

# Gemeinsamer Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems



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 BMBF

## Autor(en)

Philips Engineering Solutions  
J. Gijzen  
HTC 34, 5656 AE Eindhoven  
[Jeroen.gijzen@philips.com](mailto:Jeroen.gijzen@philips.com)

**Projektlaufzeit:** 01.10.2020 – 31.03.2024

**Erstellungsdatum:** 08.05.2024

## Förderkennzeichen

## Projektpartner

02J19B090	Fraunhofer Institut für Entwurfstechnik Mechatronik (IEM)
02J19B099	Institut für Produktentwicklung am KIT (IPEK)
02J19B103	Institut für Soziologie an der FAU Erlangen-Nürnberg
02J19B099	Institut für Produktionstechnik am KIT (wbk)
02J19B093	:em engineering methods AG
02J19B104	BENTELER Automobiltechnik GmbH
02J19B102	CLAAS KGaA mbH
02J19B096	HARTING Applied Technologies GmbH
02J19B094	IG Metall
02J19B092	Lenze SE
02J19B097	Kostal Automobil Elektrik GmbH & Co. KG
02J19B106	Miele & Cie. KG
02J19B101	Philips Engineering Solutions
02J19B105	Renumics GmbH
02J19B095	Robert Bosch GmbH
02J19B091	tech-solute GmbH & Co. KG
02J19B098	TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG
02J19B100	Two Pillars 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.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## 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 .....	4
II.1 Motivation und Aufgabenstellung .....	4
II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens .....	6
II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	7
II.4 Erzielte Ergebnisse .....	8
II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen .....	18
II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse 18	
II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes....	21
II.8 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc. ....	22
II.9 Literaturverzeichnis .....	25

# I. Teil I Kurzfassung

## I.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des Forschungsprojekts MoSyS ist die Entwicklung neuer Methoden, Hilfsmittel und IT-Werkzeuge zur Gestaltung technischer Systeme und der zugehörigen Wertschöpfungsnetze als Elemente komplexer SoS. Ferner sind Leitfäden zur Gestaltung des Wandels, die den Unternehmen auf dem Weg hin zu einem digitalen und kollaborativen Arbeitsumfeld ebenso wie für klare und nachvollziehbare Entscheidungsprozesse dienen zu erstellen. Hierbei sind alle an der Entstehung beteiligten Bereiche (Produkt-, Produktions- und Dienstleistungsentwicklung) einzubeziehen. Berücksichtigung müssen z. B. Aspekte einer fachdisziplinübergreifenden Zusammenarbeit von Beschäftigten und Interessenvertretungen, das Denken in Produktgenerationen sowie Modellierungskonzepte und Methoden für die Abbildung von SoS finden.

## 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. Ziel ist die Gestaltung innovativer technischer Systeme als Teil eines übergeordneten System of Systems (SoS) – gemeint ist ein Gesamtsystem, das sich zeit- und ortsabhängig aus verschiedenen Einzelsystemen zusammensetzt. 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 in den Mittelpunkt aller Aktivitäten zu stellen.

### Ergänzung Philips Engineering Solutions

Keine Ergänzung durch Philips notwendig. Der oben beschriebene Stand zu Beginn des Vorhabens beschreibt die Situation auch bei Philips gut.

## I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Die wesentlichen Ergebnisse des Verbundprojektes MoSyS werden in Form sogenannter Wissensnuggets präsentiert. Jedes Wissensnugget stellt ein konkretes, eigenständiges Ergebnis des Projektes dar, auch wenn diese zum Teil in enger Abstimmung zueinander entstanden sind. Im Folgenden werden die Wissensnuggets im Sinne einer verbesserten Übersichtlichkeit nach den Arbeitspaketen (AP), in denen diese hauptsächlich entstanden sind, aufgelistet

Arbeitspaket	Wissensnuggets
AP1 Kollaboration	<ul style="list-style-type: none"><li>• Definition und Operationalisierung von Agilität</li><li>• Anforderungen an Agilität &amp; Bestandsaufnahme der Umsetzung agiler Prozesse</li><li>• Kompass Agilität</li><li>• Kollaborationsmodell</li><li>• Definition Arbeitskonflikte bei agilem SE und Handlungsempfehlungen</li><li>• Richtlinien zur Arbeitssystemgestaltung</li><li>• Evaluationssystematik Qualität von Partizipation/Aufgabe von Betriebsräten</li><li>• Gestaltungsempfehlungen für Partizipationsprozesse</li></ul>
AP2 SoS Engineering	<ul style="list-style-type: none"><li>• Glossar</li><li>• Einsatz- und Anwendungsszenarien für SoS</li><li>• SoS Referenzarchitektur</li><li>• Meta-Modell</li><li>• Erweiterte Wissensbasis</li><li>• Anforderungen an Methoden für das SoS Engineering</li><li>• MBSE-Framework</li></ul>
AP3 Auswirkungsanalysen in der PGE	<ul style="list-style-type: none"><li>• AECIA – Advanced Engineering Change Impact Approach</li><li>• Modellbasierte Prüfung der Validität von Änderungsanfragen</li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ontologie zur Prüfung der Validität von Änderungsanfragen</li> <li>• Ontologie zur Ausbreitungs- und Auswirkungsanalyse</li> <li>• Kommunikationskonzept für das modellbasierte technische Änderungsmanagement</li> </ul>
AP4 Musterbasiertes Architekturmanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rahmenwerk musterbasiertes Architekturmanagement</li> <li>• Lösungsmuster im Kontext SoS</li> <li>• Lösungsmusterkatalog Smart Products, Produktion, V&amp;V</li> </ul>
AP5 KI-unterstütztes Engineering	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untersuchung der KI-Potentiale von Beschäftigten</li> <li>• Menschorientierte Entwicklung von KI-Anwendungen</li> <li>• Nutzung der Systemarchitektur im Kontext der Validierung</li> <li>• Weiterentwicklung der KI-Anwendung</li> </ul>
AP6 Rahmenwerk für einen Digitalen Zwilling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definition &amp; Anforderungserhebung für einen Digitalen Zwilling</li> <li>• Referenzarchitektur für digitale Zwillinge</li> <li>• Informationsmodell eines digitalen Zwillings</li> <li>• Leitfaden zur modellbasierten Erstellung von Digitalen Zwillingen</li> </ul>
AP7 Änderungsmanagement – Agile SE-Organisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leitfaden zur Unterstützung von Veränderungsprozessen</li> <li>• Synergien und Potentiale von agilem SE</li> <li>• Zugriffslogik des Leitfadens</li> <li>• Leitfaden zur Implementierung von agilem SoS-Engineering</li> </ul>
AP8 Modellhaftes SE- Unternehmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anforderungen &amp; Konzept für ein modellhaftes SE-Unternehmen</li> <li>• SoS Demonstrator des modellhaften SE-Unternehmens</li> <li>• IT- und Datenlandkarte</li> </ul>

### **Ergänzung Philips Engineering Solutions:**

Philips war im Rahmen des Projektes an allen APs beteiligt und hat von daher zu den meisten im Verbund erzielten Ergebnisse beigetragen. Darüber hinaus können der in AP6 erstellte Digitale Schatten als Vorstufe zu einem Digitalen Zwilling, so wie die dazugehörigen Erklärvideos genannt werden.

## **II. Teil II Eingehende Darstellung**

### **II.1 Motivation und Aufgabenstellung**

Das Engineering der Zukunft erfordert eine integrierte Betrachtung der Themen Agilität, Kollaboration, Systems Engineering und Digitalisierung bzw. KI. Die weitgehend getrennten Forschungsrichtungen von Arbeitssoziologie, Produktentwicklung sowie Produktionssystementwicklung sind im Schulterschluss zu analysieren und holistische Lösungsansätze sind zu entwickeln. Damit werden Anforderungen an gute Arbeit (Mitbestimmung, Selbstorganisation) als Ressource für nachhaltige Innovationsfähigkeit anerkannt und wirksam gemacht. Dies stellt die Grundlage zur Definition einer agilen SE-Organisation mit einer transparenten Beschreibung der Reichweite einer systematischen Transformation dar.

Es ist ein Engineering komplexer SoS anzuvisieren, welches auf bestehenden Ansätzen des MBSE (z. B. SysML) fußt und diese bezogen auf aktuelle und zukünftige Herausforderungen in der Entwicklung komplexer SoS erweitert. Dabei ist insbesondere auf die Besonderheiten im integrierten, systemorientierten und menschenzentrierten Engineering aller beteiligten Akteure einzugehen. Ausgehend aus der Produktentwicklung sind angrenzende Unternehmensbereiche wie z. B. die Produktion von Beginn an und konsequent mit einzubeziehen.

Die Bearbeitung dieser Ziele erfolgte durch ein Konsortium bestehend aus 18 Projektpartnern. Diese sind in Forschungseinrichtungen, Befähiger- und Anwenderunternehmen einzuteilen. Zusätzlich wirkten im Rahmen des Breitentransfers 13 weitere assoziierte Partner im Verbundprojekt MoSyS mit. Bild 1 gibt einen Überblick über das Projektkonsortium.

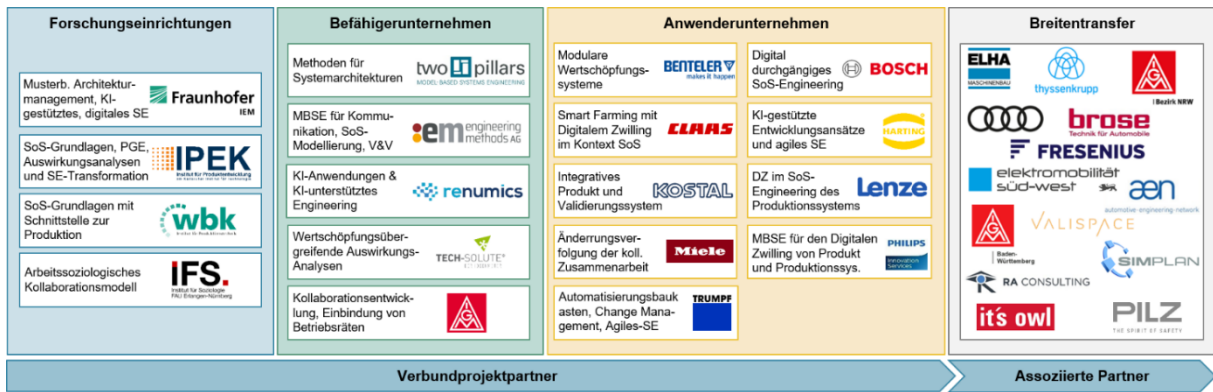


Bild 1: Übersicht über die Verbundprojektpartner und ihre Rollen

Aufgrund der sehr vielfältigen Problem- und Aufgabenstellung unterteilte sich das Verbundprojekte MoSyS in zehn Arbeitspakete. AP 1 und AP 2 bildeten das Fundament jeglicher Arbeiten und insbesondere der ausgewählten Schwerpunktthemen in AP 3 bis AP 7. Die funktionale Demonstration und prototypische Implementierung erfolgten im Rahmen des AP 8. Die Pilotierung der AP-Inhalte findet bereits im Rahmen der APs in Form von partnerspezifischen Anwendungsfällen (AF) statt und wird direkt von den beteiligten Anwendungsunternehmen verantwortet. Die Partner sind weitestgehend in allen APs involviert, legen jedoch entsprechend der Anwendungsfälle thematische Schwerpunkte. Zusätzlich behandelt AP9 alle Aspekte rund um die Verbreitung und Veröffentlichung der Ergebnisse und Aktivitäten des Verbundprojektes MoSyS. Abschließend wurden alle koordinativen Aufgaben innerhalb des Projektes in AP10 behandelt. Bild 2 stellt die vereinfachte Projektstruktur und die Zusammenhänge der beschriebenen Projektaspekte dar.

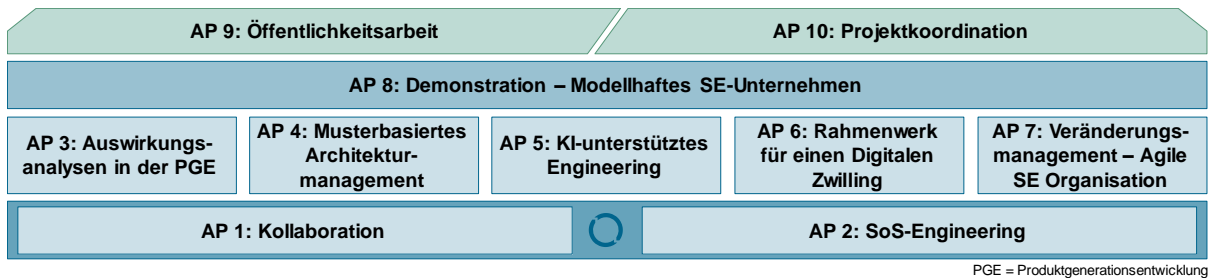


Bild 2: Vereinfachte Projektstruktur

Die initialen ressourcentechnischen Voraussetzungen des Projektes sind in Bild 3 dargestellt. Die 18 Projektpartner haben mit einem gesamten personellen Aufwand von 1.077,5 Personenmonaten und Gesamtkosten von ca. 12 Mio. Euro geplant. Die personellen Ressourcen teilen sich über die verschiedenen Partner auf die die beschriebene Projektstruktur auf. Die Kosten der Partner richteten sich einerseits nach den personellen Aufwänden und andererseits auch nach den Reise- & Sachkosten sowie den FuE Fremdleistungen. Zu beachten ist, dass in Bild 3 der initiale Gesamtressourcenplan aus der Vorhabensbeschreibung abgebildet ist. Über den Projektverlauf haben sich an mehreren Positionen Änderungen ergeben, die durch die Sachberichte zum Zwischennachweis der einzelnen Partner sowie der aktualisierten Vorhabensbeschreibung ersichtlich werden.

