DT-MBSE Integrationsmodell nutzt Design Thinking zur Förderung kreativer Aspekte, ein anwendungsspezifisches ontologisches Konzept basiert auf einer modularen Grundstruktur mit drei Hauptkomponenten, und das Konzept der Element-Bibliothek stellt ein konstitutives Werkzeug zur Unterstützung der Modellierungstätigkeiten dar. Die ITPE-Methodik stellt damit eine neuentwickelte Lösung dar, die bezüglich der Problemstellung des Umgangs mit Unsicherheiten in Daten und Informationen in Satellitenentwicklungsprojekten eine Verbesserung gegenüber

bestehenden Methodiken darstellt. Die systematische Validierung liefert empirische Belege für die Wirksamkeit modellbasierter Ansätze bei der Unsicherheitsbehandlung und stellt durch quantifizierte Ergebnisse messbare Benchmarks für zukünftige Forschung bereit.

Implikationen für die Praxis

Die ITPE-Methodik bietet Praktikern ein konkretes Werkzeug zur Verbesserung ihrer systembezogenen Dokumentation durch den gezielten Einsatz von modellbasiertem Systems Engineering. Dabei konzentriert sich die Methodik darauf, MBSE auf eine klar abgegrenzte Aufgabenstellung anzuwenden. Diese fokussierte Definition des MBSE-Einsatzes erhöht die Akzeptanz für modellbasierte Ansätze im unternehmerischen und industriellen Kontext. Insbesondere Institutionen mit bisher geringen MBSE-Erfahrungen können mithilfe der ITPE-Methodik in einem abgegrenzten Kontext und mit klarer Fokussierung die schrittweise Einführung von MBSE umsetzen. Die initiale Validierung bestätigte die grundsätzliche Praxistauglichkeit der Methodik und identifizierte gezielte Schulungen und Anleitungen als relevante Erfolgsfaktoren für die praktische Anwendung. Darüber hinaus adressiert die ITPE-Methodik durch das entwickelte Rollenkonzept mit Kompetenzprofil die Herausforderung des effizienten Ressourceneinsatzes bei der MBSE-Nutzung. Der oft hohe Aufwand bei der Befähigung von Entwicklern zum MBSE-Einsatz stellt ein wesentliches Hindernis dar. Durch die gezielte Aufgabendefinition und -zuweisung im Rollenkonzept sowie die klare Trennung zwischen Modellierungs- und Entwicklungstätigkeiten leistet die ITPE-Methodik einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Praxistauglichkeit von MBSE.

Abschließende Bemerkung

Die ITPE-Methodik hat im Rahmen der initialen Validierung Belege für ihre Wirksamkeit bei der systematischen Identifikation und Reduktion von Unsicherheiten in dokumentenbasierten Satellitenentwicklungsprojekten geliefert. Die quantitativen Ergebnisse in Verbindung mit den positiven qualitativen Bewertungen der Teilnehmer bestätigen, dass die Methodik ihren definierten Zweck erfüllt und einen Beitrag zur Bewältigung der Herausforderungen in der Satellitenentwicklung leistet. Dabei wurden alle drei Forschungsfragen erfolgreich beantwortet und der Beitrag der Arbeit zur Forschung auf dem Gebiet des modellbasierten Systems Engineering, insbesondere im Anwendungsfeld der Satellitenentwicklung, unter Beweis gestellt. Gleichzeitig zeigen die identifizierten Limitationen Bereiche für zukünftige Verbesserungen und Forschungsaktivitäten auf. Die Methodik stellt einen wichtigen Schritt in Richtung einer praxisnahen modellbasierten Unterstützung der Entwicklung komplexer Systeme dar und trägt dazu bei, die Vorteile von MBSE zu realisieren und die wahrgenommenen Herausforderungen in der modernen Systementwicklung zu mildern. Die Validierungsergebnisse bilden eine solide Grundlage für die weitere Entwicklung und Verbreitung der Methodik in Forschung und Praxis.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Die zunehmende Komplexität moderner Satellitensysteme und die damit verbundenen Herausforderungen in der Entwicklung haben dazu geführt, dass herkömmliche dokumentenbasierte Entwicklungsansätze an ihre Grenzen stoßen. Besonders in der Raumfahrtindustrie, die sich zwischen traditionellen Ansätzen und New Space-Philosophien bewegt, entstehen komplexe interdisziplinäre Entwicklungsumgebungen, die von Ambiguität und Unsicherheiten geprägt sind. Während modellbasiertes Systems Engineering als vielversprechender Ansatz zur Bewältigung dieser Herausforderungen gilt, fehlten bisher aufgabenspezifische Methodiken, die systematisch Unsicherheiten in vorhandenen dokumentenbasierten Daten und Informationen identifizieren und reduzieren können.

Die Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer aufgabenspezifischen Methodik für den prozessbegleitenden Aufbau und die Pflege ganzheitlicher Systemmodelle zur Unterstützung der Weiterentwicklung von Daten und Informationen im Entwicklungsprozess von Satellitenprojekten. Die Methodik sollte Entwickler effektiv und effizient bei der Identifikation von Unsicherheiten in bestehenden dokumentenbasierten Daten und Informationen unterstützen sowie eine modellgestützte Hilfestellung bei der Problemlösung und Ideengenerierung zur Reduzierung identifizierter Unsicherheiten bieten. Darüber hinaus bestand das Ziel darin, einen positiven Beitrag zur Wissensgenerierung durch systematische Modellbildung und strukturierte Informationsrepräsentation leisten.

Zur Erreichung der Zielsetzung wurde ein forschungsmethodisches Vorgehen angelehnt an die Design Research Methodology verfolgt. Zunächst wurden die begrifflichen und methodischen Grundlagen über Unsicherheiten, modellbasiertes Systems Engineering, Design Thinking und Ontologien erarbeitet. Der Stand der Technik wurde durch eine systematische Analyse bestehender Modellierungsmethodiken, Design Thinking-Prozessmodelle und Design Thinking-Ansätze im Systems Engineering und Ontologien für Satellitenentwicklungsprojekte untersucht. Auf Basis etablierter Quellen zur Bewertung von Methoden wurden sieben zentrale Aspekte – Anwendbarkeit, Einfachheit, Konsistenz, Nutzen, Verständlichkeit, Vollständigkeit und Wirksamkeit – abgeleitet und bilden die Grundlage für die Kriterienentwicklung.

Die entwickelte ITPE-Methodik basiert auf drei übergeordneten Bausteinen, die das zentrale Ergebnis dieser Arbeit darstellen. Der erste Baustein ist das DT-MBSE Integrationsmodell, ein Vorgehensmodell, das Design Thinking mit modellbasiertem Systems Engineering verbindet und die grundlegende Rolle der Systemmodellierung in einem menschenzentrierten Ansatz definiert. Das Modell basiert auf einem Doppel-Diamant-Prozessmodell und integriert sowohl kreative als auch systematische Aspekte zur Identifikation und Reduzierung von Unsicherheiten. Es definiert drei zentrale Teams mit spezifischen Rollen und Kompetenzen nach dem T-Shaped-Kompetenzmodell. Der zweite Baustein umfasst fünf spezifische Analysemethoden, die beschreiben, wie Modelle mit der Sprache SysML für bestimmte Analysezwecke erstellt werden können. Diese umfassen die Anforderungsanalyse, Systemkontextanalyse, Verhaltensanalyse, Funktionsanalyse und Strukturanalyse. Der dritte Baustein bildet das ontologische Konzept, welches domänenspezifische Konzepte und Beziehungen aus der Satellitenentwicklung sowie Konzepte aus dem Systems Engineering beinhaltet. Eine auf diesem Konzept basierende Elementbibliothek steht dem Modellierungsteam als unterstützendes Werkzeug zur Verfügung und ermöglicht eine strukturierte

Wissensrepräsentation. Die Validierung der Methodik erfolgte anhand eines Subsystems des wissenschaftlichen Satellitenentwicklungsprojekts SeRANIS der Universität der Bundeswehr München. Die initiale Validierung orientierte sich an der Design Research Methodology und umfasste sowohl quantitative als auch qualitative Bewertungen. Ein unabhängiges Modellierungsteam von zwei Personen verschiedener akademischer Institutionen sowie ein erfahrener Vertreter aus dem Entwicklungsumfeld führten die Validierung durch. Dabei wurden acht Validierungskriterien qualitativ bewertet, die sich auf die drei Forschungsfragen der Arbeit bezogen. Die systematische Anwendung der ITPE-Methodik führte zur Identifikation von insgesamt 113 Unsicherheiten über alle fünf Analysephasen hinweg. Von diesen konnten 43 Unsicherheiten durch entsprechende Maßnahmen reduziert und 5 zur Lösung an externe Parteien delegiert werden, was einer Reduktionsrate von 43 Prozent entspricht. Die Verteilung der Unsicherheitstypen zeigte eine deutliche Dominanz der Unvollständigkeit mit 63 Prozent aller identifizierten Unsicherheiten, gefolgt von Ambiguität mit 14 Prozent und Vagheit mit 10 Prozent. Die qualitativen Validierungsergebnisse bestätigten die Wirksamkeit der Methodik in allen bewerteten Kriterien, wobei die Teilnehmer die Erfüllung der definierten Anforderungen als weitgehend bis vollständig bewerteten. Die ITPE-Methodik demonstrierte ihre Fähigkeit, alle drei Forschungsfragen erfolgreich zu beantworten. Sie ermöglicht die systematische Identifikation von Unsicherheiten in dokumentenbasierten Daten und Informationen, unterstützt deren Reduzierung durch einen modellgestützten, menschenzentrierten Ansatz und leistet einen wertvollen Beitrag zur Wissensgenerierung im Entwicklungsprozess von Satellitenprojekten. Damit wurde ein wichtiger Beitrag zur Nutzung der Vorteile von MBSE zur Bewältigung der wahrgenommenen Herausforderungen in der Satellitenentwicklung geleistet.

Ausblick

Basierend auf den Validierungsergebnissen und identifizierten Limitationen ergeben sich mehrere vielversprechende Forschungsrichtungen für die Weiterentwicklung der ITPE-Methodik und deren Anwendungsbereich. Die durchgeführte initiale Validierung beschränkte sich auf ein einzelnes Subsystem eines Satellitenentwicklungsprojekts, was die Aussagekraft bezüglich der Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränkt. Zukünftige Forschungsaktivitäten sollten daher umfassendere Validierungen über mehrere Projekte, Domänen und Organisationen umfassen, um die Skalierbarkeit und Anwendbarkeit der Methodik auf größere und komplexere Systeme zu untersuchen, wie z.B. auf vollständige Satellitensysteme. Dabei wäre es von besonderem Interesse, die Methodik an vollständigen und vernetzten Systemen sowie verschiedenen Projekttypen und Projektgrößen zu evaluieren. Eine systematische Untersuchung der Anwendung in verschiedenen Entwicklungsphasen könnte wertvolle Erkenntnisse über die optimale Einbettung der Methodik in bestehende Entwicklungsprozesse liefern. Die Entwicklung standardisierter, objektiver Messverfahren für die Bewertung der Methodenanwendbarkeit würde die wissenschaftliche Rigorosität zukünftiger Validierungen erhöhen. Während die vorliegende Arbeit objektive Metriken für die Kernaspekte der Unsicherheitsidentifikation und -reduktion bereitstellt, basiert die Bewertung qualitativer Aspekte wie Anwendbarkeit, Einfachheit und Verständlichkeit primär auf subjektiven Einschätzungen der Beteiligten. Die Entwicklung quantifizierbarer Bewertungskriterien für diese Aspekte würde eine objektivere Bewertung der Methodik ermöglichen und die Aussagekraft zukünftiger Validierungsstudien stärken.

Longitudinale Studien zur Untersuchung der langfristigen Auswirkungen der Unsicherheitsreduktion auf Projektverläufe und -ergebnisse würden wertvolle Erkenntnisse über die Nachhaltigkeit der erzielten Verbesserungen liefern. Die vorliegende Validierung erfasste nur den unmittelbaren

Anwendungszeitraum, während die langfristigen Effekte auf Projektkosten, -dauer und -qualität noch nicht untersucht sind. Eine systematische Begleitung von Projekten über längere Zeiträume könnte belastbare Daten über den Return on Investment der Methodik-Anwendung generieren und damit wichtige Argumente für deren breitere Adoption in der Industrie liefern.

Ein besonders vielversprechender Forschungsbereich liegt in der Integration von Automatisierungsansätzen durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz und Machine Learning-Verfahren. Die teilautomatisierte Unsicherheitsidentifikation könnte die Effizienz der Methodik erheblich steigern und gleichzeitig die Ressourcenintensität reduzieren, die als eine der identifizierten Herausforderungen für die praktische Adoption identifiziert wurde. Dabei könnten Natural Language Processing-Verfahren zur automatischen Analyse dokumentenbasierter Informationen eingesetzt werden, während Machine Learning-Algorithmen Muster in Unsicherheitsverteilungen erkennen und Vorhersagen über potenzielle Problemfelder treffen könnten.

Die Anpassung und Validierung der ITPE-Methodik für andere Entwicklungsdomänen wie beispielsweise den Automobilbereich oder die Medizintechnik könnte deren Anwendungsbereich erheblich erweitern. Obwohl die Methodik modular aufgebaut ist und beschriebene Möglichkeiten zur methodischen Anpassung bietet, müsste die Übertragbarkeit auf andere Domänen systematisch untersucht werden. Dabei wären sowohl die Anpassung des ontologischen Konzepts – im Speziellen die Neuentwicklung einer entsprechenden Strukturontologie – als auch die Validierung der Analysemethoden in verschiedenen Anwendungskontexten erforderlich. Eine erfolgreiche Domänenerweiterung würde den wissenschaftlichen Impact der Arbeit erheblich steigern und gleichzeitig zur breiteren Akzeptanz modellbasierter Ansätze in verschiedenen Ingenieurdisziplinen beitragen.

Schließlich ist die Untersuchung der Integration der ITPE-Methodik in bestehende Entwicklungsprozesse und -werkzeuge ein mögliches zukünftiges Forschungsfeld. Dabei sollten auch Aspekte der Schulung und Befähigung von Anwendern berücksichtigt werden, um die identifizierten Herausforderungen bezüglich des erhöhten Arbeitsaufwands zu adressieren. Die Entwicklung eines umfassenden Schulungs- und Einführungskonzepts mit rollenspezifischen Inhalten könnte die Akzeptanz und Effizienz der Methodik-Anwendung erheblich steigern und damit einen wichtigen Beitrag zur praktischen Verbreitung von MBSE in der Satellitenentwicklung und darüber hinaus leisten.

8 Literaturverzeichnis

- Ackhoff, R. L. (1999), *Re-Creating the Corporation: A Design of Organizations for the 21st Century*, Oxford University Press.
- Adams, K. M. (2015), *Non-functional Requirements in Systems Analysis and Design, Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality*, Bd. 28, 1st ed. 2015, Springer International Publishing; Imprint: Springer, Cham.
- Ahmed, S., Kim, S. und Wallace, K. M. (2007), „A Methodology for Creating Ontologies for Engineering Design_Ahmed“, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Nr. Vol. 7, S. 132–140.
- Aktas, F., Shayea, I., Ergen, M., Aldasheva, L., Saoud, B., Tussupov, A., Yedilkhan, D. und Amanzholova, S. (2025), „Routing Challenges and Enabling Technologies for 6G–Satellite Network Integration: Toward Seamless Global Connectivity“, *Technologies*, 13. Jg., Nr. 6, S. 245.
- Albers, A. und Braun, A. (2011), „A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes“, *Int. J. Product Development*, Vol. 15.
- Albers, A., Burkhardt, N., Meboldt, M. und Saak, M. (2005), „SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development“, in *ICED - International Conference in Engineering Design*.
- Albers, A., Bursac, N. und Wintergerst, E. (2015), „Product generation development-importance and challenges from a design research perspective“, in *New developments in mechanics and mechanical engineering*, Vienna.
- Albers, A., Schmalenbach, H. und Lohmeyer, Q. (2011), „Ontology development for knowledge representation“, *Int. J. Product Development*, Nr. Vol. 14, Nos. 1-4, S. 53–71.
- Aleksandraviciene, A. und Morkevicius, A. (2021), *MagicGrid® Book of Knowledge: A Practical Guide to Systems Modeling using MagicGrid from Dassault Systèmes*, 2. Aufl., Vitae Litera.
- Alexander P. Cox, Christopher K. Nebelecky, Ronald Rudnicki, William A. Tagliaferri, John L. Crassidis und Barry Smith (2016), „The Space Object Ontology“, in *19th International Conference on Information Fusion*, Heidelberg.
- Alhazmi, A. und Huang, S. (2020), „Integrating Design Thinking into Scrum Framework in the Context of Requirements Engineering Management“, in *Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Computer Science and Software Engineering, 22 05 2020 24 05 2020, Beijing China*, ACM, New York, NY, USA, S. 33–45.
- Allen, J. K., Commuri, S., Panchal, J., Milisavljevic-Syed, J., Jiao, R., Mistree, F. und Schaefer, D. (2021), „Design Engineering in the Age of Industry 4.0“, *Journal of Mechanical Design*, 143. Jg., Nr. 7.
- Alt, O. (2012), *Modellbasierte Systementwicklung mit SysML*, Hanser eLibrary, Hanser, München.
- Alves, R. und Jardim Nunes, N. (2013), „Towards a Taxonomy of Service Design Methods and Tools“, in van der Aalst, W., Mylopoulos, J., Rosemann, M., Shaw, M. J., Szyperski, C., Falcão e Cunha, J., Snene, M. und Nóvoa, H. (Hg.), *Exploring Services Science, Lecture Notes in Business Information Processing*, Bd. 143, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 215–229.
- Amelingmeyer, J. (2004), *Wissensmanagement: Analyse und Gestaltung der Wissensbasis von Unternehmen, Strategisches Kompetenz-Management*, Auflage, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.

- Amyot, D., Anda, A. A., Baslyman, M., Lessard, L. und Bruel, J.-M. (2016), „Towards Improved Requirements Engineering with SysML and the User Requirements Notation“, in *2016 IEEE 24th International Requirements*, S. 329–334.
- Arbeitskreis Deutscher Qualifikationsrahmen (2013), *Handbuch zum Deutschen Qualifikationsrahmen: Struktur – Zuordnungen – Verfahren – Zuständigkeiten*.
- Arnold, R. D. und Wade, J. P. (2015), „A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach“, *Procedia Computer Science*, 44. Jg., S. 669–678.
- Bachmann, J., Kinzel, A., Porcelli, F., Schmidt, A., Schwarz, R., Hofmann, C., Förstner, R. und Knopp, A. (2024), *SeRANIS: In-Orbit-Demonstration von Spitzentechnologie auf einem Kleinsatelliten*, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V.
- Badra, A. A., Aiello, O. und Chaudemar, J.-C. (2023), „Applying a Model-Based Systems Engineering Approach to Model an Unmanned Aerial Vehicle Mission“, in *2023 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 17.04.2023 - 20.04.2023, Vancouver, BC, Canada, IEEE, S. 1–7.
- Banathy, B. H. (1996), *Designing Social Systems in a Changing World, Contemporary Systems Thinking Ser*, Springer, New York, NY.
- Bandagadde, S., Kraus, T., Duetsch, N., Maia, C. und Pany, T. (2024), „Navigating the Noise. How Space receivers could defend against ground-based jamming attacks“, *Engineering Solutions from the Global Navigation Satellite System Community Volume 19*, Nr. 4, S. 44–51.
- Bandyszak, T., Daun, M., Tenbergen, B., Kuhs, P., Wolf, S. und Weyer, T. (2020), „Orthogonal Uncertainty Modeling in the Engineering of Cyber-Physical Systems“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, S. 1–16.
- Bender, B. und Gericke, K. (Hg.) (2021), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, 9. Aufl. 2021, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Blessing, L. T. und Chakrabarti, A. (2009), *DRM, A Design Research Methodology*, Springer London.
- Boehm, B. und Koolmonojwong, S. (2019), „Educating I-Shaped Computer Science Students to Become T-Shaped System Engineers“, *Procedia Computer Science*, 153. Jg., S. 71–79.
- Boehm, B. und Mobasser, S. K. (2015), „System Thinking: Educating T-Shaped Software Engineers“, in *2015 IEEE/ACM 37th IEEE International Conference on Software Engineering*, 16.05.2015 - 24.05.2015, Florence, Italy, IEEE, S. 333–342.
- Boland, R. J. und Collopy, F. L. (Hg.) (2004), *Managing as designing: Workshop held at the Weatherhead School of Management in June 2002*, Stanford Business Books, Stanford, California.
- Borst, P. and Akkermans und H. (1997), „Engineering Ontologies“, *Int. J. Human-Computer Studies*, Nr. 46, S. 365–406.
- Bothelo, R. C. und Xavier, A. L. (2019), „A Unified Satellite Taxonomy Proposal Based on Mass and Size“, *Advances in Aerospace Science and Technology*, 04. Jg., Nr. 04, S. 57–73.
- Brandl, W. (2020), „Bedürfnis und Konsum“, *Haushalt in Bildung & Forschung*, 9. Jg., Nr. 1-2020, S. 11–41.
- Brenner, W. und Uebernickel, F. (Hg.) (2016), *Design Thinking for Innovation: Research and Practice*, 1st ed. 2016, Springer International Publishing; Imprint: Springer, Cham.
- Brown, T. (2008), „Design thinking“, *Harvard business review*, 86. Jg., Nr. 6, 84-92, 141.
- Brown, T. und Katz, B. (2009), *Change by Design: Wie Design Thinking Organisationen verändert und zu mehr Innovationen führt*, Verlag Fritz Vahlen, München.

