

Gemeinsamer Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von
Cyber-technischen Systemen



in der Fördermaßnahme

„Beherrschung der Komplexität soziotechnischer Systeme –
Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering für die Wertschöpfung
von morgen (PDA_ASE)“
im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung
und Arbeit“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)

Autor(en)

Technische Universität Darmstadt, PLCM & IAD
Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt
schleich@plcm.tu-darmstadt.de

Projektlaufzeit: 01.02.2021 – 30.06.2024

Erstellungsdatum: 04.12.2024

Förderkennzeichen **02J19B010, 02J19B011, 02J19B012 und 02J19B015**

Projektpartner

:em engineering methods AG
Mechatronic Medical Engineers GmbH
Technische Universität Darmstadt, PLCM & IAD
SysDICE GmbH

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.



Inhaltsverzeichnis

I.	Teil I Kurzfassung	3
I.1	Aufgabenstellung	3
I.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	3
I.3	Wesentliche Ergebnisse im Überblick.....	3
II.	Teil II Eingehende Darstellung	5
II.1	Motivation und Aufgabenstellung	5
II.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	8
II.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	17
II.4	Erzielte Ergebnisse	18
II.5	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	24
II.6	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse 25	
II.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes....	28
II.8	Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.	29
II.9	Literaturverzeichnis	30

I. Teil I Kurzfassung

I.1 Aufgabenstellung

Die Digitalisierung erfordert eine vollständig digitale und standardisierte Beschreibung komplexer Systeme und Produkte, um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können. Hieraus resultieren neue Herausforderungen an die Systementwicklung, wie vernetzte Entwicklungsarbeit und angepasste, agile Arbeitsorganisationen. Es fehlen jedoch geeignete Methoden und Befähigungskonzepte im Kontext des Advanced Systems Engineering (ASE), um vernetzte komplexe Systeme zu entwickeln. Das Verbundprojekt CyberTech betrachtet die Produktentwicklung als soziotechnisches System nach dem MTO-Ansatz (Mensch-Technik-Organisation) und zielt darauf ab, die Informationsintegration in der Produktentwicklung zu unterstützen. Eine systematische Erarbeitung neuer Arbeitsformen sowie die Entwicklung von Befähigungskonzepten für Unternehmen soll die Einführung von ASE erleichtern. Ein Sensorbebauungsplan und ein Digitaler Zwilling wurden anhand eines Demonstrators exemplarisch umgesetzt, um die Produktoptimierung und Prozesskostensenkung zu unterstützen.

Neuere Arbeitsformen wie Scrum sowie der Einsatz von Model-Based Systems Engineering (MBSE) und disziplinübergreifenden Informationsmodellen werden erforscht und eingesetzt. Der Ansatz des Advanced Systems Engineering bietet neue Möglichkeiten zur Gestaltung von datengetriebenen Arbeitsprozessen und Organisationen. Das Verbundprojekt "CyberTech – Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen" strebt daher eine neue Arbeitsgestaltung für Produktentwicklungsprozesse an. Wichtige technische Merkmale sind:

- Übergang zu digitalen Modellen in der Produktentwicklung
- Integration von Dienstleistungen und neuen Geschäftsmodellen
- Nutzung datengetriebener Erkenntnisse durch Cyber-physische Systeme
- Informationsintegration mittels KI-gestützter digitaler Zwillinge
- Befähigung von Mitarbeitenden zur agilen Produktentwicklung

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Zur Entwicklung komplexer technischer Systeme (Produkte) und dazugehöriger Dienstleistungen arbeiten unterschiedliche Akteure unternehmensintern und -übergreifend zusammen. Das Vorhaben „CyberTech – Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen“ zielt auf eine neue Arbeitsgestaltung für zukünftige Produktentwicklungsprozesse ab. Die Herausforderungen bei der Gestaltung sind zum einen, dass neuartige Methoden und Hilfsmittel für eine durchgängige und integrative Herangehensweise in der Produktentwicklung erarbeitet werden müssen. Zum anderen gilt es, das Potential einer digitalen und agilen Kollaboration in etablierte Aufbau- und Ablauforganisationen einzuführen. Hierbei ist der Mensch bei allen Aktivitäten zu berücksichtigen. Klassische Vorgehensmodelle des Systems Engineering sind nicht auf agile Kollaboration und den Faktor Mensch ausgerichtet. Darüber hinaus gibt es organisatorische Rahmenbedingungen und Herausforderungen, insbesondere die Durchgängigkeit der digitalen Produktentwicklung und zudem der Einsatz neuer Technologien wie KI-Assistenzen, die im Systems Engineering bisher nicht berücksichtigt werden. Zusammenfassend zeigt sich, dass die Bewältigung der Komplexität moderner Arbeits- und Systemumgebungen eine holistische Betrachtung technologischer Innovationen, organisatorischer Anpassungen und menschlicher Aspekte integrieren muss. Eine detaillierte Darstellung des Stands der Technik und Wissenschaft ist Abschnitt II.2 zu entnehmen.

I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Zentrales Ergebnis und zugleich strukturierendes Element für die einzelnen Arbeitspaket-spezifischen Projektergebnisse ist das Leitbild für ASE nach dem MTO-Ansatz. Die erste Detaillierungsstufe des Leitbilds ist Abb. 1 zu entnehmen. Zur besseren Übersicht werden nachfolgend die Ergebnisse des Verbundprojekts den Säulen des Leitbilds zugeordnet. Eine ausführliche Darstellung der Beiträge der einzelnen Verbundpartner entlang der Arbeitspaketstruktur ist Teil II dieses Sachberichts zum Verwendungsnachweis zu entnehmen.

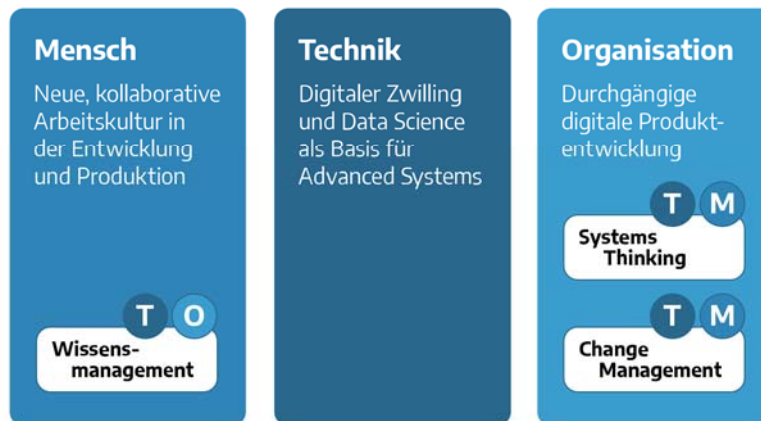


Abbildung 1 Säulen des integrativen Leitbilds für Advanced Systems Engineering in CyberTech

Darüber hinaus wurden übergreifende Arbeiten für Organisation, Berichtswesen sowie Dissemination durchgeführt. Neben der Beteiligung des Verbunds an den von AdWiSE organisierten Arbeitsgruppen, wurde zusätzliche Gremienarbeit durchgeführt, beispielweise bei der acatech ASE, prostep ivip, diversen Anwendungsgruppen wie z.B. der TAK SE (Technischer Arbeitskreis Systems Engineering) und der GfSE (Gesellschaft für Systems Engineering). Als weiteres Ergebnis entstanden daher zahlreiche Veröffentlichungen, die samt Zuordnung der Autoren bzw. Verbundpartner Abschnitt II.8. dieses Sachberichts entnommen werden können.

Wesentliche Ergebnisse des Verbundprojekts

Säule Mensch

- ASE-spezifisches Kompetenzmodell für die moderne Produktentwicklung
- Maßnahmen für die Förderung agiler Lernkultur auf Unternehmens- und Mitarbeiterenebene
- Agile Toolbox für die Befähigung von Studierenden und Mitarbeitenden
- Technisch-inhaltlicher Aufbau eines Lernlabors an der TU Darmstadt
- Konzepte für ASE-spezifische Lehr- und Lernveranstaltungen

Säule Technik

- ASE-Reifegradmodell
- Leitfaden Sensorbebauungsplan
- Konzept für die Verknüpfung von Simulationsmodellen mit Sensornetzwerken
- Demonstrator für den Digitalen Zwilling (3D-Drucker & Vier-Achs-Roboter)

Säule Organisation

- Rahmenwerk für Model-Based Systems Engineering
- Vorgehensmodell für agiles Entwickeln im Advanced Systems Engineering
- Konzepte (mit Alternativen) für den Digital Thread
- Generisches Informationsmodell für den Digital Thread
- Demonstrator für den Digital Thread auf Basis Product Lifecycle Management System
- Demonstrator für den Digital Thread auf Basis Digital Data Package Manager
- KI-basiertes Konzept für Normkonformität im Model-Based Systems Engineering
- Demonstrator einer KI-basierten Entwicklungsassistenz für Normkonformität

Säulen-übergreifende Ergebnisse

- Leitbild Mensch-Technik-Organisation für ASE (vgl. auch Abschlussveröffentlichung [1])
- Gremienarbeit (acatech ASE, prostep ivip, TAK SE, GfSE)
- Veröffentlichungen gemäß Abschnitt II.8

Ergänzung Technische Universität Darmstadt:

Im Rahmen des Forschungsprojekts CyberTech wurde Agilität als ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Kompetenzentwicklung und Neugestaltung der Arbeitsorganisation identifiziert. Dabei wurden drei Kernergebnisse erzielt: Erarbeitung eines Frameworks für ein ASE-gerichtetes Kompetenzmanagement, Konzeptionierung von Kompetenzen für agile Arbeitsweisen in der Produktentwicklung sowie Aufbau eines wissenschaftlichen Lernlabors für die universitäre Bildung zum Trainieren von ASE-Kompetenzen.

Der technische Schwerpunkt im CyberTech Verbundprojekt liegt auf dem Digitalen Zwilling und damit auf der Datenerfassung. Um diese gezielt planen zu können, wurde ein Reifegradmodell für Unternehmen entwickelt. Mit Hilfe der aufgeführten Reifegradstufen können Unternehmen ihre Ist-Situation evaluieren und je nach Ergebnis gezielte Maßnahmen umsetzen. Ebenfalls wurde ein Leitfaden zur Definition von Sensorbebauungsplänen konzipiert, um ein strukturiertes Vorgehen für die Planung der Sensorik im Rahmen bestimmter Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings zu ermöglichen. Die entwickelten Konzepte wurden anhand des Digitalen Zwillings eines Demonstrators implementiert. Der Demonstrator setzt sich aus einem 3D-Drucker der Firma Prusa und einem Vier-Achs-Roboter nach Eigenentwicklung zusammen. Eine Auswahl der erfassten Sensormesswerte des Demonstratorsystems wird über speziell entwickelte Prozesse und Methoden zu Simulationsdaten verarbeitet, um das Systemverhalten virtuell zu beschreiben. Beim Druckprozess ist eine Fehldruckquelle durch die Druckgeschwindigkeit charakterisiert, weshalb der Digitale Zwilling die Absicherung des Verhaltens des Druckbauteils mit Mehrkörpersimulationen erlaubt, um eine frühzeitige Erkennung des Fehldrucks zu ermöglichen. Dies wurde durch Prozesse und Methoden ermöglicht, die Sensormesswerte als Simulationsdaten in den Digitalen Zwilling integrieren und dabei domänenübergreifende Interoperabilität gewährleisten.

II. Teil II Eingehende Darstellung

II.1 Motivation und Aufgabenstellung

Das Verbundprojekt CyberTech greift die Ziele des BMBF-Förderprogramms „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ unter besonderer Berücksichtigung der Bekanntmachung „Beherrschung der Komplexität soziotechnischer Systeme – Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering für die Wertschöpfung von morgen (PDA_ASE)“ der Bundesregierung auf, indem es ein Konzept für die Entwicklung und Integration der soziotechnischen Perspektive in die Produktentwicklung in einer digitalisierten Welt entwickelte und umsetzte. Dies umfasst den gesamten Weg der Wertschöpfung: von der strategischen Produktplanung, der Produkt-, Dienstleistungs- und Produktionssystementwicklung und betrachtete zudem eine entsprechende Arbeitsorganisation. Somit verknüpft CyberTech ingenieurwissenschaftliche, arbeitswissenschaftliche und betriebswirtschaftliche Ziele und sorgte durch eine enge Einbindung etablierter Unternehmen für eine hohe Umsetzbarkeit und Nachhaltigkeit der entwickelten Maßnahmen und Konzepte.

Die Bundesregierung strebt mit ihrer Hightech-Strategie 2025 „Komplexe Systeme entwerfen und produzieren“ und „Komplexe Produkte und Dienstleistungen beherrschen“ unter anderem an, digitales Wachstumsland Nummer 1 zu werden. Die Etablierung einer Innovationskultur spielt dabei eine große Rolle. Hierfür ist es notwendig, die Interdisziplinarität auf konzeptueller Ebene und in der betrieblichen Umsetzung zu fördern. Dies kann insbesondere durch einen Systemansatz bzw. der systemischen Betrachtung der Produktentwicklung in den Dimensionen Mensch-Technik-Organisation (MOT) und Berücksichtigung der soziotechnischen Interaktion den gewünschten Mehrwert bieten.

Die Beherrschung der Komplexität dieser Systeme ist für viele Unternehmen mit einer strukturellen Herausforderung verbunden. Um hier einen optimalen Schulterschluss zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu ermöglichen, sieht das Projekt CyberTech sowohl eine genaue Analyse der Potentiale in den Betrieben als auch eine Entwicklung und Umsetzung vor, die sich iterativ bewegt und fortlaufend ergänzt. Die im BMBF-Förderprogramm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ gesetzten Ziele, die mensch- und wettbewerbsgerechte Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen zu unterstützen sowie ökonomische und soziale Ziele gleichermaßen zu

berücksichtigen, können somit auch mit dem Projekt CyberTech erreicht werden. Natürlich erwarten gerade die KMU von der Bundesregierung Rahmenbedingungen wie Datensicherheit und den Ausbau des High-Speed-Internets. Das Projekt CyberTech unterstützt die Unternehmen darin, sich auf die Digitalisierung mit entsprechend angepassten Produktentwicklungen sowie einer veränderten Aufbau- und Ablauf-Organisation mit der Erweiterung der Kompetenzen und der Entwicklung technischer Innovationen einzustellen.

Die Bearbeitung dieser Ziele erfolgte durch ein Konsortium bestehend aus vier Projektpartnern (mit insgesamt fünf ausführenden Stellen). Diese sind in Forschungseinrichtungen, Befähiger- und Anwenderunternehmen einzuteilen. Zusätzlich wirkten im Rahmen des Breitentransfers weitere assoziierte Partner im Verbundprojekt CyberTech mit. Abbildung 2 gibt einen Überblick über das Projektkonsortium. Zwei der Verbundpartner (ESI, Woco) sind dabei während der Laufzeit des Projekts ausgeschieden und gleichzeitig wurde SysDICE als neuer, aktiver Verbundpartner gewonnen.



