

Abschlussbericht

CyberTech – Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Abschlussbericht des BMBF-geförderten Verbundforschungsprojekts CyberTech

Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen

AUTOREN

iem engineering methods AG

Dr. Sven Kleiner (Hrsg.), Oliver Bleisinger (Hrsg.)

TU Darmstadt – Fachgebiet Product Life Cycle Management (PLCM)

Prof. Benjamin Schleich, Prof. Reiner Anderl, Dr. Benjamin Röhm, Tanja Steinbach

TU Darmstadt – Institut für Arbeitswissenschaft (IAD)

Oliwia Karasek, Yusuf Arslanparcasi

SysDICE GmbH

Dr. Mohammad Chami, Ibrahim Ghanawi, Mohammad Wissam Chami

Mechatronic Medical Engineers GmbH

Dr. Albrecht Urbaszek, Günter Eßl, Dr. Marko Čorić

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten der Projektpartner wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ mit den Förderkennzeichen 02J19B010 bis 02J19B015 gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Veröffentlicht unter CC-BY-ND 4.0 International: <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

**CyberTech – Advanced Systems
Engineering für die Arbeitsgestaltung
von Cyber-technischen Systemen**

KONSORTIALFÜHRER

Dr. Sven Kleiner
:em engineering methods AG
Rheinstraße 97
64295 Darmstadt
info@em.ag | +49 6151 7376-100
www.ase-cybertech.de

ISBN 978-3-00-079013-3

© :em engineering methods AG, März 2025

Vorwort des Projektträgers

Die ausgeprägte, vernetzte Entwicklungsarbeit über den gesamten Produktlebenszyklus und über Unternehmensgrenzen hinweg sowie eine an den Produktentstehungsprozess angepasste Arbeitsorganisation erfordern eine angepasste Herangehensweise. Beispielsweise verstärkt der vermehrte Einsatz von Sensorik in Maschinen und Anlagen die Komplexität des Produktentstehungsprozesses von neuartigen Maschinen und Anlagen zu cyber-physischen Systemen. Bei diesen stehen nicht nur die konstruktive Auslegung sowie Automatisierungstechnik im Fokus, sondern auch der zunehmende Austausch sowie die Analyse vorhandener und verteilter Daten, beispielsweise für eine vorausschauende Wartung und neuartige Dienstleistungskonzepte. Damit ein Zusammenspiel von Nutzern, Monteuren und Entwicklern reibungslos funktionieren kann, waren dazu geeignete Methoden und neue Schulungsmaßnahmen bereitzustellen.

Ziel des Forschungsprojekts CyberTech war die Erarbeitung von geeigneten, softwarebasierten Werkzeugen zur Informationsintegration im Entstehungsprozess von Maschinen und Anlagen. Dabei spielte die menschenzentrierte Arbeitsgestaltung, basierend auf digitalisierten Prozessen und Methoden, eine maßgebliche Rolle innerhalb der Organisation von Unternehmen. Durch Schulungskonzepte und Gestaltungshinweise konnten Mitarbeitende unterstützt und Arbeitsabläufe optimiert werden.

Dies erforderte eine systematische Analyse bereits bestehender Arbeitsumgebungen und die Ableitung von Gestaltungsmöglichkeiten am Beispiel der Medizintechnik. Einerseits wurden auf der organisatorischen Ebene, z.B. mittels agiler und interdisziplinärer Teams, neuartige Arbeitsformen entwickelt und erprobt. Andererseits wurden zur besseren Qualifizierung aller Beteiligten, beispielsweise Schulungsangebote im Bereich arbeitsorientiertes Lernen definiert und in Leitfäden erfasst. Mit Sensordaten aus der späteren Nutzungsphase wurde beispielsweise ein Digitaler Zwilling erzeugt, welcher zur weiterführenden Produktoptimierung verwendet wurde. Unter Verwendung von KI-Methoden wurden hierzu entsprechende Softwarebausteine entwickelt.

Die prototypische Umsetzung erfolgte durch den Aufbau sowie die virtuelle und physische Inbetriebnahme von Demonstratoren für die Medizintechnik. Durch die erarbeiteten sozio-technischen Methoden, Schulungskonzepte und Leitfäden konnte die Komplexität zukünftiger Entwicklungsprozesse für selbstoptimierende Maschinen bzw. Dienste menschenzentriert beherrscht werden. Die Erkenntnisse wurden darüber hinaus in wissenschaftlichen Lehr- und Lernlaboren für die Aus- und Weiterbildung vor allem KMU zugänglich gemacht. Zudem wurden die Ergebnisse über Verbände und Arbeitsgruppen verbreitet sowie für die Fachöffentlichkeit publiziert.

Die Partner in diesem Verbundprojekt wurden im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Allen sei an dieser Stelle gedankt, die mit ihrem Wissen, Engagement und ihren Erfahrungen an dieser richtungsweisenden Forschungs- und Entwicklungsarbeit mitgewirkt haben.

Projektträger Karlsruhe (PTKA)
Produktion, Dienstleistung und Arbeit
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Stefan Scherr
März 2025



BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Vorwort der Begleitforschung

Liebe Leserinnen und Leser,

wir blicken zurück auf drei erfolgreiche Jahre Forschungs- und Innovationsarbeit zur Leitfrage:

Wie gestalten wir die Systeme von morgen?

Die technischen Systeme der Zukunft sind wahre Wunderwerke: Sie sind vernetzt, lernen selbstständig und handeln autonom. Und sie sind ein wichtiger Faktor für eine nachhaltige Wirtschaft und Gesellschaft. Doch wie können Unternehmen diese Systeme erfolgreich und wettbewerbsfähig entwickeln? Und welche Rolle spielt dabei der Mensch?

Unsere Antwort: Advanced Systems Engineering

Die Antwort auf diese Fragen liegt in einem komplexen Zusammenspiel von Organisationsgestaltung, technologischem Know-how und der richtigen Methodik. Das Advanced Systems Engineering (ASE) kombiniert die nötigen Ansätze und gibt Industrieunternehmen das nötige Instrumentarium für die erfolgreiche Gestaltung innovativer Produkte, Dienstleistungen und Produkt-Service-Systeme an die Hand. Neun Verbundprojekte haben in den letzten Jahren neuestes Wissen aus der Forschung in konkreten Anwendungsfällen in die Industrie gebracht. Sie sind überzeugende Beispiele, welche Potentiale ASE für Unternehmen bereithält.

Strategieentwicklung für ASE

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert ein begleitendes wissenschaftliches Projekt mit der Aufgabe, dem Advanced System Engineering einen fundierten zukunftsfähigen Rahmen zu geben. Dafür haben wir im Jahr 2021 in einer *Leistungsstanderhebung* den Status Quo des Engineerings in Deutschland entwickelt. Wir haben die Akteurinnen und Akteure der Verbundprojekte mit ihren unterschiedlichen Themen vernetzt, Erkenntnisse diskutiert und neue Handlungsfelder identifiziert. Aufbauend auf diesen Ergebnissen entstand in 2022 die *Advanced Systems Engineering Strategie – Eine Leitinitiative zur Zukunft des Engineering- und Innovationsstandorts Deutschland*. Sie zeigt auf, wo wir in den nächsten Jahren ansetzen müssen, um den Innovations- und Produktionsstandort Deutschland wettbewerbsfähig zu halten.

Jetzt die Weichen für die Zukunft stellen!

Die in den Abschlussberichten präsentierten Erkenntnisse und Innovationen sind Meilensteine auf dem recht neuen Gebiet des Advanced Systems Engineering. Dafür möchte ich mich bei allen Beteiligten, den Projektpartnern, Forscherinnen und Forschern und allen Industriepartnern bedanken. Gemeinsam sind wir neue Wege gegangen – und haben wichtige Weichen für die Zukunft gestellt.

Ich wünsche Ihnen viel Spaß beim Lesen des Berichts, neue Erkenntnisse und viele Aha-Momente rund um das Engineering der Zukunft.

Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu
Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik
Mechatronik IEM, Paderborn



Vorwort des Konsortialführers

Liebe Projektpartner:innen, liebe Unterstützer:innen, liebe Leser:innen,

die Initiative für das abgeschlossene Verbundforschungsprojekt CyberTech geht zurück auf das Thesenpapier Advanced Systems Engineering der acatech aus dem Jahr 2017. Es folgten damals erste Expertenrunden zur grundlegenden Fragestellung, wie die Entstehung von digitalisierten Marktleistungen von morgen organisiert werden muss, um zukünftig am Hochlohnstandort Deutschland erfolgreich agieren zu können.

Zahlreiche Workshops und eine Bestandsaufnahme zur Situation im Engineering, den akuten Forschungsfragen zu zukünftigen Arbeitsweisen im Licht der Covid-Pandemie und vor allem den Bedarfen in der Industrie hinsichtlich Prozessen, Methoden, Technologie und Organisation folgten. In dieser Zeit entstand gemeinsam von Herrn Prof. Reiner Anderl (TU Darmstadt) und mir die Idee, im Rahmen des Programms „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und der Förderrichtlinie „Beherrschung der Komplexität soziotechnischer Systeme – Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering für die Wertschöpfung von morgen (PDA_ASE)“ eine Projektskizze und später erfolgreich einen Antrag für ein Verbundforschungsprojekt einzureichen.

Der Ansatz, sich um Forschungsfragen zur Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen in Zukunft zu kümmern, war schnell gereift und mit Industriepartnern ein Konsortium gefunden: CyberTech sollte darauf abzielen einerseits Organisationsformen, Methoden und Schulungskonzepte zur menschenzentrierten Arbeitsgestaltung von cybertechnischen Maschinen und Anlagen zu entwickeln und andererseits KI-basierte Werkzeuge zur Informationsintegration im digitalen Produktentstehungsprozess zu realisieren und prototypisch umzusetzen. Als Ergebnisse liegen heute nun neben verprobten Konzepten für die Arbeitsgestaltung auch prototypische IT-Werkzeuge vor, die bereits bei unseren Industriepartnern in der Medizintechnik zum Einsatz kommen.

Das Verbundforschungsprojekt CyberTech wurde planmäßig am 30.06.2024 beendet und ich möchte mich an dieser Stelle ausdrücklich für die vertrauensvolle und erfolgreiche Zusammenarbeit bei allen Forschungspartnern und für die Unterstützung bei den Förderern vom BMBF und dem Projektträger Karlsruhe bedanken. Mit Stolz darf ich Ihnen unseren Abschlussbericht zu CyberTech präsentieren, wünsche anregende Impulse bei der Lektüre und freue mich auf ihre Rückmeldungen!

Herzlichst,

Dr. Sven Kleiner
Konsortialführer CyberTech und Vorstand der :em AG

Management Summary CyberTech

Die moderne Systementwicklung steht vor den Herausforderungen eines steigenden Softwareanteils, zunehmender Vernetzung von Systemen und verkürzter Produktlebenszyklen, die zu der Evolution klassischer Systeme zu Advanced Systems führt. Advanced Systems Engineering (ASE) vereint Prinzipien des Advanced Engineerings, indem es agile und digitalisierte Methoden nutzt, mit den interdisziplinären Ansätzen des Systems Engineering vereint und die Herausforderungen von Advanced Systems adressiert. ASE erfordert eine integrative Betrachtung der Aspekte Mensch, Technik und Organisation für moderne Produktentwicklungsprozesse. Das Verbundprojekt CyberTech erforschte die Vision von ASE im soziotechnischen Kontext und erarbeitete Bausteine für Schlüsseltechnologien, Befähigungskonzepte und Einführungsstrategien. Diese Veröffentlichung skizziert das Leitbild einer ASE-Strategie für die Säulen Mensch, Technik und Organisation. Zudem werden zentrale Ergebnisse anhand von Demonstratoren und Anwendungsfällen der industriellen Praxis dargestellt.



Abbildung 1 Darstellung der Säulen Mensch, Technik, Organisation im Leitbild für CyberTech

Die Ergebnisse der Säule Mensch umfassen ein **ASE-spezifisches Kompetenzmodell**, Maßnahmen zur Förderung einer agilen Lernkultur sowie eine **agile Toolbox** für das Erlernen und Anwendungen ASE-relevanter Kompetenzen. Weiterhin wurde ein **Konzept für Lehr- und Lernveranstaltungen** entwickelt, um eine nachhaltige Befähigung im Kontext einer modernen Produktentwicklung zu ermöglichen. Die Evaluation erfolgte durch Umsetzung und Erprobung eines Lehr- und Lernlabor, welches im Rahmen von universitären Lehrveranstaltungen eingesetzt wurde.

Bezogen auf die Säule Technik wurden Ergebnisse wie ein **ASE-Reifegradmodell**, ein **Leitfaden zur Definition von Sensorbebauungsplänen** und ein **ASE-Vorgehensmodell** entwickelt. Zudem lag ein Schwerpunkt auf der Entwicklung von Methoden, um Sensormesswerte als Simulationsdaten im Digitalen Zwilling integrieren zu können sowie eine ganzheitliche Nachvollziehbarkeit und domänenübergreifende Interoperabilität in der Produktentwicklung zu ermöglichen. Die Demonstration erfolgte an einem Digitalen Zwilling und dessen physischen Gegenstück eines Roboterarms und 3D-Druckers.

Für die Säule Organisation wurden ein **Rahmenwerk für Model-Based Systems Engineering (MBSE)** in Form eines **agilen Vorgehensmodells** sowie ein **generisches Informationsmodell** als Blaupause zur IT-technischen Verknüpfung der Entwicklungsartefakte erarbeitet. Zur Realisierung des entstehenden Digital Threads wurde ein **Demonstrator auf Basis des Digital Data Packages** erstellt und der **Digital Data Package Manager** weiterentwickelt. Zusätzlich wurde am Beispiel eines Demonstrators die Datenbereitstellung durch eine **KI-basierte Entwicklungsassistenz** untersucht, um Routinearbeiten bei der Systemmodellierung und der Einhaltung von Normen zu automatisieren.

Neben den Ergebnissen der Säulen Mensch, Technik und Organisation der ganzheitlichen ASE-Strategie wurden die übergreifenden **Querschnittsthemen Wissensmanagement, Change Management und Systems Thinking** erforscht. Zusammenfassend stellt diese Veröffentlichung einen Leitfaden zur Einführung und Gestaltung von ASE in der Unternehmenspraxis dar, wie dies am Beispiel des Anwenderunternehmens Mechatronic Medical Engineers GmbH (vgl. Abschnitt 5) durchgeführt wurde.

Inhaltsverzeichnis

Management Summary CyberTech	IV
1 Herausforderung Advanced Systems Engineering	1
2 Leitbild und Anwendungsfälle	3
2.1 Säule Mensch	4
2.2 Säule Technik	7
2.3 Säule Organisation	9
3 Querschnittsthemen	11
3.1 Wissensmanagement	11
3.2 Change Management	13
3.3 Systems Thinking	14
4 Ergebnisse	15
4.1 Ergebnisse der :em engineering methods AG	15
4.1.1 Potenzialanalyse für Reliability, Safety & Risk Engineering mit MBSE	15
4.1.2 Generisches Informationsmodell	17
4.1.3 Evaluationsmatrix für Traceability-Plattformen	20
4.1.4 Technisches Konzept des Digital Data Package	23
4.2 Ergebnisse des Instituts für Arbeitswissenschaft (IAD)	24
4.2.1 ASE-spezifisches Kompetenzmodell	24
4.2.2 Förderung agiler Lernkultur auf Unternehmens- und auf Mitarbeiterebene	25
4.2.3 Agile Toolbox	25
4.2.4 Technisch-inhaltlicher Aufbau des Lernlabors	26
4.2.5 Konzepte für Lehr- und Lernveranstaltungen	26
4.3 Ergebnisse des Fachgebiets Product Life Cycle Management (PLCM)	27
4.3.1 Reifegradmodell	27
4.3.2 Lehrkonzept für Advanced Systems Engineering	30
4.3.3 Demonstratorsystem	32
4.4 Ergebnisse der Mechatronic Medical Engineers GmbH	34
4.4.1 Verknüpfung von Simulationsmodellen, domänenübergreifende Interoperabilität	34
4.4.2 Ganzheitliche Nachvollziehbarkeit	39
4.4.3 Model-Based Systems Engineering	40
4.5. Ergebnisse der SysDICE GmbH	40
4.5.1 Konzept für die KI-assistierte Normkonformitätsprüfung	40
4.5.2 Assisted Norm Compliance Tool-Architektur	42
4.5.3 Demonstrator für die Assisted Norm Compliance Lösung	43
5 Success Story Mechatronic Medical Engineers GmbH	45
6 Zusammenfassung und Ausblick	49
A Anhang	A
A.1 Abkürzungsverzeichnis	A
A.2 Abbildungsverzeichnis	C
A.3 Glossar	D
A.4 Veröffentlichungen und Vorträge	F
A.5 Quellenverzeichnis	H

1 Herausforderung Advanced Systems Engineering

Der technische Fortschritt und der globale Wettbewerb treiben die Produktentwicklung stetig voran, angefangen bei mechanischen Systemen über mechatronische Systeme bis hin zu Cyber-Physical Systems (CPS) und zukünftigen Advanced Systems (AS). Jede dieser Entwicklungsstufen führt zu einer kontinuierlichen Zunahme der Systemkomplexität. Die spezifische Ausprägung von AS kann in Abhängigkeit von Kontext und Branche variieren. In der Regel umfasst der Begriff hochentwickelte und komplexe Systeme, die moderne Technologien, darunter Künstliche Intelligenz (KI), einsetzen, um fortschrittliche und vernetzte Funktionen zu realisieren [2]. Bei der Entwicklung von AS können disziplinspezifische Methoden nicht mit der technologischen, organisatorischen und menschenbezogenen Entwicklungskomplexität Schritt halten. Die Integration verschiedener Disziplinen von der Softwareentwicklung bis zur Mechanik und die Berücksichtigung von Aspekten wie Datensicherheit, Systemzuverlässigkeit und Benutzerfreundlichkeit erfordern eine ganzheitliche Betrachtung. Infolgedessen besteht die Notwendigkeit einen integrativen, soziotechnischen Ansatz zur Entwicklung innovativer AS zu erarbeiten und somit ASE zu etablieren.

Zur Umsetzung von ASE wurde im Verbundprojekt CyberTech im Rahmen der Fördermaßnahme „Beherrschung der Komplexität soziotechnischer Systeme - Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering für die Wertschöpfung von morgen (PDA_ASE)“ ein MTO-Ansatz (Mensch-Technik-Organisation) verfolgt. Um Entwicklungszeiten und -kosten bei der Entwicklung komplexer technischer Systeme bzw. AS zu reduzieren, bietet die Einführung von ASE nach dem MTO-Ansatz folgende Nutzenpotenziale für Großunternehmen und insbesondere KMUs in der Produktentwicklung:

Verbesserung der Kommunikation bei kollaborativer Entwicklung

Eine modellbasierte Vorgehensweise erleichtert die Verständigung zwischen verschiedenen Disziplinen und Teams. Dies fördert die Zusammenarbeit, reduziert frühzeitig Missverständnisse und Fehlentwicklung durch Kommunikationsprobleme und senkt somit Entwicklungskosten.

Nachhaltiger Kompetenzaufbau bei Mitarbeitenden für eine agile Arbeitsumgebung

Durch Schulungen und Weiterbildungen werden die Mitarbeitenden befähigt, in einer agilen und dynamischen Entwicklungsumgebung zu arbeiten. Dies fördert die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens.

Nachverfolgbarkeit von Anforderungsänderungen im Entwicklungsprozess

Die Etablierung des Digital Threads ermöglicht eine lückenlose Verfolgung von Anforderungsänderungen und deren Auswirkungen auf das Systemdesign. Dies verbessert die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit bestehender Entwicklungen.

Integration modellbasierter Risiko- und Sicherheitsanalysen

Durch die Verwendung von Modellen können Risiken und Sicherheitsaspekte frühzeitig identifiziert und bewertet werden. Dies führt zu einer verbesserten Entscheidungsfindung, Reduktion der Entwicklungszeiten und erhöht die Sicherheit sowie Zuverlässigkeit der entwickelten Systeme.

Identifikation von Inkompatibilitäten bei Hard- und Softwareschnittstellen

Modelle ermöglichen eine frühzeitige Erkennung von Schnittstellenproblemen und Inkompatibilitäten zwischen verschiedenen Systemkomponenten. Dies reduziert das Risiko von Integrationsfehlern und senkt die Entwicklungszeit bei der Integration von Hard- und Softwarekomponenten.

Berücksichtigung organisatorischer Anpassungen sowie des Change Managements

Die Einführung von ASE erfordert nicht nur technologische, sondern auch organisatorische Veränderungen. Ein MTO-Ansatz berücksichtigt die notwendigen Anpassungen in der Organisation und unterstützt das innerbetriebliche Change Management (Veränderungsmanagement).

Erforderliche Handlungsfelder für die Einführung von ASE nach dem MTO-Ansatz wurden in CyberTech zu einem Leitbild verdichtet. Abbildung 2 zeigt die drei Säulen des Leitbilds mit den Kernaspekten sowie Querschnittsthemen.

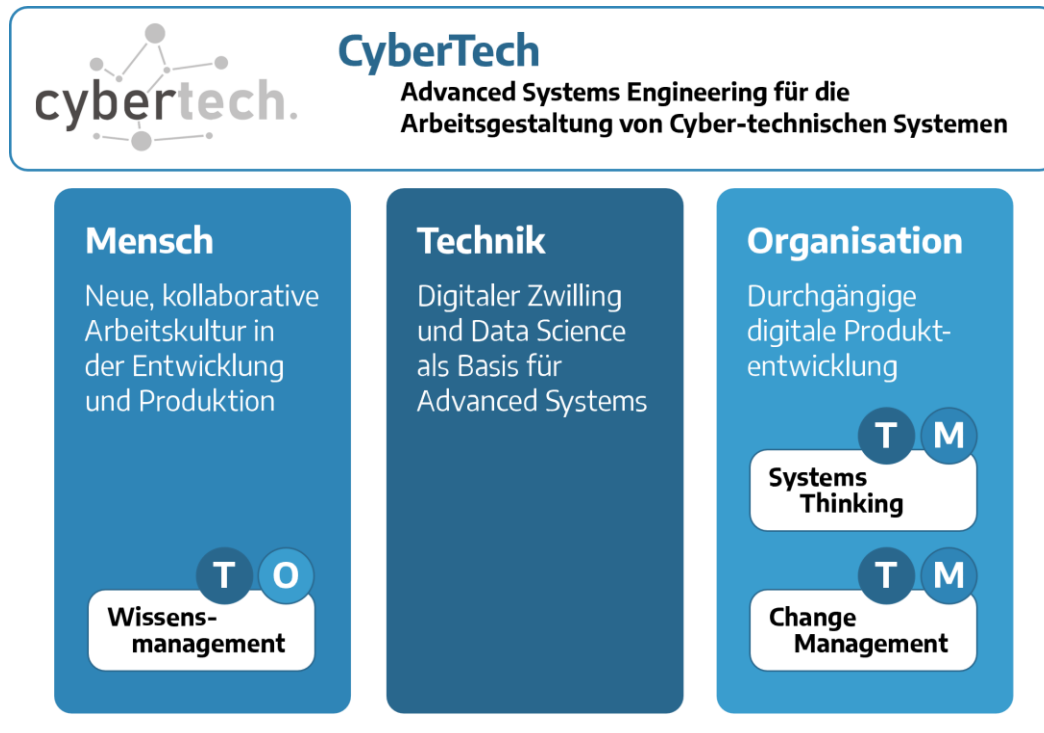


Abbildung 2 Säulen des integrativen Leitbilds für Advanced Systems Engineering im Verbundprojekt CyberTech mit Darstellung der Querschnittsthemen Wissensmanagement, Systems Thinking und Change Management [3]

Im nachfolgenden Abschnitt 2 findet eine Beschreibung der ersten Detaillierungsstufe des Leitbilds und der Anwendungsfälle im Kontext ASE sowie eine Darstellung der Kernaspekte des Leitbilds statt. In Abschnitt 3 werden die Wechselwirkungen der einzelnen Säulen als Querschnittsthemen betrachtet. Anschließend folgt in Abschnitt 4 eine Beschreibung der in CyberTech erarbeiteten Ergebnisse und untersuchten Demonstratoren statt. Diese können als Bausteine zu Schlüsseltechnologien, Befähigungskonzepte und Einführungsstrategien für ASE verstanden werden und bilden somit eine weitere Detaillierung des Leitbilds für ASE ab. Der Mehrwert in der Unternehmenspraxis wird in Abschnitt 5 über eine Success Story (Erfolgsgeschichte) bei der Einführung von ASE am Beispiel des CyberTech Anwenderunternehmens Mechatronic Medical Engineers GmbH dargestellt. Für eilige Leserinnen und Leser bietet Abschnitt 6 eine stark kondensierte Zusammenfassung sowie einen Ausblick auf den zukünftigen Forschungs- und Handlungsbedarf bei der Weiterentwicklung von ASE.

2 Leitbild und Anwendungsfälle

Digitale Technologien wirken im Zusammenspiel mit soziotechnischen Systemen, welche dadurch charakterisiert sind, dass sie aus einem technischen sowie einem sozialen Subsystem bestehen. Dabei kann ein Unternehmen bzw. die Entwicklung innerhalb eines Unternehmens als soziotechnisches System verstanden werden, sodass die moderne Produktentwicklung auch die menschenorientierte Gestaltung der Entwicklungsprozesse berücksichtigen muss. Neben dem Faktor Mensch ist es ebenso erforderlich, den Technologieeinsatz und die Organisation gesamthaft zu berücksichtigen. Dieses Zusammenspiel hat seinen Ursprung in der Arbeitswissenschaft und -psychologie unter dem Begriff MTO-Ansatz. Ein Arbeitssystem kann daher ganzheitlich zur Erfüllung der Systemaufgabe gestaltet und optimiert werden, wenn die drei Aspekte Mensch, Technik und Organisation gleichwertig mit ihren wechselseitigen Abhängigkeiten betrachtet werden [4]. Der MTO-Ansatz inkludiert Untersuchungen auf den vier Ebenen Unternehmen, Organisationseinheit, Gruppe sowie Individuum [5]. Beispielhafte Anwendungsbereiche des Ansatzes erstrecken sich von Sicherheit der Systemleistung hin zu gesunden Arbeitsbedingungen [4]. Die Technik wird als Transformationsprozess von Input in Output mit Hilfe von Artefakten, Vorgehensweisen, Methoden sowie dem damit verbundenen Know-how und der physischen Umgebung definiert [6]. Eine Organisation innerhalb des MTO-Ansatzes ist beschrieben durch formale organisatorische Anordnungen und informelle soziale Strukturen [6]. In der vorliegenden Veröffentlichung wird der MTO-Ansatz auf den Bereich ASE angewandt. Dieses umfasst die drei Betrachtungsfelder AS, Systems Engineering (SE) und Advanced Engineering [2]. AS fassen CPS mit der Eigenschaft von Produkten, Dienstleistungen und Produktionssystemen, sich zu vernetzen, zusammen. SE verfolgt einen strukturierten Ansatz, bei dem sowohl das zu entwickelnde System als auch das gesamte Entwicklungsprojekt ganzheitlich und interdisziplinär betrachtet wird. Dahingegen steht das Advanced Engineering für neuartige kreative und agile Arbeitsweisen, die sich aufgrund der Digitalisierung herausbilden. Hierbei bezeichnet Agilität eine flexibel gestaltbare und nachträglich an neue oder modifizierte Anforderungen anpassbare Vorgehensweise [7].

Bisher wurde kein Leitbild für ASE nach dem MTO-Ansatz skizziert, jedoch formuliert die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) Leitlinien und Thesen zur Gestaltung von ASE. In ähnlicher Weise finden diese sich in der INCOSE Vision 2035 [8] wieder. Nachfolgend sind sechs Thesen als Ausgangslage für CyberTech und dessen Leitbild zusammengefasst. Die ausführliche Darstellung der entsprechenden Thesen kann der acatech Veröffentlichung entnommen werden [9]:

- „Einzelne Branchen und Entwicklungs-Communities verwenden eigene Systems-Engineering-Entwicklungsrahmen, die projektspezifisch ausgeprägt werden.“
- „Daten- und modellbasiertes Arbeiten bildet in allen Bereichen der Marktleistungsentstehung die Grundlage.“
- „Die Absicherung der Marktleistung erfolgt auf Basis von Modellen.“
- „PDM/PLM/ALM und MBSE beruhen auf einem integrativen Gesamtkonzept.“
- „Im Entstehungsprozess der Marktleistung sind agile Arbeitsweisen etabliert.“
- „Die Systems-Engineering-Kompetenzentwicklung ist zentraler Bestandteil in der Aus- und Weiterbildung.“

Die Einführung von ASE integriert mehrere Handlungsfelder, die anhand des MTO-Ansatzes in einem Leitbild strukturiert sind. Der MTO-Ansatz findet sich demnach in den drei Säulen des Leitbilds wieder und adressiert die vorgestellten Thesen der Leitlinien für ASE. Das Zusammenwirken der Säulen des CyberTech-Leitbilds, deren Kernaspekten sowie die Querschnittsthemen werden im Folgenden näher beschrieben und sind zusätzlich in Abbildung 3 visualisiert. Im Rahmen von CyberTech wurden insbesondere die Kernaspekte tiefer erforscht (Hexagone in den Säulen in Abbildung 3).

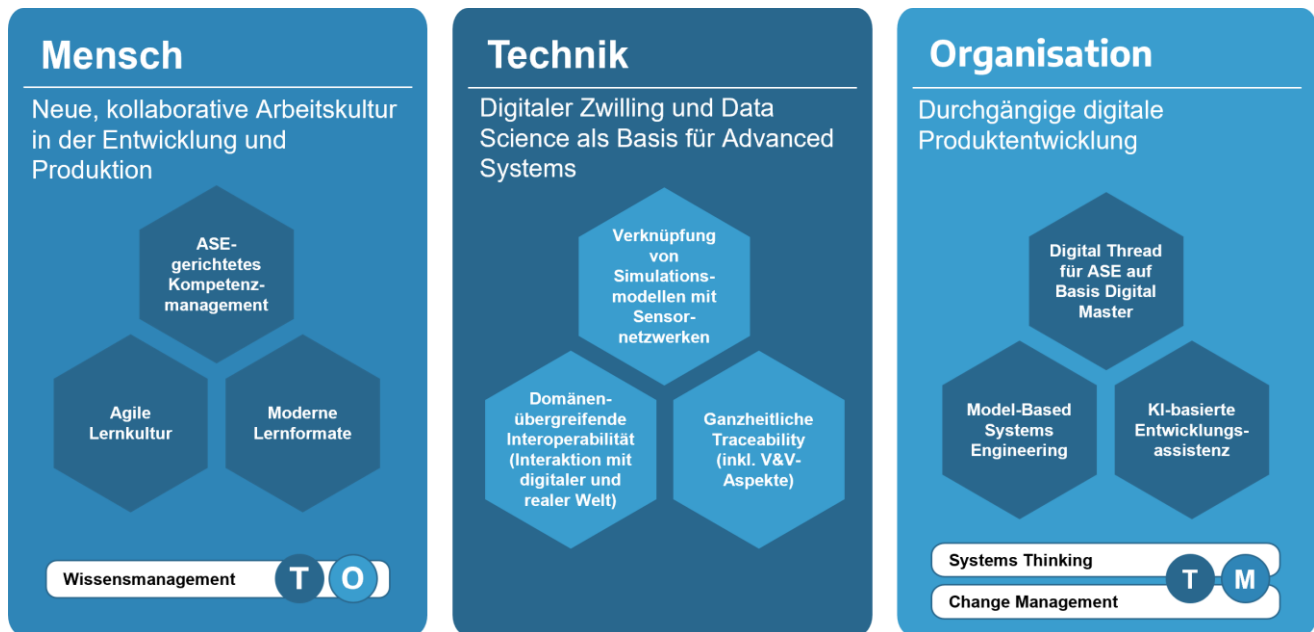


Abbildung 3 Übersicht des CyberTech-Leitbilds mit Kernaspekten und Querschnittsthemen

2.1 Säule Mensch

In einer komplexer werdenden Waren- und Dienstleistungswelt sowie im Kontext der Digitalisierung und Industrie 4.0 stößt die bisherige Produktentwicklung bei intelligenten technischen Systemen an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit [7, 10, 11]. Ein vielversprechender Ansatz ist ASE, das neue Wege zur Gestaltung von intelligenten, vernetzten und soziotechnischen Systemen eröffnet. ASE vereint Methoden zur Systembetrachtung und für das Anforderungsmanagement mit KI-geprägten Engineering-Prozessen, in denen alle relevanten Informationen – von der Geschäftsidee bis zum Markterfolg – disziplinübergreifend in den Entwicklungsprozess integriert werden, um die Entwicklung komplexer cyber-physischer Systeme effizient zu gestalten [2]. Der Einsatz neuer Entwicklungsansätze wie des ASE erfordert einerseits die Neugestaltung der Arbeitsorganisation, z.B. durch Einführung flacher Hierarchien oder cross-funktionaler Arbeitsstrukturen. Andererseits sind neue Kompetenzen und Qualifikationen für künftige Ingenieur:innen gefragt, um beispielsweise ein agiles Vorgehen zu adaptieren [2, 11]. Unternehmen müssen in solchen herausfordernden Zeiten dynamisch und flexibel sein, um sich an ihre Kunden, an die neuen Gegebenheiten und an die Unterschiedlichkeit der Absatzmärkte anzupassen. Agilität ist hierbei ein wichtiger Schlüssel zum Erfolg [12].

Im Folgenden wird daher auf die im Projekt CyberTech für wichtig erachteten drei Kernaspekte für Agilität bzw. der Säule Mensch nach Abbildung 3 detaillierter eingegangen: ASE-gerichtetes Kompetenzmanagement, agile Lernkultur und moderne Lernformate.