- Browning, T. R. (2001), „Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions“, in *IEEE Transactions on Engineering Management*, Bd. 48, S. 292–306.
- Browning, T. R. (2010), „On the alignment of the purposes and views of process models in project management“, *Journal of Operations Management*, Nr. 28, S. 316–332.
- Buchanan, R. (1992), „Wicked Problems in Design Thinking“, *Design Issues*, Vol. 8, No. 2, Nr. 2, S. 5–21.
- Burleigh, S. C., Cola, T. de, Morosi, S., Jayousi, S., Cianca, E. und Fuchs, C. (2019), „From Connectivity to Advanced Internet Services: A Comprehensive Review of Small Satellites Communications and Networks“, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019. Jg., S. 1–17.
- Bursac, N., Albers, A., Kull, P., Rapp, S. und Maul, L. (2022), „System Modelling in the Problem-Solving Process“, in *NordDesign 2022*, Kgs. Lyngby, Denmark.
- Camacho, M. (2018), „An Integrative Model of Design Thinking“, in *21st DMI: Academic Design Management Conference*, 627–641.
- Campo, K. X., Teper, T., Eaton, C. E., Shipman, A. M., Bhatia, G. und Mesmer, B. (2023), „Model-based systems engineering: Evaluating perceived value, metrics, and evidence through literature“, *Systems Engineering*, 26. Jg., Nr. 1, S. 104–129.
- Cao, Y., Guo, H., Liu, J. und Kato, N. (2018), „Optimal Satellite Gateway Placement in Space-Ground Integrated Networks“, *IEEE Network*, 32. Jg., Nr. 5, S. 32–37.
- Carayannis, E. G. (2013), „Encyclopedia of creativity, invention, innovation, and entrepreneurship“, *Springer eBooks*.
- Carroll, E. R. und Malins, R. J. (2016), „Systematic Literature Review: How is Model-Based Systems Engineering Justified?“.
- Cash, P., Daalhuizen, J. und Hekkert, P. (2023), „Evaluating the efficacy and effectiveness of design methods: A systematic review and assessment framework“, *Design Studies*, 88. Jg., S. 101204.
- Cederbladh, J., Cicchetti, A. und Suryadevara, J. (2024), „Early Validation and Verification of System Behaviour in Model-based Systems Engineering: A Systematic Literature Review“, *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 33. Jg., Nr. 3, S. 1–67.
- Chamas, M. W. und Paetzold, K. (2018), „Modeling of Requirement-Based Effect Chains of Mechatronic Systems in Conceptual Stage“, *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, Vol. 7.
- Chasanidou, D., Gasparini, A. A. und Lee, E. (2015), „Design Thinking Methods and Tools for Innovation“, in *4th International Conference, DUXU 2015, Held as Part of HCI International 2015, Los Angeles, CA, USA, August 2-7, 2015, Proceedings, Part I*, Bd. 9186.
- Chechile, I. (2021), *NewSpace Systems Engineering*, 1st ed. 2021, Springer International Publishing; Imprint Springer, Cham.
- Chen, B., Zhang, S. und Wang, B. (2018), „A Case Study of MBSE Method Used in the EMU Train Design“, in *2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, 12.12.2018 - 14.12.2018, Singapore, IEEE, S. 1–5.
- Chong, J., Zhou, H., Wang, M. und Chen, Y. (2023), „A Design Framework for Complex Spacecraft Systems with Integrated Reliability Using MBSE Methodology“, in Sun, J., Wang, Y., Huo, M. und Xu, L. (Hg.), *Signal and Information Processing, Networking and Computers, Lecture Notes in Electrical Engineering*, Bd. 917, Springer Nature Singapore, Singapore, S. 165–173.

- Church, A. (1943), „Carnap's Introduction to Semantics“, *The Philosophical Review*, Nr. 52, S. 298–304.
- Clarkson, J. und Eckert, C. (Hg.) (2005), *Design process improvement: A review of current practice*, Springer-Verlag London Limited, London.
- Clifford, M. (2020), *Benchmarking the Benefits and Current Maturity of Model-Based Systems Engineering across the Enterprise*.
- Cooper, R. G. (1990), „Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products“, *Business Horizons*.
- Cornford, S. L. und Feather, M. S., „Model Based Mission Assurance in a Model Based Systems Engineering (MBSE) Framework. State-of-the-Art Assessment“.
- Cranefield, S. und Purvis, M. (1999), „UML as an Ontology Modelling Language“, *IJCAI-99 Workshop on Intelligent Information Integration*.
- Cross, N. (2006), *Designersly ways of knowing*, Springer, London.
- Cross, N. (2023), *Design Thinking: Understanding how Designers think and work*, 2. Aufl., Bloomsbury Publishing Plc, London.
- Da Costa Junior, J., Diehl, J. C. und Secomandi, F. (2018), „Educating for a systems design approach to complex societal problems“, *Journal of Engineering Design*, 29. Jg., Nr. 3, S. 65–86.
- Daalhuizen, J. und Cash, P. (2021), „Method content theory: Towards a new understanding of methods in design“, *Design Studies*, 75. Jg., S. 101018.
- De Weck, O., Eckert, C. und Clarkson, J. (2007), „A classification of uncertainty for early product and system design“, in *International Conference on Engineering Design, ICED'07*.
- Delicado, B. A., Salado, A. und Mompó, R. (2018), „Conceptualization of a T-Shaped engineering competency model in collaborative organizational settings: Problem and status in the Spanish aircraft industry“, *Systems Engineering*, 21. Jg., Nr. 6, S. 534–554.
- Delligatti, L. (2013), *SysML Distilled: A Brief Guide to the Systems Modeling Language*, U.S. Corporate and government Sales, United States.
- Deming, E. W. (1982), *Out of crisis*, 26. print, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- Denzin, N. K. und Lincoln, Y. S. (2018), *The SAGE Handbook of Qualitative Research*, 5th Edition, SAGE Publications, Inc., Thousand Oaks, California 91320.
- Devedzic, V. (2002), „Understanding ontological engineering“, *Communications of the ACM*, Nr. Vol. 45.
- Di Russo, S. (2016), „Understanding the behaviour of design thinking in complex environments“, 2016.
- Dick, J., Hull, E. und Jackson, K. (2017), *Requirements Engineering*, Springer International Publishing, Cham.
- Dickersen, C. und Mavris, D. (2009), *Architecture and Principles of Systems Engineering, Complex and enterprise systems engineering*, CRC Press, Boca Raton.
- Dickopf, T. (2020), „A holistic Methodology for the Development of Cybertronic Systems in the Context of the Internet of Things“, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Technischen Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2020.
- Digel, W. (Hg.) (1992), *Meyers großes Taschenlexikon: In 24 Bänden*, 4., vollst. überarb. Aufl., BI-Taschenbuch-Verl., Mannheim.
- DIN (2015), *Qualitätsmanagementsysteme: Grundlagen und Begriffe* No. ISO 9000, Beuth Verlag GmbH, Berlin, verfügbar unter www.din.de.

- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2022), *System- und Software-Engineering – Qualitätskriterien und Bewertung von Systemen und Softwareprodukten (SQuaRE): Allgemeines Industrieformat (CIF) zur Gebrauchstauglichkeit: Spezifikation der Nutzungsanforderungen (ISO 25065:2019); Deutsche Fassung EN ISO 25065:2020*, 13.180; 35.080 No. DIN EN ISO 25065.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2023), *Building Information Modeling (BIM) – Semantischer Modellierungs- und Verknüpfungsstandard (SMLS): Teil 1: Generische Modellierungsmuster; Deutsche Fassung EN 17632-1:2022*, Bd. 35.240.67 No. DIN EN 17632-1.
- Dori, D. (2002), *Object-Process Methodology: A Holistic Systems Paradigm*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Dorst, K. (2011), „The core of ‘design thinking’ and its application“, *Design Studies*, 32. Jg., Nr. 6, S. 521–532.
- Duetsch, N., Ernest, H., Pany, T., Campello, A. P., Borheck, D., Speidel, J. und Sunay, H. (2024), „GNSS Interference Detection and Geolocation from LEO Satellites – Satellite Formation and Payload Design Specific Considerations and Their Impact on the Detection Sensitivity and Geolocation Accuracy“, in *Proceedings of the 37th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2024)*, 9/16/2024 - 9/20/2024, Baltimore, Maryland, Institute of Navigation, S. 737–768.
- Duetsch, N., Jaiswal, R., Hepzihbah, E., Foerstner, R. und Pany, T. (2022), „Design and Development of a Dedicated LEO Satellite Payload for Detection and Localization of Earth-Bounded GNSS Interference Sources for the Seamless Radio Access Network for Internet of Space (SeRANIS) satellite mission“, in *73rd International Astronautical Congress (IAC)*, Paris.
- Dugan, K. E., Mosyjowski, E. A., Daly, S. R. und Lattuca, L. R. (2024), „Leveraging a comprehensive systems thinking framework to analyze engineer complex problem-solving approaches“, *Journal of Engineering Education*, 113. Jg., Nr. 1, S. 53–74.
- Dumitrescu, R., Albers, A., Riedel, O. und Gausemeier, J. (2021), *Advanced Systems Engineering: Engineering in Germany: Status Quo in Business and Science*.
- Duncan, R. B. (1972), „Characteristics of Organizational Environments and Perceived Environmental Uncertainty“, *Administrative Science Quarterly*, S. 313–327.
- Dunne, D. und Martin, R. (2006), „Design Thinking and How It Will Change Management Education: An Interview and Discussion“, *Academy of Management Learning & Education*, Nr. Vol.5 Nr. 4, S. 512–523.
- Durantini, A., Fanmuy, G., Miet, S. und Pegon, V. (2016), „Disruptive Innovation in Complex Systems. The Ambition of Combining Systems Engineering and Design Thinking“, in *Proceedings of the Seventh International Conference on Complex Systems Design & Management, CSD&M Paris 2016*.
- Dym, C. L., Agogino, A. M., Ozgur, E., Frey, D. D. und Leifer, L. J. (2005), „Engineering Design Thinking, Teaching, and Learning“, *Journal of Engineering Education*, S. 103–120.
- Eckert, C. M. und Stacey, M. K. (2010), „What is a Process Model? Reflections on the epistemology of design process models“, in *modelling and Management of Engineering Processes*.
- ECSS (2008), *Space management: Organization and conduct of reviews* No. ECSS-M-ST-10-01C, Noordwijk, The Netherlands.
- ECSS (2009a), *Space Engineering: Technical requirements specification* No. ECSS-E-ST-10-06C, Noordwijk, The Netherlands.

- ECSS (2009b), *Space project management: Configuration and information management* No. ECSS-M-ST-40C Rev. 1, Noordwijk, The Netherlands.
- ECSS (2009c), *Space project management: Project planning and implementation* No. ECSS-M-ST-10C Rev.1, Noordwijk, The Netherlands.
- ECSS (2017), *Space Engineering: System engineering general requirements* No. ECSS-E-ST-10C Rev. 1, Noordwijk, The Netherlands.
- Ehrlenspiel, K. und Meerkamm, H. (2017), *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*, 6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Hanser, München, Wien.
- Eigner, M., Roubanov, D. und Zafirov, R. (2014), *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Eigner Walter und Koch Christian (Hg.) (2017), *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme Der PLM-unterstützte Re-annotated*, Springer Berlin Heidelberg.
- Eisenmann, M., Grauberger, P., Üreten, S., Krause, D. und Matthiesen, S. (2021), „Design method validation – an investigation of the current practice in design research“, *Journal of Engineering Design*, 32. Jg., Nr. 11, S. 621–645.
- Eisner, H. (2002), *Essentials of Project and Systems Engineering Management*, 2. Aufl., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Ernadote, D. (2015), „An ontology mindset for system engineering“, in *2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 28.09.2015 - 30.09.2015, Rome, Italy, IEEE, S. 454–460.
- Estefan, J. A. (2008), „Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies“, *INCOSE MBSE Initiative*.
- Estefan, J. A. und Weilkens, T. (2023), „MBSE Methodologies“, in Madni, A. M., Augustine, N. und Sievers, M. (Hg.), *Handbook of Model-Based Systems Engineering*, Springer International Publishing, Cham.
- Feldhacker, J. D. (2011), „Incorporating Uncertainty into Spacecraft Mission and Trajectory Design“, Dissertation, Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado, Denver, 2011.
- Feldhusen, J. und Grote, K.-H. (2013), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Fernandez, J. L. und Hernandez, C. (2019), *Practical Model-Based Systems Engineering*.
- Fernandez, M., Gomez-Pearez, A. und Juristo, N. (1997), „Methontology. From Ontological Art Towards Ontological Engineering“, *AAAI Technical Report*.
- Fernández-López, M. und Gómez-Pérez, A. (2002), „Overview and analysis of methodologies for building ontologies“, *The Knowledge Engineering Review*, 17. Jg., Nr. 2, S. 129–156.
- Ford, K. M., Adams-Webber, J. R. und Neil, A. M. (1993), „Knowledge acquisition as a constructive modeling activity“, *International Journal of Intelligent Systems*, Nr. Vol. 8, S. 9–32.
- Freibott, G. und Schmalenbach, K. (1999), *Langenscheidts Fachwörterbuch Maschinen- und Anlagenbau: Krupp Fördertechnik*, Langenscheidt fachverlag GmbH München.
- Frey-Luxemburger, M. (Hg.) (2014), *Wissensmanagement - Grundlagen und praktische Anwendung: Eine Einführung in das IT-gestützte Management der Ressource Wissen, IT im Unternehmen*, 2., aktual. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Friedenthal, S., Moore, A. und Steiner, R. (2012), *A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc.

- Friedenthal, S. und Oster, C. (2017), *Architecting Spacecraft with SysML*, Friedenthal & Oster.
- Gadzo, E. und Koch, A. (2025), „Reducing uncertainties in data & information - an ontological approach to support satellite development projects“, *Proceedings of the Design Society*, 5. Jg., S. 2711–2720.
- Gadzo, E., Mehlstäubl, J., Nicklas, S. J. und Paetzold, K. (2023), „Method for the Transfer and Further Development of Document-Based Data and Information in a Model-Based Development Environment Using the Example of a Small Mission Satellite“, in Chakrabarti, A. und Singh, V. (Hg.), *Design in the Era of Industry 4.0, Volume 2, Smart Innovation, Systems and Technologies*, Bd. 342, Springer Nature Singapore, Singapore, S. 519–532.
- Gadzo, E., Michalides, M. und Koch, A. (2024), „Leveraging design thinking in MBSE: mitigating data and information uncertainties – an integration model approach“, *Proceedings of the Design Society*, 4. Jg., S. 2533–2544.
- Gadzo, E., Porcelli, F., Förstner, R. und Paetzold, K. (2022), „Requirements Engineering Process for SeRANIS, a Small Satellite Mission“, in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*.
- Gasevic, D., Djuric, D. und Devedzic, V. (2006), *Model Driven Architecture and Ontology Development*, SpringerLink Bücher, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Gausemeier, J., Lanza, G. und Lindemann, U. (Hg.) (2012), *Virtuelle Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung: Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung*, Hanser eLibrary, 1. Aufl., Hanser, München.
- Gericke, K. und Blessing, L. (2012), „An Analysis of Design Process Models across Disciplines“, in *International Design Conference 2012*, Zagreb.
- Gericke, K., Eckert, C. und Stacey, M. (2017), „What do we need to say about a Design Method?“, in *International Conference on Engineering Design, ICED 17*.
- Gericke, K., Eckert, C. und Stacey, M. (2022), „Elements of a design method – a basis for describing and evaluating design methods“, *Design Science*, 8. Jg.
- Gero, J. S. und Kannengiesser, U. (2004), „The situated function–behaviour–structure framework“, *Design Studies*, 25. Jg., Nr. 4, S. 373–391.
- Gifford, W. E., Bobbit, R. H. und Slocum, J. W. (1979), „Message Characteristics and Perceptions of Uncertainty by Organizational Decision Makers“, *Academy of Management*, Nr. Vol. 22, No. 3, S. 458–481.
- Gilz, T. (2014), „PLM-integrated interdisciplinary system models in the conceptual design phase based on model-based systems engineering“, Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2014.
- Glas, M. (2013), „Ontology-based Model Integration for the Conceptual Design of Aircraft“, Forschungs- und Lehrinheit I Angewandte Softwaretechnik, Technische Universität München, 2013.
- Golkar, A. und Salado, A. (2021), „Definition of New Space—Expert Survey Results and Key Technology Trends“, *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, 2. Jg., Nr. 1, S. 2–9.
- Gomez-Perez, A., Fernandez-Lopez, M. und Corcho, O. (2003), *Ontological Engineering, Advanced information and knowledge processing*, Springer, London, New York.
- Gräßler, I. und Oleff, C. (2022), *Systems-Engineering: Verstehen und industriell umsetzen*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg.
- Gräßler, I., Pottebaum, J., Oleff, C. und Preuß, D. (2021), „HANDLING OF EXPLICIT UNCERTAINTY IN REQUIREMENTS CHANGE MANAGEMENT“, *Proceedings of the Design Society*, 1. Jg., S. 1687–1696.

- Greene, M. (2019), „Systems Design Thinking: Identification and Measurement of Attitudes for Systems Engineering, Systems Thinking, and Design Thinking“, Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, 2019.
- Greene, M. T., Gonzalez, R., papalambros, P. und McGowan, A.-M. (2017), „Design Thinking vs. Systems Thinking for Engineering Design: What's the Difference?“, in *21st International Conference on Engineering, ICED 17*.
- Gregor, S. und Hevner, A. R. (2013), „Positioning and Presenting Design Science Research for Maximum Impact“, *MIS Quarterly*, Nr. 2, S. 337–355.
- Gruber, T. R. (1993a), „A Translation Approach to Portable Ontology Specifications“, *Knowledge Acquisition*, Nr. 5 (2), S. 199–220.
- Gruber, T. R. (1993b), „Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing“, *International Journal Human-Computer Studies*, Nr. 43, S. 907–928.
- Grüninger, M. und Fox, M. S. (1995), *Methodology for the Design and Evaluation of Ontologies*.
- Guarino, N. (1997), „Understanding, Building and Using Ontologies“, *Int. J. Human-Computer Studies*, Nr. 46, S. 293–310.
- Guarino, N. (1998), „Formal Ontology and Information Systems“, in *Proceedings of FOIS'98*, IOS Press, Amsterdam, S. 3–15.
- Guilford, J. P. (1968), *Intelligence, Creativity, and Their Educational Implications*, R. R. Knapp.
- Guttag, J., Horning, J., Garland, S., Jones, K., Modet, A. und Wing, J. (1993), *Larch: Languages and Tools for Formal Specification*.
- Haberfellner, R., Weck, O. de, Fricke, E. und Vössner, S. (2019), *Systems Engineering*, Springer International Publishing, Cham.
- Halvorson, M. C., Moyers, N. und Thomas, L. D. (2022), „An Ontology for Prognostic Health Management in Spacecraft Avionics“, in *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*.
- Hause, M. (2006), „The SysML Modelling Language“, in *Fifth European Systems Engineering Conference*.
- Hebzibah, E., Duetsch, N. und Pany, T. (2022), „Development of a MEO-LEO-ground simulation testbed to evaluate the localization of GNSS interference emitters from LEO“, in *Navitec*.
- Hehn, J., Mendez, D., Uebernickel, F., Brenner, W. und Broy, M. (2020), „On Integrating Design Thinking for Human-Centered Requirements Engineering“, *IEEE Software*, 37. Jg., Nr. 2, S. 25–31.
- Hehn, J. und Uebernickel, F. (2018), „The Use of Design Thinking for Requirements Engineering: An Ongoing Case Study in the Field of Innovative Software-Intensive Systems“, in *2018 IEEE 26th International Requirements Engineering Conference (RE), 20.08.2018 - 24.08.2018, Banff, AB, IEEE*, S. 400–405.
- Henderson, K. und Salado, A. (2021), „Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature“, *Systems Engineering*, 24. Jg., Nr. 1, S. 51–66.
- Henderson-Sellers, B. (2012), *On the mathematics of modelling, metamodelling, ontologies and modelling languages, SpringerBriefs in Computer Science*, Springer, Heidelberg.
- Hening, C., Viehl, A., Kämpgen, B. und Eisenmann, H. (2016), „Ontology-Based Design of Space Systems“, in Groth, P. (Hg.), *15th International Semantic Web Conference, Kobe, Japan, October 17-21, 2016 proceedings*, Bd. 9982, Springer International Publishing AG, S. 308–324.

- Herre, H. (2010), „General Formal Ontology (GFO): A Foundational Ontology for Conceptual Modelling“, in Poli, R., Healy, M. und Kameas, A. (Hg.), *Theory and Applications of Ontology: Computer Applications*, Springer Netherlands, Dordrecht, S. 297–345.
- Hevner, A. und Chatterjee, S. (2010), *Design Research in Information Systems: Theory and Practise*, Volume 22, Springer New York Dordrecht Heidelberg London.
- Hick, H., Bajzek, M. und Faustmann, C. (2019), „Definition of a system model for model-based development“, *SN Applied Sciences*, 1. Jg., Nr. 9.
- Hoffmann, H.-P. (2010), *Systems Engineering Best Practises with the Rational Solution for Systems and Software Engineering - Deskbook: Model-based Systems Engineering with Rational Rhapsody and Rational Harmony for Systems Engineering*.
- Hofmann, M. (2021), „Der Funkmast im All“, *NET 01-02/21*.
- Holt, J. und Perry, S. (2019), *SysML for systems engineering: A model-based approach*, *IET Professional applications of computing series*, Bd. 20, 3d edition, The Institution of Engineering and Technology, Stevenage.
- Holt, J., Perry, S. A. und Brownsword, M. (2012), *Model-based requirements engineering*, *IET Professional applications of computing series*, Bd. 9, Institution of Engineering and Technology, Stevenage Herts U.K.
- Huang, Z., Zhang, C., Li, H., Wang, M., Fang, Z. und Jiang, L. (2023), „An ontology-based approach for virtual constellation recommendation in remote sensing applications“, in *2023 11th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, 25.07.2023 - 28.07.2023, Wuhan, China, IEEE, S. 1–6.
- Hubka, V. (1973), *Theorie der Maschinensysteme: Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre*, *Hochschultext*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hubka, V. (1976), *Theorie der Konstruktionsprozesse: Analyse der Konstruktionstätigkeit*, *Hochschultext*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hubka, V. und Eder, W. E. (1984), *Theory of Technical Systems: A Total Concept Theory for Engineering Design*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hubka, V. und Eder, W. E. (1992), *Einführung in die Konstruktionswissenschaft: Übersicht, Modell, Anleitungen*, *Springer eBook Collection Computer Science and Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Huldt, T. und Stenius, I. (2019), „State-of-practice survey of model-based systems engineering“, *Systems Engineering*, 22. Jg., Nr. 2, S. 134–145.
- Husung, S., Weber, C. und Mahboob, A. (2022), „Model-Based Systems Engineering: A New Way for Function-Driven Product Development“, in Krause, D. und Heyden, E. (Hg.), *Design Methodology for Future Products*, Springer International Publishing, Cham, S. 221–241.
- Husung, S., Weber, C., Mahboob, A. und Kleiner, S. (2021), „USING MODEL-BASED SYSTEMS ENGINEERING FOR NEED-BASED AND CONSISTENT SUPPORT OF THE DESIGN PROCESS“, *Proceedings of the Design Society*, 1. Jg., S. 3369–3378.
- IEEE (1990), *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology* No. 610.121990, 792-1983.
- IEEE (2005), *IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process* No. 1220-2005, verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=10106>.
- INCOSE (Hg.) (2015), *INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, John Wiley & Sons, Inc.
- INCOSE, U. (2010), „Systems Engineering Competencies Framework“.

