

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)

Lenze SE

Markus Kiele-Dunsche, Denis Göllner

Hans-Lenze-Straße 1, 31855 Aerzen

Markus.kiele-dunsche@lenze.com, denis.goellner@lenze.com

Projektlaufzeit: 01.10.2020 – 31.03.2024

Erstellungsdatum: 29.08.2024

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 GmbH Innovation Services
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	5
II.1 Motivation und Aufgabenstellung.....	5
II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	6
II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
II.4 Erzielte Ergebnisse.....	9
II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	16
II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse	16
II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes	19
II.8 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.	19
II.9 Literaturverzeichnis	22

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 Lenze SE:

Lenze bietet seinen Kunden einen komplexen Systembaukasten, bestehend aus meist konfigurierbaren Komponenten an. Die Kunden sind in der Regel Maschinen- und Anlagenbauer. Eine vollständigere Abbildung von SoS hilft Lenze und deren Kunden gleichermaßen. Derzeit sind die Abbildungen noch sehr unvollständig, Methoden der Erstellung und Nutzung sind bei Lenze nicht durchgängig und werden bei Kunden ebenfalls nicht genutzt. Die Kollaboration zwischen Lenze und Kunden in der Maschinenentwicklung bietet viel Potential. Hersteller wie Lenze sind ein wichtiger Enabler für die Kunden welche häufig KMUs sind.

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">• Definition und Operationalisierung von Agilität• Anforderungen an Agilität & Bestandsaufnahme der Umsetzung agiler Prozesse• Kompass Agilität• Kollaborationsmodell• Definition Arbeitskonflikte bei agilem SE und Handlungsempfehlungen• Richtlinien zur Arbeitssystemgestaltung• Evaluationssystematik Qualität von Partizipation/Aufgabe von Betriebsräten• Gestaltungsempfehlungen für Partizipationsprozesse
AP2 SoS Engineering	<ul style="list-style-type: none">• Glossar• Einsatz- und Anwendungsszenarien für SoS• SoS Referenzarchitektur

	<ul style="list-style-type: none"> • Meta-Modell • Erweiterte Wissensbasis • Anforderungen an Methoden für das SoS Engineering • MBSE-Framework
AP3 Auswirkungsanalysen in der PGE	<ul style="list-style-type: none"> • AECIA – Advanced Engineering Change Impact Approach • Modellbasierte Prüfung der Validität von Änderungsanfragen • Ontologie zur Prüfung der Validität von Änderungsanfragen • Ontologie zur Ausbreitungs- und Auswirkungsanalyse • Kommunikationskonzept für das modellbasierte technische Änderungsmanagement
AP4 Musterbasiertes Architekturmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Rahmenwerk musterbasiertes Architekturmanagement • Lösungsmuster im Kontext SoS • Lösungsmusterkatalog Smart Products, Produktion, V&V
AP5 KI-unterstütztes Engineering	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchung der KI-Potentiale von Beschäftigten • Menschorientierte Entwicklung von KI-Anwendungen • Nutzung der Systemarchitektur im Kontext der Validierung • Weiterentwicklung der KI-Anwendung
AP6 Rahmenwerk für einen Digitalen Zwilling	<ul style="list-style-type: none"> • Definition & Anforderungserhebung für einen Digitalen Zwilling • Referenzarchitektur für digitale Zwillinge • Informationsmodell eines digitalen Zwillings • Leitfaden zur modellbasierten Erstellung von Digitalen Zwillingen
AP7 Änderungsmanagement – Agile SE-Organisation	<ul style="list-style-type: none"> • Leitfaden zur Unterstützung von Veränderungsprozessen • Synergien und Potentiale von agilem SE • Zugriffslogik des Leitfadens • Leitfaden zur Implementierung von agilem SoS-Engineering
AP8 Modellhaftes SE- Unternehmen	<ul style="list-style-type: none"> • Anforderungen & Konzept für ein modellhaftes SE-Unternehmen • SoS Demonstrator des modellhaften SE-Unternehmens • IT- und Datenlandkarte