ASE-gerichtetes Kompetenzmanagement

Der Einsatz neuer Entwicklungsansätze erfordert einen zielgerichteten Aufbau von vorhandenen Kompetenzen der Mitarbeiter:innen. Daher ist die wesentliche Aufgabe eines auf ASE ausgerichteten Kompetenzmanagements, Kompetenzen für die Produktentwicklung in den Mittelpunkt der Entwicklungsmaßnahmen zu stellen. Dies setzt einen iterativen Überprüfungsprozess voraus, der sich aus dem stetigen Abgleichen von Umweltveränderungen, strategischer Ausrichtung der Organisation und der Identifikation zukünftiger Kompetenzbedarfe speist [13]. Die Kernelemente eines solchen zielgerichteten Kompetenzmanagements sind Kompetenzanforderungen zu formulieren, aus denen ein Kompetenzmodell erstellt werden kann und das wiederum die Grundlage für die Kompetenzentwicklung bildet. Eine detaillierte Beschreibung und weitere Erläuterung zu diesem erarbeiteten Framework sind

der Publikation „Kompetenzentwicklung in Systems Engineering. Nachhaltig Arbeiten und Lernen - Analyse und Gestaltung lernförderlicher und nachhaltiger Arbeitssysteme und Arbeits- und Lernprozesse“ [14] zu entnehmen. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die drei Kernelemente.

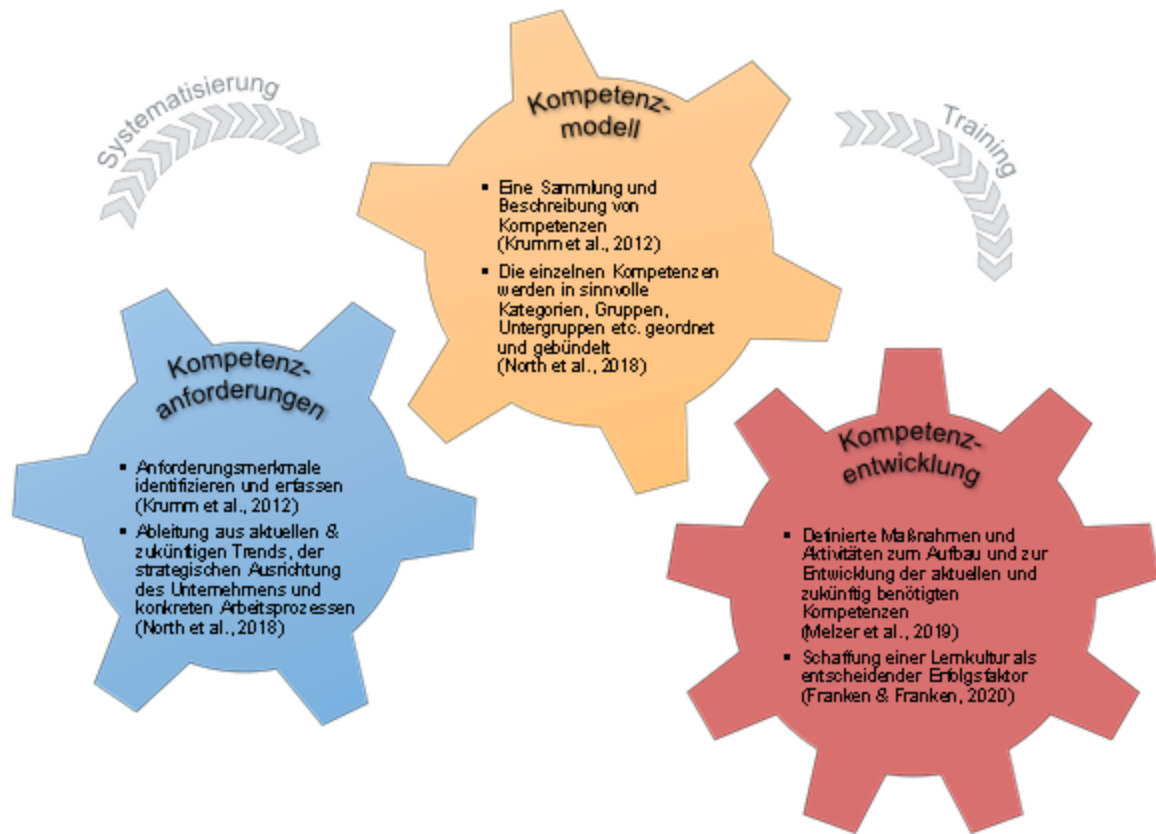


Abbildung 4 Bestandteile eines zielgerichteten Kompetenzmanagements

Vorgehensweise

Ausgangslage zur Identifizierung von Kompetenzanforderungen waren die 12 SE-Rollen nach Sarah A. Sheard [15]. Diese wurden mit dem etablierten INCOSE Competency Framework [16] verglichen und zusammengeführt. Auf Basis dieser Informationen wurde eine systematische Literaturrecherche im Zeitraum von September 2020 bis Februar 2021 durchgeführt. Hierzu wurden die identifizierten Publikationen zu den Themen SE, MBSE, Integrierte Produktentwicklung und Concurrent Engineering analysiert und zentrale Aspekte des ASE identifiziert, die anschließend in notwendige Kompetenzanforderungen für Unternehmen und Mitarbeiter:innen abgeleitet wurden. Um eine einheitliche Rollenbeschreibung und ein Kompetenzmodell zu entwickeln, wurde das gesammelte Datenmaterial aus der Literaturrecherche anhand des Kompetenzatlas von Heyse und Erpenbeck [17] klassifiziert und kategorisiert. Im nächsten Schritt wurden die theoretischen Erkenntnisse durch Onlinebefragungen und Befragungen von Expert:innen in verschiedenen Industrieprojekten angereichert. Dazu wurde das Befragungsmaterial mit Hilfe der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring [18] codiert und mit Hilfe des INCOSE Competency Frameworks [16] wurden deduktiv Kompetenzkategorien gebildet.

Agile Lernkultur

Ein weiteres Schlüsselement für Agilität ist eine innovationsoffene und wertschätzende Unternehmenskultur mit kurzen Entscheidungswegen, die Fehler und Misserfolge zulässt, empowernde Führung besitzt, ihre Mitarbeitenden motiviert und die den Rahmen für das Ausprobieren schafft [12]. Das Lernen dieser Werte ist kein selbstverständlicher, automatisch ablaufender Prozess. Es bedarf sowohl Zeit als auch die dafür notwendigen Ressourcen, die eine agile Transformation ermöglichen. Eine agile Lernkultur spiegelt diese Bedeutung wider und befasst sich mit allen Lernaktivitäten innerhalb eines Unternehmens (z.B. Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen) [19].

Vorgehensweise

Die Förderung einer agilen Lernkultur erfolgt auf individueller und organisationaler Ebene. Daher wurde im Projekt CyberTech einerseits auf bereits existierende Instrumente zurückgegriffen, um den aktuellen Status des organisationalen Lernens zu erfassen. Hierzu gehören der validierte Fragebogen Dimensions of the Learning Organization Questionnaire (DLOQ) nach Marsick & Watkins [20] und das agile Lernkonzept nach Gehlen-Baum & Illi [21]. Andererseits wurde eine agile Toolbox im Rahmen des Projektes entwickelt, mit dem Ziel, agiles Arbeiten zu verbessern und zentrale Scrum-Elemente kennenzulernen. Denn im Hinblick auf Agilität können niederschwellige Angebote helfen, Team oder Mitarbeitende in ihrem Lernen zu stärken und agile Arbeitsweisen zu fördern. Dafür eignen sich didaktisch-methodische Angebote, wie beispielweise Lernkarten, die während der Teamarbeit oder im Rahmen von Schulungen als Toolbox oder Toolkit eingesetzt werden. Zur Entwicklung der agilen Toolbox wurden verschiedene Methoden gesichtet, durch Expert:innen begutachtet und hinsichtlich der Passung für Team- und Projektarbeit ausgewählt.

Moderne Lernformate

Als weiterer Bestandteil der Säule Mensch zählen neue und moderne Lernformate. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Komplexität der Anforderungen an Ingenieur:innen sollten deshalb idealerweise bereits im Studium ASE-relevante Kompetenzen geschult und trainiert werden, um die neuen Anforderungen an das ASE bestmöglich vorzubereiten. Als Schwerpunkt wurde deshalb im Rahmen des Projekts ein universitäres Lehr- und Lernlabor entwickelt und umgesetzt. Das universitäre Lehr- und Lernlabor (ASE-Lernlab) bildet den geeigneten Rahmen, um Fach- und Methodenkompetenzen (z.B. Fachwissen zu SE oder Skills für das Projektmanagement) zu trainieren [22, 23, 24]. Die Grundlage des ASE-Lernlabs bildete das didaktische Prinzip des Constructive Alignment nach Biggs [25, 26], eine Methode des ergebnisbasierten Lehrens. Der Fokus wird hier auf die Gestaltung sowie transparente Förderung und Beurteilung des Lernens von Studierenden gerichtet [27]. Das Constructive Alignment wird genutzt, um Lern- bzw. Kompetenzziele, die Gestaltung der Inhalte, die damit verbundenen Aktivitäten und den Leistungserwerb bzw. -nachweis aufeinander abzustimmen.

Vorgehensweise

Um Aspekte des Constructive Alignment in den Kontext des ASE-Lernlabs zu stellen, wurden zunächst die notwendigen ASE-spezifischen Kompetenzanforderungen definiert und als Grundlage für die Beschreibung der Lernziele formalisiert. Dazu wurde auf das empirisch hergeleitete ASE-spezifische Kompetenzmodell zurückgegriffen. Für das ASE-Lernlab stand der Bereich „Kompetenzen für agiles Arbeiten“ im Fokus. Die Auswahl geeigneter Kompetenzen und deren Facetten im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit in einer Lern- und Lehrlaborumgebung wurden auf fakultätsspezifische Anforderungen hin überprüft und angepasst. Dadurch kam eine Auswahl von vier Kompetenzen zustande: (1) Lernbereitschaft, (2) Kommunikationsfähigkeit, (3) Teamfähigkeit, (4) Selbstmanagement. Auf der Grundlage dieser Kompetenzen wurden fünf Lernziele bzw. Kompetenzziele für agiles Arbeiten formuliert:

- verschiedene Methoden agiler und teambezogener Arbeitsweisen im Arbeitsprozess kennenlernen, auswählen und durchführen
- Arbeitsplanung und Kommunikation im Team auf konstruktive und zielgerechte Weise umsetzen und gestalten
- Projektaufgaben selbstständig strukturieren und bearbeiten durch angemessenen Einsatz von Arbeitsteilung und kooperative Zusammenarbeit
- selbständig eingesetzte Methoden agiler und teambezogener Arbeitsweisen im Arbeitsprozess beurteilen und reflektieren
- Ergebnisse der Projektarbeit zielgruppenspezifisch und aufbereitet im Rahmen einer Abschlusspräsentation im Team präsentieren

Diese übergeordneten Kompetenzziele für das Lernlabor stellen die Basis für die aus dem Projekt entwickelten Lernaktivitäten dar. Die vertiefte Darstellung zum Vorgehen von Constructive Alignment für das universitäre Lehr- und Lernlabor kann bei Karasek & Arslanparcasi [14] eingesehen werden. Im Verlauf des Projektes wurde ein Konzept für den technisch-inhaltlichen Aufbau des ASE-Lernlabs sowie die Entwicklung eines interdisziplinären Tutoriums und von Gruppenforschungsprojekten am Fachbereich 16 Maschinenbau der TU Darmstadt erarbeitet.

2.2 Säule Technik

In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf der Säule Technik. Das Ergebnis von ASE sind AS. Bei diesen handelt es sich um cyber-physische Systeme, die sowohl über physische als auch virtuelle Anteile verfügen. Die virtuelle Repräsentation erfolgt dabei im Digitalen Zwilling (DZ) mittels virtueller Modelle in der Produktnutzungsphase sollen diese Modelle mit ausgewählten Sensormesswerten der physischen Komponente interagieren. Aus der Perspektive der Technik stellt der DZ in Verbindung mit seinem physischen Gegenstück, dem Physischen Zwilling (PZ), die Grundlage für innovative Anwendungsfälle im Rahmen von ASE dar. Der DZ stellt das digitale Abbild eines physischen Produkts dar und steht mit diesem in wechselseitigem Austausch [28]. Er dient als technische Voraussetzung und Steuerungsschnittstelle beispielsweise von Fernüberwachung, vorausschauender Wartung oder Strategien zur Fehlervermeidung. Hierfür nutzt der DZ geometrie- und verhaltensbeschreibende Modelle aus der Produktentwicklung und Zustands- und Prozessdaten aus der Produktnutzung.

Drei zentrale Leitfragen wurden für die Säule Technik im Rahmen von CyberTech beantwortet, wobei für die Beantwortung der ersten Frage insbesondere ein Schwerpunkt auf dem entwickelten ASE-Reifegradmodell liegt (vgl. auch Abschnitt 4.3.1).

- Wie kann der aktuelle Reifegrad in Bezug auf Advanced Systems Engineering analysiert werden?
- Was ist ein Advanced System?
- Wie kann Advanced Systems Engineering vermittelt werden?

Die weiteren Ergebnisse der Säule Technik, als Antwort auf die zweite und dritte Leitfrage, wurden insbesondere über ein exemplarisches AS als Demonstrator erarbeitet. Dieses wurde im Rahmen des Projekts als Demonstrator entwickelt und für die Validierung und Verifizierung der Konzepte genutzt. Das Demonstratorsystem besteht aus einem Roboterarm und einem 3D-Drucker. Zur Feststellung des ASE-Reifegrades wurde ein Vorgehen mit fünf Phasen definiert – von der Definition der Bewertungskriterien, der detaillierten Analyse bis zur Bewertung und abgeleiteten Handlungsempfehlungen.

Verknüpfung von Simulationsmodellen mit Sensornetzwerken

Die Herausforderungen von ASE bei der Entwicklung von DZ umfassen die Gestaltung von virtuellen und physischen Komponenten sowie die Verarbeitung von Sensormesswerten mit Simulationsmodellen, die das Verhalten beschreiben. Dies wird mit dem Kernaspekt Verknüpfung von Simulationsmodellen mit Sensornetzwerken beschrieben.

Vorgehensweise

Um den aktuellen Reifegrad der Verknüpfung von Simulationsmodellen mit Sensornetzwerken zu analysieren, wurde zunächst eine Bestandsaufnahme bestehender digitaler Systemmodelle und Sensordaten mit dem oben genannten Vorgehen durchgeführt. Dies erfolgt anhand des ASE-Vorgehensmodells zur Bestimmung des Reifegrads, das in fünf Phasen gegliedert ist (Abbildung 5): Zunächst wurden Bewertungskriterien für die Integration von Simulationen und Sensordaten definiert. Anschließend erfolgt eine detaillierte Analyse bestehender Methoden zur Sensordatenerfassung, -verarbeitung und -integration in digitale Modelle. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Bewertung der aktuellen Ansätze genutzt, um daraus konkrete Handlungsempfehlungen für eine optimierte Kopplung

abzuleiten. Basierend auf dem CyberTech-Projekt wurden Methoden zur Nutzung von Sensormesswerten als Simulationsdaten evaluiert und in den DZ überführt. Die praktische Umsetzung und Validierung dieser Konzepte erfolgt anhand des Demonstratorsystems, das exemplarisch die Nutzung von Sensordaten für simulationsgestützte Optimierungsprozesse veranschaulicht.

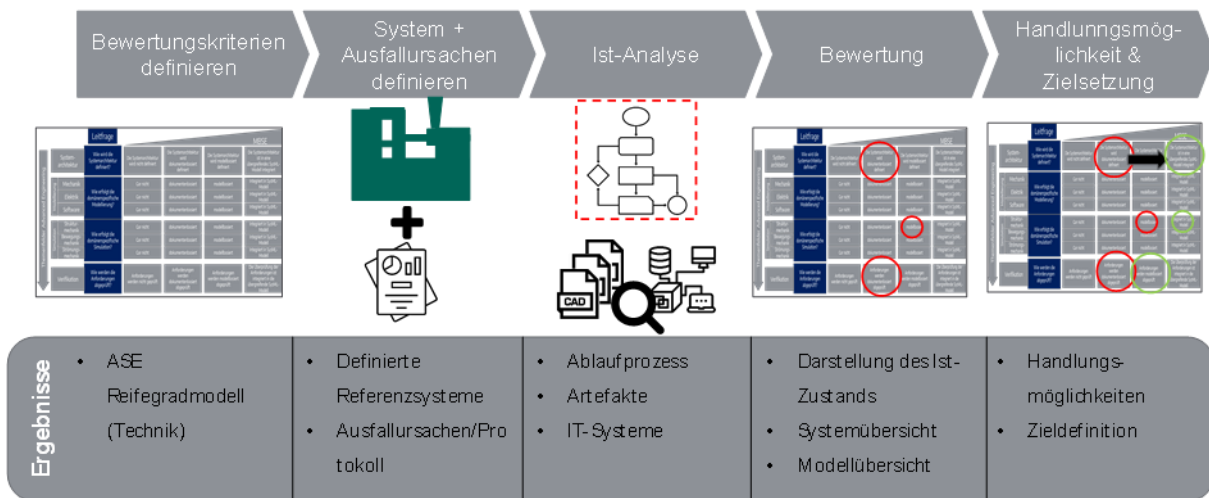


Abbildung 5 Vorgehensmodell zur Ist-Analyse des Reifegrads für Advanced Systems Engineering

Als Referenz wurden im Rahmen von CyberTech die Bewertungskriterien zur Feststellung des Reifegrads entwickelt. Damit lassen sich die digitalen Systemmodelle und die Sensorik an bestehenden Systemen analysieren. Für die individuelle Analyse konkreter Systeme lohnt es sich die Bewertungskriterien auf den gegebenen Anwendungsfall anzupassen. Zusätzlich wurden für das Konzept des DZ Prozesse und Methoden entwickelt, mit denen Sensormesswerte als Simulationsdaten im DZ verwendet werden können. Diese Ergebnisse wurden bereits veröffentlicht und präsentiert. An dieser Stelle wird daher lediglich auf die Veröffentlichungen verwiesen:

- „Approach of Simulation Data Management for the Application of the Digital Simulation Twin“ [29]
- „Development of an Information Model for Simulation Data Management in the Digital Twin“ [30]

Domänenübergreifende Interoperabilität

Für die vollständige und effiziente Repräsentation von Merkmalen, Zuständen und Verhalten muss das physische System in Partialmodellen beschrieben werden. Je nach Anwendungsfall können die Partialmodelle berechnet und zu einem Gesamtmodell verknüpft werden. Dafür muss eine domänenübergreifende Interoperabilität der Modelle sichergestellt werden. Kurz- und mittelfristig ist die Entwicklung der Partialmodelle Teil der virtuellen Produktentwicklung. Langfristig werden Plattformen und digitale Ökosysteme entstehen, über die Partialmodelle von Drittanbietern für die Erweiterungen des eigenen DZ erworben werden können.

Vorgehensweise

Die Analyse der domänenübergreifenden Interoperabilität begann mit einer Untersuchung der aktuellen Methoden zur Modellintegration in verschiedenen Anwendungsdomänen. Zunächst wurden bestehende Standards und Formate für die Modellbeschreibung identifiziert, um eine konsistente und strukturierte Modellierung zu ermöglichen. Danach wurden Partialmodelle einzelner Fachbereiche analysiert und auf ihre Kompatibilität mit übergeordneten Systemmodellen geprüft. Dies geschah unter Berücksichtigung der Anforderungen an Schnittstellen und Datenformate, um eine nahtlose Integration und Kommunikation zwischen den Modellen sicherzustellen. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Entwicklung eines strukturierten Vorgehensmodells ein, das beschreibt, wie Partialmodelle in einer domänenübergreifenden Umgebung berechnet und verknüpft werden können. In einem weiteren Schritt wurde untersucht, inwiefern digitale Plattformen den Austausch und die Nutzung von

Partialmodellen erleichtern können, insbesondere in Hinblick auf die zukünftige Bereitstellung durch Drittanbieter. Die Evaluation erfolgte anhand des Demonstratorsystems, dass die Interoperabilität zwischen verschiedenen Modellierungsansätzen und Systemarchitekturen validierte.

Ganzheitliche Traceability

Die Herausforderung während der Produktentwicklung liegt darin, der immer größer werdenden Komplexität von Produkten und damit dem Produktentwicklungsprozess selbst gerecht zu werden. Um diese Komplexität zu beherrschen, muss der Fokus auf den Beginn des Produktentwicklungsprozesses gelegt werden, in dem die Basis für die gesamte weitere Entwicklung entsteht. Hier wird die Produktidee analysiert und in Anforderungen, Funktionen und Komponenten zerlegt. Aufgrund normativer Anforderungen, aber auch um den Überblick über die Elemente des Systems zu behalten, ist eine ganzheitliche Nachvollziehbarkeit (engl. Traceability) im Produktentwicklungsprozess von großer Wichtigkeit. Mit ihrer Hilfe kann geprüft werden, welche Anforderungen erfüllt sind oder welche Elemente durch die Änderung in der Planung beeinflusst werden. Andererseits lassen sich etwaige Fehler auf Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zurückverfolgen.

Vorgehensweise

Für die Sicherstellung einer durchgängigen Nachvollziehbarkeit in der Produktentwicklung wurde zunächst eine Analyse des bestehenden Produktentwicklungsprozesses bei Anwenderunternehmen durchgeführt. Dabei wurden die verschiedenen Entwicklungsphasen und die darin genutzten Methoden zur Anforderungserfassung, Funktions- und Systemmodellierung untersucht. Auf Basis der Bewertungskriterien aus dem CyberTech-Projekt wird analysiert, welche Traceability-Mechanismen bereits etabliert sind und an welchen Stellen Optimierungsbedarf besteht. Anschließend werden Methoden zur strukturierten Verknüpfung von Anforderungen, Funktionen und Systemelementen entwickelt und validiert. Dabei lag der Fokus auf der Implementierung von Traceability-Ansätzen in modellbasierten Entwicklungsumgebungen, um eine durchgängige Verfolgbarkeit von der Produktidee bis zur realisierten Lösung zu gewährleisten. Die Umsetzung wurde anhand des Demonstratorsystems validiert, das den Einsatz digitaler Modelle zur Nachvollziehbarkeit von Entwicklungsentscheidungen und Änderungen innerhalb des gesamten Produktlebenszyklus zeigt.

2.3 Säule Organisation

Die Bereiche der menschbezogenen Arbeitsgestaltung und der Produktentwicklungsmethoden entwickeln sich ständig weiter. Die Integration von Ansätzen für menschbezogene Produktentwicklungsprozesse für AS in organisatorische Rahmenbedingungen stellt eine Herausforderung in einer globalen und agilen Arbeitsumgebung dar. Als Bindeglied zwischen der Befähigung von Mitarbeitenden und den zu entwickelnden technischen Systemen liegt der Fokus auf der Organisation als strukturierendem Faktor [31]. Im Verbundprojekt CyberTech wurden die Kernaspekte der Säule Organisation entsprechend Abbildung 3 näher untersucht.

Model-Based Systems Engineering

Die organisatorischen Rahmenbedingungen für ASE definieren Produktentwicklungsprozesse und erfordern ein Rahmenwerk für MBSE. Das Rahmenwerk strukturiert Methoden, digitale Werkzeuge und Vorlagen, um modellbasierte Entwicklungsprozesse für ASE organisatorisch zu verankern. Die unternehmensexternen Faktoren, unter denen AS entwickelt werden, sind von Unsicherheiten und Volatilität in den Entwicklungsanforderungen geprägt, sodass, wie bereits für die Säule Mensch dargestellt, hieraus eine agile Arbeitsumgebung resultiert. Wesentliche Kernelemente für die erfolgreiche Entwicklung von ASE sind daher Prozesse und Vorgehensweisen, die diese notwendige Agilität in der Entwicklung berücksichtigen. Daher wurde ein agiles Vorgehensmodell für MBSE entwickelt, welches möglichst nah an bestehenden und etablierten Vorgehensmodellen, namentlich dem V-Modell nach VDI 2206 [32], angelehnt ist.

Vorgehensweise

Zur Definition eines agilen Vorgehensmodells für die Entwicklung von ASE wurden beim Verbundpartner Mechatronic Medical Engineers Anforderungen an die agile Entwicklung erhoben. Hierbei ist wichtig zu erwähnen, dass eine konkrete Erarbeitung eines Vorgehens auf Basis dieser Anforderung zwar spezifisch für ein Anwenderunternehmen in der Medizingerätentwicklung erfolgte, jedoch eine Generalisierung durchgeführt wurde, um eine Übertragbarkeit des Vorgehensmodells sicherzustellen. Vor allem auf Aspekte der Akzeptanz bei Mitarbeitenden aus Perspektive des Change Managements wurde besonderer Wert gelegt und das Vorgehensmodell daher als Adaption eines V-Modells auf Basis VDI 2206 [32] gewählt. Eine weitere Hauptanforderung, die berücksichtigt wurde, war die Durchgängigkeit im gesamten Entwicklungsprozess. Daher wurde parallel am Thema der Durchgängigkeit bzw. des Digital Thread gearbeitet, während das Vorgehensmodell weiter ausdetailliert wurde.

Digital Thread für ASE

Des Weiteren spielt die digitale Nachverfolgbarkeit produktbezogener Entwicklungsartefakte in einer verteilten, kollaborativen Entwicklungsumgebung eine Schlüsselrolle [33]. Der Digital Thread für ASE auf Basis des Digital Master unter Verwendung des Digital Data Package Ansatzes liefert hierfür ein Mittel zur digitalen Nachverfolgbarkeit von Entwicklungsartefakten im ASE [34]. Das Digital Data Package ist ein organisatorischer Kernaspekt zur technischen Realisierung des Digital Master.

Vorgehensweise

Zur Umsetzung des Digital Thread für ASE wurde zunächst eine Bestandsaufnahme bestehender Methoden zur digitalen Nachverfolgbarkeit von Entwicklungsartefakten durchgeführt. Zudem wurden am Beispiel der Anwendungspartner von CyberTech die Anforderungen an den Digital Thread definiert, insbesondere im Hinblick auf die Integration in verteilten, kollaborativen Entwicklungsumgebungen. Es wurde das Konzept des Digital Master als zentrale Datenquelle analysiert und u.a. das Digital Data Package als technisches Mittel zur Bereitstellung von Entwicklungsartefakten untersucht. Zur Gewährleistung der digitalen Nachverfolgbarkeit wurde ein domänenübergreifendes Informationsmodell (Abschnitt 4.1.2) entwickelt, das alle relevanten Entwicklungsdaten erfasst und verwaltet. Schließlich erfolgte eine Validierung der Konzepte, indem untersucht wurde, inwiefern die digitale Nachverfolgbarkeit zu einer verbesserten Konsistenz und Nachvollziehbarkeit in der Entwicklung von AS beiträgt.

KI-basierte Entwicklungsassistenz

Um die Verfolgung von Entwicklungsartefakten wie Anforderungen, abgeleiteten Funktionen und technischen Lösungselementen sicherzustellen, müssen eine KI-basierte Datenbereitstellung, domänenspezifische Datenmodelle sowie ein domänenübergreifendes Informationsmodell unterstützen [35]. Zudem bietet eine KI-basierte Entwicklungsassistenz Unterstützung bei Routinearbeiten in der Systemmodellierung und der Einhaltung relevanter Normen in der Entwicklung von AS.

Vorgehensweise

Die Implementierung einer KI-basierten Entwicklungsassistenz begann mit der Analyse bestehender Systemmodellierungsprozesse. Zunächst wurden die typischen Routineaufgaben und Engpässe in der Modellierung von AS identifiziert, insbesondere im Hinblick auf die Verarbeitung und Verknüpfung von Entwicklungsartefakten wie Anforderungen, Funktionen und technischen Lösungselementen. Ein spezieller Fokus lag durch den Anwendungspartner vor allem auf Herausforderungen in hochregulierten Branchen wie der Medizingerätetechnik. Auf dieser Basis wurde ein KI-gestütztes Datenbereitstellungsmodell entwickelt, das relevante Informationen automatisiert extrahiert, klassifiziert und in domänenspezifische Datenmodelle integriert. Um die Unterstützung bei der Systemmodellierung weiter zu optimieren, wurden KI-Methoden zur automatisierten Normprüfung implementiert, die Modellierungsentscheidungen und den Inhalt von Systemmodellen anhand bestehender Vorschriften und Standards validieren. Abschließend erfolgte eine praktische Erprobung der KI-basierten Entwicklungsassistenz in einem Demonstrator, dass ihre Effektivität in realen Entwicklungsumgebungen überprüfte.

3 Querschnittsthemen

3.1 Wissensmanagement

Wissen muss organisiert werden, um die zukünftigen Herausforderungen der Systementwicklung meistern zu können. Wissensmanagement ist die organisierte, im Unternehmen verankerte Aktivität, Wissen aufzubauen, neu zu kombinieren, zu transferieren und zu sichern, um darauf Lösungen aufzubauen [36]. Das Wissensmanagement weist nach Probst et al. [37] mehrere Bestandteile auf, die in der nachfolgenden Abbildung mit der dazugehörigen Erklärung dargestellt werden:

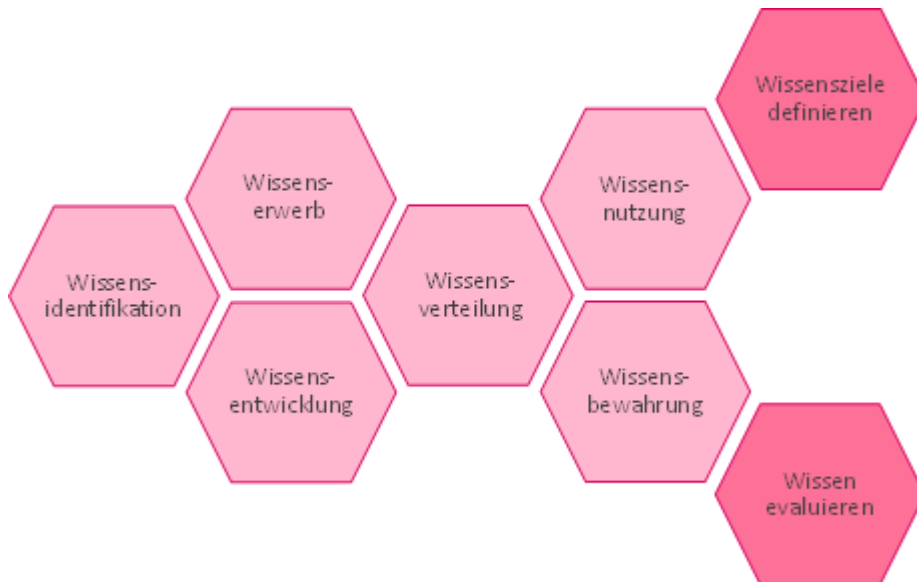


Abbildung 6 Betrachtete Wissensmanagement-Prozesse

- Wissensidentifikation: Schaffung von Transparenz über internes und externes vorhandenes Wissen bis hin zu verschiedenen Formen der Kodifizierung, Dokumentation und Speicherung.
- Wissenserwerb: Beschaffung von relevanten Informationen und Einbindung externer, personaler und technischer Netzwerke.
- Wissensentwicklung: Einrichten und Aufbau von Wissensressourcen in der Organisation sowie Schaffung interner, personaler und technischer Netzwerke.
- Wissensverteilung: Bereitstellung, Teilung und Verbreitung von explizitem und implizitem Wissen mittels IKT und personaler Ressourcen.
- Wissensnutzung: Anwendung von neuem Wissen in Entscheidungen und Handlungen sowie Umwandlung von Wissen in Produkte und Dienstleistungen. Hierfür müssen Vertrauen geschaffen, Ängste und Barrieren abgebaut und Motivation aufgebaut werden.
- Wissensbewahrung: Sicherung und Aktualisierung von Wissen sowie Bindung von wichtigen Akteuren an die Organisation, die in diesen Wissensprozessen involviert sind.
- Wissensziele definieren: Formulierung von klar definierten Wissenszielen (z.B. Was genau soll durch das Wissensmanagement erreicht werden? Welche Geschäftsziele werden damit unterstützt?)
- Wissen evaluieren: Bewertung der Qualität und der Zielerreichung des Wissensmanagements

Im Rahmen des Projektes CyberTech wurden Methoden und Instrumente für das Wissensmanagement identifiziert und im Hinblick auf das MTO-Prinzip gruppiert, um die Implementierung zu erleichtern. Die betrachteten Methoden und Instrumente sind in Abbildung 7 zusammengefasst dargestellt.

Phase	Mensch	Technik	Organisation
Sensibilisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Anreizsysteme (materiell & immateriell) • Fragenplakate • Wissensspiele 	-	<ul style="list-style-type: none"> • Personalentwicklung • Erfahrungsberichte
Wissensziele definieren	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • Reifegrad des Wissensmanagements bestimmen • Simulation von Zukunftswelten
Wissensidentifikation	<ul style="list-style-type: none"> • Litfaßsäulen-Übung 	<ul style="list-style-type: none"> • Diskussionsforen • Wissensdatenbanken • Yellow Pages • Wissenslandkarten 	<ul style="list-style-type: none"> • Wissenslandkarten • Benchmarking • Diskussionsforen • Prozessmanagement • Laufwerke strukturieren
Wissenserwerb und -entwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Coaching • Netzwerke • Weiterbildung • Open-Space • Workshop • Steh-Convent • Gemeinsame Mittagessen • Mitarbeiterveranstaltungen • Hospitation • Führungskräfteentwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> • Diskussionsforen • Internet / Intranet • Blaue Seiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Akquisition von externem Wissen • Diskussionsforen • Gruppen- und Projektarbeit • Communities of Practice • Inforäume, Kaffeecorner • Kreativitätstechniken • Sabbaticals • Qualitätszirkel • Simulation von Zukunftswelten • Szenariotechnik • Open-Space-Konferenzen • Ideenmanagement • Weiterbildung • Arbeitskolloquien • Kommunikationstraining
Wissensverteilung	<ul style="list-style-type: none"> • Anreizsysteme • Netzwerke • Weiterbildung • Mikroartikel • Storytelling • Wissensbroker 	<ul style="list-style-type: none"> • Diskussionsforen • Internet / Intranet • Weiterbildung • Groupware • Wissensmarktplatz • Visualisierte Geschäftsprozesse • Verknüpfungen zu Dokumenten • Knowledge Links • Best Practice Sharing 	<ul style="list-style-type: none"> • Diskussionsforen • Gruppen / Projektarbeit • Inforäume, Kaffeecorner • Job Rotation • Lessons Learned • Newsletter • Patenkonzept • Prozessmanagement • Qualitätszirkel • Regelung von Zugriffsrechten
Wissensnutzung	<ul style="list-style-type: none"> • Coaching • Initiativen gegen das „not invented here“ Syndrom 	<ul style="list-style-type: none"> • Internet / Intranet 	<ul style="list-style-type: none"> • Gruppen- und Projektarbeit • Lessons Learned • Laufwerke strukturieren
Wissensbewahrung	<ul style="list-style-type: none"> • Anreizsysteme • Netzwerk 	-	<ul style="list-style-type: none"> • Communities • Prozessmanagement • Lessons Learned nach Projektende
Wissens-evaluation	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • Balanced Scorecard • Intellektuelles Kapital messen • Kompetenzmessung • Reifegrad des Wissensmanagements bestimmen • Wert von erfasstem und gespeichertem Wissen messen

Abbildung 7 Methoden und Instrumente im Wissensmanagement angelehnt an Akademie Management und Politik [38]

3.2 Change Management

Change Management ist ein entscheidender Erfolgsfaktor, um die Einführung neuer Methoden und Technologien im ASE nachhaltig zu gestalten. Es umfasst dabei alle strukturierten Aktivitäten, die darauf abzielen, Organisationen, Prozesse und Mitarbeitende auf den Wandel bzw. einer Änderung von Arbeitsweisen und Methoden vorzubereiten und den Wandel erfolgreich zu implementieren [39]. Ein zentrales Ziel ist es, die technologische Transformation mit organisationalen und menschlichen Faktoren in Einklang zu bringen, um Widerstände zu minimieren und eine hohe Akzeptanz für neue Arbeitsweisen zu schaffen.