- Inkermann, D. (2022), „Potentials of integrating MBSE and LCA to handle uncertainties and variants in early design stages“, in *DS 119: Proceedings September 2022*, S. 10.
- Iribarne, L., Padilla, N., Asensio, J. A., Criado, J., Ayala, R., Almendros, J. und Menenti, M. (2011), „Open-Environmental Ontology Modeling“, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 41. Jg., Nr. 4, S. 730–745.
- ISO/IEC/IEEE (2011), *Systems and software engineering — Architecture description* No. 42010.
- ISO/IEC/IEEE (2023), *Systems and software engineering — System life cycle processes* No. 15288.
- Jannidis, F., Kohle, H. und Rehbein, M. (Hg.) (2017), *Digital Humanities: Eine Einführung*, J.B. Metzler Verlag, Stuttgart.
- Jiang, Y., Peng, G. und Liu, W. (2010), „Research on ontology-based integration of product knowledge for collaborative manufacturing“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49. Jg., Nr. 9-12, S. 1209–1221.
- Johansson-Sköldberg, U., Woodilla, J. und Çetinkaya, M. (2013), „Design Thinking: Past, Present and Possible Futures“, *Creativity and Innovation Management*, 22. Jg., Nr. 2, S. 121–146.
- Jones, D., Bench-Capon, T. und Visser, P. (2007), „Methodologies for Ontology Development“.
- Kahneman, D. (2017), *Schnelles Denken, langsames Denken*, 1. Auflage, Penguin Verlag, München.
- Kannengiesser, U. und Gero, J. S. (2022), „What distinguishes a model of systems engineering from other models of designing? An ontological, data-driven analysis“, *Research in Engineering Design*, 33. Jg., Nr. 2, S. 129–159.
- Karabulut, E., Pileggi, S. F., Groth, P. und Degeler, V. (2024), „Ontologies in digital twins: A systematic literature review“, *Future Generation Computer Systems*, 153. Jg., S. 442–456.
- Kaur, M. und Craven, L. (2022), „Systems Thinking: Practical Insights on Systems-Led Design in Socio-Technical Engineering Systems“, in Maier, A., Oehmen, J. und Vermaas, P. E. (Hg.), *Handbook of Engineering Systems Design*, Springer Cham.
- Kelley, T. und Littman, J. (2001), *The Art of Innovation: Lessons in Creativity from IDEO, America's leading Design Firm*, Random House Inc., New York.
- Kelley, T. und Littman, J. (2005), *The ten Faces of Innovation*, Doubleday&Co.
- Kerzhner, A. A. und Paredis, C. J. (2009), „Using Domain Specific Languages to Capture Design Synthesis Knowledge for Model-Based Systems Engineering“, in *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2009*, San Diego, California, USA.
- Khandoker, A., Sint, S., Gessl, G., Zeman, K., Jungreitmayr, F., Wahl, H., Wenigwieser, A. und Kretschmer, R. (2022), „Towards a logical framework for ideal MBSE tool selection based on discipline specific requirements“, *Journal of Systems and Software*, 189. Jg., S. 111306.
- Kinzel, A., Bachmann, J., Jaiswal, R., Karnal, M., Novo, E. R., Porcelli, F., Schmidt, A., Schwarz, R., Hofmann, C., Förstner, R. und Knopp, A. (2022), „Seamless Radio Access Network for Internet of Space (SeRANIS): New Space Mission for Research, Development, and In-Orbit Demonstration of Cutting-Edge Technologies“, in *73rd International Astronautical Congress (IAC)*, Paris.
- Klieme, E. und Leutner, D. (2006), „Kompetenzmodelle zur Erfassung individueller Lernergebnisse und zur Bilanzierung von Bildungsprozessen. Beschreibung eines neu eingerichteten Schwerpunktprogramms der DFG“, *Zeitschrift für Pädagogik* 52 (2006) 6, S. 876–903, *Zeitschrift für Pädagogik*, 52. Jg.

- Knight, F. H. (1921), *Risk, Uncertainty, and Profit*, The Riverside Press Cambridge, Boston and New York.
- Kodheli, O., Lagunas, E., Maturo, N., Sharma, S. K., Shankar, B., Montoya, J. F. M., Duncan, J. C. M., Spano, D., Chatzinotas, S., Kisseleff, S., Querol, J., Lei, L., Vu, T. X. und Goussetis, G. (2021), „Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges“, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23. Jg., Nr. 1, S. 70–109.
- Kossiakoff, A., Sweet, W. N., Seymour, S. J. und Biemer, S. M. (2011), *Systems Engineering Principles and Practice*, 2. Aufl., John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- Krause, D. und Gebhardt, N. (2018), *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Krause, D. und Heyden, E. (Hg.) (2022), *Design Methodology for Future Products*, Springer International Publishing, Cham.
- Krippendorff, K. (2005), *The Semantic Turn: A New Foundation for Design*, 1. Aufl., CRC Press.
- Kroll, E. und Weisbrod, G. (2020), „Testing and evaluating the applicability and effectiveness of the new idea-configuration-evaluation (ICE) method of conceptual design“, *Research in Engineering Design*, 31. Jg., Nr. 1, S. 103–122.
- Kruchten, P. (2004), *The rational unified process: An introduction, The Addison-Wesley object technology series*, 3rd ed., Addison-Wesley, Boston.
- Lamm, J. G. und Weilkiens, T. (2010), „Functional Architectures in SysML“, in *Tag des Systems Engineering*.
- Larsen, K. R., Lukyanenko, R., Mueller, R. M., Storey, V. C., Parsons, J., VanderMeer, D. und Hovorka, D. S. (2025), „Validity in Design Science“, *SSRN Electronic Journal*.
- Lawson, B. (2005), *How designers think: The design process demystified*, Fourth edition, Routledge, London.
- Ley, W., Wittmann, K. und Hallmann, W. (Hg.) (2019), *Handbuch der Raumfahrttechnik: Mit 892 Bildern und 132 Tabellen*, *Hanser eLibrary*, 5., aktualisierte und erweiterte Auflage, Hanser, München.
- Lindemann, U. (2009), *Methodische Entwicklung technischer Produkte*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Lindemann, U. (2016), *Handbuch Produktentwicklung*, *Hanser eLibrary*, Hanser, München.
- Lindemann, U. und Lorenz, M. (2008), „Uncertainty Handling in Integrated Product Development“, in *Design Society 2008 - International Design Conference*.
- Lipšinić, Z., Husung, S., Pavković, N. und Weber, C. (2024), „Supporting circular economy strategies for design of sustainable mechatronic systems using MBSE“, *Proceedings of the Design Society*, 4. Jg., S. 2645–2654.
- Lopez, M. F., Gomez-Perez, A., Sierra, J. P. und Sierra, A. P. (1999), „Building a chemical ontology using Methontology and the Ontology Design Environment“, *IEEE Intelligent Systems*, 14. Jg., Nr. 1, S. 37–46.
- Ludewig, J. (2003), „Models in software engineering ? an introduction“, *Software and Systems Modeling*, 2. Jg., Nr. 1, S. 5–14.
- Luzeaux, D. (2015), „Complex Systems Design & Management. Proceedings of the Fifth International Conference on Complex Systems Design & Management CSD&M 2014“, in Boulanger, F. (Hg.), *Complex Systems Design & Management*.

- MacDonald, M. (Hg.) (2014), *The international handbook of space technology, Springer Praxis books Astronautical engineering*, Springer; Praxis Publishing, Heidelberg, Berlin, Chinchester, Uk.
- Machi, L. A. und McEvoy, B. T. M. (2016), „The Literature Review. Six steps to success“ (Zugriff am 13. Mai 2021).
- Madni, A. M., Boehm, B., Ghanem, R. G., Erwin, D. und Wheaton, M. J. (2018), *Disciplinary Convergence in Systems Engineering Research*, Springer International Publishing, Cham.
- Maier, M. W. (1998), „Architecting principles for systems-of-systems“, *Systems Engineering*, 1. Jg., Nr. 4, S. 267–284.
- Mandel, C., Boning, J., Behrendt, M. und Albers, A. (2021), „A Model-Based Systems Engineering Approach to Support Continuous Validation in PGE - Product Generation Engineering“, in *2021 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 13.09.2021 - 13.10.2021, Vienna, Austria, IEEE, S. 1–8.
- Mandel, C., Schwarz, S., Brix, T., Albers, A. und Husung, S. (2023), *Improving system of objectives maturity through systematic reuse of knowledge using ontology-based knowledge representations*, ilmedia.
- Manning, C. G. (2018), „What is a satellite?“, verfügbar unter <https://www.nasa.gov/general/what-is-a-satellite/> (Zugriff am 11.2024).
- Martin, J. N. (1997), *Systems engineering guidebook: A process for developing systems and products*, *Systems engineering series*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Martin, R. (2009), *The Design of Business: Why Deign Thinking is the next competitive Advantage*, Harvard Business Review Press.
- Maslow, A. H. (1943), *A Theory of Human Motivation*.
- Mayring, P. (2010), *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*, 11., aktualisierte und überarbeitete Auflage, Beltz Verlag, Weinheim und Basel.
- McManus, H. und Hastings, D. (2005), „A Framework for Understanding Uncertainty and its Mitigation and Exploitation in Complex Systems“, *INCOSE*.
- Mehlstäubl, J. (2023), „Ein Framework zur Analyse komplexer Produktportfolios mittels Machine Learning“, Dissertation, Professur für virtuelle Produktentwicklung, Technische Universität Dresden, Dresden, 2023.
- Mella, P. (2012), *Systems thinking: Intelligence in action, Perspectives in Business Culture*, Bd. 2, Springer Milan, Milano.
- Merriam Webster (2024), „Merriam-Webster Dictionary. Technology“, verfügbar unter <https://www.merriam-webster.com/dictionary/technology> (Zugriff am 8. Juli 2024).
- Metz-Göckel, H. (2022), „Dorsch Lexikon der Psychologie“, verfügbar unter <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/beduerfnis>.
- Michalides, M., Bursac, N., Nicklas, S. J., Weiss, S. und Paetzold, K. (2023), „Analyzing current Challenges on Scaled Agile Development of Physical Products“, *Procedia CIRP*, 119. Jg., S. 1188–1197.
- Milliken, F. J. (1987), „Three Types of Perceived Uncertainty about the Environment: State, Effect, and Response Uncertainty“, *Academy of Management*, Nr. Vo. 12, No. 1, S. 133–143.
- Mizoguchi, R. (2004), „Ontology-based systematization of functional knowledge“, *Journal of Engineering Design*, 15. Jg., Nr. 4, S. 327–351.
- Moen, R. und Clifford, N. (2009), „Evolution of the PDCA Cycle“, in *Proceedings of the 7th ANQ Congress*, Tokyo.

- Monat, J. und Gannon, T. F. (2015), „What is Systems Thinking? A Review of Selected Literature Plus Recommendations“, *American Journal of Systems Science*, S. 11–26.
- Mordecai, Y. (2023), „Toward Systems Engineering Meta-Methodology“, *INCOSE International Symposium*, 33. Jg., Nr. 1, S. 752–767.
- Morin, E. (2007), „Emergence of sense from no-sense“, *Convergencia, Revista de Ciencias Sociales*, S. 153–167.
- Morisio, M. und Torchiano, M. (2002), „Definition and Classification of COTS: A Proposal. First International Conference, ICCBSS 2002 Orlando, FL, USA, February 4-6, 2002 Proceedings“, in *First International Conference, ICCBSS 2002*, Orlando, FL, USA.
- National Aeronautics and Space Administration (2016), *NASA Systems Engineering Handbook*, SP-2016-6105 Rev2.
- Ney, S. und Meinel, C. (2019), *Putting Design Thinking to Work: How Large Organizations Can Embrace Messy Institutions to Tackle Wicked Problems*, Springer eBooks Business and Management, 1st ed. 2019, Springer, Cham.
- Nicklas, S. J., Michalides, M., Gadzo, E. und Koch, A. (2023), „A Multi-Dimensional Analysis of the Current State of Research into Globally Distributed Product Development“, in *DS 125: Proceedings of the 34th Symposium Design for X (DFX2023)*, 14 and 15 September 2023, The Design Society, S. 183–194.
- North, K. (2002), *Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen*, Springer eBook Collection Business and Economics, 3., aktualisierte und erweiterte Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, s.l.
- Noy, N. F. und McGuinness, d. L. (2001), „Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology“.
- Oberndorf, P. A. (1998), *COTS and Open Systems: SEI Monographs on the Use of Commercial Software in Government Systems*, Pittsburgh.
- OMG (2015), *OMG Unified Modeling Language (OMG UML): Version 2.5*.
- OMG (2019), *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML): Version 1.6*.
- Oskam, I., „T-shaped engineers for interdisciplinary innovation: an attractive perspective for young people as well as a must for innovative organisations“.
- Paetzold, K. (2022), „Data and Information Flow Design in Product Development“, in Krause, D. und Heyden, E. (Hg.), *Design Methodology for Future Products*, Springer International Publishing, Cham, S. 201–218.
- Paetzold, K. und Köbler, J. (2014), „A System integration method for the continuous support of the design process“, in *International Design Conference - Design 2014*.
- Paliouras, G. (Hg.) (2011), *Knowledge-driven multimedia information extraction and ontology evolution: Bridging the semantic gap, State-of-the-art survey*, Bd. 6050, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Panusch, F., Brix, T., Rienecker, M. und Husung, S. (2023), *Systematization of existing uncertainties in the context of product development in the automotive supply industry*, ilmedia.
- Patzak, G. (1982), *Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Peppers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A. und Chatterjee, S. (2007), „A Design Science Research Methodology for Information Systems Research“, *Journal of Management Information Systems*, 24. Jg., Nr. 3, S. 45–77.

- Pendzik, M., Sembdner, P. und Paetzold, K. (2023), „Identification and Classification of Uncertainties as the Foundation of Agile Methods“, in *International Conference on Engineering Design, 2023*, Bd. 3, Bordeaux, France, S. 2165–2174.
- Pereira, L., Parizi, R., Prestes, M., Marczak, S. und Conte, T. (2021), „Towards an understanding of benefits and challenges in the use of design thinking in requirements engineering“, in Hung, C.-C., Hong, J., Bechini, A. und Song, E. (Hg.), *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on Applied Computing, 22 03 2021 26 03 2021, Virtual Event Republic of Korea*, ACM, New York, NY, USA, S. 1338–1345.
- Pietrusewicz, K. (2019), „Metamodelling for Design of Mechatronic and Cyber-Physical Systems“, *Applied Sciences*, 9. Jg., Nr. 3, S. 376.
- Piques, J.-D. (2014), „SysML for embedded automotive systems: SysCARS methodology“.
- Plattner, H. (2010), „An Introduction to Design Thinking. Process Guide“, *The Institute of Design at Stanford, Stanford University, (CA, US)*.
- Plattner, H. (Hg.) (2011), *Design Thinking: Understand - Improve - Apply, Understanding Innovation Ser*, Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Pohl, K., Honninger, H., Achatz, R. und Broy, M. (Hg.) (2012), *Model-based engineering of embedded systems: The SPES 2020 methodology*, Springer, Berlin, New York.
- Pohl, K. und Rupp, C. (2015), *A Study Guide for the Certified Professional for Requirements Engineering Exam*, 2. Aufl., Presses universitaires de France, Santa Barbara.
- Portelli, L., Sabatini, M. und Grogan, P. T. (2019), „Ontology Development for Knowledge-driven Distributed Space Mission Systems Engineering“, in *AIAA 2019: Systems Engineering IV*.
- Pourdehnad, J., Wexler, E. R. und Wilson, D. V. (2011), „Systems & Design Thinking: A Conceptual Framework for their Intergration“.
- Prenzel, M., Gogolin, I. und Krüger, H.-H. (Hg.) (2008), *Kompetenzdiagnostik: Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, Springer eBook Collection Humanities, Social Science*, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- Probst, G. J. B., Raub, S. und Romhardt, K. (2006), *Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*, 5., überarb. Aufl., Gabler, Wiesbaden.
- Qaswar, F., Rahmah, M., Raza, M. A., Noraziah, A., Alkazemi, B., Fauziah, Z., Hassan, M. K. A. und Sharaf, A. (2023), „Applications of Ontology in the Internet of Things: A Systematic Analysis“, *Electronics*, 12. Jg., Nr. 1, S. 111.
- Ramos, A. L., Ferreira, J. V. und Barcelo, J. (2012), „Model-Based Systems Engineering: An Emerging Approach for Modern Systems“, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 42. Jg., Nr. 1, S. 101–111.
- Reichertz, J. (2013), *Die Abduktion in der qualitativen Sozialforschung: Über die Entdeckung des Neuen, Lehrbuch*, Bd. 13, 2., aktualisierte und erw. Aufl., Springer VS, Wiesbaden.
- Reichertz, J. (2016), *Qualitative und interpretative Sozialforschung: Eine Einladung, Springer Lehrbuch*, Springer VS, Wiesbaden.
- Reichwein, A. und Paredis, C. J. J. (2011), „Overview of Architecture Frameworks and Modeling Languages for Model-Based Systems Engineering“, in *Volume 2: 31st Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B, 28.08.2011 - 31.08.2011, Washington, DC, USA*, ASMEDE, S. 1341–1349.
- Reinmann, G. und Mandl, H. (Hg.) (2004), *Psychologie des Wissensmanagements: Perspektiven, Theorien und Methoden, Hogrefe eLibrary*, Hogrefe, Göttingen.

- Rhea, D. (2003), „Bringing Clarity to the "Fuzzy Front End". A Precitable Process for Innovation“, in Laurel, B. (Hg.), *Design Research: Methods and Perspectives*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, S. 145–154.
- Richmond, B. (1994), „System Dynamics/Systems Thinking: Let's Just Get On With It“, in *International Systems Dynamics Conference*, High Performance Systems, Inc, Sterling, Scotland.
- Rogers, P. und Freuler, R. J. (2015), „The "T-Shaped" Engineer“, in *122nd ASEE Annual Conference & Exposition*, Seattle.
- Ropohl, G. (2009), *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*, 3. Aufl., Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe.
- Rowley, J. (2007), „The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy“, *Journal of Information Science*, 33. Jg., Nr. 2, S. 163–180.
- Rumbaugh, J., Jacobson, I. und Booch, G. (1999), *The Unified Modeling Language Reference Manual.*, Addison-Wesley Longman.
- Rupp, C. (2014), *Requirements-Engineering und -Management: Aus der Praxis von klassisch bis agil*, 6., aktualisierte und erweiterte Auflage, Hanser, München.
- Sankowski, O., Küchenhof, J., Dambietz, F. M., Züfle, M., Wallisch, A., Krause, D. und Paetzold, K. (2021), „Challenges in early phase of product family development processes“, *Procedia CIRP*, 100. Jg., S. 840–845.
- Saqui-Sannes, P. de, Vingerhoeds, R. A., Garion, C. und Thirioux, X. (2022), „A Taxonomy of MBSE Approaches by Languages, Tools and Methods“, *IEEE Access*, 10. Jg., S. 120936–120950.
- Schindel, W. D. (2023), „Pattern-Based Methods and MBSE“, in Madni, A. M., Augustine, N. und Sievers, M. (Hg.), *Handbook of Model-Based Systems Engineering*, Springer International Publishing, Cham.
- Schmalenbach, H. H. (2013), „Ontologien zum Bereitstellen von Gestaltungswissen am Beispiel von Ingenieurkeramik. Ontologies for design knowledge retrieval using the example of advanced ceramics“, Dissertation, IPEK | Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2013.
- Schmidt, T. S., Wallisch, A., Bohmer, A. I., Paetzold, K. und Lindemann, U. (2017), „Media richness theory in agile development choosing appropriate kinds of prototypes to obtain reliable feedback“, in *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 27.06.2017 - 29.06.2017, Funchal, IEEE, S. 521–530.
- Schmit, M., Briceno, S., Collins, K., Mavris, D., Lynch, K. und Ball, G. (2016), „Semantic design space refinement for model-based systems engineering“, in *2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*, 18.04.2016 - 21.04.2016, Orlando, FL, USA, IEEE, S. 1–8.
- Schön, D. A. (1994), *The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action*, Taylor and Francis, Abingdon, Oxon.
- Schrader, S., Riggs, W. M. und Smith, R. P. (1993), „Choice over uncertainty and ambiguity in technical problem solving“, *Journal of Engineering and Technology Management*, Nr. 10, S. 73–99.
- Sendler, U. (Hg.) (2013), *Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM, Xpert.press*, Springer Vieweg, Berlin.
- Senge, P. M. (1996), *Die fünfte Disziplin: Kunst und Praxis der lernenden Organisation*, Aus dem Amerikanischen von Maren Klötermann, 2. Aufl., Klett-Cotta, Stuttgart.