Partner	Typ	Σ PM	Personal-kosten gesamt [€]	Reise-kosten [€]	Sachkosten / sonstige Vorhaben-kosten [€]	ggf. FuE-Fremd-leistungen [€]	Σ [€/Partner]
ITEM	F&E	110	1.191.541 €	10.357 €	45.000 €	0 €	1.246.898 €
IfS	F&E	70	421.126 €	11.300 €	4.605 €	0 €	437.031 €
KIT (IPEK, w bk)	F&E	129	821.247 €	14.044 €	4.000 €	0 €	839.291 €
IG Metall	S	36	319.868 €	6.000 €	0 €	0 €	325.868 €
Benteler	AW	72	846.565 €	3.000 €	0 €	0 €	849.565 €
CLAAS	AW	54,5	862.454 €	3.500 €	0 €	0 €	865.954 €
HARTING	AW	93	861.920 €	3.498 €	0 €	0 €	865.418 €
Lenze	AW	36	313.033 €	4.012 €	0 €	30.000 €	347.045 €
Kostal	AW	36	498.960 €	3.500 €	0 €	0 €	502.460 €
Miele	AW	49	499.188 €	3.500 €	0 €	0 €	502.688 €
Philips	AW	84	854.141 €	0 €	0 €	61.312 €	915.453 €
Bosch	AW	50	818.832 €	3.500 €	27.228 €	45.536 €	895.096 €
Trumpf	AW	72	1.260.000 €	3.500 €	0 €	0 €	1.263.500 €
em	EA	72	945.196 €	9.916 €	0 €	0 €	955.112 €
Renumics	EA	36	386.372 €	3.900 €	0 €	0 €	390.272 €
tech-solute	EA	36	335.864 €	3.556 €	0 €	0 €	339.420 €
Two Pillars	EA	42	397.813 €	11.020 €	0 €	0 €	408.833 €
	Σ	1.077,5	11.634.120 €	98.103 €	80.833 €	136.848 €	
<b>Gesamtkosten Projektlaufzeit € :</b>							<b>11.949.904 €</b>

Bild 3: Initialer Gesamtressourcenplan in MoSyS

### Ergänzung Philips Engineering Solutions:

Philips konnte das Projekt erfolgreich durchführen, benötigte allerdings nur 51 MM (statt ursprünglich geplanter 84 MM) und hatte 200.000 € geringere Personalkosten. Die Gründe dafür wurden in den Zwischenberichten erläutert.

## II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

In der modernen Arbeitswelt, speziell im Engineering, vollzieht sich durch die Subjektivierung von Arbeit [Kle12] ein Paradigmenwechsel. Dieser ist gekennzeichnet durch die zunehmende Nachfrage nach sinnstiftender Arbeit und der Anerkennung von Arbeitsleistungen, wie im Agile Manifest (agilemanifesto.org) verankert. Der Trend zur **Agilität** und Selbstorganisation erfordert neue Kompetenzen wie Kreativität und Flexibilität [Böh13], [Böh15], [HW06], und stellt traditionelle Arbeitsmodelle wie das Wasserfall- und V-Modell [HH08] in Frage. In diesem Kontext werden die Digitalisierung und die Notwendigkeit zur interdisziplinären **Kollaboration** als zentrale Herausforderungen identifiziert [BDL+11], [HN19], [HSS+19], [PLH19], [Pfe14], die das Verbundprojekt MoSyS adressiert.

Das "**System of Systems**" (**SoS**)-**Engineering**, das die Integration unabhängiger Systeme zu einem übergeordneten Gesamtsystem beschreibt [Bou56], [AMY+18], [Mai96], sieht sich mit der Herausforderung konfrontiert, dass traditionelle System-Engineering-Methoden nicht ohne Weiteres auf die Komplexität und Dynamik von SoS übertragbar sind [KRU+03]. Die Notwendigkeit einer angepassten Methodik, die Unsicherheiten und Mehrdeutigkeiten berücksichtigt, wird betont, ebenso wie die Bedeutung von Architekturprinzipien zur Gestaltung der verschiedenen SoS-Typen [Mai98], [DB08].

Im Kontext der **Produktgenerationsentwicklung (PGE)** spielt die Nutzung existierender Systeme und deren Anpassung eine Schlüsselrolle [ARS+19]. Die Herausforderungen und Chancen technischer Änderungen werden ebenso thematisiert wie die Bedeutung eines umfassenden Änderungsmanagements [JEC+12], [KBH+15]. Methoden wie die Design Structure Matrizen (DSM) und Multidomain Matrizen (MDM) [EB12], [ML08] unterstützen die Analyse der Auswirkungen von Änderungen, während modellbasierte Ansätze zur Beschreibung von Produkten und Prozessen [DKK+11] weiterentwickelt werden.

Das **musterbasierte Architekturmanagement** adressiert die Entwicklung von Systemarchitekturen unter Einbeziehung von Lösungsmustern und Modularisierungsmethoden [Ulr95], [HWF+12]. Die

Integration von System of Systems-Analysen und die Anpassung an ein dynamisches Umfeld werden als wesentlich für das Architekturmanagement erachtet [HPB+12], [INC17]. Die Evaluation und der Vergleich von Architekturen mittels Methoden wie der Design Space Exploration (DSE) [KJS11] sowie die Verifikation und Validierung von SoS [MGB+16] sind entscheidende Schritte im Entwicklungsprozess.

**KI-unterstützte Ansätze** in der Produktentstehung [Gal15], [PD16] und das Konzept des **Digitalen Zwillings** [RWL+15], [SCD+10] repräsentieren innovative Lösungsansätze für die Herausforderungen der Industrie 4.0. Die Vernetzung von physischen und virtuellen Systemen eröffnet neue Möglichkeiten zur Simulation und Zustandsüberwachung [BDK+15], [SR16].

Im Bereich des **Veränderungsmanagements und der agilen SE-Organisation** wird die Bedeutung der Anpassung von Arbeitsweisen und der Einbeziehung von Entwicklern hervorgehoben [Sch06], [Kot12]. Die Übertragung agiler Prinzipien auf die mechatronische Entwicklung bedarf spezifischer Anpassungen [GL18], [Kle16], wobei die Rolle des Veränderungsmanagements und die Förderung von Mitarbeiterengagement als kritische Erfolgsfaktoren identifiziert werden [DL14], [LS08].

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.

### **Ergänzung Philips Engineering Solutions**

Zu allen in dem Projekt bearbeiteten Themen lagen bei Philips in Aachen zu Projektbeginn zumindest Grundkenntnisse vor. Zu einigen Themen, wie z.B. Systems Engineering standen darüber hinaus auch tiefere Kenntnisse in anderen Bereich von Philips zur Verfügung.

## **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 MoSyS. Die Projektstruktur bildete die Grundlage für die Zusammenarbeit. In den Arbeitspaketen (AP) wurden die wissenschaftlichen Grundlagen erarbeitet, die in den Anwendungsfällen (AF) der einzelnen Industrieunternehmen zur Anwendung kamen. Im Folgenden wird auf die Aspekte Projektkoordination, Arbeitspaketleitung, Lenkungsreis, Anwendungsfälle und Projektdurchführung näher eingegangen, da diese Aspekte die tragenden Säulen des Projektablaufs darstellen.

**Projektkoordination:** Die Koordination des Gesamtprojektes oblag dem Fraunhofer IEM und war in AP 10 auch in der Projektstruktur verankert. Die Projektkoordination überwachte gemeinsam mit dem Lenkungsreis 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.

**MoSyS-Lenkungsreis:** Der Lenkungsreis setzte sich aus der Projektkoordination und den verantwortlichen Arbeitspaketleitern zusammen. Er überwachte die strategische Ausrichtung des Projektes. Einmal im Quartal erstellte der Lenkungsreis unter Verantwortung der Projektkoordination einen Gesamtbericht für das PTKA. Ebenfalls einmal im Quartal fand eine Controlling-Sitzung mit den Mitgliedern des Lenkungsreises 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.

**Anwendungsfälle:** Jeder Anwendungsfall wurde von einem Anwendungsfallverantwortlichen geleitet. Seine Aufgabe war es, die Aktivitäten des Anwendungsfalls zu steuern und zu koordinieren, wie z.B. die Organisation und Durchführung von Sitzungen mit Einladungen und Protokollen. Jedem Anwendungsfallverantwortlichen stand ein Arbeitspaketleiter auf wissenschaftlicher Seite als Ansprechpartner zur Verfügung. Er stellte sicher, dass die Forschungsergebnisse einen hohen Praxisbezug aufwiesen und umfassend erprobt wurden.

**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 wie folgt stattgefunden: 2022 in Paderborn beim Fraunhofer IEM, 2023 in Stuttgart bei TRUMPF, 2023 in Harsewinkel bei CLAAS und 2024 in Paderborn beim Fraunhofer IEM. Außerdem haben innerhalb der APs weitere Treffen in Person in kleinerer Personenstärke stattgefunden.

### **Ergänzung Philips Engineering Solutions**

Philips hat in alle APs mitgearbeitet, und hatte die Federführung in AP 6.3 „Leitfaden zur Implementierung des Digitalen Zwillings“. Darüber hinaus wurden in verschiedenen APs Anwendungsfälle aus dem Philips Umfeld beigesteuert.

## **II.4 Erzielte Ergebnisse**

### **AP 1: Kollaboration**

Die in AP 1 erarbeitete **Definition und Operationalisierung von Agilität** umfasst eine generische Definition von Agilität, zentrale agile Grundprinzipien sowie Merkmale agiler Vorgehensweisen in der Projektarbeit. Im kollaborativen Austausch mit den Projektpartner\*innen und unter Einbeziehung empirischer Befunde aus den Expert\*inneninterviews, Beschäftigtenbefragung und Workshops wurde das grundlegende Agilitätsverständnis weiterentwickelt sowie in einzelnen Aspekten operationalisiert und empirisch überprüft.

Auf der Basis von 83 Interviews mit Expert\*innen aus den Unternehmen und wissenschaftlichen Instituten wurden grundsätzliche **Anforderungen an Agilität** sowie eine **Bestandsaufnahme der Umsetzung agiler Prozesse** herausgearbeitet. Die Analyse fokussiert auf grundlegende Herausforderungen, Bedingungen sowie Stand der Umsetzung, Erfahrungen sowie nicht-intendierte Folgen und Fehlentwicklungen.

Der **Kompass Agilität** stellt den Ist-Stand der Umsetzung von Agilität sowie die verschiedenen Sichtweisen und Erfahrungen der Beschäftigten in den Partnerunternehmen dar. Dazu wurden mehr als 1.500 Beschäftigte unter anderem zu arbeitsinhaltenlichen, kollaborativen und organisationalen Themen, sowie zu Be- und Entlastungsfaktoren befragt. Die Untersuchung fand mithilfe einer standardisierten Beschäftigtenbefragung mittels Online-Fragebögen auf Basis der Befunde aus den Expert\*innen-Interviews statt.

Das **Kollaborationsmodell** basiert auf allen empirischen Ergebnissen und zeigt auf, wie die Kollaboration im Engineering in den untersuchten Unternehmen aussieht. Das Modell dient in erster

Linie als Hilfsmittel, um die eigene Kollaboration im Unternehmen zu reflektieren, zu hinterfragen und die einzelnen Faktoren genauer zu betrachten und einzuordnen. Dies bildet den Ausgangspunkt für weitere Bearbeitungsschritte in Richtung einer Verbesserung der Kollaboration, sowohl unternehmensintern also auch übergreifend.

Es wurden betriebliche Treiber und Hemmnisse für die sozio-technische Herangehensweise bei der Gestaltung von Agilität im Unternehmen aus der Perspektive der Interessenvertretungen mittels qualitativer Fallstudien ermittelt. Dazu wurden Muster von Spannungen bei Implementierung und Betrieb agiler Arbeit in Entwicklungsprozessen ermittelt. Diese wurden anschließend zu einer **Definition von Arbeitskonflikten bei agilem SE und Handlungsempfehlungen** verdichtet. Die wesentlichen Konfliktfelder sind:

- Differenz zwischen dem Konzept Agilität und der betrieblichen Umsetzung.
- Mangelnde Aufgabenklarheit bei Führungskräften.
- Gratifikationsdefizite.
- Veränderte Bedingungen der repräsentativen Partizipation.