Ergänzung Lenze SE:

Arbeitspaket	Wissensnuggets
AP1 Kollaboration	<ul style="list-style-type: none"> • 199 Mitarbeiter wurden zu Agilität befragt • Durchführung von zwei Workshops
AP2 SoS Engineering	<ul style="list-style-type: none"> • Identifikation geeigneter Werkzeuge für Lenze (Systembaukasten) • Identifikation des Kontextes für erste Umsetzung und Nutzung.
AP3 Auswirkungsanalysen in der PGE	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von Erkenntnissen für die Modellierung, erste Ausbreitungs- und Auswirkungsanalysen durchgeführt
AP4 Musterbasiertes Architekturmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Erste Untersuchungen mit iQUAVIS, • Erneute Abbildung in Enterprise Architect (EA), • Weiterentwicklung des Modells mit Fachabteilung • Erprobung der Nutzung des Systemmodells im Produktmanagement für die „sichere“ Entwicklung IEC62443 zertifizierter Systeme
AP6 Rahmenwerk für einen Digitalen Zwilling	<ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeit am Leitfaden zur Erstellung Digitaler Zwillinge • Dokumentation der IT-Systeme für automatisierte Erstellung • Workshops mit Fachexperten • Veröffentlichungen, Konferenzen IEEE ICPS und CIRP CMS • Aufbau Demonstrator als Beispiel für Maschinenbauer und Komponentenhersteller für standardisierte Abbildung von Systemen darstellt
AP8 Modellhaftes SE- Unternehmen	<ul style="list-style-type: none"> • Unternehmen-übergreifenden Austausch von Systemmodellen eingebracht

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 anzuvizieren, 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.

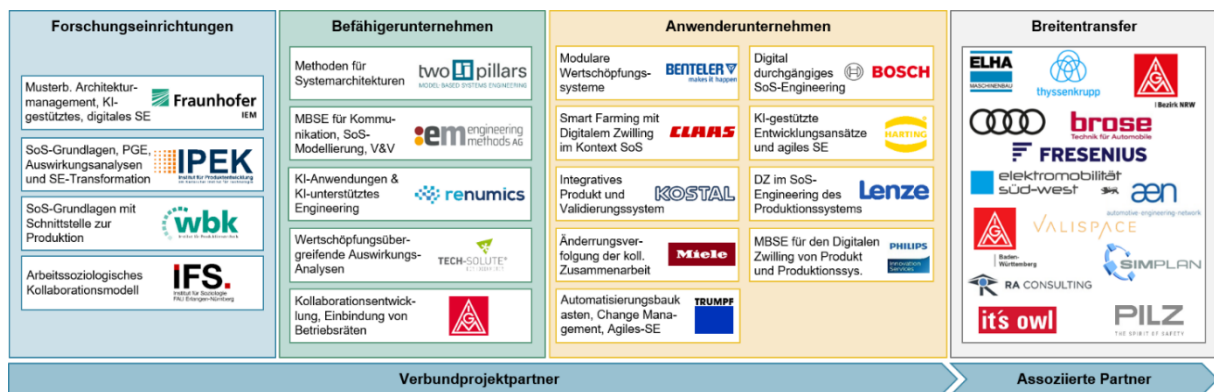
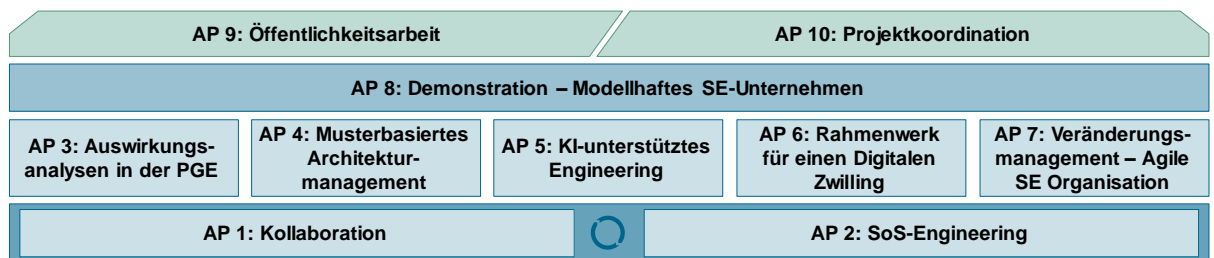