Abbildung 2 Übersicht über die Verbundprojektpartner in CyberTech (obere Reihe) und assoziierten Partner (unter Reihe)

Aufgrund der sehr vielfältigen Problem- und Aufgabenstellung entlang der Säulen des MTO-Ansatzes unterteilte sich das Verbundprojekte in sieben Arbeitspakete (APs) entsprechend Abbildung 3.

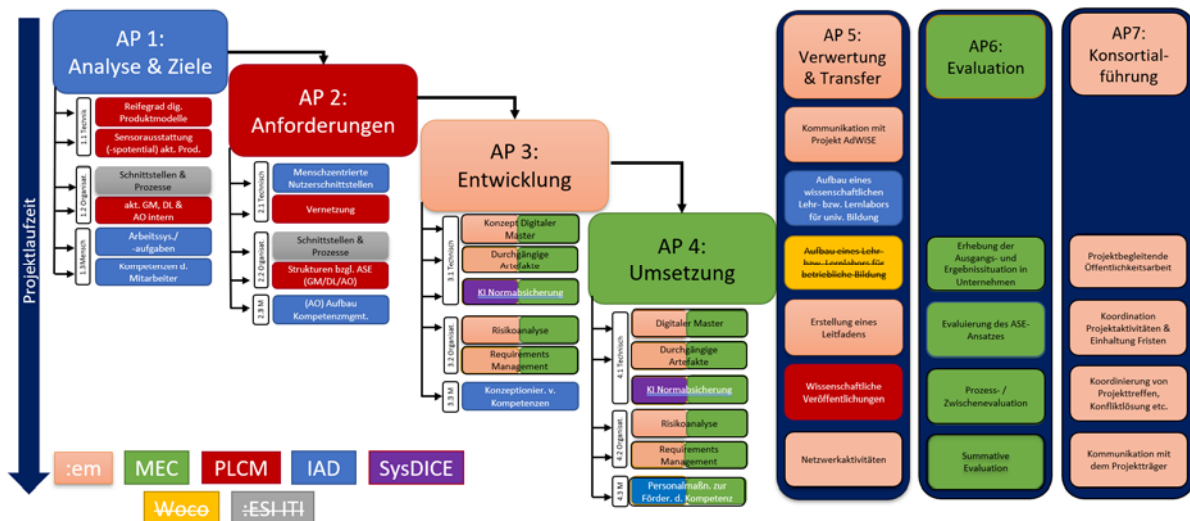


Abbildung 3 Vereinfachte Projektstruktur CyberTech mit Darstellung der Mitarbeit und Verantwortlichen der Partner

AP 1 und AP 2 bildeten die Basis für die Definition des detaillierten Zielbildes bzw. des Leitbildes (siehe Abbildung 1) sowie Formulierung der Anforderungen an die Lösungen in Bezug zu Mensch, Technik und Organisation. Der Schwerpunkt des AP 3 stellte hierbei die Entwicklung der Lösungskonzepte dar, während in AP 4 die Lösungen mit initialen Demonstratoren tatsächlich umgesetzt wurden. AP5 widmete sich neben Disseminationstätigkeiten auch der weiteren Ausdetaillierung der Demonstratoren, die für Zwecke der Verwertung auf Messen und Konferenzen präsentiert wurden. In AP 6 fand eine Evaluation der Ergebnisse, insbesondere bei den Anwendern, aber auch durch Einholen von Feedback der assoziierten Partner statt. In AP 7 wurden Projektmanagement-Tätigkeiten zur Steuerung des Projekts und des Berichtswesens, ebenso wie die Durchführung von Lenkungskreis- und Konsortialtreffen zusammengefasst. Um den unmittelbaren Anwendungsbezug darzustellen, wurden die Konzepte und

Lösungen mit Bezug zu definierten Anwendungsfällen (Use Cases) erforscht und entwickelt. Folgende Anwendungsfälle standen dabei im Fokus der Erforschung von ASE:

- **Digitaler Master**
Nutzung von Modellen als Blaupause für die Instanziierung Digitaler Zwillinge verschiedene Produkte und Produktvarianten in relevanten IT-Werkzeugen
- **Anforderungsmanagement**
Verwaltung und Organisation von Anforderungen und Spezifikationsdokumenten mittels digitaler Werkzeugketten für ASE
- **Durchgängigkeit der Artefakte**
Nachvollziehbarkeit und Rückerverfolgbarkeit der Entwicklungsartefakte entlang der gesamten Produktentwicklung über die Durchgängigkeit der Werkzeugketten/Autorenwerkzeuge
- **KI-basierte Normabsicherung**
Absicherung der Einhaltung der Konformität zu geltenden Normen, Richtlinien und Standards durch Einsatz von KI im Model-Based Systems Engineering
- **Risiko- und Sicherheitsanalysen**
Modellbasierte Durchführung von Risiko- und Sicherheitsanalysen mit digitalen Werkzeugen und angepassten Methoden für ASE

Die Partner sind weitestgehend in allen APs involviert, legen entsprechend den Anwendungsfällen jedoch thematische Schwerpunkte. Der Zeit- und Meilensteinplan ist der Abbildung 4 zu entnehmen, wobei die konkret ausgestaltete Mitarbeit der Verbundpartner Abschnitt II.4 zu entnehmen ist.

Zeit- und Meilensteinplan		Balkenplan / Gantt- Diagramm																																																																					
		1. Projektjahr 2021										2. Projektjahr 2022										3. Projektjahr 2023										4. Projektjahr 2024																																							
Projektmonat	Kalendermonat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12															
AP 1	Analyse und Ziel																																																																						
AP 2	Anforderungen																																																																						
AP 3	Entwicklung																																																																						
AP 4	Umsetzung																																																																						
AP 5	Verwertung und Transfer																																																																						
AP 6	Evaluation																																																																						
AP 7	Konsortialführung																																																																						
		MS1										MS2										MS3										MS4										MS5																													

Abbildung 4 Vereinfachter Zeit- und Meilensteinplan des Verbundprojekts CyberTech

Ergänzung Technische Universität Darmstadt:

Getrieben durch die digitale Transformation wird neuen produktbezogenen Dienstleistungen und Geschäftsmodellen eine hohe Bedeutung beigemessen, etwa indem Dienstleistungen auf Basis von Produktdaten unter Anwendung von KI-Methoden angeboten werden. Dies führt zu unterschiedlichen Herausforderungen während der Systementwicklung, welche momentan durch die Grenzen des Systems Engineering (SE) nicht angegangen werden können. In weiterreichenden Ansätzen wie insbesondere Advanced Systems Engineering (ASE) ist dies jedoch zukünftig möglich [1.1]. Während im SE technische Systeme modellbasiert abgebildet werden können, erfordert die ausgeprägte vernetzte Entwicklungsarbeit neue Methoden und Prozesse im Umgang mit soziotechnischen Systemen [1.2]. Zudem muss berücksichtigt werden, dass die Entwicklung nicht in dem Moment vollendet ist, in dem die Herstellung ansetzt. Stattdessen verläuft die Entwicklung auch entlang der Nutzung, zum einen durch die fortlaufende Weiterentwicklung von Diensten, zum anderen aber auch durch die Rückführung von Informationen der Nutzung in die Entwicklung. Dies hat zur Folge, dass Entwicklungsprozesse nicht mehr nur innerhalb eines Unternehmens oder sogar einer Abteilung ablaufen, sondern der Produktentstehungsprozess die Unternehmensgrenze überschreitet, was den Aspekt der Teamarbeit sowohl zeitlich als auch organisatorisch ausdehnt, da auch Kundenvertreter integriert werden müssen und die Phase der Nutzung des Produkts mitbetrachtet werden muss [1.3, 1.4]. Entsprechende Organisationsansätze von Entwicklungsarbeit wurden bisher noch nicht systematisch untersucht. Für den Umgang der daraus ansteigenden Komplexität bedarf es neuer Konzepte der Arbeitsgestaltung basierend auf digitalisierten Prozessen, durchgehend digitalen Modellen sowie zugehöriger Schnittstellen und KI-Methoden [1.5]. Im Projekt CyberTech werden diese an Anwendungsbeispielen

von Unternehmen der Medizintechnik sowie Forschungsinstituten erforscht, entwickelt und angewandt und so eine breite Typologisierung sichergestellt.

Ziel des Forschungsprojekts CyberTech war die Informationsintegration bei Entwicklung und Nutzung von Maschinen unter Verwendung von KI-Methoden, um einen erhöhten Nutzen durch verbesserte, selbstoptimierende Maschinen bzw. Dienste zu realisieren. Dabei spielte die menschenzentrierte Arbeitsgestaltung basierend auf digitalisierten Prozessen und Methoden die maßgebliche Rolle innerhalb der Organisationen von Unternehmen. Daher war das Ziel des IAD die Entwicklung eines Konzeptes für die Produktentwicklungsphasen mit Berücksichtigung des Menschen innerhalb der Organisation. Im Fokus standen dabei die Klärung der Arbeitsorganisation (Welche Prozesse müssen wie umgestaltet werden?), die Mitarbeiter-Befähigung (Welche Kompetenzen sind notwendig für die neuen Arbeitsaufgaben?) und die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen (Welche Maßnahmen erhöhen die Performance und die Nutzung?). Die Fragen richteten sich sowohl an die Ebene des Arbeitssystems und der Gruppenarbeit als auch die Ebene der gesamten Ablauf- und Aufbauorganisation. Das PLCM legte den Fokus auf Verwertung von Sensordaten aus der Nutzungsphase und verfolgte das Ziel, Digitale Zwillinge für sozio-technische Systeme auf Basis neuer Geschäftsmodelle und Dienstleistungen zu konzipieren. Dazu wurden bestehende Modelle der verschiedenen Produktlebenszyklusphasen und Schnittstellen zwischen Unternehmen und Lieferanten, wie auch mit dem Kunden zum Erfassen der Nutzungsphase analysiert und weiterentwickelt. Zudem verfolgten das IAD und PLCM das Ziel, die Erkenntnisse in einem wissenschaftlichen Lernlabor sowohl in der universitären Lehre im Bereich studentischer Forschungs- und Entwicklungsprojekten und Abschlussarbeiten als auch für Unternehmen, vor allem KMUs mittels des Mittelstand-Digital-Zentrum Darmstadt (MDZ), zugänglich zu machen.

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Für langfristigen Innovationserfolg müssen Unternehmen in der Lage sein, komplexe soziotechnische Systeme gemeinsam mit Lieferanten und Kunden zu entwickeln. Dabei müssen Mensch, Technik und Organisation in allen Schritten berücksichtigt werden. Eine erfolgreiche Interaktion in soziotechnischen Systemen ist nur in einer Organisation möglich, die so strukturiert ist, dass Mensch und Technik optimal zusammenarbeiten. Insbesondere auch die Interaktion bzw. Schnittstellen zwischen den einzelnen Aspekten im MTO-Kontext (vgl. Abbildung 5) benötigt hierbei besondere Berücksichtigung.

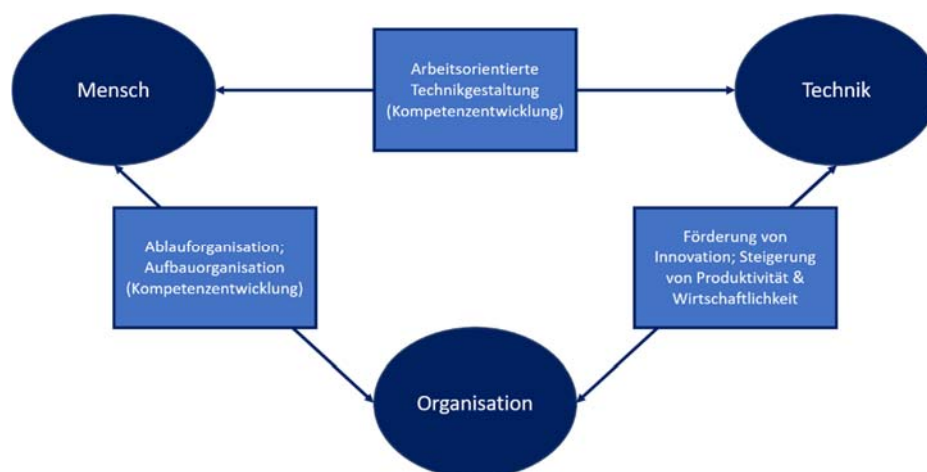


Abbildung 5 Schnittstellen zwischen Mensch, Technik, Organisation in eigener Darstellung und nach MTO-Ansatz von Ulrich und Strohm (1997)

Zudem stellt die Digitalisierung Unternehmen vor erhebliche Herausforderungen wie zunehmende Produktverbreitung und individualisierte Produkte sowie komplexere und störungsanfällige Lieferketten. Diese Herausforderungen erfordern eine verbesserte Effizienz und Anpassungsfähigkeit der

Produktions-, Service- und Lieferkettensysteme [2]. Der zunehmende globale Wettbewerb um Produktqualität und Produktionskosten erfordert neue Produktentwicklungsprozesse, die eine hohe Konnektivität und Integration zwischen Geschäftsprozessen und Systemen ermöglichen. Viele traditionelle computerintegrierte Ansätze und fortschrittliche Fertigungstechnologien stoßen an ihre Grenzen und führen selten zu einer umfassenden organisatorischen Umstrukturierung [3]. Erste Konzepte zur Anpassung der Organisation an Fortschrittstechnologien konzentrieren sich auf die Steigerung der Agilität von Unternehmen [4] und die Entwicklung von Netzwerkstrukturen. Durch veränderte Marktbedingungen, einschließlich der technischen Einbindung von Kunden und Lieferanten sowie erweiterter Serviceansätze im Bereich nachhaltiger Wartung, wird eine umfassende organisatorische Transformation erforderlich [5]. Der folgende Abschnitt stellt den Stand der Technik in der Produktentwicklung sowie die existierenden Forschungsergebnisse zu kompetenzorientierten Organisationsstrukturen (Aspekte Mensch und Organisation) vor, der zum Beginn des Verbundprojekt CyperTech vorlag.

Stand der Technik und Forschung zu V-Modell und ASE

Die VDI-Richtlinie 2221 [6] stellt ein branchen-, prozess- und produktunabhängiges Modell für Produktentwicklungsprozesse dar, das auf generischen Bausteinen basiert und iterative Entwicklungsprozesse betont (vgl. Abbildung 6).