Auf dieser Basis wurden sozio-technische Gestaltungsleitlinien für Innovationsarbeit als **Richtlinien zur Arbeitssystemgestaltung** entwickelt. Diese sind ausgerichtet auf die gleichrangige Betrachtung der Systemelemente Mensch-Organisation-Technik („joint optimization“) im Entwicklungsprozess von Arbeitssystemen in agilen und interdisziplinären Entwicklungsprozessen komplexer Systems of Systems. Das Fazit ist, dass mangelnde Berücksichtigung der Anforderungen an Lernprozesse sowie die mangelnde Nutzung von Partizipationschancen Ursachen für die oft zu beobachtende Kluft zwischen dem Konzept agiler Selbstorganisation und der praktischen Umsetzung ist. Meist gibt es keinen strukturierten Change-Prozess. Gute Change-Prozesse zum ASE müssen die Sicht der Betroffenen miteinbeziehen, sowohl die der Entwicklerinnen als auch die der Führungskräfte. Die Gruppe hochqualifizierte Entwicklerinnen und der Charakter ihrer Tätigkeit bieten ein oft brachliegendes Vermögen zur Steigerung von Innovationsfähigkeit und Arbeitsqualität durch mehr Partizipation. Wenn Advanced Systems Engineering auch im Sinne humaner Arbeit Erfolg haben soll, müssen Lernförderlichkeit und Partizipation stärker in den Fokus genommen werden.

Außerdem wurden die Möglichkeiten der betrieblichen Mitbestimmung im Rahmen betriebsverfassungsrechtlicher Mandate sowie die Möglichkeiten der direkten Partizipation von Beschäftigten im Rahmen agiler Prozesse betrachtet. Dabei wurde eine **Evaluationssystematik zur Qualität der Partizipation und zu den Aufgaben von Betriebsräten** entwickelt, um repräsentative und direkte Beteiligung gleichermaßen zu berücksichtigen. Es zeigt sich, dass Arbeitssystemgestaltung mit und durch die betroffenen Beschäftigten in partizipativen Prozessen erfolgen sollte, um die Arbeitsprozesse an deren Anforderungen auszurichten und deren kreatives Potenzial zu nutzen.

Die gewonnen Erkenntnisse wurden zu **Gestaltungsempfehlungen für Partizipationsprozesse** zusammengefasst. Beschäftigte sollten auf anstehende Veränderungen vorbereitet werden und die Anforderungen an Arbeitssysteme in agilen und interdisziplinären Entwicklungsprozessen sollten partizipativ von Management und betroffenen Beschäftigten ermittelt werden. Die Implementierung sollte als kontinuierlicher Lernprozess aufgefasst werden.

#### **Beitrag Philips Engineering Solutions:**

Der Beitrag von Philips am AP1 Kollaboration bestand zunächst in der aktiven Teilnahme an den Workshops und Diskussionen zur Definition des Begriffes Agilität, dem ersten Ziel des Arbeitspaketes. Hierfür wurde die am Standort Aachen aber auch in anderen Bereichen von Philips verwendeten Definitionen oder Sichtweisen zusammengetragen und flossen in die Definition.

In Vorbereitung der großen Umfrage des IfS zum Thema Agilität wurde verschiedenen Aspekte des aktuellen Zustandes, der Organisation und der Arbeitsweisen bei Philips analysiert und mit den Projektpartnern geteilt.:

- Es wurde eine Übersicht erstellt, welche Schulungs- und Weiterbildungsangebote es bei Philips bereits zu dem Thema gibt.
- Ein Organigramm des Standortes Aachen und der übergeordneten Firmenstruktur flossen ebenfalls in die Vorbereitung ein.

- Es wurde untersucht, wie verschiedene Gruppen in Philips, also nicht nur am Standort Aachen, das Thema Agilität und agiles Arbeiten außerhalb der Softwareentwicklung bereits umsetzen oder planen umzusetzen.

Eine Reihe von Experten Interviews und die Befragung des Betriebsrates dienten sowohl zur Vorbereitung der vom IfS als auch der von der IG Metall durchgeführten Studie. In Vorbereitung auf die on-line Befragung zum Kompass Agilität durch das IfS, wurde das Thema agiles Arbeiten im Engineering von den Philips MoSyS Team den Kollegen am Standort Aachen vorgestellt. Zum einen um den Kollegen ein erstes Verständnis zu geben und auch um sie zur Teilnahme an der Befragung zu motivieren. Von 40 Mitarbeitern habe 34 ein Feedback geben.

In Bild II-1 ist exemplarisch eines der Ergebnisse der Studie dargestellt.

## Ausgewählte Ergebnisse zu Agilität

Frage: Wie wirkt sich der Einsatz agiler Methoden auf Ihren Arbeitsalltag generell aus? n=22

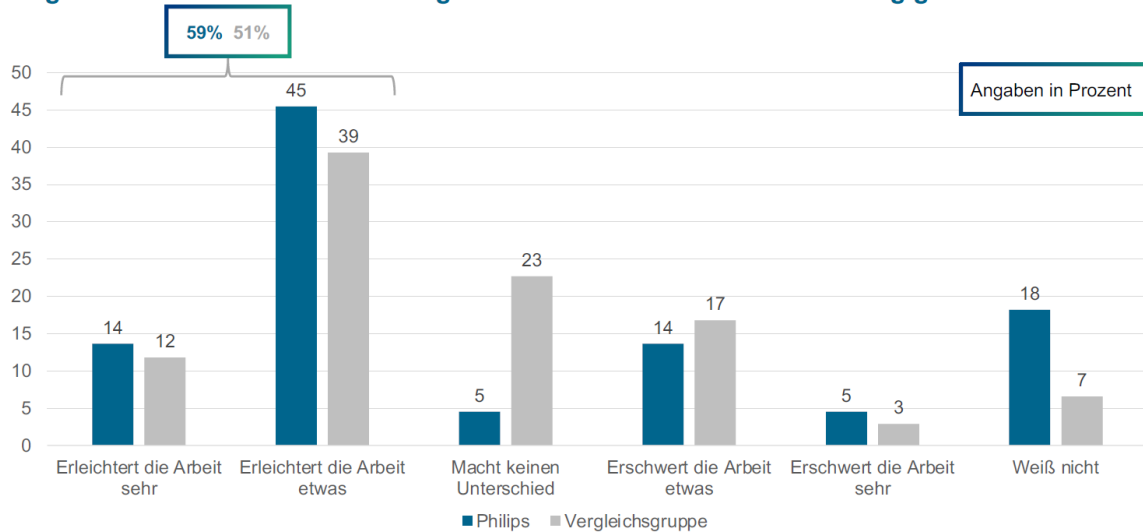


Bild II-1 Ergebnisse zu Agilität

Man kann erkennen, dass von den 22 Philips Mitarbeitern, die an der Studie teilgenommen und bereits Erfahrung mit agilen Projekten haben, 59% die Methode positiv bewerten, da damit sogar etwas mehr als im Durchschnitt aller befragten (51%).

Die Ergebnisse der Studie wurden im ersten Teil eines zweitägigen Workshops in Aachen mit den Experten des IfS besprochen. Im zweiten Teil des Workshops wurde das Thema Kollaboration bei Philips genauer betrachtet. Der Schwerpunkt bei Philips lag dabei auf der Zusammenarbeit von Kollegen an zwei Standorten (Aachen und Eindhoven) in einem Hardwareprojekt.

Hierbei stellte sich der temporäre One-room-approach als neues zu testendes Werkzeug heraus.

Mit temporärer One-room-approach ist gemeint, dass eine effektivere Zusammenarbeit von räumlich verteilten Teams vermutlich erreicht werden kann, wenn man die Teams wenigstens an einem Tag die Woche an einem Ort zusammenzubringen. Dies Konzept sollte in einem geeigneten späteren Hardwareprojekt getestet werden.

Über die AP-Treffen hinaus wurde in einer Reihe von bilateralen Treffen mit dem IfS oder der Firma Trumpf Erfahrungen zum Thema agiles Arbeiten ausgetauscht.

Die im MoSyS erworbenen Kenntnisse über das agile Arbeiten wurden ferner 2022 bei Philips als Pilotprojekt in dem Industrie 4.0 Innovationsprogramm getestet. Hierfür wurden u.a. in einer Reihe von bilateralen Meetings mit dem IfS konkrete Problem und Fragestellungen für das Team bei Philips besprochen und es wurden mögliche Herangehensweisen diskutiert. Später wurden die Ergebnisse wieder mit dem IfS geteilt und die Erkenntnisse in AP1 zurückgeführt.

## AP 2: SoS-Engineering

Im **Glossar** werden Begriffe definiert oder beschrieben, die relevant für das Projekt sind, um eine einheitliche Verständnisbasis zu bilden. Hierfür wurden Begriffe ins Glossar übernommen, die zum einen vor Projektbeginn als relevant betitelt wurden und zum anderen während des Projekts neu definiert oder hinzugekommen sind. Auf jeder Glossarseite konnten Definitionen sowie Verständnisse von anderen Projektbeteiligten diskutiert und bestätigt werden, indem eine Kommentarfunktion implementiert wurde.

Die Problem-Statements beschreiben Herausforderungen in der Entwicklung von SoS in den Unternehmen des Konsortiums. Insgesamt wurden 84 Problem-Statements identifiziert und anschließend geclustert. Diese sieben Cluster beschreiben die folgenden **Einsatz- und Anwendungsszenarien** im Kontext SoS: Kommunikation - Im Produktlebensphasenübergreifenden Kontext, Verantwortlichkeiten, Traceability und Schnittstellen, Organisation, Ressourcen und Infrastruktur - Mangel an Ressourcen über den gesamten Produktentstehungsprozess und Projektablauf, Anforderungsmanagement, Traceability Schnittstellen Produktseitig, Dokumentation sowie Fehlende anwendbare/akzeptierte Rahmenwerke. Zu jedem dieser Szenarien wurde eine Beschreibung basierend auf den geclusterten Problem-Statements beschrieben und durch Visionen und Zwecke Handlungsmöglichkeiten definiert.

Die **SoS-Referenzarchitektur** stellt eine Grundlage zur konsistenten Modellierung eines zentralen Systemmodells unter Berücksichtigung des System of Systems, Produkts, Produktionssystems, Validierungssystems sowie des übergreifenden Change-Managements und Problemraums. Hierfür liefert die Referenzarchitektur eine passende Ontologie bestehend aus Element- und Relationstypen sowie deren Multiplizitäten.

Das **Meta-Modell** beschreibt ein Framework, mit welchem die Ablauf- und Aufbauorganisation sowie die Systemarchitektur eines Unternehmens mit den Unternehmenszielen verknüpft werden können, um beispielsweise Projektaktivitäten wie Projektteam zusammenstellen oder Projektressourcen planen auszulösen oder strategische Entscheidungen wie Projektführung zu treffen. Für das Meta-Modell existiert ein Workshop, um dieses in einem Team aus allen vier Bereichen zu instanzieren. Innerhalb MoSyS wurden zwei Meta-Modelle im Kontext der Konsortialpartner Bosch und Harting angewandt.

Damit das in MoSyS generierte Wissen nicht verloren geht, wurde zum einen eine Wiki aufgesetzt und eine **Wissensbasis mit Verknüpfungen** in Obsidian erstellt. In der Wiki werden die Inhalte der Zielsetzung mit den zentralen Ergebnissen (Wissensnuggets) kombiniert, indem eine übergreifende Seite pro Arbeitspaket erstellt wurde und die Kernergebnisse als eigene Seiten verknüpft wurden. Diese Inhalte der Wiki wurden in die Wissensbasis überführt, die in Obsidian umgesetzt ist. Hier wurden die einzelnen Ziele, Wissensnuggets sowie Verknüpfungen interaktiv visualisiert.

Es wurden **Anforderungen** aus semi-strukturierten Interviews abgeleitet, die für die **Anwendung von Methoden im Kontext von SoS** zu berücksichtigen sind. Dabei werden Anforderungen beschrieben, die zum einen direkt an die Methoden selbst gerichtet sind (bspw. Einheitliche Terminologie) und zum anderen auf den praktischen Einsatz von Methoden in Unternehmen sich beziehen (bspw. Praktische Beschreibung von Methoden).

Das **MoSyS-MBSE-Framework** dokumentiert Methoden sowie Modellierungsaktivitäten in SoS innerhalb eines zentralen Systemmodells. Dabei basiert das Framework auf den gleichen Bereichen wie die SoS-Referenzarchitektur: Problemraum, Produktionssystem, Produkt, Validierungssystem sowie Änderungsmanagement. Innerhalb dieser Bereiche werden wichtige Elementtypen vorgestellt, die aus der Referenzarchitektur übernommen werden können. Diese Elementtypen werden dem Problemraum sowie den Anforderungen, Funktionen, der logischen und physischen Architektur (RFLP) zugeordnet. Im Problemraum sowie RFLP werden dann Modellierungsaktivitäten bereitgestellt, beispielsweise in Anforderungen (im Modell Requirements) können Stakeholder, Anwendungsfälle oder der Systemkontext analysiert werden. Dieses Framework wurde auch in die Methodensteckbriefe überführt. Dieses Framework wurde beim Konsortialpartner Harting angewandt und zu diesem Zweck wurde eine unternehmensspezifische Ontologie analog zur MBSE-Methodik MoSyS entwickelt. Neben detaillierten Methodendokumentationen wurden die verschiedenen Methoden in Form von Schritt-für-Schritt-Anleitungen in das Modellierungstool implementiert.