- Shani, U., Jacobs, S., Wengrowicz, N. und Dori, D. (2016), „Engaging ontologies to break MBSE tools boundaries through semantic mediation“, in *Conference on Systems Engineering Research*.
- Sievers, M. (2023), „Semantics, Metamodels, and Ontologies“, in Madni, A. M., Augustine, N. und Sievers, M. (Hg.), *Handbook of Model-Based Systems Engineering*, Springer International Publishing, Cham, S. 15–46.
- Sillitto, H., Martin, J., McKinney, D., Griego, R., Dori, D., Krob, D., Godfrey, P., Arnold, E. und Jackson, S. (2019), „Systems Engineering and System Definitions“, *INCOSE-TP-2020-002-06*.
- Simon, H. A. (1981), *Die Wissenschaften vom Künstlichen*, Vollständige Übersetzung der 1981 bei The MIT Press erschienen erweiterten Originalausgabe, Kammerer & Unverzagt, Berlin.
- Slobin, S., Yoon, Z. und Fugger, S. (2024), „Applying MBSE to Optimize Satellite and Payload Interfaces in Early Mission Phases“, *Systems*, 12. Jg., Nr. 8, S. 310.
- Staab, S. und Studer, R. (Hg.) (2009), *Handbook on ontologies, International handbooks on information systems*, Second Edition, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Stacey, M., Eckert, C., Pirtle, Z. G., Poznic, M., Schuelke-Leech, B.-A. und Tann, L. von der (2025), „Methods as a form of engineering knowledge“, *Design Science*, 11. Jg.
- Stachowiak, H. (1973), *Allgemeine Modelltheorie*, Springer, Wien, New York.
- Stoewer, H. (2023), „Perspectives on SE, MBSE, and Digital Engineering: Road to a Digital Enterprise“, in Madni, A. M., Augustine, N. und Sievers, M. (Hg.), *Handbook of Model-Based Systems Engineering*, Springer International Publishing, Cham, S. 1301–1337.
- Stokes, D. E. (1997), *Pasteur's Quadrant: Basic Science and Technological Innovation*, Brookings Institution Press, Washington D.C.
- Subramanian, D. und Genesereth, M. R. (1987), „The Relevance of Irrelevance“, in *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 10. Aufl., Stanford, California, S. 416–422.
- Tekaati, J., Kharatyan, A., Anacker, H. und Dumitrescu, R. (2019), „Potentials for the Integration of Design Thinking along Automotive Systems Engineering Focusing Security and Safety“, in *International Conference on Engineering Design, ICED 2019*, Bd. 1, S. 2883–2892.
- Tekaati, J. L., Anacker, H. und Dumitrescu, R. (2021), „The Paradigm of Design Thinking and Systems Engineering in the Design of Cyber-Physical Systems: A Systematic Literature Review“, in *2021 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 13.09.2021 - 13.10.2021, Vienna, Austria, IEEE, S. 1–8.
- Tellioglu, H. (2016), „Models as Bridges from Design Thinking to Engineering“, *Proceedings of the 10th International Conference on Interfaces and Human Computer Interaction (IHCI) 2016*, verfügbar unter <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/56737>.
- Thunnissen, D. (2003), „Uncertainty Classification for the Design and Development of Complex Systems“, in *Third Annual Predictive Methods Conference*, Newport Beach, California.
- Tomita, Y., Watanabe, K., Shirasaka, S. und Maeno, T. (2017), „Applying Design Thinking in Systems Engineering Process as an Extended Version of DIKW Model“, *INCOSE International Symposium*, 27. Jg., Nr. 1, S. 858–870.
- Tschimmel, K. (2012), „Design Thinking as an effective Toolkit for Innovation“, in Huizingh, E. (Hg.), *Proceedings of the XXIII ISPIIM Conference: Action for Innovation: Innovating from*, Manchester, UK.
- Ullman, D. G. (2010), *The mechanical design process, McGraw-Hill series in mechanical engineering*, 4th ed., McGraw-Hill Higher Education, Boston.

- Ulrich, K. T., Eppinger, S. D. und Yang, M. C. (2020), *Product design and development*, Seventh edition, McGraw-Hill Education, New York NY.
- Uschold, M. und King, M. (1995), „Towards a Methodology for Building Ontologies“, *Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing*.
- van Ruijven, L. (2012a), „Ontology and Model-based Systems Engineering“, *Procedia Computer Science*, 8. Jg., S. 194–200.
- van Ruijven, L. (2012b), „Ontology for Systems Engineering: Model-Based Systems Engineering“, in *2012 Sixth UKSim/AMSS European Symposium on Computer Modeling and Simulation*, 14.11.2012 - 16.11.2012, Malta, Malta, IEEE, S. 371–376.
- van Ruijven, L. (2015), „Ontology for Systems Engineering as a base for MBSE“, *INCOSE International Symposium*, 25. Jg., Nr. 1, S. 250–265.
- VDI 2206 (2020), *Entwicklung cyber-physischer mechatronischer Systeme (CPMS): VDI 2206*, 03.100.40, 31.220.01, 39.020 No. 2206.
- VDI 2221 (2018), *Entwicklung technischer Produkte und Systeme Modell der Produktentwicklung: VDI 2221*, Bd. 03.100.40 No. 2221.
- VDI 2424 (1986), *Industrial Design-Grundlagen, Begriffe, Wirkungsweisen: VDI/VDE 2424*, 681.001.1: 18.01, 658.512.2(083.132) No. 1.
- VDI 3780 (2000), *Technikbewertung. Begriffe und Grundlagen: VDI 3780*, Beuth.
- Vietor, T. und Huth, T. (2022), „Methodical Approaches for Engineering Complex Systems“, in Krause, D. und Heyden, E. (Hg.), *Design Methodology for Future Products*, Springer International Publishing, Cham, S. 287–306.
- Voirin, J.-L., Wippler, J.-L., Bonnet, S. und Exertier, D. (2018), *Model-Based System and Architecture Engineering: The ARCADIA Method, Principles and Practice*, Systems and industrial engineering, ISTE Press Limited - Elsevier Incorporated; Elsevier Science & Technology Books [distributor], Saint Louis.
- von Bertalanffy, L. (1968), *General Systems Theory: Foundations, Development, Applications*, George Braziller, Inc., New York, NY.
- Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M., Janssen, P. und Krayen von Krauss, M. P. (2003), „Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support“, *Integrated Assessment*, 4. Jg., Nr. 1, S. 5–17.
- Wang, X., Johnston, R. und Patel, S. (2001), „Ontology Modeling Using UML“, in *7th International Conference on Object-Oriented Information Systems*, Calgary, Canada.
- Waseem, M. und Sadiq, M. U. (2018), „Application of model-based systems engineering in small satellite conceptual design-A SysML approach“, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 33. Jg., Nr. 4, S. 24–34.
- Weilkiens, T. (2014), *Systems Engineering mit SysML/UML: Anforderungen, Analyse, Architektur*, 3. Aufl., dpunkt.verlag.
- Weilkiens, T. (2016), *Variant modeling with SysML, MBSE4U booklet series, MBSE4U*, [Fredesdorf].
- Weinberg, U. (2024), „Die sechs Schritte im Design Thinking Innovationsprozess“, verfügbar unter <https://hpi.de/school-of-design-thinking/design-thinking/hintergrund/design-thinking-prozess.html> (Zugriff am 24. September 2024).
- Weinert, F. E. (Hg.) (2014), *Leistungsmessungen in Schulen, Ciando library*, 3., aktualisierte Auflage, Beltz, Weinheim, Basel.

- Wertz, J. R., Everett, D. F. und Puschell, J. J. (2011), *Space Mission Engineering - The New SMAD*, Microcosm Press, Hawthorne, CA.
- Wiley, L. J., Kirkpatrick, D., Sellers, J. J., Thomas, d. und Dinesh, V. (2009), *Applied Space Systems Engineering*, The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Woodcock, C. S. E., Callewaert, J. und Millunchick, J. (2021), „Synthesizing Definitions of Professional Competencies Linked to Experiential Learning in Engineering Education: A Literature Review“, *Journal of Higher Education Theory and Practice*, Nr. Vol. 2.
- Wymore, A. W. (1993), *Model-Based Systems Engineering*, CRC Press.
- Wynn, D. C. und Clarkson, P. J. (2018), „Process models in design and development“, *Research in Engineering Design*, 29. Jg., Nr. 2, S. 161–202.
- Wynn, D. C. und Clarkson, P. J. (2024), *The Design and Development Process: Perspectives, Approaches and Models*, 1st ed. 2024, Springer International Publishing; Imprint Springer, Cham.
- Yang, L., Cormican, K. und Yu, M. (2019), „Ontology-based systems engineering: A state-of-the-art review“, *Computers in Industry*, 111. Jg., S. 148–171.
- Zahid, F., Tanveer, A., Kuo, M. M. Y. und Sinha, R. (2022), „A systematic mapping of semi-formal and formal methods in requirements engineering of industrial Cyber-Physical systems“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33. Jg., Nr. 6, S. 1603–1638.
- Zhang, M., Selic, B., Ali, S., Yue, T., Okariz, O. und Norgren, R. (2016a), „Understanding Uncertainty in Cyber-Physical Systems: A Conceptual Model. 12th European Conference, ECMFA 2016, Held as Part of STAF 2016, Vienna, Austria, July 6-7, 2016, Proceedings“, in *Modelling Foundations and Applications*, Bd. 9764.
- Zhang, M., Selic, B., Yue, T., Okariz, O. und Norgren, R. (2016b), „Understanding Uncertainty in Cyber-Physical Systems: A Conceptual Model“, *Simula Research Laboratory, Technical Report*, 2015. Jg.
- Zhang, M., Yue, T., Ali, S., Selic, B., Okariz, O., Norgre, R. und Intxausti, K. (2018), „Specifying uncertainty in use case models“, *Journal of Systems and Software*, 144. Jg., S. 573–603.
- Zhao, X., Wang, Z., Cui, Y. und Zheng, G. (2020), „Novel Ontology-Based Method for Generating Satellite Cluster’s Task Configuration“, *Journal of Aerospace Information Systems*, 17. Jg., Nr. 2, S. 86–96.
- Zhao, Y. und Jensen, H. (2022), „Towards a Modern Learning Organization: Human-Centered Digitalization of Lessons Learned Management for Complex Systems Development Projects“, *Technologies*, 10. Jg., Nr. 6, S. 117.
- Zhao, Y.-Y. (2015), „Towards innovative system development: A joint method of design thinking and systems thinking“, *INCOSE International Symposium*, 25. Jg., Nr. 1, S. 1427–1437.
- Zulch, B. G. (2014), „Communication: The Foundation of Project Management“, *Procedia Technology*, 16. Jg., S. 1000–1009.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Zusammenfassung Zielsetzung und Aufgabenstellung.....	13
Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit und Übersicht Kapitelinhalt.....	14
Abbildung 2-1: Hilfestellungen der DRM bei der Erarbeitung einer methodischen Unterstützung	15
Abbildung 2-2: Das DRM-Rahmenwerk i.A. an (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 15).....	17
Abbildung 2-3: Suchmatrix für die Literaturrecherche zu Design Thinking und MBSE.....	19
Abbildung 2-4: Suchmatrix für die Literaturrecherche zu Ontologien in der Satellitendomäne	19
Abbildung 2-5: Prozess der Literaturauswahl i.A. an (Gadzo und Koch, 2025)	20
Abbildung 2-6: Elemente der Methodik, i.A. an (Gericke et al., 2017, S. 107).....	21
Abbildung 2-7: Übersicht Forschungskonzept	22
Abbildung 2-8: Kriterien für die Entwicklung und Validierung der Methodik.....	23
Abbildung 2-9: Stokes Matrix i. A. an die Darstellung aus (Hevner und Chatterjee, 2010, S. 3).....	24
Abbildung 2-10: DSR Knowledge Contribution Framework i.A. an (Gregor und Hevner, 2013, S. 345).....	25
Abbildung 3-1: Unsicherheits-/Mehrdeutigkeitsmatrix i.A. an (Schrader et al., 1993, S. 81).....	29
Abbildung 3-2: Unsicherheitsklassifizierung für den Entwurf und die Entwicklung komplexer Systeme i.A. an (Thunnissen, 2003, S. 12).....	30
Abbildung 3-3: Unsicherheitsquellen i.A. an (De Weck et al., 2007, S. 4)	31
Abbildung 3-4: Dreidimensionales Konzept zur Beschreibung und Klassifikation von Unsicherheit, i.A. an (Walker et al., 2003, S. 9)	32
Abbildung 3-5: Vier Merkmale von Komplexität nach (Lindemann, 2009, S. 10).....	34
Abbildung 3-6: Arten der Unsicherheit in der Entwicklung, i.A. an (Clarkson und Eckert, 2005, S. 183)	35
Abbildung 3-7: Systemdarstellung i.A. an (Ehrlenspiel und Meerkamm, 2017, S. 28)	38
Abbildung 3-8: Die Prozesse der (ISO/IEC/IEEE, 2023, S. 21) i.A. an (Lindemann, 2016, S. 157).....	45
Abbildung 3-9: Das vereinfachte Systems Engineering Konzept. i.A. an (Haberfellner et al., 2019, S. 6)	46
Abbildung 3-10: Die drei Säulen des MBSE i.A. an (Delligatti, 2013).....	47
Abbildung 3-11: Einteilung der Modellierungssprachen i.A. an (Saqui-Sannes et al., 2022, S. 4).....	48
Abbildung 3-12: Diagrammtypen der SysML i.A. an (INCOSE, 2015, S. 187)	49
Abbildung 3-13: Aktivitäten und Ebenen des Requirements Engineering i.A. an (Gadzo et al., 2022, S. 3) ..	51
Abbildung 3-14: Design Thinking Sichtweisen nach (Johansson-Sköldberg et al., 2013).....	53
Abbildung 3-15: Veranschaulichung des Begriffes Ontologie, basierend auf (Schmalenbach, 2013).....	57
Abbildung 3-16: Grafische Darstellung einer beispielhaften Fahrzeug Ontologie.....	58
Abbildung 3-17: Ontologie-Klassifizierung in Abhängigkeit der Allgemeinheit und dem Bezugsaspekt i.A. an (Jannidis et al., 2017, S. 165).....	60
Abbildung 3-18: Kategorisierung von Prozessmodellen nach (Wynn und Clarkson, 2018, S. 165).....	63
Abbildung 4-1: OOSEM Aktivitäten und Modellartefakte i.A. an (Estefan und Weillkiens, 2023, S. 52)	69
Abbildung 4-2: Veranschaulichung der Matrix der MagicGrid-Methodik i.A. an (Aleksandraviciene und Morkevicius, 2021, S. 12)	70
Abbildung 4-3: Das Kern-Unsicherheitsmodell dargestellt in SysML, i.A. an (Zhang et al., 2016a, S. 255) ..	72
Abbildung 4-4: Doppel-Diamant-Prozessmodell i.A. an Darstellung in (Hehn et al., 2020, S. 26)	80
Abbildung 4-5: Das Design Thinking 3-I-Modell von IDEO i.A. an (Tschimmel, 2012, S. 6).....	80
Abbildung 4-6: Design Thinking-Modell der d-school des Hasso-Plattner-Instituts in Potsdam i.A. an (Plattner, 2011, S. 220)	81
Abbildung 4-7: Fünf-Phasen-Modell des Hasso-Plattner-Instituts für Design in Stanford i.A. an (Plattner, 2010)	82
Abbildung 4-8: Problemlösungsmodell nach Anders Skoe. i.A. an (Camacho, 2018, S. 638).....	84
Abbildung 4-9: Das strukturierte Design Thinking Framework i.A. an (Tomita et al., 2017, S. 7).....	85
Abbildung 4-10: Das "atmende" SPALTEN-Prozessmodell i.A. an (Bursac et al., 2022, S. 4)	86
Abbildung 4-11: Verteilung der Beiträge nach Themenbereich	89

Abbildung 5-1: Die drei Bausteine der aufgabenspezifischen Methodik	96
Abbildung 5-2: Das DT-MBSE Integrationsmodell	97
Abbildung 5-3: T-Shaped-Kompetenzmodell i.A. an (Delicado et al., 2018, S. 545).....	101
Abbildung 5-4: Der linke Diamant des DT-MBSE Integrationsmodells.....	104
Abbildung 5-5: Der rechte Diamant des DT-MBSE Integrationsmodells	106
Abbildung 5-6: Bewertung der Methoden zur Ontologieentwicklung	114
Abbildung 5-7: Gesamtaufbau des ontologischen Konzepts, i.A. an (Gadzo und Koch, 2025).....	115
Abbildung 5-8: Die General Ontology in SysML, i.A. an (Gadzo und Koch, 2025).....	116
Abbildung 5-9: Aktivitäten der METHONTOLOGY i.A. an (Lopez et al., 1999, S. 39)	118
Abbildung 5-10: Die obersten Ebenen der Structure Ontology in SysML i.A. an (Gadzo und Koch, 2025) .	119
Abbildung 5-11: Zusammenwirken von Profil und Structure Ontology	121
Abbildung 5-12: Structure Profile Top-Level.....	122
Abbildung 5-13: Die Uncertainty Ontology i.A. an (Gadzo und Koch, 2025)	123
Abbildung 5-14: Schematische Teildarstellung des Aufbaus der Element-Bibliothek	126
Abbildung 5-15: Übersicht über die Analysemethoden der ITPE-Methodik.....	130
Abbildung 5-16: Zusammenhang zwischen Checkpoints und dem DT-MBSE Integrationsmodell	131
Abbildung 5-17: Zusammenspiel DT-MBSE Integrationsmodell und Analysemethoden, i.A. an (Gadzo et al., 2024, S. 2542).....	132
Abbildung 5-18: Übergeordnete Struktur der ITPE-Methodik - Schematische Darstellung der Umsetzung im SysML-Tool	133
Abbildung 5-19: Allgemeine Struktur der Aktivitätsdiagramme der Analysemethoden	134
Abbildung 5-20: Werkzeugauswahl für die Anforderungsanalyse in SysML	135
Abbildung 5-21: Werkzeugauswahl für die Systemkontextanalyse in SysML	137
Abbildung 5-22: Werkzeugauswahl für die Verhaltensanalyse in SysML	139
Abbildung 5-23: Werkzeugauswahl für die Funktionsanalyse in SysML.....	142
Abbildung 5-24: Werkzeugauswahl für die Strukturanalyse in SysML	144
Abbildung 5-25: Struktur der Unsicherheitsmodellierung in der Elementbibliothek.....	145
Abbildung 5-26: Beispiel für den Einsatz der Kommentarelemente zur Unsicherheitsmodellierung.....	146
Abbildung 5-27: Beispiel für den Einsatz der Blockelemente zur Unsicherheitsmodellierung.....	147
Abbildung 5-28: Beispiel für die Zuweisung von Unsicherheitsblöcken in der Verhaltensanalyse	147
Abbildung 6-1: Visualisierung des Validierungsvorgehens der ITPE-Methodik	149
Abbildung 6-2: Kriterien für die Validierung der ITPE-Methodik, analog Abbildung 2-8	150
Abbildung 6-3: Schematische Gesamtübersicht des Experiments 06 i.A. an (Hebzibah et al., 2022, S. 2)	153
Abbildung 6-4: Verteilung der Unsicherheiten in Abhängigkeit der Analysemethode	156
Abbildung 6-5: Verteilung der Unsicherheiten in Abhängigkeit der Art der Unsicherheit.....	157
Abbildung 6-6: Ausschnitt aus dem ibd des L1/L5-GNSS-Zenitantennen-Subsystems	158
Abbildung 6-7: Reduktion und Zuweisung von Unsicherheiten in Abhängigkeit des Analysegegenstandes	159

10 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1-1: "Wie definieren Sie den Begriff New Space?" - Interview Ergebnisse</i>	<i>5</i>
<i>Tabelle 1-2: Herausforderungen bei der Entwicklung mit einem New Space-Ansatz.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabelle 1-3: Herausforderungen bei der Entwicklung mit einem traditionellen Ansatz</i>	<i>9</i>
<i>Tabelle 1-4: Die sieben häufigsten Nennungen von Vorteilen von MBSE nach Frage aus (Clifford, 2020, S. 8)</i>	<i>10</i>
<i>Tabelle 2-1: Typen von Forschungsprojekten i.A. an (Blessing und Chakrabarti, 2009, S. 18).....</i>	<i>16</i>
<i>Tabelle 3-1: Ausgewählte Definitionen des Begriffes Systems Thinking.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabelle 3-2: Eigenschaften eines System Thinkers nach INCOSE.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabelle 3-3: Ausgewählte Definitionen des Begriffes Systems Engineering</i>	<i>42</i>
<i>Tabelle 3-4: Auswahl an MBSE-Modellierungswerkzeugen i.A. an (Khandoker et al., 2022, S. 8).....</i>	<i>50</i>
<i>Tabelle 3-5: Übersicht Quellen der Sichtweisen</i>	<i>54</i>
<i>Tabelle 3-6: Definitionen des Begriffsfeldes Wissen.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabelle 3-7: Ausschnitt aus den identifizierten Prozessmodell-Zwecken nach (Browning, 2010, S. 322)....</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 4-1: Zuordnung der Forschungsschwerpunkte zur Struktur des Kapitels 4.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabelle 4-2: Identifizierte MBSE-Methodiken aus (Estefan, 2008) & (Estefan und Weilkens, 2023)</i>	<i>66</i>
<i>Tabelle 4-3: Überblick der in (Dickopf, 2020) identifizierten SysML-bezogenen Ansätze i.A. an (Dickopf, 2020, S. 64).....</i>	<i>68</i>
<i>Tabelle 4-4: Mittel zur Identifizierung von Unsicherheiten im Requirements Engineering, i.A. an (Gräßler et al., 2021, S. 1693)</i>	<i>74</i>
<i>Tabelle 4-5: Ausschnitt aus der Klassifikation von Satelliten aus (Bothelo und Xavier, 2019, S. 68)</i>	<i>88</i>
<i>Tabelle 4-6: Häufigkeit weiterer Themenbereiche in Beiträgen zu domänenspezifischen Ontologien.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabelle 4-7: Zusammenfassung der Beiträge aus anderen Themenbereichen</i>	<i>92</i>
<i>Tabelle 5-1: Zuordnung der Forschungsschwerpunkte zur Struktur des Kapitels 5.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabelle 5-2: Kompetenzprofile jeweiligen Rollen des DT-MBSE Integrationsmodells.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabelle 5-3: Anforderungen an Vorgehensmodelle zur Unterstützung von Projekten unter Unsicherheiten nach (Lindemann und Lorenz, 2008, S. 178).....</i>	<i>107</i>
<i>Tabelle 5-4 Qualitätskriterien für Ontologien nach (Staab und Studer, 2009, S. 294, ff.)</i>	<i>127</i>
<i>Tabelle 5-5: Übersicht Aktivitäten und SysML-Werkzeuge in der Anforderungsanalyse</i>	<i>135</i>
<i>Tabelle 5-6: Übersicht Aktivitäten und SysML-Werkzeuge in der Systemkontextanalyse</i>	<i>136</i>
<i>Tabelle 5-7: Übersicht Aktivitäten und SysML-Werkzeuge in der Verhaltensanalyse</i>	<i>138</i>
<i>Tabelle 5-8: Übersicht Aktivitäten und SysML-Werkzeuge in der Funktionsanalyse</i>	<i>141</i>
<i>Tabelle 5-9: Übersicht Aktivitäten und SysML-Werkzeuge in der Strukturanalyse</i>	<i>143</i>
<i>Tabelle 6-1: Ergebnisse der Experimentenbewertung zur Auswahl eines Anwendungsfalls</i>	<i>153</i>
<i>Tabelle 6-2: Übersicht über identifizierte Unsicherheiten</i>	<i>155</i>
<i>Tabelle 6-3: Bilanz der reduzierten und zugewiesenen Unsicherheiten</i>	<i>158</i>
<i>Tabelle 6-4: Ergebnisse der Kriterienbewertung.....</i>	<i>159</i>

A-1 Interviewstudie

Fragebogen

1 Hintergrund & Erfahrung der Studienteilnehmer:

- Wie lange arbeiten Sie bereits auf dem Gebiet der Raumfahrt?
- In welcher Position arbeiten Sie derzeit?
- In welchem Bereich sind Sie derzeit tätig?
- Wie lange sind Sie bereits in diesem Bereich tätig?
- In welchem Bereich haben Sie bis dato am längsten gearbeitet?
- An wie vielen Satellitenmissionen haben Sie bis jetzt mitgearbeitet?

