

Advanced Systems Engineering

Wertschöpfung im Wandel

**Engineering in Deutschland –
Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft**

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Das wissenschaftliche Projekt AdWiSE wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm »Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen«, Fördermaßnahme »Beherrschung der Komplexität soziotechnischer Systeme – Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering für die Wertschöpfung von morgen (PDA_ASE)« gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Advanced Systems Engineering

Wertschöpfung im Wandel

**Engineering in Deutschland –
Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft**

	Vorwort	7
	Extended Executive Summary	9
1	Einleitung	21
2	Advanced Systems Engineering	25
2.1	Wandel der Wertschöpfung	25
2.2	Die drei Handlungsfelder des Advanced Systems Engineerings	28
2.3	Anwendungsszenarien des Advanced Systems Engineerings	32
3	Voruntersuchungen und Zielsetzung	35
4	Status quo des Engineerings in Wirtschaft und Wissenschaft	41
4.1	Megatrends mit Einfluss auf das Engineering	44
4.1.1	Globalisierung im Engineering	45
4.1.2	Digitalisierung im Engineering	46
4.1.3	Nachhaltigkeit im Engineering	48
4.2	Advanced Systems - Marktleistungen von morgen	50
4.2.1	Perspektiven für Advanced Systems	51
4.2.2	Herausforderungen bei der Gestaltung von Advanced Systems	55
4.3	Systems Engineering - Komplexität managen	59
4.3.1	Verständnis von Systems Engineering	60
4.3.2	Mehrwert des Systems Engineerings	64
4.3.3	Leistungsstand des Systems Engineerings in der Wirtschaft	67
4.3.4	Einführung von Systems Engineering	68
4.3.5	Rollen im Systems Engineering	72
4.3.6	Model-Based Systems Engineering	74

4.4	Advanced Engineering – Engineering neu denken	78
4.4.1	Digitale Technologien im Engineering	79
4.4.1.1	Digitale Durchgängigkeit und Produktlebenszyklusmanagement	79
4.4.1.2	Digitale Zwillinge und Betriebsdatennutzung im Engineering	85
4.4.1.3	Künstliche Intelligenz und Assistenzsysteme	88
4.4.2	Innovative Methoden im Engineering	93
4.4.2.1	Agilität im Engineering	93
4.4.2.2	Kreativitätsmanagement im Engineering	97
4.4.2.3	Produktgenerationsentwicklung	100
4.5	Auswirkungen von ASE auf die Organisation und den Menschen	101
4.5.1	Organisation im Wandel	102
4.5.1.1	Wandel der Organisationsstruktur und -kultur	102
4.5.1.2	Kollaboration im Engineering	105
4.5.1.3	Kooperation zwischen Wirtschaft und Wissenschaft	108
4.5.2	Der Mensch im Engineering	109
4.5.2.1	Rollen im Entstehungsprozess	109
4.5.2.2	Erforderliche Kompetenzen im Engineering	112
4.5.2.3	Bildungswege im Engineering	115

5

	Engineering im internationalen Vergleich	121
5.1	Systems Engineering	124
5.1.1	Systems Engineering in der Lehre	125
5.1.2	Systems Engineering in der Forschung	132
5.2	Advanced Engineering	139
5.2.1	Digitale Technologien im Engineering: Künstliche Intelligenz, Digitaler Zwilling und Produktlebenszyklusmanagement im Engineering	140
5.2.2	Innovative Methoden im Engineering: Kreativität und Agilität im Engineering	142
5.3	Erste Ansätze des Advanced Systems Engineerings	144

6

	Resümee und Ausblick	147
--	-----------------------------	-----

7

	Anhang	149
7.1	Begleitforschung AdWiSE	149
7.2	Abkürzungsverzeichnis	151
7.3	Glossar	152
7.4	Literaturverzeichnis	153
7.5	Bildverzeichnis	159
7.6	Mitwirkende	161

Vorwort

Damit Unternehmen auch zukünftig erfolgreich bleiben, müssen sie sich dem Wandel der Wertschöpfung und den verändernden Marktbedingungen anpassen. Durch die Digitalisierung zeichnet sich ein kontinuierlicher Wandel von den früheren Produkten über mechatronische Systeme hin zu intelligenten technischen Lösungen ab. Diese **Advanced Systems** bergen ein enormes Marktpotential – einmalige Chancen und erhebliche Wettbewerbsvorteile für Pionierunternehmen. Gleichzeitig erfordert die Entwicklung dieser Systeme neue Kompetenzen und Qualifikationen der daran beteiligten Menschen.

Das Entwicklungsgeschehen muss sich den wandelnden Arbeitsstrukturen mit global verteilten Wertschöpfungsnetzwerken anpassen. Die gemeinschaftliche, nachhaltige Gestaltung der zukünftigen Produkte als auch der Produktentstehung erfordert talentierte Entwickler aus verschiedensten Fachgebieten wie zum Beispiel Ingenieurwissenschaften, Informatik, Soziologie und Arbeitswissenschaft. Um die Komplexität dieses zunehmend interdisziplinären Entwicklungsgeschehens zu managen, müssen die Fähigkeiten, Prozesse und Methoden des **Systems Engineerings** branchenübergreifend eingeführt und eingesetzt werden.

Um die neuen Angebote und Geschäftsmodelle zu gestalten, müssen die bestehenden Qualifikationen durch vollkommen neue Ansätze ergänzt werden. Durch das **Advanced Engineering** können die aktuellen Grenzen des Engineerings übertroffen und bestehende Produkte und Dienstleistungen revolutioniert werden. Dazu zählt zum Beispiel der Einsatz von aufstrebenden Technologien wie KI und dem Digitalen Zwilling als auch von neuen Arbeitsstrukturen wie Agilität.

Es ergibt sich ein besonderes Potential für die zukünftige Wertschöpfung, wenn der Dreiklang aus Advanced Systems, Systems Engineering und Advanced Engineering zusammenwirkt. Mit dem integrierenden Leitbild des **Advanced Systems Engineerings** können die Akteure in Wirtschaft und Wissenschaft die bestehenden Stärken forcieren und gemeinschaftlich das Ziel verfolgen, den Innovationsstandort Deutschland nachhaltig weiterzuentwickeln. Dazu bietet die vorliegende Lektüre einen umfassenden Einstieg in das Themenfeld. Die Analyse des aktuellen Leistungsstands zeigt die bestehenden Herausforderungen auf und bietet einen ganzheitlichen, systematischen Rahmen für die Transformation der Engineering-Strategie.

Dr. Walter Koch

Vorsitzender der Gesellschaft für Systems Engineering e.V. (GfSE e.V.)

Extended Executive Summary

Die Digitalisierung, der globale Wettbewerb, der Wandel von Arbeitsstrukturen und der Leitgedanke der Nachhaltigkeit stellen Organisationen vor neue Herausforderungen. Prioritäres Ziel ist, Wertschöpfung zu sichern. Damit Produkte, Software und Dienstleistungen weiterhin profitabel entwickelt und zum Markterfolg geführt werden, muss neu gedacht werden. Der Wandel zu autonomen, interaktiven und dynamisch vernetzten Produkten mit steigendem Software- und Service-Anteil stellt Unternehmen vor weitere Herausforderungen. Komplexe, interdisziplinäre Entstehungsprozesse können durch strukturierte Ansätze wie Systems Engineering bewältigt werden. Kreative Entwicklungsmethoden, agile Prozesse und digitale Tools haben das Potential, Wertschöpfung auch zukünftig zu sichern.

Advanced Systems Engineering (ASE) schafft einen Handlungsrahmen, um die vielfältigen systemorientierten und teils hochinnovativen Ansätze des Engineerings zu integrieren. Es fungiert als Leitbild für die erfolgreiche Gestaltung von innovativen Produkten, Dienstleistungen und Produkt-Service-Systemen sowie deren Entstehungsprozesse. ASE steht für eine neue umfassende Perspektive in der Planung, der Entwicklung und dem Betrieb der technischen Systeme von morgen. Im Hinblick auf die weitere Konkretisierung des Leitbilds wurden der Status quo des Engineerings in Wissenschaft und Wirtschaft erhoben und im internationalen Vergleich analysiert. Die wichtigsten Erkenntnisse sowie der daraus resultierende Handlungsbedarf werden nachfolgend vorgestellt.

Advanced Systems Marktleistungen von morgen

Megatrends im Engineering: Digitalisierung, Globalisierung und Nachhaltigkeit

Diese haben sowohl einen starken Einfluss auf die zukünftigen Marktleistungen als auch auf deren Entstehungsprozesse. Insbesondere die Ausprägungen dieser Megatrends wie die Sharing Economy, Greentech, das Internet of Things, Künstliche Intelligenz und der Fokus auf ein globales Wissensmanagement als Folge des zunehmenden Fachkräftemangels werden die künftige Gestaltung des Engineerings nachhaltig prägen. Es eröffnen sich erhebliche Erfolgspotentiale, deren Erschließung aber gute Ideen und Umsetzungsstärke erfordern.

Perspektiven für Advanced Systems: Autonomie, Vernetzung, Interaktion und Smarte Services.

Die Autonomie von technischen Systemen entwickelt sich zu einem wichtigen Differenzierungsmerkmal am Markt. Insbesondere der Einsatz von autonomen Systemen in komplexen, hochdynamischen Umgebungen in nahezu allen Lebensbereichen eröffnet neue Wachstumsmärkte. Um diese Potentiale auszuschöpfen, müssen Unternehmen befähigt werden, ihre

bestehenden Marktleistungen mit Schlüsseltechnologien wie Künstliche Intelligenz (KI), Robotik und Automatisierungstechnik aufzuwerten. Die zunehmende Vernetzung von interagierenden, intelligenten technischen Systemen eröffnet faszinierende Perspektiven für die Wertschöpfung von morgen. Dazu müssen die aktuellen Systeme mit Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) verzahnt sowie für die Integration in einem Systemverbund qualifiziert werden. Anwender, Nutzer und Konsumenten verlangen eine intelligente, anpassungsfähige Interaktion mit dem technischen System. Die menschenzentrierte Gestaltung unter Berücksichtigung neuer Formen der Mensch-Maschine-Interaktion stellt neue Anforderungen an Entstehungsprozesse der zukünftigen Marktleistungen. Ferner wird datenbasierten Produkt-Service-Systemen (PSS) eine zunehmende Relevanz zugeschrieben. Kontinuierliche Softwareaktualisierung von PSS ermöglicht z. B. eine Funktionserweiterung im Betrieb oder eine kritische Sicherheitsaktualisierung. Die Unternehmen stoßen bei der Ausgestaltung der Services jedoch auf erhebliche Herausforderungen hinsichtlich der Bewertung des Kundennutzens und der Rentabilität der Geschäftsmodelle.

Herausforderungen bei der Gestaltung von Advanced Systems: Entwicklungskomplexität, Kostendruck und regulatorische Aspekte.

Mit der Komplexität der zukünftigen Marktleistungen wird auch die Entwicklungskomplexität steigen. Es besteht ein kontroverses Meinungsbild, ob der Aufbau auf den bestehenden Vorgehensmodellen des Engineerings den geforderten disruptiven Innovationen gerecht wird oder eine umfassende Neuausrichtung notwendig ist. Im Gegensatz dazu wird das durchgängige Schnittstellenmanagement gemeinschaftlich als zentrale Herausforderung wahrgenommen. Die beschriebenen Schnittstellen betreffen sowohl die Prozess- und Organisationsstrukturen, die technischen Schnittstellen in der

Engineering-IT-Infrastruktur als auch die Schnittstellen zwischen der Marktleistung im Betrieb und dem Unternehmen.

Mehr denn je sind die Unternehmen gefordert, den Zielkonflikt zwischen einer Steigerung der kundenwahrnehmbaren Individualisierung der Marktleistung und dem gleichzeitigen Kostendruck auf globalen Märkten zu meistern. Es fehlt an Entwurfsmethoden für Produktarchitekturen, Produktionssysteme und Wertschöpfungsnetzwerke sowie für Geschäftsmodelle. Des Weiteren stehen die befragten Unternehmen weiterhin vor der Herausforderung, kürzere Innovationszyklen bei gleichbleibend hoher Qualität zu realisieren. Dabei sind sie zusätzlich mit unterschiedlichen Lebenszyklen der Anwendungssoftware (z. B. Apps), der eingebetteten Produktsoftware (z. B. Firmware) und der Hardware (z. B. mechanisches Grundsystem) konfrontiert. Um den genannten Herausforderungen zu begegnen, sind neue Kompetenzen und entsprechende Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen erforderlich.

In Ergänzung zu den technischen Anforderungen ergeben sich neue Anforderungen in Bezug auf die Erfüllung von regulatorischen Aspekten. Dabei werden Aspekte wie 1) Haftung und Verantwortlichkeiten bei autonomen Systemen, 2) Datenschutz und Datensicherheit sowie 3) Homologation und Zulassung maßgeblich den Erfolg zukünftiger Marktleistungen beeinflussen. Neben der IT-Sicherheit stellt die Aktualisierung der zukünftigen Systeme im Betrieb neue und umfangreichere Anforderungen an die Absicherung vernetzter Systemverbünde und System of Systems.

Systems Engineering Komplexität managen

Verständnis von Systems Engineering: Mächtiges Werkzeug, aber vage Vorstellungen.

Der Begriff Systems Engineering (SE) ist branchenübergreifend geläufig. Viele verbinden SE mit Großprojekten der USA wie dem Apollo-Programm. Das Verständnis ist sehr heterogen. Der Großteil der Befragten assoziiert mit Systems Engineering die fachgebietsübergreifende Zusammenarbeit bei der Entwicklung von komplexen multidisziplinären Produkten. Ein Einsatz in späteren Phasen der Entstehung wie der Produktionssystementwicklung (Fertigungsplanung) sowie die integrative Betrachtung von Produkt, Produktionssystem und Dienstleistung sind nicht etabliert.