### **Beitrag Philips Engineering Solutions:**

Der Beitrag von Philips an AP2 SoS Engineering wurde vor allem zu Beginn des Projektes geleistet. Wir haben an den Workshops zur Erstellung der Problem Statements und der Use Case Diagramme und bei der Clusterung der Ergebnisse beigetragen. Dabei haben wir die Sichtweisen und Problem in einer Maschinenbau Firma (Standort Aachen) aber auch eines produzierenden Unternehmens im HealthCare Bereiche eingebracht. Dies geschah zum Beispiel durch Erstellen von sechs Problembeschreibungen.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit, die vor allem Themen in AP3 bearbeitet, wurde auch die bei Philips bereits vorhandenen oder in der Entstehung befindlichen Referenzarchitekturen betrachtet und mit den Kollegen im MoSyS Projekt besprochen

Darüber hinaus wurde vor allem mit dem IPEK und dem IEM über Konzepte zur Einführung von MBSE in Philips besprochen.

Bei der Erstellung des Glossars und der Wiki wurden von Philips Beiträge beigesteuert und die vorhandenen Einträge geprüft bzw. ergänzt.

---

### **AP 3: Auswirkungsanalyse in der Produktgenerationsentwicklung**

Für die Entwicklung der modellbasierten Methodik **AECIA – Advanced Engineering Change Impact Approach** wurden 49 unternehmensspezifische Änderungsfälle identifiziert, mit Hilfe einer Nutzwertanalyse priorisiert und für ausgewählte Änderungsfälle unternehmensspezifische (Teil-)Systemmodelle erarbeitet. Auf dieser Grundlage wurden unternehmensspezifische Bedarfe und Anforderungen an eine modellbasierte Methodik für das technische Änderungsmanagement identifiziert und im nächsten Schritt relevante Aktivitäten abgeleitet. Die identifizierten Aktivitäten wurden in Form eines aktivitäten-basierten Rahmenwerkes implementiert. Damit wurden die Grundlagen für die Weiterentwicklung und Implementierung der modellbasierten Methodik AECIA geschaffen.

Für die Hauptaktivität **Prüfung der Validität von Änderungsanfragen** wurde eine **Ontologie** mit relevanten Elementtypen und Relationstypen sowie ein Ablaufprozess erarbeitet. Sichten für die Durchführung von Subaktivitäten im Ablaufprozess wurden auf Grundlage der Ontologie entwickelt. Alle Subaktivitäten sowie die zugehörigen Sichten wurden am Beispiel einer Sondermaschine implementiert, evaluiert und veröffentlicht.

Für die Hauptaktivitäten **Ausbreitungs- und Auswirkungsanalyse** wurde auf Grundlage der identifizierten Anforderungen Subaktivitäten sowie eine **Ontologie** mit für die Durchführung notwendigen Elementtypen und Relationstypen erarbeitet. Für alle Subaktivitäten wurden passende Sichten implementiert. Am Beispiel mehrerer unternehmensspezifischer Änderungsfälle wurden die Hauptaktivitäten implementiert und evaluiert.

Für das **Konzept zur Kommunikation von Änderungsinformation** in einer agilen Entwicklungsumgebung wurden relevante Element- und Relationstypen sowie Subaktivitäten identifiziert. Für die Unterstützung der Subaktivitäten wurden Sichten erarbeitet und am Beispiel von Änderungsfällen in einem MBSE-Modellierungstool implementiert und evaluiert.

### **Beitrag Philips Engineering Solutions:**

Im AP3 Auswirkungsanalyse in der PGE wurden mehr Stunden als ursprünglich geplant erbracht, da wir bereits bei der Beschreibung von Szenarien für relevante Änderungen (AP3.1) gemerkt haben, dass wir viel zu diesem Thema beitragen können und die Ergebnisse für Philips relevant sind. Wir haben bei der Sammlung und Priorisierung der relevanten Änderungsfälle auf die Sicht des Maschinenbauers beschränkt und Fälle identifiziert und beschrieben. Die Änderungsfälle wurden nach Ursachen des Änderungsfalls, deren Auswirkungen, der Phase, der Situation, dem Referenzelement sowie der Quelle klassifiziert und anschließend priorisiert. Die Priorisierung wurde auf Grundlage von folgenden Kriterien durchgeführt: Auftreten, Auswirkung, Möglichkeit der Einflussnahme, Risiko, Durchschaubarkeit.

Exemplarisch wurde ein hypothetischer Änderungsfall bei einer Testmaschine für Zahnbürsten erläutert und analysiert. Der betrachtete Fall ist ein Farbwechsel der zu testenden Zahnbürsten von weiß auf schwarz. Dies kann z.B. zu Problemen bei der Detektion der Zahnbürste führen, wodurch bestimmte Testabläufe in der Testzelle nicht fehlerfrei durchgeführt werden können.

In Kooperation mit dem IPEK wurde eine Studentische Abschlussarbeit zum Thema Implementierung und Weiterentwicklung der modellbasierten Methodik für das technische Änderungsmanagement (AECIA) Advanced Engineering Change Impact Approach realisiert. Der Student erstellte ein SysML-Modell auf Grundlagen der Referenzarchitektur aus AP2 einer Laboranlage (eine hypothetische Linie zur Fertigung von Schnullern, siehe Bild II-10) bei Philips in ein ausführbares Cameo Modell ab und erarbeitete anhand des Modells Methoden zur Implementierung und Bewertung von Lösungsalternativen, welche maßgeblich in die Methodik von AP 3 einfließen. In Zusammenarbeit vor allem mit dem IPEK wurden so mehrere Ansätze getestet und zuletzt ein endgültiger Ansatz erarbeitet dessen Beschreibung sich in der Bachelorarbeit widerspiegelt. Somit wurde maßgeblich zu den Entwicklungen dieses APs beigetragen und eine Möglichkeit bereitgestellt Ideen direkt an einer bestehenden Testzelle auszuprobieren und zu verbessern.

---

#### **AP 4: Musterbasiertes Architekturmanagement**

Das in AP 4 erarbeitete **Rahmenwerk musterbasiertes Architekturmanagement** umfasst unterschiedliche Methoden und Hilfsmittel zur Unterstützung von Anwender\*innen im Engineering von SoS. Dazu gehört zum einen ein Nutzungs- und Anpassungskonzept der Referenzarchitektur (AP 2) für unterschiedliche Anwendungsbereiche. Zum anderen wurde ein Vorgehen zur Entwicklung und Nutzung von Systemreferenzarchitekturen in einem bestimmten Anwendungskontext erarbeitet. Des Weiteren ist eine Systematik zur Bewertung von Architekturen entstanden, welche durch eine Referenzliste an Architekturkriterien sowie einem Reifegradmodell gestützt wird. Elementarer Bestandteil des Rahmenwerks ist die systematische Nutzung von Lösungsmustern entlang des Entwicklungsprozesses. Sämtliche Methoden und Hilfsmittel wurden in zahlreichen Diskussionsrunden ausgearbeitet und durch die Analyse und Anwendung in einer Vielzahl von unterschiedlichen Beispielen der Anwendungspartner aus den Bereichen Smart Products, Industrie 4.0 und V&V weiterentwickelt.

Lösungsmuster stellen einen zentralen Ansatz im Rahmenwerk dar. Das Ziel von Lösungsmustern ist es, bereits etablierte und immer wiederkehrende Lösungen in generalisierter Form zu explizieren und für die Gestaltung von SoS zur Verfügung zu stellen. Daher wurden **Lösungsmuster im Kontext SoS** identifiziert, in einer einheitlichen Struktur dokumentiert und in Beispielen angewendet. Die Lösungsmuster adressieren unterschiedliche Herausforderungen von SoS durch etablierte Lösungsansätze, die in generalisierter Form vorliegen und durch Adaption in den jeweiligen Problemstellungen der Entwicklung angewendet werden können.

Der Lösungsmusteransatz wurde für die drei wesentlichen Anwendungsbereiche der MoSyS Projektpartner ausgeprägt und die Lösungsmuster in bereichsspezifischen Katalogen dokumentiert. So sind **Lösungsmusterkataloge für Smart Products, Industrie 4.0-Lösungen und V&V** entstanden, die als Hilfsmittel für konkrete Anwendungsprojekte zur Verfügung stehen. Die Lösungsmuster wurden in den Modellierungstools iQuavis und Cameo modelliert und in Beispielen prototypisch genutzt und adaptiert.

#### **Beitrag Philips Engineering Solutions:**

Im AP Musterbasiertes Architekturmanagement hat Philips zunächst vor allem an den frühen Arbeitsaspekten zur Ausarbeitung einer Ausgangsbasis mitgearbeitet und dabei wieder Input aus der Sicht und Erfahrung eines Sondermaschinenbauers gegeben. Für die Definition des und die Anforderungen an das Architekturmanagement wurde die in Bild II-6 gezeigten Abhängigkeiten herausgearbeitet.

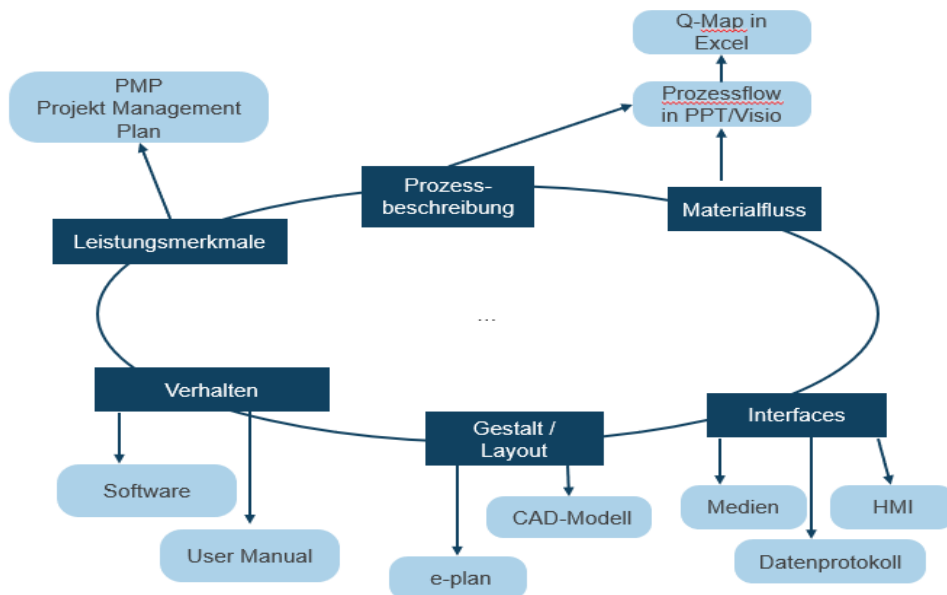


Bild II-2 Abhängigkeiten Architekturmanagement

Der innere Kreis zeigt die Aspekte, die eine Anlage beschreiben und daran angehängt sind die Dokumente oder Tools, mit denen dies bei Philips erfasst werden.

Für die Definition einer System-Referenzarchitektur, für die die verschiedenen Referenzarchitekturen der Anwendungspartner untersucht wurden, wurde die bei Philips im Bereich Healthcare verwendete Architektur von einem Mitarbeiter des Chief Architect Office in Eindhoven den MoSyS Partnern vorgestellt. Dabei wurden sowohl die Inhalte als auch das bei Philips verfolgte Vorgehen zur Entwicklung der System-Referenzarchitektur vorgestellt und mit den Partnern diskutiert. Abbildung Bild II-7 zeigt einen Teil der so genannten HealthSuite Reference Architecture.