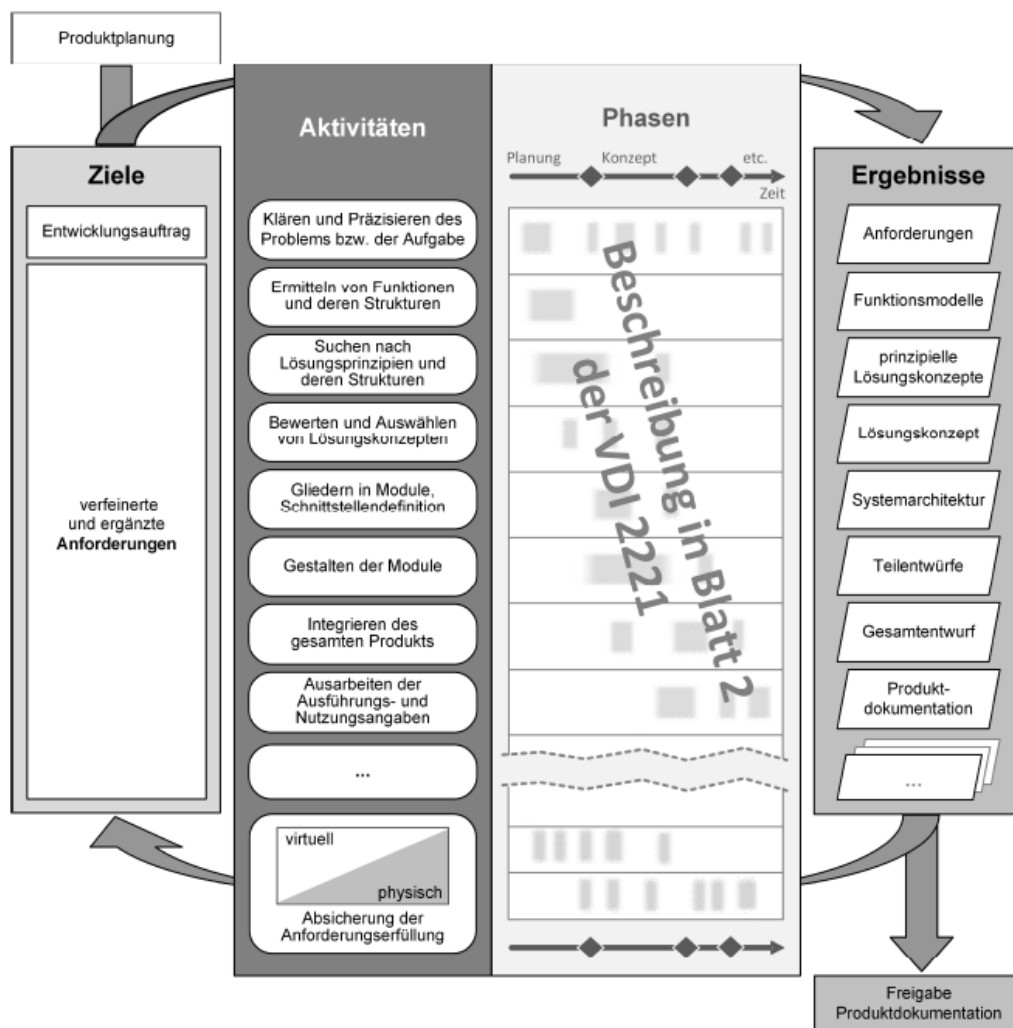


Abbildung 6 Allgemeines Modell der Produktentwicklung nach VDU 2221 [6]

Die Anwendung dieses Modells auf unternehmensspezifische Kontexte wird in der Richtlinie detailliert beschrieben. Die Entwicklungsziele können sowohl aus konkreten Kundenaufträgen als auch aus

Marktanalysen abgeleitet werden und führen zu spezifischen technischen und projektbezogenen Anforderungen, die im Verlauf des Prozesses kontinuierlich verfeinert und angepasst werden.

Unterstützende Aktivitäten im Modell werden in „Design to/for X“, Begleitaktivitäten und Querschnittsaktivitäten unterteilt. Diese umfassen unter anderem das Projekt-, Änderungs-, Qualitäts- und Kostenmanagement sowie das Prozess-, Varianten-, Wissens- und Technologiemanagement. Diese Aktivitäten tragen dazu bei, dass neue Anforderungen und Bedingungen, die während des Projekts entstehen, angemessen berücksichtigt werden.

Die VDI-Richtlinie 2206 erweitert dieses Modell durch das V-Modell, das speziell für die Entwicklung von mechatronischen Systemen konzipiert ist [7]. Aufgrund der höheren Komplexität, die sich aus der Vielzahl der Elemente und den beteiligten Fachdisziplinen ergibt, wird der gesamte Entwicklungsprozess durch Modellbildung und -analyse unterstützt (siehe Abbildung 7), oft unter Einsatz rechnergestützter Werkzeuge. Das Ergebnis des Prozesses kann variieren, von Labormustern bis hin zu Vorserienprodukten.

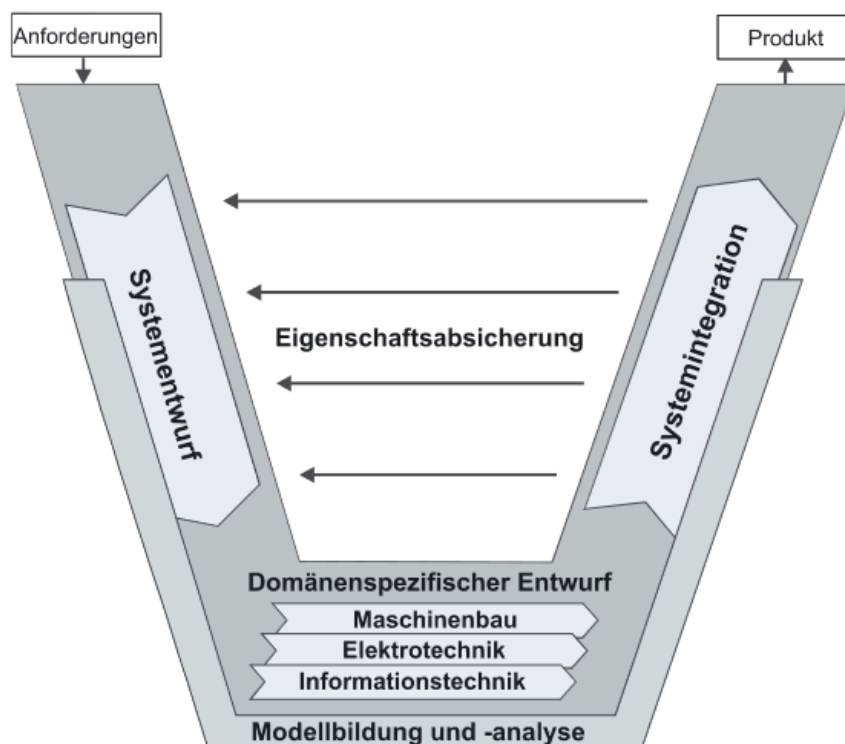


Abbildung 7 V-Modell für die Entwicklung von mechatronischen Systemen analog VDI 2206 [7]

Das V-Modell wird häufig an unternehmensspezifisch Bedarfe angepasst und bildet heute praktisch den Stand der Technik in der Produktentwicklung ab. Eine Weiterentwicklung des V-Modells ist das W-Modell, das für die Entwicklung adaptronischer Systeme geeignet ist [8]. Dieses Modell berücksichtigt, dass die Systemintegration aufgrund fehlender Kommunikation nicht immer reibungslos verläuft. Das W-Modell zielt darauf ab, die Ergebnisse der einzelnen Fachdisziplinen besser aufeinander abzustimmen, um eine effiziente und erfolgreiche Integration der Systeme zu gewährleisten.

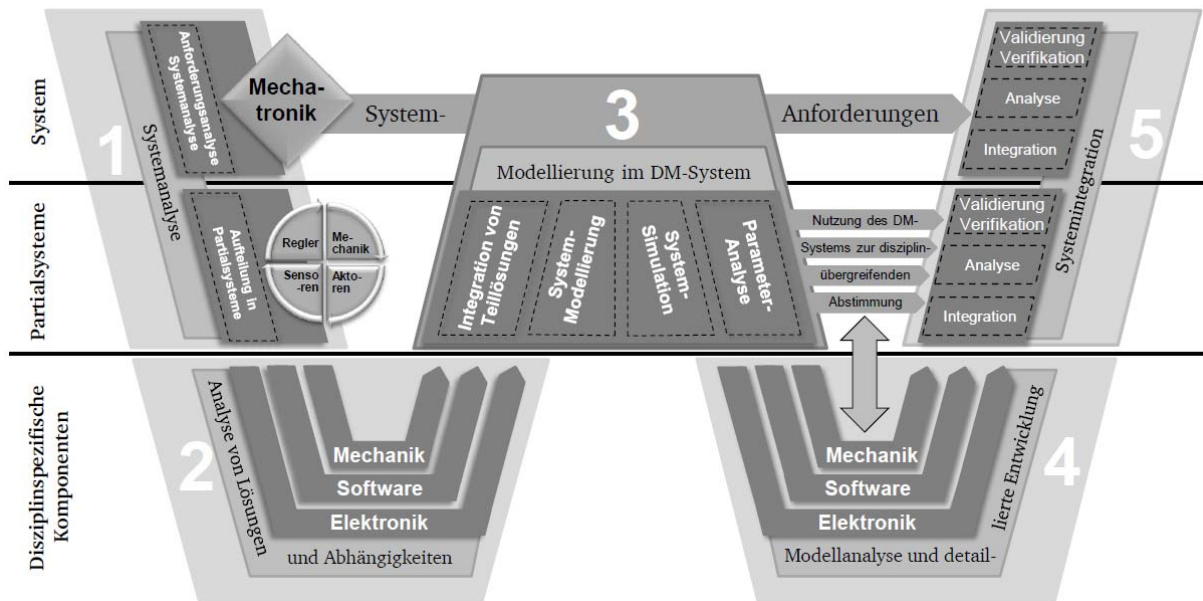


Abbildung 8 W-Modell mit expliziter Darstellung des Einsatzes von Modellbildung und Simulation [8]

Die Entwicklung eines Systems erfolgt dabei in fünf Schritten, beginnend mit einer umfassenden Analyse und Aufgabenverteilung, ähnlich dem V-Modell. Im zweiten Schritt wird domänenspezifisch gearbeitet, ohne sofort detaillierte Lösungen zu erarbeiten, sondern um einen Überblick über die erforderlichen Systeme und Komponenten zu gewinnen. Schließlich wird das Gesamtsystem zusammengefügt und analysiert. Cybertronische Systeme, eine Weiterentwicklung mechatronischer Systeme, bestehen aus mindestens zwei cyber-fähigen Elementen, die in offenen Netzen kommunizieren können. Diese Elemente können sich zusammenschließen, um gemeinsam spezifische Aufgaben zu erfüllen. Die Entwicklung cybertronischer Systeme ist ebenfalls ein Schwerpunkt des W-Modells.

Der Produktlebenszyklus (PLZ) dient als Konzept zur Betrachtung der Produktentwicklung und unterstützt die Entscheidungsfindung durch verschiedene Perspektiven: betriebswirtschaftlich, ökologisch und informationstechnisch. Dabei werden die Phasen der Produktentwicklung nicht mehr streng sequenziell durchlaufen, sondern oft überlappend bearbeitet, um kürzere Entwicklungszeiten zu ermöglichen (Abbildung 9).



Abbildung 9 Produktlebensphasen [9]

Dieser Ansatz hat zur Entwicklung des Systems Engineering (SE) geführt, das eine ganzheitliche Betrachtung der Systeme über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg fördert. In interdisziplinären Teams wird SE genutzt, um die Anforderungen von Nutzern und Stakeholdern durch wissenschaftliche Methoden und Managementansätze von der Konzeption bis zur Stilllegung des Produkts zu erfüllen. Systems Engineering (SE) bietet eine umfassende Methode, um komplexe Systeme, Produkte, Services und Prozesse zu entwickeln, indem es die gesamte Projektstruktur berücksichtigt. Es arbeitet transdisziplinär und integriert die verschiedenen Disziplinen, um gemeinsam auf ein Ziel hinzuwirken. SE ist besonders nützlich für die Bewältigung sogenannter "Wicked Problems" – komplexe Herausforderungen ohne klare Lösungen, bei denen es darum geht, die bestmöglichen Entscheidungen zu treffen. Ein zentrales Ziel des SE ist es, alle Anforderungen zu erfüllen und Risiken, wie verspätete Lieferungen oder unerwünschte Produkteigenschaften, zu minimieren. Dabei endet der Entwicklungsprozess nicht mit der Produktion, sondern umfasst auch die Nutzung des Systems, wobei Kundenfeedback in die kontinuierliche Verbesserung einfließen sollte. [10]

Insgesamt bilden die VDI-Richtlinien und Standards zu SE wie das SE-Handbook den aktuellen Stand der Technik und einen strukturierten Rahmen für die Produktentwicklung, der auf verschiedenen Modellen basiert und sowohl technische als auch organisatorische Aspekte berücksichtigt. Darüber hinaus gibt es wie nachfolgend dargestellt neuere Ansätze, deren Stand der Technik und Forschung nachfolgend dargestellt wird.

Das Model-Based Systems Engineering (MBSE) ist eine Methode des Systems Engineering, die im Gegensatz zum traditionellen dokumentenbasierten Ansatz mit einem zentralen Modell arbeitet. Dieses Modell lässt sich leicht aktualisieren und mit anderen Datenquellen kombinieren. MBSE zielt darauf ab, die Produktivität und Qualität zu steigern und so das übergeordnete Ziel der Risikominimierung zu unterstützen. Durch die Verwendung der standardisierten Systems Modeling Language (SysML) wird eine einheitliche Syntax für die Dokumentation gewährleistet, was auch die Integration in gängige PLM-Systeme (Product Lifecycle Management Systeme) erleichtert. [10]

Das Advanced Systems Engineering (ASE) stellt eine Weiterentwicklung des traditionellen Systems Engineering dar. Es legt besonderen Wert darauf, Nutzungsdaten des Produkts intensiver zu erfassen und für die Optimierung anderer Phasen im Produktlebenszyklus zu verwenden. Dabei wird der Entwicklungsprozess als Bestandteil eines sozio-technischen Systems betrachtet. ASE basiert auf drei zentralen Säulen, die in der entsprechenden Abbildung (Abbildung 10) dargestellt sind. Angesichts aktueller Megatrends, die die zukünftige Wertschöpfung beeinflussen, müssen Produkte, Dienstleistungen und Produktionsprozesse zunehmend intelligent und digital vernetzt werden. Sach- und Dienstleistungen verschmelzen dabei stärker miteinander, und Systeme agieren zunehmend autonom. ASE kombiniert diese zukünftigen Marktanforderungen mit komplexen Herausforderungen durch innovative Methoden für ein ganzheitliches Engineering.