Bild 1: Übersicht über die Verbundprojektpartner und ihre Rollen

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.



PGE = Produktgenerationsentwicklung

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]
IEM	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, wbk)	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 €	
Gesamtkosten Projektlaufzeit € :							11.949.904 €

Bild 3: Initialer Gesamtressourcenplan in MoSyS

Ergänzung Lenze SE:

Wie oben im Teil I schon angedeutet ist eine SoS-Abbildung für die Beschreibung des eigenen Lösungsraumes und deren Abhängigkeiten sehr wichtig und wird in den kommenden Jahren weiter an Bedeutung gewinnen. Dieses Modellwissen kann dann auch mit den Kunden geteilt werden, dafür wird die standardisierte Abbildung (der „digitaler Zwilling“) benötigt, welcher die Kollaboration mit den Kunden verbessert. Dort liegt ein großes Potential. Lenze versteht sich hier als Enabler für die Digitalisierung des Engineerings der Maschinenbauer, den Kunden, die häufig ein KMU sind.

Über das Projekt sollten für dieses umfangreiche und komplexe Thema Methoden und Ansatzpunkte für erste Umsetzungen und Nutzung gefunden werden, um das Thema schrittweise weiter auszubauen.

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 Lenze SE:

Lenze setzt Systemmodellierungswerkzeuge heute schon ein. Diese sind allerdings nicht über das gesamte Portfolio hinweg eingeführt und werden nur sehr begrenzt genutzt. Zum Kunden hin können Lenze Systeme in einem Lenze-Werkzeug modelliert werden, können allerdings nicht automatisiert in IT-Systeme übernommen werden.

Lenze beschäftigt sich schon länger mit der standardisierten Abbildung von Komponenten und Systemen nach der Plattform Industrie 4.0 mit der I4.0-Verwaltungsschale (englisch Asset-Administration-Shell, kurz AAS). Allerdings hat sich der Standard, der gerade weiter ausgebaut wird, noch nicht etabliert, da die Unternehmen wie Lenze aber auch die Kunden die Voraussetzungen dafür noch schaffen müssen.

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die verbundinterne Projektplanung beinhaltet 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, Lenkungskreis, 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 Lenkungskreis den Arbeitsfortschritt und bildete die Schnittstelle zwischen dem Projektkonsortium und dem Projektträger. Dabei wurde auf Basis des Arbeitsplans und der Arbeitsteilung besonderer Wert auf die Sicherstellung der arbeitsteiligen und interdisziplinären Zusammenarbeit aller Projektpartner über die Grenzen der partnerspezifischen Anwendungsfälle hinweg sowie auf ein konstruktives Konfliktmanagement gelegt.

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

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

Anwendungsfälle: Jeder Anwendungsfall wurde von einem Anwendungsfallverantwortlichen geleitet. Seine Aufgabe war es, die Aktivitäten des Anwendungsfalles zu steuern und zu koordinieren, wie z.B. die Organisation und Durchführung von Sitzungen mit Einladungen und Protokollen. Jedem Anwendungsfallverantwortlichem 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 Lenze SE:

Lenze hat sich an den Regelterminen beteiligt, um die Lenze-Sichten einzubringen und aktiv bei der Lösungsfindung zu unterstützen.