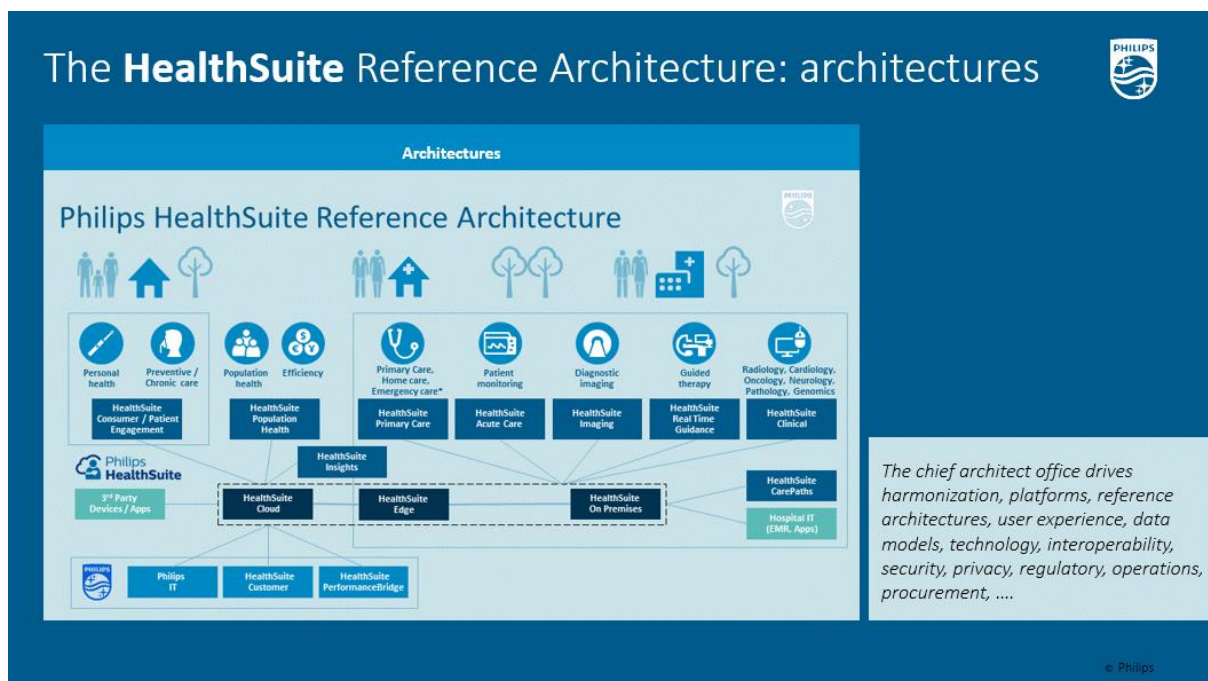


Bild II-3 HealthSuite Reference Architecture

In den regelmäßigen on-line Arbeitskreistreffen aber auch bei Vor-Ort-Treffen bei Lenze und am IEM wurden an den Lösungsmuster für I4.0 Anwendungen gearbeitet. Zusammen mit der Firma Harting wurde aus Sicht von einer Maschinenbaufirma zunächst exemplarisch das Beispiel einer MBSE-Architektur für eine Kugelschreiberfertigung und anschließend einer Fahrradmontage untersucht. Dieses allgemeinen und auf den ersten Blick sehr einfach erscheinenden Montage Szenarien wurde

gewählt, um die grundlegenden Prozesse und Abläufe auszuprobieren, ohne sich an komplexen Details zu verlieren. Auch ermöglichen neutrale Beispiele einen offeneren Austausch zwischen den Partnern als ein konkretes aus einem Unternehmen. Nach Erarbeitung von Use Cases und Lösungsmöglichkeiten wurden dabei die verschiedenen Ebenen und Abläufe der Maschine dargestellt und erste Modularisierungen von Funktionen erarbeitet und getestet. Die Ergebnisse der Arbeiten sind in das grundsätzliche Vorgehen für ein musterbasiertes Architekturmanagement für Produktionssysteme als auch in den Lösungsmusterkatalog für Produktionsanlagen mit eingeflossen.

---

## **AP5: KI-unterstütztes Engineering**

Im Zuge von AP 5.1 **Untersuchung der KI-Potentiale von Beschäftigten** wurden Interviews zur KI-Unterstützung im Engineering durchgeführt, ausgewertet und daraus Synergien abgeleitet. Ein Glossar, das zur Klärung der Begrifflichkeiten rund um das Thema Künstliche Intelligenz dient, wurde als Basis erstellt.

Innerhalb von AP 5.2 und 5.3 **Menschorientierte Entwicklung von KI-Anwendungen** wurde eine kompakte Score Card entwickelt, welche die Bewertung der KI-Potentiale ermöglicht. Weiterhin erfolgte, nach der Selektion und Untersuchung relevanter Prozesse im Engineering, eine Domänenanalyse mittels einer Spezifikationstechnik in den Prozessbereichen Dokumentation und Konstruktion bei einem Unternehmenspartner. Zusätzlich wurden Steckbriefe zur Erfassung und Beurteilung der KI-Potentiale entworfen. Die in der Domänenanalyse identifizierten KI-Potentiale wurden in einer Potentiallandkarte festgehalten und in den Steckbriefen gemeinsam mit den Unternehmenspartnern verfeinert. Auf der Grundlage dieser Aktivitäten wurde eine Methode zur Menschorientierten Entwicklung von KI-Anwendungen entwickelt und validiert, die Anwender in die Entwicklung von KI-Anwendungsfällen einbezieht. Diese Methode kam zum Einsatz, um die KI-Anwendung im Bereich des Gleichteilemanagements auszuwählen und näher auszuarbeiten.

In AP 5.4 wurde mittels einer Methode zur **Nutzung der Systemarchitektur im Kontext der Validierung**, die die Nutzung der Systemarchitektur für Validierungszwecke vorsieht, die KI-Anwendung des Gleichteilemanagements entwickelt und evaluiert. Es resultierte eine Systemarchitektur der Anwendung, die zur Identifikation neuer Anforderungen führte. Nachdem die KI-Anwendung implementiert wurde, erfolgten Nutzungstests, um die Anwendung zu validieren, woraus ein benutzerfreundliches Ergebnis hervorging. Die Validierung brachte neue Anforderungen zum Vorschein, welche in die KI-Anwendung integriert wurden.

In AP 5.5 **Weiterentwicklung der KI-Anwendungen** wird die Technologie hinter der KI-Anwendung aufbereitet und es wird eine Verbindung zu AP 8 hergestellt, um Synergien zwischen den Arbeitspaketen zu schaffen. Die Technologie hinter der KI-Anwendung basiert auf einer webbasierten Benutzeroberfläche und einem Backend, die gemeinsam eine interaktive Suche in einem PDM-System ermöglichen, wobei die Anwendung auf Daten in Vektorform aufbaut und erweiterte Suchfunktionen bietet, um ähnliche Teile effizient zu finden. Der iterative Entwicklungsprozess mit kontinuierlichem Nutzerfeedback und die Einbindung von Anwendern als Stakeholder führten zu einer benutzerfreundlichen und validierten Anwendung, die sich auf neueste Bibliotheken zur Ähnlichkeitssuche stützt.

### **Beitrag Philips Engineering Solutions:**

Im AP5 KI-unterstütztes Engineering hat Philips vor allem in der ersten Phase des Projektes bis etwa Mitte 2022 mitgearbeitet, also an dem AP 5.1 Schnittstelle Mensch KI und 5.2 Potentialanalyse. Wir haben in weiteren Verlauf des Projektes allerdings noch an einigen Workshops und Befragungen teilgenommen.

Bei den Befragungen zur Schnittstelle Mensch / KI konnten wir aus eigener Erfahrung im Umgang mit und Akzeptanz der KI berichten, da wir seit Jahren KI in der Bildverarbeitung einsetzen.

Weitergehend wurde bei der Erstellung und Clusterung des Glossars zum Thema KI teilgenommen und Beiträge Probe gelesen. Auch an der Erstellung des Concept Bords zur Potentialanalyse wurde

mitgearbeitet und Potentiale und Aufwände zur Realisierung von KI unterstützenden Engineering Lösungen bewertet

---

## **AP6: Rahmenwerk für einen Digitalen Zwilling**

Im Rahmen von AP6.1 wurde eine **Definition** des Begriffs Digitaler Zwilling erarbeitet, die als Grundlage für ein gemeinsames Verständnis und die Anforderungserhebung dient. Ergänzend wurden von allen Unternehmenspartnern Anwendungsfälle in Form von Steckbriefen gesammelt. Diese Anwendungsfälle wurden mit Hilfe von Systemmodellen detailliert. Auf Basis der Systemmodelle wurden die Anforderungen abgeleitet, geclustert und in eine **Anforderungsliste** überführt.

In AP6.2 wurde eine **Referenzarchitektur** für digitale Zwillinge entwickelt. Dabei wurden die Elemente der Referenzarchitektur auf bestehende Ansätze wie AAS (Asset Administration Shell), MBSE (Model-Based Systems Engineering), Eclipse Ditto und BaSyx (Basissystem Industrie 4.0) abgebildet.

Zur Unterstützung und Abbildung des **Informationsmodells** wurden Unternehmensarchitektursprachen (ArchiMate) und Software-/Systembeschreibungssprachen (SysML) zusammengeführt, um einen einheitlichen und umfassenden Rahmen für die Referenzarchitektur zu schaffen.

Die erarbeiteten Ergebnisse wurden in AP6.3 in einen **Leitfaden zur modellbasierten Erstellung von digitalen Zwillingen** überführt. Dabei wurden relevante Personas identifiziert und Aktivitäten für die Entwicklung von digitalen Zwillingen dokumentiert. Die Personas wurden verwendet, um verschiedene Arten von Nutzern zu repräsentieren, die mit dem digitalen Zwilling interagieren könnten, wie z.B. Ingenieure, Entwickler oder Kunden. Die Personas wurden gruppiert und Standard-Personas abgeleitet. Die Aktivitäten wurden dokumentiert, um ein klares Verständnis der Schritte und Prozesse bei der Entwicklung und Nutzung von digitalen Zwillingen zu schaffen. Darüber hinaus wurde ein Frontend für Ansichten und Filter für den Leitfaden erstellt. Damit wurde eine visuelle Schnittstelle geschaffen, die es den Nutzern ermöglicht, mit dem Leitfaden zu interagieren und auf die von ihnen benötigten Informationen und Funktionen zuzugreifen. Parallel dazu wurde in AP6.4 der Leitfaden anhand von unternehmensspezifischen Implementierungen evaluiert und die individuellen Anforderungen und Ziele des digitalen Zwillings erarbeitet.

### **Beitrag Philips Engineering Solutions:**

Im AP6 „Rahmenwerk für einen Digitalen Zwilling“ lag der Schwerpunkt der Arbeiten bei Philips, zumal wir die Leitung des AP 6.3 „Leitfaden zur Implementierung des Digitalen Zwillings“ übernommen haben. Überschneidend mit AP8 „Demonstration“ wurde bei Philips als Demonstrator an einem Digitalen Zwilling einer Produktionsanlage gearbeitet.

Bei der Definition von potenziellen Anwendungsfällen für einen Digitalen Zwillings wurden für Philips zwei Anwendungsfälle ausgearbeitet. Der im Bereich Service und Maintenance wurde vor allen unter dem Aspekt der Datenauswertung und Verwendung betrachtet. Hierzu wurde zuerst Steckbrief erstellt und diese Informationen dann nach und nach in die entsprechenden Diagramme übertragen.

Auf dem Weg zum geplanten Demonstrator eines Digitalen Zwillings wurde zunächst das Prinzip der virtuellen Inbetriebnahme untersucht. Dafür wurde erfolgreich die Steuerung einer vorhandenen Anlage in eine spezielle Simulationssoftware (Virtuos von ISG) überführt und damit konnte das Verhalten der Anlage bei Änderungen in der Steuerung erfolgreich vorhergesagt werden.

Leider erwies sich der Aufwand zum Erstellen des entsprechenden Modells in der speziellen Software als zu groß, um dies in einem kleinen Team wie in Aachen für alle Anlagen umzusetzen.

Der danach ebenfalls in einer Masterarbeit verfolgte Ansatz war die Abbildung der Anlage in einer auf Unity basierenden 3-D Simulation, sowie der Aufnahme und anschließenden Darstellung des Anlagenstatus. Dies bezeichnet man als den Digitalen Schattens der Anlage.

Die Hauptarbeit bestand darin, die Daten der Anlagensteuerung und zusätzlicher Sensoren über ein Edge Device in die Cloud und dort als Input in die Anlagen Simulation mit Unity zu spielen.

Das Konzept wurde in einem zusammen mit dem IEM erstellten Erklärvideo genauer erläutert.

Der nächste Schritt hin vom Digitalen Schatten, der „nur“ den realen ist Zustand einer Anlage darstellt hin zum Digitalen Zwilling, der sein Modell der Anlage und ihres Verhaltens anhand der aufgenommenen Daten automatisch anpasst. Konnte im MoSyS Projekt nicht mehr realisiert werden. Das Konzept ist in einem Erklärvideo dargestellt.

Eine andere untersuchte Fragestellung betraf das Thema, wie können Digitale Zwillinge miteinander interagieren oder ineinander integriert werden. In bilateralen Terminen mit Lenze wurde hierfür die Schnittstellen Diskussion zwischen MBSE Modellen /digitalen Zwillingen angegangen und neue Ideen ausgetestet. Diese Fragestellungen erwiesen sich als wesentlich komplexer als angenommen und als absehbar war, dass Philips keine Digitalen Zwilling der Anlage im Rahmen des Projektes bereitstellen kann, wurden die Arbeiten gestoppt.

Das AP 6.3 „Leitfaden zur Implementierung des Digitalen Zwillings“ haben wir zusammen mit dem IEM geleitet und in der Elternzeit von Herrn Rasor zunächst die Termine und Workshops mit den Partnern geplant und abgehalten und den Übergang zu Herrn Trienens begleitet.

---

## **AP7: Veränderungsmanagement – Agile-SE Organisation**

Der in AP 7 erarbeitete **Leitfaden zur Unterstützung von Veränderungsprozessen** hin zum agilen Systems Engineering soll den Anwendenden dabei unterstützen, die für seinen Kontext passendste Methode zur Umsetzung von agilem Systems Engineering zu identifizieren, diese zu implementieren und den Erfolg der Einführung zu überprüfen, um so eine nachhaltige Einführung und damit auch Weiterentwicklung der Organisation zu unterstützen. Der Leitfaden unterstützt dabei, spezifische verbesserungspotenziale innerhalb bestehender Kompetenzen einer Organisation zu identifizieren und betrachtet dabei bestehende Kompetenzen in der Organisation, sowie vorliegende Randbedingungen.