Mehrwert von Systems Engineering: Förderung eines gemeinsamen Systemverständnisses.

Durch Systems Engineering erhoffen sich die Unternehmen ein verbessertes Systemverständnis, um beispielsweise Inkonsistenzen und Fehler frühzeitig zu identifizieren, die Entwicklungsaktivitäten zu parallelisieren und innovativere Kundenlösungen zu gestalten. Weitere Nutzenpotentiale des Systems Engineerings werden insbesondere in der Rückverfolgbarkeit der Zusammenhänge und Beziehungen zwischen Artefakten des Entwicklungsprozesses (Traceability) und der Verbesserung der Transparenz in der Produktentwicklung gesehen. Es herrscht die Auffassung vor, dass Systems Engineering ein erforderlicher Ansatz zur Komplexitätsbeherrschung von technischen und soziotechnischen Systemen und der verbundenen Prozesse ist und die Leistungsfähigkeit der Marktleistungsentstehung steigert. >

Leistungsstand von Systems Engineering in der Wirtschaft: An der Schwelle zur Verbreitung.

Trotz der hohen Erwartungshaltung und der zahlreichen Nutzenpotentiale ist der Leistungsstand abhängig von Unternehmensgröße und Branche sehr heterogen. In der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie ist Systems Engineering wesentlich etablierter als im Maschinenbau oder der Automatisierungsbranche. In Großkonzernen wird Systems Engineering tendenziell eher genutzt als in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU). Unabhängig von der Größe und der Branche fokussiert sich der Einsatz auf das Anforderungsmanagement und den Systementwurf.

Einführung von Systems Engineering: Hürden durch inkrementelle Einführung überwinden.

Eine Vielzahl der befragten Unternehmen plant oder führt Systems Engineering ein. Allerdings fehlt es an Methoden für ein begleitendes Veränderungsmanagement. Gleichzeitig stehen die Unternehmen vor der Herausforderung, dass eine umfassende Qualifikation und Motivation der Entwickler und über alle Führungsebenen erforderlich sind. Des Weiteren entstehen erhebliche Kosten, um die Methoden und Prozesse des Systems Engineerings an das Unternehmen und die Projektgegebenheiten anzupassen. Wichtige Kenngrößen wie die Amortisationsdauer über die Entwicklung mehrerer Systemgenerationen hinweg sowie der nachhaltige Mehrwert einer SE-Einführung lassen sich bislang kaum fundiert quantifizieren.

Einzelne Unternehmen haben Systems Engineering teilweise erfolgreich eingeführt. Dabei hat sich insbesondere eine inkrementelle und projektbezogene Einführung bewährt. Ferner kann ein Einführungsvorhaben durch einen simultanen Top-down- und Bottom-up-Ansatz über alle Führungsebenen hinweg, eine externe Methodenunterstützung sowie begleitendes Veränderungsmanagement unterstützt werden.

Rollen im Systems Engineering: Unklare Rollenbilder und Kompetenzprofile.

Ein klares Berufsbild eines Systems Engineers hat sich in der Wirtschaft noch nicht etabliert. Vom Systems Engineer abgeleitete Rollen sind u. a. Systemarchitekt und Verantwortlicher für Kundenanforderungen. Es herrscht kein eindeutiges Meinungsbild über die Profile, die Aufgaben und die Verantwortlichkeiten der involvierten Rollen. Häufig wird von einem Systems Engineer eine ausgeprägte Methoden- und Sozialkompetenz erwartet, um die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten zu gewährleisten. In KMU decken sich diese Kompetenzen häufig mit der Rolle eines technischen Projektleiters. Es herrscht keine Einigkeit, ob diese Kompetenzen durch Lehre an den Hochschulen vermittelt werden können oder auf Basis von Erfahrungen in der Praxis erlangt werden müssen.

Model-Based Systems Engineering: Hohes Potential bei zahlreichen Hürden.

Die Beschreib- und Beherrschbarkeit der zunehmenden Systemkomplexität sowie die Organisation des entsprechenden, interdisziplinären Entwicklungsprozesses auf Basis eines ganzheitlichen Systemmodells kommt durch den Begriff Model-Based Systems Engineering (MBSE) zum Ausdruck. Damit einher geht eine hohe Erwartungshaltung nach einem durchgängigen Entwicklungsgeschehen. MBSE wird aktuell primär nur für die formale Modellierung von Systemarchitekturen genutzt. Obwohl sich die Systems Modeling Language (SysML) als De-facto-Standard etabliert hat, muss in der Regel eine unternehmensspezifisch angepasste Modellierungsmethode eingeführt werden, um die systemischen Zusammenhänge vollständig zu erfassen. Weitere Hürden bei der Einführung von MBSE in der heutigen Form sind die fehlenden Amortisationskonzepte für den erhöhten Modellierungsaufwand, die unzureichende Benutzungsfreundlichkeit der IT-Werkzeuge und die mangelhafte Integration in die bestehende Engineering-IT-Infrastruktur.

Advanced Engineering Engineering neu denken

Digitale Durchgängigkeit und Produktlebenszyklusmanagement (PLM): Nur Standards helfen weiter.

Die Vision einer digitalen Durchgängigkeit beschreibt einen ungehinderten Informationsfluss zwischen allen Aktivitäten des Entwicklungsgeschehens durch die Vernetzung der IT-Systeme in den Unternehmen und in Entwicklungspartnerschaften. Als Vorteile dieser Vernetzung werden Transparenz durch Rückverfolgbarkeit, Effizienzgewinn durch Prozessautomatisierung und Qualitätsverbesserung durch Informationsverfügbarkeit erwartet. Damit ergänzen die digitale Durchgängigkeit und Vernetzung die bestehenden Ansätze der virtuellen Produktentstehung und des Produktlebenszyklusmanagements (PLM) durch eine umfassende Integration sämtlicher Informationen der Marktleistungsentstehung und dessen Nutzung. Eine Vielzahl der befragten Unternehmen befindet sich in einem permanenten Transformationsprozess, mit dem Ziel, einen hohen Vernetzungsgrad zu erreichen. Einer vollständigen Vernetzung wirken mehrere Herausforderungen entgegen. So wird beispielsweise für die Gestaltung komplexer interdisziplinärer Systeme eine zunehmende Anzahl an IT-Systemen eingesetzt. Dies resultiert in hohen Aufwänden bei der Administration und Orchestrierung der Softwarewerkzeuge. Medienbrüche zwischen den IT-Systemen sind mangels standardisierter Austauschformate an der Tagesordnung. Ferner können die Unternehmen nicht alle erforderlichen Programmierschnittstellen gestalten und pflegen. Diese Herausforderungen verstärken sich bei unternehmensübergreifenden Kooperationen und gemeinschaftlich genutzten Informationen, welche gewissen Sicherheitsstandards genügen müssen. Neben den technischen Hürden müssen unternehmensspezifische Vorgehensweisen der Produktentstehung >

und die Zusammenhänge innerhalb der IT-Infrastruktur berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund gilt es, zukünftig insbesondere die Synergien zwischen PLM, virtueller Produktentstehung und MBSE zu nutzen.

Digitale Zwillinge und Betriebsdatennutzung im Engineering: Erfolgversprechende Technologien in den Kinderschuhen.

Dem Konzept Digitaler Zwilling wird von vielen Befragten eine zentrale Bedeutung im Engineering beigemessen. Ergänzend zur digitalen Durchgängigkeit liegt der Fokus auf der Vernetzung der spezifischen Daten und Modelle über den Lebenszyklus einer Marktleistung. Obwohl kein einheitliches Verständnis des Konzepts vorliegt, werden vielfältige Nutzenpotentiale insbesondere in der Betriebsdatennutzung und bei der Gestaltung von datenbasierten Dienstleistungen oder Geschäftsmodellen erkannt. Für die Erschließung dieser Potentiale müssen zunächst die Anwendungsfälle identifiziert, strukturiert und bewertet werden. In der praktischen Anwendung bestehen besondere Herausforderungen bei der Modellbildung und deren Vernetzung über den gesamten Lebenszyklus. Eine virtuelle Eigenschaftsabsicherung auf Basis vernetzter Modelle ist derzeit nur sehr bedingt möglich. In der Entwicklung werden nach jetzigem Stand nur in Ausnahmefällen Betriebs- und Umfelddaten genutzt, um dadurch die Marktleistungen von Generation zu Generation zu optimieren. Vor diesem Hintergrund kommt der technischen und wirtschaftlichen Umsetzung der Engineering-IT-Infrastruktur für Digitale Zwillinge eine sehr hohe Bedeutung zu. Dabei muss eine unternehmensübergreifende Nutzung und insbesondere die Interoperabilität von Digitalen Zwillingen sichergestellt werden.

Künstliche Intelligenz (KI) und Assistenzsysteme: Mächtiges Werkzeug zur Unterstützung des Menschen.

Die Schlüsseltechnologie Künstliche Intelligenz eröffnet auch im Engineering neue Perspektiven. Assistenzsysteme werden schon von vielen Unternehmen erfolgreich eingesetzt. Damit einher geht die Erwartung, dass die offensichtlichen Erfolgspotentiale von KI in nächster Zeit weiter erschlossen werden. Das gilt beispielsweise für die Übernahme von sich wiederholenden Routineaufgaben, die Verarbeitung unstrukturierter Daten, das Lernen aus Erfahrungswissen und für die starke Verbesserung bestehender IT-Anwendungen. Bei der Erschließung dieser Potentiale bestehen Herausforderungen wie die Identifikation relevanter Anwendungsfälle, die Bildung domänenspezifischer KI-Modelle sowie unzureichende Kompetenzen in den Unternehmen. Des Weiteren besteht eine starke Unsicherheit bei dem Einsatz von nicht-deterministischen Lernalgorithmen, die im Konflikt zu sicherheitsrelevanten oder regulatorischen Anforderungen entstehen können. Vergleichbare Herausforderungen ergeben sich in Bezug auf den Datenschutz und die Persönlichkeitsrechte bei Systemen, welche Daten der Mitarbeiter oder Nutzer verarbeiten.

Agilität im Engineering: Umfassende Begeisterung trotz mangelnder Umsetzung.

Der Großteil der Unternehmen plant oder erprobt aktuell den Einsatz agiler Vorgehensmodelle. Die Einführung beschränkt sich in der Regel auf einzelne Teams, Abteilungen oder Projekte. Bei einer Vielzahl der Unternehmen wird das Scrum-Rahmenwerk adaptiert und genutzt. Mit der Einführung von Agilität besteht die durch Erfahrungen gestützte Erwartungshaltung, dass die agile Arbeitsweise die Kommunikation und die Kooperation im Engineering stark fördert. Ferner erwarten die Unternehmen eine verbesserte Transparenz in der Planung und

Dokumentation des Vorgehens sowie eine erhöhte Verbindlichkeit für Arbeitsergebnisse. Die Transparenz und das regelmäßige Feedback sollen zu einer kontinuierlichen Verbesserung führen. Zu guter Letzt soll das agile Vorgehen die Unternehmen befähigen, flexibler und schneller auf sich ändernde Kunden- oder Marktanforderungen zu reagieren. Die damit verbundene Umstrukturierung der bestehenden Arbeitsweise führt zu einer Vielzahl von Herausforderungen. Die bestehenden Vorgehensmodelle und Werkzeuge stoßen an ihre Grenzen. Gleichzeitig fehlt es häufig an Akzeptanz über alle Unternehmensebenen hinweg und in unternehmensübergreifenden Vorhaben. Es fehlt auch an systematischen Vorgehensmodellen für die Einführung der agilen Arbeitsweise in Unternehmen, die den Anforderungen an die Organisation (z. B. Skalierbarkeit über viele Entwicklungsabteilungen) und an das Projektumfeld (z. B. interdisziplinäre Produkte) gerecht werden. Vor diesem Hintergrund gilt es, Synergien mit dem Systems Engineering zu identifizieren und zu nutzen.

Kreativitätsmanagement im Engineering: Unausgeschöpftes Potential von bewährten Methoden.

Kreativität führt zu innovativen Marktleistungen. Es kommt darauf an, das Kreativitätspotential einer Organisation zu erkennen und systematisch auszuschöpfen. Obwohl die Unternehmen grundsätzlich diese Meinung teilen, ergibt sich im Hinblick auf den gezielten Einsatz von Kreativitätsmethoden im Engineering ein uneinheitliches Stimmungsbild. Eine Vielzahl der Unternehmen verwendet kaum bzw. keine Kreativitätstechniken. Trotz der erkannten Relevanz von kreativem Freiraum sind die dafür erforderlichen Infrastrukturen oder Arbeitszeitmodelle noch nicht verbreitet. Um Kreativität in der Produktentstehung zu fördern, bedarf es eines Mentalitätswandels sowohl in den Führungspositionen als auch bei den Entwicklern. Dadurch kann die Akzeptanz gesteigert werden.

Positiv ist die sehr große Auswahl an Kreativitätstechniken, die sich in der Praxis bewährt haben, beispielsweise das Design Thinking und Kreativitätsworkshops wie Makeathons. Hier zeichnet sich die Herausforderung ab, die für den spezifischen Einsatzfall bestgeeignete Technik auszuwählen.

Produktgenerationsentwicklung (PGE): Nachhaltige Effizienz im Innovationsgeschehen.

Die zunehmende Anzahl von verschiedenen Produktversionen und -generationen und deren Release kann durch einen systematisch-integrierten Planungs- und Entwicklungsprozess beschrieben, strukturiert und gesteuert werden. Dies bietet Vorteile hinsichtlich der Risikominimierung in den Entwicklungsaktivitäten, Reduktion von Validierungsaufwänden sowie neue Möglichkeiten der Wettbewerbsdifferenzierung. Obwohl die Modelle und Potentiale der generationsübergreifenden Entwicklung in der Wissenschaft konstituiert sind, haben sich die Ansätze in der Praxis noch nicht umfassend etabliert. >

Auswirkungen von ASE auf die Organisation und den Menschen im soziotechnischen Gesamtsystem

Wandel der Organisationsstruktur und -kultur: Aktive Gestaltung mit dem Menschen im Mittelpunkt.