Der Austausch mit den anderen Unternehmen, welche vergleichbare Herausforderungen haben, war sehr hilfreich. Es konnten hier verschiedenste Erfahrungen getauscht werden, um die sehr abstrakten Themen praxistauglich zu bewerten und Umsetzungen zu planen. Lenze hat sich in dem Zusammenhang an einer großen Umfrage beteiligt und diese intern organisiert. Ergebnisse stehen dem Gesamtprojekt zur Verfügung.

Die Unterstützung bei den ersten Beispielhaften Modellierungen war im Projekt sehr gut. Hier haben erfahrene Partner unterstützt die richtigen Abbildungen zu finden. Das war ein wichtiger Schritt, um das Modell dann mit der Fachabteilung zu validieren, weiterzuentwickeln und in die Nutzung zu überführen.

Das AP 6 ist aus Lenze Sicht hervorzuheben. Zum Thema „Digitaler Zwilling (DZ)“ hat Lenze sich in anderen Projekten einen Wissensvorsprung erarbeitet, der im Projekt eingebracht werden konnte und wovon die Partnerunternehmen partizipieren konnten.

In den letzten Monaten im Projekt ist die Idee eines Demonstrators für die Kundenkollaboration im Zusammenhang mit dem DZ und Security entstanden. Beide Themen gewinnen immer mehr an Bedeutung. Hier gab es viele Onlinemeetings für Details und ein paar Vororttermine für Umsetzungen und Inbetriebnahme.

Bezüglich Materialkosten, sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten, Fremdleistungen und Reisekosten sind keine signifikanten Abweichungen zur Planung entstanden. Bei den Personalkosten ergibt sich ein Plus von ca. 25%, obwohl nur ca. 11% mehr Stunden geleistet worden sind als geplant. Diese Abweichung kommt zustande, da in der Planung Kostenstellendurchschnittsätze angesetzt worden sind. Im Verwendungsnachweis wurde jedoch mit den genauen personenbezogenen IST-Stundensätzen kalkuliert, die höher lagen.

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 Entwickler:innen als auch die der Führungskräfte. Die Gruppe hochqualifizierte Entwickler:innen 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 gewonnenen 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 Lenze SE:

Lenze war durch die Teilnahme an den Regelterminen an der Erarbeitung der Arbeitsergebnisse im AP1 beteiligt. In bilateralen Gesprächen wurden fünf geeignete Experten bei Lenze identifiziert, die anschließend in Experteninterviews befragt wurden. Dadurch konnte ein erster Eindruck zum Stand der Umsetzung von Agilen Prozessen bei Lenze entwickelt werden. Basierend auf den Ergebnissen der Experteninterviews bei Lenze und allen Partnerunternehmen, ist eine Online-Befragung durchgeführt worden, an der Lenze sich mit 199 Mitarbeitern aus verschiedensten Engineering-Abteilungen beteiligt hat. Die Organisation und Durchführung der Befragung hat bei Lenze in Abstimmung mit der Human Resources Abteilung sowie der Entwicklungsleitung und dem Betriebsrat stattgefunden.

Unter Anleitung des IfS ist anschließend ein Workshop mit fünf Lenze Beschäftigten durchgeführt worden. Das dort vorgestellte Workshop Konzept wurde übernommen und in einem weiteren internen Workshop mit anderem inhaltlichen Fokus wiederholt.