2 Fragen zur Begriffsabgrenzung, Satellit, Kleinsatellit, Kleinsatellitenmission, Cube-Sat, New Space:

- Existiert für Sie eine begriffliche Abgrenzung zwischen den Begriffen "Großsatellit/herkömmlicher Satellit" und "Kleinsatellit"? Wenn ja, welche?
- Wie definieren Sie den Begriff „New Space“?
- Wenn wir jetzt die oberen beiden Fragen kombinieren: Wie würden Sie jetzt die begriffliche Abgrenzung zwischen einem Großsatelliten in einer herkömmlichen/konventionellen Entwicklungsumgebung und einem Kleinsatelliten in einer New Space Entwicklungsumgebung voneinander abgrenzen?
- Wie würden Sie die begriffliche Abgrenzung zwischen einem Kleinsatelliten in einer herkömmlichen/konventionellen Entwicklungsumgebung und einem Kleinsatelliten in einer New Space Entwicklungsumgebung voneinander abgrenzen?
- Ich möchte nun auf den Cube-Sat zu sprechen kommen. Welche Eigenschaften hat ein Cube-Sat? (Hinweis: Eine Eigenschaft setzt sich formal aus einem Merkmal und seiner Ausprägung zusammen)
- Existiert ein Unterschied zwischen einer "Cube-Sat Mission" und einer "Kleinsatellitenmission"?
- Welche Unterschiede sind das?
- In welcher Umgebung wird ein Cube-Sat entwickelt (herkömmlich/konventionell oder New Space)?

3 Fragen zu den Herausforderungen in der Entwicklung von Kleinsatellitenmissionen:

3.1 New Space vs. konventionell

- Was sind Ihrer Meinung nach aktuelle Herausforderungen in der Entwicklung von Kleinsatellitenmissionen in einer New Space-Umgebung?
- Was sind aktuelle Herausforderungen bei konventionellen Missionen?

- Inwiefern hat der New Space-Ansatz Ihrer Meinung nach neue Herausforderungen in der Entwicklung von Kleinsatellitenmissionen geschaffen?
- Existieren hybride Ansätze?
- Bezogen auf die Nutzung der beiden Ansätze New Space und konventionell, werden auch zukünftig beide Ansätze zum Einsatz kommen? Wenn ja, inwiefern?

3.2 Herausforderungen in der Entwicklung in Abhängigkeit von der Art der Mission

- Ändert sich das Vorgehen in der Entwicklung in Abhängigkeit von der Art der Mission, z.B. erdgebunden oder interplanetar? Wenn ja, wie?
- Unterscheiden sich die Herausforderungen im Entwicklungsvorgehen einer wissenschaftlichen Satellitenmission von einer kommerziellen Satellitenmission, beispielsweise im Kommunikationsbereich? Wenn ja, wie?

3.3 Abschließende Frage

- Wie könnte man Ihrer Meinung nach den aktuellen methodischen Herausforderungen in der Entwicklung von Kleinsatellitenmissionen in einer New Space-Umgebung begegnen?

Auswertung

Im Folgenden werden die ausgewerteten Fragen der Interviewstudie dokumentiert, die nicht bereits im Hauptteil der Arbeit vorgestellt wurden.

Existiert für Sie eine begriffliche Abgrenzung zwischen den Begriffen "Großsatellit/herkömmlicher Satellit" und "Kleinsatellit"? Wenn ja, welche?

Antworten	Häufigkeit
Gewicht (Masse)	10
Anzahl Funktionalitäten	5
Orbit	4
Komplexität	4
Größe (Volumen)	4
Anpassung an die Payload (herkömmlicher Satellit: besitzt eine bessere Anpassung an die Payload)	2
Anwendungsfall	1

An was ist der New Space-Ansatz gekoppelt/wann wird dieser verwendet?

Antworten	Häufigkeit
New Space-Ansatz ist losgelöst von der Satellitengröße, wird derzeit hauptsächlich bei Kleinsatelliten verwendet	11
Ist auf Anwendungsfall bezogen: Wenn der Wert des Satelliten zu hoch ist, bzw. keine Risikobereitschaft vorhanden ist, wird kein New Space-Ansatz verwendet	11

Welche Eigenschaften hat ein Cube-Sat?

Antworten	Häufigkeit
Standardisierte Größe: Volumen Vorgabe (in U oder Cubes)	11
Begrenzte Einsatzmöglichkeit aufgrund der Größe	10
Wenig Funktionen (aufgrund Einschränkung durch Größe) im Vergleich zu Kleinsatelliten	10
COTS-Integration	9
Keine aktive Lage-Regelung	6
Keine Redundanz	6
Modulare Bausteine	2
Eigenes Command & Control Protokoll	1

In welcher Umgebung wird ein Cube-Sat entwickelt (herkömmlich/konventionell oder New Space)?

Antworten	Häufigkeit
New Space	10

Existieren hybride Ansätze?

Antworten	Häufigkeit
Ja, die traditionelle Raumfahrt stellt eine gute Basis, die gut durch New Space Ansätze komplementiert werden kann	11

Bezogen auf die Nutzung der beiden Ansätze New Space und konventionell, werden auch zukünftig beide Ansätze zum Einsatz kommen? Wenn ja, inwiefern?

Antworten	Häufigkeit
Hybride Ansätze mit verschiedenen Ausprägungen je nach Mission werden die Zukunft: Je nach Risikobereitschaft mehr Richtung New Space oder traditionell (weniger Dokumentation und Testung oder mehr Dokumentation und Testung)	11
Trend mehr Richtung New Space: gerade bei erdnahen Satelliten und Satellitentypen, die oft gebaut werden (z.B. Kommunikationssatellit) höhere Risikobereitschaft	10
Mehr Richtung konventioneller Ansatz: wenn Wert zu hoch ist (Preis oder Relevanz) und daher nur minimale Risikobereitschaft (Bsp.: interplanetare Missionen)	10
Verschwinden des rein traditionellen Ansatzes, da nicht mehr zeitgemäß	9

Ändert sich das Vorgehen in der Entwicklung in Abhängigkeit von der Art der Mission, z.B. erdgebunden oder interplanetar? Wenn ja, wie?

Antworten	Häufigkeit
Entwicklungsprozess gleich (grundlegende methodisches Vorgehensweise bleibt gleich)	11
Erdgebunden eher New Space (große Änderung)	10
Interplanetar mehr Richtung konventioneller Ansatz (geringe Änderung)	10
Je teurer ein Satellit/Payload und je schwieriger das Umfeld (mehr Unsicherheiten), desto mehr geht es in die traditionelle Richtung (Ausprägung ändert sich, Risikoakzeptanz, mehr QS)	10

Unterscheiden sich die Herausforderungen im Entwicklungsvorgehen einer wissenschaftlichen Satellitenmission von einer kommerziellen Satellitenmission, beispielsweise im Kommunikationsbereich? Wenn ja, wie?

Antworten	Häufigkeit
Kommerzielle Missionen: engerer Kostenplan; mögliches Zurückgreifen auf standardisierte verfügbare Lösungen und geprüfte Bauteile; höhere Modularität (aufgrund Fokus auf Gewinnmarge)	10
Wissenschaftliche Missionen: teurer; einzigartig („One of a kind“, Unikat); auf spezifischen Anwendungsfall zugeschnittene Lösung; Anpassung der Satelliten-Plattform an die Payload; höhere Anforderungen an Satelliten (Genauigkeit und Präzision); finanzielle Aspekte nicht vordergründig	10

Wie könnte man Ihrer Meinung nach den aktuellen methodischen Herausforderungen in der Entwicklung von Kleinsatellitenmissionen in einer New Space Umgebung begegnen?

Antworten	Häufigkeit
MBSE wäre ein <u>möglicher</u> Ansatz zur Minimierung der Herausforderungen	9
MBSE ist ein <u>geeigneter</u> Ansatz zur Minimierung der Herausforderungen	3

A-2 Schaubilder Ontologie

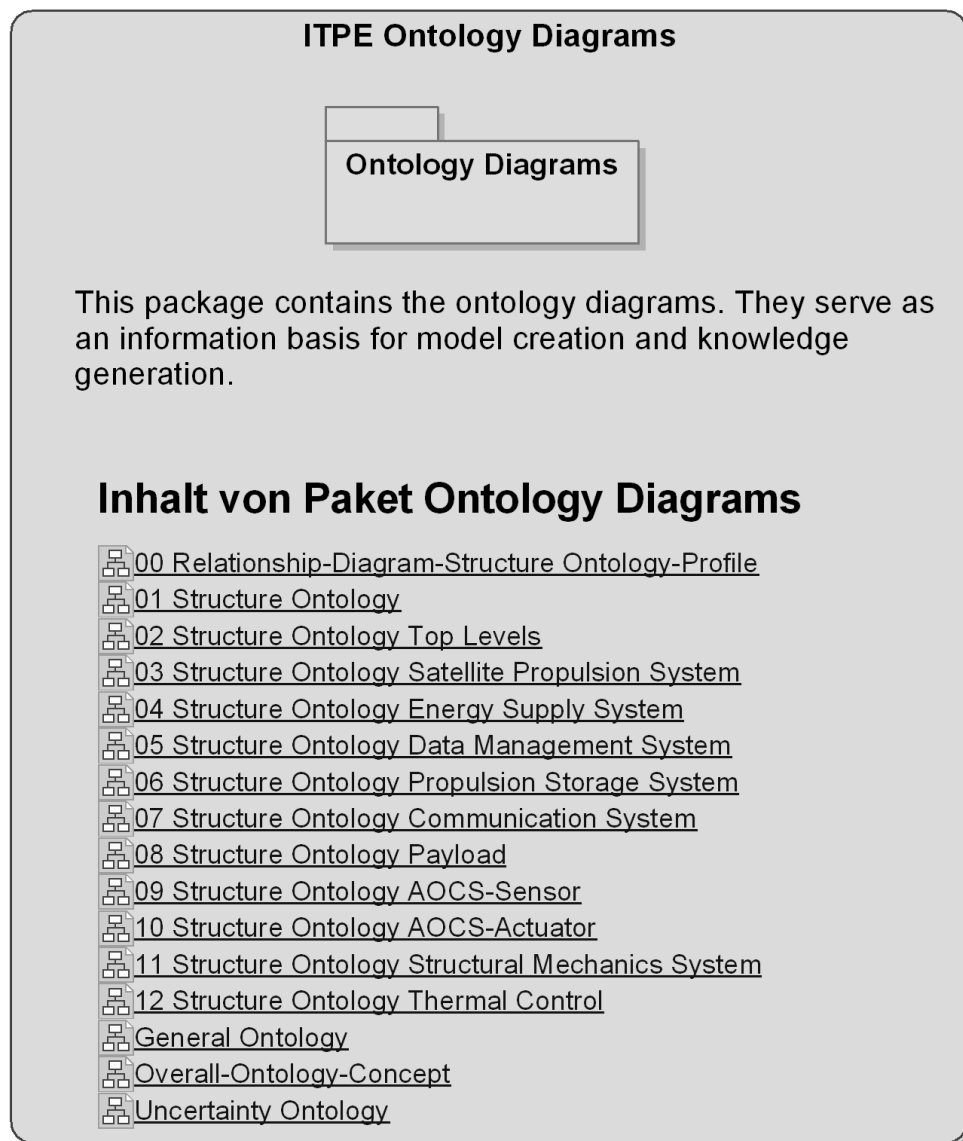


Abbildung 11-1: Inhaltsdiagramm des Ontologie Abschnittes der ITPE Methodik

Im Folgenden werden die in Abbildung 11-1 aufgelisteten Detailansichten der Structure Ontology dokumentiert. Darstellungen von Diagrammen, die bereits im Hauptteil dokumentiert sind, werden nicht im Anhang dargestellt (Overall-Ontology-Concept, General Ontology & Abschnitte, Uncertainty Ontology, Structure Ontology Top Levels, Relationship-Diagram-Structure Ontology-Profile). Um die Lesbarkeit zu vereinfachen, sind die Diagramme in Querformat dargestellt.