Betrachtete Change-Management-Prozesse in CyberTech

- Veränderungsbedarf identifizieren: Analyse von Treibern und Hemmnissen der digitalen Transformation im ASE, insbesondere durch die Einführung von MBSE oder neue Modellierungsansätze wie SysML v2 und KI-gestützte Assistenzsysteme.
- Change-Strategie entwickeln: Erarbeitung maßgeschneiderter Transformationsstrategien, die sowohl technische als auch organisatorische Anforderungen berücksichtigen.
- Stakeholder einbinden: Entwicklung von Kommunikations- und Beteiligungsformaten zur frühzeitigen Einbindung von Fachbereichen, Führungskräften und Ingenieur:innen.
- Akzeptanz messen und steuern: Anwendung strukturierter Werkzeuge, wie des TASC-Modells (Technology Acceptance Scoring Model) [40], zur Bewertung der Akzeptanz von ASE-Methoden bzw. Einführung neuer IT-Werkzeuge und Identifikation von Anpassungsbedarfen.
- Schulungen und Qualifizierung: Aufbau einer agilen Lernkultur durch gezielte Weiterbildungsprogramme und Kompetenzentwicklung für neue ASE-Technologien.
- Nachhaltigkeit sichern: Verankerung von Change-Prozessen in der Organisation durch kontinuierliches Monitoring, Feedback-Mechanismen und Anpassung bestehender Strukturen.

Im Rahmen von CyberTech wurden Methoden für das Change Management nach dem MTO-Prinzip gruppiert, um anwendbare Instrumente zu identifizieren. Darüber hinaus wurde das TASC-Modell weiterentwickelt, um eine Metrik zur Bewertung der voraussichtlichen Akzeptanz von Änderungen durch Einführung von ASE-Methoden/Tools zu ermöglichen (vgl. Auszug TASC-Modell in Abbildung 8).

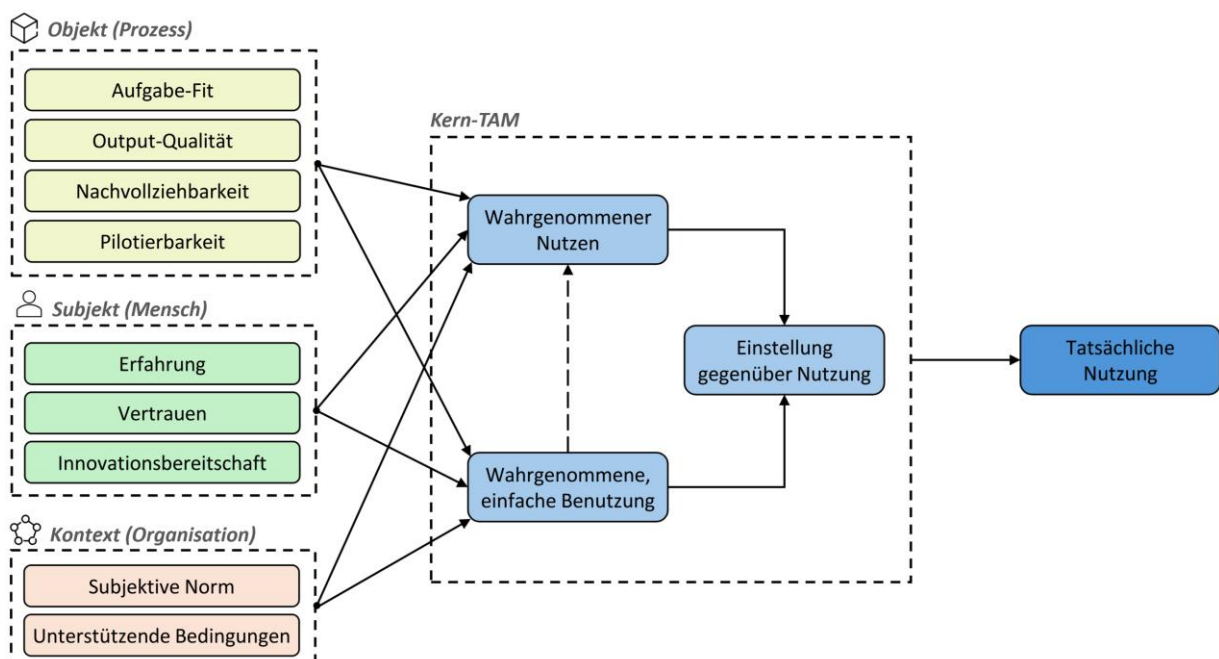


Abbildung 8 Modell zur Quantifizierung der voraussichtlichen Akzeptanz bei Einführung neuer ASE-Methoden/Tools [40]

3.3 Systems Thinking

Um die steigende Komplexität technischer Systeme zu bewältigen, ist ein ganzheitlicher Denkansatz erforderlich. Systems Thinking bezeichnet die Fähigkeit, Systeme als vernetzte Einheiten zu betrachten, Wechselwirkungen zwischen Komponenten bzw. Teilen eines Systems zu verstehen und langfristige Auswirkungen von Entscheidungen (z.B. im Entwicklungsprozess) zu berücksichtigen [41]. Im Kontext von ASE ermöglicht Systems Thinking die Entwicklung nachhaltiger, interdisziplinärer Lösungen, die sowohl technische, organisatorische als auch menschliche Faktoren einbeziehen. Insbesondere fokussiert der Ansatz in CyberTech darauf für SE relevante Techniken zu identifizieren, um die Modellierung des Systemkontext und die Wechselwirkung des zu entwickelnden Systems mit dessen Umgebung besser zu analysieren und zu verstehen.

Auszug betrachteter Aktivitäten für Systems Thinking

Systemgrenzen definieren: Identifikation relevanter Systemkomponenten, Akteure und Einflussfaktoren zur Abgrenzung des zu entwickelnden AS.

Funktionales denken: Identifikation von Funktionen (Haupt-, Neben- und Unterstützungsfunktionen) eines AS und dessen Teilsystems bzw. Komponenten.

Wechselwirkungen analysieren: Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Subsystemen, externen Einflüssen, Rückkopplungseffekten sowie funktionaler Flüsse im und um das zu entwickelnde AS.

Dynamische Modellierung nutzen: Anwendung von modellbasierten Methoden wie SysML, um AS zu visualisieren und Abhängigkeiten zu weiteren vernetzten Systemen frühzeitig zu erkennen.

Interdisziplinäre Zusammenarbeit fördern: Integration von Expert:innen verschiedener Fachrichtungen zur besseren Abstimmung zwischen technisch relevanten Abhängigkeiten zwischen Komponenten des zu entwickelnden Systems und der Wechselwirkung mit Umgebung, Organisation und Menschen.

Szenarien und Systemverhalten simulieren/modellieren: Nutzung von DZ und Simulationsansätzen, um das Verhalten von Systemen in verschiedenen Betriebszuständen vorherzusagen, aber auch verschiedene Basisszenarien und weiterführende Anwendungsszenarien zu verstehen.

Nachhaltigkeit und Resilienz bewerten: Identifikation potenzieller Schwachstellen, um robuste und langfristig tragfähige Systemlösungen zu entwickeln und die Auswirkungen von äußeren Störungen (z.B. auf die funktionale Sicherheit) zu bewerten.

Im Rahmen des Projekts CyberTech wurden Methoden und Instrumente des Systems Thinking insbesondere in Bezug zur Anwendung im Rahmen der Modellierungsunterstützung untersucht, um ihre praktische Anwendung im MBSE im Kontext von Gefährdungs-, Risiko- und Zuverlässigkeitsanalysen zu erleichtern.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der :em engineering methods AG

4.1.1 Potenzialanalyse für Reliability, Safety & Risk Engineering mit MBSE

Die Sicherheit und Risikobewertung von komplexen Systemen sind zentrale Herausforderungen im SE. In sicherheitskritischen Branchen wie der Automobilindustrie, Medizintechnik oder Luftfahrt sind strukturierte Methoden zur Identifikation, Bewertung und Minderung von Risiken erforderlich, um gesetzliche Vorgaben und Standards einzuhalten. MBSE bietet hierfür ein enormes Potenzial, da es nicht nur die Effizienz in der Sicherheitsbewertung steigert, sondern auch die Automatisierung und Wiederverwendbarkeit von Sicherheitsanalysen ermöglicht.

Im Rahmen des CyberTech-Projekts wurde eine Potenzialanalyse zur Nutzung von MBSE im Reliability, Safety & Risk Engineering durchgeführt. Diese zeigt auf, wie beispielsweise Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA), Fehlerbaumanalysen (FTA) sowie Hazard & Risk Analysen (HARA) durch MBSE-Methoden unterstützt, optimiert und teilweise automatisiert werden können. Zudem wurden spezifische Prozesse von Anwendungspartnern des Projekts betrachtet. Es wurden die in Abbildung 9 genannten Werkzeuge und Methoden betrachtet, wobei die Risikoanalyse in einem Plattform Tool nicht untersucht wurde (und daher in der Abbildung ausgegraut wurde). Insbesondere wurde auf die Untersuchung verschiedener technischer Lösungen, z.B. Plugins von Editoren für die Systemmodellierung und Nutzung angepasster Modellierungssprachen wie RAAML (Risk Analysis and Assessment Modeling Language) und der GSN (Goal Structuring Notation), ein Schwerpunkt gelegt und dies mit einem dokumentenbasierten Ansatz (Microsoft Excel) verglichen.

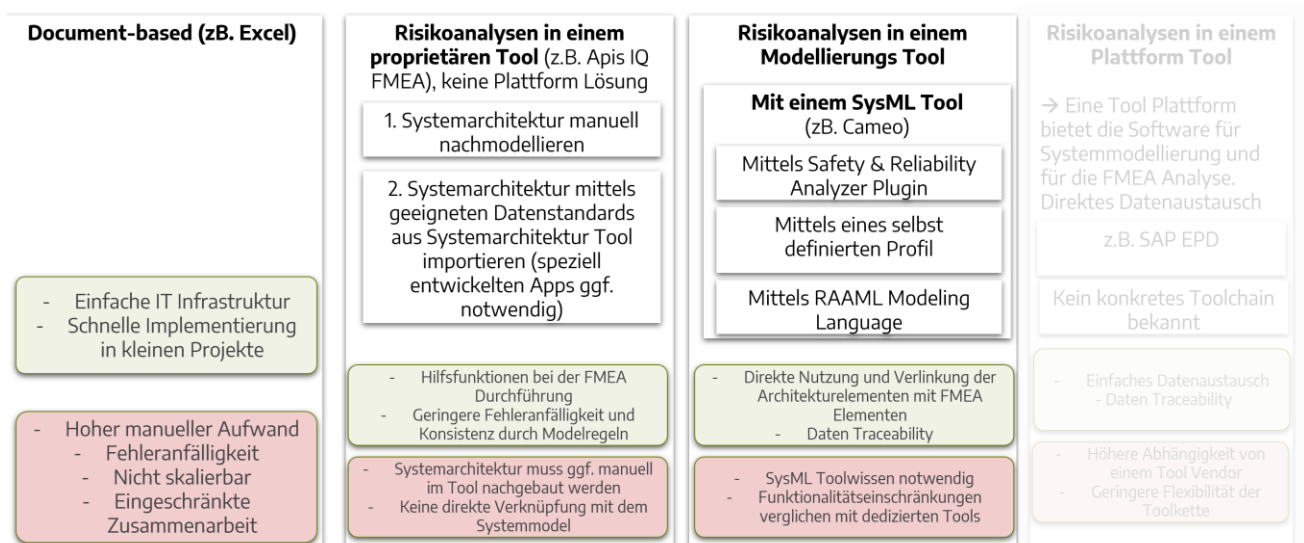


Abbildung 9 Darstellung betrachteter Lösungsansätze für die Durchführung von Risiko- und Sicherheitsanalysen im Kontext des Advanced Systems Engineering

Insbesondere wurden die verschiedenen Lösungen in Hinblick auf definierte Dimensionen bzw. Kriterien untersucht, die für die Umsetzung möglicher Nutzenpotenziale relevant waren.. Hierbei wurden vor allem folgende Nutzenpotenziale näher betrachtet.

Integration der Sicherheitsanalysen in das Systemmodell

Ein wesentlicher Vorteil von MBSE ist die Möglichkeit, strukturelle und funktionale Analysen direkt im Systemmodell durchzuführen, ohne zusätzlichen Modellierungsaufwand. Die für die Systemarchitektur ohnehin erforderlichen Modelle liefern bereits die benötigten Informationen für Sicherheits- und Risikoanalysen. Dadurch entfällt die Notwendigkeit, separate Safety-Modelle manuell zu erstellen, was sowohl Zeit spart als auch die Konsistenz der Analysen verbessert.

Automatisierte Durchführung von FMEA, FTA und HARA

MBSE-gestützte Ansätze bieten die Möglichkeit eine FMEA, FTA oder HARA durch modellbasierte Methoden und Tools zu unterstützen. Diese Analysen sind essenziell für die Zuverlässigkeits- und Sicherheitsbewertung sowie letztendlich Zulassung technischer Systeme. Durch die direkte Verknüpfung der Analysen mit den funktionalen und technischen Systemmodellen können potenzielle Fehlerquellen frühzeitig erkannt und mögliche Risikominderungsstrategien direkt in das Systemdesign integriert werden. Hieraus folgt eine Teilautomatisierung einiger Analyseschritte und/oder die Erledigung notwendiger Vorarbeiten durch strukturierte Nutzung der modellbasierten Systementwicklungsansätze (vgl. exemplarisch Abbildung 10 für eine FMEA).

● **provided by MBSE in early phases (no additional effort)**

● **assisted by MBSE in early phases (reduced effort)**

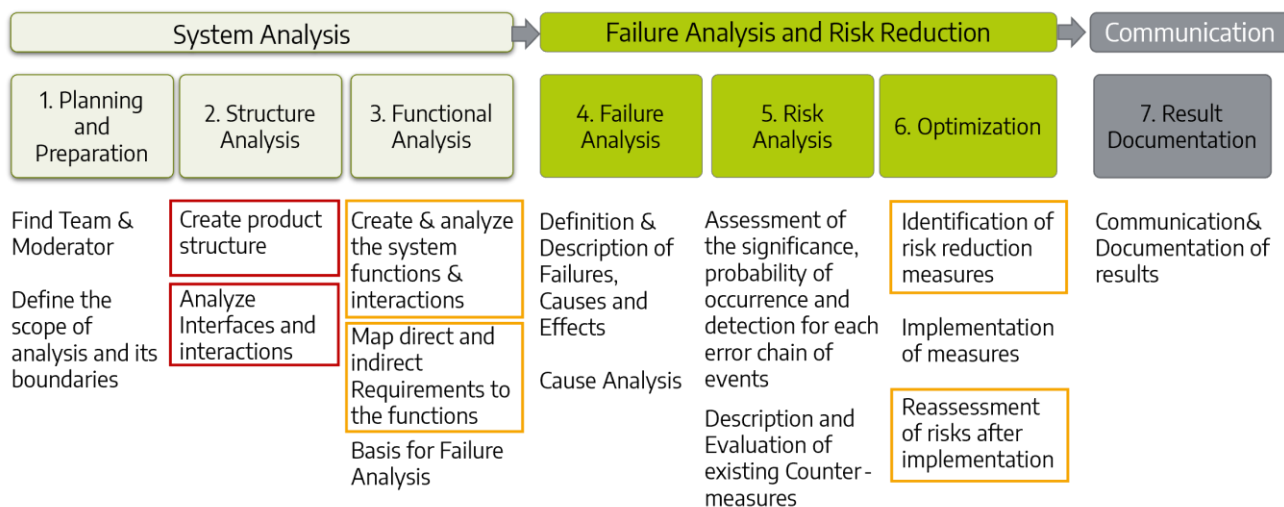


Abbildung 10 Anknüpfungspunkte der MBSE-basierten Entwicklung vom ASE an die exemplarische Durchführung einer FMEA nach Referenzprozessaktivitäten

Automatisierte Generierung von Sicherheitsberichten

Ein großer Vorteil von MBSE im Reliability & Safety Engineering ist die automatische Erstellung von Berichten und Sicherheitsübersichten bzw. Dokumenten für die Sicherheitsargumentation nach branchenüblichen Standards. Dies reduziert den manuellen Aufwand für die Dokumentation, sorgt für konsistente Nachverfolgbarkeit und minimiert Fehler durch menschliches Eingreifen.

Reduzierung des Abstimmungsaufwands und effizientere FMEA/HARA-Meetings

Durch die direkte Einbindung der Sicherheitsanalysen in das MBSE-Modell werden viele traditionelle FMEA/HARA-Meetings überflüssig oder können deutlich effizienter gestaltet werden. Die Ergebnisse aus der Modellierung und Simulation sind für alle Stakeholder transparent nachvollziehbar, wodurch Diskussionen auf Basis fundierter Daten geführt werden können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt von MBSE im Reliability & Safety Engineering ist die Möglichkeit zur Wiederverwendung von Sicherheitsartefakten. Da Fehler- und Risikoanalysen in digitalisierten Modellen gespeichert werden, können sie für ähnliche Produkte oder Varianten wiederverwendet werden. Dies verbessert die Konsistenz über verschiedene Entwicklungsprojekte hinweg und reduziert den Erstellungsaufwand für neue Sicherheitsanalysen erheblich.

Besonders im Kontext von Reliability Engineering bietet MBSE daher die Möglichkeit, Zuverlässigkeitsmodelle und Sicherheitsnachweise systematisch abzuleiten. So lassen sich funktionale und technische Sicherheitskonzepte (TSC) direkt aus dem Systemmodell entwickeln, wodurch eine höhere Standardisierung und Qualitätssicherung erreicht wird. Die Potenzialanalyse für Safety & Risk

Engineering mit MBSE hat gezeigt, dass modellbasierte Ansätze die Effizienz, Transparenz und Wiederverwendbarkeit in der Sicherheitsbewertung im ASE erheblich steigern können. Die direkte Integration von Sicherheitsanalysen in das Systemmodell ermöglicht eine konsistente und automatisierte Nachverfolgbarkeit von Risiken und Fehlerquellen.

Zukünftig sollte erforscht werden, wie KI-gestützte Methoden weiter in die modellbasierte Sicherheitsbewertung integriert werden können, um die Automatisierung noch weiter voranzutreiben. Außerdem ist es sinnvoll, MBSE-gestützte Safety-Konzepte in bestehende regulatorische Rahmenwerke einzubinden, um deren Praxisanwendung in sicherheitskritischen Branchen zu erleichtern.

4.1.2 Generisches Informationsmodell

Die Entwicklung komplexer Systeme erfordert die enge Zusammenarbeit verschiedener Engineering-Disziplinen sowie den Einsatz einer Vielzahl von IT-Tools zur Erstellung und Verwaltung von Entwicklungsartefakten. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, eine nahtlose Rückverfolgbarkeit (engl. Seamless Traceability) zwischen diesen IT-Tools zu gewährleisten, um eine ganzheitliche Systembetrachtung zu ermöglichen und die interdisziplinäre Zusammenarbeit zu verbessern. MBSE setzt in der Praxis eine durchgängige IT-Toolchain voraus, um den Entwicklungsprozess möglichst effizient und nachvollziehbar zu gestalten.

Die Auswahl geeigneter Tools für spezifische MBSE-Anwendungsfälle sowie die Sicherstellung der Traceability von Engineering-Artefakten erfordert jedoch ein tiefgehendes Verständnis der MBSE-Methodik sowie erheblichen zeitlichen und finanziellen Aufwand. Um diesen Aufwand zu reduzieren und gleichzeitig die Qualität bei der Definition von IT-Toolchains zu verbessern, wurde im Rahmen des Forschungsprojekts CyberTech ein generisches Informationsmodell entwickelt. Dieses Modell dient als Vorlage oder Blaupause für die Gestaltung und Integration von IT-Toolchains, ohne sich auf spezifische Softwarelösungen oder unternehmensspezifische Systeme zu beschränken.

Der aktuelle Stand der Technik zeigt, dass es bislang keine ganzheitlichen Modelle oder standardisierten Beschreibungen von IT-Toolchains gibt, die alle wesentlichen Entwicklungsartefakte umfassen. Ziel in CyberTech war es daher, den Aufbau und die exemplarische Anwendung eines generischen Informationsmodells vorzustellen. Als Fallbeispiel dient die Entwicklung einer Toolchain für den MBSE-Anwendungsfall Model-Based Safety Analysis im Bereich Medizingerätetechnik, basierend auf früheren Erkenntnissen aus CyberTech zur funktionalen Dekomposition. Darüber hinaus wurden weitere Anwendungsfälle des Informationsmodells beschrieben und abschließend Implikationen sowie Empfehlungen für zukünftige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet abgeleitet.

Konzept des generischen Informationsmodells

Das generische Informationsmodell im Rahmen von CyberTech ist in sieben zentrale Domänen unterteilt: *Configuration Management*, *System Domain*, *Discipline-Specific Domain*, *Safety Domain*, *Simulation*, *Change Management* (gemeint ist hier Engineering Change Management bzw. technisches Änderungsmanagement) sowie *Verification & Validation Domain*. Das Modell fokussiert sich auf übergeordnete, toolneutrale Artefakte, um eine branchenunabhängige und skalierbare Grundlage für IT-Toolchains zu schaffen. Spezifischere Artefakte können individuell ergänzt werden, sind jedoch nicht Bestandteil der generischen Darstellung, sondern Teil möglicher projektspezifischer Anpassungen.

Die einzelnen Entwicklungsartefakte sind durch Kompositions-, Aggregations- oder Assoziationsbeziehungen miteinander verknüpft. Assoziationsbeziehungen enthalten eine Beziehungsbezeichnung sowie eine Richtungsangabe und definierte Multiplizitäten. Beispielsweise ist das *Technical Element* über eine *realizes-Beziehung* mit dem *Logical Element* verbunden. Die Multiplizität von *Logical Element* zu *Technical Element* beträgt $1..n$ zu $0..1$, was bedeutet, dass ein logisches Element von maximal einem technischen Element realisiert werden kann, während ein technisches Element mindestens ein logisches Element repräsentieren muss.

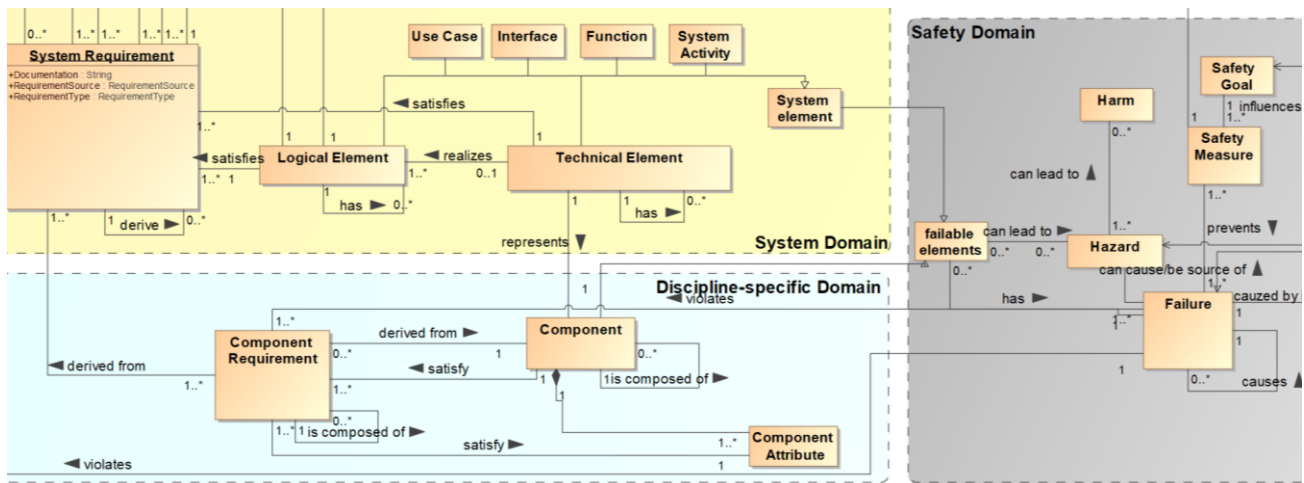


Abbildung 11 Darstellung der Verlinkungen zwischen System Domain, Safety Domain und Discipline-Specific Domain des generischen Informationsmodells

Abbildung 11 zeigt exemplarisch die Verknüpfungen zwischen der *System Domain*, *Discipline-Specific Domain* und *Safety Domain*, die insbesondere für Model-Based Safety Analysis von Relevanz sind. Domänenübergreifende Beziehungen ermöglichen eine ganzheitliche Nachvollziehbarkeit zwischen Anforderungen, Komponenten und Sicherheitsaspekten. So besteht beispielsweise zwischen *Component Requirement* und *System Requirement* eine *derived from*-Beziehung, während *Component Requirement* über eine *satisfy*-Verbindung mit dem zentralen Element *Component* in der *Discipline-Specific Domain* verknüpft ist. In der *Safety Domain* kann das Artefakt *Failure* mit mehreren *Component Requirements* assoziiert sein, während *Failable Elements* aus der *Safety Domain* auf Artefakte der *System Domain* wie *Use Case*, *System Activity*, *Function*, *Logical Element*, *Interface* oder *Technical Element* verweisen kann. *Components* repräsentieren Systemartefakte und sind mit dem *Technical Element* über eine *represents*-Beziehung verbunden. Eine *Component* kann beispielsweise ein CAD-Bauteil, eine Software-Klasse, eine Simulationskomponente oder ein elektrisches Kabel sein. Die Attribute einer *Component* variieren je nach Domäne – bei einem CAD-Bauteil sind es einzelne Flächen, bei einer Software-Klasse einzelne Code-Begriffe. Komponenten können hierarchisch aus weiteren Sub-Komponenten bestehen und reale Bauteile repräsentieren, denen eine Sachnummer zugewiesen werden kann. Das generische Informationsmodell schafft eine strukturierte Grundlage für die Entwicklung, indem es domänenübergreifende Traceability ermöglicht.

Anwendung und Anpassung des generischen Informationsmodells

Anhand eines Fallbeispiels aus der Medizintechnik, einer FMEA für ein Beatmungsgerät, wurde ein erstes Tailoring des generischen Informationsmodells vorgenommen. Das Fallbeispiel greift den MBSE-Anwendungsfall Model-Based Safety Analysis auf und nutzt das generische Informationsmodell, um eine IT-Toolchain sowie die Verlinkung notwendiger Artefakte (Datenobjekte) für eine FMEA darzustellen. Nachfolgend wird eine Darstellung in die Verwendung bzw. das Tailoring des generischen Informationsmodells dargestellt. Aus dem generischen Informationsmodell muss für den gewählten MBSE-Anwendungsfall ein spezifisches Informationsmodell für die Definition und Umsetzung der IT-Toolchain entwickelt werden. Das generische Informationsmodell unterstützt die Definition des spezifischen Modells durch die Bereitstellung der generischen Elemente, die ein oder mehrere äquivalente Elemente in der spezifischen Toolchain besitzen können. Somit wird einerseits der Aufwand für die Konzeption und Entwicklung der FMEA-Toolchain reduziert und andererseits sichergestellt, dass die wichtigsten Artefakte für die Durchgängigkeit zwischen den Tools berücksichtigt werden. Ein vollständiges Verständnis, welche Artefakte miteinander verlinkt sein sollen und in welchen Tools sich diese befinden, hilft Fehler wie das Ausrollen von Tools ohne nahtlosen Datenaustausch oder eine falsche Aufwandabschätzung für die Toolchain Umsetzung vorzubeugen.

Das generische und daraus abgeleitete spezifische Informationsmodell kann außerdem als Grundlage für die systematische Erhebung von Toolanforderungen und zur Unterstützung einer Toolauswahl genutzt werden, falls diese noch nicht erfolgt ist (siehe Abbildung 12). Für die Model-Based Safety Analysis Toolchain, wurden im Forschungsprojekt einige Tools bereits vorgegeben:

- Systemmodellierung (System Domain) – Cameo Systems Modeler
- Requirements Engineering (System Domain) – Siemens Polarion Requirements
- FMEA-Durchführung (Safety Domain) – Cameo Systems Modeler
- CAD Tool (Discipline-Specific Domain: Mechanic) – Siemens NX

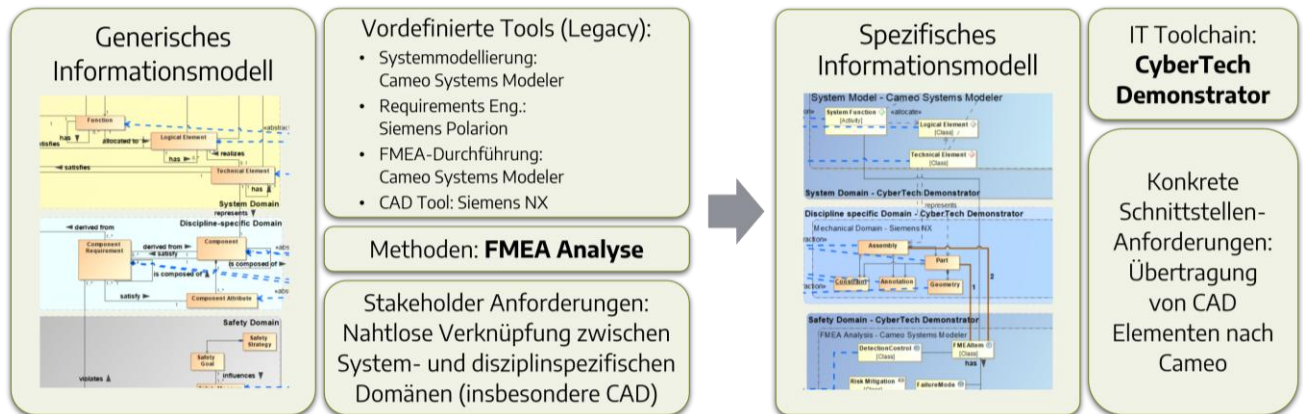


Abbildung 12 Darstellung der Ableitung eines spezifischen Informationsmodells aus dem generischen Informationsmodell als Blaupause

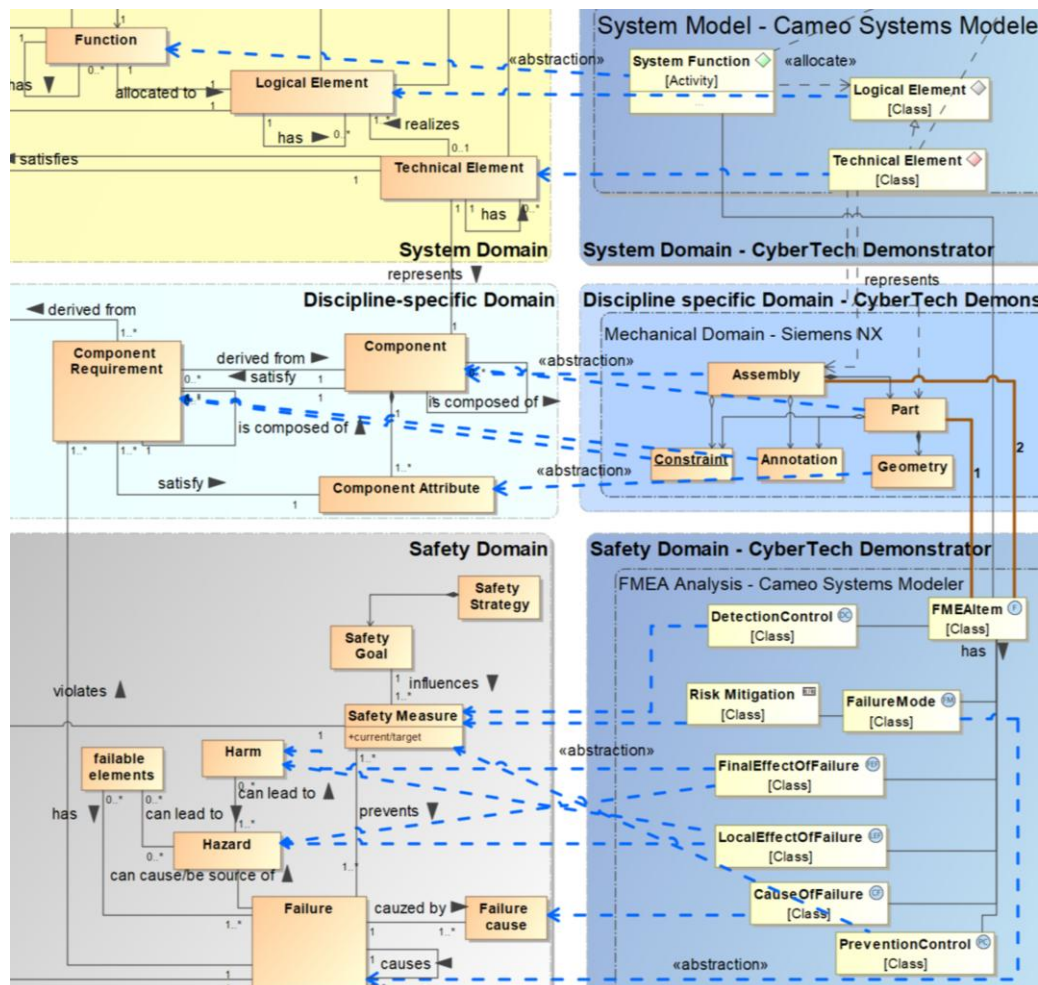


Abbildung 13 Zuordnung der spezifischen Engineering Artefakte für den Model-Based Safety Analysis Anwendungsfall (rechts) zu den Artefakten aus dem generischen Informationsmodell (links)

Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Tools können für die generischen Elemente spezifische Elemente und deren Verknüpfungen identifiziert werden. Dies erfolgt durch Analyse der Tools in der Anwendung, Analyse der Entwicklungsmethode oder Befragung des Toolherstellers. Abbildung 13 zeigt rechts (dunkler Hintergrund) einen Ausschnitt des spezifischen Informationsmodells. Die durchgestrichenen Verbindungen (auch durch *<<abstraction>>* gekennzeichnet) zeigen die dazugehörigen abstrakten Elemente des generischen Informationsmodells auf der linken Seite. Beispielsweise wird das generische *Component*-Artefakt im Tool für die Mechanik-Domäne für das Beatmungsgerät durch eine CAD Assembly oder ein Part repräsentiert. Im dargestellten Auszug des spezifischen Informationsmodells sind wichtige Verknüpfungen zwischen Artefakten in unterschiedlichen Tools, beispielsweise zwischen *FMEA Item* in Cameo und *Part* bzw. *Assembly* in Siemens NX mit Zahlen 1 und 2 gekennzeichnet. Diese Verknüpfungen werden von der Entwicklungsmethodik vorausgesetzt.