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 Lenze SE:

Lenze war bei der Erstellung des Glossars beteiligt, indem bei der Auswahl und Priorisierung der enthaltenen Begriffe unterstützt wurde. In internen Workshops mit Entwicklungsabteilungen sind Problem Statements identifiziert und dokumentiert worden, die im AP2 verwendet und konsolidiert

wurden. Auch bei dem Schritt der Konsolidierung in Form von Workshops war Lenze beteiligt. Im Zuge erster Modellierungen bei Lenze musste zunächst die Entscheidung für ein Modellierungstool getroffen werden. Im Rahmen von MoSys wurde zunächst IQuavis ausgiebig getestet und positiv bewertet. Trotzdem ist bei Lenze die Entscheidung getroffen worden, kein neues Tool einzuführen. Da Enterprise Architect (EA) im Rahmen der Modellierung in der Softwareentwicklung bereits bekannt war und auch die Möglichkeit zur Systemmodellierung mit SysML enthält, sollte im Rahmen von MoSys EA eingesetzt werden. Um die in AP2 entstandenen Modellelemente der Referenzarchitektur bei Lenze nutzen zu können, wurden diese deshalb in EA als Stereotypen angelegt.

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 Lenze SE:

Auch bei Lenze sind im Rahmen von Workshops Änderungsfälle identifiziert worden. Zu diesem Zweck haben unternehmensintern verschiedene Abstimmungen mit unterschiedlichen Entwicklungsabteilungen stattgefunden, um eine große Varianz der Änderungsfälle zu erhalten. Zu den identifizierten Änderungsfällen zählen beispielsweise die, die auf neuen Marktanforderungen basieren, wie zum Beispiel die Bereitstellung zusätzlicher Sensordaten aus Geräten für einen Smart Service. Eine andere Art von Änderungsfällen sind Fehler, die aufgefallen sind und behoben werden müssen. Im Rahmen von AP3 sind die für die Änderungsfälle relevanten Teile des Lenze Systemmodells in EA modelliert worden. Die Besonderheit bei Lenze war, dass das betroffene System als Baukasten verstanden werden kann, in dem es eine Vielzahl an Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Subsystemen gibt. Die Herausforderung dabei ist, dass bei einer durchgeführten Änderung keine Wechselwirkung übersehen wird. Heute basiert diese komplexe Aufgabe in der Regel auf Expertenwissen, das die langjährigen Lenze Entwickler mitbringen. Im Rahmen von MoSys wurden erste Ansätze erarbeitet, dieses Expertenwissen im Systemmodell aufzunehmen. Außerdem ist eine Ausbreitungsanalyse der Änderungen im Systemmodell durchgeführt und modelliert worden. Im Rahmen der Entwicklung des Kommunikationskonzeptes ist ein Workshop mit Lenze Entwicklern durchgeführt worden, in dem bestehende Probleme bei der Kommunikation und Durchführung von Änderungen identifiziert wurden.

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 Lenze SE:

Wie in AP2, ist auch in AP4 begonnen worden, das Modellierungstool iQUAVIS zu testen und Lenze Modelle dort zu erstellen. Wie bereits beschrieben, wurde anschließend entschieden, Enterprise Architect einzusetzen. Im Rahmen von AP4 sind anschließend die bestehenden Modelle aus iQUAVIS überführt und weitere große Teile des Lenze Automatisierungsbaukastens modellbasiert abgebildet worden. Dazu haben eine Vielzahl an Workshops mit Lenze Entwicklungsabteilungen stattgefunden. Für eine bessere Zusammenarbeit bei Lenze ist sind zusätzliche EA-Lizenzen beschafft worden. Außerdem ist der sog. Pro Cloud Server in der Lenze IT Infrastruktur aufgesetzt worden. Dieser dient zur zentralen Verwaltung der EA-Modelle sowie der zentralen Lizenzverwaltung. Mit dem Pro Cloud Server wird sichergestellt, dass die erstellten Modelle auf produktiven Lenze Servern abgespeichert und gesichert werden. Darüberhinaus sind Schnittstellen zwischen EA und Polarion getestet worden, da letzteres bei Lenze das führende Anforderungsmamangement-Tool ist und Anforderungen auf diese Weise nicht doppelt angelegt werden müssen. In verschiedenen Entwicklungsprojekten ist diese Infrastruktur erprobt worden und findet bereits unabhängig von MoSyS Anwendung. Insbesondere bei der sicheren Entwicklung nach IEC62443 findet die modellbasierte Entwicklung große Zustimmung. Zusätzlich sind im Lenze Systemmodell Lösungsmuster identifiziert und modelliert worden.