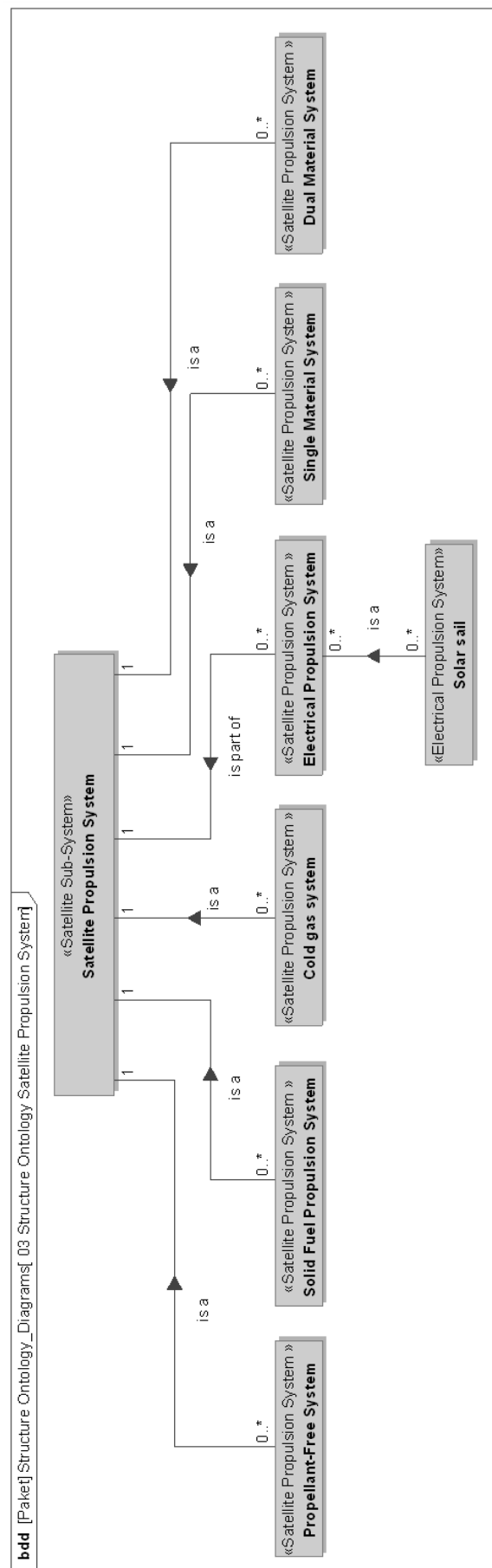


Abbildung 11-2: Structure Ontology Subcategory - Satellite Propulsion System

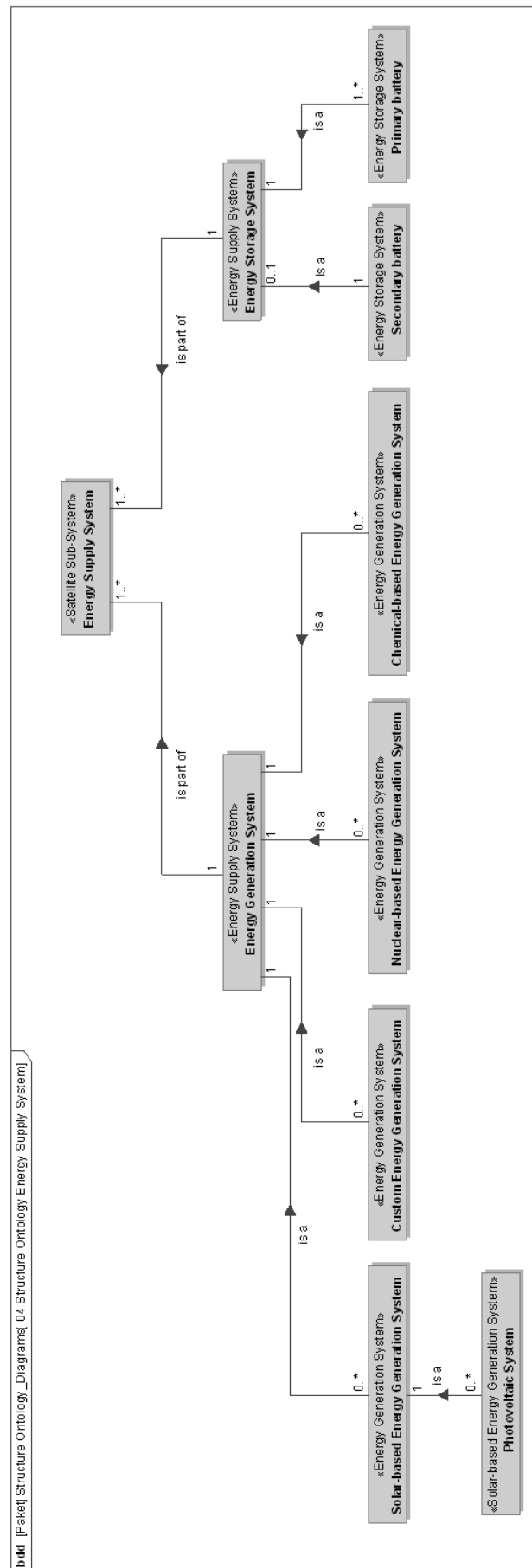


Abbildung 11-3: Structure Ontology Subcategory – Energy Supply System

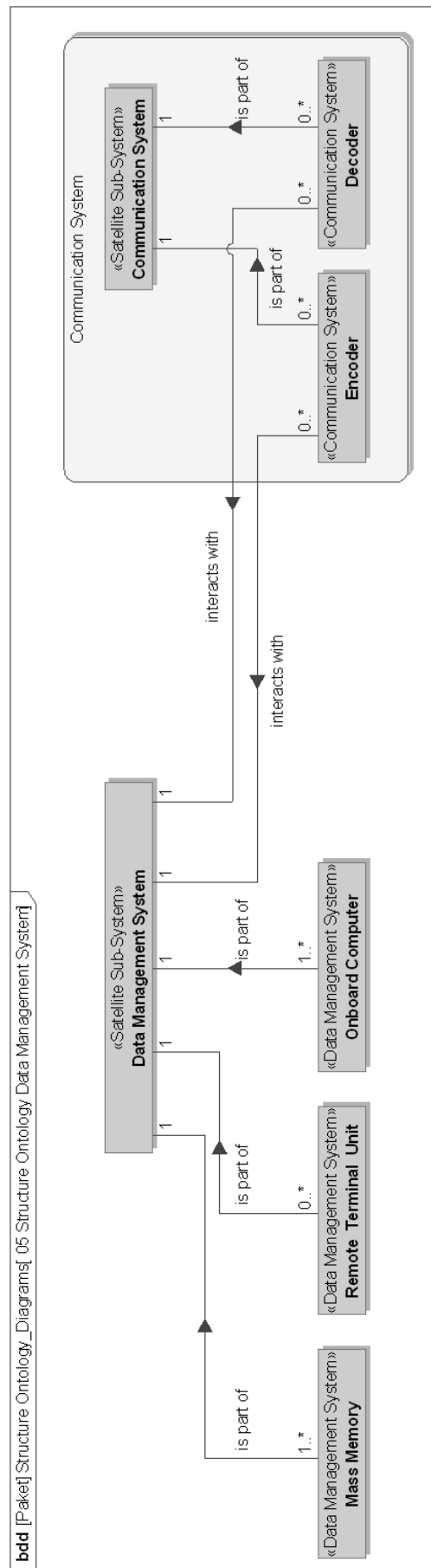


Abbildung 11-4: Structure Ontology Subcategory – Data Management System

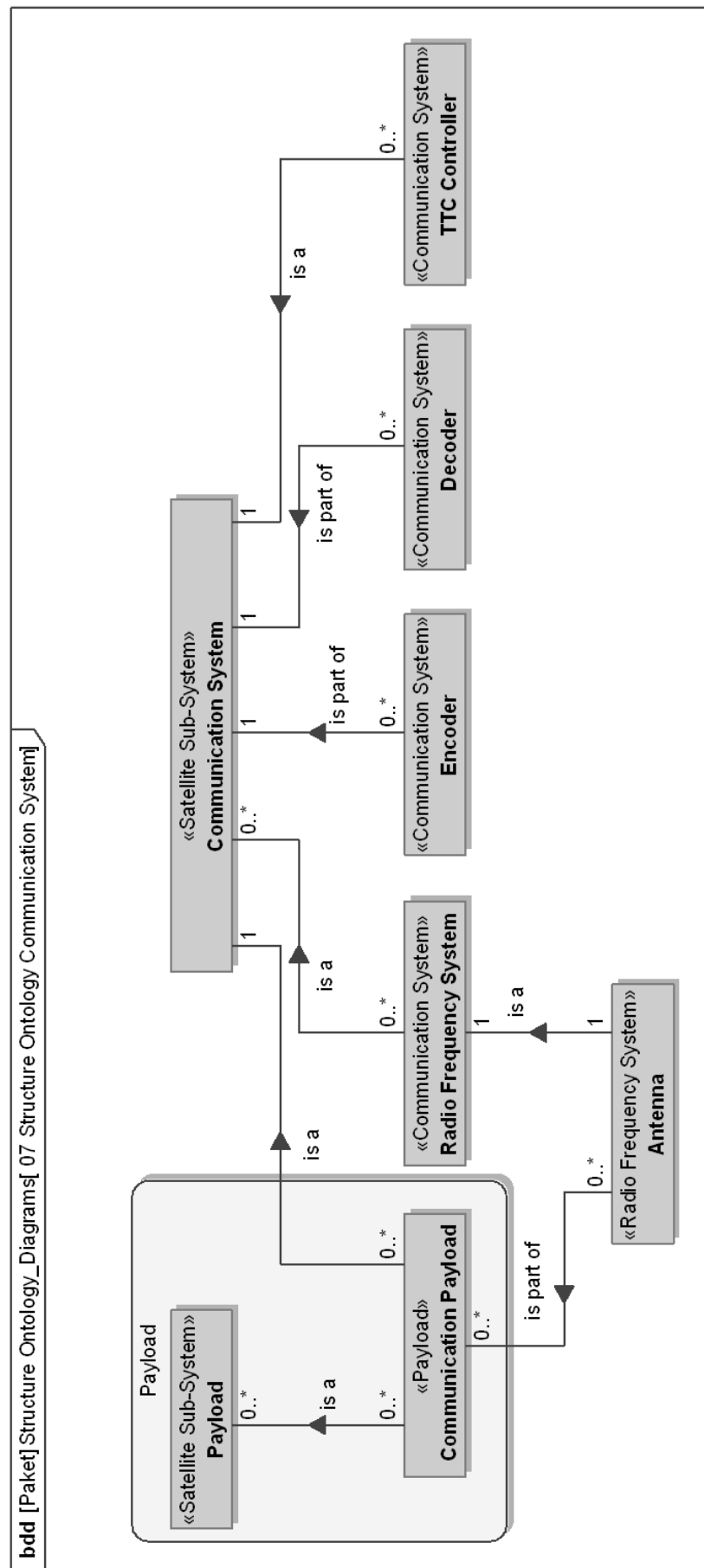


Abbildung 11-5: Structure Ontology Subcategory – Communication System

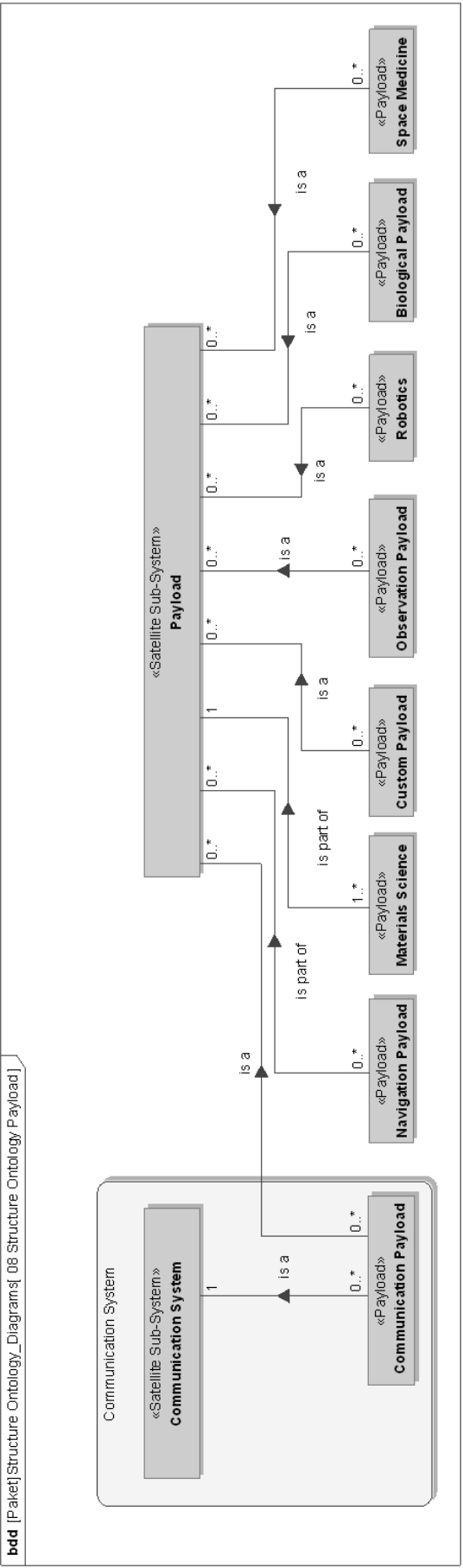


Abbildung 11-6: Structure Ontology Subcategory - Payload

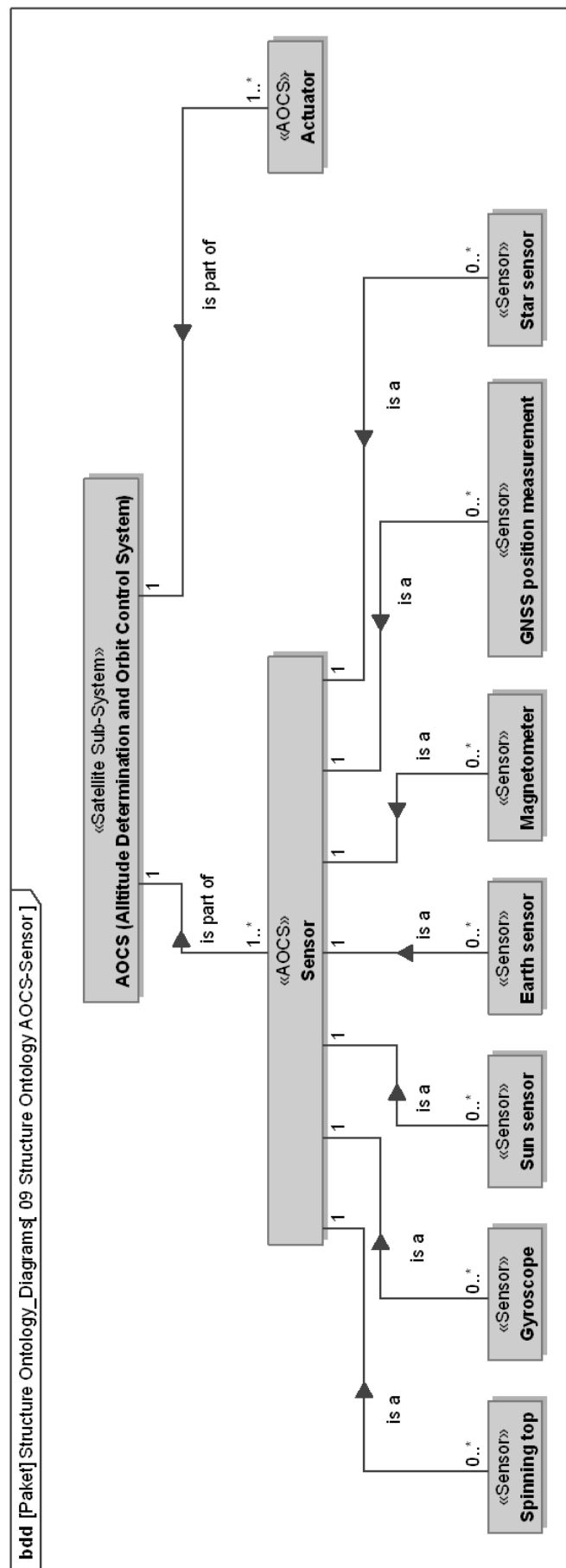


Abbildung 11-7: Structure Ontology Subcategory – AOCS Sensor

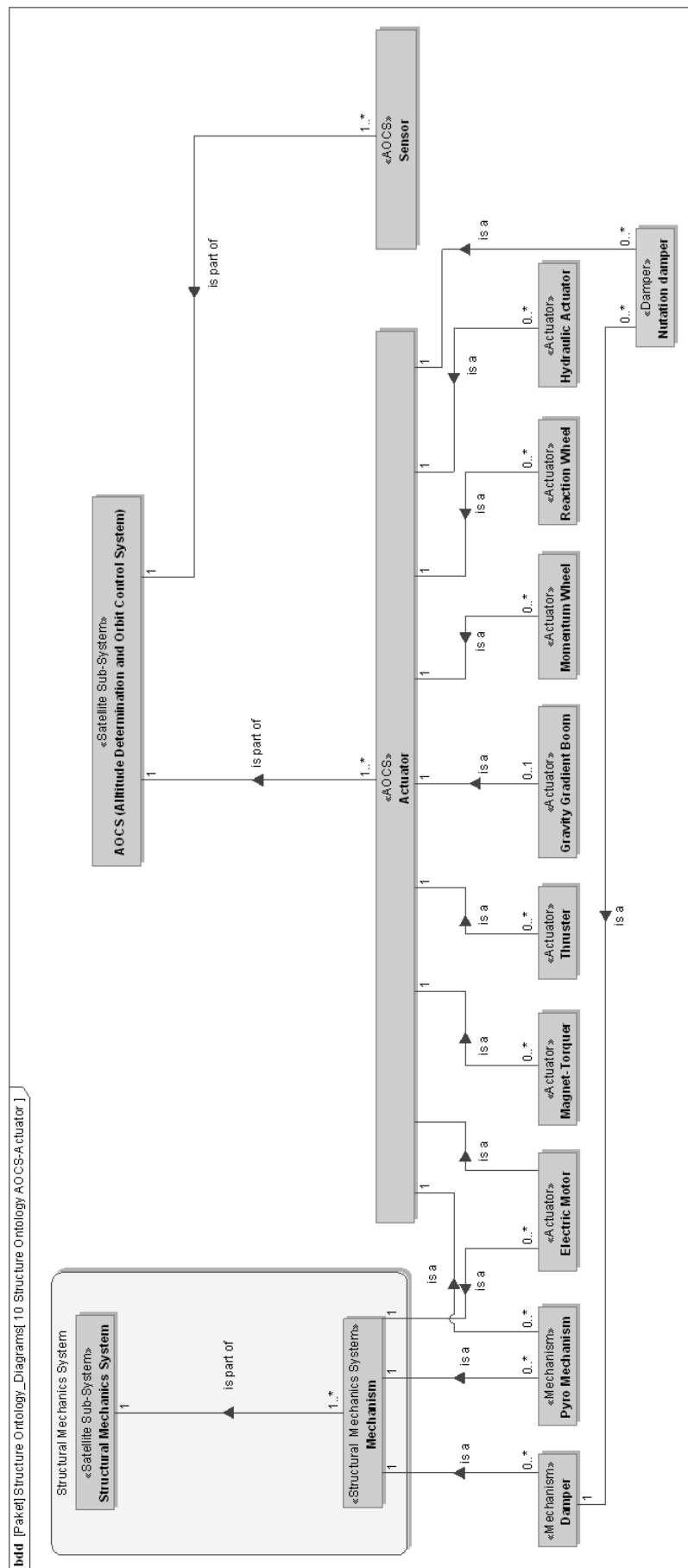


Abbildung 11-8: Structure Ontology Subcategory – AOCs Actuator

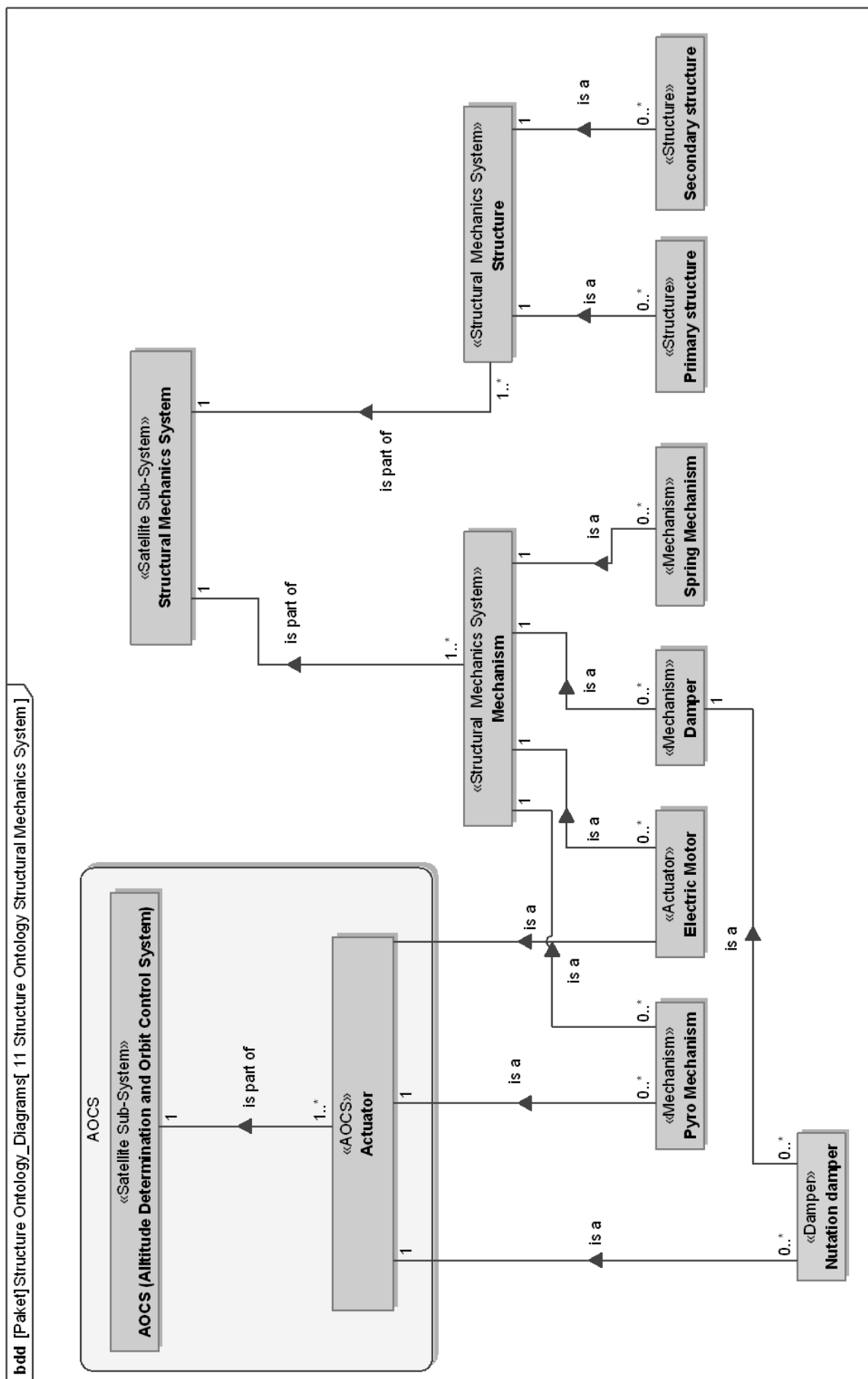


Abbildung 11-9: Structure Ontology Subcategory – Structural Mechanics System

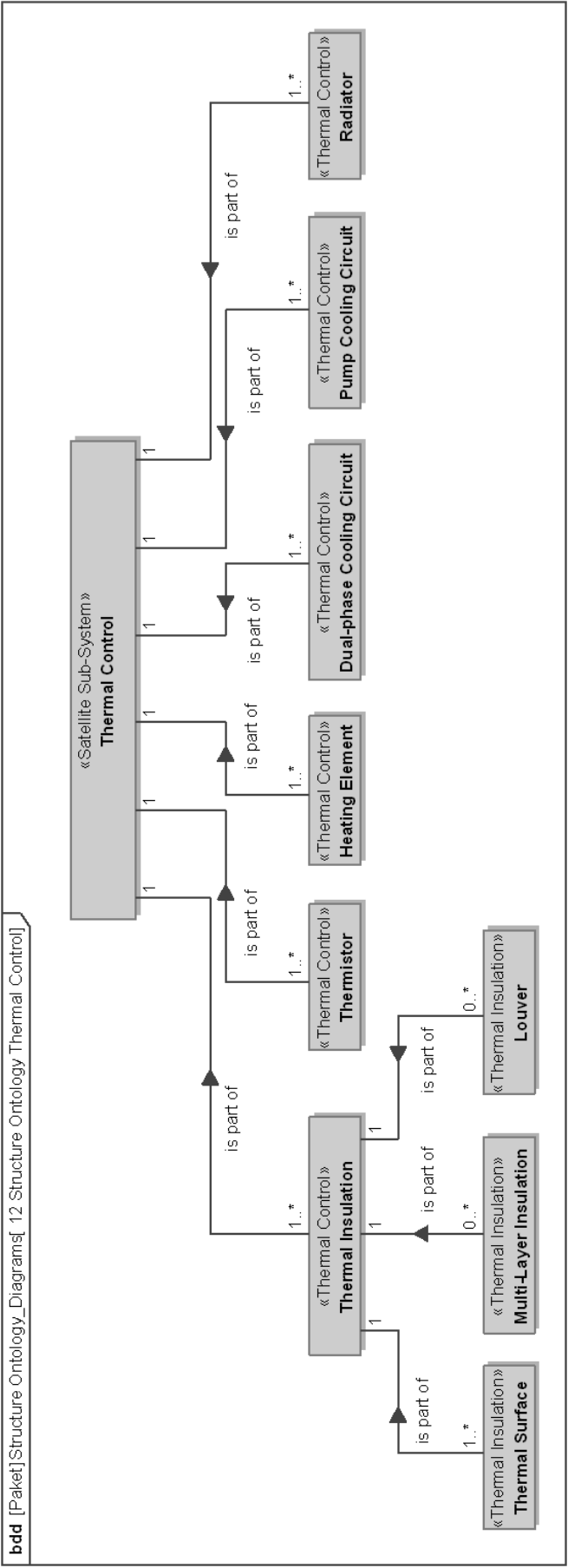


Abbildung 11-10: Structure Ontology Subcategory – Thermal Control

A-3 Schaubilder Profil

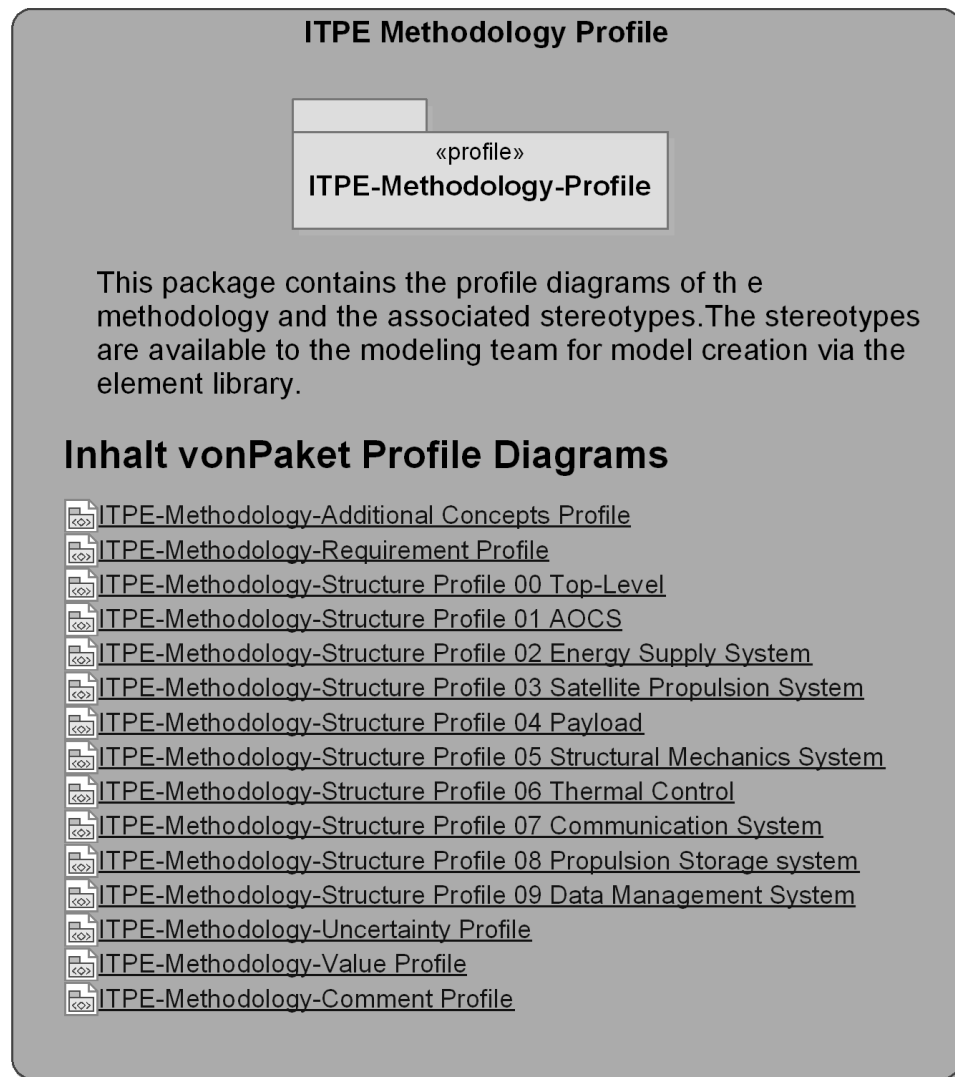
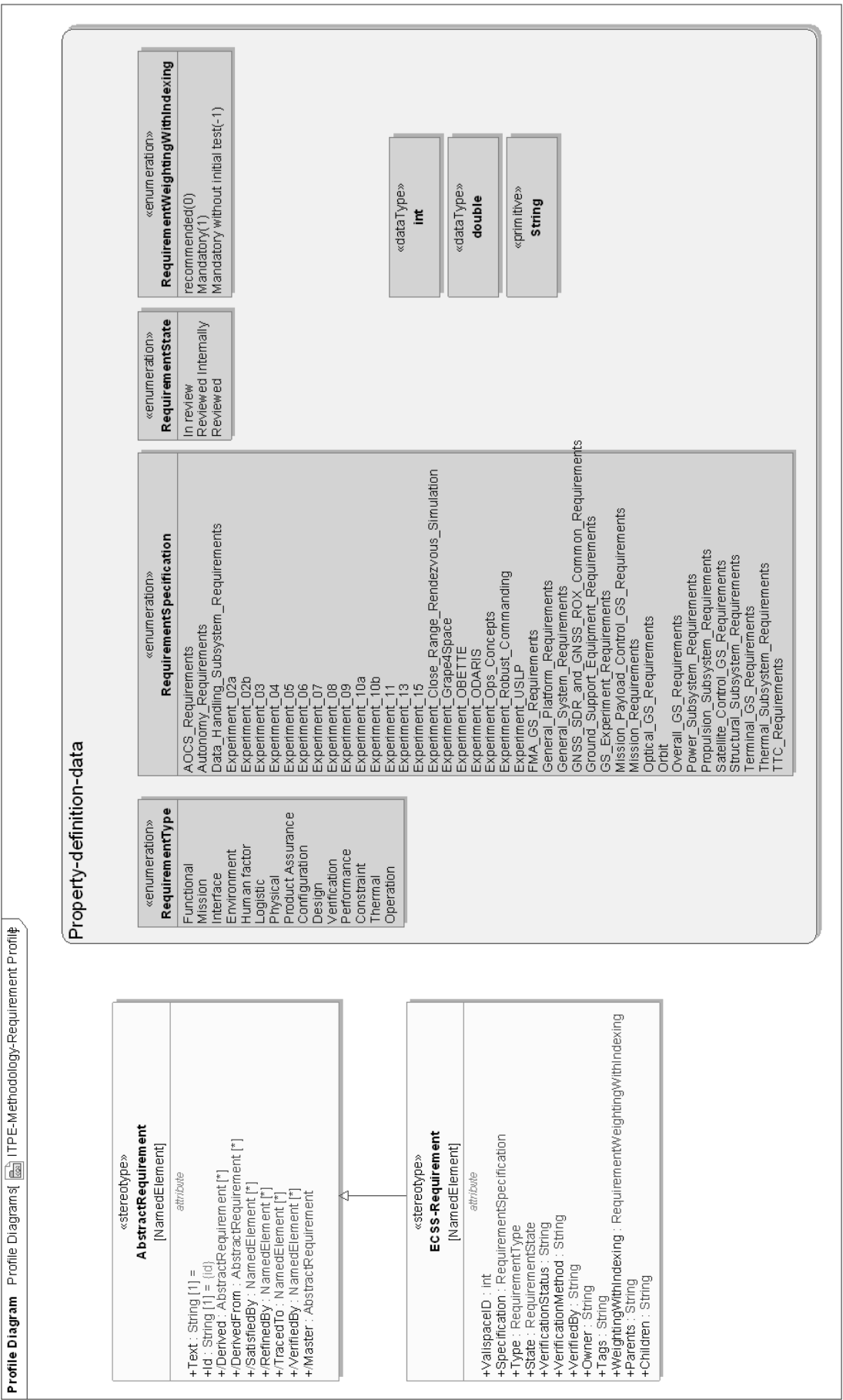