Viele Unternehmen befinden sich in einer Phase der Neuausrichtung der Organisationsstruktur im Engineering, in deren Verlauf die Einführung von flachen Organisationsstrukturen sowie ein Wandel von funktionsorientierten zu prozessorientierten Arbeitsstrukturen angestrebt wird. Der Etablierung einer offenen Unternehmens- und Fehlerkultur mit transparenter Kommunikation wird dabei eine hohe Relevanz zugewiesen. Des Weiteren rückt die Rolle der Unternehmenskultur als Grundlage für die Förderung von Kreativität und Zusammenarbeit in den Fokus. Es herrscht die Meinung vor, dass der tiefgreifende Wandel im Engineering Hand in Hand mit der Weiterentwicklung der Unternehmenskultur gehen muss, die alle Führungsebenen erfasst und von den Führungspersönlichkeiten vorgelebt wird. Die Führung muss sich bewusst sein, dass eine Veränderung der Unternehmenskultur viel Zeit und ein hohes Maß an Beharrlichkeit erfordert.

Kollaboration im Engineering: Innovationskraft durch lernende Organisationen.

Erfolgreiche Wertschöpfung erfordert kollaboratives, gemeinschaftliches Arbeiten und die unternehmensinterne und -übergreifende Zusammenführung von Kompetenzen und Erfahrungswissen. Die Kollaboration bei der Entstehung von Advanced Systems bedarf einer gemeinsamen, disziplinübergreifenden Entwicklungssprache sowie eines gemeinsamen Meta-Modells für Produkte, Dienstleistungen und Produktionssysteme. Entsprechende Methoden

und IT-Systeme für das unternehmensinterne Wissensmanagement und die Kommunikation müssen etabliert werden. Des Weiteren gilt es, Best Practices für Prozesse, Methoden, IT-Werkzeuge und Informationsstandards zu identifizieren und zu kommunizieren, um voneinander zu lernen und um global verteilte Entwicklungsstandorte und unternehmensübergreifende Kollaborationen innerhalb von Wertschöpfungsnetzwerken zu ermöglichen.

Kooperation von Wirtschaft und Wissenschaft: Einklang aus unternehmerischen, wissenschaftlichen und volkswirtschaftlichen Zielen.

Die Befragten schätzen die Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft und Wissenschaft und erwarten eine zunehmende Relevanz der Kollaboration. Vor dem Hintergrund erfolgreicher Beispiele für eine Zusammenarbeit besteht einzeln auch die Forderung nach neuen Kollaborationsmodellen und multilateralen Austauschprogrammen. Bei der Zusammenarbeit muss der häufig auftretende Zielkonflikt zwischen dem wirtschaftlichen Erfolg der Unternehmen und dem Erkenntnisgewinn der Forschung berücksichtigt werden. Diesem Zielkonflikt können z. B. Innovations-Ökosysteme gerecht werden, in welchen gemeinschaftlich und anwendungsnah an Technologie- und Methodenentwicklung gearbeitet wird.

Rollen im Entstehungsprozess: Kontinuierliche Anpassung der Qualifikationen und der Teamzusammensetzung.

Zukünftig werden die Akteure im Entwicklungsgeschehen in zunehmend wechselnden und teilweise vollkommen neuen Tätigkeitsbereichen eingesetzt. Dies fordert zum einen eine hohe Flexibilität und Lernbereitschaft der Entwickler. Zum anderen ist eine kontinuierliche Einführung und Verstetigung der Weiterentwicklung von neuen Rollenprofilen im Engineering und den damit verbundenen Verantwortlichkeiten durch

die Unternehmen notwendig. Eine besondere Relevanz wird in diesem Zuge organisatorischen Schnittstellenfunktionen im Engineering und unterstützende Stabsstellen wie einem Coach für das Management von Prozessen, Methoden und Werkzeugen zugeschrieben. Um dabei eine Diskrepanz zwischen den definierten und gelebten Rollen zu vermeiden, müssen die Personaleinsatzplanung, die Projektteam-Zusammensetzungen und die Qualifizierungsplanung im Entwicklungsgeschehen entsprechend angepasst werden.

Erforderliche Kompetenzen: Zielkonflikt zwischen fundiertem Fachwissen und ganzheitlichem Systemverständnis.

Mehr denn je kommt es auf den ausgewogenen Dreiklang von Fach-, Methoden- und Sozialkompetenz an. Darüber hinaus werden die Akteure in zukünftigen Entstehungsprozessen gefordert sein, den Zielkonflikt von tiefer technischer Versiertheit in einer Disziplin und einem ganzheitlichen Verständnis über das Gesamtsystem zu meistern. Systemdenken wird eine herausragende Schlüsselkompetenz. Die Basis dafür ist ein gutes Verständnis über den jeweiligen Anwendungskontext sowie die prinzipiellen, systemischen Lösungsansätze. Wenngleich die involvierten Fachdisziplinen im Prinzip gleich relevant sind, spielt im Zeitalter der Digitalisierung die Informatikkompetenz eine besonders erfolgskritische Rolle, insbesondere als integrierende Querschnittskompetenz. Zu guter Letzt nimmt die Bedeutung von Sozialkompetenz stark zu; dazu zählen insbesondere Kommunikationsfähigkeit und Kooperationsvermögen. Trotz dieser Breite von neuen, teils »weichen« Kompetenzen zählen in Zuge der Konkretisierung eines komplexen Systems fundierte Fachkompetenzen, sodass nicht der Trugschluss gezogen werden darf, dass »weiche« Kompetenzen »harte« Kompetenzen ablösen. Daher werden die Akteure im Entwicklungsgeschehen mehr denn je gefordert sein, ihre Stärken in fundiertem Fach- und Methodenwissen mit »weichen« Kompetenzen zu untermauern.

Bildungswege im Engineering: Neue Impulse in Aus- und Weiterbildung.

In der Ausbildung von Ingenieuren sollte zunehmend ein umfangreiches Verständnis für die Wichtigkeit von interdisziplinärer Zusammenarbeit und Kommunikation etabliert werden. Dazu sollte die Lehre an den Hochschulen innerhalb einer etablierten Fachdisziplin kontinuierlich durch neue Lehrformate wie z. B. fachgebietsübergreifende Projektarbeiten im Team mit Problemstellungen aus der Wirtschaft weiterentwickelt werden. Derartige Formate zielen darauf ab, Methodenkompetenz an konkreten Aufgabenstellungen einzusetzen und Sozialkompetenzen zu trainieren. Gleichzeitig gilt es, mehr junge Menschen für Technikwissenschaften zu begeistern, um einem sich abzeichnenden Fachkräftemangel frühzeitig entgegenzuwirken. Hier ist nach neuen Wegen zu suchen, die zu einer sichtbaren Attraktivität der Systemgestaltung führen.

Nicht alle erforderlichen Kompetenzen können in der erforderlichen Reife ausschließlich durch das Studium vermittelt werden. Praktische Kenntnisse und Fähigkeiten müssen daher durch Weiterbildungen im Beruf vermittelt und erprobt werden. Die Weiterbildungsprogramme müssen sowohl der Dynamik neuer Technologien und Methoden gerecht werden als auch einen nachhaltigen Transfer von Erfahrungswissen ermöglichen. >

Engineering im internationalen Vergleich

Systems Engineering in Forschung und Lehre im internationalen Vergleich: Deutschland im Wettlauf mit USA und China.

Deutschland nimmt im europäischen Vergleich eine Vorreiterposition im Systems Engineering ein. Sowohl in der Lehre als auch in der Forschung gewinnt das Thema Systems Engineering weltweit zunehmend an Bedeutung. Die Durchdringung des Themenfeldes Systems Engineering ist zwar in den Lehrprogrammen der neun technischen Universitäten (TU9) in Deutschland sehr heterogen, dennoch bereits jetzt in den verschiedenen Fakultäten wiederzufinden. International werden die meisten Absolventen im Bereich Systems Engineering in den USA, China und Japan ausgebildet. Eine Vergleichbarkeit der Bildungslandschaften ist durch die vielfältigen Interpretationsmöglichkeiten der Lehrinhalte nicht gegeben.

Mit einem jährlichen Anstieg der wissenschaftlichen Veröffentlichungen von 8 % gewinnt das Systems Engineering zunehmend an Relevanz in der deutschen Forschungslandschaft. Im internationalen Vergleich weisen die USA und China die sowohl höchste Anzahl als auch die höchste Qualität von Publikationen, gemessen an der Anzahl der Zitationen auf. Dabei verzeichnet China mit etwa 30 % die höchste jährliche Wachstumsrate.

Advanced Engineering im internationalen Vergleich: Deutschland trotz Spitzenforschung weitläufig abgeschlagen.

Die Erhebung der Forschungskennzahlen im Bereich des Advanced Engineerings unterstreicht die Vormachtstellung der USA und China. Die USA sind führend bei der Anzahl der Veröffentlichungen in den Bereichen Kreativität und Agilität im Engineering. China dominiert das

Themengebiet Digitalisierung im Engineering. Deutschland ist hinsichtlich der Quantität von Veröffentlichungen in den Bereichen KI und Kreativität weit abgeschlagen, hat jedoch in den Bereichen PLM und Digitaler Zwilling eine führende Position.

Erste Ansätze Advanced Systems Engineering im internationalen Vergleich: Der Wandel der Wertschöpfung kann mit ASE wirkungsvoll begleitet werden.

Die Untersuchung zeigt eine besondere Zunahme der Veröffentlichungen in den kombinatorischen Betrachtungen der Themenfeldern KI und SE sowie Agilität und SE. Das bestätigt die Auffassung, dass wir mit KI und Agilität die richtigen Akzente setzen und sich die entsprechenden Nutzenpotentiale nur im Schulterschluss mit ASE schnell genug erschließen lassen. ●

1 Einleitung

Es zeichnet sich ein zunehmender Wandel der Marktleistungen von den früheren, mechanischen Produkten über mechatronische Lösungen hin zu intelligenten, cyberphysischen Systemen ab. Diese zukünftigen Advanced Systems werden von einem hohen Grad an dynamischer Vernetzung, Autonomie und interaktiver, soziotechnischer Integration geprägt sein.

Diese zukünftigen Systeme entstehen durch das enge Zusammenwirken von vielen Fachgebieten wie den Ingenieurwissenschaften, den Naturwissenschaften, der Informatik, Soziologie, Psychologie und Arbeitswissenschaft. Die zunehmende Einbindung und Vernetzung der Fachgebiete sowie die damit einhergehende, steigende Komplexität in Projekten und Unternehmen erfordern ein ganzheitliches und interdisziplinäres Systems Engineering.

Parallel zum Systems Engineering entwickeln sich kontinuierlich neue technische und arbeitsorganisatorische Trends im Engineering. Advanced Engineering berücksichtigt die Prozesse, Methoden und Werkzeuge sowie die Arbeitsorganisation, um die etablierten Engineering-Ansätze mit Kreativität, Agilität und Digitalisierung neu zu denken.

Advanced Systems Engineering (ASE) ist das Leitbild für die erfolgreiche Gestaltung von innovativen Produkten, Dienstleistungen und Produkt-Service-Systemen sowie deren Entstehungsprozess. Das Leitbild integriert die Ansätze des Systems Engineerings und des Advanced Engineerings für die erfolgreiche Gestaltung der Advanced Systems. Dabei berücksichtigt Advanced Systems Engineering

insbesondere die Auswirkungen der zunehmenden Digitalisierung, Interdisziplinarität und Vernetzung zur Beherrschung der technischen und organisatorischen Komplexität in der zukünftigen Wertschöpfung. Advanced Systems Engineering integriert systemorientierte und hochinnovative Ansätze des Engineerings und steht für eine neue Perspektive in der Planung, der Entwicklung und dem Betrieb der technischen Systeme von morgen.

Im Rahmen der vorliegenden Veröffentlichung wird der aktuelle Status quo des Engineerings in der Wirtschaft und Wissenschaft in Deutschland identifiziert und analysiert. Dazu wurden sowohl die Trends im Engineering als auch die aktuellen Herausforderungen und möglichen Lösungsansätze im Bereich Advanced Systems, Systems Engineering und Advanced Engineering qualitativ untersucht. Diese qualitative Untersuchung erfolgte im Rahmen einer Interviewreihe mit über 100 Interviewteilnehmern aus dem akademischen Umfeld und der industriellen Praxis. Zur ganzheitlichen Einordnung wurden die Ergebnisse im Hinblick auf Auswirkungen auf die Organisation und den Menschen im soziotechnischen Gesamtsystem untersucht. Abschließend wurde anhand einer quantitativen Kennzahlenerhebung in der Forschungslandschaft aufgezeigt, wie das Engineering in Deutschland im internationalen Vergleich aufgestellt ist. Die Ergebnisse sollen zum einen die Ableitung von strategischen Handlungsempfehlungen für die Umsetzung des Leitbilds Advanced Systems Engineering unterstützen. Zum anderen soll der Status quo eine fundierte Grundlage und einen Orientierungsrahmen für weitere Forschungsaktivitäten schaffen. >

Entstanden ist die Erhebung des Leistungsstands im Rahmen der Begleitforschung zum Forschungsprogramm »Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen« zum Thema »Beherrschung der Komplexität soziotechnischer Systeme – Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering für die Wertschöpfung von morgen (PDA_ASE)« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Leistungsstandserhebung liegt ausschließlich bei den Autoren. Ausschließlich aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit wird in dem Leistungsstand die maskuline Form verwendet. Wenn beispielweise von Ingenieuren gesprochen wird, sind damit selbstredend auch Ingenieurinnen gemeint.