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.

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 Lenze SE:

Lenze hat zu Beginn des AP6 relevante Anwendungsfälle für den digitalen Zwilling identifiziert und in Form von Steckbriefen beschrieben. Bei der Begriffsdefinition hat Lenze mitgearbeitet. Großer Fokus lag für Lenze auf der Verwendung der AAS als digitalen Zwilling für Industrie 4.0. Die Expertise auf diesem Gebiet wurde im Rahmen der Teilnahme von Sitzungen der Industrial Digital Twin Association weiter aufgebaut und ins Projekt eingebracht. Sie konnte unter anderem in den Vergleich verschiedener Ansätze für digitale Zwillinge wie Eclipse Ditto, MBSE, AAS eingebracht werden.

Bei Lenze sind darüber hinaus in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IEM die technischen Systeme sowie die IT-Systeme modelliert worden, die in den identifizierten Anwendungsfälle relevant sind, also relevante Informationen bereitstellen. Zur Modellierung waren, um den benötigten Detaillierungsgrad zu erhalten, mehrere Workshops notwendig. Es wurden verschiedene Fachexperten eingebunden, um das Wissen aus den jeweiligen Domänen in ein Gesamtbild integrieren zu können.

Die für Lenze wesentlichen Erkenntnisse des AP6 sind in drei Veröffentlichungen beschrieben worden. Kern der Arbeitspaketes war es zu ergründen, wie digitale Zwillinge systematisch erstellt werden können. Einerseits wurden dazu Methoden und Vorgehensmodelle, andererseits technische Infrastrukturen entwickelt. Die entstandenen Bausteine können in Unternehmen wie Lenze verwendet werden, um digitale Zwillinge in Form der Verwaltungsschale für die relevanten Produkte des Unternehmens zu identifizieren, deren Inhalte zu spezifizieren und sie auf Servern für Kunden bereitzustellen.

Lenze hat im Rahmen des AP6 einen Demonstrator konzipiert und IoT Experience Center am Fraunhofer IEM in Paderborn aufgebaut. Der Demonstrator besteht aus verschiedenen Lenze Komponenten, die exemplarisch verschiedene Achsen eines virtuellen Lagersystems antreiben. Der Demonstrator neben dieser virtuellen Automatisierung bilden die Verwaltungsschalen der einzelnen Komponenten den Kern des Demonstrators. Der Demonstrator wird genutzt, um Besuchern das Konzept standardisierter digitaler Zwillinge, sowie deren Entstehung und das Zusammenspiel, näher zu bringen.

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

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 Lenze SE:

Lenze hat sich an Diskussionen zur Erarbeitung der User Stories beteiligt. Zur Demonstration des AP6 werden in einem letzten Schritt des durchgehenden Use Cases relevante Informationen aus Verwaltungsschalen einer Lenze Komponente in das Systemmodell integriert und können so dort ohne manuelle Aufwände weiterverwendet werden.

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 Lenze SE:

Insbesondere ist hier zu nennen, dass sich die interne Arbeitskultur geändert hat und die Akzeptanz bezüglich digitaler Lösungen weiter erhöht hat. Was den Transfer der Ergebnisse begünstigt.

Bezüglich des unternehmens-übergreifenden automatisierten Austausches von Daten mit dem „Digitalen Zwilling“ sind viele Ergebnisse entstanden und eine Umsetzung und Nutzung scheint näher gerückt zu sein, was die Ergebnisse des Projektes bedeutender machen lässt.