Als Ergebnis haben IT-Verantwortliche einen klaren Überblick über die beteiligten Tools und Entwicklungsartefakte. Für die toolübergreifende Verknüpfung der Artefakte aus dem Cameo Systems Modeler und Siemens NX kann dann eine direkte Toolschnittstelle implementiert werden. Das spezifische Informationsmodell dient in dem Fall als Unterstützung, zur Definition konkreter Workflows sowie zur Softwarespezifikation bzw. als Grundlage für die Schnittstellenentwicklung. Mit einer direkten Schnittstelle oder einer alternativen IT-technischen Umsetzung für die Durchgängigkeit der Artefakte können die *Components* und *Assemblies* aus Siemens NX direkt mit den FMEA-Artefakten wie *FMEA Failure* in Cameo verknüpft werden. Zusätzlich können aus Siemens NX komponentenspezifische Anforderungen (in NX Constraint oder Annotation) wie Werte für Oberflächenrauheit oder Durchmesser von Bohrungen in Cameo für die FMEA-Analyse bereitgestellt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass keine Informationen zur Fehlersuche vergessen werden. Zudem kann nach einer Änderung der CAD-Elemente die Auswirkung auf die FMEA direkt sichtbar dargestellt werden (Impact Analysis im MBSE).

Die Auswahl und Entwicklung der technischen Umsetzung der in den Informationsmodellen dargestellten Anforderungen für einen spezifischen MBSE-Anwendungsfall bildet somit die Grundlage für ein Seamless Traceability Konzept für die Entwicklungsartefakte. Seamless Traceability wird in diesem Kontext als lückenlose Verknüpfung der Artefakte entlang der gesamten Toolchain durch die Tools jeder Domäne verstanden, wobei die betrachteten Artefakte direkt durch dynamische Verlinkung miteinander verknüpft sind. Ein weiterer Anwendungsfall für das spezifische und generische Informationsmodell ist die Nutzung der definierten Artefakte als In- und Output für Entwicklungsmethoden und -prozesse sowie als Diskussionsgrundlage, welche Artefakte in welcher Form als Entwicklungsergebnis in dem jeweiligen Unternehmen schon erzeugt werden oder zukünftig erzeugt werden sollen.

4.1.3 Evaluationsmatrix für Traceability-Plattformen

Eine Durchgängigkeit zwischen Anforderungen, Modellen, Simulationen und Produktdaten ermöglicht eine konsistente, fehlerfreie und nachvollziehbare Entwicklung im ASE. Im Rahmen von CyberTech wurde daher eine Evaluationsmatrix für Traceability-Plattformen entwickelt, um verschiedene IT-Lösungen systematisch in Hinblick auf deren Eignung für spezifische MBSE-Anwendungsfälle zu bewerten. Die Matrix bietet somit eine strukturierte Grundlage zur Auswahl geeigneter Traceability-Plattformen, indem sie relevante Kriterien für Technologie, Funktionalität, Interoperabilität und Benutzerfreundlichkeit definiert. Um die Praxistauglichkeit zu überprüfen, wurde sie an Beispielen angewandt: Die Plattform XSPHERE diente dabei als Referenzsystem, um exemplarisch mögliche Bewertungsfaktoren für Traceability-Lösungen zu analysieren, wobei hierfür ein Demonstrator aufgesetzt wurde.

Vorgehensweise zur Erarbeitung der Evaluationsmatrix

Die Entwicklung der Evaluationsmatrix erfolgte in einem strukturierten, mehrstufigen Prozess, der sich an methodischen Best Practices orientierte. Dabei wurden sowohl konzeptionelle Aspekte als auch eine praktische Validierung durch Demonstratoren berücksichtigt und an die Arbeiten in Bezug zum Informationsmodell nach Abschnitt 4.1.2 angeknüpft bzw. diese integriert.

1. Definition des Scopes und der betrachteten Entwicklungsartefakte

Zu Beginn wurde der Umfang der Produktentwicklung im Kontext ASE festgelegt, indem definiert wurde, welche Entwicklungsartefakte für eine durchgängige Traceability betrachtet werden sollten. Dies umfasste unter anderem:

- Anforderungen (Requirements) und deren Verknüpfung zu System- und Komponentenmodellen
- Systemmodelle im MBSE und deren Beziehungen zu CAD- und Simulationsmodellen
- Arbeitsergebnisse der Sicherheits- und Risikoanalysen sowie Simulationsergebnisse

2. Festlegung von Anwendungsfällen für die Durchgängigkeit

Im nächsten Schritt wurden konkrete Use Cases (Anwendungsfälle) definiert, die eine durchgängige Traceability zwingend erfordern. Wichtige Beispiele waren:

- Impact-Analyse: Identifikation von Auswirkungen bei Änderungen an Anforderungen bzw. technischen Spezifikationen oder Bauteilen/Komponenten eines AS.
- Nachverfolgbarkeit von Sicherheitsanforderungen: Sicherstellung der Konsistenz zwischen Risikoanalysen und realisierten Sicherheitsmaßnahmen.
- Modellbasierte Verifikation & Validierung: Überprüfung, ob alle Anforderungen und Systemmodelle mit Test- und Simulationsdaten abgedeckt sind.

3. Entwicklung des Konzepts und Modellierung der Artefakte

Auf Basis der definierten Use Cases wurde das Traceability-Konzept entwickelt. Ein zentraler Bestandteil des Vorgehens war die detaillierte Analyse der relevanten Entwicklungsprozesse, um kritische Schnittstellen und Übergänge zwischen verschiedenen Domänen zu identifizieren. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden die Entwicklungsartefakte und ihre Abhängigkeiten modelliert, um eine Nachverfolgbarkeit über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg zu ermöglichen. Hierzu war die Erstellung des generischen Informationsmodells nötig, das als Blaupause für die Integration von Traceability-Funktionen in bestehende IT-Toolchains diente. Besondere Bedeutung hatte dabei die Informationsmodellierung, da sie die strukturelle Abbildung der Beziehungen zwischen verschiedenen Entwicklungsartefakten ermöglichte. Dadurch konnten bestehende Lücken in der Nachverfolgbarkeit identifiziert und gezielt Maßnahmen zur Verbesserung der Traceability abgeleitet werden.

4. Analyse bestehender Traceability-Plattformen und Aufbau Demonstratoren

Zur praktischen Umsetzung wurden existierende Traceability-Plattformen untersucht und anhand der entwickelten Kriterien bewertet. Dabei wurden verschiedene Softwarelösungen analysiert, darunter:

- Integrierte Funktionalitäten (Plugins) von Editoren für die Systemmodellierung im MBSE
- Spezialisierte Traceability-Tools, die über Schnittstellen verschiedene Entwicklungsumgebungen/Werkzeuge verbinden
- Kollaborative Plattformen zur Visualisierung und Verwaltung von Abhängigkeiten zwischen Entwicklungsartefakten

Unter den letzten beiden Punkten wurden vor allem die Lösungen kommerzielle Werkzeuge wie XSPHERE der Firma XPLM, Linksphere von CONWEAVER, Smartfacts von MID und weitere Werkzeuge untersucht. Um die Praxistauglichkeit der entwickelten Konzepte zu validieren, wurde zudem ein Demonstrator als Proof-of-Concept aufgebaut. Dieser Demonstrator simulierte eine IT-Toolchain für die modellbasierte Produktentwicklung und zeigte, wie durchgängige Traceability mit Hilfe bestehender Softwarelösungen realisiert werden kann.

5. Bewertung und Evaluation bestehender Lösungen

Im abschließenden Schritt wurde die Effektivität der untersuchten Traceability-Plattformen anhand der entwickelten Evaluationsmatrix bewertet. Wichtige Kriterien bzw. Gruppen von Kriterien waren:

- Technische Interoperabilität: Inwieweit lassen sich verschiedene IT-Tools (z.B. MBSE, CAD, PLM) nahtlos integrieren?
- Benutzerfreundlichkeit und Anpassbarkeit: Wie intuitiv ist die Bedienung und können Unternehmen die Plattform an ihre spezifischen Prozesse anpassen?
- Skalierbarkeit und Performance: Ist die Lösung für den Einsatz in großen, interdisziplinären Entwicklungsprojekten geeignet?
- Wirtschaftlichkeit: Wie aufwendig ist die Einführung und Anpassung der Lösung sowie der notwendige Schulungsbedarf, um Anwendungsfälle im ASE bzgl. Traceability zu unterstützen?

Zur Validierung der Matrix wurden bestehende Lösungen mit diesen Kriterien analysiert. Dabei zeigte sich, dass unterschiedliche Plattformen spezifische Stärken und Schwächen aufweisen, sodass eine anwendungsfallsspezifische Bewertung essenziell ist. Einen Auszug der Matrix zeigt Abbildung 14.

Administration & Interoperability					
Administration & Interoperability	Management of interfaces	The connection & administration of various key authoring systems is possible (future approved)	0 - The connection to different authoring systems is possible only via direct plugins. Plugins to further tools need to be developed by the vendor. 1 - The connection to different authoring systems is possible only via plugins - own/open source development possible 2 - Connection is possible via plugins and an integration interface (web solution) 3 - Connection is possible via plugins and an integration interface (web solution). OSLC and maybe other open source standards are integrated!	COULD	1
Administration & Interoperability	Control of link / objects type	The integration platform must support a restriction of the link creation between specific object types by the administrator	0 - No customizing of link types possible 1 - Predefined static customization / restriction of links is available 2 - Restriction based on object types possible possible 3 - Advanced / rule based restrictions possible (e.g. based on attributes)	COULD	1
Administration & Interoperability	Roles & Rights (permissions)	The intergation platform offers an authorization concept (in the system/organizational) based on roles & rights. Rights management in the authoring tool versus in the integration platform (same/different)	0 - Not available 1 - 2 - 3 - Available	COULD	1
Data & Synchronisation					
Data & Synchronisation	Synchronisation /Data mapping	The mapping/synchronization to the source tools is established (attribute mapping, data synchronization). Changes are synchronized & the traceability (e.g. new element) is assured	0 - No mapping/synchronization 1 - Mapping/synchronization is established but it need to be triggered manually 2 - Mapping/synchronization of changes is handled automatically (changes to existing attributes will be done automatically). Creation/Deletion need to be synced manually 3 - Fully automated mapping/synchronization	COULD	1

Abbildung 14 Auszug der Evaluationsmatrix zur Bewertung verschiedener Traceability-Lösungen für ASE

4.1.4 Technisches Konzept des Digital Data Package

In CyberTech wurde das Konzept des Digital Data Package als eine zentrale Lösung für den Digital Thread entlang der Produktentwicklung weiterentwickelt und validiert. Dieser Ansatz ermöglicht die strukturierte Ablage, Verwaltung und Verknüpfung von Entwicklungsartefakten in einem standardisierten Containerformat. Ziel ist es, Daten aus verschiedenen IT-Tools in einer offenen und interoperablen Umgebung zusammenzuführen, um die Traceability, Konsistenz und Kollaboration innerhalb und zwischen Unternehmen zu verbessern. Ein wesentlicher Vorteil des Ansatzes ist seine Offenheit und Standardisierung, wodurch sich Abhängigkeiten von proprietären Lösungen reduzieren lassen. Innerhalb des Digital Data Package Managers, der als IT-Werkzeug zur Verwaltung der Pakete dient, können Entwicklungsartefakte aus unterschiedlichen Disziplinen (z.B. Mechanik, Elektrik, Software) integriert und verknüpft werden. Die in Neutralformaten gespeicherten Artefakte ermöglichen eine Nachvollziehbarkeit über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts hinweg (Abbildung 15) [42].

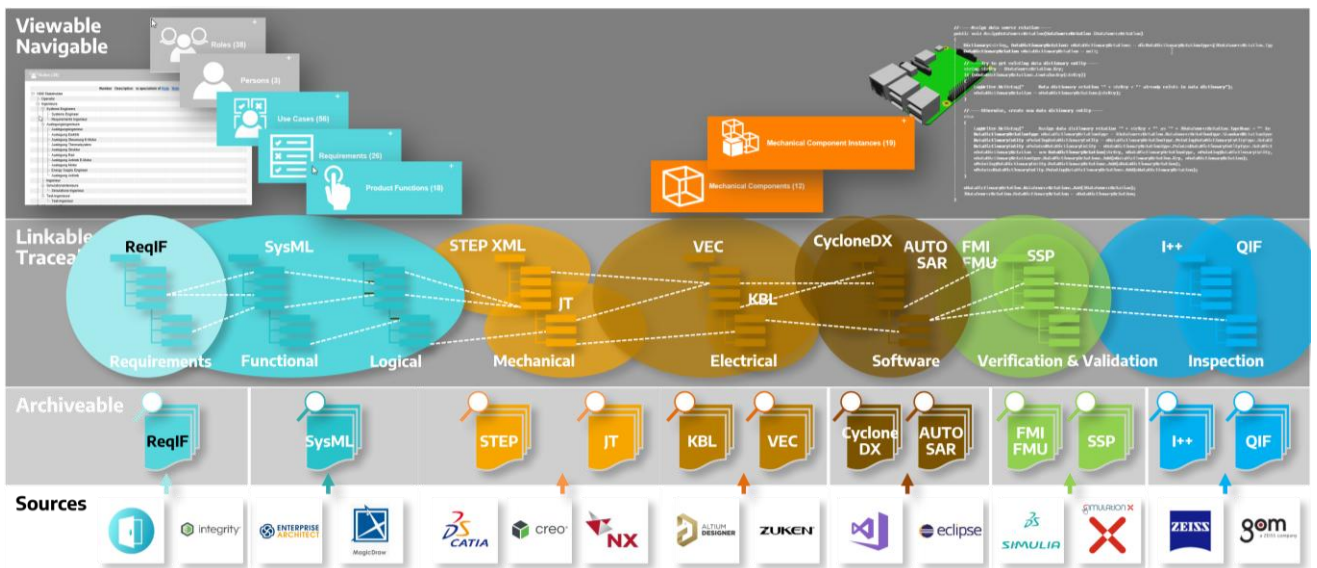


Abbildung 15 Auszug aus der Digital Data Package Empfehlung [42] zur Verknüpfung von Entwicklungsartefakten

Der Digital Data Package Ansatz wurde als Lösung zur Umsetzung des Digital Threads evaluiert. Alternative Lösungen wurden ebenfalls verfolgt bzw. evaluiert und prototypisch umgesetzt (siehe Abschnitt 4.1.3). Verschiedene Softwareplattformen wurden auf ihre Eignung zur technischen Implementierung eines Digital Thread geprüft, wobei sich das Digital Data Package in Kombination mit dem Digital Data Package Manager als besonders vielversprechend erwies. Die flexible Integration von Entwicklungsdaten aus verschiedenen Systemen ermöglicht eine effiziente Verwaltung von Produktinformationen, ohne bestehende Prozesse grundlegend verändern zu müssen oder größere Eingriffe in die bestehenden IT-Systeme vorzunehmen.

Zur weiteren Optimierung wurde im Projekt der Digital Data Package Manager weiterentwickelt, um eine verbesserte Sichtung, Analyse und Verknüpfung der enthaltenen Entwicklungsartefakte zu ermöglichen. Diese Weiterentwicklung eröffnet neue Potenziale für automatisierte Validierungs- und Änderungsprozesse, indem Abhängigkeiten zwischen Artefakten sichtbar gemacht und Änderungswirkungen frühzeitig erkannt werden. Eine exemplarische Ansicht aus dem Digital Data Package Manager ist in Abbildung 16 dargestellt. Insgesamt stellt dies eine skalierbare und anpassbare Lösung für Unternehmen dar, die eine durchgängige Digitalisierung und Integration ihrer Entwicklungsdaten anstreben. Hierbei sind auch Möglichkeiten gegeben, um existierende Informationsmodelle oder Ontologien zur Verknüpfung der Entwicklungsartefakte im Digital Data Package Manager zu ermöglichen. Die im Rahmen von CyberTech erarbeiteten Konzepte und Demonstratoren zeigen, dass dieser Ansatz einen entscheidenden Beitrag zur Umsetzung von MBSE und ASE leisten kann. Aufgrund dessen wurden auch Bemühungen um die Standardisierung des Digital Data Package aktiv unterstützt.

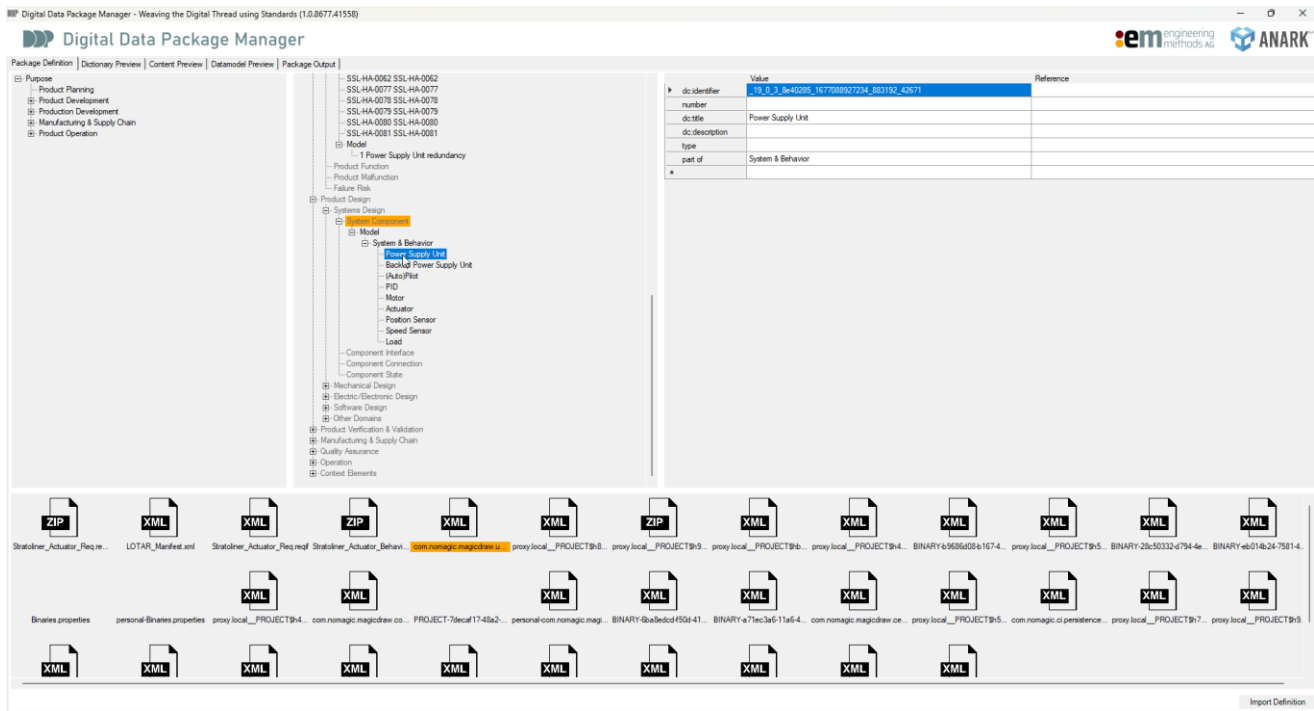


Abbildung 16 Darstellung einer Ansicht im Digital Data Package Manager für ein Anwendungsbeispiel

4.2 Ergebnisse des Instituts für Arbeitswissenschaft (IAD)

4.2.1 ASE-spezifisches Kompetenzmodell

Die aus verschiedenen Quellen identifizierten Kompetenzanforderungen wurden auf drei Ebenen zusammengefasst und gebündelt: Basiskompetenzen, Kompetenzen für agiles Arbeiten sowie ASE-spezifische Kompetenzen. Das resultierende generische Kompetenzmodell für System- und Produktentwickler bildet das Kernelement eines ASE-gerichteten Kompetenzmanagements, da dort die für ASE als relevant erachteten Kompetenzen gesammelt und beschrieben werden. Diese Systematisierung der Kompetenzen stellt die Ausgangslage für die späteren Entwicklungsmaßnahmen dar. Abbildung 17 bildet die identifizierten Kompetenzen in dem generischen Kompetenzmodell ab. Auf eine ausführliche Erläuterung der Kompetenzdimensionen und 22 zugehörigen Kompetenzfacetten wird aus Platzgründen verzichtet. Für nähere Informationen können die Autor:innen kontaktiert werden.

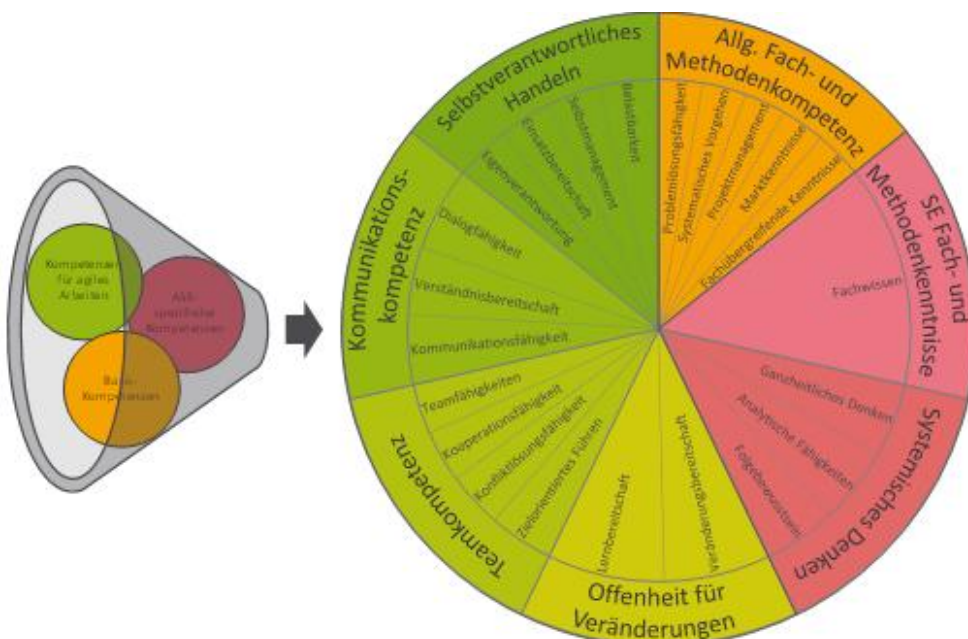


Abbildung 17 ASE-spezifisches Kompetenzmodell im Rahmen von CyberTech

4.2.2 Förderung agiler Lernkultur auf Unternehmens- und auf Mitarbeiterebene

Um relevante Ansatzpunkte für die Praxis zu finden, wurden die sieben Aspekte des DLOQ ausgewertet und konkrete Maßnahmen auf organisationaler Ebene entwickelt. Abbildung 18 zeigt eine Zusammenstellung möglicher Maßnahmen zur Förderung einer agilen Lernkultur.

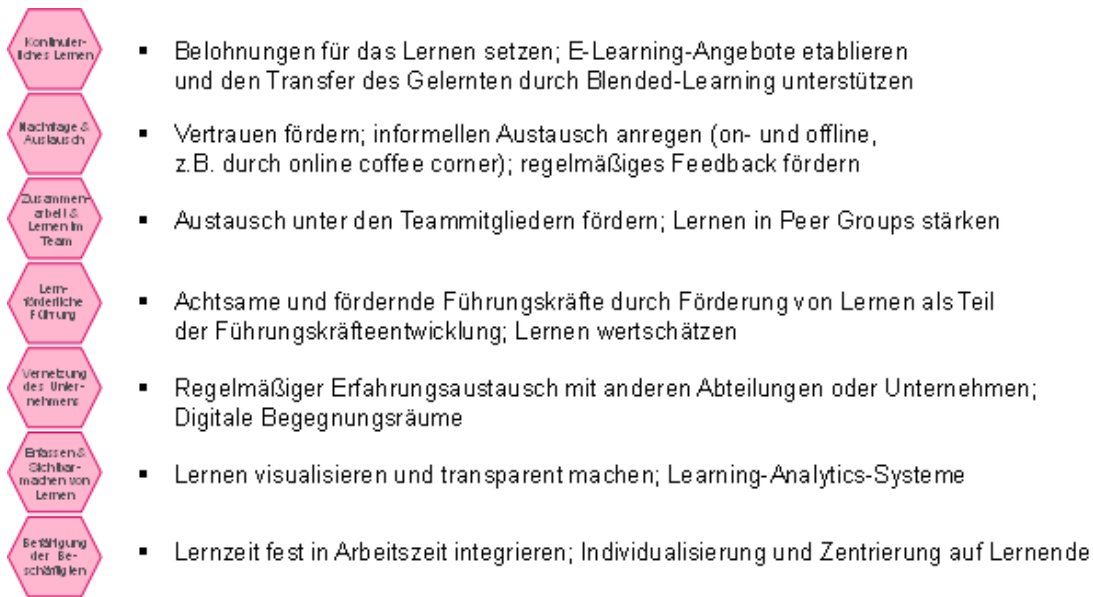


Abbildung 18 Maßnahmen zur Förderung einer agilen Lernkultur

Weitere Maßnahmen wurden auf Basis des agilen Lernkonzepts nach Gehlen-Baum und Illi [21] hergeleitet, um auf individueller Ebene Agilität zu stärken. Daher wurden im Projekt CyberTech folgende Empfehlungen für die Kompetenzentwicklung ausgesprochen:

- Individualisierung und Anpassung des Lernens an das Leistungslevel und die Bedürfnisse der Mitarbeitenden.
- Lernbegleitung durch einen agilen Lerncoach, der z.B. in der Planungsphase hilft, die Wissenssicherung und den Transfer durch kollaborative Lernformate unterstützt oder Knowledge Sharing und Networking betreibt.
- Learning on Demand, damit Mitarbeitende nach Bedarf ihre Lernziele setzen sowie Inhalte, Formate, Zeit und Ort frei wählen können.
- Praxisintegration des Gelernten am Arbeitsplatz durch kollaborative Formate (z.B. Tandem Learning, Communities of Practice etc.).
- Organisation in Lernsprints, um in Arbeitstakten strukturiert und häppchenweise zu lernen. Dabei werden am Ende jedes Lernsprints die Ergebnisse reflektiert und die Lernziele und -strategien angepasst.

4.2.3 Agile Toolbox

Die eigenentwickelte agile Toolbox beinhaltet Methodenkarten, die nützliche Instruktionen für Projektgruppen zur Stärkung agiler Kompetenzen bereitstellten. In Anlehnung an die identifizierten agilen Kompetenzen aus dem ASE-spezifischen Kompetenzmodell und basierend auf Experteneinschätzungen wurden insgesamt 26 Methoden ausgewählt und zusammengestellt. Die 26 Methoden waren inhaltlich in sechs Anwendungsbereiche gruppiert: (1) Gesprächstechniken, (2) Kooperation, (3) Planen & Strukturieren, (4) Problemlösen, (5) Entscheiden, (6) Kreativität, (7) Reflexion. Die einzelnen Methoden waren dabei auf je einer Karte als Anleitung schriftlich festgehalten worden und beinhalteten hilfreiche Informationen zu notwendigen Tools, Zeitdauer und die einzubeziehenden Personen. Die 26 Methoden standen als Methodenkarten sowohl physisch als auch digital zur Verfügung und bildeten gemeinsam mit einem voll ausgestatteten Moderationskoffer die agile Toolbox.

4.2.4 Technisch-inhaltlicher Aufbau des Lernlabors

Ausgehend von den Erkenntnissen zu den Kompetenzanforderungen und den Lernzielen, die aus dem Constructive Alignment abgeleitet wurden, wurde ein Raum mit Arbeitsplätzen eingerichtet, der ausreichend groß, erreichbar und zentral gelegen war. Die mobilen Arbeitsplätze waren mit zwölf hochmodernen und leistungsstarken Notebooks ausgestattet, die sowohl Zugang zu erforderlicher Software für die Organisation der Arbeit und die Recherche als auch für die inhaltliche technische Bearbeitung von Aufgaben bieten (wie Software für die Modellierungssprache SysML). Ein digitales Whiteboard mit Projektionsfunktionen wurde bereitgestellt, um Visualisierungen, Präsentationen und Gruppenarbeiten zu unterstützen. Ein mobiler Multi-Touch-Tisch stand zur Verfügung, um Ergebnisse und Inhalte in Kolloquien vor Interessenten aus Industrie und Forschung zu präsentieren. Das Profil des ASE-Lernlabors wurde durch zwei Demonstratoren für mechatronische Systeme, die das Arbeiten an einem cyber-physischen System ermöglichen, abgerundet. Abbildung 19 zeigt das ASE-Lernlab.



Abbildung 19 Bildaufnahme des ASE-Lernlabors

4.2.5 Konzepte für Lehr- und Lernveranstaltungen

Um die Kompetenzanforderungen von ASE besser zu erfüllen, wurde von zwei Fachgebieten der TU Darmstadt ein interdisziplinäres Tutorium entwickelt. Der Fokus lag sowohl auf technischen Fähigkeiten (Fach- und Methodenkompetenz) als auch auf Kompetenzen für agiles Arbeiten. Dabei wurden verschiedene Kompetenzbereiche integriert, um eine methodisch-technische Kernaufgabe (die Erstellung einer mechatronischen Projektaufgabe) mit agilen Projektmethoden zu bearbeiten. Das Konzept für das Tutorium ist in Abbildung 20 als Ablaufstruktur dargestellt.

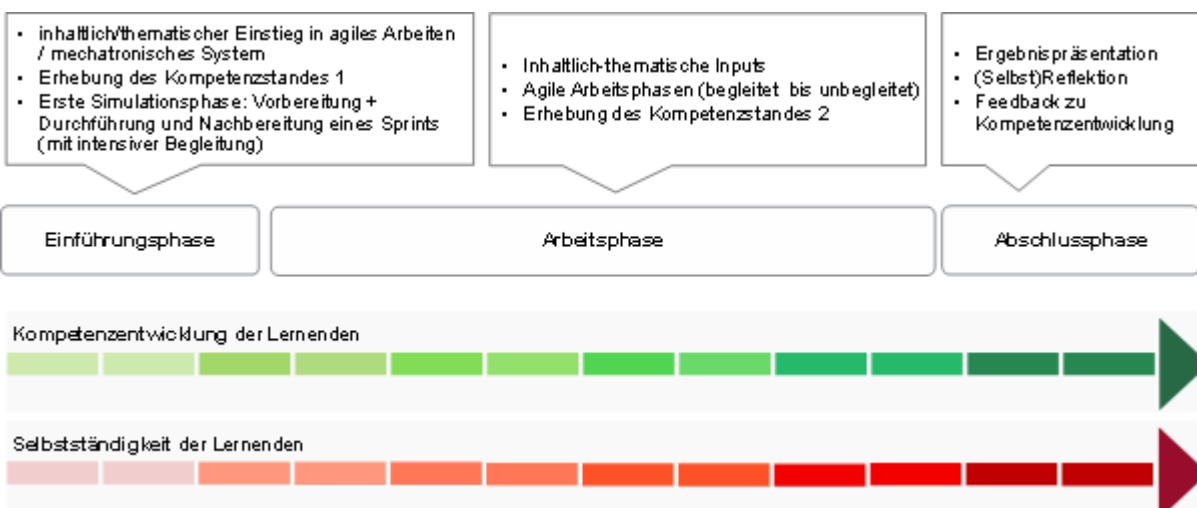


Abbildung 20 Ablaufstruktur des Tutoriums

In der Einführungsphase erwarben die Studierenden das erforderliche Wissen über agiles Arbeiten basierend auf dem Scrum-Framework. In der ersten Phase der Simulation wurden bestimmte Aspekte des agilen Arbeitens (z.B. Retrospektive und Planung) intensiv begleitet und trainiert. In der nachfolgenden Phase des Projekts wurde die mechatronische Aufgabe mit Hilfe des Scrum-Rahmenwerks von der Projektgruppe bearbeitet. In der Schlussphase wurden die Ergebnisse des Projekts vorgestellt und diskutiert. Das Tutorium folgte der Logik der Lernziele und verschob sich allmählich von den durch Dozenten geleiteten Aktivitäten hin zu individuellen und selbständigen Aktivitäten. Das Konzept des Tutoriums wurde im Verlauf des Projektes für interdisziplinäre studentische Projektarbeiten (Advanced Design Project) adaptiert und mit Studierenden durchgeführt.