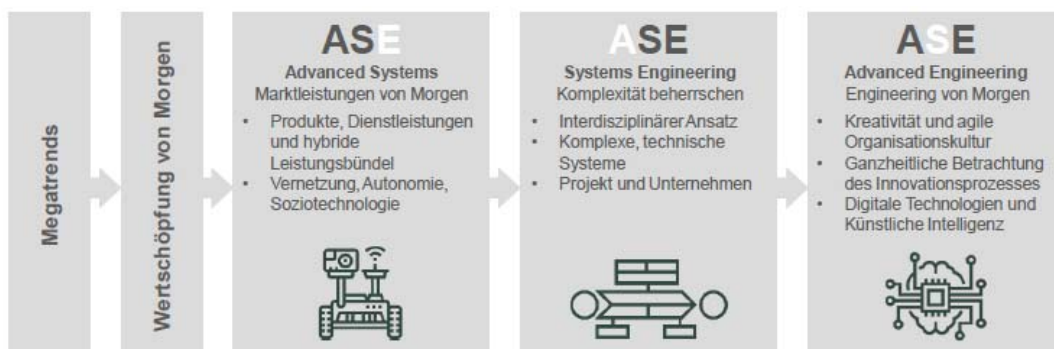


Abbildung 10 Die drei Aspekte des Advanced Systems Engineering [11]

Durch die Nutzung gesammelter Daten eröffnen sich neue Geschäftsmodelle, die über die reine technische Funktion von Produkten hinausgehen. Produkte werden zunehmend mit Diensten und Services verknüpft, die in der Nutzungsphase einen Mehrwert bieten. Dazu gehören autonom agierende Systeme und dynamische, vernetzte Systemverbände. Die bidirektionale Vernetzung zwischen

Entwicklung und Nutzung ermöglicht selbstoptimierende Maschinen und Dienstleistungen. Zukünftig werden Produkte und Services stärker kombiniert, um maßgeschneiderte Lösungen zu bieten, wobei Systeme sich an den Anwender anpassen und kontextsensitiv agieren. Zur Umsetzung dieser Ziele sind Technologien wie Digitale Zwillinge und Künstliche Intelligenz entscheidend.

In der Raumfahrt wird häufig ein „Zwilling“ oder ein zweites identisches Raumfahrzeug für Missionen gebaut, das zur Vorbereitung und Problemlösung genutzt wird. Das Konzept des „digitalen Zwilling“ überträgt dieses Prinzip in die digitale Welt. Ein digitaler Zwilling ist ein präzises virtuelles Modell eines realen Objekts oder Prozesses, das durch eine Sensor System Architecture (SSA) mit dem physischen Objekt verknüpft ist. Diese Architektur ermöglicht die Übertragung und Nutzung von Echtzeitdaten des physischen Modells in verschiedenen Anwendungen. [12, 13, 14]

Zur Erstellung eines digitalen Zwillinges ist ein Sensorbebauungsplan erforderlich, der die Integration der verschiedenen Sensoren beschreibt. Der digitale Zwilling spiegelt sowohl im Digitalen Master als auch im digitalen Modell die genaue physikalische Realität wider und ist mit detaillierten Modellen für thermische, strömungsdynamische und andere physikalische Eigenschaften ausgestattet. Es besteht eine bidirektionale Verbindung, die eine umfassende Datenspeicherung und -nutzung ermöglicht, einschließlich historischer Daten und Flotteninformationen. Der digitale Zwilling stellt eine fortschrittliche Form der Simulationstechnologie dar und bietet mehr als nur eine Darstellung der Realität. Im Gegensatz zu IoT-Betriebssystemen oder PLM-Software, die lediglich als notwendige Infrastruktur für den digitalen Zwilling dienen, ist der digitale Zwilling selbst ein leistungsfähiges Werkzeug für Simulation und Datenmanagement. [15, 16]

Datenmodelle müssen effizient eingesetzt werden, etwa durch Cloud-Anwendungen oder komplexe Simulationen, um bestehende Produkte, Prozesse und das Systemverständnis zu optimieren. In der Automobilbranche zeigt sich der Trend, physische Prototypen weitgehend durch virtuelle Modelle zu ersetzen, um Zeit und Kosten zu sparen. Digitale Zwillinge bieten Unterstützung bei Predictive Maintenance und Equipment as a Service, ermöglichen eine schnellere und gründlichere Prüfung von Garantiefällen und tragen zur Steigerung der Kundenzufriedenheit bei. Sie liefern zudem neue Einblicke in Prozesse, die zu Verbesserungen führen können und ermöglichen potenziell auch einen autonomen Betrieb von Produkten oder Prozessen. Derzeit sind digitale Zwillinge aufgrund hoher Kosten und fehlender Infrastruktur vorwiegend im B2B-Bereich im Einsatz, doch zukünftige Entwicklungen könnten auch private Endverbraucher als Zielgruppe erschließen. [17, 18]

Neben dem Digitalen Zwilling ist eine Schlüsseltechnologie für die Ziele des Verbundprojekts CyberTech auch künstliche Intelligenz. In der industriellen Produktion bietet der Einsatz von KI-basierten Systemen erhebliches Potenzial für Optimierungen. Intelligente Automatisierung kann dazu beitragen, die enge Verknüpfung von Produkt und Produktion zu lösen, sodass sich Prozesse selbstständig an veränderte Bedingungen anpassen können. Automatisierte Systeme sind in der Lage, komplexe Aufgaben zu übernehmen und autonome Entscheidungen zu treffen. Durch optimiertes Ressourcenmanagement wird der Energie- und Ressourcenverbrauch effizienter gestaltet. In der Qualitätssicherung kommen bereits KI-gestützte Bilderkennungstechniken zum Einsatz. [19]

Bei der Betrachtung der Nutzungsphase eines Produkts eröffnet sich das Feld der intelligenten Instandhaltung oder Predictive Maintenance. Durch die Analyse von Daten können potenzielle Anlagenschäden frühzeitig erkannt und die Instandhaltung proaktiv geplant werden. Gleichzeitig können Ersatzteile automatisch bestellt und geliefert werden, was Stillstandszeiten minimiert und Kosten reduziert. Zudem kann KI auch dazu beitragen, Wissen über Prozesse und Optimierungspotenziale zu bewahren und weiterzugeben. Durch Sprach-, Bild- oder Schrifterkennung kann dieses Wissen an die nächste Generation übermittelt werden, wodurch Risiken eines Generationenwechsels im industriellen Bereich gemindert werden können. [19]

Künstliche Intelligenz (KI) kann maßgeblich zur Weiterentwicklung in der Industrie beitragen, insbesondere durch den Einsatz intelligenter Produkte und Services. Cyber-physische Systeme (CPS) werden bereits genutzt, um eine Grundlage für zukünftige Smart Services zu schaffen. Diese Systeme kommen unter anderem in der Warenverfolgung, im Condition Monitoring und bei der Erfassung von

Verbrauchsdaten zum Einsatz. Durch die Integration der von CPS gesammelten Daten in komplexe Gesamtsysteme kann KI helfen, die entstandene Komplexität zu bewältigen. Mit in Produkte eingebetteten Services können Unternehmen über den reinen Produktnutzen hinausgehende Mehrwerte bieten, wie beispielsweise Hintergrundinformationen zur Wertschöpfungskette eines Produkts für den Kunden bereitzustellen. [20]

Die zunehmende Vernetzung bringt jedoch auch höhere Sicherheitsrisiken mit sich. Während bestehende IT-Systeme oft nachträglich durch Einzelmaßnahmen (Security in Depth) gesichert werden, wird bei Neuentwicklungen Sicherheit von Anfang an als grundlegendes Designkriterium (Security by Design) berücksichtigt. Dennoch können nicht alle Risiken und Wechselwirkungen aufgrund der Systemkomplexität vorhergesehen werden. Hier kommen KI-gestützte Methoden ins Spiel, die große Datenmengen analysieren, um Sicherheitsbedrohungen zu erkennen und abzuwehren. Beispiele hierfür sind Intrusion Detection und Prevention Systeme sowie die KI-gestützte Anomalieerkennung in Produktionsnetzen, die auf mögliche IT-Sicherheitsvorfälle hinweisen können.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Bewältigung der Komplexität moderner Arbeits- und Systemumgebungen eine holistische Betrachtung erfordert, die technologische Innovationen, methodische Anpassungen und die Berücksichtigung menschlicher Aspekte integriert. [19]

Im Kontext von CyberTech existierten für die Säule Technik im Bereich der Vorgehensmodelle Forschungslücken. Speziell für ASE ist ein agiles Entwicklungsumfeld nötig, um auf kurzfristige Änderungen von Kunden- und Marktanforderungen sowie die Änderung sonstiger externer Unsicherheiten kurzfristig reagieren zu können. Darüber hinaus sind vor allem im Kontext Digitaler Zwillinge und dem Einsatz Künstlicher Intelligenz im ASE viele Fragestellungen noch Gegenstand der Forschung und insbesondere in CyberTech relevant.

Stand der Technik zu kompetenzorientiertem Organisationsdesign

Die ganzheitliche Umstrukturierung einer Organisation im Zuge von Veränderungen im Produktentwicklungsprozess ist bisher wissenschaftlich noch wenig erforscht. Forschung zu „Arbeit 4.0“ beschäftigt sich mit der Neugestaltung von Arbeitsprozessen und -systemen, wobei insbesondere die sozialen Auswirkungen auf die Menschen in der Organisation betrachtet werden. Im Gegensatz dazu konzentriert sich „Industrie 4.0“ stärker auf technologische Aspekte und teilweise auf Geschäftsmodelle, berücksichtigt jedoch oft nicht die spezifischen organisatorischen Abläufe und Strukturen eines Unternehmens. Dennoch bietet Industrie 4.0 erste Ansatzpunkte für eine Unternehmensstrategie. Ein zentrales Anliegen für viele Stakeholder ist die Abwägung von Nutzen, wie Wirtschaftlichkeit und höhere Produktivität, gegen die Kosten für die organisatorische Umstrukturierung. Zudem erfordert die Integration von physischen und digitalen Systemen, wie beim Advanced Systems Engineering (ASE), erheblichen Qualifikations- und Schulungsaufwand. [21]

Bei der Nutzung intelligenter Maschinen können Probleme bei der Konnektivität und dem Datenaustausch im Projekt-, Programm- und Portfoliomanagement auftreten, insbesondere aufgrund noch ungeklärter Fragen zur Datennutzung. Es ist wichtig, Handlungsoptionen zu entwickeln, die von allen Beteiligten akzeptiert werden. [22]

Zur Anpassung an veränderte Marktbedingungen in der Produktentwicklung sind neue arbeitsorganisatorische Ansätze erforderlich. Die steigenden Anforderungen an Flexibilität erfordern eine Organisation, die adaptiv ist. Dazu müssen Prozesse so gestaltet sein, dass sie von verschiedenen Personen nachvollzogen und ausgeführt werden können, und es müssen effektive Schnittstellen zur Verbesserung der Kommunikation vorhanden sein. Die Auswirkungen solcher Änderungen sind direkt spürbar für die Mitarbeiter: Eine offene und adaptive Unternehmenskultur muss von den Beschäftigten unterstützt und gewünscht werden. Die notwendigen innerbetrieblichen Umorganisationen ermöglichen es, veraltete Strukturen grundlegend zu überarbeiten und an neue Strategien anzupassen. [23]

In einem sich schnell verändernden Umfeld benötigt eine Organisation eine flexible Struktur, die schnelle Entscheidungsfindungen ermöglicht. Eine solche Struktur, die als organisch bezeichnet wird,

ähnelt einem Netzwerk, in dem Interaktionen und Kommunikation eher lateral verlaufen und Wissen dort verfügbar ist, wo es am nützlichsten ist. Organische Strukturen sind darauf ausgelegt, rasch auf Umweltveränderungen zu reagieren. Reengineering umfasst die radikale Neugestaltung von Organisationsprozessen, wobei die Organisation von Grund auf neu gestaltet wird, um sich auf ihre Kernprozesse zu konzentrieren, anstatt inkrementelle Änderungen vorzunehmen. Ziel ist es, die Rollen der Mitarbeiter grundlegend zu verändern und einen horizontalen Fluss von Teams zu schaffen, die Produkte oder Dienstleistungen liefern. Die Informationstechnologie hat die Notwendigkeit für solche tiefgreifenden Veränderungen verstärkt, weshalb konkrete Umsetzungslösungen erforderlich sind. Traditionelle Fragen der Organisationsgestaltung betreffen Unternehmensstrukturen wie Leitungsspanne, Hierarchieebenen, administrative Hierarchie, Zentralisation und Formalisation. Moderne Trends wie Agilität und kompetenzorientierte Organisationen erweitern diese Themen, obwohl konkrete empirische Studien zur Wirksamkeit noch fehlen. [24]

Ein Organisationsdesign, welches sich auf Kompetenzen ausrichtet, kann zum Beispiel folgende Elemente beinhalten:

Ablauforganisation:

- Arbeitsorientiertes Lernen in den Arbeitsprozess integrieren
- Kompetenzen analysieren und die Menschen und Prozesse, die zueinander passen, zusammenbringen
- Kompetenzerweiterung durch Job Rotation, Tandems, Mentoring und Ausrichtung der Prozesse darauf
- Integration von Wissensdatenbanken in den Arbeitsprozess
- Einführung von Regelabsprachen zur gegenseitigen Kompetenzerweiterung

Aufbauorganisation:

- Einführung oder Neustrukturierung sowie Qualifikation von Teamleitenden, die kompetenzorientiert führen, das heißt regelmäßige Evaluationen und Feedbacks antreiben
- Hierarchien durchlässig machen, um Kompetenzen zu fördern

Die Kompetenzorientierung wird üblicherweise dem Funktionsbereich Wissensmanagement zugeschrieben. Hier existieren bereits zahlreiche Ansätze, die auch konkret umsetzbar sind [26]. Es ist jedoch sinnvoll, die Kompetenzorientierung ganzheitlich zu verankern, um auch die entsprechende Akzeptanz bei allen Beschäftigten und Führungskräften zu erlangen. So stärkt sich die Organisation als gesamtes System für den Wandel.