Basierend auf einer Analyse aus **Synergien und Konflikten zwischen agilen Denk- und Handlungsweisen und Grundlagen des Systems Engineering** wurden Potenziale erarbeitet, unter deren Umständen eine gemeinsame Anwendung der bisher zumeist unabhängigen Ansätze den größten Mehrwert für Unternehmen erbringen können.

Kernelement des Leitfadens ist eine **Zugriffslogik**, die unter Beachtung des gewählten Ziels, den bestehenden Kompetenzen in den Dimensionen Agilität und Systems Engineering und den vorliegenden Randbedingungen die passendste Methode, für die Umsetzung des gewählten Ziels vorschlägt. Dabei greift die Zugriffslogik auf eine **Datenbank** zurück in der Methoden aus den weiteren Arbeitspaketen, aber auch im Umfeld der AdWiSE Verbundprojekte, der industriellen Praxis und dem Stand der Technik zurück, um ein breites Spektrum an Anwendungsfällen bedienen zu können.

Um die Implementierung möglichst zielgerichtet durchzuführen, beinhaltet der Leitfaden zusätzlich einen generischen **Implementierungsprozess**, der den Anwendenden durch Leitfragen und eine Toolunterstützung befähigt, die ausgewählte Methode selbstständig in der eigenen Organisation einzuführen

### **Beitrag Philips Engineering Solutions:**

Zu dem Erfolg von in AP7 hat Philips im Wesentlichen durch die aktive Teilnahme in den großen und in bilateralen Workshops beigetragen. Das ging von der Definition von Agilen und SE-Faktoren über die Identifizierung von Synergien und Konflikten (AP7.1) bis zur Identifikation von Kriterien und Zielen des Einführungsprozesses (AP7.3). Für die Validierungsstudie wurde sowohl einer der vorgeschlagenen Anwendungsfälle als auch ein eigener typischer Anwendungsfall bei Philips exemplarisch durchgespielt und die Erkenntnisse in die Entwicklung zurückgespielt (7.4). Für die Leitfaden Datenbank wurde von Philips als Methode das Sunrise Meeting beschrieben und der entsprechende Methoden Steckbrief erstellt.

## **AP8: Modellhaftes SE-Unternehmen**

Im Rahmen von AP 8.1 wurden bestehende Vorarbeiten analysiert, um die **Anforderungen** an ein modellhaftes SE-Unternehmen hinsichtlich der Aufbau- und Ablauforganisation, den relevanten Informationen, Daten und IT-Anwendungen abzuleiten und ein **Konzept** für ein **modellhaftes SE-Unternehmen** zu erstellen, welches aus zwei sich ergänzenden Teilen besteht. Die Anforderungen wurden mittels einer Heatmap dokumentiert und priorisiert. Unter Berücksichtigung der relevanten Anforderungen wurde ein Unternehmensmodell hinsichtlich der Aufbau- und Ablauforganisation und möglicher Daten- und Informationsflüsse (AP8.2) mithilfe von iQUAVIS modelliert und den ersten Teil des Konzepts abbildet.

Für das Zusammentragen und den Transfer der Ergebnisse aller Arbeitspakete wurde in AP8.5 ein **SoS-Demonstrator** entwickelt, welcher den zweiten Teil des Konzepts für das modellhafte SE-Unternehmen darstellt. Die Benutzeroberfläche des Transferdemonstrators ermöglicht eine Integration zentraler Ergebnisse aus allen MoSys-APs – von dem SoS-Metamodell (AP2), den Lösungsmustern (AP4) bis zu konkreten technischen Lösungen aus AP5 und AP6.

In AP8.3 wurde eine **IT- und Datenlandkarte** aufgebaut, welche die relevanten Phasen (Entstehung, Produktion, Operation) umfasst. Die IT- und Datenlandkarte beinhaltet die für ein SoS relevanten IT-Anwendungen, welche in übergeordnete Layer und in die jeweiligen Phasen des Lebenszyklus eines SoS geclustert wurden. Für die Umsetzung der IT- und Datenlandkarte in AP8.4 wurden User Stories erarbeitet, welche relevante Schnittstellen zwischen den IT-Anwendungen aufweisen, beispielsweise zwischen einem Anforderungsmanagement- und einem MBSE-Tool.

### **Beitrag Philips Engineering Solutions:**

Der von Philips im Rahmen des Projektes erstellte Demonstrator bestand in dem digitalen Schatten einer Vorführanlage, der sogenannten „XTS“. Die Anlage wurde dazu über eine Edge unter Verwendung einer neu geschaffenen OPC UA Schnittstelle mit der Cloud verbunden und wichtige Betriebsdaten wurden übertragen. Danach wurde eine Offline-Simulation der Anlage in Unity erstellt und diese an die vorhandenen Betriebsdaten angebunden. Ein MBSE-Modell der Anlage wurde erstellt. Dies könnte als Basis für den nächsten Schritt in Richtung eines Digitalen Zwillings genutzt werden. Details zu dem Demonstrator sind bereits bei AP6 beschrieben.

## **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.

### **Ergänzung Philips Engineering Solutions**

Uns wurden keine entsprechenden Ergebnisse bekannt.

## **II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Ergebnisse des vorliegenden Verbundprojekts sind Methoden, Hilfsmitteln und IT-Werkzeugen zur Gestaltung technischer Systeme und den zugehörigen Handlungssystemen als Elemente komplexer System of Systems. Alle beteiligten Projektpartner erhoffen sich von diesen Ergebnissen einen anderen 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 Gestaltung komplexer Systeme of Systems (SoS). 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 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 Bildungsarbeit einzubinden. Dies soll helfen, die gesellschaftlichen Auswirkungen von KI und autonomen Systemen adäquat zu begleiten. Zudem erwarten sie ein Wachstum in ihren Geschäftsbereichen durch die Eingliederung der Projektergebnisse in ihr Angebotsspektrum, was Beratungs-, Dienstleistungs- und Softwarelösungen einschließt.

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 Philips Engineering Solutions**

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten müssen vor dem Hintergrund des zum Projektende geschehenen Umbaus bei Philips betrachtet werden. Die das Projekt im Wesentlichen ausführende Stelle Philips GmbH – Engineering Solutions Aachen wurde zum 1.2. 2024 an die Firma Zeiss SMT verkauft. Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten lassen sich also zum einen für die Firma Philips und dabei insbesondere für den bei Philips verbleibenden Maschinenbau (angesiedelt in Eindhoven und als Unterauftragnehmer bereits am Projekt beteiligt) und den Standort Aachen, nun in der Firma Zeiss, betrachten.

Für den Maschinenbau in Philips werden die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und Kompetenzen sicher zum wirtschaftlichen Erfolg beitragen. Wie bereits im Zwischenbericht für 2022 erwähnt, geschehen die Fortschritte z.B. auf dem Gebiet des Digitalen Zwilling oder der digitalen Geschäftsmodelle, die z.B. einen Digitalen Zwilling nutzen, sehr viel langsamer als zu Projektbeginn erwartet. Es wurden aber die Grundlagen erarbeitet, z.B. im Leitfaden für einen Digitalen Zwilling oder in der Schaffung eines Digitalen Schattens, der als Vorstufe zum Digitalen Zwilling gesehen werden kann. Die hierfür benötigten Fähigkeiten wie z.B. die Anbindung einer Produktionsanlage an die Azure Cloud und das Rückspielen der Anlagenzustände aus der Cloud werden für die Schaffung einer Digitalen Fabrik benötigt werden. Die Erkenntnisse wurden auch in mehreren Videos zusammengefasst und verschiedenen Standorten in Philips zur Verfügung gestellt.

Das zweite große Thema für Philips in MoSyS war MBSE und SoS. Die hier gewonnenen Erkenntnisse wurden mit Experten an anderen Philips Standorten wie z.B. Böblingen oder auch Eindhoven geteilt und der rege Austausch der Philips Experten mit den Experten der MoSyS Partner erhöht auch die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten für Philips.

Beim dritten großen Thema des Projektes, dem agilen Arbeiten im Systemengineering wurden die Erkenntnisse und Erfahrungen, die am Standort Aachen gemacht wurden, ebenfalls mit den Philips Kollegen in Eindhoven geteilt und es fand ebenfalls ein Erfahrungsaustausch (Best Practice) mit den MoSyS Partnern statt. Da bei Philips zunehmend Hardwareprojekte agil abgearbeitet werden, erhöhen die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrung die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten des Maschinenbaus bei Philips in Eindhoven, da sich die Kollegen dieser Arbeitsweise anpassen können.

### **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 und die Veröffentlichung in Fachzeitschriften soll nicht nur die wissenschaftliche Gemeinschaft profitieren, sondern auch die Sichtbarkeit der beteiligten Organisationen gesteigert werden.

Forschungseinrichtungen erwarten sich von den Projektergebnissen eine signifikante Erweiterung ihrer Kompetenzen, insbesondere in der menschenorientierten Entwicklung komplexer Systeme of Systems (SoS). Dabei liegt ein Fokus auf der Optimierung von Entwicklungsprozessen und der Verbreitung neu entwickelter Methoden und Vorgehensweisen. Die Sicherung der technischen Erfolgsaussichten durch regelmäßigen Austausch und Demonstration der Entwicklungen ist ebenso zentral wie die Vertiefung des Dialogs mit der Praxis durch Vorträge und Publikationen.

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. Anwenderunternehmen wiederum sehen in den Projektergebnissen eine Möglichkeit, ihre Effizienz zu steigern, die Planungsqualität zu verbessern und ihre Wettbewerbsfähigkeit zu stärken.

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 zielt das Projekt darauf ab, 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 Philips Engineering Solutions**

Die im Rahmen des MoSyS Projektes gewonnenen Erkenntnisse wurden innerhalb Philips' mit Experten an Philips Standorten in Böblingen, Hamburg, Eindhoven oder Drachten geteilt. Dies geschah zum Beispiel in internen Vorträgen in Expertenrunden wie dem „Center of Expertise Systems Engineering“, in der Arbeitsgruppe Digital Twin oder auch in allgemeinen Management Präsentationen zum Beispiel in dem Industrie 4.0 Programm.

Ferner wurde im Laufe des Projektes eine ganze Reihe von Austausch Veranstaltung (On-line und vor Ort) zwischen Philips Experten (größtenteils nicht aus Aachen) und MoSyS Partnern durchgeführt.

### **Gesellschaftlicher Nutzen:**

Das Verbundprojekt MoSyS zielt darauf ab, durch die Entwicklung menschenorientierter Systeme oder System of Systems (SoS) weitreichende gesellschaftliche Vorteile zu generieren. Indem es nachhaltige Technologien fördert, trägt es zur Umweltfreundlichkeit und Ressourceneffizienz bei. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Verbesserung der Arbeitsqualität und des Wohlbefindens der Nutzer, was zur allgemeinen Lebensqualität beiträgt. Die Ergebnisse des MoSyS-Verbundprojektes unterstützen zudem die Bildung und Kompetenzentwicklung durch die Integration neuer Technologien in die Ausbildung, was die Fachkräfte von morgen stärkt. Durch die Förderung der sozialen Inklusion und Teilhabe verbessert das Projekt somit den Zugang zu Technologie für alle Gesellschaftsschichten. Schließlich stärken die Projektergebnisse die Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Institutionen und fördern die Schaffung von Arbeitsplätzen, während sie gleichzeitig von Forschung und Innovationen vorangetrieben werden. Zusammenfassend zahlen die Ergebnisse von MoSyS auf die technologischen Innovationen mit sozialen und ökologischen Vorteilen ein, um positiven Beitrag zu den gesellschaftlichen Herausforderungen zu leisten.

### **Ergänzung Philips Engineering Solutions**

Keine weiteren Ergänzungen von Philips.

### **Anschlussmöglichkeiten:**

Die Anschlussmöglichkeiten des Forschungsprojektes zeichnen sich durch ein breites Spektrum an Initiativen und Strategien seitens der Forschungseinrichtungen, Befähiger- und Anwendungsunternehmen aus, um die erzielten Ergebnisse effektiv zu nutzen und zu verbreiten. Forschungseinrichtungen planen, die Ergebnisse in die Entwicklung äquivalenter Systeme einzubringen und neue Industriekunden zu erschließen, wobei ein besonderer Fokus auf den Mittelstand gelegt wird. Durch die Anwendung der Ergebnisse in Drittmittelprojekten und deren Verbreitung über diverse Netzwerke wird der Wissenstransfer intensiviert. Zudem ist die Integration der Forschungsergebnisse in die Lehre und Forschung vorgesehen, um neue Wissensbasen aufzubauen und die Erkenntnisse für zukünftige Projekte nutzbar zu machen, was gleichzeitig die Schaffung hochqualifizierter Arbeitsplätze in Deutschland fördert.

Die Forschungseinrichtungen legen Wert darauf, die Ergebnisse in Softwaretools, Vorlesungen und Weiterbildungsprogramme zu integrieren, um die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit zu gewährleisten. Die Verbreitung der Ergebnisse erfolgt auch über Netzwerke und durch gezielte Öffentlichkeitsarbeit. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Weiterentwicklung eigener Konzepte und der Verbesserung der Verzahnung von Wissenschaft und Praxis, vor allem im Bereich der partizipativen Forschung.