4.3 Ergebnisse des Fachgebiets Product Life Cycle Management (PLCM)

Mit der zunehmenden Relevanz von Industrie 4.0 und den damit verbundenen datenbasierten Prozessen gewinnt eine effiziente und strukturierte Datenerfassung an Bedeutung. Derzeit werden Sensoren in der Großindustrie eingesetzt, um Automatisierungsprozesse zu ermöglichen und die Produktqualität zu überprüfen. Die gesammelten Daten werden direkt in der Anlage verarbeitet, um Prozesse zu steuern. Abgesehen davon werden Produktions- und Nutzungsdaten in den meisten Fällen nicht oder nicht explizit erfasst. Die Industrie der Zukunft wird jedoch nicht mehr nur auf dem Verkauf von Produkten basieren. Es werden neue, datenbasierte Geschäftsmodelle und Dienstleistungen entstehen, und die Produktion wird auf der Grundlage von Daten optimiert werden. Einige Beispiele hierfür sind Zustandsüberwachung, vorausschauende Wartung oder Fernzugriff. Diese und andere Anwendungen können industrielle Produktionsprozesse hinsichtlich der drei wichtigsten Faktoren Zeit, Kosten und Qualität erheblich optimieren. Ein weiterer wichtiger Bereich der Zukunft ist das Engineering selbst. Der Bereich der Produktentwicklung wandelt sich hin zum ASE [43]. Inwiefern Unternehmen auf diesen Wandel vorbereitet sind, kann im entwickelten ASE-Reifegradmodell eingeordnet werden.

4.3.1 Reifegradmodell

Das Reifegradmodell umfasst acht Themenfelder auf der vertikalen Achse und jeweils vier Stufen auf der horizontalen Achse (Abbildung 21). Die Themenfelder umfassen die Bereiche, die für die Entwicklung von AS bedeutend sind. Das umfasst die bestehende IT-Infrastruktur im Unternehmen, die Sensorik, vorhandene Information- und Kommunikationsschnittstellen, klar definierte Anforderungen, die beschriebene Systemarchitektur und den Dreiklang aus Modellierung, Simulation und Validierung. Für das Zusammenspiel physischer und virtueller Komponenten ist die verbaute Sensorik von Bedeutung. Das Themenfeld Sensorik ist mit dem Sensor-Layout-Plan bedacht und wird separat beschrieben.



Abbildung 21 Reifegradmodell digitale für Systemmodelle

Die vier Bewertungsstufen der einzelnen Themenfelder umfassen das Spektrum von der niedrigsten Stufe („derzeit keine Berücksichtigung“) bis zur höchsten Stufe („Berücksichtigung in einem ganzheitlichen Systemmodell“). Unternehmen sind damit in der Lage, sich selbst einzuschätzen und die Ist-Situation zu erfassen. Darauf aufbauend können daraus ein Ziel und Handlungen abgeleitet werden.

Mit dem Ansatz des Sensor-Layout-Plans (SLP) nach Steinbach et al [44], auch Sensorbebauungsplan genannt, werden die Mitarbeiter:innen bei der oben genannten gezielten und nachhaltigen Daten- und Sensorplanung unterstützt. Basis des SLP ist ein Leitfaden, der ein effizientes Vorgehen bei der Sensorplanung vorschlägt und begleitet. Der SLP-Leitfaden basiert auf einem strukturierten Ansatz (vgl. Abbildung 22). Er beginnt mit einer ganzheitlichen Analyse des Datenbedarfs. Schritt 1A analysiert den Datenbedarf (Soll-Datenerhebung) der Neu-, Weiter- oder Anpassung eines Produktes. Dabei spielen das Geschäftsmodell und die angebotenen Dienstleistungen sowie die Anwendungsfälle des DZ eine wesentliche Rolle. Alle Überlegungen werden ganzheitlich über alle Aspekte des Produktentwicklungsprozesses und des Produktlebenszyklus hinweg betrachtet.

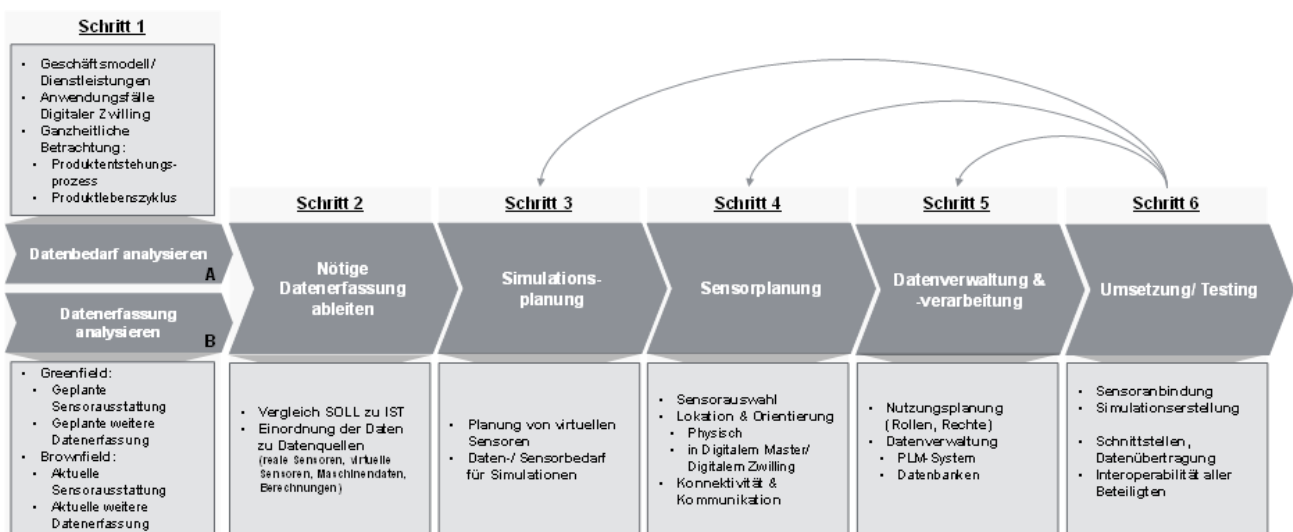


Abbildung 22 Leitfaden für den Sensor-Layout-Plan [44]

Schritt 1B analysiert die aktuelle oder aktuell mögliche Datenerhebung (Ist-Datenerfassung). Der Fokus liegt auf bestehenden oder geplanten Sensoren sowie weiteren Datenerfassungsmaßnahmen. Es wird zwischen Neu- und Weiterentwicklungen unterschieden. Diese beiden Analysen werden im zweiten Schritt miteinander verglichen. Das Ergebnis dieses Vergleichs zeigt die erforderliche Datenerhebung. Die benötigten Daten werden den entsprechenden Datenquellen bzw. Instrumenten zur Datenerhebung zugeordnet. Diese Quellen können z.B. ein realer Sensor, ein virtueller Sensor aus einer Simulation, spezielle Maschinendaten und (KI-basierte) Berechnungen sein. Ist eine Datenerhebung aus Simulationen geplant, werden diese Simulationen im Schritt 3 geplant. In den meisten Fällen werden Daten für die Simulation selbst benötigt, die wiederum in der Daten- und Sensorplanung berücksichtigt werden müssen. Im anschließenden Schritt der Sensorplanung (Schritt 4) werden die benötigten Sensoren ausgewählt und sowohl im physischen, realen Produkt als auch im Digital Master oder DZ platziert. Ein Augenmerk wird dabei auf die Konnektivität und Kommunikation der Sensoren gelegt. Schritt 5 befasst sich mit dem umfangreichen Thema der Datenverwaltung und -verarbeitung. In diesem Schritt werden die Datenübertragung und -speicherung sowie die Datennutzung und -archivierung geplant. In Schritt 6 wird die geplante Datenerfassung umgesetzt und mit realen Datensätzen getestet. Hierfür werden die geplanten Sensoren angeschlossen und die geplanten Simulationen durchgeführt. Bei den Tests wird ein besonderes Augenmerk auf die Schnittstellen und die reibungslose Datenübertragung gelegt und die Interoperabilität aller beteiligten Instanzen genauer untersucht. Werden an dieser Stelle Lücken oder Fehler gefunden, wird der Prozess in den entsprechenden Schritten 3, 4 oder 5 wiederholt. So entsteht eine iterative Optimierungsschleife.

Wie bereits beschrieben, wird zu Beginn der Sensorplanung in Schritt 1B die aktuelle oder aktuell mögliche Datenerfassung analysiert. Um diese Analyse zu erleichtern und zu strukturieren, wurde das Reifegradmodell für die Datenerfassung als Analyseinstrument entwickelt, das in Abbildung 23 dargestellt ist. Dieses Reifegradmodell wurde in Anlehnung an das Industrie 4.0 Reifegradmodell von Schuh et al. [45] entwickelt.

		Leitfrage	Sensorbauungsplan			
Sensorik	Planung	Welche Bereiche werden für die Sensorplanung berücksichtigt?	Nicht vorhanden	für Funktion/ Sicherheit relevante Bereiche (intern)	für Zustandsüberwachung relevante Bereiche	Bereiche individuelle DL und GM
		Wie werden Sensoren geplant?	Nicht vorhanden	dokumentenbasiert	modellbasiert	in übergreifende SysML-Struktur integriert
	Erhebung	Wie werden systembezogene Daten* erhoben?	Nicht vorhanden	Automatisierte Stichprobenmessung	Automatisierte kontinuierliche Messung	Messung und Simulation
		Wie werden artikelbezogene Daten* erhoben?	Nicht vorhanden	Automatisierte Stichprobenmessung	Automatisierte kontinuierliche Messung	Messung und Simulation
	Übertragung	Wie werden Daten* kommuniziert?	Nicht vorhanden	Kommunikation über Feldbus	Kommunikation über Industrial Ethernet	Kommunikation über das Internet
	Archivierung	Wie werden Daten* gespeichert?	Nicht vorhanden	Dokumentenablage	maschinenlesbare Datenspeicherung	neutrales Datenformat
		Wo werden Daten* gespeichert?	Nicht vorhanden	On Edge (Maschine/Artikel)	Netzwerk	Netzwerk + Datenverwaltungssystem
	Verwendung	Wie werden gesammelte Systemdaten* genutzt?	Nicht vorhanden	Archivierung bis Bedarf	Prüfung des Maschinenzustands in Echtzeit	Vorausschauende Wartung
		Wie werden gesammelte Artikeldaten* genutzt?	Nicht vorhanden	Archivierung bis Bedarf	Automatisierte Prüfung der Artikelqualität	Vorausschauende Simulationen der Artikelqualität

*von Sensorik erfasste Daten während der Nutzung

Abbildung 23 Reifegradmodell für Sensorik

Das Reifegradmodell ist chronologisch von der Datenplanung, -erfassung und -übermittlung bis zur Datenarchivierung und -nutzung aufgebaut. Leitfragen erleichtern das Verständnis und die Einordnung der Themen. Von links nach rechts steigt in der Klassifizierung der Grad der Befähigung in Bezug auf Industrie 4.0 und den DZ. Da dies die Hauptziele sind, die mit Hilfe des SLP erreicht werden sollen, ist diese Achse entsprechend benannt. Der erste Bereich des Reifegradmodells für die aktuelle Datenerfassung ist die Datenplanung. Zu den Leitfragen im Bereich der Datenplanung gehören erstens der Zweck der Datenerfassung und zweitens die Art der Daten bzw. die Sensorplanung. Der Zweck der Datenerfassung kann z.B. rein maschinenfunktionale oder sicherheitstechnische Aspekte, Condition Monitoring oder andere individuelle Dienste und Geschäftsmodelle umfassen. Die letzte Stufe umfasst Anwendungsfälle des DZ. Die Möglichkeit, dass eine Klassifizierung nicht vorhanden ist, ist immer gegeben. Die Art der Sensorplanung wird zweimal klassifiziert. Es wird zwischen dokumentenbasierter, modellbasierter oder in eine übergreifende SysML-Struktur integrierter Sensorplanung unterschieden. Anschließend wird die Sensorplanungsmethodik in mitarbeiterspezifische Vorgehensweisen, unternehmensinterne Vorgaben oder allgemeingültige aktuelle Standards klassifiziert.

Bei der Datenerfassung wird abgefragt, wie anlagenbezogene und artikelbezogene Daten erfasst werden. Diese Unterscheidung ist für produzierende Unternehmen gedacht, für die zum einen Daten über den Produktionsprozess und zum anderen Daten über das Endprodukt relevant sein können. Unterschieden werden hier automatisierte Stichprobenmessungen, kontinuierliche Messungen und zusätzliche Simulationen. Der dritte Bereich "Datenübertragung" befasst sich mit der Art der Kommunikation. Diese kann über Feldbus, Industrial Ethernet oder das Internet erfolgen. Der Bereich der Datenarchivierung klassifiziert die aktuelle Datenerfassung hinsichtlich der Art und des Ortes der Datenspeicherung. Die Art unterscheidet sich in Dokumentenablage, maschinenlesbare Datenablage und Ablage in einem neutralen Datenformat. Der Archivierungsort kann On-Edge sein, z.B. auf der Maschine oder dem Artikel, ein Netzwerk oder ein Netzwerk mit einem zusätzlichen Datenmanagementsystem.

Der letzte Bereich des Reifegradmodells betrifft die Nutzung der gesammelten Daten. Auch in diesem Bereich wird zwischen systembezogenen und artikelbezogenen Daten unterschieden. Die Einteilung ist hier möglich in reine Datenspeicherung, bis spezielle Daten benötigt werden, Echtzeitüberwachung des Maschinenzustandes oder der Artikelqualität oder vorausschauende Wartung der Maschine oder vorausschauende Simulationen der Artikelqualität. Der SLP soll kleinen und mittelständischen Fertigungsunternehmen den Einstieg in die Anwendungen von Industrie 4.0 und dem DZ erleichtern. Das Reifegradmodell für die aktuelle Datenerfassung bietet im ersten Schritt des oben vorgestellten Prozesses eine gute Ausgangsbasis für eine gezielte und nachhaltige Datenerfassung. Es gibt einen sehr guten Überblick über die aktuelle Situation im Unternehmen und zeigt weitere Potenziale auf.

Dieses Reifegradmodell wurde bereits im Rahmen von CyberTech erfolgreich erprobt.

Schlussfolgerung

Eine strukturierte und zielgerichtete Datenerfassung wird in Zukunft für ein erfolgreiches Unternehmen unerlässlich sein. Daten sind notwendig, um Prozesse zu optimieren und Dienstleistungen und Geschäftsmodelle zu ermöglichen. Die Zielgerichtetheit der Datenerfassung ist von besonderer Bedeutung, um Kosten, Zeit und Ressourcen zu sparen. Das beschriebene Konzept stellt einen Ansatz dar, um eine solche Datenerfassung zielgerichtet planen zu können.

4.3.2 Lehrkonzept für Advanced Systems Engineering

Die Phase der Produktentwicklung ist ein dynamischer Prozess, der viele unterschiedliche Bereiche mit unterschiedlichen Arbeitsweisen umfasst. Diese Dynamik enthält auch iterative Optimierungsschleifen, da durch neue Erkenntnisse fortlaufend Anforderungen aktualisiert und Entwicklungen angepasst werden müssen. Um den Überblick über alle Änderungen zu behalten und den Einfluss von Änderungen auf andere Bereiche nachvollziehen zu können, gibt es die Nachverfolgbarkeit (engl. Traceability). Zusammengefasst steht Traceability für die lückenlose Rückverfolgbarkeit der Produktentwicklungs- bzw. Produktentstehungsprozesse. Eine Möglichkeit, Traceability zu ermöglichen, ist MBSE. MBSE basierend auf der Modellierungssprache SysML, welche verschiedene Beziehungstypen besitzt, mit deren Hilfe Elemente voneinander abgeleitet oder ein logischer sowie zeitlicher Zusammenhang dargestellt werden kann. Mit der Unterstützung durch ein geeignetes IT-Tools bzw. eine geeignete Software, können diese Beziehungen anschließend schnell gefunden und ausgewertet werden. So kann jederzeit nachvollzogen werden, welche Entscheidung auf welcher Anforderung basiert oder welche physische Komponente von welcher logischen Komponente abgeleitet ist.

INCOSE definiert MBSE als "die formalisierte Anwendung der Modellierung zur Unterstützung von Systemanforderungen, Design, Analyse, Verifikation und Validierung, beginnend in der konzeptionellen Designphase und weiterführend während der Entwicklung und späteren Lebenszyklusphasen." [46]. Die Grundprämisse von MBSE ist, dass ein einziges ganzheitliches Modell alle relevanten Informationen des System of Interest umfasst und verwaltet, um eine "Single Source of Truth" zu bilden [46, 27]. Verschiedene Modelle können unterschiedliche Zwecke und Umfänge haben sowie für den eigenständigen Gebrauch oder für die Zusammenarbeit mit anderen Einheiten bestimmt sein [46, 48].

Die Digitalisierung treibt seit Jahren die technologische Entwicklung in der industriellen Wertschöpfung voran. Es zeichnet sich ein Wandel von den früheren Mechanik-zentrierten Systemen über mechatronische Systeme hin zu intelligenten, cyber-physischen Systemen ab. Diese zukünftigen Systeme werden von einem hohen Grad an dynamischer Vernetzung, Autonomie und interaktiver, soziotechnischer Integration geprägt sein. Hinzu kommen ein zunehmendes Angebot von internet- und plattformbasierten Diensten und die Verfügbarkeit von großen Datenmengen, aus denen sich erfolgversprechende Möglichkeiten für innovative und datengetriebene Dienstleistungen (Smart Services), Produkt-Service-Systeme und attraktive Geschäftsmodelle ergeben [49]. Einhergehend mit diesen Potenzialen wird die Individualisierung der Systeme aus der Perspektive der Kunden und Anwender zunehmen. Die Vernetzung von Produkten, Dienstleistungen und Produktionssystemen ermöglicht zukünftig neue Informationsflüsse zwischen Anbieter und Kunden, um z.B. eine individualisierte Massenfertigung wirtschaftlich zu gestalten [50]. Dieser Wandel von traditionellen Sach- oder Dienstleistungen zu AS wird das zukünftige Verständnis der Marktleistungen entscheidend prägen. Mit der skizzierten Entwicklung geht einher, dass sowohl die Systeme als auch die Planungs- und Entwicklungsaktivitäten komplexer werden. Dies resultiert in dem dringenden Bedarf, neue Ansätze für die Gestaltung der Marktleistungen und dessen Entstehungsprozess zu erforschen [2].

Die Erkenntnisse und Ergebnisse des Projektes CyberTech wurden für die universitäre Lehre aufbereitet und in einem Lehrkonzept zusammengefasst. Dieses Lehrkonzept wurde bereits unter realen Bedingungen erprobt und wird laufend weiterentwickelt. Grundlage des Lehrkonzeptes ist das in diesem Rahmen entwickelte „Zwiebelmodell ASE“. Dieses Zwiebelmodell zeigt die Schritte, die im Rahmen der Lehrveranstaltung von den Lernenden durchlaufen werden, um eine komplexe Entwicklungsaufgabe im Team zu bearbeiten. ASE dient sowohl als Basis für die Aufgabenstellung als auch für die Aufgabenbewältigung. Die Leserichtung ist dabei von innen nach außen.

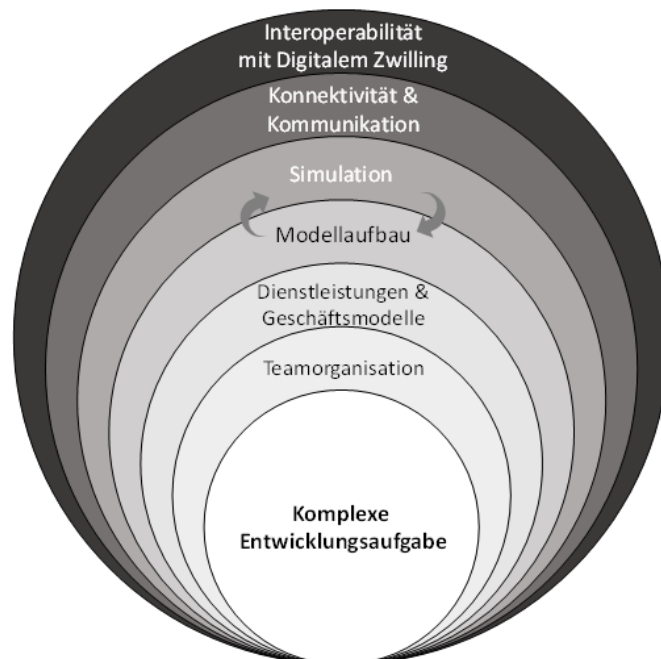


Abbildung 24 Zwiebelmodell Advanced Systems Engineering

Im Zentrum des Modells steht eine komplexe Entwicklungsaufgabe, die von der Gruppe bearbeitet werden soll. Im Fall des universitären Lehrkonzepts besteht diese Gruppe in der Regel aus 4-8 Studierenden. Da es beim ASE um eine besonders ganzheitliche Herangehensweise geht, sieht der erste Schritt des Zwiebelmodells die Analyse und Planung der Teamorganisation vor. Diese Teamorganisation begleitet die gesamte Entwicklungsaufgabe. Im nächsten Schritt werden die Hintergründe der Aufgabe, bzw. des Produktes beleuchtet. In den meisten Fällen wird dieser Hintergrund durch das Geschäftsmodell und eventuelle Dienstleistungen abgebildet. Nachdem die Randbedingungen für das

Produkt festgelegt und analysiert sind, beginnt der Modellaufbau, beispielsweise nach einer MBSE-Methodik. Iterativ werden diese Modelle anschließend im nächsten Schritt simuliert sowie weiterentwickelt und optimiert. Nachdem die Modellentwicklung im MBSE weitestgehend abgeschlossen ist, werden weitere Domänen wie CAD berücksichtigt. Auch die CAD-Modelle werden in verschiedenen Bereichen simuliert und optimiert. Nachdem das gesamte Produkt digital entwickelt sowie modellbasiert aufgebaut und simuliert wurde, kann der Prototypenbau beginnen. Nach dem Vorbild der Modelle werden alle physischen Komponenten und anschließend die Konnektivität und Kommunikation, also die Verbindungen zur digitalen Welt aufgebaut. Im letzten Schritt wird der DZ basierend auf den bestehenden Modellen und Simulationen aufgebaut und mit dem PZ verbunden.

4.3.3 Demonstratorsystem

Die beschriebenen Konzepte gilt es anhand eines Demonstratorsystems und ausgewählten repräsentativen Anwendungsfällen zu validieren. Unterschieden wird die Entwicklung des Demonstratorsystems in die Weiterentwicklung eines 3D-Druckers der Firma Prusa und der Neuentwicklung eines 4-Achs Roboterarms. Das Gesamtsystem ist in Abbildung 25 schematisch dargestellt.

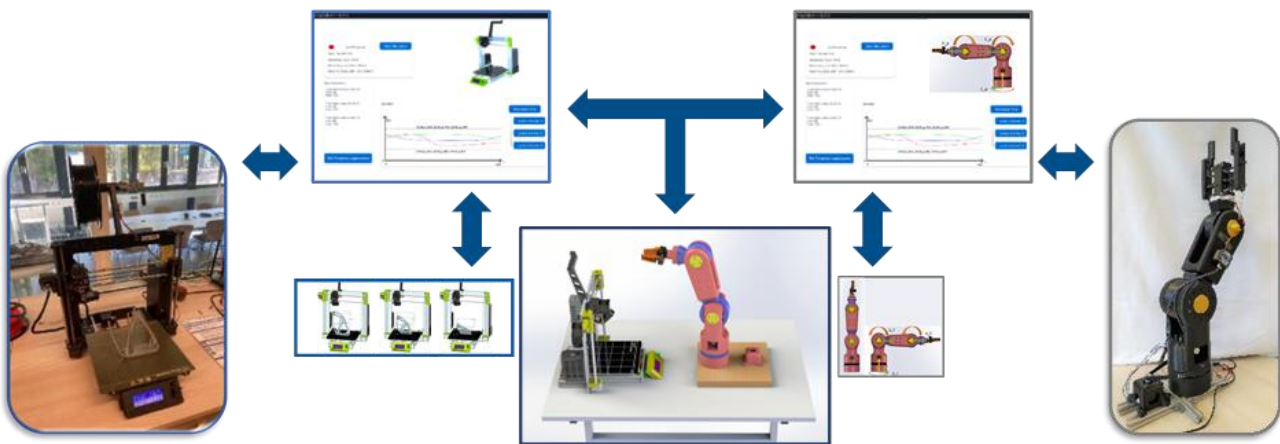


Abbildung 25 Darstellung des Demonstratorsystems als Advanced System

Ziel ist, dass sowohl der 3D-Drucker als auch der Roboterarm AS sind, die neben den physischen Komponenten jeweils einen DZ besitzen. Das Demonstratorsystem repräsentieren einen interagierenden Prozess aus Fertigungseinheit und Handlingsystem. Die Interaktion erfolgt sowohl auf der physischen als auch auf der digitalen Ebene. Anhand des Demonstrators sollen die drei Schwerpunktthemen der Säule Technik veranschaulicht werden. Bei den Schwerpunktthemen handelt es sich um:

- Ganzheitliche Traceability analog auch der Säule Organisation,
- Verknüpfung von Simulationsmodellen mit Sensornetzwerken und
- domänenübergreifende Interoperabilität.

Da es sich beim Roboterarm um eine Neuentwicklung handelt, entfällt dafür die Analysephase. Der bestehende 3D-Drucker wurde mittels der Reifegradmodelle hinsichtlich der vorhandenen Sensorik und der virtuellen Modelle analysiert. Am 3D-Drucker sind Temperatursensoren, ein Infrarot Filamentsensor am Extruder und Induktionssensoren, die den Abstand zwischen Extruder und Druckbett messen. Als virtuelles Modell steht ein 3D-CAD Modell des 3D-Druckers zur Verfügung. Simulations- oder Verhaltensmodelle sind nicht vorhanden. Für die Weiterentwicklung des 3D-Druckers zu einem AS wurde ein konkreter Anwendungsfall definiert. Der gewählte Anwendungsfall betrachtet das Problem, dass sich Druckbauteile während des Drucks von der Druckplattform lösen können (Abbildung 26). Gerade bei Druckbauteilen, die wesentlich höher als breit sind, kann es bei hohen Druckgeschwindigkeiten aufgrund von dynamischen Kräften zu einem Lösen des Bauteils vom Druckbett kommen. Bei hohen Druckgeschwindigkeit und zunehmender Bauteilhöhe steigt die Gefahr, dass sich das Bauteil vom Druckbett löst.

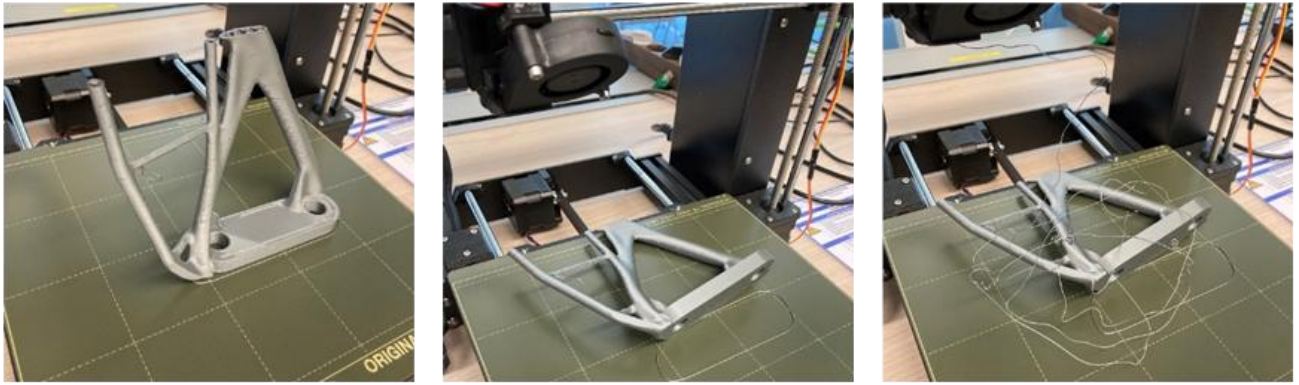


Abbildung 26 Anwendungsfall 3D-Druck

Löst sich das Bauteil von der Druckplattform, ist das ein Fehlprint und der Druck muss neu geplant werden. Ziel ist es, mittels des DZ den Druckprozess virtuell abzusichern und einen Fehlprint möglich früh zu erkennen und ggf. vorzubeugen. Dazu sollen virtuelle Simulationsmodelle im DZ genutzt werden, die das Kippverhalten simulieren. Für die Berechnung der Simulationsmodelle sollen reale Sensormesswerte als Eingangsgröße genutzt. Dafür wurden Simulationsmodelle der CAD-Domäne MKS (Mehrkörpersimulation) entwickelt, die das dynamische Verhalten des Druckbauteils während des Drucks simulieren. Der Drucker wurde um einen Geschwindigkeitssensor erweitert, der die aktuelle Geschwindigkeit des Druckbetts erfasst. Für die Kommunikation zwischen den Sensormesswerten wurde eine OPC-UA Kommunikationsserver aufgebaut, an den der Drucker und die Simulationsinstanz als Clients angeschlossen wurden. Für die Verarbeitung der Sensormesswerte als Simulationsdaten wurden Prozesse und Methoden entwickelt die im Detail in „*Development of an Information Model for Simulation Data Management in the Digital Twin*“ von Röhm et al. veröffentlicht wurden [30].

Das entwickelte AS vom 3D-Druck wurde um ein modellbasiertes Simulationsdatenmanagementsystem für den DZ erweitert. Es ermöglicht die Interaktion zwischen der realen und der virtuellen Welt und bildet die Schnittstelle zwischen den verhaltensbeschreibenden Simulationsmodellen und den in der Nutzungsphase gewonnenen Sensormesswerten. Der Zusammenhang ist schematisch in Abbildung 27 dargestellt. Die Validierung umfasst fünf Schritte. Schritt 1 ist die Erhöhung der Druckgeschwindigkeit durch die Anwendungsperson am 3D-Drucker. Die Sensormesswerte erfassen diese Geschwindigkeitserhöhung und werden vom Anwendungssystem geprüft. Sensormesswerte werden zusammen mit dem CAE-Simulationsmodell berechnet. Die Ergebnisse werden über das Anwendungssystem präsentiert und es erfolgt ein direkter oder indirekter Prozesseingriff. Bei einem direkten Prozesseingriff regelt der DZ die Druckgeschwindigkeit auf eine validierte Druckgeschwindigkeit herunter. Bei einem indirekten Prozesseingriff erfolgt der Prozesseingriff über die nutzende Person.

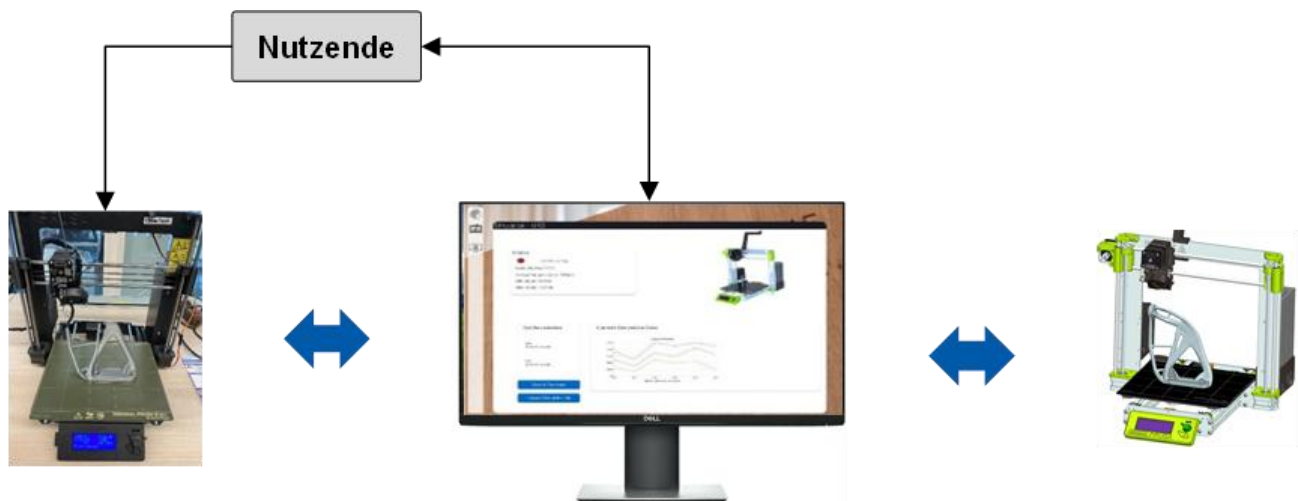


Abbildung 27 Advanced Systems 3D-Druck

Schlussfolgerung

Der Nutzen des AS liegt in der modellbasierten Prüfung der Sensormesswerte und der virtuellen Absicherung des Produktverhaltens. Daraus lassen sich Handlungsempfehlungen für den Prozesseingriff ableiten und abschließend eine Fehlproduktion verhindert werden. Der allgemeine Nutzen des Konzepts liegt in der methodischen Vorgehensweise und der modellbasierten Datenprüfung. Damit lassen sich individuelle Services anbieten. Die Wertsteigerung des physischen 3D-Druckers liegt in einem erweiterten Funktionsangebot. Der beschriebene Anwendungsfall zeigt den Mehrwert im Service der virtuellen Absicherung des Produktverhaltens.

4.4 Ergebnisse der Mechatronic Medical Engineers GmbH

4.4.1 Verknüpfung von Simulationsmodellen, domänenübergreifende Interoperabilität

Das ASE V-Modell für die Entwicklung stellt das Systemmodell bzw. die Systemmodellierung in den Mittelpunkt der Produktentwicklung. Makroskopisch unterscheidet das Modell auf dem linken Schenkel die digitale und auf dem rechten Schenkel die realitätsnahe Welt (Abbildung 28).