An dieser Stelle möchten wir uns bei allen Partnern für Ihre Unterstützung bedanken. Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Finanzierung und Förderung dieses Projekts. Des Weiteren danken wir dem Projektträger Karlsruhe (PTKA) für die professionelle und hilfreiche Unterstützung. Ein besonderer Dank richtet sich an die vielen Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft, welche durch Ihre Bereitschaft die Erhebung erst ermöglicht haben und durch Ihre Offenheit die Sicherung der Innovationskraft deutscher Unternehmen unterstützen. Abschließend richtet sich ein großer Dank an den projektbegleitenden Expertenkreis für viele wegweisende Anmerkungen, Anregungen und Diskussionen.

Strukturierung des Leistungsstands

Kapitel 2 gibt eine Einführung in den Wandel der Wertschöpfung und gibt einen Überblick über die drei Handlungsfelder des Leitbilds Advanced Systems Engineering. Die drei Handlungsfelder umfassen die Advanced Systems (AS) als zukünftige Marktleistungen, das Systems Engineering (SE) und die innovativen Technologien und Methoden des Advanced Engineerings (AE).

Kapitel 3 beschreibt die Zielsetzung der Erhebung des Status quo im Engineering. Die verschiedenen Voruntersuchungen zeigen dabei den Forschungsbedarf auf.

Kapitel 4 stellt die Befunde der durchgeführten qualitativen Erhebung dar, in welcher der Status quo des Engineerings in Deutschland anhand der Handlungsfelder untersucht worden ist. Abschnitt 4.1 beschreibt die Megatrends, welche fundamentalen und dauerhaften Einfluss auf unser Engineering und unsere zukünftigen Marktleistungen haben. Die Abschnitte 4.2 bis 4.4 zeigen die Auswirkungen auf die drei Handlungsfelder Advanced Systems (Abschnitt 4.2), Systems Engineering (Abschnitt 4.3) sowie Advanced Engineering (Abschnitt 4.4) auf. Der letzte Abschnitt beschreibt die Auswirkungen auf die Organisation und den Menschen im soziotechnischen Gesamtsystem (Abschnitt 4.5).

Kapitel 5 umfasst die Erkenntnisse der quantitativen Untersuchung zum Status quo des Engineerings im internationalen Vergleich. In den Abschnitten 5.1 und 5.2 werden die Themenfelder Systems Engineering in der Forschung und Lehre sowie Advanced Engineering in der Forschung sowohl national als auch international untersucht. Abschließend erfolgt eine kombinatorische Betrachtung dieser beiden Themenfelder in Form eines kurzen Einblicks in das Advanced Systems Engineering (Abschnitt 5.3).

Kapitel 6 fasst die Inhalte des Status quo zusammen und leitet Schlussfolgerungen ab. Zudem wird ein Ausblick auf zukünftige Handlungsbedarfe gegeben.

Der Anhang in **Kapitel 7** umfasst ergänzende Informationen zu dem begleitenden Forschungsprojekt AdWiSE und den beteiligten Instituten. ●

2 Advanced Systems Engineering

Eine neue Perspektive für die Wertschöpfung von morgen

2.1 Wandel der Wertschöpfung

Megatrends wie Digitalisierung und Künstliche Intelligenz (KI) sowie der wachsende Druck einer neuen nachhaltigen Gestaltung der technischen Produkte und Systeme werden die Wertschöpfung von morgen entscheidend prägen [BUN16]. In der industriellen Produktion und Produktentwicklung wird die Digitalisierung beispielsweise durch das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 vorangetrieben. Die technische Grundlage von Industrie 4.0 bilden intelligente und digital-vernetzte Produkte, Dienstleistungen und Produktionssysteme. Die flexiblen Kombinationen von Sach- und Dienstleistungen sowie ein hoher Grad an Autonomie und Vernetzung charakterisieren die Systeme von morgen. Die ganzheitliche Gestaltung der Entstehung dieser technischen Systeme erfordert einen neuen Ansatz des zukünftigen Engineerings (VGL. INFOBOX 1). Für die Realisierung ist es wichtig, den aktuellen Leistungsstand des Engineerings aufzuzeigen und die sich abzeichnenden Trends für die zukünftige Wertschöpfung zu analysieren.

Traditionell verankert beschreibt die Wertschöpfung eine unternehmerische Aktivität, die zu einem Wertzuwachs führt [SCH13]. Die konventionelle, industrielle Wertschöpfungskette adressiert den gesamten Prozess von der Ideengenerierung bis hin zur Lieferung eines Produkts. Die ökologische Verantwortung und die steigende Relevanz der Nachhaltigkeit setzen zusätzlich eine Betrachtung der Rücknahme und Entsorgung im Rahmen des gesamten Produktlebenszyklus voraus. Damit umfasst die Wertschöpfungskette industrieller Produkte die folgenden

Aktivitäten: die Planung, Entwicklung und Validierung des Produkts; die Planung der Fertigung und die Beschaffung der Rohstoffe, Produktmaterialien und Komponenten; die eigentliche Herstellung und Produktion; den Vertrieb und Absatz; den Kundenservice während der Nutzung; die Rücknahme, Entsorgung und das Recycling zum Ende des Lebenszyklus eines Produkts.

INFO 1 Verständnis »Engineering«

Für den Begriff »Engineering« gibt es im Deutschen keine eindeutige Entsprechung. Das Engineering wird häufig mit der Produktentwicklung gleichgesetzt. Zutreffender wäre aber der Begriff der Produktentstehung, der zudem die strategische Produktplanung, die Produktionssystementwicklung als auch die eigentliche Herstellung umfasst.

Das Engineering ist eine Tätigkeit, bei der das wissenschaftliche und technische Verständnis genutzt wird, um Dinge zu erfinden, Systeme zu entwickeln und herzustellen sowie Probleme zu lösen. Systeme umfassen technische Lösungen wie Maschinen und Anlagen aber auch Gebäude, Infrastrukturen, Prozesse und Verfahren. Vor dem Hintergrund einer steigenden Verbreitung intelligenter, vernetzter und hochintegrierter Produkt-Service-Systeme gewinnen das Software- und Service-Engineering zunehmend an Relevanz. >

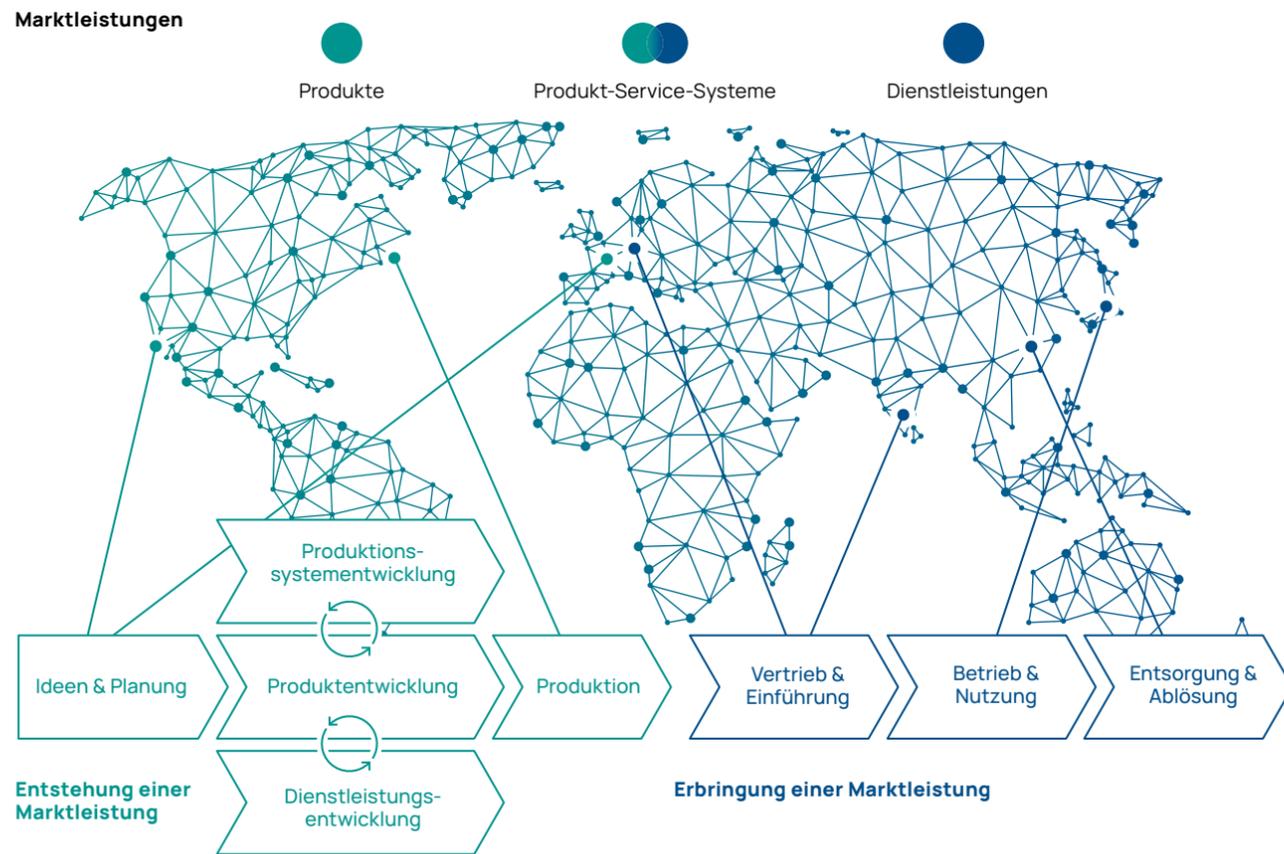


Bild 1: Aspekte des Wandels der Wertschöpfung

Zukünftig findet die Wertschöpfung nicht mehr ausschließlich in überwiegend geschlossenen Wertschöpfungsketten statt, sondern basiert auch auf offenen, kollaborativen und dezentralen Wertschöpfungsnetzwerken. Digitale Technologien agieren als Treiber und Befähiger dieses Wandels [RMW18]. Der digitale Wandel der Wertschöpfung resultiert in neuen Formen von Partnerschaften, Organisationen und Geschäftsmodellen,

- einer zunehmenden Auflösung traditioneller Branchengrenzen
- sowie innovativen Leistungsangeboten, welche sich nicht mehr eindeutig dem produzierenden Gewerbe oder dem Dienstleistungssektor zuordnen lassen.

Innovative Produkte, Dienstleistungen und Produkt-Service-Systeme sind dabei für den Unternehmenserfolg der deutschen Industrie von entscheidender Bedeutung und haben folglich einen herausragenden Stellenwert im Rahmen der Wertschöpfung von morgen. Die besondere Relevanz der Wertschöpfung durch Innovation wird durch die Innovationskennzahlen der deutschen Industrie verdeutlicht [RBD+17; DBF+17] und durch Deutschlands Position als innovativstem Land im internationalen Vergleich hervorgehoben. Der Innovationsbegriff wird im Folgenden durch die drei Aspekte Marktleistung, Invention in der Entstehung und deren wirtschaftliche Erbringung charakterisiert [AHW+18], welche entsprechend der Wertschöpfung einem kontinuierlichen Wandel unterliegen (s. Bild 1):

Marktleistung: Die zu erbringende Marktleistung sind Produkte (Sachleistungen) und Dienstleistungen, welche dem Anbieter, Kunden und Anwender einen validierten Nutzen

stiften. In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass die integrative Betrachtung von Produkt-Service-Systemen und der Digitalisierung der Marktleistungen zusätzlichen Kundennutzen generieren kann. Es entstehen derzeit vermehrt digitale Marktleistungen in Ergänzung oder gar in Substitution zu den bisherigen Marktleistungen, welche auf neuen, unternehmerischen Ansätzen und Geschäftsmodellen basieren (z. B. die Plattformökonomie) [DFH+19]. In einer digitalen Ökonomie nimmt die Bedeutung von Daten, Algorithmen und virtuellen Modellen zu [PH14]. Daher wird ein zunehmender Anteil der zukünftigen Produkteigenschaften und Funktionalitäten durch mechatronische Lösungen und Software realisiert oder zumindest ergänzt. Neben dem zunehmenden Softwareanteil erfordern Produkt-Service-Systeme eine integrierte Planung, Entwicklung und Nutzung von Sach- und Dienstleistungsanteilen, einschließlich ihrer Produktion und immanenten Softwarekomponenten. Die beschriebenen Entwicklungen stellen enorme Anforderungen an den Entstehungsprozess zukünftiger Marktleistungen.

Invention: Der zukünftige Wandel der Marktleistungen erfordert eine kontinuierliche Umsetzung von neuen Ideen in Produkte, Dienstleistungen oder Produktionsprozesse. Die erfolgreiche Umsetzung bedingt gleichzeitig technische oder organisatorische Neuheiten in den Aktivitäten der strategischen Planung, Produktentwicklung, Dienstleistungsentwicklung und Produktionssystementwicklung [MS14]. Dabei ist der Entstehungsprozess von der Idee für eine neue Marktleistung bis zu dessen Herstellung durch eine zunehmende und standortübergreifende Vernetzung verschiedenster Akteure, Stakeholder, Abteilungen und Unternehmen geprägt. Die Marktleistungen von morgen werden mehr denn je auf das Zusammenwirken von unterschiedlichen Fachgebieten wie Ingenieurwissenschaften, Informatik, Soziologie, Arbeits- und Wirtschaftswissenschaften sowie Betriebswirtschaft beruhen. Neben der steigenden Interdisziplinarität und Vernetzung werden die einzelnen Aktivitäten der Marktleistungsentstehung zunehmend durch Informations- und Kommunikationstechnologien unterstützt. Vor diesem Hintergrund ist eine neue Herangehensweise in der Marktleistungsentstehung erforderlich, welche sowohl den zunehmenden Einfluss der Digitalisierung als auch die wechselseitigen Abhängigkeiten innerhalb der Aktivitäten und zwischen den Wertschöpfungspartnern berücksichtigt.