Befähigerunternehmen sehen in den Projektergebnissen eine wertvolle Ressource, um die Kompetenzen von Mitarbeitern, Betriebsräten und Führungskräften in der Gestaltung komplexer Wissensarbeit zu erweitern. Sie planen, die Inhalte zielgruppengerecht aufzubereiten und praxisnah zu transferieren. Anwendungsunternehmen wiederum beabsichtigen, die Forschungsergebnisse in ihre Entwicklungsprozesse, Produkte und Dienstleistungen zu integrieren und diese über verschiedene Plattformen und Netzwerke zu verbreiten. Im Fokus stehen dabei die Anwendung von Systems Engineering (SE)-Methoden, die Nutzung digitaler Zwillinge, die Verbesserung der Zusammenarbeit sowie die Entwicklung neuer Technologien und Geschäftsmodelle. Insgesamt bieten die Anschlussmöglichkeiten des Projektes eine solide Grundlage für die Weiterführung und den Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis, wodurch ein nachhaltiger Impact auf Wirtschaft und Gesellschaft generiert wird.

### **Ergänzung Philips Engineering Solutions**

Die wissenschaftlicher und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit muss erneut vor dem Hintergrund des Betriebsübergangs von Philips Engineering Solutions Aachen zu Zeiss SMT betrachtet werden. In Philips werden die im MoSyS bearbeiteten Themen weiterhin eine wichtige Rolle spielen und an verschiedenen Standorten vorangetrieben. Dies geschieht auch nach Ende des Projektes in Form eines Experten austauschs.

## **II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes**

Als Teil des Begleitforschungsprojektes AdWiSE bestand über die gesamte Laufzeit des Vorhabens sowohl ein enger Austausch zu den anderen Verbundprojekten als auch zu AdWiSE selbst. Dies äußerte sich einerseits durch regelmäßige Austauschrunden zwischen der MoSyS Projektleitung und den AdWiSE Projektkoordinatoren. Andererseits hat ein intensiver Austausch über die verschiedenen AdWiSE Arbeitsgruppen stattgefunden. Dadurch konnten einerseits Synergien identifiziert und andererseits die Forschungsergebnisse klar voneinander abgegrenzt werden. Daraus sind z.B. Anknüpfungspunkte zu den Verbundprojekten AMeLie, bi.smart, CyberTEch, FuPEP und RePASE genutzt worden, die in gemeinsame Veröffentlichungen und White Paper dokumentiert wurden. Darüber hinaus haben stets Vertreter des Vorhabens bei fachlich relevanten Tagungen und Veranstaltungen, wie dem ASE Summit in Stuttgart, dem SE Summit in Clausthal, dem TdSE oder der system:ability teilgenommen. 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. Ein umfassender Austausch mit den assoziierten Partnern konnte allerdings nur in einzelnen Fällen erreicht werden.

## Ergänzung Philips Engineering Solutions

Im Rahmen der vom Rahmenvertrag gegebenen Möglichkeiten wurden die Erkenntnisse auch mit Experten außerhalb von Philips und dem MoSyS / AdWISE Umfeld geteilt und diskutiert. Zu nennen sind hier zum Beispiel Vorträge in einem Expertenkreis des VDMA (Betriebsinterne Sondermaschinenbau, BeSoMa) oder die Mitarbeit im International Center of Networked Adapted Production (ICNAP). ICNAP wird von den drei Fraunhofer Instituten in Aachen koordiniert und hat mittlerweile über 24 Partner. Erkenntnisse aus MoSyS wurden ebenfalls in einer Studie der RWTH zum Thema „Future assembly“ mit Verweis auf das Projekt genutzt. Die sechsmonatige Studie finanzierten 11 Firmen (incl. Partner aus MoSyS) und MBSE und agile Arbeitsweisen spielten dabei zumindest am Rande eine Rolle.

Gegen Ende des Projektes wurden zusammen mit dem FhG -IEM zwei Erklärvideos zu den Themen digitaler Schatten und Digitaler Zwilling erstellt und in Philips, MoSyS, der ASE Community und über die Internetseite des PTKA auch der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

## II.8 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.

- [AGW+22] Harald Anacker, Matthias Günther, Fabian Wyrwich, Roman Dumitrescu (2022): Pattern based engineering of System of System - a systematic literature review. 17th Annual System of Systems Engineering Conference (SOSE). DOI: 10.1109/SOSE55472.2022.9812697
- [AIM+23] Ammersdörfer, A.; Inkermann, D.; Müller, J.; Mandel, C.; Albers, A.; Tekaas, J.; Schierbaum, A.; Anacker, H.; Bitzer, M.; Kleiner, S.; Hermann, J.-P.; Krause, P. (2023): SUPPORTING SYSTEMS ENGINEERING ACTIVITIES BY ARTIFACT-ORIENTED DESCRIPTION AND SELECTION OF METHODS International Conference on Engineering Design (ICED23). 1017: 10.1017/pds.2023.325
- [ALK+22] Albers, A.; Lanza, G.; Klippert, M.; Schäfer, L.; Frey, A.; Hellweg, F.; Müller-Welt, P.; Schöck, M.; Krahe, C.; Nowoseltschenko, K.; Rapp, S. (2022): Product-Production-CoDesign: An Approach on Integrated Product and Production Engineering Across Generations and Life Cycles. Procedia CIRP Design 2022 . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.231>
- [AMH+22] Theresa Ammersdörfer, Johannes Müller, Jonas Heimicke, Helena Reichardt, Simon Rapp, David Inkermann, Albert Albers (2022): Access Logics for Situation-Appropriate Selection and Introduction of Methods in Engineering Design. ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. DOI: 10.35199/NORDDESIGN2022.26
- [ARS+22] Albers, A.; Rapp, S.; Klippert, M.; Lanza, G.; Schäfer, L. (2022): Produkt-Produktions-CoDesign: Ein Ansatz zur integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung über Generationen und Lebenszyklen hinweg. News / Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung, WiGeP, Berliner Kreis & WGMK
- [AS21] Albert, Bruno; Sauer Stefan (2021): Arbeit: Projektbasiert, selbstorganisiert, wertgeschätzt? Work: project based, self-organized, recognized? Arbeit Zeitschrift für Arbeitsforschung, Arbeitsgestaltung und Arbeitspolitik.
- [BRW+21] Nikola Bursac, Simon Rapp, Lukas Waldeier, Steffen Wagenmann, Albert Albers, Magnus Deiss, Volker Hettich (2021): Anforderungsmanagement in der Agilen Entwicklung Mechatronischer Systeme – ein Widerspruch in sich? 5. Entwerfen - Entwickeln - Erleben (EEE 2021). DOI: 10.5445/IR/1000138004
- [GDH+23] Matthias Günther, Denis Göllner, Jörg Heihoff-Schwede, Harald Anacker, Roman Dumitrescu (2023): Engineering und Management von System of Systems - Gestaltungskonzepte im SoS-Engineering. Tag des Systems Engineering (TdSE) 2023
- [GDR+23] Denis Göllner, Sophie Dzienus, Rik Rasor, Dr.-Ing. Harald Anacker, Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu (2023): Guidelines for providing digital twins. 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems, CIRP CMS '23, South Africa. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.189>
- [GKR+22] Göllner, D., Klausmann, T., Rasor, R., & Dumitrescu, R. (2022): Use Case Driven Digital Twin Generation. 2022 IEEE 5th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). DOI: 10.1109/ICPS51978.2022.9816907

- [GRA+22] Göllner, D., Rasor, R., Anacker, H., & Dumitrescu, R. (2022): Collaborative Modeling of Interoperable Digital Twins in a SoS Context. *Procedia CIRP* 107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.113>
- [GT+23] Großmann, Stephan; Tihlarik, Amelie (2023): Informational black holes. How artificial intelligence relates to implicit and contextual knowledge in the working practice of professionals. *EGOS Colloquium*
- [HBS+21] Heimicke, Jonas; Bramato, Luis; Schöck, Moritz; Müller, Johannes; Albers, Albert (2021): Framework for Introducing Agility into Development Processes of Producing Companies. *ISPIM Connects Valencia 2021 - Reconnect, Rediscover & Reimagine*
- [HMB+22] Lynn Humpert, Enrik Mundt, Lukas Bretz, Harald Anacker (2022): Analysis of the criteria for comparing Systems Engineering and agile Methods. *2022 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*. DOI: 10.1109/ISSE54508.2022.10005556
- [HMB+23] Humpert, L.; Mundt, E.; Bretz, L.; Bernz V.; Anacker, H.; Dumitrescu, R. (2023): Criteria-based comparison of Systems Engineering and agile methods. *8th International Conference on Information Systems*
- [HRA+22] Lynn Humpert, Benjamin Röhm, Harald Anacker, Roman Dumitrescu, Reiner Anderl (2022): Method for direct end customer integration into the agile product development. *Procedia CIRP* 109(1). DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.239
- [HS23] Vencia Herzog, Stefan Suwelack (2023): Bridging the Gap between Geometry and User Intent: Retrieval of CAD Models via Regions of Interest. *Computer-Aided Design, Volume 163*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2023.103573>
- [HSF+21] Jonas Heimicke, Silke Roebenack, Christian Frobieter, Amelie Thilarik, Bruno Albert, Luis Bramato, Constantin Mandel, Matthias Behrendt, Albert Albers (2021): Evaluation of Challenges in the Implementation of Scrum in a large German Plant Engineering Company: Derivation of Hypotheses for an Improved Introduction of Agile Approaches into the Processes of Physical Product Development. *R&D Management Conference 2021 - Innovation in an Era of Disruption*. DOI: 10.5445/IR/1000135429
- [HTW+23] Humpert, L.; Tihlarik, A.; Wäschle, M.; Anacker, H.; Dumitrescu, R.; Albers, A.; Albert, B.; Röbenack, S.; Pfeifer, S.(2023): Investigating the potential of artificial intelligence for the employee from the perspective of AI-experts. *8th International Conference on Information Systems*
- [HWH+22] Lynn Humpert, Moritz Wäschle, Sarah Horstmeyer, Harald Anacker, Roman Dumitrescu, Albert Albers (2022): Stakeholder-oriented Elaboration of Artificial Intelligence use cases using the example of Special-Purpose engineering. *Procedia CIRP Volume 119*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.160>
- [HZA+23] Humpert, L.; Zagatta, K.; Anacker, H.; Dumitrescu, R. (2023): Identification of fields of action for validation in Systems Engineering. *IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (IEEE ICTMOD)*
- [KHA+22] Aschot Kharatyan, Lynn Humpert, Harald Anacker, Roman Dumitrescu, Moritz Wäschle, Albert Albers und Sarah Horstmeyer (2022): Künstliche Intelligenz im Engineering - Menschorientierte Analyse von Potenzialen am Beispiel vom Sondermaschinenbau. *ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Juni 2022*. DOI: 10.1515/zwf-2022-1074
- [MGM+22] Constantin Mandel, Matthias Günther, Alex Martin, Emily Windisch, Nikola Bursac, Simon Rapp, Harald Anacker, Albert Albers (2022): Towards a System of Systems Engineering Architecture Framework. *17th Annual System of Systems Engineering Conference (SOSE)*. DOI: 10.1109/SOSE55472.2022.9812634
- [MGP+21] Jan Michael, Eva-Maria Grote, Stefan Achilles Pfeifer, Rik Rasor, Christian Henke, Ansgar Trächtler, Lydia Kaiser (2021): Towards the Concept of a Digital Green Twin for a Sustainable Product Lifecycle. *International Conference on Water Energy Food and Sustainability*. DOI: 10.1007/978-3-030-75315-3\_59
- [MKP+22] Alex Martin, Jerome Kasper, Stefan Pfeifer, Constantin Mandel, Albert Albers (2022): Advanced Engineering Change Impact Approach (AECIA) – Towards a model-based methodology for an evaluated analysis of change cases. *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*. DOI: 10.1109/ISSE54508.2022.10005534
- [MMA22] Constantin Mandel, Alex Martin, Albert Albers (2022): Addressing Factors for User Acceptance of Model-Based Systems Engineering. *XXXIII ISPIM Innovation Conference "Innovating in a Digital World"*
- [MMK+23] Constantin Mandel, Alex Martin, Jerome Kaspar, Rebecca Heitmann, Sarah Horstmeyer (2023): Implementation and Assessment of a Comprehensive Model-Based Systems Engineering Methodology with Regard to User Acceptance in Practice. *Procedia CIRP* 119(8). DOI: 10.1016/j.procir.2023.03.135