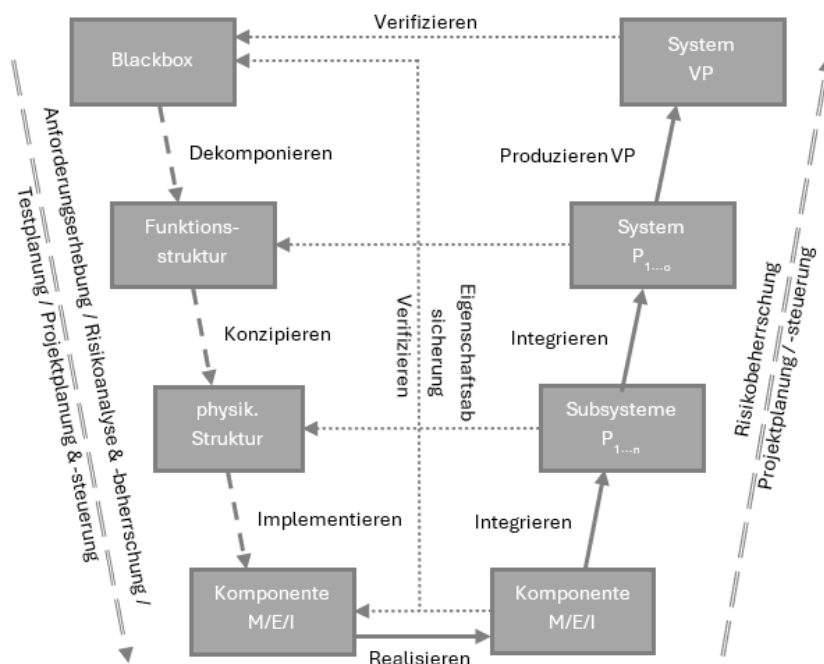


Abbildung 28 V-Modell für Advanced Systems Engineering im Rahmen von CyberTech

In der digitalen Welt laufen fünf logische Kernstränge parallel ab, die den klassischen Aufgaben der Produktentwicklung entsprechen:

- Modellierung des zu entwickelnden Produktes eingeteilt in Blackbox, Funktionsstruktur, physikalische Struktur und Komponenten M/E/I
- Anforderungserhebung als Teilarbeitspaket des Requirements Engineerings
- Risikobeurteilung und -beherrschung als Teil des Risikomanagements
- Testplanung
- Projektplanung/-steuerung

In der realitätsnahen Welt laufen vier logische Kernstränge parallel ab:

- Integration zu unterschiedlichen Prototypen mit definierten Reifegraden bzw. die Produktion des Verifizierungsprototypen (VP)
- Teilaspekte der Risikobeherrschung, insbesondere die Überwachung der Wirksamkeit der Risikominimierenden Maßnahmen
- Projektplanung / -steuerung

Die Verbindung zwischen der digitalen und der realitätsnahen Welt bilden drei Arbeitspakete:

- Realisierung als Übergang von der digitalen in die realitätsnahe Welt
- Eigenschaftsabsicherung
- Verifizierung

Die Systemarchitektur beinhaltet die Konkretisierungsstufen inklusive sämtlicher Informationen beginnend mit der Blackbox, über die Funktionsstruktur hin zu der physikalischen Struktur.

Blackbox

Die Blackbox ist die makroskopische Sicht, welche die Systemgrenze und den Verwendungszweck des Systems sowie die Schnittstellen und Wechselwirkungen zu Akteuren, anderen Systemen und der Umwelt definiert. Die Gesamtfunktion des betrachteten Produkts wird durch die Größen Material-, Energie- und/oder Signalströme als Schnittstellen an der Systemgrenze beschrieben (Abbildung 29).

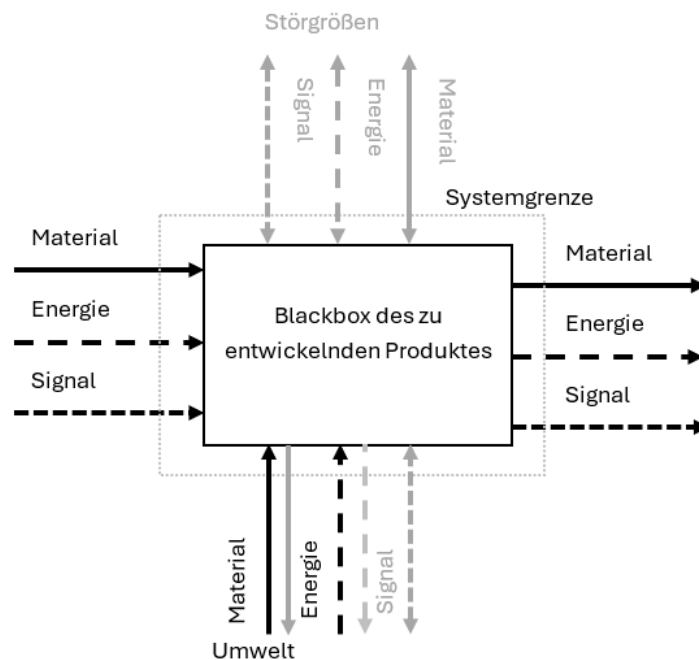


Abbildung 29 Partialmodell der Blackbox

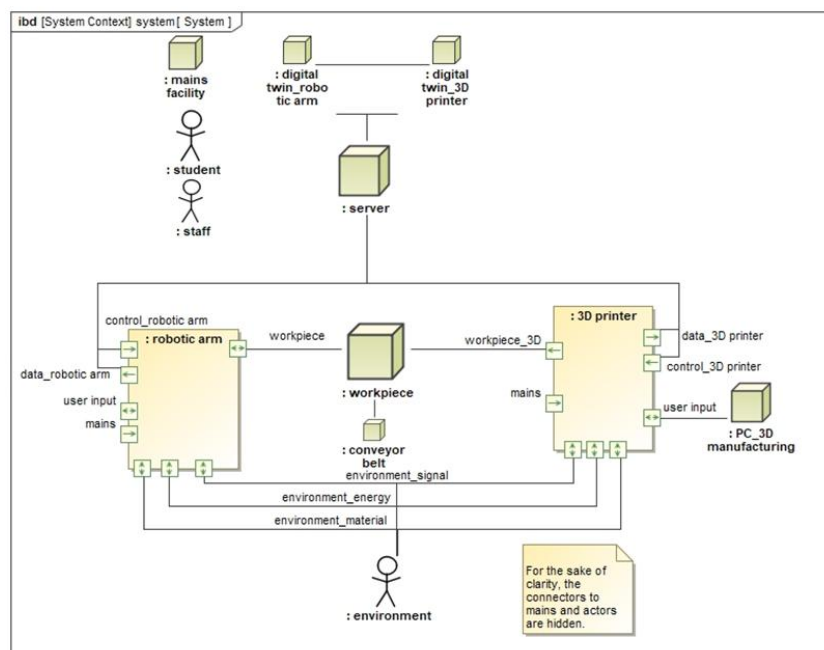


Abbildung 30 Blackbox des Roboterarms als Teil des Demonstratorsystems

Der Demonstrator „Roboterarm mit funktional erweiterten 3D-Drucker“, welcher im Cyber Tech Projekt definiert wurde, zeigt beispielhaft die Modellierung der Blackbox im Systemmodell, der in Interaktion mit dem Advanced 3D-Drucker steht (Abbildung 30). Der Anwendungszweck des Roboterarms ist das Aufnehmen eines 3D-gedruckten Werkstückes vom Druckbrett des 3D-Druckers und das Umsetzen auf ein Förderband. Den Druckstatus, die Form des Werkstücks mit dessen Schwerpunkt und die Position des Werkstücks im Druckbett erhält der DZ des Roboterarms vom DZ des 3D Druckers. Sei-nerseits sendet der Roboterarm u.a. Statusmeldungen an den DZ des 3D Druckers, dass das Werkstück entfernt worden ist. Als Akteure sind hier entsprechend dem Anwendungsfall, Studierende und wissenschaftliche Mitarbeitende modelliert. Abbildung 31 beschreibt die modellierten Schnittstellen des Roboterarms zu Akteuren, anderen Systemen und der Umwelt.

Schnittstelle	Beschreibung	Größe
control_robotic arm	Steuerungssignale des Digitalen Zwillings des Roboterarms, z.B. <ul style="list-style-type: none"> • Bewegung starten • Anfangs- und Endpunkte • Parameter zum Greifen/Loslassen 	Signal
data_robotic arm	aktuelle Zustandsdaten des Roboterarms z.B. zu <ul style="list-style-type: none"> • aktuellen Bewegung • Prozessstatus 	Signal
environment_energy	gewollte und ungewollte Energie vom Roboterarm zur Umwelt und umgekehrt	Energie
environment_material	ungewolltes Material vom Roboterarm zur Umwelt und umgekehrt	Material
environment_signal	ungewollte Signale vom Roboterarm zur Umwelt und umgekehrt	Signal
mains	Steckdose	Energie
user input	Ein- und Ausschalten des Roboterarms	Signal
workpiece	Effektor	Energie

Abbildung 31 Schnittstellen des Roboterarms zu Akteuren, anderen Systemen und der Umwelt

Funktionsstruktur

Ein Konzipieren, ausgehend von der Blackbox, ist für zu entwickelnde Produkte hoher Komplexität anspruchsvoll. Es werden die Gesamtfunktionen, modelliert durch die Blackbox, durch eine Dekomposition in Unter- bzw. Teilfunktionen (Tf) untergliedert und detaillierter überarbeitet, vgl. Abbildung 32.

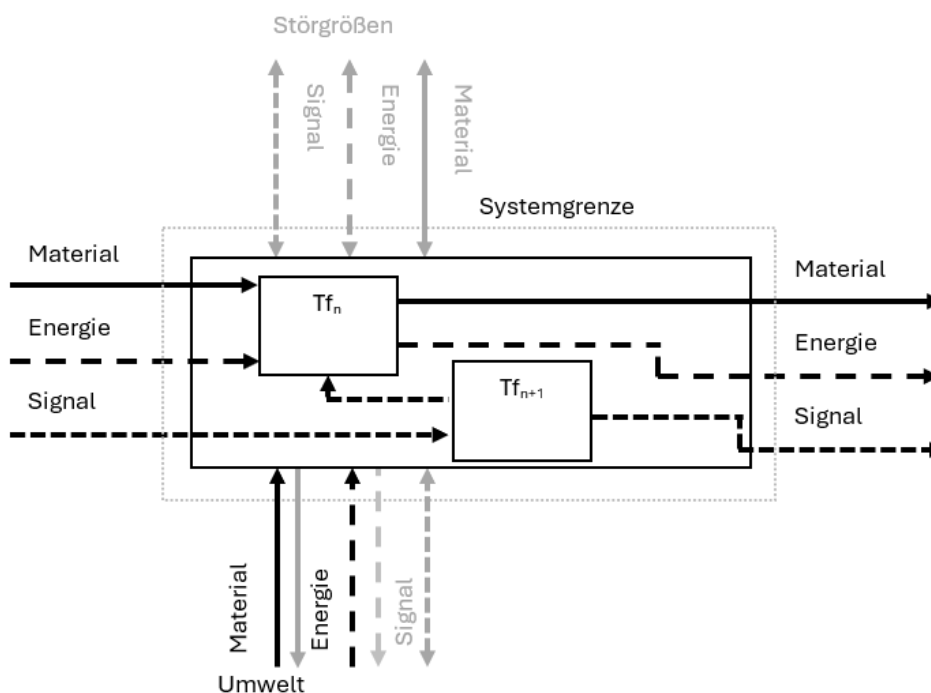


Abbildung 32 Partialmodell der Funktionsstruktur

Die Funktionsstruktur beschreibt, was „unter der Haube“ passiert. Konsistent zum Funktionsverständnis werden die Teilfunktionen über Material-, Energie- und/oder Signalflüsse verknüpft. Die Abbildung der Gesamtfunktion eines zu entwickelnden Produktes über Teilfunktionen, die durch die Größen Material-, Energie- und/oder Signalfluss miteinander verknüpft sind, wird als Funktionsstruktur bezeichnet. Abbildung 33 zeigt beispielhaft die Modellierung der Funktionsstruktur des Roboterarms.

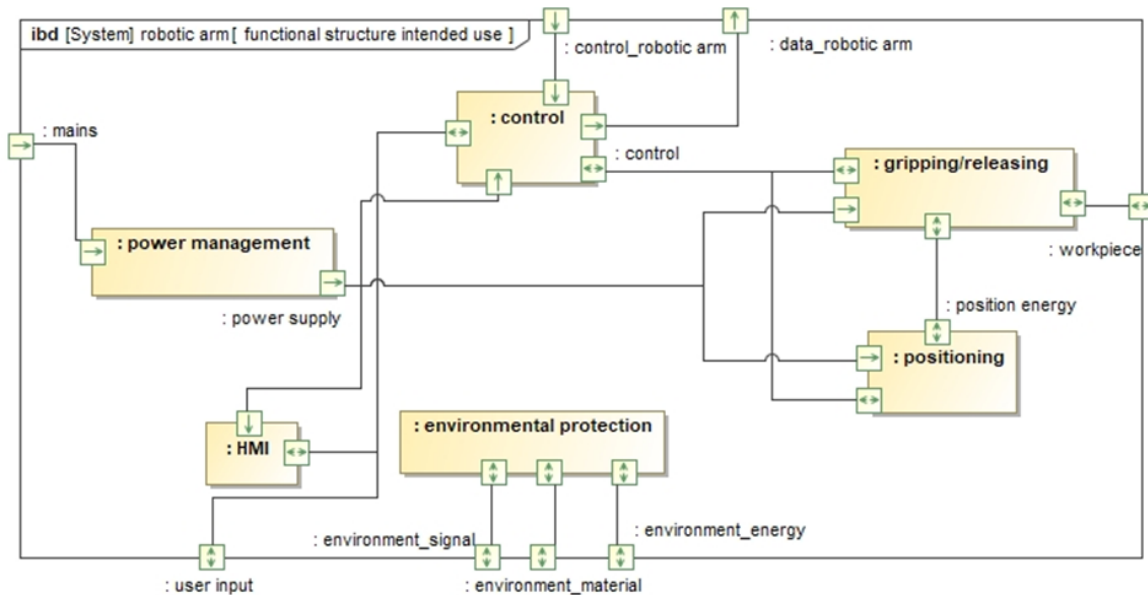


Abbildung 33 Funktionsstruktur des Roboterarms

Physikalische Struktur

Die physikalische Struktur konkretisiert die in der Funktionsstruktur definierten Teilfunktionen über die Festlegung der physikalischen Effekte einschließlich der Geometrie und stofflicher Merkmale während des Konzipierens bis hin zu den Wirkprinzipien. Während des Konzipierens können unterschiedliche Kreativitätstechniken verwendet werden. Beispielsweise ermöglicht ein morphologischer Kasten auf Basis von Teillösungen einzelner Teilfunktionen der Funktionsstruktur die Kombination zu Lösungsvarianten für das zu entwickelnde Produkt. Eine anschließende Auswahl und Bewertung anhand der Anforderungen führt zu der Gesamtlösung bzw. der physikalischen Struktur, siehe Abbildung 34.

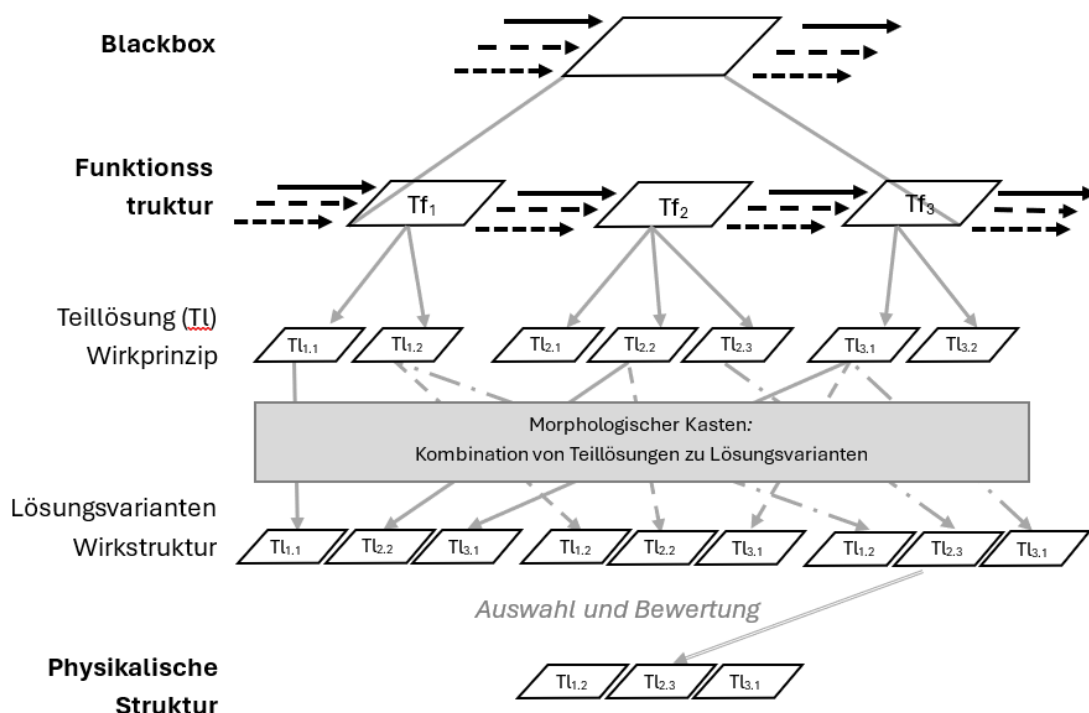


Abbildung 34 Der morphologische Kasten als Beispiel zum Konzipieren der physikalischen Struktur

Zur Modellierung der physikalischen Struktur können Diagramme oder Blackboxes verwendet werden, die die Wirkprinzipien mit physikalischen Zusammenhängen ähnlich der Funktionsstruktur darstellen. Identisch der Funktionsstruktur oder der Blackbox werden die Beziehungen zwischen den Wirkprinzipien einzelner Teilfunktionen über die Größen Stoffen, Energie und/oder Signal in der physikalischen Struktur modelliert. Beispielsweise ist das Drehzahl-Drehmoment-Verhalten und der Wirkungsgrad eines Schrittmotors als Wirkprinzip von Größen wie der angelegten Spannung, der Stromaufnahme oder der Schrittauflösung abhängig. Bei Verwendung eines Schrittmotors als Aktuator in einer Wirkstruktur hängt das Verhalten einer Positionsregelung im geschlossenen Regelkreis vom Verhalten aller spezifizierten Systemelemente ab, wie dem Positionssensor, dem Regler, möglichen Störungen, der Regelstrecke, dem Schrittmotor selbst usw. Der Detaillierungsgrad der physikalischen Struktur hängt sehr stark vom Projekt, den Stakeholdern, den beteiligten Ingenieur:innen und dem Ursprung der Wirkprinzipien oder der Teile der Wirkstruktur ab. Die physikalische Struktur wurde ebenfalls für den Demonstrator entwickelt, siehe Abbildung 35.

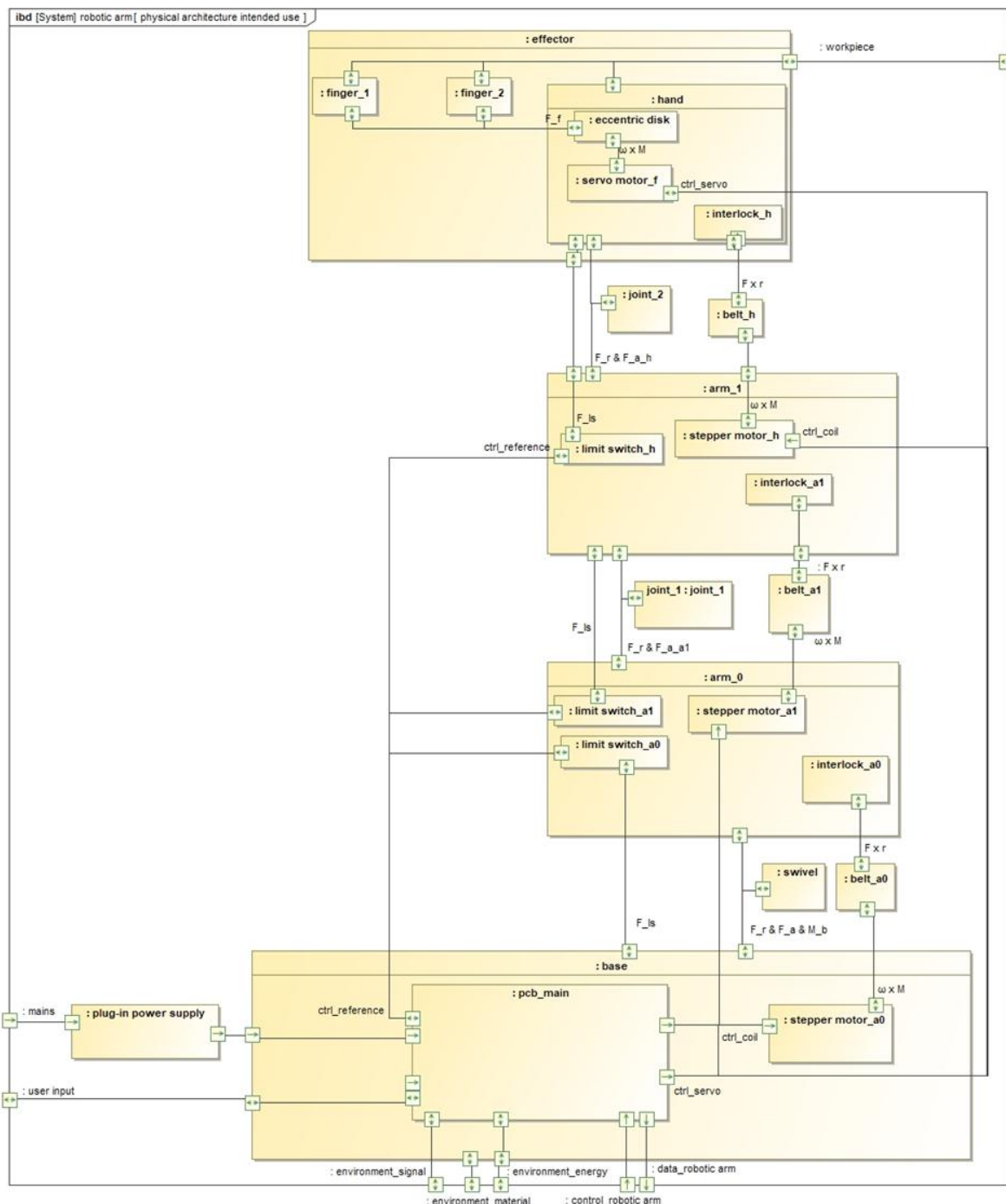


Abbildung 35 Physikalische Struktur des Roboterarms

4.4.2 Ganzheitliche Nachvollziehbarkeit

Als Entwicklungsdienstleister für Medizinprodukte kann bei der Organisation der Produktentwicklung nicht auf standardisierte Methodiken, wie die VDI 2206, Wasserfallmodelle oder die VDI 2206 zurückgegriffen werden. Diese legen dem Vorgehen ein Modell zugrunde, dass als Eingang die Bedürfnisse u.a. der Anwendenden des zu entwickelnden Produktes hat. Für die Entwicklung ist der einzige Stakeholder bzw. die einzige Möglichkeit des Informationsaustausches ihr Kunde. Auf Basis einer Systemmodellierung wird eine sachlogische, agile bzw. chaotisch abarbeitbare und an die Bedürfnisse der Mechatronic Medical Engineers GmbH angepasste Methodik realisiert, die die Anforderungserhebung effektiv und effizient gestaltet. Eine Skalierbarkeit des Vorgehens an den Umfang des zu entwickelnden Produktes - Gesamtsystem, Subsystem oder Komponente, stellt sicher, dass die Methodik an das zu entwickelnde Produkt adaptierbar ist.

Durch eine durchgängige Traceability zwischen dem Lastenheft und dem Systemmodell bzw. den erhobenen Anforderungen ist stets die Transparenz den Kunden gegenüber gewährleistet. Weiterhin verhindert die Traceability Redundanzen in den Informationen und damit potenzielle Fehlerquellen. Durch die Gegebenheiten eines Entwicklungsdienstleisters dürfen die beschriebenen Methodiken nicht toolspezifisch anwendbar, sondern sollten durch generische Ansätze multimethodenfähig bzw. toolunabhängig sein. Abbildung 36 ordnet beispielhaft Lasten den Systemmodellelementen des Roboterarms zu bzw. dokumentiert die Systemmodellelemente, die sich aus den Lasten ergeben.

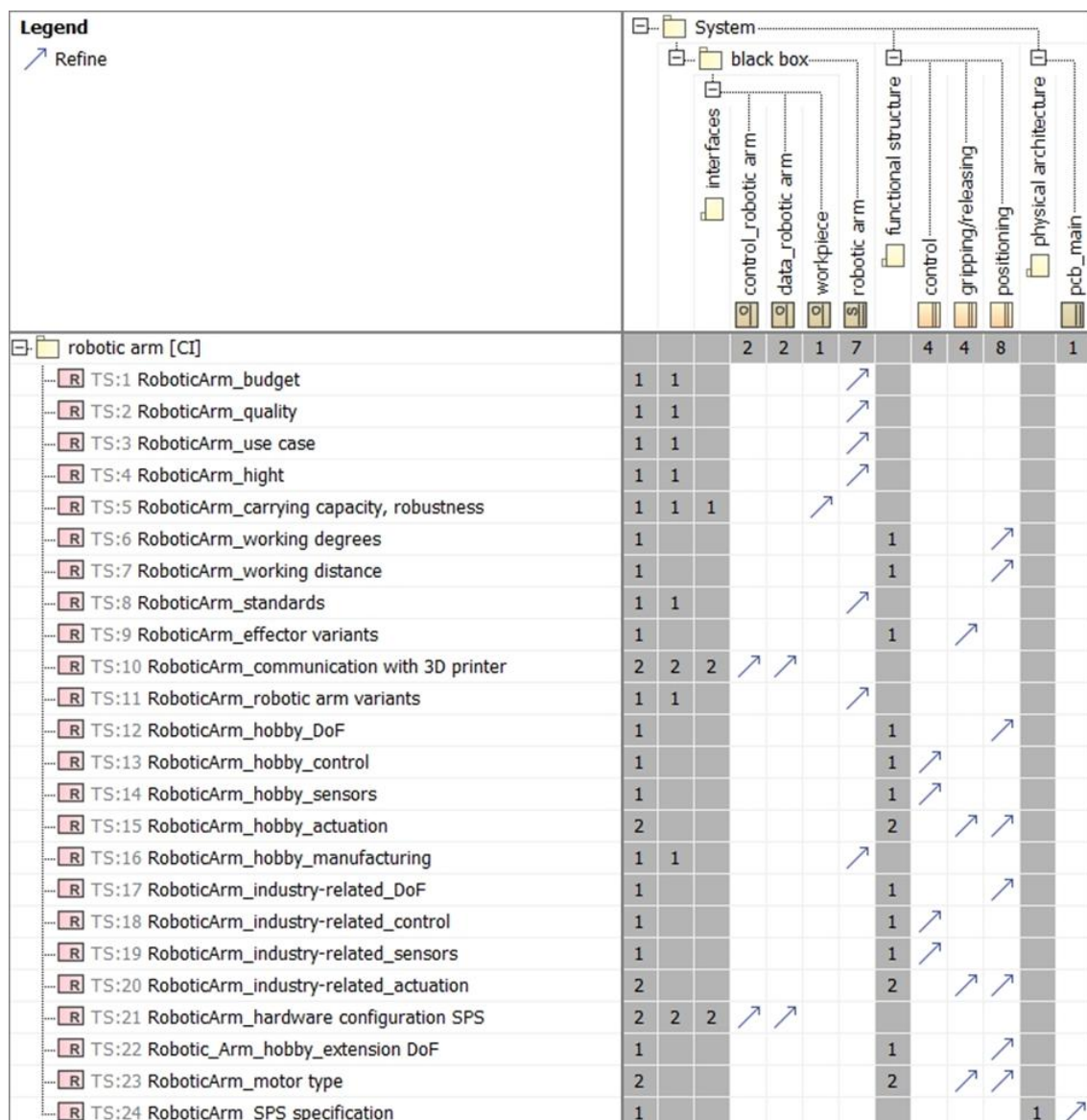


Abbildung 36 Zuordnung der Lasten zu den Systemmodellelementen des Roboterarms

4.4.3 Model-Based Systems Engineering

Die modellbasierte Systemmodellierung mittels SysML ist in den Entwicklungsprozessen der Mechatronic Medical Engineers GmbH seit Jahrzehnten als Kernaufgabe tief verankert. Schwerpunkte lagen dabei bislang auf der Rückverfolgbarkeit von Anforderungen und Risikomaßnahmen hin zu Verifizierungstätigkeiten sowie auf einer automatisierten Dokumentationsgenerierung basierend auf der Modellierung. Im Sinne des Advanced Engineering sind mit diesen Tätigkeiten die Potenziale der Systemmodellierung im Rahmen des MBSE jedoch noch nicht ausgeschöpft. Die Mechatronic Medical Engineers GmbH hat so erkannt, dass MBSE inklusive einer formalisierten Nutzung von Systemmodellen auch bei anderen Kernaufgaben der Systementwicklung wie Requirements Engineering, Design, Risikomanagement oder Projektmanagement gewinnbringend anzuwenden ist. Folge dieser Erkenntnis ist die Vision einer systemmodellgetriebenen Entwicklungsabteilung, bei der sämtliche Tätigkeiten der Systementwicklung auf Basis des Systemmodells organisiert und durchgeführt werden – MBSE soll also den gesamten Entwicklungsprozess über alle Fachabteilungen prägen. Dieses Ziel wurde im Rahmen des Verbundprojekts CyberTech verfolgt. Die größte Herausforderung bestand bislang in einem Paradigmenwechsel von der sequenziell phasengegliederten und dokumentengetriebenen hin zu einer sachlogischen agilen oder gar chaotischen Systementwicklung. Infolge dieses Paradigmenwechsels hat sich schließlich ein weiterer vollzogen, der ursprünglich nicht beabsichtigt war, sondern sich vor dem übergeordneten Ziel einer modellgetriebenen Systementwicklung herauskristallisiert hat: die funktionsgetriebene Systementwicklung.

Es ist davon auszugehen, dass ohne integrative Ansätze wie die modellbasierte Systementwicklung – insbesondere bei einer durchgängig digitalen Systementwicklung – oder ASE in Zukunft keine komplexen Produkte im Kunden-Auftragsgefüge mehr entwickelt werden können. Wenngleich diesbezüglich nach wie vor noch viel Überzeugungsarbeit zu leisten und die entsprechende Durchdringung der deutschen Industrie noch nicht abgeschlossen ist, lässt sich aus den Praxiserfahrungen der Mechatronic Medical Engineers GmbH ein eindeutig positives Fazit zur Anwendung der modellbasierten Systementwicklung ziehen, da die Vorteile überwiegen.

4.5. Ergebnisse der SysDICE GmbH

4.5.1 Konzept für die KI-assistierte Normkonformitätsprüfung

Die zunehmende Verbreitung von MBSE im medizinischen Sektor hat zu einer erheblichen Fokussierung auf der Digitalisierung medizinischer Standards in Normmodelle geführt. Diese Transformation fördert die Konsistenz und ermöglicht die Nachverfolgung von Systemmodellelementen zu den entsprechenden Normmodellelementen. Trotz dieser Bemühungen stützen sich die aktuellen Digitalisierungsaktivitäten stark auf manuelle Extraktion und Transformation, insbesondere von PDF-Dokumenten in SysML-Modelle. Gleichzeitig bietet die Verbreitung von KI-Anwendungen in den letzten Jahren die Möglichkeit, solche Aktivitäten zu automatisieren.

Abbildung 37 zeigt die hochrangigen Anwendungsfälle des Assisted Norm Compliance (ANC)-Konzepts. Das Hauptziel besteht darin, KI mit MBSE zu kombinieren, um die Überprüfung der Normkonformität bei der Entwicklung von AS zu automatisieren und die finale Erstellung des Konformitätsberichts zu unterstützen. Der klassische Ansatz zur Normkonformität umfasst mehrere Aktivitäten: das manuelle Übertragen von Anforderungen aus medizinischen Normen in ein Normmodell innerhalb eines SysML-Werkzeugs, das Verknüpfen dieser Normelemente mit den passenden Systemelementen sowie weitere Aufgaben im Bereich Risikomanagement und Compliance. Dazu gehört beispielsweise die Überprüfung der Normkonformität durch Tests, um einen Konformitätsbericht für das entwickelte System zu erstellen. Diese Aktivitäten erfordern die Zusammenarbeit mehrerer Stakeholder. In der Regel konzentrieren sich Qualitätsmanagement-Stakeholder auf die Normdokumente, während Systemingenieure und Architekten sich auf die SysML-Modelle konzentrieren. Daher sollte jede Lösung nahtlos die Integration sowohl der Dokumente als auch der SysML-Modelle adressieren.

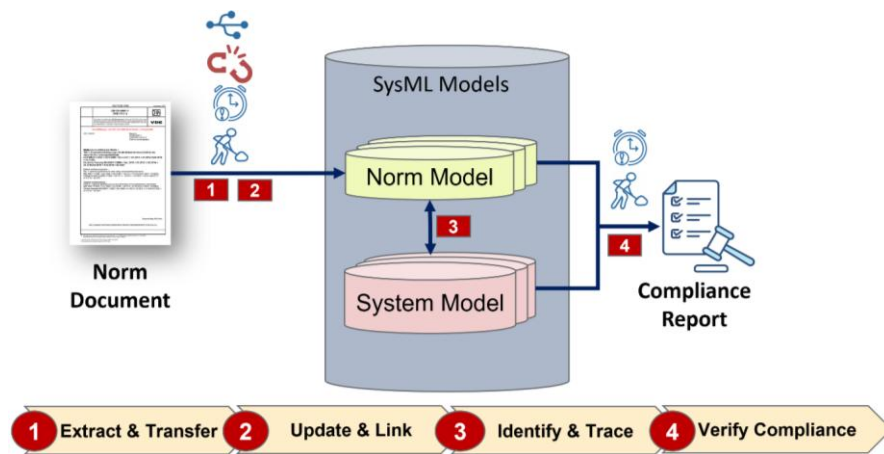


Abbildung 37 Die vier Anwendungsfälle des Assisted Norm Compliance Konzepts

Die Problemstellung umfasst folgende Punkte:

- Die Digitalisierung der Normdokumente in das Normmodell ist zeitaufwendig und kostspielig.
- Es fehlt an Rückverfolgbarkeit zwischen den Normdokumenten und den Normmodellen.
- Manuelle Versions-/Konfigurationsverwaltung bei Updates von Normdokumenten ist fehleranfällig.
- Die Einhaltung von Normen ist zeitaufwendig und komplex.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, stellt sich die Frage: Wie können wir die Verfahren zur Normkonformität unterstützen und automatisieren? Um die Effizienz und Genauigkeit der Normkonformitätsprozesse zu verbessern, sollen folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Die Digitalisierung von Normdokumenten in Normmodellen soll automatisiert werden.
- Rückverfolgbarkeit zwischen Normdokumenten und Normmodellen muss sichergestellt bleiben.
- Versionen der Normdokumente und die Auswirkungen auf Änderungen müssen verwaltet werden.
- Die Zuordnung der Normmodell-Elemente zu Systemmodell-Elementen soll automatisiert werden.
- Die gesamte Überprüfung der Normkonformität soll automatisiert werden.