Stand der Forschung zu Mitarbeiterkompetenzen im soziotechnischen System

Eine Umgestaltung der Aufbau- und Ablauforganisation im Rahmen der Kompetenzorientierung auf Advanced Systems Engineering (ASE) hat direkte Auswirkungen auf die Mitarbeiter innerhalb der Organisation. Diese Auswirkungen können als Teil des Arbeitssystems, das als soziotechnische Einheit betrachtet wird, analysiert und bewertet werden. Um die neuen Anforderungen im ASE erfolgreich umzusetzen, ist eine effiziente Arbeitsorganisation erforderlich. Dabei zeigt sich erneut, dass der Aufbau und die Förderung von Kompetenzen entscheidend sind, um das Arbeitssystem optimal zu gestalten und für die Mitarbeiter nutzbar zu machen. Dies kann beispielsweise durch arbeitsorientiertes Lernen (Learning on the Job) erreicht werden, bei dem die Erweiterung der Kompetenzen direkt in die Arbeitsprozesse integriert wird. [27]

Auch Führung und Veränderungsmanagement spielen eine entscheidende Rolle für den Erfolg der Kompetenzerweiterung im soziotechnischen System. Eine unterstützende und positive Begleitung der Mitarbeiter bei Veränderungen fördert die Akzeptanz und führt zu einem deutlich höheren Maß an

Zustimmung unter den Beschäftigten. [28]

Um den Herausforderungen im Bereich der Arbeitsmittel, Arbeitsaufgaben, Kompetenzorientierung und Führung gerecht zu werden, ist die Gestaltung des soziotechnischen Systems von zentraler Bedeutung. Die soziotechnische Interaktion stellt eine Gestaltungsaufgabe dar, die meist von der Organisation initiiert wird, aber alle drei Bereiche – Technik, Organisation und Mensch – betrifft. Das Konzept des „Sociotechnical Systems Engineering“ bietet neue Perspektiven für die Gestaltung der Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Diese Systeme passen sich flexibel den Bedürfnissen der Anwender an, unterstützen kontextsensitiv und sind in der Lage, sich zu erklären sowie Handlungsmöglichkeiten zu bieten. Die Interaktion erfolgt zunehmend multimodal, beispielsweise durch Sprache und Gestik, und nutzt moderne Technologien wie Augmented Reality oder Hologramme. [29, 30]

Vor diesem Hintergrund liegt der Fokus weniger auf der Frage, bei welchen Aufgaben der Mensch durch Maschinen ersetzt wird, sondern vielmehr darauf, welche neuen Aufgaben oder bestehenden Aufgaben durch Augmentation – die Erweiterung menschlicher Fähigkeiten durch maschinelle Intelligenz – auf innovative Weise gelöst werden können. Der Erfolg soziotechnischer Prozesse kann anhand verschiedener Kriterien gemessen werden. Laut Hacker [31] sollte ein Arbeitssystem mehrere Ziele verfolgen: Ausführbarkeit, Unschädlichkeit, Beeinträchtigungsfreiheit und Förderung der Persönlichkeitsentwicklung. Diese Kriterien lassen sich durch Aufgabenmerkmale, psychologische Erlebniszustände und die Auswirkungen der Arbeit bewerten. Ein wichtiger Erfolgsfaktor ist beispielsweise die Wahrung der Entscheidungsautonomie des Nutzers durch entsprechende Eingriffsmöglichkeiten. Auch das Verhältnis von physischer zu kognitiver Tätigkeit ist ein Bewertungskriterium. Während die physische Tätigkeit, etwa durch Augmented Reality, erweitert wird, nimmt die anschauliche Darstellung vieler Prozesse durch die Digitalisierung ab. Ein weiterer Erfolgsfaktor ist die harmonische Abstimmung der Wechselwirkungen zwischen Technik und Mensch, um eine bessere Gesamtleistung zu erzielen.

Insgesamt ist festzuhalten, dass der Stand der Forschung im Bereich Kompetenzorientierung in Richtung ASE noch unzureichend erforscht ist. Das gilt sowohl für die organisatorische Ebene als auch für die Ebene der Mitarbeitenden.

Ergänzung Technische Universität Darmstadt:

Der Einsatz von neuen Produktentwicklungsansätzen wie dem ASE geht mit weitreichenden Veränderungen für die Organisation und den Menschen einher und erfordert eine moderne kollaborative Arbeitskultur in der Entwicklung und Produktion. Unter dem Begriff Arbeit 4.0 oder Industrie 4.0 verbergen sich Forschungsaktivitäten, in denen es um die Neugestaltung von Arbeitsprozessen und –systemen geht. Allerdings werden die menschlichen und organisationalen Faktoren in diesen Ansätzen unzureichend skizziert [31.1]. Es fehlen oftmals die Berücksichtigung der unternehmensspezifischen Ablauf- und Aufbauorganisation [31.2], agiler Arbeitsweisen oder des lebenslangen Lernens im Beruf, die für die Produktentwicklung zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die dominierenden Themen der klassischen Organisationsgestaltung sind Fragen zu grundsätzlichen Unternehmensstrukturen, zum Beispiel die Leitungsspanne, Anzahl der Hierarchielevel, administrative Hierarchie, Zentralisation und Formalisation [24]. Aktuelle Trends wie etwa Agilität [31.3] ergänzen dies, werden allerdings nicht im Kontext von Systementwicklung diskutiert. Ein weiteres Thema ist die Kompetenzentwicklung, die üblicherweise dem Funktionsbereich Wissensmanagement zugeschrieben wird. Hier existieren bereits zahlreiche Ansätze [31.4, 31.5, 26] – konkrete empirische Studien zur Wirksamkeit im Kontext von Systementwicklung stehen allerdings noch aus. Ungeachtet dessen, ist es sinnvoll, die Kompetenzentwicklung als ASE-gerichtetes Kompetenzmanagement ganzheitlich zu verankern, um auch die entsprechende Akzeptanz bei allen Beschäftigten und Führungskräften zu erlangen. So stärkt sich die Organisation als gesamtes System für den Wandel. Darüber hinaus ist die Gestaltung des soziotechnischen Systems im Sinne des MTO-Ansatzes relevant, um die Herausforderungen für den Menschen (Arbeitsmittel, Arbeitsaufgaben, Kompetenzentwicklung, Führung) zu meistern. Das sogenannte sociotechnical systems engineering [29] eröffnet neue Perspektiven der Gestaltung der Interaktion zwischen Mensch, Technik und Organisation. Vor diesem Hintergrund können Fragen, wie etwa welche neuen Aufgaben entstehen durch neue Entwicklungsansätze oder welche Kompetenzen

sind notwendig für die neuen Arbeitsaufgaben, gelöst werden. Ein Erfolgsfaktor für eine gelungene Interaktion ist, dass die Wechselwirkungen aus Mensch, Technik und Organisation aufeinander abgestimmt zu einer besseren Gesamtleistung führen. Insgesamt ist festzuhalten, dass es bereits erste Ansätze für die Kompetenzentwicklung und einer dynamischen Arbeitsorganisation gibt, allerdings müssen diese Themen im Kontext von Systementwicklung und ASE noch weiterhin erforscht werden. Da der Einsatz von ASE mit weitreichenden Veränderungen für Organisation und Mensch einhergeht und bspw. flachere Hierarchien sowie ein gesteigertes Bedürfnis nach Autonomie, Kreativität und Well-Being am Arbeitsplatz voraussetzt [31.6].

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die verbundinterne Projektplanung beinhaltete das Zusammenwirken der beteiligten Forschungseinrichtungen, der Befähiger- und Anwenderunternehmen sowie der assoziierten Partner des Verbundprojektes CyberTech. Die Projektstruktur bildete die Grundlage für die Zusammenarbeit. In den Arbeitspaketen wurden die wissenschaftlichen Grundlagen erarbeitet, die in den Anwendungsfällen der einzelnen Anwenderunternehmen zur Anwendung kamen. Im Folgenden wird auf die Aspekte Projektkoordination, Arbeitspaketleitung, Lenkungskreis und Projektdurchführung näher eingegangen, da diese Aspekte die tragenden Säulen des Projektablaufs darstellen.

Projektkoordination: Die Koordination des Gesamtprojektes oblag dem Konsortialführer :em engineering methods AG und war durch AP 7 in der Projektstruktur verankert. Die Projektkoordination überwachte gemeinsam mit dem Lenkungskreis den Arbeitsfortschritt und bildete die Schnittstelle zwischen dem Projektkonsortium und dem Projektträger. Dabei wurde auf Basis des Arbeitsplans und der Arbeitsteilung besonderer Wert auf die Sicherstellung der arbeitsteiligen und interdisziplinären Zusammenarbeit aller Projektpartner über die Grenzen der partnerspezifischen Anwendungsfälle hinweg sowie auf ein konstruktives Konfliktmanagement gelegt.

Arbeitspaketleitung: Die organisatorische und inhaltliche Leitung der Arbeitspakete erfolgte durch definierte Partner – der sogenannten Federführung der einzelnen APs. Diese koordinierten die inhaltliche Bearbeitung der Teilarbeitspakete sowie die damit verbundene inhaltliche Erarbeitung der verorteten Anwendungsfälle. Die Federführung übernahm somit die im Rahmen der Projektkoordination beschriebenen Aufgaben auf Ebene der Arbeitspakete. Unterstützt wurde die Federführung bei der Leitung der Arbeitspakete durch die Co-Federführung. Diese stand der AP-Leitung als Sparring zur Verfügung und stellte die Breitenwirksamkeit sowie die thematische Ausrichtung der APs auf die Anwendungsfälle sicher.

CyberTech-Lenkungskreis: Der Lenkungskreis setzte sich aus der Projektkoordination und den verantwortlichen Arbeitspaketleitern zusammen. Er überwachte die strategische Ausrichtung des Projektes. Einmal im Quartal erstellte der Lenkungskreis unter Verantwortung der Projektkoordination einen Gesamtbericht für das PTKA. Ebenfalls einmal im Quartal fand eine Controlling-Sitzung mit den Mitgliedern des Lenkungskreises statt, um den Projektfortschritt kontinuierlich zu kontrollieren und die Vernetzung der APs zu gewährleisten. Dabei beriet der Lenkungskreis über das weitere Vorgehen im Projekt, sprach Handlungsempfehlungen aus und entlastete die Projektkoordination, indem er die erarbeiteten Ergebnisse überprüfte und mit dem Projektziel abglich.

Projektdurchführung: Für eine effektive Projektdurchführung wurden die Anwendungsfälle der Unternehmen in den Teilarbeitspaketen verortet und mit konkreten Ergebnissen je Arbeitspaket versehen. Die Erfüllung der Ergebnisse je Arbeitspaket war eine wesentliche Voraussetzung für die planmäßige Projektdurchführung und wurde von den verantwortlichen Unternehmen an die Arbeitspaketleitung kommuniziert. Diese waren für die Erstellung eines Ergebnisberichtes auf Arbeitspaketebene verantwortlich, der den Partnern sowie dem Projektträger zur Verfügung gestellt wurde. Zur Sicherstellung der individuellen Zielerreichung verpflichtete sich jeder Partner zur Erstellung eines eigenen Ergebnisberichtes für den jährlichen Zwischennachweis an den Projektträger. Der Zeitpunkt der Abgabe dieser Berichte wurde im Rahmen der Kooperationsvereinbarung geregelt.

Für eine regelmäßige Abstimmung wurden Treffen aller Projektmitglieder im Rahmen von jährlichen

Meilensteintreffen genutzt. Während die ersten Treffen aufgrund der Corona-Pandemie noch virtuell und online stattgefunden haben, haben die folgenden Treffen vor Ort stattgefunden. Außerdem haben innerhalb der APs weitere Treffen in Person in kleinerer Personenstärke stattgefunden.

II.4 Erzielte Ergebnisse

Ergänzend zur Darstellung innerhalb der MTO-Säulen in Abschnitt I.3 werden die Ergebnisse des Verbundprojekts CyberTech nachfolgend in tabellarischer Form präsentiert. Die Tabelle stellt konkrete, eigenständige Arbeitsergebnisse des Projektes dar, auch wenn diese zum Teil in enger Abstimmung mit weiteren ASE-Projekten entstanden sind. Im Folgenden werden die Ergebnisse im Sinne einer verbesserten Übersichtlichkeit nach den Arbeitspaketen (AP), in denen diese hauptsächlich entstanden sind, aufgelistet. Die partnerspezifischen Beiträge sind den weiteren Ausführungen zu den in der Tabelle genannten Ergebnisse zu entnehmen.

Arbeitspaket	Arbeitsergebnisse
AP1 Analyse und Ziel	<ul style="list-style-type: none"> Leitbild Mensch-Technik-Organisation für ASE (vgl. auch Abschlussveröffentlichung [1]) Zielbild Digitaler Zwilling, Digitaler Master und Digital Thread für ASE-Anwenderunternehmen Analyse des Reifegrads der digitalen Systemmodelle im Anwenderunternehmen
AP2 Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> Grafische Abbildung des Produktentwicklungsprozesses im Anwenderunternehmen Skizzierung von Use Cases für ASE ausorganisatorischer und technischer Sichtweise Spezifikation eines Konzepts für den Digitalen Master für cybertechnische Systeme Spezifikation einer Daten-/Informationsintegration für die Durchgängigkeit der Artefakte
AP3 Entwurf	<ul style="list-style-type: none"> generisches Informationsmodell zur Datenintegration entlang ASE-Fachdomänen Konzepte (mit Alternativen) für den Digital Thread ASE-Reifegradmodell Konzept für die Verknüpfung von Simulationsmodellen mit Sensornetzwerken Konzepte für ASE-spezifische Lehr- und Lernveranstaltungen Analyse, Auswahl und Anpassung von Frameworks für Risikoanalyse
AP4 Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> KI-basiertes Konzept für Normkonformität im Model-Based Systems Engineering Umsetzung eines Proof-of-Concept für eine KI-Assistenz im Model-Based Systems Engineering Rahmenwerk für Model-Based Systems Engineering Vorgehensmodell für agiles Entwickeln im Advanced Systems Engineering Demonstrator für den Digitalen Zwilling (3D-Drucker & Vier-Achs-Roboter)

	<ul style="list-style-type: none"> • Technisch-inhaltlicher Aufbau eines Lernlabors an der TU Darmstadt • Agile Toolbox für die Befähigung von Studierenden und Mitarbeitenden • Maßnahmen für die Förderung agiler Lernkultur auf Unternehmens- und Mitarbeitererebene • ASE-spezifisches Kompetenzmodell für die moderne Produktentwicklung • Entwicklung eines toolgestützten Workflows für Import von Anforderungen auf Basis ReqMan • Demonstrationsumgebung für Requirements Management auf Basis ReqMan • Umsetzung der Risikoanalyse im Kontext ASE auf Basis von Cameo Systems Modeler
AP5 Verwertung	<ul style="list-style-type: none"> • Gremienarbeit im Rahmen acatech ASE Experten- und Dialogkreis, prostep ivip e.V. (u.a. Projektgruppe DDP – Digital Data Package), Anwendungsgruppen (z.B. Technischer Arbeitskreis Systems Engineering, TAK SE im Rahmen der GSE CATIA), GfSE (Gesellschaft für Systems Engineering), IDTA (Industrial Digital Twin Association) • Publikationen auf wissenschaftlichen, wissenschaftlich-industriellen, industriellen Kanälen (wissenschaftliche Paper, Fachzeitschriftenartikel, Präsentationen auf Anwenderkonferenzen) gemäß Abschnitt II.8 • Aktive Gestaltung von und Teilnahme an Workshops und Round Tables
AP6 Evaluation	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation des Proof-of-Concept und Verfeinerung der Lösung für KI-Assistenz im Model-Based Systems Engineering • Demonstrator für den Digital Thread auf Basis Product Lifecycle Management System • Evaluation des DDP-Managers für Digital Master im Kontext cyber-technischer Systeme • Demonstrator einer KI-basierten Entwicklungsassistenten für Normkonformität • Evaluationsergebnisse für technische Konzepte / Demonstratoren zur Durchgängigkeit der Artefakte mittels • Evaluationsumgebung für die Durchgängigkeit der Artefakte auf Basis XPLM Xsphere
AP7 Konsortialführung	<ul style="list-style-type: none"> • Projektmanagement (u.a. Einhaltung des Projekt- und Ressourcenplans) • Organisation und Durchführung der Lenkungskreistreffen • Organisation und Durchführung der Konsortialmeetings • Einbindung der assoziierten Partner inkl. Feedback an Lenkungskreis • Koordination der Verwertung und Öffentlichkeitsarbeit (u.a. Messeauftritte) • Koordination der Zusammenarbeit mit AdWiSE und acatech

Ergänzung Technische Universität Darmstadt:

AP 1 Analyse:

Im Rahmen der Untersuchung wurde der Ist-Zustand und die Ziele in Bezug auf digitale Systemmodelle sowie die Sensorausstattung bei beiden Anwendungsunternehmen analysiert. Darüber hinaus wurden Dienstleistungen und Geschäftsmodelle (GM) untersucht.