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 Lenze SE:

Lenze nutzt die Ergebnisse in der internen Entwicklung der Produkte und ein erster Ansatz in der Systementwicklung wurde eingeführt, welcher weiter genutzt und ausgebaut wird. Der Nutzen ist in erster Linie ein Effizienzgewinn, da Zusammenhänge abgebildet sind, so dass Auswirkungen transparent werden. Das führt zu weniger Arbeit, vermeidet Fehler, entkoppelt einzelne Produktentwicklungen und verbessert die Kollaboration.

Auf der anderen Seite wurde auch die Kollaboration mit den Kunden im Projekt behandelt. Kurzfristig kann Lenze damit sein positives Image bei seinen Kunden stärken. Da dargestellt wird, dass Lenze sich für vielversprechende neue Ansätze und Technologien engagiert. Mit Unterstützung des Projekts ist ein Konzept für die erste Umsetzung des „Digitalen Zwilling“ mit der AAS entstanden. Dieses Konzept wartet aufgrund der derzeit schwierigen wirtschaftlichen Lage und der daraus resultierenden Kapazitätsengpässen auf Umsetzung und wird in den kommenden Monaten gestartet.

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 Lenze SE:

Die Verbesserung der Kollaboration mit den Kunden, wie in der Plattform Industrie 4.0 beschrieben, ist heute noch nicht in Reichweite. Das Projekt hat hier wichtige wissenschaftliche Grundlagen erarbeitet und verbreitet. Lenze hat sich hier aktiv beteiligt, bei den oben genannten Konferenzen, auf Messen und bei Kundenveranstaltungen. Hier wird es im ersten Schritt einen riesigen Effizienzgewinn bei den Kunden geben und im zweiten Schritt passendere Lösungen und ein erweitertes Angebot ermöglichen. Die Erweiterung bezieht sich vor allem auf die Einführung von Produkt-Service-Systemen (PPS), welche für ein komplexes Lösungsportfolio eine große Herausforderung darstellt. Lenze ist aktiv an Projekten beteiligt, wie zum Beispiel Factory-X, in denen die Ergebnisse aufgegriffen und weiterentwickelt werden.

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 zählen die Ergebnisse von MoSyS auf die technologischen Innovationen mit sozialen und ökologischen Vorteilen ein, um positiven Beitrag zu den gesellschaftlichen Herausforderungen zu leisten.

Ergänzung Lenze SE:

Lenze sieht hier einen großen Nutzen in der Kollaboration mit den Kunden, welche häufig KMU sind und wo wenige Mitarbeiter die großen Herausforderungen im Bereich, z.B. Security, CO2-Fußabdruck und Kreislaufwirtschaft, bewältigen müssen. Das ist ohne MBSE oder SoS und einem Unternehmensübergreifenden Austausch nicht denkbar. Eine sinnvolle Kollaboration entlastet diese kleinen Unternehmen und verbessert den Arbeitsalltag der Mitarbeiter dort, da die Herausforderungen beherrschbar werden.

Aber auch die Mitarbeiter in Unternehmen wie Lenze profitieren von einer besseren Kollaboration für die oben genannten Themen.

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 Lenze SE:

Wie oben schon ausgeführt werden die Ergebnisse vielschichtig genutzt. Das im Projekt entstandene Bewusstsein hilft bei strategischen Entscheidungen bezüglich neuer IT-Systeme und Methoden. Eingeführte Ansätze wie das Systemmodell für Security werden weiter ausgebaut. Die Kollaboration mit den Kunden wird insbesondere durch die Umsetzung des „Digitalen Zwilling“ für die Lenze Lösungen verbessert und mit Nachfolgeprojekten wie z.B. Factory-X weiterausgebaut.

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 Lenze SE:

Lenze hat keine weiteren externen Stellen.

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/NORDESIGN2022.26
- [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 Razor, 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., Razor, 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., Razor, 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. ISPIIM 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/NORDDESIGN2022.18>
- [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
- [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
- [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
- [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. Bojčetić & 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, 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

Ort und Datum

Name (in Druckschrift), Unterschrift

Ort und Datum

Name (in Druckschrift), Unterschrift