Um die Herausforderungen zu bewältigen, werden nun konkrete Anwendungsfälle definiert, die die Automatisierung und Unterstützung der Normkonformität weiter konkretisieren.

Use Case 1 - Extract & Transfer

- Die Transformation eines Normdokuments in ein Normmodell soll automatisiert werden.
- Die Rückverfolgbarkeit zwischen Normdokument und Normmodell soll sichergestellt werden.
- Die Lösung soll anpassbar sein und Feedback von Benutzer:innen berücksichtigen.

Use Case 2 - Update & Link

- Mehrere Versionen der Normdokumente sollen verwaltet werden.
- Die Auswirkungen von Änderungen auf das Modell sollen analysiert werden.

Use Case 3 - Identify & Trace

- Es soll die Zuordnung von Norm- zu Systemmodell-Elementen ermittelt werden.
- Verknüpfungen zwischen Norm- und Systemmodell-Elementen soll automatisiert werden.

Use Case 4 - Verify Compliance

- Die Übereinstimmung von System- und Normmodell-Elementen soll geprüft werden.
- Die Umsetzung dieser Maßnahmen steigert die Effizienz, minimiert Fehler, verbessert die Norm-einhaltung, wodurch eine zukunftssichere, automatisierte Konformität gewährleistet wird.

4.5.2 Assisted Norm Compliance Tool-Architektur

Die ANC-Tool-Architektur ist darauf ausgelegt, die vielfältigen Bedürfnisse der Stakeholder zu adressieren, die an den Normkonformitätsaktivitäten beteiligt sind. Sie ist so strukturiert, dass verschiedene Komponenten integriert werden, die jeweils zur Gesamtfunktionalität und Leistung der Anwendung beitragen. Insbesondere die Haupttreiber der Tool-Architektur umfassen folgende Punkte:

- Anpassbare Lösung: neu beschriften, neu trainieren, neu testen
- Flexible Lösung: unabhängig von SysML-Werkzeugen (Cameo Systems Modeler, CSM)
- Einfach einzurichten: Plugin + Browser
- Hybride Lösung: mit oder ohne LLM (einfaches und realistisches Kosten-Training)

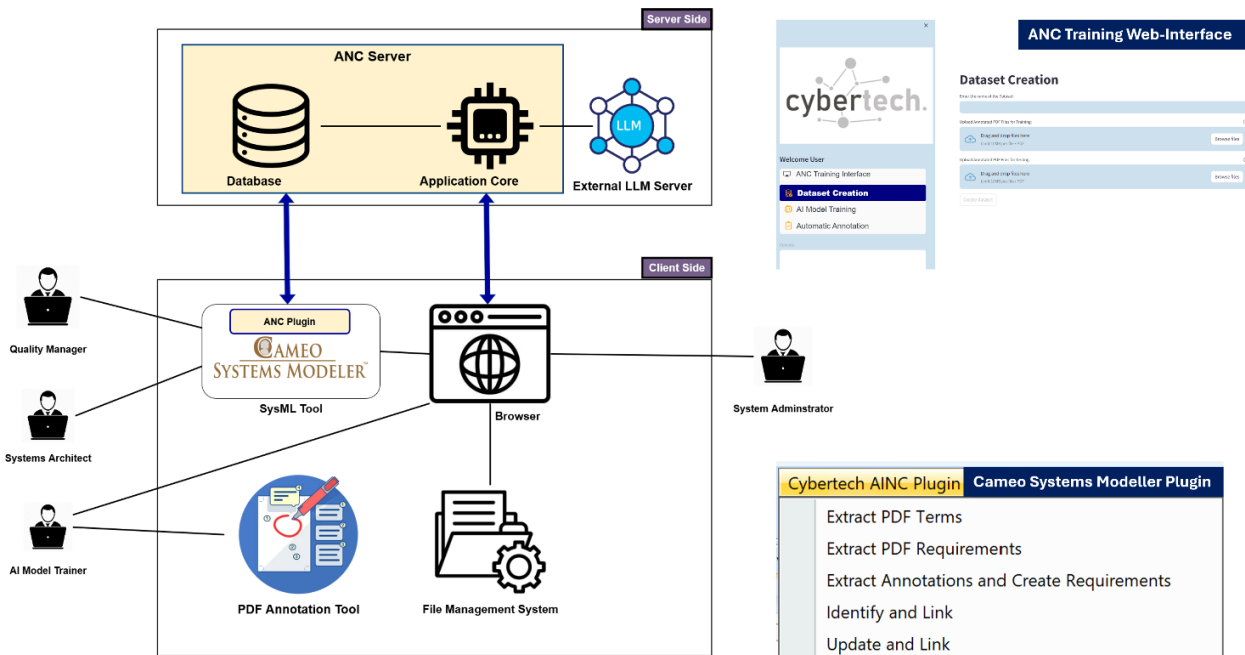


Abbildung 38 Die hochrangige Tool-Architektur für die ANC-Lösung

Die in Abbildung 38 dargestellte ANC-Tool-Architektur umfasst folgende Teile:

AI Core Server (Anwendungskern)

Ein Backend-Server wurde entwickelt, um die Kommunikation zwischen dem CSM ANC-Plugin und der Lösung zu ermöglichen. Er empfängt PDF-Dokumente sowie Systemmodellelemente vom CSM-Plugin und sendet die Verarbeitungsergebnisse, wie extrahierte Elemente, zurück.

Training-Webschnittstelle

Eine Webanwendung wurde entwickelt, die dem Benutzer ermöglicht, KI-Modelle zur Extraktion von Informationen aus PDFs zu trainieren, bereitzustellen und zu evaluieren. Sie bietet Anmeldefunktionen und unterstützt die Extraktion von Anforderungen mit einer anpassbaren KI-Lösung.

Cameo ANC Plugin

Das ANC-Plugin wurde im CSM erstellt und ist verantwortlich für die Verwaltung der Kommunikation mit dem Backend (Hochladen von PDF-Dokumenten, Erstellen von Cameo-Elementen aus Serverantworten usw.) und die Manipulation der Modellelemente im CSM.

Cameo Systems Modeler

Das SysML-Modellierungswerkzeug verwaltet die SysML-Projekte für das Norm- und Systemmodell. Zukünftig können auch alternative SysML- oder Systemmodellierungswerkzeuge einbezogen werden.

Datenbank

Hauptsächlich verwendet für die Speicherung und das geschickte Management der wichtigen Daten der Anwendung, um reibungslose Abläufe und zuverlässige Datenintegrität zu gewährleisten.

PDF-Annotationstool

Die spezialisierte Software, die von KI-Modelltrainern verwendet wird, um Anmerkungen in PDF-Dokumente einzufügen, um später Modelle entsprechend ihren Anmerkungen trainieren zu können.

Externer LLM-Server

Das Programm, das Techniken der natürlichen Sprachverarbeitung verwendet, um menschenähnlichen Text zu verstehen und zu generieren. Durch Integration eines LLM-Servers in das ANC-System kann die Genauigkeit und Effizienz der Normkonformitätsprozesse erheblich verbessert werden, indem kontextuelle Informationen aus den Dokumenten extrahieren und verarbeitet werden.

4.5.3 Demonstrator für die Assisted Norm Compliance Lösung

Use Case 1 - Extract & Transfer

Die beiden notwendigen Elemente für die Rückverfolgbarkeit wurden aus den PDF-Dateien extrahiert und in ein SysML-Modell (das Normmodell) übertragen. Eines dieser Elemente war das Glossar, das unter Verwendung eines proprietären großen Sprachmodells (von OpenAI) extrahiert wurde. Die Lösung, die ein solches LLM nutzt, zeigte eine zufriedenstellende Leistung. Die Anforderungen verlangten jedoch eine anpassbare Lösung, um die spezifischen Aufgabenanforderungen zu erfassen. Ein benutzerdefiniertes ML-Modell wurde zunächst auf einem Satz annotierter PDF-Dateien (Abbildung 39, links) trainiert. Danach wurde das trainierte Modell verwendet, um die Anforderungen aus PDF-Dokumenten zu extrahieren, die nicht im Training verwendet wurden. Die Schnittstelle zum ML-Modell erfolgt über eine Webanwendung. Die Anforderungen in Abbildung 39 (rechts) wurden erstellt, nachdem ein automatisch annotiertes PDF an das CyberTech ANC-Plugin übergeben wurde.

Use Case 2 - Update & Link

Wenn eine neue Version einer Norm verfügbar ist, kann der Systemarchitekt die neue Version an das ANC-Plugin senden, wo die Hauptelemente erneut extrahiert werden, zusammen mit einem Bericht, der die Unterschiede zwischen den beiden Normversionen hervorhebt. Die älteren extrahierten Elemente bleiben im Normmodell erhalten, um die erstellten Beziehungen zu bewahren. Außerdem wurde jede vom ANC-Plugin erstellte Anforderung und jeder Glossarbericht mit der Seite im PDF-Dokument verknüpft, von der er extrahiert wurde.

UC1 & UC2 zeigt die PDF-Anmerkung und die extrahierten Elemente:

Das linke Bild zeigt eine PDF-Anmerkung mit dem Text: "The test finger is likewise applied to all openings in the ENCLOSURE, including holes and TERMINALS. In these cases, the ACCESSIBLE parts of the ENCLOSURE are considered to include any part of the test finger which can be inserted into the hole or TERMINAL (see Figure 1)." Darunter befindet sich eine technische Zeichnung eines Testfingers (E) in einer Öffnung (A, B, C, D) eines Gehäuses (ENCLOSURE). Die Beschriftungen A bis E sind im Key definiert: A: inside of equipment, B: outside of equipment, C: HAZARDOUS LIVE part, D: tip of test finger is considered to be ACCESSIBLE, E: test finger. Die Anforderung ist als "Requirement text" und "Requirement title" markiert.

Das rechte Bild zeigt die extrahierten Elemente in der Normkonformität im ANC-Plugin. Die Liste enthält Anforderungen wie "REQ 13.2.3 Batteries and battery charging" und "REQ 13.2.3 Implosion of cathode ray tubes". Die Anforderungen sind als "Requirements Titles" und "Location in PDF" markiert.

UC3 & UC4 zeigt die Normkonformität im ANC-Plugin:

#	Client	Confidence	Compliance Status	Validated	Supplier
1	TS_60601-1_6.2.2 Determination of ACCESSIBLE parts - Examination	0.97	Compliant	Checked and Validated	6.2.2 Examination
2	TS_60601-1_6.2.3 Determination of ACCESSIBLE parts - Openings above parts that are HAZARDOUS LIVE	0.72	Compliant	Not Checked Yet	6.2 Determination of ACCESSIBLE parts
3	TS_60601-1_6.2.4 Determination of ACCESSIBLE parts - Openings for pre-set controls	0.59	Not Compliant	Checked and Not Valid	6.2 Determination of ACCESSIBLE parts
4	TS_60601-1_7.2 Protection against mechanical HAZARDS - Sharp edges	0.55	Not Compliant	Checked and Validated	7.2 Sharp edges
5	TS_UL1439 Protection against mechanical HAZARDS - Sharp edges	0.52	Compliant	Checked and Not Valid	7 Protection against mechanical HAZARDS
6	mechanical energy	0.5	Neutral	Not Checked Yet	7 Protection against mechanical HAZARDS

Abbildung 39 Demonstration der PDF-Anmerkung, der extrahierten Normmodell-Elemente in Cameo Systems Modeler und der Normkonformität im ANC-Plugin.

Use Case 3 - Identify & Trace

Der Systemarchitekt wählt einen Umfang aus, der die Normanforderungen und seine Systemmodellelemente enthält, und bittet das ANC-Plugin, Beziehungen zwischen den Elementen vorzuschlagen. Das Plugin sammelt die Elemente und sendet sie über das Web an die Kernanwendung, die sie verarbeitet. Zunächst wird mittels semantischer Analyse (Use Case 3) ermittelt, welche Elementpaare verknüpft werden sollten, und anschließend wird der Konformitätsstatus anhand von Textual Entailment vorgeschlagen. Die Ergebnisse der Kernanwendung werden verwendet, um eine Beziehung zu erstellen, die den Konformitätsstatus zwischen den Paaren dokumentiert, zusammen mit der Zuverlässigkeit der Ergebnisse des AI-Algorithmus und der Information, ob der Systemarchitekt die Ergebnisse validiert hat oder nicht (Abbildung 39, unten).

Use Case 4 - Verify Compliance

Die Integration beider Anwendungsfälle in einer Benutzeroberfläche vereinfacht die Benutzererfahrung und ermöglicht es dem Systemarchitekten, sich ausschließlich auf die wichtige Aufgabe der Identifikation der Konformität zu konzentrieren. Zudem werden Anmerkungen eingesetzt, um den Architekten auf empfohlene Maßnahmen hinzuweisen (wie die Überprüfung einer empfohlenen Beziehung oder die Änderung nicht konformer Elemente). Diese aktualisieren sich bei jeder Interaktion des Benutzers mit der empfohlenen Beziehung.

Zusammenfassend stellt das Konzept der ANC zusammen mit seiner Tool-Architektur und dem demonstrativen Beispiel einen bedeutenden Schritt zur Automatisierung und Verbesserung der Normkonformitätsprozesse im medizinischen Sektor dar. Durch die Integration von KI mit MBSE bietet es effiziente Lösungen zur Bewältigung von Herausforderungen wie manueller Extraktion, Rückverfolgbarkeitsproblemen und Compliance-Komplexitäten, um einen nahtlosen Übergang zu standardisierten Entwicklungsprozessen für cyber-physische Systeme zu gewährleisten.

5 Success Story Mechatronic Medical Engineers GmbH

Der folgende Abschnitt ist ein Auszug der Primärveröffentlichung „Erfolgsgeschichten ASE“ [1].

„Eine sowohl effektive als auch effiziente Systementwicklung ist ohne die Implementierung von Systems Engineering sowie Advanced Engineering-Ansätzen in den Entwicklungsprozess heutzutage kaum möglich.“

Dr. Marko Coric & Dr. Albrecht Urbaszek, Mechatronic Medical Engineers GmbH

Ausgangslage und Herausforderung

Die Mechatronic Medical Engineers GmbH ist eine der Schwestergesellschaften im Verbund YOOme – your medical experts mit der BAYOONET AG als starker Muttergesellschaft. Ihren Fokus hat die Mechatronic Medical Engineers GmbH auf der Entwicklung und Fertigung von medizintechnischen Geräten und Geräten in hochregulierten Bereichen, weshalb sie ideal mit den Fähigkeiten der anderen YOOme-Gesellschaften und mit deren Schwerpunkten in Design, User Interface/User Experience (UI/UX), Apps, Digitalisierung und Regulatorik in der Medizintechnik korrespondiert. Die enge Zusammenarbeit mit seinen Kunden ermöglicht dem Unternehmen die Entwicklung anspruchsvoller und innovativer Lösungen, die höchsten Qualitätsstandards genügen. Die kontinuierliche Weiterentwicklung digitaler Arbeitsprozesse und Marktleistungen steht im Zentrum der Unternehmensaktivitäten, umgesetzt durch ein hochqualifiziertes Team aus Ingenieurinnen und Ingenieuren, Technikerinnen und Technikern sowie IT- Spezialistinnen und Spezialisten.

Die **modellbasierte Systemmodellierung** mittels Systems Modeling Language (SysML) ist in den Entwicklungsprozessen der Mechatronic Medical Engineers GmbH seit Jahrzehnten als Kernaufgabe verankert. Schwerpunkte lagen dabei bislang auf der Rückverfolgbarkeit (Traceability) von Anforderungen und Risikomaßnahmen hin zu Verifizierungstätigkeiten sowie auf einer automatisierten Dokumentationsgenerierung basierend auf der Modellierung. Im Sinne des Advanced Engineering sind mit diesen Tätigkeiten die Potenziale der Systemmodellierung im Rahmen des **Model-Based Systems Engineering** (MBSE) jedoch noch nicht ausgeschöpft. Die Mechatronic Medical Engineers GmbH hat erkannt, dass MBSE inklusive einer formalisierten Nutzung von Systemmodellen auch bei anderen Kernaufgaben der Systementwicklung wie **Requirements Engineering**, Design, Risikomanagement oder Projektmanagement gewinnbringend Anwendung finden sollte. Folge dieser Erkenntnis ist die Vision einer systemmodellgetriebenen Entwicklung, bei der sämtliche Tätigkeiten der Systementwicklung auf Basis des **Systemmodells** organisiert und durchgeführt werden – **MBSE** soll also den gesamten Entwicklungsprozess prägen. Dieses Ziel wurde im Rahmen des Verbundprojekts CyberTech verfolgt. Die größte Herausforderung bestand bislang in einem Paradigmenwechsel von der sequenziell phasengegliederten und dokumentengetriebenen hin zu einer sachlogischen agilen Systementwicklung. Infolge dieses Paradigmenwechsels hat sich schließlich ein weiterer vollzogen, der ursprünglich nicht beabsichtigt war, sondern sich vor dem übergeordneten Ziel einer modellgetriebenen Systementwicklung herauskristallisiert hat: die **funktionsgetriebene Systementwicklung**.

ASE als Lösung

Die steigende Komplexität jener Systeme, die bei der Mechatronic Medical Engineers GmbH zu entwickeln sind, erfordert neue Vorgehens- und Denkweisen. Komplexität im hier gemeinten Sinne umfasst dabei nicht nur funktionale Komplexität, also gestiegene Anzahl und Vielfalt der Systemschnittstellen, sondern auch steigende Anforderungen an den kompletten Prozess der Systementwicklung aufgrund von Compliance- und Dokumentationspflichten. Eine sowohl effektive als auch effiziente Systementwicklung ist ohne die Implementierung von **Systems Engineering-** und **Advanced Engineering-**Ansätzen in den Entwicklungsprozess heutzutage kaum möglich. Hierbei muss die Mechatronic Medical Engineers GmbH die passende Balance zwischen einem pragmatischen,

klassisch dokumentenzentrierten Ansatz und einer bei den Kunden akzeptierten Tiefe der modellbasierten Entwicklungsansätze finden, um das Potenzial von **Systems Engineering** und **Advanced Engineering** bestmöglich auszuschöpfen. Nicht bei jedem Kunden der Mechatronic Medical Engineers GmbH stößt z.B. ein durchgängig durch MBSE geprägter Entwicklungsprozess auf Begeisterung, weil dieser bei nicht umfänglicher Umsetzung im Kundenunternehmen zu Mehraufwänden und ungewohnten Vorgehensweisen führen kann.

Einführung von ASE

Zur Umsetzung der Vision einer **modellgetriebenen Systementwicklung** ist im Rahmen des Verbundprojekts CyberTech ein an die Bedürfnisse der Mechatronic Medical Engineers GmbH angepasstes V-Modell als unternehmensspezifisches Vorgehensmodell entwickelt worden, das im linken Schenkel die **Systemmodellierung** in den Mittelpunkt stellt. Das System wird dabei über vier Konkretisierungsstufen modelliert: (1) Zu Beginn erweitert eine Blackbox das klassische Kontextdiagramm um Schnittstellen zu externen Systemen, Akteuren und Umwelt. (2) Die erste Dekomposition über die Funktionsstruktur beschreibt, was unter der sprichwörtlichen Haube innerhalb des Systems vonstattengeht. Dabei wird das System über Teilfunktionen modelliert, die den kausalen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen beschreiben. (3) Das Konzipieren setzt die Funktionen über Wirkprinzipien und -strukturen in der physikalischen Struktur des Systems um. Während des Konzipierens kommen Kreativitätstechniken wie der morphologische Kasten zum Einsatz, der es ermöglicht verschiedene Wirkprinzipien durchzuspielen. (4) Anschließend erfolgt die Implementierung zu Komponenten, also das Auskonstruieren der Mechanik und Elektronik beziehungsweise die Programmierung der Software oder Informationstechnik (Komponenten M/E/I) durch die jeweilige Disziplin. Hier werden erstmals auch disziplinspezifische Architekturen wie die Softwarearchitektur, Blockschaltbilder oder Baugruppenlogiken modelliert, wobei disziplinspezifische Werkzeuge wie Computer-Aided Design (CAD), Electronic Computer-Aided Design (ECAD) oder Integrated Development Environment (IDE) zum Einsatz kommen.

Auf jeder dieser vier Stufen werden die Modellelemente durch Anforderungen beziehungsweise Designspezifikationen als Teil der Systemmodellierung beschrieben. Bei den jeweiligen Kernaufgaben der Systementwicklung werden diese Modellierungsstufen dann herangezogen und für die spezifischen Zwecke verwendet. So erfolgt beispielsweise die Identifizierung von Gefährdungen als Teilaufgabe der Risikoanalyse auf Basis der hier beschriebenen Blackbox-Modellierung. Im Kontext der Modellierung der für die Risikoeinschätzung benötigten Abfolge von Ereignissen können so sukzessive tiefere Konkretisierungsstufen herbeigezogen werden. Auf verschiedenen Integrationsstufen erfolgt im rechten Schenkel des V-Modells des Weiteren die Überführung der Ergebnisse der Systementwicklung in die reale Welt. Diese umfasst auch realitätsnahe Verhaltensmodellierungen im Sinne von Simulationen, beispielsweise Finite-Elemente-Methode (FEM), Schaltungssimulationen oder das Unit Testing, wenngleich solche Modellierungsschritte mitunter bereits Bestandteil der erwähnten Implementierungsstufe sind. Am Ende der Systementwicklung steht schließlich ein Verifizierungsprototyp (System VP), der Zulassungen durchlaufen hat und die Akzeptanzkriterien des Kunden erfüllt.

Den sachlogischen Kern des Projektmanagements bildet in der **funktionsgetriebenen Systementwicklung** die Funktionsstruktur. Die Entscheidung über Sprints wird dabei mit Blick auf mögliche Projektrisiken hinsichtlich der Zeit, der Qualität und der Kosten zur Umsetzung einzelner modellierter Teilfunktionen getroffen. In einem Prototypenplan werden die Sprints über die Teilfunktion und deren planmäßigen Reifegrad beziehungsweise deren planmäßige Integrationsstufe dokumentiert. Dies kann sich auf wichtige Funktionen auswirken, die die Benutzerfreundlichkeit beeinflussen, beispielsweise die Leichtigkeit der Bedienung oder das Nutzererlebnis, die UX. Zudem können auch solche technischen Funktionen betroffen sein, deren anforderungsgerechte Umsetzbarkeit unsicher ist. Bisweilen sind Funktionen unklar, weil Anforderungen fehlen oder widersprüchlich sind.

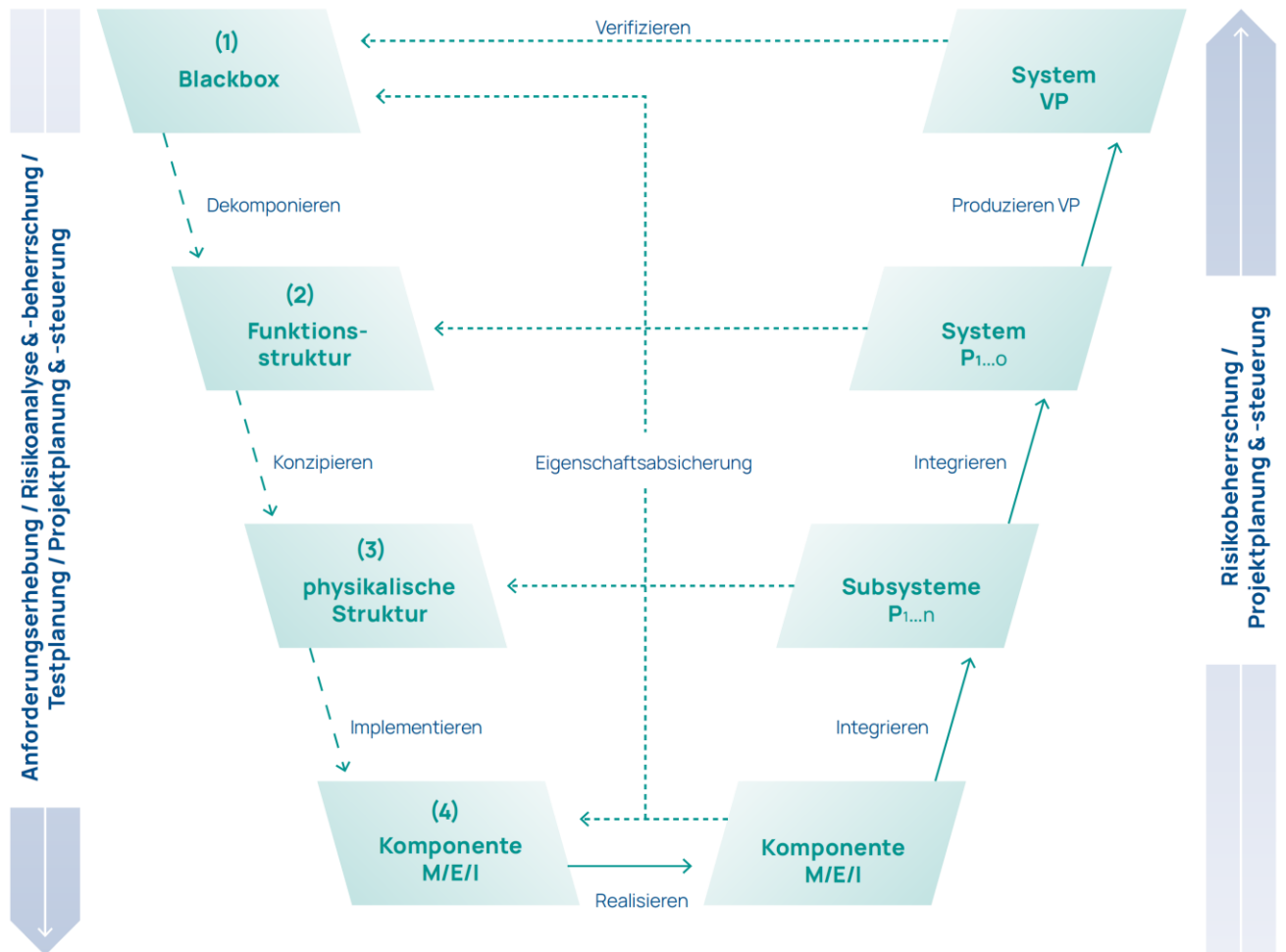


Abbildung 40 Sachlogisches V-Modell mit Darstellung der begleitenden Anforderungserhebung, Risikoanalyse & -beherrschung, Testplanung, Projektplanung & -steuerung

Lessons learned

- Grundsätzlich gilt, dass für eine gleichermaßen effektive und effiziente modellgetriebene Systementwicklung viele Faktoren zu berücksichtigen sind. Die Mechatronic Medical Engineers GmbH verfolgt die Grundidee einer modellgetriebenen Systementwicklung, allerdings können aufgrund der nicht ganz optimalen Projekt-Set-ups hinsichtlich des Grads der Umsetzung einer modellbasierten Entwicklung bei Auftragnehmer und Auftraggeber die Potenziale des Ansatzes für beide Seiten nicht gänzlich ausgeschöpft werden.
- Kundenvorgaben wie spezifische Tools oder konkrete Prozesselemente erschweren eine durchgängig modellbasierte Entwicklung. Während eine ganzheitliche Systemmodellierung inklusive Requirements Engineering und Risikomanagement, Redundanzen im Tool vermeidet, führt jeder Toolsprung, beispielsweise bei einer Kundenvorgabe zur Verwendung von klassischen Office-Lösungen für die Risikoanalyse oder die Dokumentation des Backlogs, zu Herausforderungen im Tracing.
- Besitzt der Kunde eine gewisse Affinität zur methodischen Arbeitsweise und gelingt es dem Dienstleister, in den ersten Phasen der Entwicklung des Kundenkontakts die modellgetriebene Entwicklung im Rahmen von geplanten Vorgehensweisen der Entwicklung zu platzieren, zeigen sich durchgängig sehr positive Erfahrungen. Ein herausragendes Beispiel hierfür sind die Erfolge, die die Mechatronic Medical Engineers GmbH mit dem funktionsgetriebenen Ansatz erzielen konnte. Während es in der Vergangenheit in der Integration von Mechanik, Elektronik und Software teilweise zu Kompatibilitätsproblemen gekommen war, hat die funktionsgetriebene Entwicklung die gemeinsame Arbeit sämtlicher Disziplinen für ein und dasselbe Ziel ermöglicht. Allein durch die

Einführung einer sachlogischen Ebene oberhalb der des Konzipierens beziehungsweise der der eigentlichen Lösungsfindung wurde eine disziplinübergreifende Zusammenarbeit gefördert. Es galt nicht mehr, eine Mechanik, eine Elektronik und darüber hinaus eine Software zu entwickeln, sondern stattdessen eine Funktion zu realisieren, die Mechanik, Elektronik und Software zwar benötigt, deren Integration und Zusammenspiel aber bestens funktionieren.

- Die Erfahrung zeigt, dass die deutsche Industrie – unabhängig von Unternehmensgröße oder Branche – in sehr unterschiedlichem Maße methodische Arbeitsweisen in ihre Abläufe implementiert hat. Sämtliche Tätigkeiten wie Requirements Engineering oder Systemmodellierung, werden bei unerfahrenen Anwendenden als unnötiger Offset oder als notwendiges Übel betrachtet, die lediglich Geld und Zeit kosten.

Fazit

Es ist davon auszugehen, dass ohne integrative Ansätze wie die modellbasierte Systementwicklung – insbesondere bei einer durchgängig digitalen Systementwicklung – oder ASE in Zukunft keine komplexen Produkte im Kunden-Auftragsgefüge mehr entwickelt werden können. Wenngleich diesbezüglich nach wie vor noch viel Überzeugungsarbeit zu leisten und die entsprechende Durchdringung der deutschen Industrie noch nicht abgeschlossen ist, lässt sich aus den Praxiserfahrungen der Mechatronic Medical Engineers GmbH ein eindeutig positives Fazit zur Anwendung der modellbasierten Systementwicklung ziehen, da die Vorteile überwiegen: Das sachlogische V-Modell erleichtert es, den Entwicklungsprozess an die jeweilige Aufgabenstellung des Kunden anzupassen. Wenn zudem kein Gesamtsystem zu entwickeln ist, sondern lediglich Subsysteme, Varianten, Komponenten herzustellen oder Anpassungen vorzunehmen sind, braucht es zu Beginn keine Blackbox oder Funktionsstruktur; das Projekt beginnt vielmehr mit der bereits vorhandenen physikalischen Struktur oder den Komponenten M/E/I. Das hat wiederum Auswirkungen auf die Flughöhe im Requirements Engineering und im Risikomanagement: Die definierten Konkretisierungsstufen beziehungsweise die hieraus resultierenden Ablagestrukturen helfen des Weiteren bei der Organisation der zu Beginn des Kundenauftrags vorhandenen Informationen und Aufwände. So werden beispielsweise die Spezifikationen der zu verwendenden Komponenten ohne Umweg auf Ebene der Komponenten M/E/I abgelegt. Aufseiten des Auftragnehmers – in diesem Fall der Mechatronic Medical Engineers GmbH – wird so frühzeitig sichergestellt, dass die entsprechenden Informationen den richtigen Projektbeteiligten zur Verfügung stehen; zum Kunden hin besteht zudem stets ein hohes Maß an Informationstransparenz. Eine stetige Zusammenführung der Informationen in Kombination mit der Konkretisierung des Systemmodells unterstützt zudem ihre Prüfung. Widersprüche in den Anforderungen oder weiße Flecken in der Beschreibung des zu entwickelnden Systems werden bei dieser Vorgehensweise frühzeitig sichtbar. Für die verantwortlichen Ingenieurinnen und Ingenieure bietet die modellgetriebene Systementwicklung darüber hinaus Vorteile im Tagesgeschäft. Die dazugehörige Systemmodellierung gibt einen klar definierten Betrachtungsrahmen für eine jeweilige Aufgabe vor. Beispielsweise wird für die Funktions-FMEA die oben genannte Funktionsstruktur verwendet, die Systemanforderungen beschreiben ausschließlich die Schnittstellen und Elemente der Funktionsstruktur.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Advanced Systems Engineering (ASE) ist Teil der digitalen Transformation in Entwicklung und Produktion. CyberTech prägt durch identifizierte Handlungsfelder und Lösungsbausteine nach dem Mensch-Technik-Organisation-Leitbild die zukünftige Gestaltung von Cyber-technischen Systemen und zeigt die Umsetzung am Beispiel der ASE-Erfolgsgeschichte der Firma Mechatronic Medical Engineers GmbH [1]. Nach CyberTech können Unternehmen das ASE-Vorgehensmodell anwenden oder Teilergebnisse wie das ASE-Reifegradmodell nutzen, um Advanced Systems zu entwickeln.

Die Weiterentwicklung von ASE wird durch zwei zentrale technologische Trends maßgeblich geprägt, die sich gegen Ende des Verbundprojekts verdichtet haben: die Einführung von SysML v2 und die zunehmende Integration von Large Language Models (LLMs) in den Produktentwicklungsprozess. SysML v2 ermöglicht standardisierte, maschinenlesbare Modellierung, während LLMs KI-gestützte Assistenz in der Systementwicklung bieten. Dies verändert den Entwurf, die Analyse und Optimierung von Systemarchitekturen und erfordert neue Methoden und Kompetenzen im ASE-Umfeld. Basierend auf den Erkenntnissen aus CyberTech lassen sich fünf Kernaussagen für erfolgreiches ASE ableiten:

KI-gestützte Modellierungsassistenten werden zum Standard in der Systementwicklung

Durch die Integration von LLMs in die Modellierungsumgebung von SysML v2 wird der Modellierungsprozess vereinfacht, automatisiert und zugänglicher gestaltet. Automatisierte Generierung, Validierung und Fehlererkennung verbessern die Effizienz und Qualität der Systemmodelle erheblich.

Interdisziplinäre Zusammenarbeit wird durch Advanced Systems Engineering neu definiert

Die steigende Komplexität cyber-physischer Systeme erfordert eine stärkere Vernetzung von Fachdisziplinen. ASE-Methoden müssen daher stärker auf Kollaborationsplattformen setzen, die Model-Based Systems Engineering (MBSE) mit KI-gestützten Entscheidungsprozessen verknüpfen.