Die wesentlichen Ergebnisse lauten:

- *Reifegrad digitaler Systemmodelle (AP 1.1.1): Der aktuelle Reifegrad der digitalen Systemmodelle in beiden Unternehmen wurde bewertet mit dem Ziel einer Verbesserung der Modellierung und Integration digitaler Systeme.*
- *Sensorausstattung (AP 1.1.2): Die vorhandene Sensorausstattung in beiden Anwendungsunternehmen wurde analysiert. Daraus lassen sich in Arbeitspaket (AP) 3 die Sensorinfrastruktur für eine effiziente Datenerfassung optimieren.*
- *Dienstleistungen und GM (AP 1.2.2): In diesem Arbeitspaket wurden die Dienstleistungen und Geschäftsmodelle in beiden Unternehmen untersucht zur Bewertung der Ist-Situation und der Definition von Handlungsempfehlungen.*

Menschbezogene Analyse (AP 1.3):

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, den aktuellen Stand der Kompetenzentwicklung und der Arbeitsorganisation bei den Anwenderunternehmen zu analysieren. Im Zentrum der Untersuchung standen folgende Fragen: (1) welche Maßnahmen wurden durchgeführt, um die Kompetenzen der Mitarbeitende zu stärken? sowie (2) existieren Kompetenzmodelle, die auf ASE ausgerichtet sind? Zur Beantwortung dieser Fragen wurde der MTO-Ansatz herangezogen. Dabei wurden verschiedene Methoden eingesetzt, um das soziotechnische Arbeitssystem zu untersuchen. Die Ausgangslage stellte eine systematische Literaturrecherche zu neuen Formen der Systementwicklung dar, die durch acht Experteninterviews begleitet wurde. Auf Basis zusätzlicher Dokumentenanalyse und weiterer Gespräche mit den Anwenderunternehmen zu qualitativen Aspekten des ASE und Kompetenzanforderungen wurde eine Onlinebefragung entwickelt. Nach erfolgreichem Pretesting wurde die Onlinebefragung 121 Mitarbeitenden der Anwenderunternehmen zur Teilnahme bereitgestellt. Die Onlinebefragung diente dazu, sich auf einer empirischen Grundlage ein umfassendes Bild von der Kompetenzentwicklung und der Arbeitsorganisation zu machen.

Die wesentlichen Ergebnisse der Ist-Analyse bei den Anwenderunternehmen lauten:

- (1) *Geringer Einsatz agiler Methoden (z.B. Scrum-Rahmenwerk)*
- (2) *Geringer Einsatz von MBSE- oder ähnlicher Engineering-Methodik*
- (3) *Aufbauorganisation ist gekennzeichnet durch klassische Hierarchien mit isolierter Linienorganisation (z.B. Teams arbeiten in traditioneller Top-Down-Struktur, weisen keine cross-funktionale Arbeitsstrukturen auf etc.)*
- (4) *Eingeschränkte flexible Arbeitszeitgestaltung (z.B. Home-Office)*
- (5) *Stetige Zunahme von virtueller Kommunikation via Chat und Videos*
- (6) *Begrenzte Qualifizierungsmöglichkeiten zu Förderung von ASE-spezifischen Inhalten, agilen Methoden und Soft Skills (z.B. sozial-kommunikative Fähigkeiten)*
- (7) *Der Fokus der meisten Schulungsangebote richtete sich auf den fachlich-methodischen Bereich*
- (8) *Kommunikation und Information von Schulungsangeboten erfolgt vorwiegend durch E-Mails und Mitarbeitersprache*

(9) *Schwach ausgeprägte Lernkultur, um Lernen im Hinblick auf ASE auf individueller und organisationaler Ebene zu fördern*

AP 2 Anforderungen:

Im Rahmen des Arbeitspaket (AP) 2 wurden die Anforderungen definiert. Das Vorgehen beinhaltet drei Schritte, die strukturiert geplant und umgesetzt wurden.

Für die Definition von Anforderungen für die Umsetzung von ASE wurde ein Vorgehensmodell entwickelt, womit die Inhalte und Zwischenergebnisse dargestellt werden konnten. Für die Anforderungsanalyse wurden die Ergebnisse aus AP1 untersucht, Anforderungen formuliert und in einem Anforderungsmodell dokumentiert. Auf Basis der Anforderungen konnte das System konzipiert und die Architektur festgelegt werden.

Im speziellen Anwendungsfall AP 2.1.2 ging es um die Vernetzung beim Anwendungsunternehmen Mechatronic. Es wurde ein Anwendungsfall detailliert beschrieben und von den relevanten Stakeholdern freigegeben. Die Bedürfnisse der Nutzer wurden in eine umfassende Anforderungsliste überführt, welche sowohl funktionale als auch nicht-funktionale Anforderungen umfasst.

Nutzbarkeit im Sinne von menschenzentrierten Nutzerschnittstellen (AP 2.1.1):

Neben organisatorischen Anforderungen und Marktanforderungen sind insbesondere Nutzungsanforderungen bei der Entwicklung von technischen Lösungen relevant, um die Gebrauchstauglichkeit und Nutzbarkeit von Produkten zu gewährleisten. Aus diesem Grund unterstützte das IAD das PLCM bei der Formulierung von technischen Anforderungen hinsichtlich Nutzbarkeit im Sinne von menschenzentrierten Nutzerschnittstellen. Dabei wurden anhand der Erkenntnisse aus den vorhergehenden Arbeitspaketen die ersten Ansätze zur Ableitung von Anforderungen hergeleitet. Zusätzlich wurden die direkten Ziele und Wünsche der an den Anwendungsfällen beteiligten Unternehmen und deren Stakeholder ermittelt. Hierzu wurden einzelne Aspekte wie die Nutzerschnittstelle und gewünschte Experience bei Interaktion mit dem System im Rahmen von Workshops mit den Anwenderunternehmen näher betrachtet und diskutiert. Es wurden sowohl qualitative (z.B. welche Ziele sollen erreicht werden? welche Features werden gewünscht?) und quantitative Anforderungen (z.B. welche Effizienz-/Performancekriterien gelten?) identifiziert.

Ergebnisse:

Die identifizierten Gestaltungsansätze aus den Workshops mit den Anwenderunternehmen wurden in eine Anforderungsliste mit Fest- und Wunschforderungen überführt und in Arbeitspaket 2.1 für die Gestaltung der Nutzerschnittstelle aus Nutzersicht zur Technikgestaltung herangezogen. Die Anforderungsliste wurde durch die Anwender in einem schriftlichen Umlauf validiert und priorisiert.

Definition der mitarbeiterorientierten Anforderungen zum Aufbau eines Kompetenzmanagements

(AP 2.3):

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, auf Basis des aktuellen Standes mitarbeiterorientierte Anforderungen herzuleiten und ein Soll-Bild für die Kompetenzentwicklung zu erstellen. Dabei spielte die gezielte Befähigung von Mitarbeitenden durch die Förderung der im Rahmen des ASE notwendigen Kompetenzen eine zentrale Rolle für das soziotechnische System. Zur Erreichung dieser Ziele wurde ein Framework zum Aufbau eines auf ASE-gerichteten Kompetenzmanagements erarbeitet. Die Kernelemente eines solchen zielgerichteten Kompetenzmanagements sind Arslanparcasi & Karasek [31.7] zu entnehmen.

Ergebnisse:

Um Kompetenzen zu beschreiben, transparent zu machen sowie Transfer, Nutzung und Entwicklung der Kompetenzen sicherzustellen, wurde ein Kompetenzmodell erstellt. 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 bildete das Kernelement eines ASE-gerichteten Kompetenzmanagements. Diese Systematisierung der Kompetenzen stellte die Ausgangslage für die späteren Entwicklungsmaßnahmen dar. Des Weiteren wurden Handlungsempfehlungen zur Förderung einer agiler Lernkultur auf Unternehmens- und auf Mitarbeiterebene sowie zur Implementierung eines Wissensmanagements formuliert. Nähere Erläuterungen hierzu sind der Abschlusspublikation zu entnehmen.

AP 3 Entwicklung:

Im Rahmen der Tätigkeiten in AP3 wurde eine Definition für den Begriff "Digitaler Master" erarbeitet. Dieser Begriff bezieht sich auf ein zentrales digitales Modell oder eine Datenbasis, die als Referenz für verschiedene Prozesse und Anwendungen vorrangig in der Phase der Produktentwicklung dient. Der Digitale Master enthält Informationen über Produkte, Systeme oder Prozesse und ermöglicht eine effiziente Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen der physischen und der digitalen Welt. Zusätzlich wurden Prozesse und Methoden entwickelt, um ausgewählte Sensormesswerte als Simulationsdaten mit Simulationsmodellen berechnen zu können. Diese zielt darauf ab, realistische und zuverlässige Daten für das Inputdeck der Produktnutzungsphase zu generieren.

Konzeptionierung von Kompetenzen (AP 3.3):

Ziel dieses Arbeitspaketes war es konkrete Handlungsempfehlungen für die weitere Entwicklung der auf ASE ausgerichteten agilen Kompetenzen beim Anwenderunternehmen abzuleiten und anzubieten. Daher wurde von Ende September bis Anfang Oktober 2023 eine Untersuchung zur Erfassung der aktuellen Umsetzung und dem Verständnis von „Agilität“ bzw. „agilem Arbeiten“ im Kontext der Produktentwicklung bei einem Anwendungsunternehmen durchgeführt. Es wurden drei Workshops mit vier Experten aus verschiedenen Tätigkeitsschwerpunkten (Abteilungsleitung, Projektleitung, Systemarchitektur) durchgeführt. Die Erhebung erfolgte virtuell und kollaborativ via Zoom und Miro-Board im Rahmen von jeweils ca. 90-minütigen Sessions. Entlang von Leitfragen wurden die Experten dabei um Einschätzungen und detaillierte Erläuterungen gebeten, die digital dokumentiert und den jeweiligen Leitfragen zugeordnet wurden.

Ergebnisse:

Die Handlungsempfehlungen für das Anwendungsunternehmen lassen sich in Maßnahmen für eine ASE-gerichtete Kompetenzentwicklung (1-7) und allgemeine Maßnahmen für agiles Arbeiten (8-13) gliedern:

- (1) Aufbau einer Einheit, die Kompetenzen organisiert, plant und steuert (Kompetenzmanagement)
- (2) Sukzessive Adaptation und Ausweitung des entwickelten ASE-Kompetenzmanagements
- (3) Auswahl und Realisierung von Qualifizierungsangeboten, die den Fokus auf Soft Skills legen
- (4) Schulungen zu neugeschaffenen Rollen
- (5) Einbezug und Ausbau bestehender Kompetenzentwicklungsangebote durch E-Learning und Blended Learning
- (6) Einführung eines standardisierten und umfassenden Onboardings
- (7) Förderung des informellen Lernens und Austauschs
- (8) Wissensvermittlung und -vertiefung zum Thema Agilität/SCRUM

- (9) *Einheitliches Verständnis zu „agilem Arbeiten“ schaffen*
- (10) *Einführung und Formulierung eines agilen Selbstverständnisses*
- (11) *Ausgestaltung von agilen Methoden in Übereinstimmung mit regulatorischen, personellen und organisationalen Rahmenbedingungen*
- (12) *Verankerung und Sichtbarmachung*
- (13) *Umsetzung und Erprobung des erarbeiteten Verständnisses zu agilem Arbeiten im Rahmen eines Projektes*

AP 4 Umsetzung:

Im Rahmen der Tätigkeiten von AP4 wurden an der TU Darmstadt zwei Demonstratoren aufgebaut. Ein Demonstrator betrachtet den Bereich der additiven Fertigung und der zweite Demonstrator bezieht sich auf einen Roboterarm. Die beiden Demonstratoren wurden zu einem Gesamtsystem zusammengeführt. Beide Systeme umfassen neben ihren physischen Komponenten einen Digitalen Zwilling.

Die Kommunikationsstruktur des Gesamtsystems umfasst die Verwendung von OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) für die Konfigurationen des Roboterarms. Dafür wurden sowohl Mikrocontroller als auch speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) als Clients mit dem Kommunikationsserver verbunden.

AP 5 Verwertung und Transfer:

Im Rahmen der Verwertung und des Transfers der Projekthalte wurden von Seiten des PLCM eine Reihe an Veröffentlichungen erarbeitet und auf Konferenzen vorgestellt. Details zu den Veröffentlichungen sind in Kapitel II.8 zu finden.

Ein weiteres Ergebnis in diesem Bereich ist der Aufbau des Demonstratorsystems, das ASE-Funktionen beinhaltet. Dieses Demonstratorsystem dient anschließend als anschauliches Beispiel für Lehrveranstaltungen, in denen die Projektergebnisse fortlaufend integriert werden. Ein weiteres Ergebnis ist der Abschluss des Lehr- und Lernlabors, das für studentische Projektaufgaben genutzt wird.

Aufbau eines wissenschaftlichen Lernlabors für die universitäre Bildung zum Trainieren von ASE-Kompetenzen (AP 5.2):

Die Entstehung des neuen Entwicklungsansatzes ASE geht Hand in Hand mit neuen Anforderungen an die akademische Ausbildung von Ingenieuren. In diesem Zusammenhang muss die Hochschulbildung auf diese neuen Anforderungen an spezifische Fähigkeiten und Kompetenzen der künftigen Ingenieure reagieren. Das Ziel dieses Arbeitspaketes war einerseits ein Lernlabor aufzubauen und andererseits auf Basis der Erkenntnisse zu Kompetenzentwicklung spezifische Lernaktivitäten und -settings für Studierenden zu konzipieren und anzubieten. Das in AP2 abgeleitete auf ASE-ausgerichtete Kompetenzmodell wurde als Grundlage für die Konzeptualisierung des Lernlabors verwendet und bildete den Mittelpunkt der definierten Kompetenzen. Für das Lernlabor wurde eine Auswahl an Kompetenzen für agiles Arbeiten identifiziert, im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit auf fakultätsspezifische Anforderungen angepasst und von Hochschulexperten und Didaktikern begutachtet. Eine vertiefte Darstellung zur Konzipierung von Lernaktivitäten und -settings für ASE im Rahmen der universitären Bildung kann bei Karasek & Arslanparcasi [31.7] eingesehen werden.

Ergebnisse:

Für die Lehr-/Lernaktivitäten wurden im Verlauf des Projektes verschiedene Konzepte entwickelt und umgesetzt. Diese betreffen den technisch-inhaltlichen Aufbau und die Ausstattung des Lernlabors sowie

die Entwicklung eines interdisziplinären Tutoriums und Gruppenforschungsprojekten am Fachbereich 16 Maschinenbau der TU Darmstadt. Im Folgenden werden diese Kernergebnisse ausgeführt.