Wirtschaftliche Erbringung: Entsprechend der Entstehung erfolgt die Erbringung der Marktleistungen zunehmend auf global verteilten und vernetzten Märkten. Dabei bietet der globale Vertrieb einerseits attraktives Potential, neue Märkte zu erschließen. Andererseits stellen die länderspezifischen Normen, Regeln und Verordnungen zur Zulassung einer Marktleistung eine enorme Herausforderung in der Entstehung dar [SCH13; ROG03; AHW+18]. Gleichzeitig wandeln sich die Konsumformen sowie das Verständnis von Besitz und Eigentum. Branchenübergreifend entstehen Plattformen, durch die verschiedene Anbieter und Wertschöpfungspartner gemeinsame Eigentümer einer Marktleistung werden können. Bei Sharing-Modellen erfolgt die vorübergehende Nutzung der Marktleistung ohne Eigentumserwerb, wodurch sich die Nutzungsphasen bei einem einzelnen Kunden verkürzen. Des Weiteren müssen Unternehmen beachten, dass sich vernetzte Produkte auch noch nach dem Verkauf verändern und weiterentwickeln können. Es besteht die Notwendigkeit, die genannten Aspekte bei der Entstehung zu berücksichtigen, um sowohl den digitalen als auch den physischen Lebenszyklus einer Marktleistung zu gestalten.

Vor dem Hintergrund dieses Wandels müssen Unternehmen befähigt werden, sowohl innovative Marktleistungen als auch deren zukünftigen Entstehungsprozess wirtschaftlich und effizient zu gestalten. Dabei werden die zunehmende Vernetzung und die umfassende Digitalisierung in der Produktion bereits im Rahmen des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 beleuchtet. Mit Blick auf vorgelagerten Aktivitäten der Entstehungsphase ergibt sich die grundlegende Fragestellung, wie ein neues Leitbild für die Forschung, Entwicklung und Planung gestaltet werden muss, um Deutschlands Innovationsfähigkeit im globalen Wettbewerb zu verstetigen. Als initialer Schritt bei der Ausgestaltung dieses Leitbilds werden der aktuelle Status quo und die sich abzeichnenden Trends des Engineerings im Rahmen dieser Veröffentlichung untersucht. Die Untersuchung erfolgt anhand einzelner Handlungsfelder. Dazu wurde zunächst der Untersuchungsgegenstand Advanced Systems Engineerings strukturiert (VGL. ABSCHNITT 2.2). Diese Strukturierung führt die verschiedenen Aspekte des zukünftigen Engineerings in einer gemeinsamen Perspektive auf das Leitbild zusammen. ●

2.2 Die drei Handlungsfelder des Advanced Systems Engineerings

Der beschriebene Wandel der Wertschöpfung von morgen erfordert eine ganzheitliche Betrachtung mittels des neuen Leitbilds des Advanced Systems Engineerings (ASE), welches auf den drei Handlungsfeldern Advanced Systems, Systems Engineering und Advanced Engineering aufbaut (VGL. BILD 2).

Advanced Systems

Marktleistungen von morgen

Die Digitalisierung treibt seit Jahren die technologische Entwicklung in der industriellen Wertschöpfung voran. Es zeichnet sich ein Wandel von den früheren Mechanik-zentrierten Systemen über mechatronische Systeme hin zu intelligenten, cyber-physischen Systemen ab. Diese zukünftigen Systeme werden von einem hohen Grad an dynamischer Vernetzung, Autonomie und interaktiver, soziotechnischer Integration geprägt sein. Hinzu kommen ein zunehmendes Angebot von internet- und plattformbasierten Diensten und die Verfügbarkeit von großen Datenmengen, aus denen sich erfolgversprechende Möglichkeiten für innovative und datengetriebene Dienstleistungen (Smart Services), Produkt-Service-Systeme und attraktive Geschäftsmodelle ergeben [GDE+18]. Einhergehend mit diesen Potentialen wird die Individualisierung der Systeme aus der Perspektive der Kunden und Anwender zunehmen. Die Vernetzung von

Produkten, Dienstleistungen und Produktionssystemen ermöglicht zukünftig neue Informationsflüsse zwischen Anbieter und Kunden, um z. B. eine individualisierte Massenfertigung wirtschaftlich zu gestalten [PIL07].

Dieser Wandel von traditionellen Sach- oder Dienstleistungen zu Advanced Systems wird das zukünftige Verständnis der Marktleistungen entscheidend prägen. Mit der skizzierten Entwicklung geht einher, dass sowohl die Systeme als auch die Planungs- und Entwicklungsaktivitäten komplexer werden. Dies resultiert in dem dringenden Bedarf, neue Ansätze für die Gestaltung der Marktleistungen und dessen Entstehungsprozess zu erforschen [GDE+18; DEU18].

Systems Engineering Komplexität managen

Heutige und zukünftige Systeme entstehen durch das enge Zusammenwirken vieler Disziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik. Kein Fachgebiet kann für sich in Anspruch nehmen, allen Anforderungen der zukünftigen Marktleistungsentstehung gerecht zu werden. Es ist eine neue Denk- und Handlungsweise erforderlich, welche die interdisziplinäre Arbeit am System in den Mittelpunkt stellt, die Interaktion mit den Stakeholdern fördert und das in Entstehung befindliche System für die Anwender

erlebbar macht. Systems Engineering hat das Potential, die Gestaltung der soziotechnischen Engineering-Systeme von morgen auf eine neue Basis zu stellen [DEU18].

Systems Engineering erhebt somit den Anspruch, die Akteure in der Entwicklung komplexer Systeme zu koordinieren. Der durchgängige, ganzheitliche und fachgebietsübergreifende Ansatz adressiert dabei das zu entwickelnde, technische System und das dazugehörige Projekt. Über die zentralen Aufgaben in der Marktleistungsentstehung hinaus berücksichtigt Systems Engineering die wechselseitigen Abhängigkeiten dieser Tätigkeiten bis in das sozioökonomische Umfeld einer gesamten Branche. Um sicher das Entwicklungsziel zu erreichen, umfasst die Projektgestaltung die Abstimmung der Aktivitäten unter Berücksichtigung der gegebenen Restriktionen hinsichtlich Ressourcen, Zeit, Kosten und Qualität. Je höher die Anzahl der Stakeholder in der Entwicklung ist, desto komplexer wird diese Aufgabe. Systems Engineering fokussiert die Einbindung und Vernetzung weiterer Disziplinen, wie z. B. Soziologie und Psychologie, sowie die damit einhergehende, steigende Komplexität der Lösungen im konkreten Entwicklungsprojekt und Unternehmen [GDS13].

Die Bedeutung der formalisierten Modellbildung im Systems Engineering steigt kontinuierlich. Im Fokus des Bedarfs für ein modellbasiertes Systems Engineering (MBSE) steht der Gedanke, die Systeme mithilfe von Modellen zu beschreiben, zu verstehen und zu planen. MBSE hat das Potential, die Dokumenten-basierte Abbildung von Informationen über ein zu entwickelndes System sukzessiv zu ersetzen und die zukünftige Praxis des Systems Engineerings maßgeblich zu beeinflussen [WRF+15]. Die Realisierung der MBSE-Idee im wirtschaftlichen Kontext steckt aber noch in den Anfängen. Zur Erschließung dieser Potentiale sind umfangreiche Forschungsaktivitäten erforderlich.

Advanced Engineering Engineering neu denken

Parallel zum Systems Engineering entwickeln sich kontinuierlich neue Ansätze im Engineering, welche die einzelnen Aspekte und Aktivitäten der Marktleistungsentstehung maßgeblich beeinflussen. Diese Ansätze beruhen nicht ausschließlich auf Innovationen der IT-Werkzeuge, sondern

machen Gebrauch von aktuellen Erkenntnissen in und zwischen den ingenieur- und wirtschaftswissenschaftlichen sowie informationstechnologischen Disziplinen. Diese grundlegenden Veränderungen im Engineering werden unter dem Begriff Advanced Engineering zusammengefasst. Advanced Engineering berücksichtigt die Prozesse, Methoden und Werkzeuge sowie die Arbeitsorganisation, um die etablierten Engineering-Ansätze durch Kreativität, Agilität und Digitalisierung zu erweitern.

Das Engineering ist in weiten Zügen eine kreative Tätigkeit des Menschen, die nicht von regelbasierten IT-Werkzeugen oder Maschinen geleistet werden kann. Die zukünftigen Systeme erfordern neue Methoden, Modelle und Techniken zur Förderung der Kreativität in interdisziplinären Teams, um eine gemeinsame Sprache zu entwickeln, neue Lösungen zu finden und Potential für Innovationen zu fördern. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass das Wissen der Spezialisten aus den notwendigen Fachgebieten durch völlig neue Ansätze der Kommunikation und Interaktion zusammengeführt werden muss.

Agile Prinzipien und Methoden werden zunehmend auch in Abteilungen und Teams außerhalb der IT und Softwareentwicklung implementiert. Die entsprechenden Vorgehensmodelle und Aufbauorganisationen können jedoch nicht ohne Anpassungen auf komplexe, mechatronische Systeme übertragen werden. Durch den zunehmenden Anteil nicht-mechanischer Komponenten wie Software und Dienstleistungen wird jedoch eine ganzheitliche, agile Transformation der Arbeitsweisen erforderlich, um z. B. flexibel und proaktiv mit veränderlichen Anforderungen umgehen zu können. Neben den menschenorientierten Aspekten werden sich zukünftig ebenfalls der Umfang und die Ausgestaltung der Engineering-Prozesse und -Organisation weiterhin stetig verändern.

Die strategische Planung und Entwicklung des Produkts, der Dienstleistung und des Produktionssystems sind zunehmend vernetzt und müssen zukünftig mehr denn je integrativ durch IT-Werkzeuge und die IT-Infrastruktur unterstützt werden. Geeignete Virtualisierungen und digitale Technologien bilden zukünftig die Basis für eine eindeutige Beschreibung und ganzheitliche Vernetzung sämtlicher Entwicklungsobjekte und -aspekte sowie ein kollaboratives Engineering über global verteilte

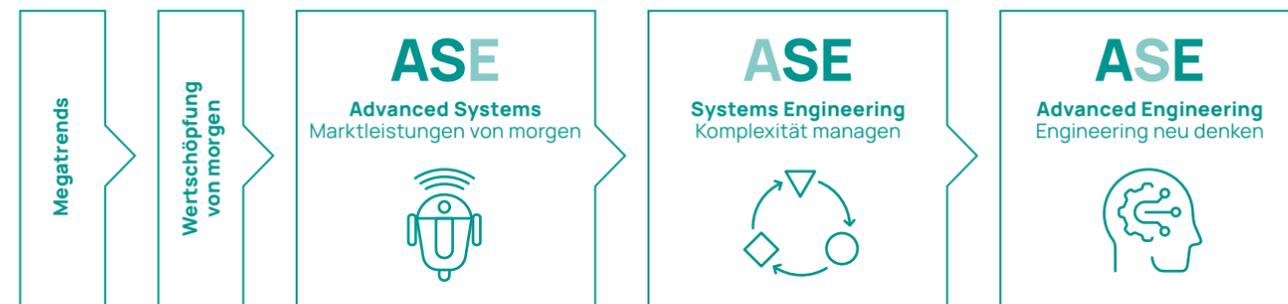
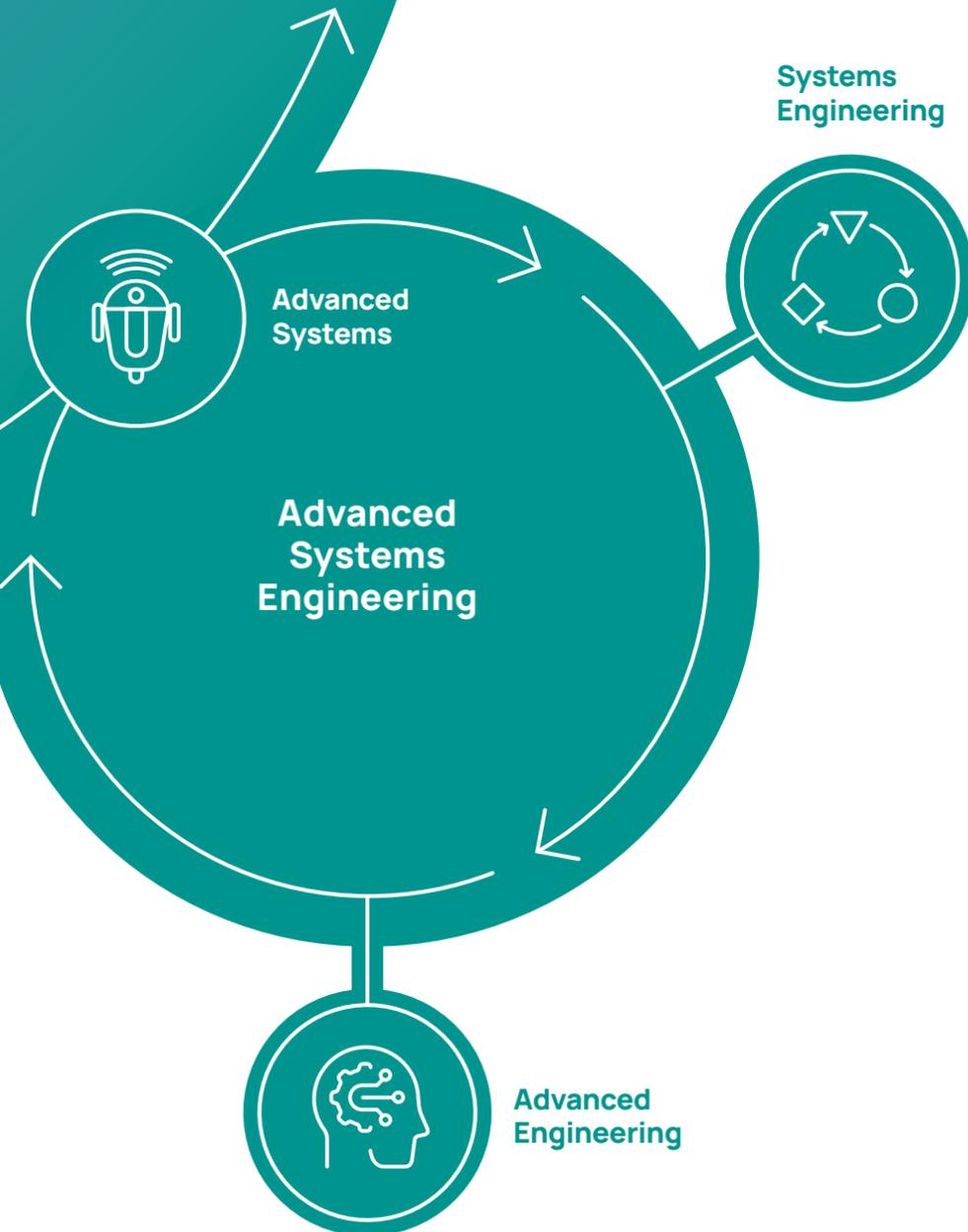


Bild 2: Handlungsfelder des Advanced Systems Engineerings

Wertschöpfung von morgen als soziotechnisches Gesamtsystem



Advanced Systems

-  **Autonome Systeme**
-  **Interaktive soziotechnische Systeme**
-  **Dynamisch vernetzte Systeme**
-  **Produkt-Service-Systeme**

Systems Engineering

-  **Technisches System**
-  **Projekt**
-  **Unternehmen**

Advanced Engineering

-  **Kreativität**
-  **Agilität**
-  **Digitalisierung**

Standorte, Unternehmensgrenzen und Systemgenerationen hinweg. Dabei werden z. B. die zunehmende Integration von KI und die Nutzung von Digitalen Zwillingen eine Vielzahl von Engineering-Prozessen entscheidend verändern [SD19].