Rolle des Menschen im ASE wird durch agile Lernkultur und neue Kompetenzmodelle gestärkt

Die Einführung neuer Technologien verändert Arbeitsprozesse und erfordert eine kontinuierliche Anpassung von Fähigkeiten und Methoden. Agile Lernformate und ein ASE-spezifisches Kompetenzmodell sind essenziell, um Ingenieur:innen auf diese Veränderungen vorzubereiten.

Digitale Zwillinge und Simulationen als Grundlage für ganzheitliche Systementwicklung

Die Kombination von realen Daten aus Sensornetzwerken mit digitalen Simulationsmodellen ermöglicht eine präzisere Vorhersage von Systemverhalten. Dies führt zu verbesserter Interoperabilität und einer besseren Rückverfolgbarkeit von Designentscheidungen.

Akzeptanz und Change Management sind entscheidend bei der Einführung von ASE

Die Implementierung neuer Technologien muss mit gezielten Maßnahmen zur Akzeptanzförderung einhergehen. Es bedarf hierfür künftig einer methodischen Grundlage zur Bewertung und Steuerung der Akzeptanz von KI-basierten Lösungen in der Systementwicklung.

Zukünftiger Forschungs-/Handlungsbedarf besteht in der vertieften Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den drei Leitsäulen von ASE. Im Bereich des Change Managements und der Akzeptanzbewertung sind Maßnahmen notwendig, um den Übergang zu neuen Technologien wie SysML v2 und KI-gestützten Modellierungsansätzen erfolgreich zu gestalten. Metriken müssen erforscht und praxisnah angewandt werden, um die Akzeptanz von ASE-Methoden systematisch zu bewerten.

Neben den technologischen Trends wird auch das Thema Standardisierung für ASE eine wichtige Rolle spielen. Die Arbeiten der CDT-Arbeitsgruppe (Collaborative Digital Twin) und der zukünftige Digital Data Package Standard nehmen eine besondere Rolle ein. Das Digital Data Package [42] wird im Rahmen der CASCaDE (Collaborative Artifact, Specification, Context and Data Exchange) Initiative durch die Object Management Group standardisiert. CASCaDE zielt darauf ab, die digitale Durchgängigkeit bei der Entwicklung von Advanced Systems im Produktlebenszyklus von der Konzeption bis zur Stilllegung zu erleichtern und durch einheitliche Datenformate und Ontologien zu unterstützen.

A Anhang

A.1 Abkürzungsverzeichnis

ANC	Assisted Norm Compliance
AS	Advanced System
ASE	Advanced Systems Engineering
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer-Aided Design
CPS	Cyber-Physical System
CSM	Cameo Systems Modeler
DLOQ	Dimensions of the Learning Organization Questionnaire
DZ	Digitaler Zwilling
ECAD	Electronic Computer-Aided Design
engl.	englisch
etc.	et cetera
FDA	U. S. Food and Drug Administration
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FSC	Functional Safety Concept
FTA	Fault Tree Analysis
GSN	Goal Structuring Notation
HARA	Hazard Analysis and Risk Assessment
HMI	human machine interface
i.d.R.	in der Regel
IDE	integrated development environment
KI	Künstliche Intelligenz
LLM	Large Language Model
M/E/I	Maschinenbau / Elektrotechnik / Informationstechnik
MBSE	Model-Based Systems Engineering
MKS	Mehrkörpersimulation
MTO	Mensch-Technik-Organisation
PCB	printed circuit board
PEMS	programmable electrical medical system
PESS	programmable electrical subsystem
PLM	Product Lifecycle Management
PPZ	Produkt-Prototypen-Zyklus
PZ	Physischer Zwilling

RAAML	Risk Analysis and Assessment Modeling Language
RL	Risikolevel
SE	Systems Engineering
SLP	Sensor-Layout-Plan
SysML	Systems Modeling Language
TASc-Model	Technology Acceptance Scoring Model
Tf	Teilfunktion
TL	Teillösung
TSC	Technical Safety Concept
TU	Technische Universität
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
vgl.	vergleiche
VP	Verifizierungsprototyp
z.B.	zum Beispiel

A.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Darstellung der Säulen Mensch, Technik, Organisation im Leitbild für CyberTech	IV
Abbildung 2	Säulen des integrativen Leitbilds für Advanced Systems Engineering im Verbundprojekt CyberTech mit Darstellung der Querschnittsthemen Wissensmanagement, Systems Thinking und Change Management [3]	2
Abbildung 3	Übersicht des CyberTech-Leitbilds mit Kernaspekten und Querschnittsthemen.....	4
Abbildung 4	Bestandteile eines zielgerichteten Kompetenzmanagements	5
Abbildung 5	Vorgehensmodell zur Ist-Analyse des Reifegrads für Advanced Systems Engineering	8
Abbildung 6	Betrachtete Wissensmanagement-Prozesse.....	11
Abbildung 7	Methoden und Instrumente im Wissensmanagement angelehnt an Akademie Management und Politik [38]	12
Abbildung 8	Modell zur Quantifizierung der voraussichtlichen Akzeptanz bei Einführung neuer ASE-Methoden/Tools [40].....	13
Abbildung 9	Darstellung betrachteter Lösungsansätze für die Durchführung von Risiko- und Sicherheitsanalysen im Kontext des Advanced Systems Engineering	15
Abbildung 10	Anknüpfungspunkte der MBSE-basierten Entwicklung vom ASE an die exemplarische Durchführung einer FMEA nach Referenzprozessaktivitäten	16
Abbildung 11	Darstellung der Verlinkungen zwischen System Domain, Safety Domain und Discipline-Specific Domain des generischen Informationsmodells	18
Abbildung 12	Darstellung der Ableitung eines spezifischen Informationsmodells aus dem generischen Informationsmodell als Blaupause	19
Abbildung 13	Zuordnung der spezifischen Engineering Artefakte für den Model-Based Safety Analysis Anwendungsfall (rechts) zu den Artefakten aus dem generischen Informationsmodell (links) .	19
Abbildung 14	Auszug der Evaluationsmatrix zur Bewertung verschiedener Traceability-Lösungen für ASE .	22
Abbildung 15	Auszug aus der Digital Data Package Empfehlung [42] zur Verknüpfung von Entwicklungsartefakten	23
Abbildung 16	Darstellung einer Ansicht im Digital Data Package Manager für ein Anwendungsbeispiel	24
Abbildung 17	ASE-spezifisches Kompetenzmodell m Rahmen von CyberTech	24
Abbildung 18	Maßnahmen zur Förderung einer agilen Lernkultur	25
Abbildung 19	Bildaufnahme des ASE-Lernlabors	26
Abbildung 20	Ablaufstruktur des Tutoriums	26
Abbildung 21	Reifegradmodell digitale für Systemmodelle	27
Abbildung 22	Leitfaden für den Sensor-Layout-Plan [44]	28
Abbildung 23	Reifegradmodell für Sensorik.....	29
Abbildung 24	Zwiebelmodell Advanced Systems Engineering	31
Abbildung 25	Darstellung des Demonstratorsystems als Advanced System	32
Abbildung 26	Anwendungsfall 3D-Druck	33
Abbildung 27	Advanced Systems 3D-Druck	33
Abbildung 28	V-Modell für Advanced Systems Engineering im Rahmen von CyberTech	34
Abbildung 29	Partialmodell der Blackbox	35
Abbildung 30	Blackbox des Roboterarms als Teil des Demonstratorsystems.....	35
Abbildung 31	Schnittstellen des Roboterarms zu Akteuren, anderen Systemen und der Umwelt	36
Abbildung 32	Partialmodell der Funktionsstruktur	36
Abbildung 33	Funktionsstruktur des Roboterarms.....	37
Abbildung 34	Der morphologische Kasten als Beispiel zum Konzipieren der physikalischen Struktur	37
Abbildung 35	Physikalische Struktur des Roboterarms	38
Abbildung 36	Zuordnung der Lasten zu den Systemmodellelementen des Roboterarms	39
Abbildung 37	Die vier Anwendungsfälle des Assisted Norm Compliance Konzepts	41
Abbildung 38	Die hochrangige Tool-Architektur für die ANC-Lösung	42
Abbildung 39	Demonstration der PDF-Anmerkung, der extrahierten Normmodell-Elemente in Cameo Systems Modeler und der Normkonformität im ANC-Plugin.....	43
Abbildung 40	Sachlogisches V-Modell mit Darstellung der begleitenden Anforderungserhebung, Risikoanalyse & -beherrschung, Testplanung, Projektplanung & -steuerung.....	47

A.3 Glossar

ANFORDERUNGS-MANAGEMENT	„Maßnahmen, die notwendig sind, um [...] Anforderungen zu strukturieren, hinsichtlich Fakten und Annahmen zu unterscheiden, Annahmen nachzuverfolgen, anwendungsbezogen aufzubereiten sowie konsistent zu halten und an die von Anforderungsänderungen betroffenen Entwicklungsteams weiterzuleiten und nachzuverfolgen [...]“	VDI 2206 (2021)
BASISSICHERHEIT	„Freiheit von unvertretbarem, durch physikalische Gefährdungen direkt verursachtem Risiko, wenn das ME-Gerät im Normalzustand und bei Ersten Fehlern benutzt wird“	DIN EN 60601-1 (2022)
DEKOMPOSITION	„schrittweise erfolgende Untergliederung von Funktionen und/oder Hardware eines [...] Systems innerhalb der Produktentwicklung“	VDI 2206 (2021)
DEKOMPOSITION	schrittweise erfolgende Untergliederung von Funktionen und/oder Hardware eines →Systems innerhalb der Produktentwicklung	VDI 2206 (2021)
EIGENSCHAFTS-ABSICHERUNG	„Der Entwurfsfortschritt muss fortlaufend anhand des spezifizierten Lösungskonzepts und der Anforderungen überprüft werden. Es ist sicherzustellen, dass die tatsächlichen mit den gewünschten Systemeigenschaften übereinstimmen.“	VDI 2206 (2004)
ENTWICKLUNGSEINGABE	Sämtliche Informationen, die das zu entwickelnde Produkt betreffen und vom Kunden, Normen, Gesetzen oder Richtlinien oder Dritten in die Produktentwicklung eingehen.	ISO 13485 (2021)
GEFÄHRDUNG	„potenzielle Schadensquelle“	ISO 12100 (2010)
GEFÄHRDUNGSSITUATION	„Sachlage, bei der eine Person mindestens einer Gefährdung ausgesetzt ist. Diese Situation kann unmittelbar oder über einen Zeitraum hinweg zu einem [Schaden] führen“ „Umstände, unter denen Menschen, Güter oder die Umwelt einer oder mehreren [Gefährdungen] ausgesetzt sind“	ISO 12100 (2010)
INTEGRATION	„Zusammenführung einer Menge von Systemelementen zu einem realisierten System in einem definierten Reifegrad (z.B. [...] A/B/C/D-Muster)“	VDI 2206 (2021)
LASTENHEFT	„vom Auftraggeber festgelegte Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers innerhalb eines Auftrages“	DIN 69901-5 (2009)
MBSE	„formalisierte Anwendung der Modellierung zur Unterstützung von Systemanforderungen, Entwurfs-, Analyse-, Verifikations- und Validierungsaktivitäten, die in der Konzeptentwurfsphase beginnen und sich über die gesamte Entwicklung und spätere Lebenszyklusphasen erstrecken/fortsetzen“	VDI 2206 (2021)
PFLICHTENHEFT	„vom Auftragnehmer erarbeiteten Realisierungsvorgaben aufgrund der Umsetzung des vom Auftraggeber vorgegebenen Lastenhefts“	DIN 69901-5 (2009)
RISIKO	„Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines [Schadens] und seines Schadensausmaßes“ „Kombination der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines [Schadens] und des Schweregrades dieses [Schadens]“ „Kombination aus Festlegung der Grenzen der Maschine, Identifizierung der [Gefährdungen] und [Risikoeinschätzung]“	ISO 12100 (2010)
RISIKOANALYSE	„systematische Verwendung von verfügbaren Informationen zur Identifizierung von [Gefährdungen] und Einschätzung des [Risikos]“	ISO 12100 (2010)

E

RISIKO-BEHERRSCHUNG	„Prozess [...], in dem Entscheidungen getroffen und Maßnahmen implementiert werden, durch die Risiken [...] auf festgelegte Bereiche verringert oder auf diesen gehalten werden“	ISO 14971 (2020)
RISIKO-BEURTEILUNG	„Gesamtheit des Prozesses [...], der Risikoanalyse [...] und Risikobewertung (3.20) umfasst“	ISO 14971 (2020)
RISIKO-EINSCHÄTZUNG	„Bestimmung des wahrscheinlichen Ausmaßes eines [Schadens] und der Wahrscheinlichkeit seines Eintritts“	ISO 12100 (2010)
	„Prozess, in dem der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines [Schadens] und dem Schweregrad dieses [Schadens] Werte zugeordnet werden“	
	„Prozess [...], in dem der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens [...] und dem Schweregrad [...] dieses Schadens Werte zugeordnet werden“	ISO 14971 (2020)
RISIKO-MINIMIERENDE MAßNAHMEN	sind Maßnahmen, die während der Risikobeherrschung getroffen werden, um durch das Minimieren - der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Gefährdungssituation P1 und/oder - der Wahrscheinlichkeit, dass die Gefährdungssituation zum Schaden führt P2 und/oder - des Schweregrads des Schadens das Risiko minimieren.	ISO 14971 (2020)
SCHADEN	„physische Verletzung oder Schädigung der Gesundheit“ „Verletzung oder Schädigung der Gesundheit von Menschen oder Schädigung von Gütern oder der Umwelt“	ISO 12100 (2010)
VALIDIERUNG	Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises [...], dass die Anforderungen [...] für einen spezifischen beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind.	ISO 9000 (2015)
VERIFIZIERUNG	„Bestätigung durch einen objektiven Nachweis, dass Anforderungen erfüllt werden“	ISO 9000 (2015)
WESENTLICHE LEISTUNGSMERKMALE	„Leistungsmerkmal einer klinischen Funktion, die sich nicht auf die Basissicherheit bezieht, bei dem der Verlust oder die Verschlechterung über die vom Hersteller spezifizierten Grenzen hinaus zu einem unvertretbaren Risiko führt“	DIN EN 60601-1 (2022)
ANFORDERUNGS-MANAGEMENT	„Maßnahmen, die notwendig sind, um [...] Anforderungen zu strukturieren, hinsichtlich Fakten und Annahmen zu unterscheiden, Annahmen nachzuverfolgen, anwendungsbezogen aufzubereiten sowie konsistent zu halten und an die von Anforderungs-änderungen betroffenen Entwicklungsteams weiter-zuleiten und nachzuverfolgen [...]“	VDI 2206 (2021)
BASISSICHERHEIT	„Freiheit von unvertretbarem, durch physikalische Gefährdungen direkt verursachtem Risiko, wenn das ME-Gerät im Normalzustand und bei Ersten Fehlern benutzt wird“	DIN EN 60601-1 (2022)
DEKOMPOSITION	schrittweise erfolgende Untergliederung von Funktionen und/oder Hardware eines →Systems innerhalb der Produktentwicklung	VDI 2206 (2021)
EIGENSCHAFTS-ABSICHERUNG	„Der Entwurfsfortschritt muss fortlaufend anhand des spezifizierten Lösungskonzepts und der Anforderungen überprüft werden. Es ist sicherzustellen, dass die tatsächlichen mit den gewünschten Systemeigenschaften übereinstimmen.“	VDI 2206 (2004)

A.4 Veröffentlichungen und Vorträge

B. Röhm, B. Emich, R. Anderl: „Approach of Simulation Data Management for the Application of the Digital Simulation Twin“, 31st CIRP Design Conference 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.098>.

Y. Wang, T. Steinbach, J. Klein, R. Anderl: “Integration of model based system engineering into the digital twin concept“, 31st CIRP Design Conference 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.003>.

J. Olbort, B. Röhm, V. Kutscher, R. Anderl: “Integration of Communication using OPC UA in MBSE for the Development of Cyber-Physical Systems“, 32nd CIRP Design Conference 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.241>.

L. Humpert, B. Röhm, H. Anacker, R. Dumitrescu, R. Anderl: “Method for direct end customer integration into the agile product development“, 32nd CIRP Design Conference 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.239>.

B. Röhm, T. Steinbach, R. Anderl “Concept for the Selection and Positioning of Sensor Technology in the Development of Advanced Systems“, Human Factors in Software and Systems Engineering, Vol. 61, 2022, pp. 15-20, doi: <https://doi.org/10.54941/ahfe1002517>.

T. Steinbach, B. Röhm, R. Anderl, "Development of a Guideline for the Sensor Layout Plan“, Production Management and Process Control, Vol. 36, pp. 56–61, 2022, <https://doi.org/10.54941/ahfe1001619>.

T. Steinbach, F. Parthey, M. Weidmann, R. Anderl, “Development of a Potential Analysis for the Introduction of Sustainable Digitization Solutions“, Manufacturing Driving Circular Economy, pp.559-566, 2023, https://doi.org/10.1007/978-3-031-28839-5_63.

B. Röhm, R. Anderl, B. Schleich, "Development of an Information Model for Simulation Data Management in the Digital Twin“, 33rd CIRP Design Conference 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.120>.

O. Karasek, Y. Arslanparcasi, “Conceptualizing an Academic Teaching and Learning Laboratory for Systems Engineering“, Training, Education, and Learning Sciences, Vol. 109, pp. 134-141, 2023, doi: <https://doi.org/10.54941/ahfe1003159>.

Y. Arslanparcasi, O. Karasek, „Kompetenzentwicklung in Systems Engineering“, Tagungsband zum 69. Arbeitswissenschaftlichen Kongress, 2023, url: <https://community.advanced-systems-engineering.de/news/competence-development-in-systems-engineering/EDPG3J8PKI>.

M. Coric, P. Joisten, B. Schleich: „Leitbild und Status zum Advanced Systems Engineering für die Entwicklung von Cyber-technischen Systemen“, Vortrag, Konferenz system:ability 2023.

I. Ghanawi, M. W. Chami, M. Chami, M. Coric, N. Abdoun, “Integrating AI with MBSE for Data Extraction from Medical Standards“, 34th INCOSE International Symposium 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/iis2.13212>.

M. Coric, A. Urbaszek, „Modellgetriebene Systementwicklung - Mechatronic Medical Engineers GmbH“, "Erfolgsgeschichten" (herausgegeben vom Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM, Paderborn), Erscheinungsdatum offen

S. Kleiner, R. Anderl, “Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-Technischen Systemen“, Vortrag, prostep ivip Symposium 2022, 09.06.2022.

O. Bleisinger, K. Mai, “MBSE Best Practices – Erfahrungsaustausch zur Einführung und Akzeptanz von MBSE in der Organisation“, Workshop, Engineering Process Day 2023.

J. Kaspar, N. Cioroi, M. Bauch, S. Kleiner, "Guidelines for systematic functional decomposition in model-based systems engineering“, IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), Vienna, Austria, 2022, pp. 1-8, doi: <https://doi.org/10.1109/ISSE54508.2022.10005482>.

S. Kleiner, „Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen“, AdWiSE ASE Experten- und Dialogkreis, Berlin, 13.09.2023.

E. Marzocchi, O. Bleisinger, „Introducing MBSE for Combination Product Development“, Vortrag, Swiss Systems Engineering Day 2023.

S. Kleiner, O. Bleisinger, A. Mechergui, N. Cioroi, J. Krautkremer, "Ein generisches Informationsmodell für die durchgängige IT Toolchains im Kontext des Model-Based Systems Engineering", Tag des Systems Engineering 2023, url: https://www.ase-cybertech.de/wp-content/uploads/2024/08/TdSE23_Ein-generisches-Informationsmodell-fuer-IT-Toolchains-im-Kontext-des-Model-Based-Systems-Engineering_V2.3.pdf.

S. Kleiner, B. Schleich, „Advanced Systems Engineering: Model-Based Systems Engineering for Cyber-Technical Systems“, Vortrag, prostep ivip Symposium 2024, 11.04.2024.

M. Kirsch, "Weaving the Digital Thread Across Standards: How the Digital Data Package Leverages Collaboration", Workshop, prostep ivip Symposium 2024.

S. Kleiner, O. Bleisinger, B. Schleich, A. Anderl, T. Steinbach, B. Röhm, O. Karasek, Y. Arslanparcasi, M. Chami, A. Urbaszek, G. Eßl, M. Coric, "CyberTech WhitePaper – Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen", 2024, doi: <https://doi.org/10.26083/tuprints-00028310>.

S. Kleiner, M. Kirsch, "How Digital Data Packages Support Model-Based Systems Engineering & Supply Chain Excellence in the Future", Vortrag, 3D Collaboration & Interoperability Congress, Golden; 2024

O. Bleisinger, K. Mai, "Die MBSE Journey – Ein Leitfaden für erfolgreiches Change Management im Model-Based Systems Engineering", Workshop, Engineering Process Day 2024.

K. Mai, C. Sinnwell, "Model-based Systems Engineering - Transformation im Engineering braucht ein Eco-System", Vortrag, Siemens PLM Connection 2024.

O. Bleisinger, S. Kleiner, K. Avdejuk, B. Röhm, T. Steinbach, Y. Arslanparcasi, O. Karasek, „Ein Leitbild zu Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen“, Tag des Systems Engineering 2024.

M. Bauch, M. Hohmann, O. Bleisinger, K. Mai, „Exkursion SysMLv2“, Workshop, Tag des Systems Engineering 2024.

S. Kleiner (Hrsg.), O. Bleisinger (Hrsg.), B. Schleich, A. Anderl, T. Steinbach, B. Röhm, O. Karasek, Y. Arslanparcasi, M. Chami, A. Urbaszek, G. Eßl, M. Coric, "Abschlussbericht CyberTech – Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen", Erscheinungsdatum 2025, ISBN: 978-3-00-079013-3.

A.5 Quellenverzeichnis

- [1] Erfolgsgeschichten im Advanced Systems Engineering, url: https://www.advanced-systems-engineering.de/wp-content/uploads/241031_FHI_ASE_Erfolgsgeschichten-Broschuere_WEB_RZ.pdf
- [2] Dumitrescu, R., Riedel, O., Gausemeier, J., Albers, A., & Stark, R. (2021). Advanced Systems Engineering Wertschöpfung im Wandel: Engineering in Deutschland - Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft. Fraunhofer IEM.
- [3] Bleisinger, O., Kleiner, S., Avdejuk, K., Röhm, B., Steinbach, T., Arslanparcasi, Y., Karasek, O. (2024). „Ein Leitbild zu Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen“, Tag des Systems Engineering 2024.
- [4] Ulich, E. (2013). „Arbeitssysteme als Soziotechnische Systeme – eine Erinnerung, Psychologie des Alltagshandelns“, Jg. 6, Nr. 1, S. 4-12.
- [5] Strohm, O., Ulich, E. (1997). „Unternehmen arbeitspsychologisch bewerten. Ein Mehr-Ebenen-Ansatz unter besonderer Berücksichtigung von Mensch, Technik und Organisation“, Schriftenreihe Mensch, Technik, Organisation, Band 10, Zürich: vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich.
- [6] Porras, J., Robertson, P. (1992). „Organizational development: theory, practice, and research“, Handbook of Industrial and Organizational Psychology, M. Dunette, Hg., L. Hough Hg., Palo Alto: Consulting Psychologist Press Inc, S. 719-822.
- [7] Haberfellner, R., de Weck, O., Fricke, E., & Vössner, S. (2021). Systems engineering. Fundamentals and Applications. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13431-0>.
- [8] International Council on Systems Engineering (INCOSE), Hrsg. (2021). „Systems Engineering Vision 2035: Engineering Solutions for a Better World“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.incose.org/about-systems-engineering/se-vision-2035>.
- [9] Dumitrescu, R., Albers, A., Riedel, O., Stark, R., Gausemeier, J. (2021): Engineering in Deutschland – Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft. Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering - acatech. Hrsg. v. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Kooperationspublikationen). Online verfügbar unter Engineering in Deutschland – Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft. Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering - acatech , zuletzt aktualisiert am 08.04.2024, zuletzt geprüft am 21.05.2024.
- [10] Czaja, A., Amon, M., Dumitrescu, R., Lampert, R., & Gaarman, D. (2017). Bedarfsgerechter SE Prozess für einen mittelständischen Hersteller von Automatisierungskomponenten. In S.O. Schulze, C. Tschirner, R. Kaffenberger & S. Ackva (Hrsg.), Tag des Systems Engineering. Paderborn, 8. - 10. November 2017. Carl Hanser Verlag.
- [11] Gräßler, I., & Oleff, C. (2022). Systems Engineering: Verstehen und industriell umsetzen. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-64517-8>.
- [12] Glück, M. (2022). Agile Innovation - Mit neuem Schwung zum Erfolg. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37957-5>.
- [13] Jacobs, J. C., Kagermann, H., Roehl, H., & Spath, D. (2021). Dynamisches Kompetenzmanagement – Kompetenzbedarfe früherkennen, passgenaue Angebote ableiten. Ein Praxis-Leitfaden des Human-Resources-Kreises von acatech. acatech.
- [14] Arslanparcasi, Y., & Karasek, O. (2023). Kompetenzentwicklung in Systems Engineering. Nachhaltig Arbeiten und Lernen - Analyse und Gestaltung lernförderlicher und nachhaltiger Arbeitssysteme und Arbeits- und Lernprozesse, Tagungsband zum 69. Arbeitswissenschaftlichen Kongress. GfA-Press.
- [15] Sheard, S. A. (1996). Twelve systems engineering roles. INCOSE International Symposium, 6(1), 478–485. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.1996.tb02042.x>.
- [16] INCOSE (2018). Systems Engineering Competency Framework. INCOSE-TP-2018-002-01.1. International Council on Systems Engineering.

- [17] Heyse, V. & Erpenbeck, J. (2010). Kompetenztraining. Informations- und Trainingsprogramme (2., überarb. u. erw. Aufl.). Schäffer-Poeschel.
- [18] Mayring, P. (2015). Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken (12., überarbeitete Auflage). Beltz Verlag.
- [19] Arslanparcasi, Y. (2022). Von der klassischen Weiterbildung zur virtuellen Lernkultur. Arbeit und Digitalisierung. Warum Digitalisierung besser mit einer partizipativen Arbeitskultur gelingt (S. 24–26). Begleitforschung Mittelstand-Digital.
- [20] Marsick, V. J., & Watkins, K. E. (2003). Demonstrating the Value of an Organization's Learning Culture: The Dimensions of the Learning Organization Questionnaire. *Advances in Developing Human Resources*, 5(2), 132–151. <https://doi.org/10.1177/1523422303005002002>.
- [21] Gehlen-Baum, V., & Illi, M. (2019). Agiles Lernen mit den Mitarbeitern im Zentrum—Neue Formen der betrieblichen Bildung. *Wirtschaftspsychologie aktuell*, 2, 43–46.
- [22] Kauffeld, S., & Reining, N. (2019). Agiles Arbeiten in der Industrie 4.0: Herausforderungen für die Hochschullehre der Zukunft am Beispiel einer Lehr-Lernfabrik. In S. Dany, T. Haertel, S. Heix, & C. Terkowsky (Hrsg.), *Hochschullehre & Industrie 4.0: Herausforderungen – Lösungen - Perspektiven* (S. 137–152). wbv Publikation.
- [23] Tekkaya, A. E., Wilkesmann, U., Terkowsky, C., Pleul, C., Radtke, M., & Maevus, F. (2016). Das Labor in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung – Zukunftsorientierte Ansätze aus dem Projekt IngLab. *acatech*.
- [24] Terkowsky, C., May, D., Frye, S. (2019). Labordidaktik: Kompetenzen für die Arbeitswelt 4.0. In S. Dany, T. Haertel, S. Heix, & C. Terkowsky (Hrsg.) *Hochschullehre & Industrie 4.0: Herausforderungen - Lösungen - Perspektiven* (S. 89–104). wbv Publikation.
- [25] Biggs, J. (1996). Enhancing Teaching through Constructive Alignment. *Higher Education*, 32(2), 347–364.
- [26] Biggs, J. (2014). Constructive alignment in university teaching. *Reviews of Higher Education*, 1, 5–22.
- [27] Mappes, T. & Klink, K. (2011) Constructive Alignment interdisziplinär – Ein Beispiel aus dem Maschinenbau. In: Berendt, B., Fleischmann, A., Schaper, N., Scczyrba, B., Wiemer, M. & Wildt, J. (Hrsg.) *Neues Handbuch Hochschullehre*.
- [28] Stark, Rainer; Anderl, Reiner; Thoben, Klaus-Dieter; Wartzack, Sandro (2020): WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. In: *ZWF* 115, S. 47–50. DOI: 10.3139/104.112311.
- [29] Röhm, Benjamin; Emich, Bennett; Anderl, Reiner (2021): Approach of simulation data management for the application of the digital simulation twin. In: *Procedia CIRP* 100, S. 421–426. DOI: 10.1016/j.procir.2021.05.098.
- [30] Roehm, Benjamin; Anderl, Reiner; Schleich, Benjamin (2023): Development of an Information Model for Simulation Data Management in the Digital Twin. In: *Procedia CIRP* 119, S. 681–686. DOI: 10.1016/j.procir.2023.03.120.
- [31] DIN Deutsches Institut für Normung (2009). DIN 69901-1: Project management systems - Part 1: Fundamentals, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [32] VDI Verein Deutscher Ingenieure (2021). „VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“, Düsseldorf: VDI Verlag.
- [33] Eigner, M., Stelzer, R. (2009). „Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management“, Berlin: Springer, 2009, ISBN 978-3-540-44373-5.
- [34] Kleiner, S., Kirsch, M. (2024). „How Digital Data Packages Support Model-Based Systems Engineering & Supply Chain Excellence in the Future“, 3D Collaboration & Interoperability Congress, Golden.
- [35] Chami, M., Abdoun, N., Bruel, J.-M. (2022). „Artificial Intelligence Capabilities for Effective Model-Based Systems Engineering: A Vision Paper“, INCOSE International Symposium, S. 1160-1174, <https://doi.org/10.1002/iis2.12988>.
- [36] North, K. (2021). „Wissensorientierte Unternehmensführung: Wissensmanagement im digitalen Wandel“, Springer Gabler Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32771-2>.

-
- [37] Probst, G., Raub, S., & Romhardt, K. (2012). „Wissen managen (7. Auflage)“, Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-4563-1>.
- [38] MuP - Akademie Management und Politik (2007). „Wissensmanagement. Verfahren, Instrumente“, Beispiele für Vereine und Verbände. Friedrich-Ebert-Stiftung.
- [39] Kotter, J. P. (2012). „Leading Change“, Harvard Business Review Press.
- [40] Heinrich, J., Bleisinger, O., Avdejuk, K., et al. (2024). „Das Technology Acceptance Scoring Model (TASc-Model) für die Einführung von Model-Based Systems Engineering“, In: Willke, D., Koch, W., Kaffenberger, R., & Dreiseitl, S. (Hrsg.), Tag des Systems Engineering 2024: Tagungsband Leipzig, 13.–15. November 2024. Gesellschaft für Systems Engineering. ISBN: 391064905X.
- [41] Serman, J. D. (2000). „Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World“, McGraw-Hill.
- [42] prostep ivip Association, Hrsg., „prostep ivip Recommendation PSI 30 – Digital Data Package Recommendation Version 1“, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ps-ent-2023.de/fileadmin/prod-download/DDP-Recommendation_V2.zip.
- [43] Riedel, O.; Kürümlüoğlu, M.; Schneider, B. (2019). „Advanced Systems Engineering. In: Dieter Spath und Engelbert Westkämper (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung“. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI Springer Reference), S. 1–24. Online verfügbar unter https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-642-45370-0_132-1.
- [44] Steinbach, T.; Roehm, B.; Anderl, R. (2022). „Development of a Guideline for the Sensor Layout Plan“. In: Production Management and Process Control. 13th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2022), July 24-28, 2022: AHFE International (AHFE International).
- [45] Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., Hompel, M., Wahlster, W. (2017). „Industrie 4.0 Maturity Index – Managing the Digital Transformation of Companies“. Hg. v. acatech – National Academy of Science and Engineering. Online verfügbar unter Industrie 4.0 Maturity Index – Managing the Digital Transformation of Companies - acatech - National Academy of Science and Engineering, zuletzt geprüft am 08.02.2022.
- [46] T. Steinbach, F. Parthey, M. Weidmann, R. Anderl (2023). „Development of a Potential Analysis for the Introduction of Sustainable Digitization Solutions“, Manufacturing Driving Circular Economy, pp.559–566, https://doi.org/10.1007/978-3-031-28839-5_63.
- [47] Singam, C.; Carter, J. (2024). „Model-Based Systems Engineering (MBSE) - SEBoK“. Online verfügbar unter [https://sebokwiki.org/w/index.php?title=Model-Based_Systems_Engineering_\(MBSE\)&oldid=69966](https://sebokwiki.org/w/index.php?title=Model-Based_Systems_Engineering_(MBSE)&oldid=69966), zuletzt aktualisiert am 07.05.2024, zuletzt geprüft am 07.05.2024.
- [48] Wymore, A. W. (1993): „Model-based systems engineering. An introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricategory theory of system design“. Boca Raton: CRC Press (Systems engineering series).
- [49] Abramovici, M., Gebus, P., Savarino, P. (2018). „Engineering smarter Produkte und Services. Plattform Industrie 4.0 STUDIE“. Hg. v. Abramovici Michael und acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. Plattform Industrie 4.0. München. Online verfügbar unter Engineering smarter Produkte und Services , zuletzt geprüft am 09.02.2022.
- [50] Schäfer, A. (2020). „Digitalisierung und Digitaler Zwilling im Realitäts-Check“. In: ZWF 115 (special), S. 19–22. <https://doi.org/10.3139/104.112334>.

**CyberTech – Advanced Systems
Engineering für die Arbeitsgestaltung
von Cyber-technischen Systemen**

KONSORTIALFÜHRER

Dr. Sven Kleiner
:em engineering methods AG
Rheinstraße 97
64295 Darmstadt
info@em.ag | +49 6151 7376-100
www.ase-cybertech.de

ISBN 978-3-00-079013-3

© :em engineering methods AG, März 2025