(1) *Technisch-inhaltlicher Aufbau des Lernlabors*

Das Lernlabor als Lernumgebung dient zur Erreichung der Lernziele. In diesem Zusammenhang wurde ein ausreichend großer, erreichbarer und zentral gelegener Raum mit Arbeitsplätzen eingerichtet, welche mobil an verschiedenen Arbeitsstellen im Raum eingesetzt werden konnten. Die Arbeitsplätze bestehen aus 12 state-of-the-art und leistungsstarken Notebooks, mit Zugang zu relevanter und notwendiger Software zu Arbeitsorganisation, Recherche sowie inhaltlich-technischer Bearbeitung von Aufgaben (z.B. Software für die Modellierungssprache SysML). Zur Unterstützung von Visualisierung, Präsentationen und Gruppenarbeiten stehen ein digitales smartes Whiteboard mit Projektionsfunktion und ein mobiler Multi-Touch-Tisch bereit. Des Weiteren stehen zwei Demonstratoren (ein Roboterarm und ein 3D-Drucker) für die Entwicklungsarbeiten an cyber-physischen Systemen wie oben beschrieben zur Verfügung.

(2) *Didaktisches Lehr- und Lernkonzept*

Das Lehrlabor zielte auf eine ganzheitliche Ausbildung ab. Um den Fokus auf Kompetenzentwicklung für ASE zu stärken, wurde ein interdisziplinäres Tutorium von zwei Fachgebieten der TU Darmstadt konzipiert. Dabei wurden technische (Fach- und Methodenkompetenz) mit menschenbezogenen Kompetenzen (Kompetenzen für agiles Arbeiten) in drei Phasen zusammengeführt. In der Einführungsphase erhielten die Studierenden das nötige Know-How zu agilem Arbeiten in Anlehnung an das Scrum-Rahmenwerk. In einer ersten Simulationsphase wurden dabei spezifische und ausgewählte Bereiche des agilen Arbeitens (Retrospektive, Rollen und Rollenrotation, Planning etc.) intensiv begleitet und trainiert. In der anschließenden Arbeitsphase erfolgte die Bearbeitung der mechatronischen Projektaufgabe mit begleiteter bis selbstständiger Organisation der Projektgruppe mittels agiler Methoden. In der Abschlussphase wurden die Projektergebnisse präsentiert und reflektiert. Darüber hinaus wurde eine „agile Toolbox“ entwickelt, die aus vorselektierten Methodenkarten bestand und die Studierenden bei der agilen Projektarbeit unterstützte. Die Auswahl der Methoden erfolgte in Übereinstimmung mit den Lernzielen sowie auf Basis didaktisch-pädagogischer Erkenntnisse für Projektgruppenarbeit im Hochschulkontext und Standards der Hochschuldidaktik. Zudem wurde durch gezielte Vernetzung und Öffentlichkeitsarbeit, z.B. in Zusammenarbeit mit dem Science Communication Office des FB 16 Maschinenbau die Sichtbarkeit des Themas und des Lernlabors via Social Media (z.B. Instagram und Linked-In) sowohl für Studierende als auch für TU-Angehörige erhöht. Das Konzept des Tutoriums wurde zudem in Verlauf des Projektes für interdisziplinäre studentische Projektarbeiten (Advanced Design Project) adaptiert und mit Studierenden durchgeführt.

AP 6: Evaluation

Der Aufbau des wissenschaftlichen Lernlabors für die universitäre Bildung und die agile Toolbox wurden im Rahmen des Advanced Design Project evaluiert und stoßen auf eine positive Resonanz seitens der Studierenden.

II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Über die Dauer des Vorhabens wurden keine für die Durchführung und Zielerreichung des Projektes relevanten FE-Ergebnisse bekannt.

II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse des vorliegenden Verbundprojekts sind Arbeitsgestaltungsrahmen, Methoden, Hilfsmittel und IT-Werkzeuge zur Entwicklung für Cyber-technische Systeme. Alle beteiligten Projektpartner erhoffen sich von diesen Ergebnissen einen Nutzen hinsichtlich der Verwertbarkeit der Ergebnisse. Im Folgenden werden die wirtschaftlichen, wissenschaftlich-technischen und gesellschaftlichen Nutzen herausgestellt und denkbare Anschlussmöglichkeiten an das Vorhaben beschrieben:

Wirtschaftlicher Nutzen:

Die Ergebnisse des Vorhabens weisen ein wirtschaftliches Potential auf, das von den beteiligten Forschungspartnern, Befähiger- und Anwenderunternehmen gleichermaßen erkannt wird. Die beteiligten Forschungspartner prognostizieren durch den Transfer der Ergebnisse in die Unternehmenspraxis nicht nur ein großes Marktpotenzial, sondern auch die Schaffung neuer Arbeitsplätze und die Erweiterung von Kompetenzen in der menschenorientierten Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen. Diese Dynamik wird durch die Zusammenarbeit mit Industriepartnern verstärkt, die darauf abzielt, Forschungsergebnisse und Kompetenzen zu erweitern und neue Partnerschaften zu knüpfen. Durch die Präsentation der Ergebnisse auf Messen, Tagungen, in Arbeitskreisen und in Fachzeitschriften wird zudem eine breite Öffentlichkeitswirksamkeit erzielt. Die Integration der Erkenntnisse in weitere Projekte fördert zusätzlich die Forschung in zukunftsweisenden Bereichen wie Digitalisierung, Agilität und Kollaboration.

Befähigerunternehmen erkennen den Nutzen in der Berücksichtigung der Beschäftigten und streben danach, die gewonnenen Erkenntnisse in ihre Bildungs- und Beratungsarbeit einzubinden. Dies soll helfen, die gesellschaftlichen Auswirkungen von Cyber-technischen Systemen adäquat zu begleiten. Zudem erwarten sie ein Wachstum in ihren Geschäftsbereichen durch die Eingliederung der Projektergebnisse in ihr Angebotsspektrum, insbesondere bezüglich Beratungs-, Dienstleistungs- und Softwarelösungen.

Anwenderunternehmen nutzen die Projektergebnisse, um Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen sowie eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit zu erreichen. Sie erwarten auch die Entwicklung neuer Arbeitsweisen und Geschäftsmodelle sowie die Optimierung bestehender Entwicklungsprozesse durch die Anwendung der Forschungsergebnisse. Insgesamt verspricht das Forschungsprojekt, einen signifikanten wirtschaftlichen Nutzen zu generieren, der über die direkte Anwendung der Forschungsergebnisse hinausgeht und langfristige positive Auswirkungen auf die beteiligten Unternehmen und die gesamte Branche hat.

Ergänzung Technische Universität Darmstadt:

Die Technische Universität Darmstadt erwartet keinen direkten wirtschaftlichen Nutzen.

Wissenschaftlich-technischer Nutzen:

Das Vorhaben hat das ambitionierte Ziel verfolgt, den wissenschaftlichen Diskurs zu bereichern, die Forschungseinrichtungen zu stärken und die Praxis in der Produkt- und Systementwicklung voranzutreiben. Durch die Präsentation der Projektergebnisse auf Konferenzen, in Arbeitskreisen und die Veröffentlichung in Fachzeitschriften soll nicht nur die wissenschaftliche Gemeinschaft profitieren, sondern auch die Sichtbarkeit der beteiligten Organisationen gesteigert werden.

Die beteiligten Forschungseinrichtungen erwarten kurz- und mittelfristig Impulse für die Gestaltung weiterer Forschungsthemen sowie Impulse für die Lehre. So werden durch CyberTech nicht nur die anvisierten Forschungslücken geschlossen, sondern auch neue, bisher kaum beachtete Themen und Fragestellungen für die weiterführenden Forschungsbemühungen identifiziert.

Befähigerunternehmen erkennen in der Verbreitung der Ergebnisse eine Chance, die betriebliche Praxis zu verbessern und einen Beitrag zur Optimierung der Systemelemente Mensch-Organisation-Technik

zu leisten. Neben der wissenschaftlich-methodischen Weiterentwicklung von zukunftsweisenden Kernkompetenzen, können mit den Projektergebnissen auch wesentliche technische Konzepte und weiterführende Lösungen erarbeitet werden. Anwenderunternehmen wiederum sehen in den Projektergebnissen eine Möglichkeit, ihre Effizienz zu steigern, die Planungsqualität zu verbessern und ihre Wettbewerbsfähigkeit zu stärken – beispielweise durch die Umsetzung der in CyberTech erarbeiteten Konzepte zur Befähigung von Mitarbeitenden im Themenkomplex des ASE.

Ein wesentliches Anliegen des Projekts ist die Entwicklung und Erprobung neuer Methoden, die nicht nur den Teilnehmern, sondern auch weiteren Firmen, insbesondere KMUs, zugutekommen sollen. Dies unterstreicht die Bedeutung des Projekts für die breitere wirtschaftliche und technologische Gemeinschaft.

Darüber hinaus wird erwartet, dass die Ergebnisse in die Forschungs-, Lehr- und Weiterbildungsaktivitäten der beteiligten Institutionen einfließen. Dies dient der Ausbildung der nächsten Generation von Ingenieuren und Entwicklern und unterstützt somit die langfristige Entwicklung innovativer Technologien und Methoden. Insgesamt erreicht das Projekt, durch die Kombination von wissenschaftlicher Forschung und praktischer Anwendung einen bedeutenden Beitrag zur Weiterentwicklung der Technologie und Methodik in der Entwicklung komplexer Systeme zu leisten.

Ergänzung Technische Universität Darmstadt:

Die Anwendungsunternehmen und die Demonstratoren dienen als Basis für die Einführung und Erprobung des ASE-Ansatzes. Diese wurden durch die Veröffentlichung eines Leitbildens und die Ableitung von konkreten Anforderungen für das soziotechnische System unterstützt. Die Zusammenarbeit mit dem assoziierten Kreis sowie den Netzwerken und Gremien der Partner und dem wissenschaftlichen Begleitprojekt AdWiSE bilden die Grundlage für eine langfristige Skalierbarkeit auf weitere Branchen sowie den Themen „Arbeit 4.0“ und „Industrie 4.0“. Mit dem wissenschaftlichen Lehr- und Lernlabor für die Kompetenzentwicklung im universitären Umfeld der TU Darmstadt wird aktiv der Transfer in Form von Projektarbeiten durch Studierende durchgeführt. Die Verwertung der Ergebnisse findet darüber hinaus in Industrieprojekten wie beispielsweise im Mittelstand Kompetenzzentrums (MiT 4.0) der TU Darmstadt statt.

Gesellschaftlicher Nutzen:

Das Verbundprojekt CyberTech verfolgte das ehrgeizige Ziel, durch die Entwicklung fortschrittlicher cyber-technischer Systeme bedeutende gesellschaftliche Vorteile zu schaffen. Im Fokus des Projekts stand die Förderung nachhaltiger Technologien, die sowohl zur Umweltfreundlichkeit als auch zur Ressourceneffizienz beitragen. Ein zentraler Aspekt war auch die Verbesserung der Arbeitsgestaltung und -umgebung, einschließlich der Schaffung optimaler Bedingungen für lebenslanges Lernen.

Die Ergebnisse des CyberTech-Projekts tragen erheblich zur Bildung und Kompetenzentwicklung bei, indem sie neue Technologien in die Aus- und Weiterbildung integrieren und so die Fachkräfte von morgen stärken. Darüber hinaus fördern die erzielten Ergebnisse die Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Institutionen und unterstützen die Schaffung neuer Arbeitsplätze, während sie gleichzeitig durch innovative Forschung und Entwicklung vorangetrieben werden.

Insgesamt leisten die Ergebnisse von CyberTech einen wertvollen Beitrag zu technologischen Innovationen und bieten sowohl soziale als auch ökologische Vorteile. Sie sind darauf ausgelegt, die gesellschaftlichen Herausforderungen positiv zu beeinflussen und die Grundlagen für eine nachhaltige und zukunftsfähige Entwicklung zu legen.

Ergänzung Technische Universität Darmstadt:

Die Technische Universität Darmstadt hat als Forschungs- und Lehranstalt eine besondere Rolle inne und trägt stark zum gesellschaftlichen Nutzen dieses Projektes bei. Da sie als Universität keinen wirtschaftlichen Nutzen erzielt, ist ihre Forschung besonders uneigennützig und allgemeingültig. Durch ihren Lehrauftrag werden Projektergebnisse sowohl an Studierende als auch über das Mittelstands-

Projekt an Unternehmen als auch über zahlreiche Veröffentlichungen an die wissenschaftliche und nicht-wissenschaftliche Öffentlichkeit vermittelt.

Anschlussmöglichkeiten:

Die Anschlussmöglichkeiten des Forschungsprojekts bieten ein umfassendes Spektrum an Initiativen und Strategien von Forschungseinrichtungen sowie von Befähiger- und Anwendungsunternehmen, um die erzielten Ergebnisse wirkungsvoll zu nutzen und zu verbreiten. Forschungseinrichtungen beabsichtigen, die gewonnenen Erkenntnisse in die Entwicklung vergleichbarer Systeme zu integrieren und/oder durch die Weiterentwicklung von Methoden und Werkzeugen neue Industriekunden zu gewinnen, wobei ein besonderes Augenmerk auf den Mittelstand gelegt wird.

Durch die Anwendung der Ergebnisse in Drittmittelprojekten und deren Verbreitung über verschiedene Netzwerke wird der Wissenstransfer intensiviert. Zusätzlich ist die Integration der Forschungsergebnisse in die akademische Lehre und weitere Forschungsprojekte geplant, um neue Wissensbasen zu etablieren und die Erkenntnisse für künftige Vorhaben zu nutzen. Diese Maßnahmen tragen gleichzeitig zur Schaffung hochqualifizierter Arbeitsplätze in Deutschland bei und stärken die Position des Landes als Innovationsstandort.

Die Forschungseinrichtungen setzen sich aktiv dafür ein, die Projektergebnisse in verschiedene Bereiche wie Softwaretools, Lehrveranstaltungen und Weiterbildungsprogramme zu integrieren. Dies stellt sicher, dass die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit gewahrt bleibt. Die Ergebnisse werden nicht nur durch Netzwerke verbreitet, sondern auch durch gezielte Öffentlichkeitsarbeit einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der kontinuierlichen Weiterentwicklung eigener Konzepte und der Verbesserung der Verknüpfung von Wissenschaft und Praxis. Besonders im Bereich der partizipativen Forschung wird darauf geachtet, dass die wissenschaftlichen Erkenntnisse eng mit praktischen Anwendungen verknüpft werden, um deren Relevanz und Anwendungsmöglichkeiten zu maximieren. Ergänzend dazu werden auch neue Partnerschaften und Kooperationen angestrebt, um die Reichweite und den Einfluss der Forschungsergebnisse weiter auszubauen und innovative Ansätze in der Praxis zu etablieren.