Advanced Systems Engineering

Das Zusammenwirken und die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen den Handlungsfeldern Advanced Systems, Systems Engineering und Advanced Engineering erfordern ein Überdenken der Arbeitsweise der Unternehmen und eine Neudefinition der Interaktion zwischen Mensch, Organisation und Technik. Advanced Systems Engineering hat das Ziel, die vielfältigen Aspekte des Systems Engineerings und Advanced Engineerings zu integrieren und eine fundierte Basis für die Entstehung und Erbringung der Advanced Systems als innovative Marktleistungen zu bilden (VGL. BILD 3).

Vor diesem Hintergrund ist Advanced Systems Engineering das Leitbild für die erfolgreiche Gestaltung von innovativen Marktleistungen und deren Entstehung. Das Leitbild berücksichtigt insbesondere die Auswirkungen der zunehmenden Digitalisierung, Interdisziplinarität und Vernetzung zur Beherrschung der technischen und organisatorischen Komplexität im zukünftigen Engineering. Advanced Systems Engineering steht damit für eine neue Perspektive in der Planung, der Entwicklung und dem Betrieb von komplexen Systemen. Das Leitbild verspricht einen starken Impuls für Wertschöpfung, Wohlstand und Beschäftigung, indem es Unternehmen bei der notwendigen Transformation ihrer Wertschöpfung hin zu Advanced Systems unterstützen wird.

Das Leitbild schafft einen Handlungsrahmen für interdisziplinäre Ansätze und die Gesamtheit der Denkprinzipien, Methoden und Verfahrensweisen für das ganzheitliche Engineering von innovativen Advanced Systems. Die Umsetzung des Leitbilds wird einen entscheidenden Beitrag für die Wertschöpfung von morgen leisten, indem es die effiziente Entstehung und erfolgreiche Erbringung der zukünftigen Marktleistungen im Kontext des soziotechnischen Gesamtsystems adressiert. ●

2.3 Anwendungsszenarien des Advanced Systems Engineerings

Das zu erforschende Leitbild des Advanced Systems Engineering adressiert die Herausforderungen des Wandels der Wertschöpfung. Um als Industriestandort Deutschland weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben, muss das Engineering weiterentwickelt werden. Die folgenden, beispielhaften Anwendungsszenarien sollen anschaulich darstellen, wie das zukünftige Advanced Systems Engineering möglichen Herausforderungen begegnen kann.

Anwendungsszenario 1 – Mobilitätssysteme Gemeinsam modellbasiert entwickeln

In Zukunft werden autonome Fahrzeuge als hoch automatisierte, technische Systeme im Mobilitätssystem im Wechselspiel mit konventionellen und damit nicht automatisierten Fahrzeugen, aber auch in Interaktion mit weiteren Elementen, wie z.B. Infrastruktursystemen, ein komplexes System of Systems (SoS) bilden. Entscheidungsverantwortlichkeiten werden zukünftig vermehrt in der Autonomie und Künstlichen Intelligenz liegen. Zur Beherrschung dieser Wechselwirkungen werden zwingend ganzheitliche Ansätze im Fokus der Entwicklungsprozesse essentiell. Hieraus folgt ein sehr komplexer und komplizierter Anforderungsraum, der nicht allein eine einfache technische Lösung zur Folge haben kann. Vielmehr müssen durch die geschickte Kombination unterschiedlicher Technologien die bestmöglichen Nutzen-Wirkungsverhältnisse für die individuellen Anforderungen geschaffen werden.

Viele Teilsysteme des Mobilitätssystems von morgen werden in der Praxis von einer Vielzahl verschiedener, auch mittelständischer, Zulieferunternehmen produziert. Um die Komplexität der Entwicklung von Fahrzeugen, die solch diverse Anforderungen erfüllen, handhaben zu können, ist das Zusammenspiel vieler verschiedener Disziplinen notwendig. Unter anderem ist hierfür das Fachwissen von Maschinenbauern, Elektrotechnikern, Mechatronikern, Informatikern, Verkehrswissenschaftlern, Bauingenieuren, Architekten, Juristen und vielen weiteren erforderlich. Dies stellt alle Unternehmen, insbesondere auch mittelständische Zulieferer, vor große Herausforderungen.

Um die verschiedenen Teilsysteme zu integrieren und die Komplexität der z. B. Mobilitätssysteme managen zu können, muss die gesamte Entwicklung auf systemtheoretischen, modellbasierten Ansätzen sowie einer gemeinsamen Kommunikationsbasis fußen. Eine besondere Herausforderung ist dabei die große Spannbreite von Entwicklungs- und Realisierungszyklen von wenigen Wochen in der Software, über 3 bis 4 Jahre in der Fahrzeugentwicklung bis hin zu 10 und mehr Jahren in der Infrastruktur. Ebenso stellt die Absicherung der Mobilitätssysteme die Unternehmen für ungelöste Problemstellungen. Hier ist klar, dass die heutigen Methoden und Prozessen dies nicht abbilden können, da die benötigten Versuchszeiten in der Größenordnung von 100 und mehr Jahren liegen würden.

Anwendungsszenario 2 – Produkt-Service-Systeme Potentiale der Agilität und frühe Validierung nutzen

Industrie 4.0 und das Internet der Dinge (IoT) ermöglichen zunehmend dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelle im Maschinen- und Anlagenbau. Statt Maschinen zum Festpreis zu verkaufen, werden die Bereitstellung und Nutzung abgerechnet. Die Kunden profitieren von einer höheren Flexibilität, einer garantierten Leistung der Maschine und einer Reduzierung der Kapitalbindung sowie des Ausfallrisikos. Dabei stellt die Erweiterung bestehender Maschinen- und Anlagen um die erforderliche IoT-Technologie lediglich eine technische Hürde dar. Die Neuausrichtung zu Machines-as-a-Service bedingt jedoch vollkommen neue Geschäftsmodelle und Strategien. Die Gestaltung der damit verbundenen Abrechnungs- und Vertriebsmodellen, Serviceverträgen sowie die zunehmende Relevanz der Dienstleistungsentwicklung erfordert ein unternehmensweites Umdenken und einen Wandel der Wertschöpfungskette.

Bei diesem Wandel müssen die Interaktion verschiedener Disziplinen, eine frühere Integration der Kunden und Anwender in die Produktentstehungsprozesse und die kontinuierliche Absicherung von Entwicklungsergebnissen im Vordergrund stehen. Dies erfordert eine gezielte Flexibilisierung der bestehenden Produktentstehungsprozesse ohne die etablierten Strukturen im unternehmensinternen Innovationsökosystem vollends fallen zu lassen. Die Produkte müssen in kurzen Entwicklungszyklen agil mit Kunden, Anwendern und Anbieter weiterentwickelt und abgesichert werden. Zur frühen und kontinuierlichen Absicherung der identifizierten Nutzenbündel werden die entstehenden Entwicklungsgenerationen in zweckmäßigen Validierungs-Umgebungen erprobt. Hierdurch lassen sich bereits frühzeitig emergente Effekte im Systemverhalten erkennen und eine ganzheitliche Perspektive auf die Analyse des in der Entwicklung befindlichen Produkt-Service-Systems gewinnen. Das situations- und bedarfsgerechte Kombinieren flexibler (bspw. Sprints) und strukturierender Prozesselemente (z.B. Meilensteine oder bei späteren Reifegraden Freigabeprozesse) muss hierbei neben der tiefen Domänenkompetenz zu den Kernkompetenzen der Systementwickler gehören. Dabei ist die zukünftige, enorme Breite der benötigten Disziplin – vom Maschinenbau, der Elektrotechnik, der Informatik über das Marketing, den Einkauf bis hin zum juristischen- und gesellschaftlichen Fachwissen – mit zu denken.

3 Voruntersuchungen und Zielsetzung

In den vergangenen Jahren wurde eine Vielzahl von Studien veröffentlicht, welche den Forschungsbedarf in den einzelnen Handlungsfeldern des Advanced Systems Engineerings untersuchen. Der Fokus der bestehenden Vorarbeiten liegt dabei vorwiegend auf der isolierten Betrachtung einzelner Themengebiete. Die Erhebungsmethode des vorliegenden Status quo baut auf den Ergebnissen der Vorarbeiten auf, um dadurch das Themenfeld Advanced Systems Engineering umfassend untersuchen zu können. Ein Auszug der bisherigen Vorarbeiten schließt sich im Folgenden an:

2012 **acatech DISKUSSION** Smart Engineering

Die acatech dokumentierte bereits 2012 einen grundlegenden Handlungsbedarf beim Engineering im Umfeld von Industrie 4.0. Dieser resultierte aus der zunehmenden Integration von Informations- und Kommunikationstechnik in den Produktentwicklungsprozess und in die Produkte selbst. Aufgrund dieser Entwicklung zeichnete sich die Notwendigkeit einer verstärkt vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung ab. Diese sollte insbesondere alle relevanten Fachdisziplinen in die Entwicklung einbeziehen und disziplinübergreifend geschehen.

IPEK – Institut für Produktentwicklung Advanced Systems Engineering – Towards a model-based and human-centered methodology:

Die Vorarbeiten des Advanced Systems Engineerings reichen bis in das Jahr 2012 zurück. Die Intention der wissenschaftlichen Publikation war es, die Idee des Advanced Systems Engineerings als eine modellbasierte und menschenzentrierte Methodik auf Basis des Systems Engineerings vorzustellen. Die Publikation hat erste Konzepte des Advanced Systems Engineerings eingeführt und ausgewählte Forschungsaktivitäten in der Entwurfsmethodik reflektiert.

IPEK – Institut für Produktentwicklung, **Heinz Nixdorf Institut** Von der fachdisziplinenorientierten Produktentwicklung zur vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung:

2012 wurden zukünftige Forschungsbedarfe und Forschungsansätze als Voraussetzung für den nachhaltigen Innovationserfolg beschrieben. Als Basis für den zukünftigen Innovationserfolg wurde eine vorausschauende und systemorientierte Produktentstehung erkannt. Als Tätigkeitsfelder wurden die integrative Betrachtung von Produktentwicklung, Produktionssystementwicklung und strategischer Produktplanung sowie personen- und organisationsübergreifendes Wissensmanagement identifiziert. ➤

2013 **Fraunhofer IAO**
Arbeit der Zukunft

2013 untersuchte das Fraunhofer IAO im Rahmen der Studie »Arbeit der Zukunft« unter anderem die Auswirkungen der Digitalisierung auf die Arbeitsgestaltung. Eine zentrale Erkenntnis war, dass Mitarbeiter und Teams in neuen Formen der Mensch-Technik-Kollaboration mindestens zu gleichberechtigten, eher aber zu führenden Entscheidungsinstanzen innerhalb eines cyberphysischen Systems (CPS) gemacht werden müssen. Die Mensch-Technik-Arbeitsteilung muss so gestaltet werden, dass durch Kollaboration im soziotechnischen System schneller bessere Entscheidungen getroffen werden. Innovative Lösungen der Arbeitsgestaltung, der arbeitsorientierten Qualifizierung und der sozio-technologischen Führung helfen dabei.

Heinz Nixdorf Institut, Fraunhofer Projektgruppe Entwurfstechnik Mechatronik
Auf dem Weg zu intelligenten technischen Systemen (it's OWL)

Der Wandel von früheren Produkten über mechatronische Lösungen hin zu Advanced Systems wurde bereits im Jahr 2013 durch wissenschaftliche Publikationen antizipiert. Zu diesem Zeitpunkt wurde das Advanced Systems Engineering als Lösungsansatz für den Entwurf dieser intelligenten technischen Systeme prognostiziert. Es wurde als der Schlüssel zur Komplexitätsbeherrschung der Produktentstehung im Sinne eines vernetzten soziotechnischen Systems vorgestellt.