Abbildung 11-11: Inhaltsdiagramm des Profil Abschnittes der ITPE Methodik

Im Folgenden werden die einzelnen Profil-Diagramme des in Abbildung 11-11 gezeigten Inhaltsdiagramms dokumentiert. Da die Top-Level-Darstellung des Structure Profils bereits im Hauptteil der Arbeit in Abbildung 5-12 vorgestellt wurde, wird dieses Diagramm nicht ein weiteres Mal im Anhang dokumentiert. Die folgenden Schaubilder umfassen die Detaildarstellungen des Structure Profils und des Anforderungsprofils. Um die Lesbarkeit zu vereinfachen, sind größere Diagramme im Querformat dargestellt.



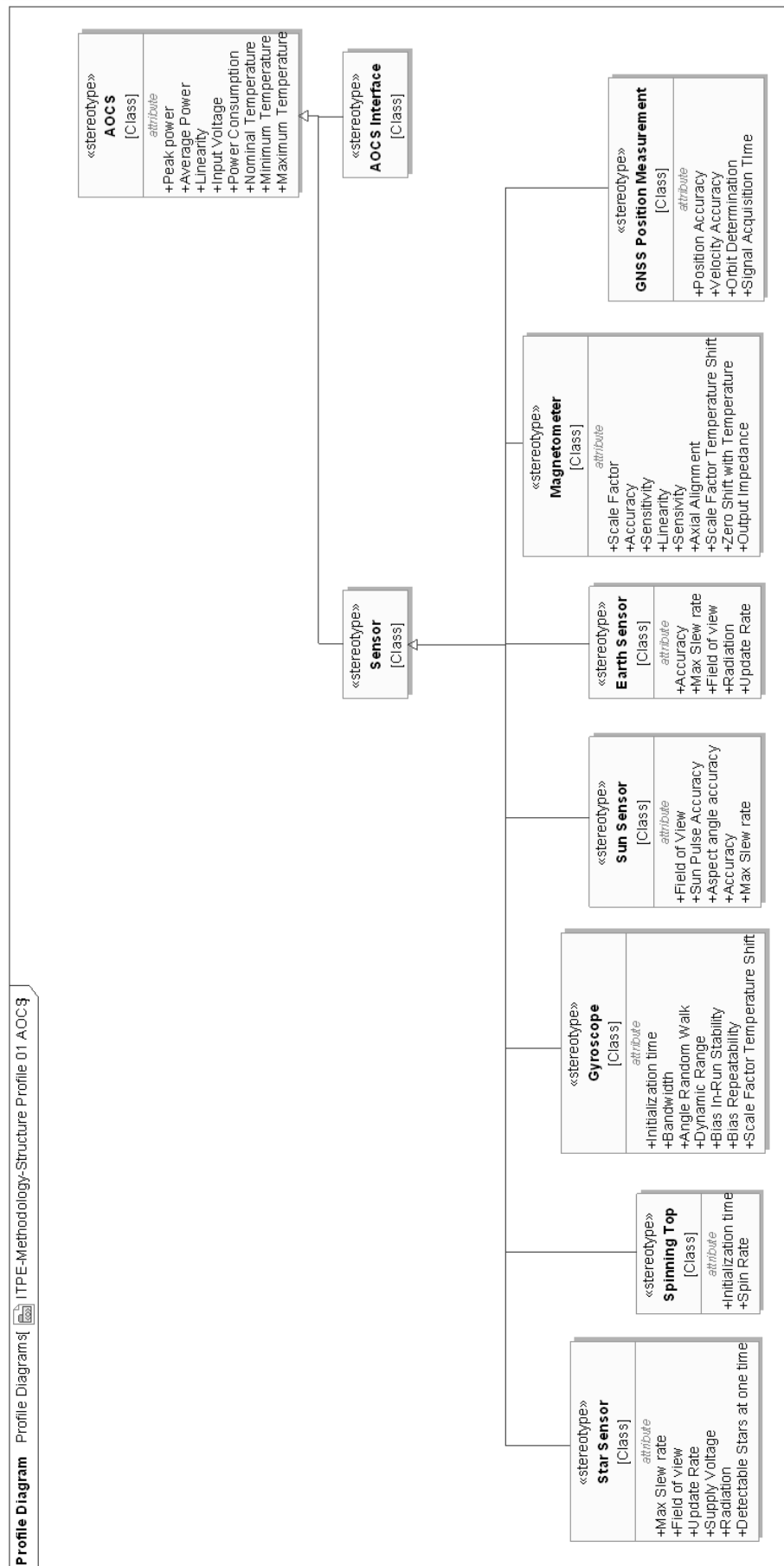


Abbildung 11-13: AOC3 Profil - Teil 1 (Sensor & AOC3 Interface)

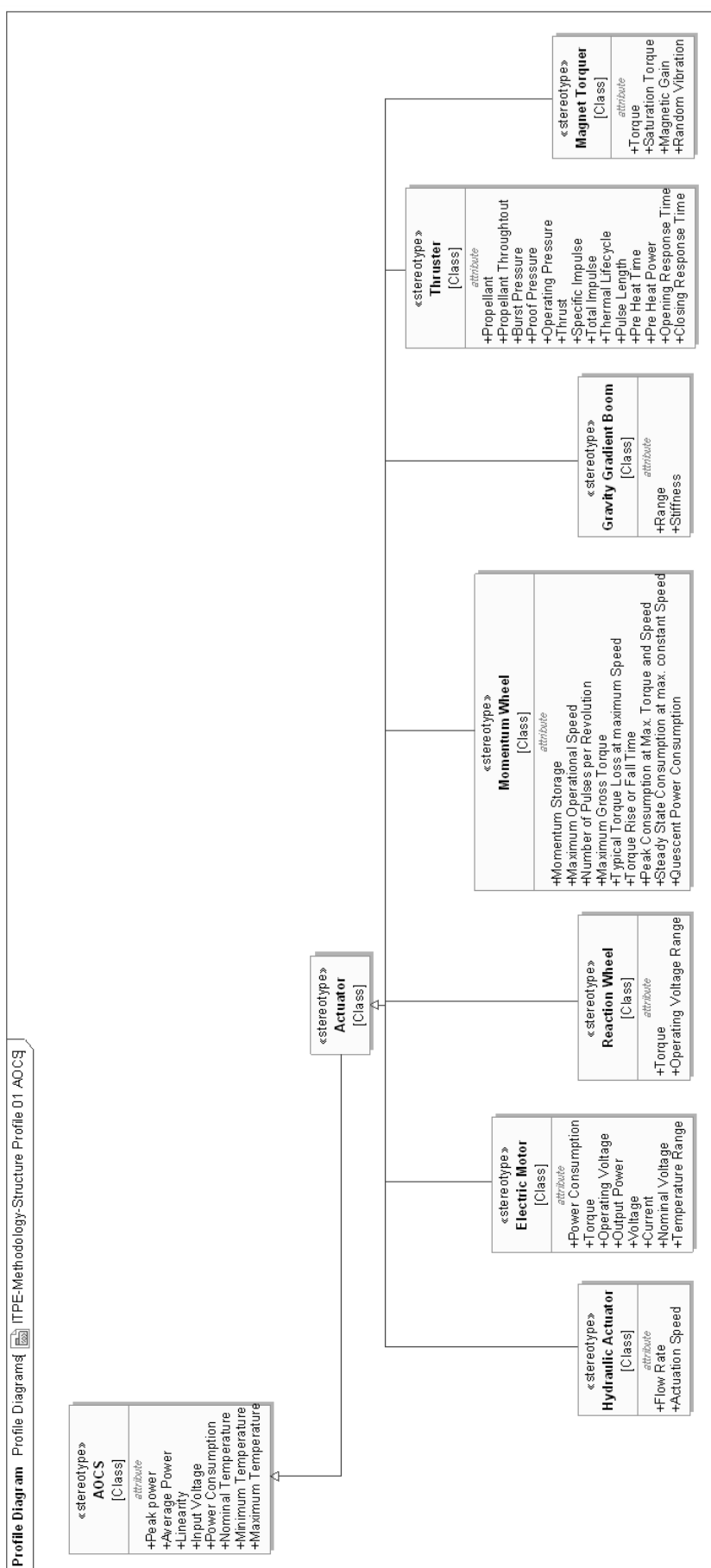


Abbildung 11-14: AOCs Profil - Teil 2 (Actuator)