Befähigerunternehmen betrachten die Projektergebnisse als wertvolle Ressource zur Erweiterung der Kompetenzen von Mitarbeitern, Betriebsräten und Führungskräften in der Gestaltung komplexer Wissensarbeit. Sie planen, die Inhalte gezielt für unterschiedliche Zielgruppen aufzubereiten und praxisnah zu vermitteln. Anwendungsunternehmen hingegen beabsichtigen, die Forschungsergebnisse in ihre Entwicklungsprozesse, Produkte und Dienstleistungen zu integrieren und über verschiedene Plattformen und Netzwerke zu verbreiten. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Anwendung von Systems Engineering (SE)-Methoden, der Nutzung digitaler Zwillinge, der Verbesserung der Zusammenarbeit sowie der Entwicklung neuer Technologien und Geschäftsmodelle.

Insgesamt bieten die Anschlussmöglichkeiten des Projekts eine solide Grundlage für die Weiterführung und den Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis. Dies ermöglicht einen nachhaltigen Einfluss auf Wirtschaft und Gesellschaft, indem es zur Schaffung innovativer Lösungen und zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit beiträgt.

Ergänzung Technische Universität Darmstadt:

Auch über die Laufzeit des Projektes CyberTech hinaus werden die Ergebnisse des Projekts genutzt und weiterentwickelt. Diese finden sich beispielsweise in Teilen in verschiedenen Lehrveranstaltungen sowie in individuellen studentischen Projektarbeiten wieder.

Für industrielle Interessenten werden die Ergebnisse weiterentwickelt und im Rahmen des Mittelstand-Digital Zentrum Darmstadt in Workshops verwertet.

Des Weiteren werden die Ergebnisse weiterentwickelt, um anschließende Forschungs- und Umsetzungsprojekte zu ermöglichen.

II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

In Bezug zum Begleitforschungsprojekt AdWiSE bestand über die gesamte Laufzeit des Vorhabens ein enger Austausch, insbesondere durch die Einbindung in die fachspezifischen Arbeitsgruppen. Dies äußerte sich einerseits durch regelmäßige Austauschrunden zwischen der CyberTech Projektleitung und den AdWiSE Projektkoordinatoren und der Teilnahme an den von AdWiSE organisierten Veranstaltungen, wie dem ASE Summits. Dadurch konnten einerseits Synergien identifiziert und andererseits die Forschungsergebnisse klar voneinander abgegrenzt werden. Dabei wurden insbesondere Anknüpfungspunkte zu den Verbundprojekten SyProLei, MoSyS und RePASE genutzt worden. Darüber hinaus haben stets weitere Vertreter von CyberTech bei fachlich relevanten Tagungen und Veranstaltungen, wie dem ASE Summit, dem Tag des Systems Engineering oder der system:ability teilgenommen und mit Beiträgen aus CyberTech die Ergebnisse präsentiert. Das Ziel der Teilnahme war neben der Präsentation aktueller Ergebnisse stets der Austausch mit anderen Vorhaben, Unternehmen und Forschungsinstituten, um sich über andere Fortschritte auf diesem Gebiet auszutauschen. Außerdem konnte ein umfassender Austausch mit den assoziierten Partnern und weiteren interessierten Unternehmen erreicht werden.

Ergänzung Technische Universität Darmstadt:

Während der Projektlaufzeit wurden vielfältige Aktivitäten zur Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb wahrgenommen. Die untenstehende Tabelle zeigt einen Auszug der wichtigsten Aktivitäten. Nicht in der Tabelle aufgeführt sind Teilnahmen in den Arbeitsgruppen des Verbundprojekts AdWiSE. Dort wurde von Seiten der Technischen Universität Darmstadt in den Arbeitsgruppen Bildung und Kompetenzen, Nachhaltigkeit und Advanced Systems die Themen mit Partnern anderer Projekte zusammengetragen und als White Paper veröffentlicht.

<i>Datum</i>	<i>Rahmen</i>	<i>Titel der Veranstaltung</i>
14.06.2021	AdWiSE	Kickoff zw. Den Verbundprojekten
14.07.2021	AdWiSE	Austauschtreffen CyberTech & MoSys
02.11.2021	acatech	ASE-Experten- und Dialogkreis
05.04.2022	AdWiSE	Austauschtreffen RePase & CT
17.05.2022	Cirp Design (online)	Konferenz
08.06.2022	ProSTEPiViP	Konferenz
12.07.2022	AdWiSE	Advanced Systems Engineering Summit 2022
24.07.2022	AHFE 2022	Veröffentlichung
29.09.2022	CyberTech	Austausch DynaSoS
14.11.2022	FV Smart Engineering e.V.	Mitgliederversammlung
01.03.2023	CyberTech	Konferenz (GfA)
21.03.2023	CyberTech	IIC Meeting 2023
15.05.2023	CyberTech	Cirp Design Konferenz 2023
23.-25.05.2023	CyberTech	system:ability
13.06.2023	CyberTech	Engineering Process Day Darmstadt 2023
20.-21.06.2023	AdWiSE	Ase Summit 2023
06.07.2023	CyberTech	Mittestand Digital Zentrum Darmstadt - Austauschtreffen
19.07.2023	CyberTech	Konferenz (AHFE)
11.09.2023	CyberTech	GSE Systems Engineering
10.-12.04.2024	CyberTech	ProSTEP iViP Symposium 2024
22.-25.04.2024	CyberTech	Hannover Messe Industrie

II.8 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.

Röhm, Emich, Anderl: „Approach of Simulation Data Management for the Application of the Digital Simulation Twin“

Wang, Steinbach, Klein, Anderl: “Integration of model based system engineering into the digital twin concept”

Olbort, Röhm, Kutscher, Anderl: “Integration of Communication using OPC UA in MBSE for the Development of Cyber-Physical Systems”.

Humpert, Röhm, Anacker, Dumitrescu, Anderl: “Method for direct end customer integration into the agile product development”

Kleiner, Anderl „Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-Technischen Systemen“

Röhm, Steinbach, Anderl “Concept for the Selection and Positioning of Sensor Technology in the Development of Advanced Systems”

Steinbach, Röhm, Anderl: "Development of a Guideline for the Sensor Layout Plan"

Kaspar, Cioroi, Bauch, Kleiner: "Guidelines for systematic functional decomposition in model-based systems engineering“

Steinbach, Anderl: “Development of a Potential Analysis for the Introduction of Sustainable Digitization Solutions”

Röhm, Anderl, Schleich: "Development of an Information Model for Simulation Data Management in the Digital Twin”.

Kleiner, Cioroi, Bleisinger, Mechergui, Krautkremer: “Ein generisches Informationsmodell für durchgängige IT Toolchains im Kontext des Model-Based Systems Engineering”

Karasek, Arslanparcasi: “Conceptualizing an Academic Teaching and Learning Laboratory for Systems Engineering”

Arslanparcasi, Karasek: „Kompetenzentwicklung in Systems Engineering. Nachhaltig Arbeiten und Lernen - Analyse und Gestaltung lernförderlicher und nachhaltiger Arbeitssysteme und Arbeits- und Lernprozesse“

Coric, Joisten, Schleich: „Leitbild und Status zum Advanced Systems Engineering für die Entwicklung von Cyber-technischen Systemen.“ Vortrag während: Konferenz system:ability, 23.05.2023 – 25.05.2023, Paderborn – Deutschland

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

Kleiner, Schleich: „Advanced Systems Engineering: Model-Based Systems Engineering for Cyber-Technical Systems“, ProSTEP iViP Symposium 2024, 11.04.2024

Ibrahim Ghanawi, Mohammad Wissam Chami, Mohammad Chami, Marko Coric, Nabil Abdoun: “Integrating AI with MBSE for Data Extraction from Medical Standards”, The 34th Annual INCOSE International Symposium, Dublin, Ireland, 2024

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

II.9 Literaturverzeichnis

- [1] S. Kleiner, Hg., O. Bleisinger, Hg., „Abschlussveröffentlichung CyberTech – Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen“, Darmstadt, 2024, ISBN 978-3-00-079013-3.
- [1.1] J. Gausemeier, Strategische Planung und integrative Entwicklung der technischen Systeme von morgen: 88. Sitzung vom 13. März 2013 in Düsseldorf. Paderborn, 2014.
- [1.2] J. Gausemeier, R. Dumitrescu, J. Echterfeld, T. Pfänder, D. Steffen und F. Thielemann, Innovationen für die Märkte von morgen. Hanser, München, 2018.
- [1.3] A. Albers und J. Gausemeier, Smart Engineering - Interdisziplinäre Produktentstehung. In Anderl, Eigner, et al. (Hrsg.), 2012.
- [1.4] M. Abramovici, P. Gebus und P. Savarino, Engineering smarterer Produkte und Services Plattform Industrie 4.0 STUDIE. 2018.
- [1.5] H. Hirsch-Kreinsen und M. ten Hompel, In B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl and M. ten Hompel (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0. Springer Vieweg, Berlin, 2017.
- [2] D. Ivanov, A. Das und T.-M. Choi, International Journal of Production Research 2018, 56, 3359–3368, DOI: 10.1080/00207543.2018.1457813.
- [3] H. Fatorachian und H. Kazemi, Production Planning & Control 2018, 29, 633–644, DOI: 10.1080/09537287.2018.1424960.
- [4] Y. Xifan, Z. Jianming, T. Tao, J. Jingfa und C. Xinzhun, From leagile manufacturing to long-tail production in Industry 4.0 for upgrading manufacturing, <https://doi.org/DOI: 10.13196/j.cims.2018.10.001>, 2018.
- [5] D. T. Matt, E. Rauch und D. Fraccaroli, ZWF 2016, 111, 52–55, DOI: 10.3139/104.111471.
- [6] VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik, VDI-2221 Blatt 1, 2019.
- [7] VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik, VDI 2206, https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/richtlinien/inhaltsverzeichnisse/9567281.pdf, VDI.
- [8] R. Nattermann und R. Anderl, Approach for a Data-Management-System and a Proceeding-Model for the Development of Adaptronic Systems, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:tuda-tuprints-25486>, Darmstadt, 2011.
- [9] Pahl, Gerhard ; Beitz, Wolfgang: Pahl/Beitz Konstruktionslehre : Grundlagen Erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden Und Anwendung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- [10] Systems Engineering Definition, <https://www.incose.org/about-systems-engineering/system-and-se-definition/systems-engineering-definition>, 28.2.2020.
- [11] Gebauer, M., Kühnapfel, M., Wissenschaftliches Projekt AdWiSE – BMBF-Bekanntmachung PDA_ASE: Beherrschung der Komplexität bei der Entwicklung soziotechnischer Systeme, 2020.
- [12] R. Anderl, S. Haag, K. Schützer und E. Zancul, it - Information Technology 2018, 60, 125–132, DOI: 10.1515/itit-2017-0038.
- [13] R. Dumitrescu, Heinz Nixdorf Institut: Advanced Systems Engineering, <https://www.hni.uni-paderborn.de/ase/>, 28.2.2020.
- [14] American Institute of Aeronautics and Astronautics, American Society of Mechanical Engineers, American Society of Civil Engineers, AHS International, American Society for Composites, AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference (SDM), AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, AIAA Non-Deterministic Approaches Conference, AIAA Gossamer Systems Forum und AIAA Multidisciplinary Design Optimization Specialist Conference (MDO), 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 2012, Curran, Red Hook, NY, 2012.
- [15] Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0 (Hrsg.: P. Chiabert, A. Bouras, F. Noël und J. Ríos), Springer International Publishing, Cham, 2018.
- [16] M. S. Haag, Generierung topologieinvarianter Geometrierepräsentationen für Digitale Zwillinge, 1. Aufl., Shaker, Düren, 2019.
- [17] Eigner, Martin. "Digitaler Zwilling – Stand der Technik" Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, vol. 115, no. s1, 2020, pp. 3-6. <https://doi.org/10.3139/104.112300>

- [18] R. Klostermeier, S. Haag und A. Benlian, Geschäftsmodelle digitaler Zwillinge : HMD Best Paper Award 2018, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28353-7>, Wiesbaden, 2020.
- [19] Gesamtvorhabensbeschreibung (GVB) zur Aufstockung des Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrums Darmstadt (MiT 4.0) um KI für KMU / KI-Trainer, https://www.smarter-service.com/download-assets/Praxisleitfaden_loT_2017.pdf.
- [20] V. Gruhn, I40M 2018, 2018, 45–48, DOI: 10.30844/I40M_18-6_45-48.
- [21] Stark, Rainer, Anderl, Reiner, Thoben, Klaus-Dieter and Wartzack, Sandro. "WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“" Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, vol. 115, no. s1, 2020, pp. 47-50. <https://doi.org/10.3139/104.112311>.
- [22] C. Tschohl, Elektrotech. Inftech. 2014, 131, 219–222, DOI: 10.1007/s00502-014-0228-7.
- [23] S. Sivri und H. Krallmann, Soziotechnische Betrachtung der Digitalisierung. Auswirkungen der Industrie 4.0, 2016.
- [24] G. Moordhead, R.W. Griffin. Organizational Behavior: Managing People and Organizations. South-Western/Cengage Learning, 2010.
- [25] R.L. Daft. Understanding the theory and design of organizations. South-Western/Cengage Learning, 2007.
- [26] R. Ruggles und R. Little, Enabling complex adaptive processes through knowledge, 2000.
- [27] CSR und neue Arbeitswelten (Hrsg.: B. Spieß und N. Fabisch), Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [28] R. T. Kreutzer, Führungs- und Organisationskonzepte im digitalen Zeitalter kompakt, Springer Gabler, Wiesbaden, Germany, 2018.
- [29] G. Baxter, I. Sommerville. Socio-technical systems: From design methods to systems engineering. Interacting with Computers, 23, 4-17, 2011.
- [30] Abdelnour Nocera, J. & Dunckley, L. (2008). Sociotechnical research and knowledge communication in community-centred systems design: A technological frames perspective. IJWBC. 4. 476-490. 10.1504/IJWBC.2008.019551.
- [31] W. Hacker, Arbeitspsychologie, 1. Aufl., Huber, Bern, 1986.
- [31.1] H. Hirsch-Kreinsen, P. Ittermann & J. Niehaus, Digitalisierung industrieller Arbeit, 2. Aufl., Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden, 2018.
- [31.2] S. Reinheimer (Hrsg.), Industrie 4.0. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017.
- [31.3] G. Hünemeyer, Agil, digital und zukunftsorientiert Wie Unternehmen mit Systems Engineering vorangehen. https://www.wiso-net.de/document/PPS__D12537D06884052D189B9BBB220591EF, 2019.
- [31.4] A. Alparslan, Ablauforganisation des Wissensmanagements. 2002.
- [31.5] R. Phaal und D. R. Probert, International journal of technology, 27, S. 1–15, 2004.
- [31.6] R. Dumitrescu, O. Riedel, J. Gausemeier, A. Albers & R. Stark, Advanced Systems Engineering Wertschöpfung im Wandel: Engineering in Deutschland - Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft. Fraunhofer IEM. 2021.
- [31.7] Y. Arslanparcasi & O. Karasek, Kompetenzentwicklung in Systems Engineering. Nachhaltig Arbeiten und Lernen – Analyse und Gestaltung von lernförderlicher und nachhaltiger Arbeitssysteme und Arbeits- und Lernprozesse, Tagungsband zum 69. Arbeitswissenschaftlichen Kongress, GfA-Press, 2023.