Heinz Nixdorf Institut, Fraunhofer IEM, Unity Systems Engineering in der industriellen Praxis

Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass die Verbreitung von SE im deutschsprachigen Raum stark branchenabhängig ist. So ist Systems Engineering z. B. in der Luft- und Raumfahrttechnik schon fest etabliert. In der Fahrzeugindustrie wird SE als Befähiger gesehen, gewinnt zunehmend an Bedeutung und wird von den OEM vorangetrieben. Die Studie zeigte aber auch, dass in der Breite, insbesondere dem in Deutschland stark mittelständisch geprägten Maschinen- und Anlagenbau, Systems Engineering trotz seiner hohen Bedeutung noch nicht eingesetzt wird.

2014 **acatech POSITION**
Resilience-by-Design: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen

Resilienz ist die Fähigkeit, tatsächlich oder potentiell widrige Ereignisse abzuwehren, sich darauf vorzubereiten, sie einzukalkulieren, sich davon zu erholen und sich ihnen immer erfolgreicher anzupassen. Die acatech Position zeigt, dass u. a. Länder wie die USA, Großbritannien und die Schweiz in der konkreten Umsetzung des Resilienzkonzepts Deutschland einige Schritte voraus sind. Auch hierzulande müssen in Zukunft Resilienzstrategien in Regierungsprogramme aufgenommen werden.

2016 **acatech STUDIE**
Engineering im Umfeld von Industrie 4.0

Zentrale Erkenntnis der Studie »Engineering im Umfeld von Industrie 4.0« ist die zentrale und zunehmende Bedeutung des Engineerings innerhalb der Industrie 4.0. Es wird außerdem der Bedarf neuer Herangehensweisen im Engineering über die Produktentwicklung hinaus bestätigt. Die Ergebnisse zeigten außerdem die Notwendigkeit zur Anpassung bestehender Methoden und der Entwicklung entsprechender IT-Werkzeuge sowie des Veränderungsbedarfs in den Organisationsstrukturen. Ferner thematisierte die Studie zukünftig erforderliche Kompetenzen im Engineering.

Heinz Nixdorf Institut, WZL RWTH Aachen, acatech Industrie 4.0
Internationaler Benchmark, Zukunftsoptionen und Handlungsempfehlungen für die Produktionsforschung

Industrie 4.0 eröffnet neue Perspektiven für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Um als Leitmarkt und Leitanbieter zu agieren, besitzt Deutschland beste Voraussetzungen. Allerdings fehlt es in Deutschland an einer breiten Kompetenzbasis im Bereich der Internettechnologien und innovativer Geschäftsmodelle. Die Studie entwickelte 44 Handlungsempfehlungen wie u. a. »Akzeptanz von Industrie 4.0 fördern«, »Innovationssystem verbessern« oder »Kollaboration ermöglichen«.

2017 **Bitkom Research, Autodesk GmbH**
Digital Engineering

Untersuchungsgegenstand der Studie war die Innovationsfähigkeit der deutschen Industrie. Hier galt es, Maßnahmen zu identifizieren, um die Wettbewerbsfähigkeit durch Produkt- und Prozessinnovationen angesichts sinkender Margen durch digitale Wertschöpfungs- und Geschäftsmodelle gewährleisten zu können. Im Allgemeinen zeigt die Studie, dass die Durchdringung der deutschen Industrie mit digitalen Technologien bereits weit fortgeschritten ist. Digitale Technologien werden genutzt, um die Produktentwicklung zu beschleunigen, Fertigungsprozesse zu optimieren oder die Anpassungsfähigkeit von Organisation zu erhöhen.



2018 **Plattform Industrie 4.0 STUDIE**
Engineering smarter Produkte und Services

Die Studie »Engineering smarter Produkte und Services« identifizierte operative Forschungsbedarfe für das Engineering smarter Produkte und Services. Im Allgemeinen werden die Innovations- und Geschäftspotentiale des Engineerings smarter Produkte innerhalb von Industrie 4.0 zunehmend erkannt. Die Forschungsbedarfe richteten sich u. a. an die Entwicklung neuer Vorgehensmodelle und Methoden, die z. B. agile Methodenfragmente integrieren, eine Detaillierung der verschiedenen Phasen des bestehenden V-Vorgehensmodells sowie an die Entwicklung von Verbesserungsmaßnahmen für das Produktdaten- und Prozessmanagement.

Fachhochschule des Mittelstands (FHM)
SMeART Learning and business consultant
needs of Europe's SMEs in Smart Engineering

Die Studie »Learning and Business Consultant needs of Europe's SMEs in Smart Engineering« befasste sich mit der Frage, wie KMU in Europa ihre Strukturen, Organisationen und Prozesse anpassen müssen, um in der immer smarter werdenden Industrie mithalten zu können. Die Befragung einer Vielzahl europäischer KMU ergab, dass nur ein kleiner Teil der Befragten ihr Unternehmen als ein gutes Beispiel für »Smart Industry« sieht. Die meistgenannten Probleme liegen hier bei der Datenspeicherung und -erhebung sowie rechtlichen und vertraglichen Hürden. Gelöst werden können diese Probleme mit Agilität, denn aufgrund der geringen Größe von KMU fällt es ihnen oft leichter, ihre Geschäftsmodelle sowie Strategie anzupassen und sind damit flexibler als große Unternehmen.

2019 **Fraunhofer IPK, Contact Software, VDI**
Smart Industrial Products

Die Studie zeigt, dass sich bereits rund 90 % der Befragten mit smarten Produkten beschäftigen. Durch die Integration von smarten Produkten in das Produktportfolio erwarten diese ein Wachstum des Angebotsportfolios sowie als vorrangiges Ziel eine Umsatzsteigerung. Die für diese Entwicklung notwendigen Kompetenzen sind nur in wenigen Fällen schon durch einzelne Unternehmen abbildbar. Gleichzeitig zeigen sich bei der Adaption der Geschäftsmodelle sowie der Umsetzung der notwendigen IT-Infrastruktur Schwächen, die für eine erfolgreiche Einführung von smarten Produkten behoben werden müssen.

Begleitforschung PAiCE
Kollaboratives Engineering

Im Rahmen der Studie wurden Herausforderungen des kollaborativen Engineerings in den Bereichen Technik, Arbeitsorganisation, Ökonomie und Recht identifiziert und analysiert. Die Voraussetzungen und Erfolgsfaktoren des kollaborativen Engineerings sind aber noch weitgehend unbekannt. Erfahrungen im kollaborativen Arbeiten bestehen gegenwärtig vor allem im Bereich Forschung und Entwicklung, also im vorwettbewerblichen Bereich.

Aufbauend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen der Vorarbeiten in den einzelnen Handlungsfeldern des Advanced Systems Engineerings wurde eine ganzheitliche Betrachtung jener als Zielsetzung dieser Leistungsstandserhebung des Engineerings festgelegt. Diese Notwendigkeit wird durch die vorangegangenen Arbeiten unterstrichen. Für eine ganzheitliche Betrachtung wurden zum einen qualitative Interviews mit Teilnehmern aus Wirtschaft und Wissenschaft durchgeführt, um ein tieferes Verständnis über bestehende Herausforderungen und mögliche Lösungsansätze innerhalb der Handlungsfelder zu gewinnen (VGL. KAPITEL 4). Zum anderen wurde mittels quantitativer Kennzahlenerhebung der Leistungsstand der Handlungsfelder in der internationalen Forschung und Lehre ausgewertet (VGL. KAPITEL 5). Durch die Kombination der zwei Ansätze schafft der vorliegende Status quo eine fundierte Grundlage für die Ableitung von strategischen Handlungsempfehlungen zur Umsetzung des Leitbilds Advanced Systems Engineerings. ●

4 Status quo des Engineerings in Wissenschaft und Wirtschaft

PHASEN		RESULTATE
1	Identifikation der Zielsetzung <ul style="list-style-type: none"> — Identifikation thematischer Fragestellungen für Wirtschaft und Wissenschaft sowie relevanter Stakeholder — Entwicklung von Arbeitshypothesen 	→ Strukturierung des Themenfeldes
2	Vorbereitung der Interviews <ul style="list-style-type: none"> — Auswahl relevanter Branchen — Identifikation geeigneter Interviewpartner — Entwicklung eines Interviewleitfadens mit über 20 offenen Fragestellungen 	→ Strukturiertes Befragungspanel
3	Durchführung der Interviews <ul style="list-style-type: none"> — Durchführung der Interviews mit offenen Fragestellungen (Interviewdauer: 1,5 Stunden) — Nach Möglichkeit Aufnahme des Interviews 	→ >100 durchgeführte Experteninterviews
4	Auswertung <ul style="list-style-type: none"> — Erstellung eines Kurzprotokolls — Transkription und softwaregestützte Kodierung der durchgeführten Interviews — Konsolidierung der Ergebnisse 	→ Kernergebnisse
5	Begutachtung <ul style="list-style-type: none"> — Bewertung und Diskussion der Erkenntnisse im Rahmen eines Expertenworkshops 	→ Diskutierte Erkenntnisse der Studie

Bild 4: Vorgehen bei der Durchführung der Erhebung des vorliegenden Leistungsstands

Anzahl der Interviewpartner

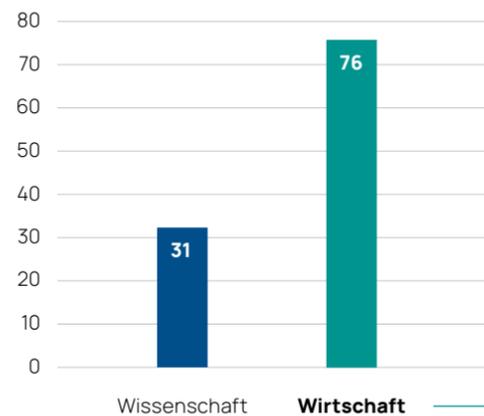


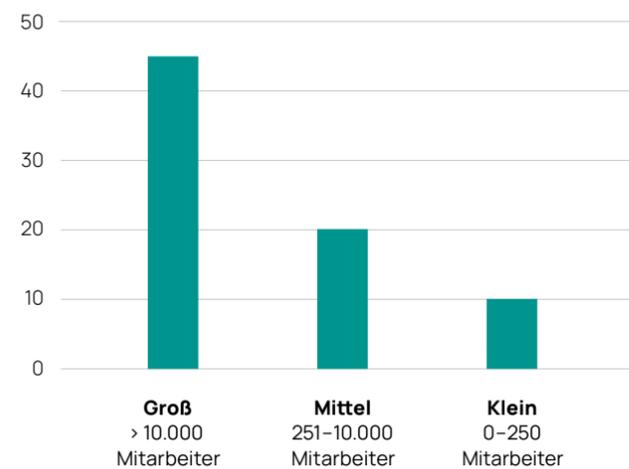
Bild 5: Untersuchungsfeld und Verteilung der Interviewteilnehmer

Die qualitative Erhebung zum Status quo des Engineerings in Wirtschaft und Wissenschaft gliedert sich in fünf Phasen (VGL. BILD 4).

In der ersten Phase wurden durch das Forschungskonsortium die Zielsetzung und Fragestellungen der Leistungserhebung definiert. Der Leistungsstand verfolgt das Ziel, die Ableitung von strategischen Handlungsempfehlungen für das zukünftige Engineering zu unterstützen. Gleichzeitig sollen die Ergebnisse eine fundierte Grundlage und einen Orientierungsrahmen für weitere Forschungsaktivitäten schaffen. Zur Erreichung dieser allgemeinen Ziele wurden konkretere Fragestellungen formuliert. Dazu wurden zunächst Kernthemen und relevante Stakeholder der ASE-Aktivitäten identifiziert. Darauf aufbauend wurden Arbeitshypothesen zum zukünftigen Engineering aufgestellt, an welchen sich der Untersuchungsplan orientiert. Gleichzeitig wurden die Arbeitshypothesen als Ausgangspunkt für die quantitative Kennzahlenerhebung genutzt (VGL. KAPITEL 5).

In der zweiten Phase wurde das Themenfeld strukturiert und der Leistungsstand vorbereitet. Zur Strukturierung wurden vorhandene Studien, Fachliteratur zum Stand der Forschung und bestehende Forschungsaktivitäten analysiert. Auf Basis der Analyse und der Vorkenntnisse des Forschungskonsortiums wurde das ASE-Leitbild als

Unternehmensgröße



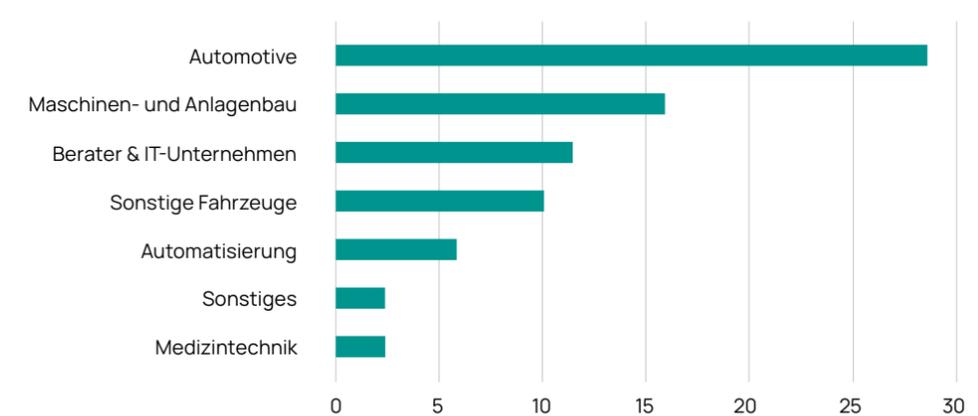
Orientierungsrahmen für den Untersuchungsgegenstand hergeleitet. Die Strukturierung des Themenfelds hat die Erstellung eines Katalogs von 20 offenen Fragen mit vorgegebenen Kategorien unterstützt (VGL. QR-CODE AUF SEITE 43).