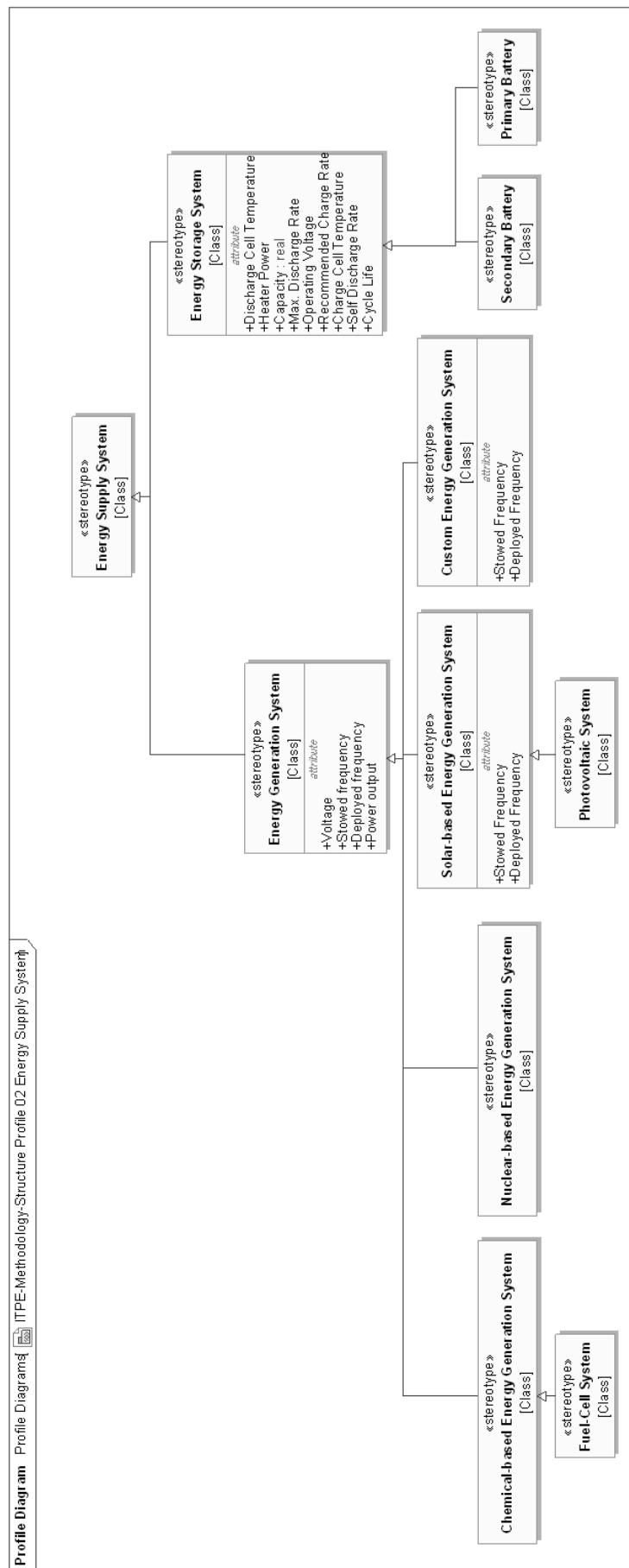


Abbildung 11-15: Energy Generation System Profil

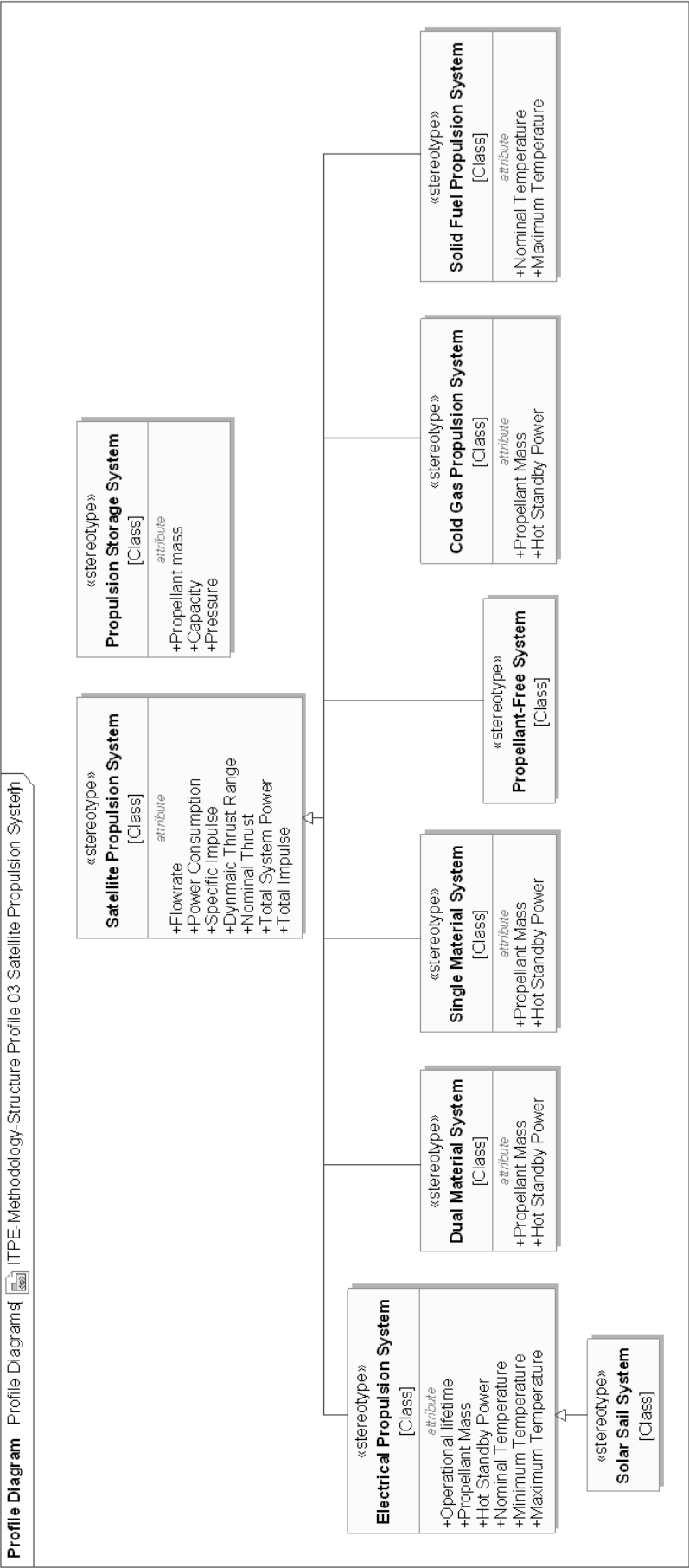


Abbildung 11-16: Satellite Propulsion System & Propulsion Storage System Profil

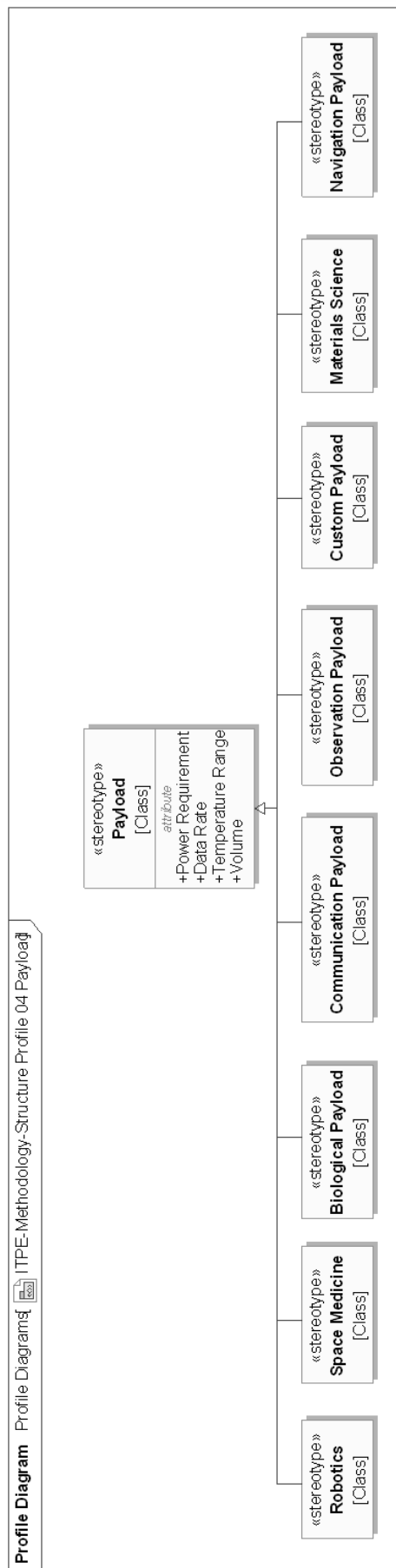


Abbildung 11-17: Payload Profil

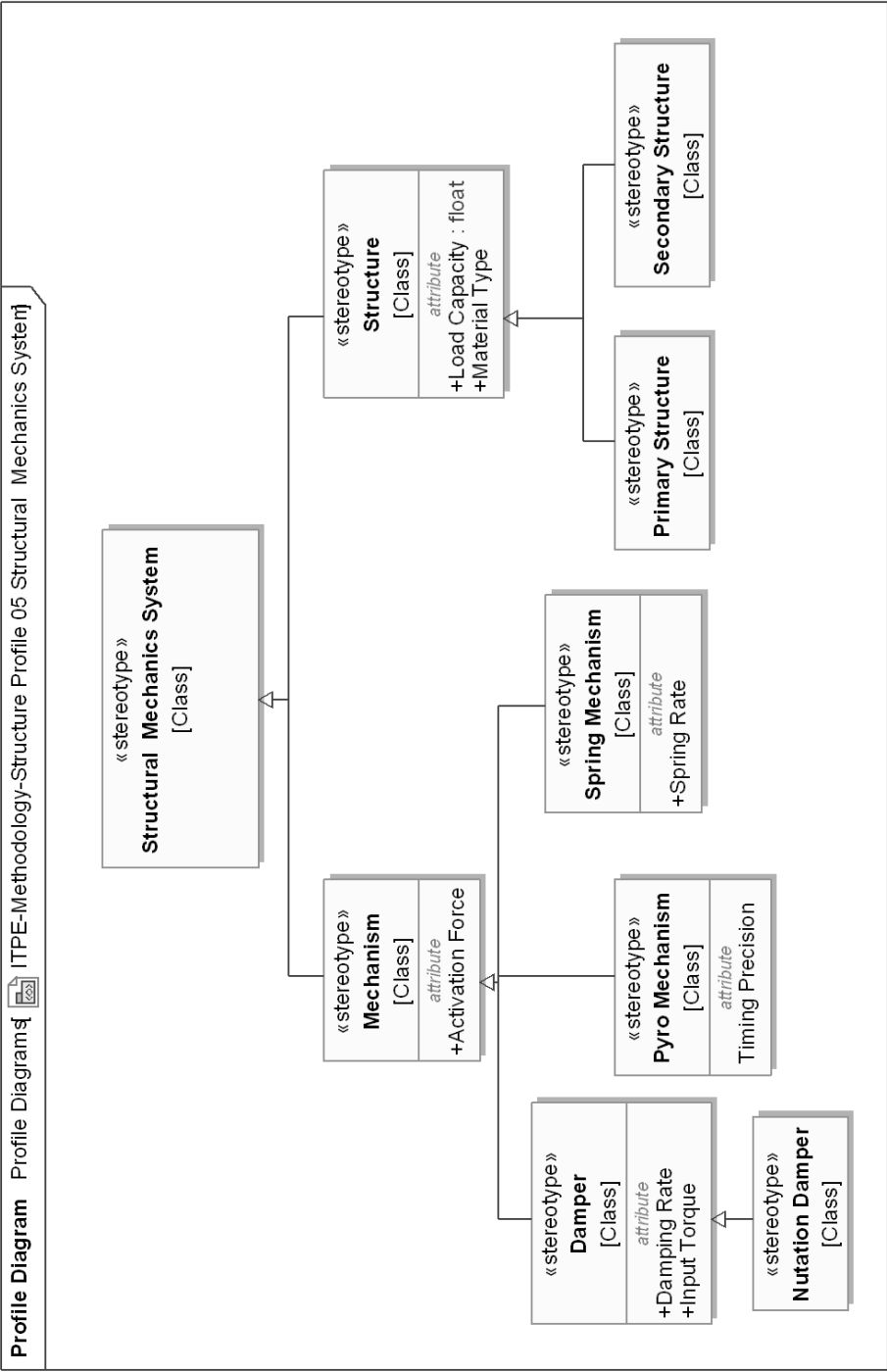


Abbildung 11-18: Structural Mechanics System Profil

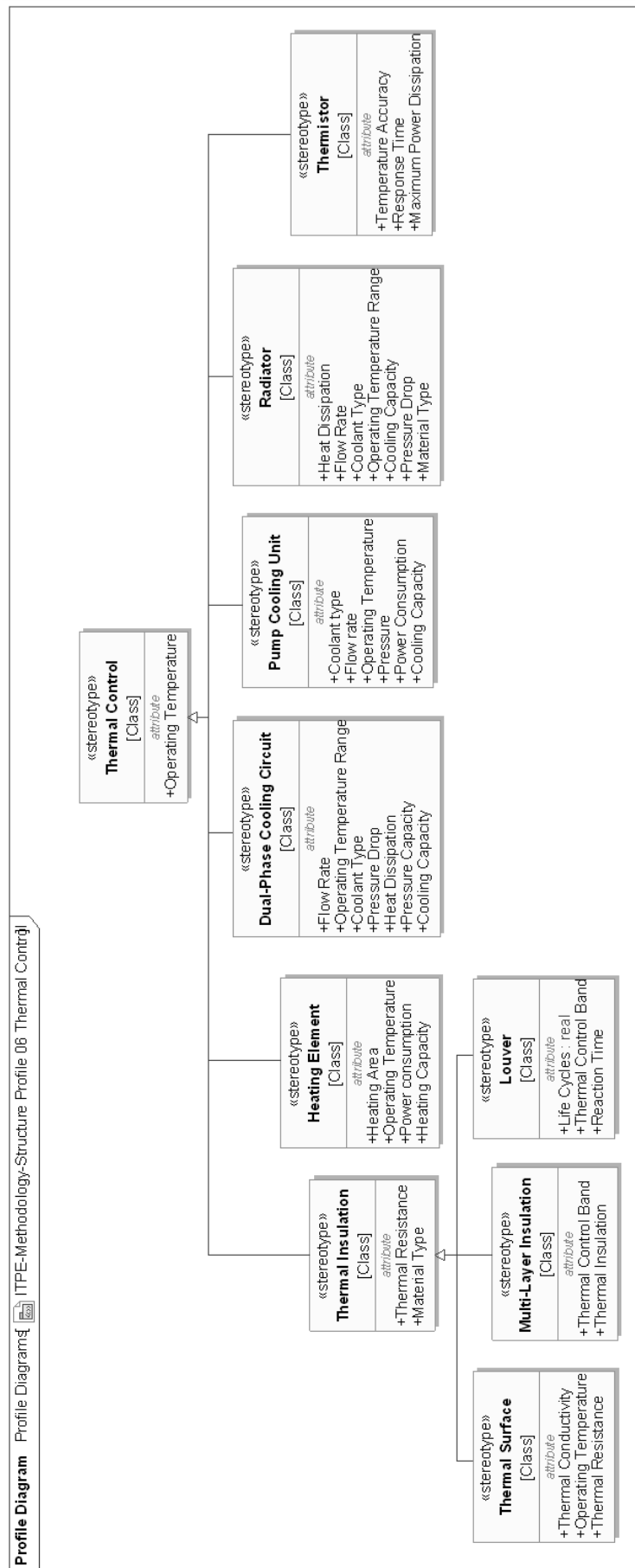


Abbildung 11-19: Thermal Control Profil

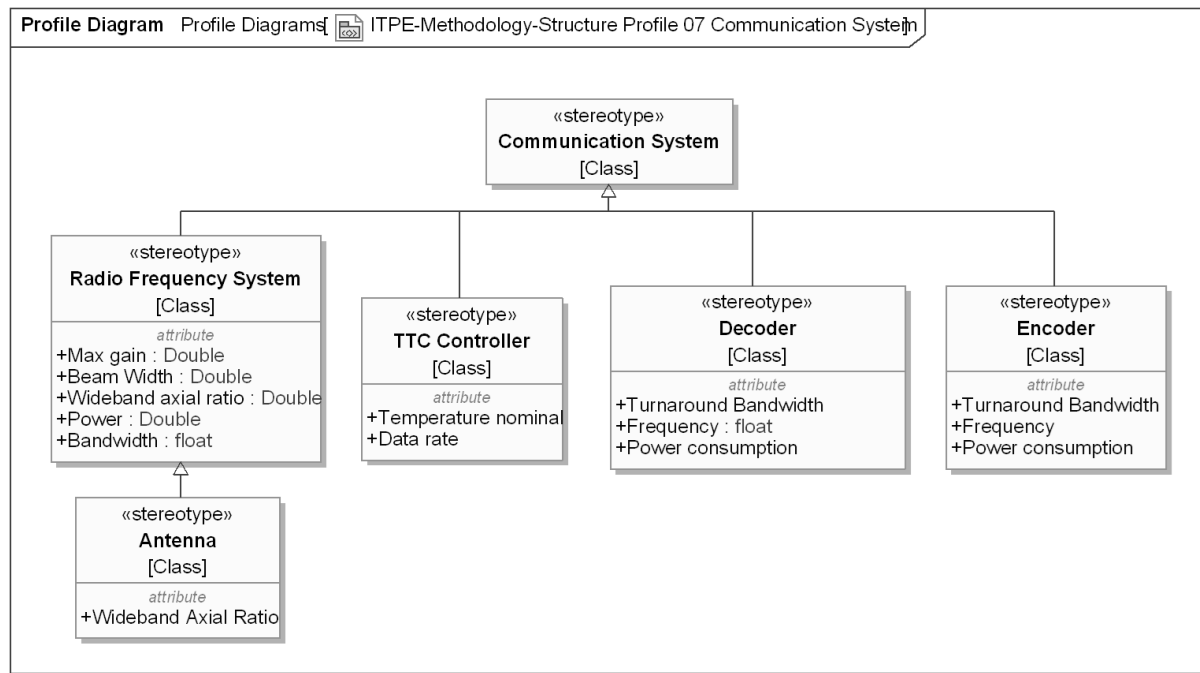


Abbildung 11-20: Communication System Profil

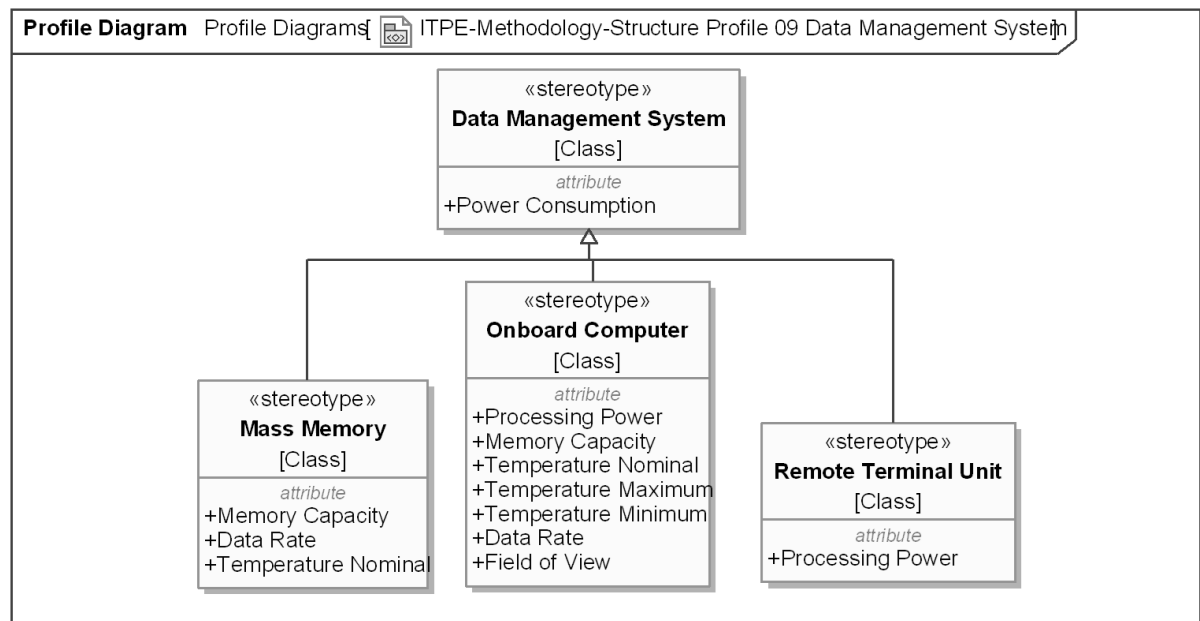


Abbildung 11-21: Data Management Profil

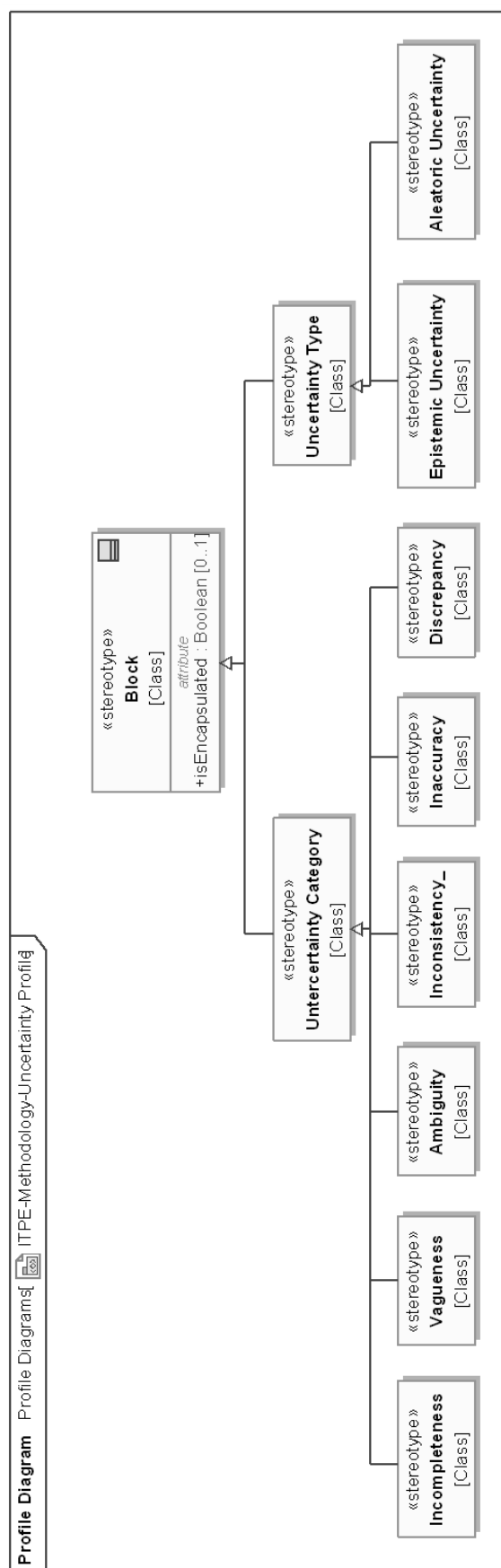


Figure 11-22: Block-Profil für die Unsicherheitsmodellierung

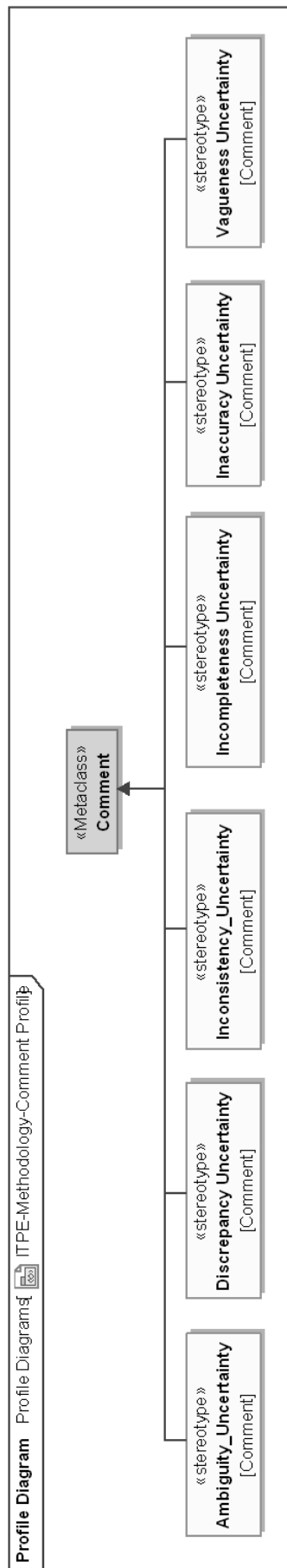


Abbildung 11-23: Kommentar-Profil für die Unsicherheitsmodellierung

A-4 Stellungnahme M-T 1

Im Folgenden ist die Stellung der Rolle M-T 1 im englischen Original dokumentiert.

The evaluation of the methodology against the defined criteria shows its applicability and effectiveness in the context of satellite development projects. The first criterion is fully met, as the methodology provides all necessary methods and tools to transfer information from various documents into a model-based environment. This makes sure that data and information are moved smoothly and reliably. The second criterion is largely fulfilled, as the procedural aspects are complete and robust. However, there is a minor gap in the representative elements, particularly within the ontology section. This part needs further elaboration to cover all relevant concepts and relationships in satellite development. The third criterion, which is about finding uncertainties, is completely satisfied. The methodology proved to be 100% effective in systematically uncovering uncertainties throughout the project documentation. Similarly, the fourth criterion which is focused on reducing these uncertainties was also fully achieved. During the workshop sessions, the methodology enabled the team to successfully mitigate identified uncertainties, thereby making the project data and information more reliable. Regarding the fifth criterion, the methodology strongly supported knowledge generation within the team. For instance, during the functional analysis, it enabled the development of a functional architecture based on available requirements, leading to new ideas and insights. The sixth criterion, which addresses the ease of use and clarity of the methodology in real-world application, is also fully met. The methodology was successfully applied in the SeRANIS satellite development project, where it enabled the team to identify and mitigate numerous uncertainties efficiently. The seventh criterion, consistent use of terminology, is fully satisfied as well. Through multiple internal review sessions, terminology issues were identified and re-solved, making the methodology clear and consistent. Finally, the methodology fully meets its intended purpose. Its application in a real satellite development project demonstrated its capability to support uncertainty identification & management and knowledge generation, thereby supports the project's success.

B-1 Veröffentlichungen

Jahr	Rolle	Veröffentlichung
2021	1.Autor	Gadzo, Emir; Mehlstäubl, Jan; Denk, Martin; Paetzold, Kristin (2021): Modellbasierte Umsetzung des Anforderungsmanagements zur Unterstützung der Entwicklung eines Experimentalsatelliten. In: DS 111: Proceedings 27/28 September 2021. DOI: 10.35199/dfx2021.21
2022	Co-Autor	Mehlstäubl, Jan; Gadzo, Emir; Atzberger, Alexander; Paetzold, Kristin (2022): Herausforderungen datengetriebener Methoden in der Produktentwicklung/Challenges of data-driven methods in product development. In: Konstruktion (74 (06)), S. 60–66. DOI: 10.37544/0720-5953-2022-06-60.
2022	1.Autor	Gadzo, E.; Porcelli, F.; Förstner, R.; Paetzold, K. (2022): Requirements Engineering Process for SeRANIS, a Small Satellite Mission. In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. DOI: 10.25967/570212
2023	Co-Autor	Denk, Martin; Rother, Klemens; Gadzo, Emir; Paetzold, Kristin (2023): Multi-Objective Topology Optimization of Frame Structures Using the Weighted Sum Method. In: Jasper Rieser, Felix Endress, Alexander Horschenskoff, Philipp Höfer, Tobias Dickhut und Markus Zimmermann (Hg.): Proceedings of the Munich Symposium on Lightweight Design 2021. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 83–92. DOI: 10.1007/978-3-662-65216-9_8
2023	Co-Autor	Porcelli, Francesco; Bachmann, Johannes; Mohd, Bilal; Kinzel, Artur; Gadzo, Emir; Hülsmann, Maren; Andert, Tom (2023): Autonomous Space Operations Planner and Scheduler (ASOPS): Optimal and Autonomous Operations in Space. In: SpaceOps. Dubai
2023	Co-Autor	Mehlstäubl, Jan; Braun, Felix; Gadzo, Emir; Paetzold-Byhain, Kristin (2023): Machine Learning to Generate Knowledge for Decision-Making Processes in Product Portfolio and Variety Management. In: Amaresh Chakrabarti und Vishal Singh (Hg.): Design in the Era of Industry 4.0, Volume 1, Bd. 343. Singapore: Springer Nature Singapore (Smart Innovation, Systems and Technologies), S. 1217–1228. DOI: 10.1007/978-981-99-0293-4_98
2023	1.Autor	Gadzo, Emir; Mehlstäubl, Jan; Nicklas, Simon J.; Paetzold, Kristin (2023): Method for the Transfer and Further Development of Document-Based Data and Information in a Model-Based Development Environment Using the Example of a Small Mission Satellite. In: Amaresh Chakrabarti und Vishal Singh (Hg.): Design in the Era of Industry 4.0, Volume 2, Bd. 342. Singapore: Springer Nature Singapore (Smart Innovation, Systems and Technologies), S. 519–532. DOI: 10.1007/978-981-99-0264-4_43

2023	1.Autor	Nicklas, Simon J.; Michalides, Marvin; Gadzo, Emir; Koch, Alexander (2023): A Multi-Dimensional Analysis of the Current State of Research into Globally Distributed Product Development. In: DS 125: Proceedings of the 34th Symposium Design for X (DFX2023). The 34th Symposium Design for X, 14 and 15 September 2023: The Design Society, S. 183–194. DOI: 10.35199/dfx2023.19
2024	Co-Autor	Michalides, Marvin; Weiss, Stefan; Gadzo, Emir; Paetzold-Byhain, Kristin; Koch, Alexander (2024): Relation between purpose of individual agile elements and the need for their adaptation in product design & development. In: Proc. Des. Soc. 4, S. 305–314. DOI: 10.1017/pds.2024.33
2024	1.Autor	Gadzo, Emir; Michalides, Marvin; Koch, Alexander (2024): Leveraging design thinking in MBSE: mitigating data and information uncertainties – an integration model approach. In: Proc. Des. Soc. 4, S. 2533–2544. DOI: 10.1017/pds.2024.256
2025	Co-Autor	Kessler, Leonhard; Gadzo, Emir; Koch, Alexander (2025): Comparative Analysis of Digital Twin Implementations – Identifying Cross-Disciplinary Knowledge Transfer Potentials for Space Systems Development. In: Proceedings of the 36th Symposium Design for X, 11/12 September 2025. DOI: 10.35199/dfx2025.04
2025	1.Autor	Gadzo, Emir; Koch, Alexander (2025): Reducing uncertainties in data & information - an ontological approach to support satellite development projects. In: International Conference on Engineering Design 2025. Cambridge, UK: Cambridge Press. DOI: 10.1017/pds.2025.10285

B-2 Betreute studentische Arbeiten

Art der Arbeit	Themenstellung
2021	
Bachelorarbeit	Elaboration of a development environment for serial production of small-scale satellites
Masterarbeit	Auswahl eines MBSE-Tools zur Entwicklung eines Experimentalsatelliten
2022	
Projektarbeit	Implementation and modeling of requirements of an experimental satellite project into a model-based systems engineering environment
Bachelorarbeit	Funktionsmodellierung eines Experimentalsatellitenprojektes in einer MBSE-Entwicklungsumgebung
Masterarbeit	Model-Based Requirements Engineering for an experimental unit in the development process of a small-scale-satellite project
2023	
Studienarbeit	Analyse der Konstruktionslehre im Kontext der fortschreitenden Industrialisierungsentwicklung am Beispiel der Automobilindustrie
Projektarbeit	Entwicklung eines Ansatzes zur Traceability-Schaffung zwischen Meta-Zielen und Missionszielen in einem wissenschaftlichen Kleinsatellitenprojekt
Masterarbeit	Analyse der Herausforderungen in der Kleinsatellitenentwicklung – Eine empirische Studie
2024	
Bachelorarbeit	Entwicklung eines Konzeptes für eine domänenspezifische Ontologie zur Unterstützung der Wissensgenerierung im Entwicklungsprozess von Satellitenprojekten
Masterarbeit	Konzepterstellung eines Tools zur zuverlässigen Vorhersage von Mobilitätsklassen
2025	
Semesterarbeit	Reducing uncertainties in data & information - An ontological approach
Masterarbeit	Ausarbeitung eines Tools zur zuverlässigen Vorhersage der Bodenpressung in militärischen Logistikfahrzeugen
Masterarbeit	Entwicklung eines Betriebskonzeptes für einen Prüfstand zur Ermittlung der Bodenpressung militärischer Fahrzeuge