- [MSF+23] May, M. C.; Schäfer, L.; Frey, A.; Krahe, C.; Lanza, G. (2023): Towards Product-Production-CoDesign for the Production of the Future. *Procedia CIRP Design 2023*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.172>
- [NRS+22] Manuel Nicklich, Silke Roebenack, Stefan Sauer, Jasmin Schreyer, Amelie Tihlarik (2022): Qualitative Sozialforschung auf Distanz. *Forum Qualitative Sozialforschung Forum: Qualitative Social Research*, 24(1). DOI: <https://doi.org/10.17169/fqs-24.1.4010>
- [PAR+22] Stefan Pfeifer, Didem Akgül, Silke Röbenack, Amelie Tihlarik, Bruno Albert, Harald Anacker, Roman Dumitrescu (2022): Design Decisions in the Architecture Development of Advanced Systems: Towards traceable and sustainable Documentation and Communication. *Proceedings of NordDesign*. DOI: <https://doi.org/10.35199/NORDDDESIGN2022.18>
- [RGB+21] R Rasor, D Göllner, R Bernijazov, L Kaiser, R Dumitrescu (2021): Towards collaborative life cycle specification of digital twins in manufacturing value chains. *Procedia CIRP 2021*. DOI: [10.1016/j.procir.2021.01.035](https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.035)
- [RHA+22] Rik Rasor, Chris Hammerschmidt, Harald Anacker, Roman Dumitrescu (2022): Bewertung der Anwendbarkeit von grafischen Modellierungssprachen für Digitale Zwillinge. *Tag des Systems Engineering (TdSE)*
- [SBK+21] Schäfer, L.; Burkhardt, L.; Kuhnle, A.; Lanza, G. (2021): Integriertes Produkt-Produktions-Codesign. Ganzheitliche Auswirkungsanalysen von Änderungsfällen und Identifikation von Lösungsmustern. *Werkstatttechnik online Heft 4 April 2021*. DOI: [10.37544/1436-4980-2021-04-23](https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-04-23)
- [SFM+22] Schäfer, L.; Frank, A.; May, M. C.; Lanza, G. (2022): Automated Derivation of Optimal Production Sequences from Product Data. *Procedia CIRP CMS 2022*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.010>
- [SGM+22] Louis Schäfer, Matthias Günther, Alex Martin, Mariella Lüpfer, Constantin Mandel, Simon Rapp, Gisela Lanza, Harald Anacker, Albert Albers, Daniel Köchling (2022): Systematic for an Integrative Modelling of Product and Production System. *Procedia CIRP 118(04)*. DOI: [10.1016/j.procir.2023.06.019](https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.019)
- [SKM+23] Schäfer, L.; Kochendörfer, P.; May, M.C.; Lanza, G. (2023): Planning and Multi-Objective Optimization of Production Systems by means of Assembly Line Balancing. *Procedia CIRP CMS 2023*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.136>
- [SRL22] Schäfer, L.; Reichardt, A.-K.; Lanza, G. (2022): Lösungsmuster zur Produktionssystemplanung : Entwicklung eines integrierten Rahmenmodells und exemplarische Anwendung. *Werkstatttechnik online Heft 4 2022*. DOI: <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2022-04-43>
- [STM+23] Schäfer, L.; Treml, N.; May, M. C.; Lanza, G. (2023): Classifying Parts using Feature Extraction and Similarity Assessment. *Procedia CIRP Design 2023*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.127>
- [Tih23] Tihlarik, Amelie (2023): Sinnvoller Einsatz von KI-Tools im Engineering - Aber wo und wie? *Bayern Innovativ Mit KI-Werkzeugen zu einem effizienten und nachhaltigen Engineering*
- [WMG+24] Carsten Wiecher, Constantin Mandel, Matthias Günther, Jannik Fischbach, Joel Greenyer, Matthias Greinert, Carsten Wolff, Roman Dumitrescu, Daniel Mendez, Albert Albers (2024): Model-based Analysis and Specification of Functional Requirements and Tests for Complex Automotive Systems. *Systems Engineering Journal*. DOI: <https://doi.org/10.1002/sys.21748>
- [WMR+22] Emily Windisch, Constantin Mandel, Simon Rapp, Nikola Bursac, Albert Albers (2022): Approach for model-based requirements engineering for the planning of engineering generations in the agile development of mechatronic systems. *Procedia CIRP Volume 109*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.293>

## II.9 Literaturverzeichnis

- [AMY+18] ALBERS, ALBERT; MANDEL, CONSTANTIN; YAN, STEVEN; BEHRENDT, MATTHIAS (2018): System of Systems Approach for the description and characterization of validation environments. In: DS92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference: Marjanović, D.; Ivčević, N.; Pavković, N, S. 2799–2810.
- [ARS+19] Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F., ... & Wessels, H. (2019). The Reference System in PGE-Product Generation Engineering: A generalized Understanding of the Role of Reference Products and their Influence on the Development Process. In *Proceedings of 22nd International Conference on Engineering Design ICED*
- [BDK+15] BAZILEVS, Y.; DENG, X.; KOROBENKO, A.; SCALEA, F.; TODD, M.; TAYLOR, S.: Isogeometric Fatigue Damage Prediction in Large-Scale Composite Structures Driven by Dynamic Sensor Data. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, vol. 82, United States, 2015
- [BDL+11] BAUMANN, R.; DÖRR, N.; LANDGRAF, K.; LANGENBERG, D.: Integration von Innovationsmanagement in den Produktlebenszyklus. *ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Ausgabe 6, Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [Böh13] BÖHLE, F. (2013). Handlungsfähigkeit mit Ungewissheit – Neue Herausforderungen und Ansätze für den Umgang mit Ungewissheit. Eine Betrachtung aus sozioökonomischer Sicht. In: Jeschke, S.; Jakobs, E.-M.; Dröge, A. (Hrsg.): *Exploring Uncertainty*. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 281-293.
- [Böh15] BÖHLE, F. (2015). Von der formalen Organisation zum informellen Organisieren. Zum Wandel des Informellen aus einer arbeitssoziologischen Perspektive. In: von Groddek, V.; Wilz, S. M. (Hrsg.): *Formalität und Informalität in Organisationen*. Wiesbaden: Springer VS, S. 93-122.
- [Bou56] Boulding, K. E. (1956). General systems theory—the skeleton of science. *Management science*, 2(3), 197-208.
- [DB08] J. S. Dahmann; K. J. Baldwin (2008): Understanding the Current State of US Defense Systems of Systems and the Implications for Systems Engineering. In: 2008 2nd Annual IEEE Systems Conference, S. 1–7.
- [DKK+11] DAMERAU, T.; KAUFMANN, U.; KNOTHE, T.; STARK, R.; ULBRICH, A. (2011): Modellbasierte Prozess- und Systemgestaltung für die Innovationsbeschleunigung - Das Verbundprojekt ISYPROM. In: *ZWF – Virtuelle Produktentstehung* 106.
- [DL14] DOPPLER, K., & LAUTERBURG, C. (2008). *Change Management: den Unternehmenswandel gestalten*. Campus Verlag.
- [EB12] EPPINGER, S. D., & BROWNING, T. R. (2012). *Design structure matrix methods and applications*. MIT press.
- [Gal15] GALANTE, A. T.: Intelligent Agent Technologies: The Work Horse of ERP E-Commerce. *International Journal of Intelligence Science* (5), 2015, doi: 10.4236/ijis.2015.54015
- [GL18] Goevert, K., Lindemann, U.; Further development of an agile technique toolbox for mechatronic product development. In D. Marjanović, M. Storga, S. Škec, N. Bojčević & N. Pavković (Hrsg.), *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference (Design Conference Proceedings)*, S. 2015–2026). Glasgow: Design Society, 2018.
- [HH08] HÖHN, R. & HÖPPNER, S. (2008). *Das V-Modell XT*. Berlin: Springer Verlag.
- [HN19] HERRMANN, THOMAS & NIERHOFF, JAN. (2019). Heuristik 4.0. Heuristiken zur Evaluation digitalisierter Arbeit bei Industrie-4.0 und KI-basierten Systemen aus soziotechnischer Perspektive. *FGW – Forschungsinstitut für gesellschaftliche Weiterentwicklung*, Düsseldorf.
- [HPB+12] HOLT, J.; PERRY, S.; Brownsword, M.; Cancila, D.; Hallerstede, S.; Hansen, F. O.: Model-based requirements engineering for system of systems. In: IEEE (Hrsg.): 7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE). 2012 7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE), 16.07.2012 - 19.07.2012, Genova, IEEE, 2012
- [HSS+19] HANDKE, L.; SCHULTE, E.-M.; SCHNEIDER, K.; KAUFFELD, S.: Teams, Time, and Technology: Variations of Media Use Over Project Phases. *Small Group Research*, Vol. 50, Iss. 2, 2019, p. 266–305
- [HW06] HÜLSMANN, M. & WYCISK, C. (2009). Selbstorganisation als Ansatz zur Flexibilisierung der Kompetenzstrukturen. In: Burmann, C.; Freiling, J. & Hülsmann, M. (Hrsg.): *Neue Perspektiven des strategischen Kompetenz-Managements*. Wiesbaden: Gabler, S. 323-350.

- [HWF+12] HABERFELLNER, R.; WECK DE, O. L.; FRICKE, E.; VÖSSNER, S.: Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung. Orell Füssli, Zürich, 2012
- [INC17] INCOSE: INCOSE Systems Engineering Handbuch // INCOSE Systems Engineering Handbuch - Ein Leitfaden für Systemlebenszyklus-Prozesse und -Aktivitäten : INCOSE-TP-2003-002-04 2015. GfSE e.V, München, Deutsche Übersetzung der vierten Ausgabe, 2017
- [JEC+12] Jarratt, T. A. W.; Eckert, C. M.; Caldwell, N. H. M.; Clarkson, P. J. (2011): Engineering change: an overview and perspective on the literature. In: Res Eng Design 22 (2), S. 103–124. DOI: 10.1007/s00163-010-0097-y.
- [KBH+15] Koch, J.; Brandl, F.; Hofer, A.; Reinhart, G. (2015): Studie: Änderungsmanagement in der Produktion. Hg. v. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb). TUM. München.
- [KJS11] Kang, E.; Jackson, E.; Schulte, W.: An Approach for Effective Design Space Exploration. 2011
- [Kle12] Kleemann, F. (2012). Subjektivierung von Arbeit. Eine Reflexion zum Stand des Diskurses. In: Arbeits- und industriesoziologische Studien, Jg. 5, H. 2, S. 6-20.
- [Kle16] Klein, T. P.; Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau (Forschungsberichte IWB, Bd. 323). Dissertation Technische Universität München. München: Utz., 2016.
- [Kot12] JOHN P. KOTTER. Leading Change. Harvard Business Review Press, Boston, Massachusetts. 2012
- [KRU+03] Keating, Charles; Rogers, Ralph; Unal, Resit; Dryer, David; Sousa-Poza, Andres; Safford, Robert et al. (2003): System of Systems Engineering. In: Engineering Management Journal 15 (3), S. 36–45. DOI: 10.1080/10429247.2003.11415214.
- [LS08] Long, S.; Spurlock, D. G.: Motivation and Stakeholder Acceptance in Technology-driven Change Management: Implications for the Engineering Manager. Engineering Management Journal, Vol. 20, Iss. 2, 2008, p. 30–36
- [Mai96] MAIER, MARK W. (1996): Architecting Principles for Systems-of-Systems. In: INCOSE International Symposium 6 (1), S. 565–573. DOI: 10.1002/j.2334-5837.1996.tb02054.x.
- [Mai98] MAIER, MARK W. (1998): Architecting principles for systems-of-systems. In: Systems Engineering 1 (4), S. 267–284. DOI: 10.1002/(SICI)1520-6858(1998)1:4<267::AID-SYS3>3.0.CO;2-D.
- [MGB+16] Mehrpouyan, H.; Giannakopoulou, D.; Brat, G.; Tumer, I. Y.; Hoyle, C.: Complex Engineered Systems Design – Verification Based on Assume-Guarantee Reasoning. 2016 – DOI: 10.1002/sys.21368
- [ML08] Maurer, M., & Lindemann, U. (2008, October). The application of the Multiple-Domain Matrix: Considering multiple do-mains and dependency types in complex product design. In 2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (pp. 2487-2493). IEEE.
- [PD16] Purdy, M.; Daugherty, P.: Why Artificial Intelligence is the future of growth, 2016. Unter: [https://www.accenture.com/t20170524t055435\\_\\_w\\_/ca-en/\\_acnmedia/pdf-52/accenture-why-ai-is-the-future-of-growth.pdf](https://www.accenture.com/t20170524t055435__w_/ca-en/_acnmedia/pdf-52/accenture-why-ai-is-the-future-of-growth.pdf), 15.08.2019
- [Pfe04] Pfeiffer, S. (2004). Arbeitsvermögen. Ein Schlüssel zur Analyse (reflexiver) Informatisierung. Wiesbaden: Springer.
- [PLH19] Pfeiffer, S.; Lee, H.; H., Maximilian. (2019). Doing Industry 4.0 – participatory design on the shop floor in the view of engineering employees. In: Cuadernos de Relaciones Laborales 37(2).
- [RWL+15] ROSEN, R.; WICHERT, G.; LO, G.; BETTENHAUSEN, K.: About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Ottawa, 2015
- [SCD+10] SHAFTO, M.; CONROY, M.; DOYLE, R.; GLAESSGEN, E.; KEMP C.; LEMOIGNE, J.; WANG, L.: DRAFT MODELING, SIMULATION, INFORMATION TECHNOLOGY & PROCESSING ROADMAP TECHNOLOGY AREA 11. National Aeronautics and Space Administration, Washington, 2010
- [SR16] SCHLUSE, M.; ROSSMANN, J.: From Simulation to Experimentable Digital Twins. IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), Edinburgh, 2016
- [Ulr95] ULRICH, K.: The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm. In: Research Policy, 24, 1995, S. 419-440

Eindhoven, 18-sept-2024

---

Ort und Datum

Jeroen Gijzen,

---

Name (in Druckschrift), Unterschrift