Zur Durchführung der semistrukturierten Interviews wurden geeignete Fachleute, bzw. Experten aus der Wirtschaft und Wissenschaft identifiziert. Die ausschlaggebenden Kriterien bei der Auswahl der Fachleute waren

- mehrjährige Erfahrungen im Engineering (z. B. als Entwicklungsleiter),
- eine strategische Weitsicht als technische Leitungsperson (z. B. als Technikvorstand),
- eine besondere Expertise in einem Handlungsbereich (z. B. als Senior-Experte)
- oder eine herausragende wissenschaftliche Reputation (z. B. als Inhaber einer Professur).

Im Untersuchungszeitraum von Oktober 2019 bis März 2020 wurden anschließend vorwiegend im deutschsprachigen Raum 107 Interviews durchgeführt und ausgewertet; dies entspricht der dritten Phase der qualitativen Erhebung des Status quo. Bei der Auswahl der Befragten wurde darauf geachtet, dass diese das Untersuchungsfeld im Engineering möglichst breit abbilden. Zwei Drittel der Befragungen wurden mit Unternehmensvertretern ver-

Branche



schiedener Branchen und Unternehmensgrößen durchgeführt. Dabei wurden außerdem verschiedene Rollen im Wertschöpfungsnetzwerk (z. B. Zulieferer, Integrator, Erstausrüster) berücksichtigt. Die Verteilung der Unternehmensvertreter ergab sich entsprechend der wichtigsten deutschen Industriebranchen. (VGL. BILD 5).

Die empirische Erhebung erfolgte in Form von leitfadengestützten Interviews in den folgenden fünf Themenfeldern:

- Megatrends mit Einfluss auf das Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.1)
- Advanced Systems – Marktleistungen von morgen (VGL. ABSCHNITT 4.2)
- Systems Engineering – Komplexität managen (VGL. ABSCHNITT 4.3)
- Advanced Engineering – Engineering neu denken (VGL. ABSCHNITT 4.4)
- Auswirkungen von ASE auf die Organisation und den Menschen (VGL. ABSCHNITT 4.5)

Die Interviews in der dritten Phase dauerten jeweils ca. 90 Minuten und wurden in der Regel aufgezeichnet. Im Anschluss an die Interviews wurden Kurzprotokolle angefertigt, welche zur Priorisierung der Interviews und initialen Kategorienbildung dienten.



QR-Code: Leitfaden der qualitativen Forschung und Fragekategorien

In der vierten und fünften Phase wurden die Interviews ausgewertet und von ausgewählten Fachleuten begutachtet sowie der erhobene Leistungsstand ausgearbeitet. Die transkribierten Interviews wurden zunächst mit Softwareunterstützung kodiert und systematisch ausgewertet. Dabei wurden die Aussagen der Befragten konsolidiert, analysiert und als Erkenntnisse zusammengefasst. Zur kritischen Überprüfung der Erkenntnisse und zur initialen Ermittlung von strategischen Handlungsempfehlungen wurde abschließend ein Workshop mit ausgewählten Fachleuten durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass nur die Minderheit der Teilnehmer bereits an den Interviews teilgenommen hatte.

Die in den Abschnitten 4.1 bis 4.5 folgenden Erkenntnisse stellen eine konsolidierte, explorative Sicht auf die Handlungsfelder dar. Dabei wurde das Meinungsbild aus der Perspektive der Interviewteilnehmer erfasst, um das umfassende Verständnis in zusammenfassende Schlussfolgerungen zu überführen. Dabei liegen auch widersprüchliche oder heterogene Erkenntnisse vor. Die offene Fragestellung der Interviews ermöglichte teilweise eine hohe Befragungstiefe. Daher werden einzelne Meinungen der Befragten durch gesonderte Nennung hervorgehoben.

4.1 Megatrends mit Einfluss auf das Engineering

Langfristige Megatrends prägen den Wandel der Wertschöpfung mit tiefgreifenden Veränderungen. Diese Veränderungen betreffen alle gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Bereiche. Damit beeinflussen sie in hohem Maße die zukünftigen Entwicklungen im Engineering. Im Zuge der Erhebung wurden 17 Einzeltrends mit relevantem Einfluss auf das Engineering identifiziert. Eine Übersicht

der identifizierten Trends erfolgt in Form eines Trendradars (VGL. BILD 6). Im Trendradar sind die identifizierten Strömungen den Clustern Globalisierung, Digitalisierung und Nachhaltigkeit im Engineering zugeordnet. Über die Anzahl der Nennungen wurde die Relevanz branchenunabhängig gewichtet. Im Folgenden werden die Trends mit einer mittleren bis hohen Relevanz detaillierter beleuchtet.

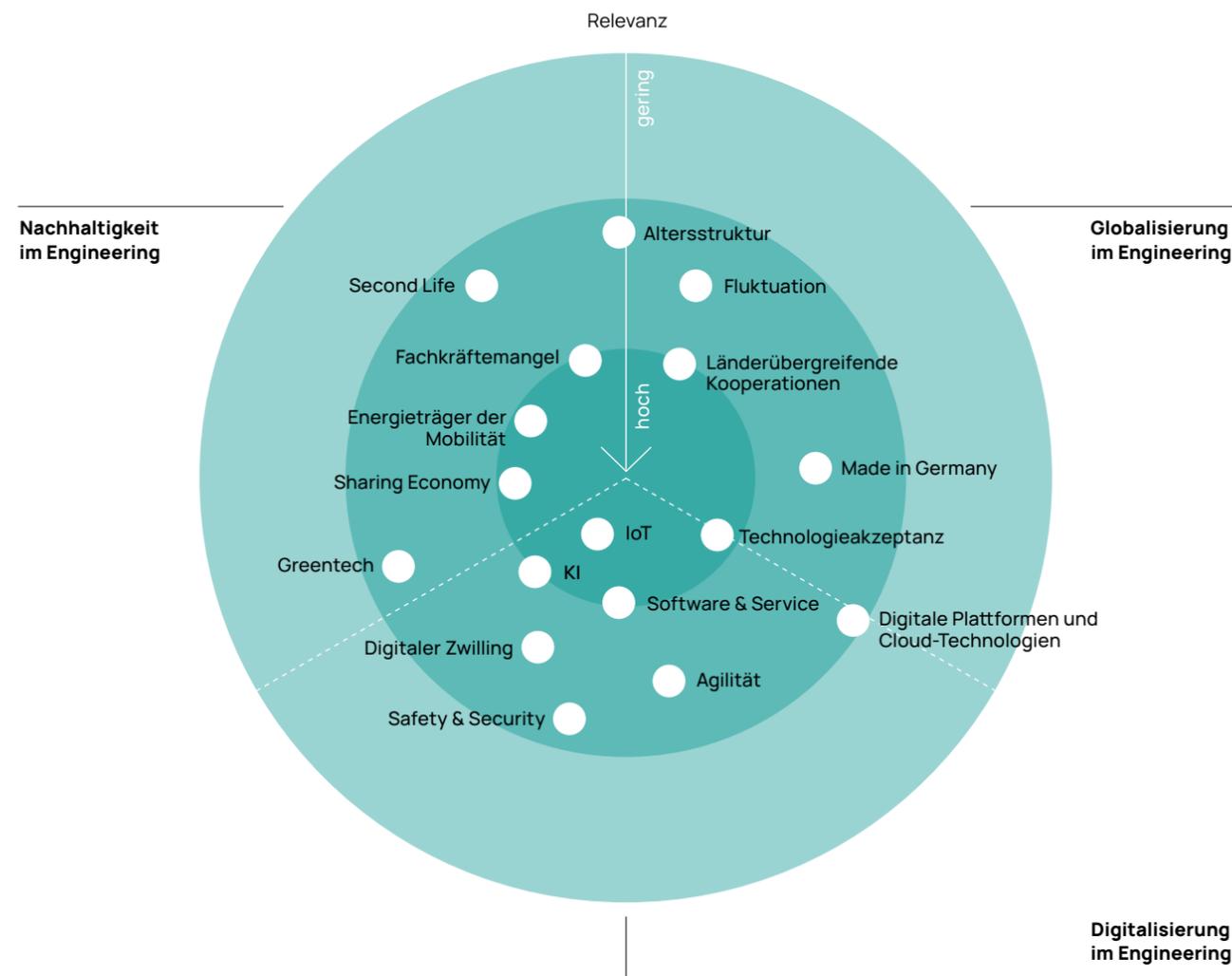


Bild 6: Trendradar des Engineerings als Resultat der qualitativen Leistungserhebung

4.1.1 Globalisierung im Engineering

Die Globalisierung beschreibt mehr als die weltweite Arbeitsteilung und den grenzüberschreitenden Handel. Sie umfasst auch den internationalen Austausch von Ideen, Wissen und Technologien in Wissenschaft und Wirtschaft. Diese Internationalisierung eröffnet den Unternehmen zahlreiche Möglichkeiten, neue Absatzmärkte zu erschließen und neue strategische Wettbewerbsvorteile zu erzielen. Gleichzeitig gilt es, das Potential von einem intensiven Wissenstransfer durch globale Forschungsnetzwerke zu nutzen. Einige Befragte beschreiben einen gegenläufigen Trend der Deglobalisierung, der beispielsweise durch Handelskonflikte bestärkt wird. Diese Entwicklungen gehen z. B. mit einer Lokalisierung von Lieferketten einher, um das Risiko von Lieferausfällen zu reduzieren.

Die globale Bevölkerungsentwicklung ist gleichzeitig eine Chance und eine Herausforderung für die befragten Unternehmen. Stagnierende Gesellschaften treffen auf stark wachsende. Die Verteilung der Ressourcen, Migration und die Weiterentwicklung des Lebensstandards werden die nächsten Jahrzehnte prägen. Für Deutschland ergibt sich eine besonders herausfordernde Situation, denn dem wachsenden Wohlstand Deutschlands stehen begrenzte Ressourcen und ein stark belastetes Rentensystem gegenüber. Vor dem Hintergrund des demografischen Wandels müssen Konzepte zur Sicherung des Erfahrungswissens und der Methodenkompetenz erforscht werden. Insbesondere im wissensintensiven Engineering besteht das Potential, im Berufsleben langfristig durch Erfahrung und Wissen unterstützen zu können. Im Folgenden werden einzelne Trends und deren Auswirkungen auf das Engineering betrachtet:

Länderübergreifende Kooperationen: Grundsätzlich ist dieser Trend von vielen befragten Unternehmen bestätigt worden, wenngleich die Umsetzung in starke und sich lohnende Bündnisse eine Herausforderung bleibt.

Fluktuation: Eine Vielzahl der befragten Interviewteiler erwartet für die Zukunft eine hohe Fluktuation ihrer Mitarbeiter durch häufigere Jobwechsel oder durch den Wechsel an internationale Standorte. Durch das frühzeitige Ausscheiden vieler Mitarbeiter gewinnt das Wissensmanagement im Engineering an Relevanz. Offen bleibt, wie erfolgreiche und menschenzentrierte Konzepte im Wissensmanagement zukünftig aussehen können.

Made in Germany: Made in Germany gilt nach wie vor als eins der wichtigsten Qualitätsmerkmale der deutschen Industrie. Darunter wird nicht ausschließlich die Herstellung oder der Zusammenbau der Waren verstanden. Einige Befragten beziehen sich insbesondere auf den erforderlichen Innovationsprozess und das Engineering als entscheidenden Wertschöpfungsanteil des Qualitätsmerkmals. Gleichzeitig fürchtet ein Anteil der Befragten um den Verlust dieses Qualitätsmerkmals, da im Zuge einer zunehmenden Globalisierung Unternehmen aus Asien in die etablierten Märkte drängen oder sich das Kerngeschäft nach Asien verlagert. Dabei ist eine besondere Herausforderung, die Produktion als Teil des Herstellungsprozesses unter den deutschen Kostenbedingungen zu sichern. Vor diesem Hintergrund gilt es, rechtzeitig den Markenkern von »Made in Germany« im Sinne eines führenden Innovationsstandorts weiterzuentwickeln.

Zum Zeitraum der Befragung zwischen Oktober 2019 und März 2020 wurde dem Trend der Resilienz noch kein hoher Einfluss auf das Engineering zugesprochen.

4.1.2 Digitalisierung im Engineering

Digitalisierung beeinflusst als einer der Megatrends des 21. Jahrhunderts alle Bereiche der deutschen Gesellschaft und Wirtschaft. Die Digitalisierung verfolgt in der Regel drei spezifische Ziele: 1) In neuen Geschäftsfeldern und mit neuen Technologien Werte zu schaffen, 2) in den Kernprozessen und in der Kundenerfahrung einen Mehrwert zu liefern und die Effizienz zu steigern sowie 3) grundsätzlich technologische und organisatorische Fähigkeiten aufzubauen, um die digitale Transformation und Akzeptanz sicherzustellen.

Der Großteil der Befragten ist sich einig, dass zahlreiche Nutzenpotentiale durch digitale Lösungen existieren und in Zukunft weiter erschlossen werden müssen, um die Wettbewerbsfähigkeit am Standort Deutschland zu unterstützen. Potentiale im Engineering ergeben sich z. B. beim Vernetzen von Informationen im Produktentstehungsprozess oder bei der Durchgängigkeit von digitalen Modellen. Im Folgenden werden einzelne Trends und deren Auswirkungen auf das Engineering betrachtet:

Künstliche Intelligenz (KI): Die Künstliche Intelligenz wird von vielen Befragten als ein wesentlicher Trend beschrieben, welcher auch im Engineering zu einem relevanten Wettbewerbsvorteil führen kann. Obwohl die Mehrheit der Befragten das Potential von KI-basierten Lösungen und Assistenzsystemen in der Produktentstehung betonen, konnten nur wenige Unternehmen konkrete Anwendungsbeispiele benennen. Hier besteht dementsprechend ein Bedarf an Forschung sowie an geeigneten Transfermöglichkeiten, um KI-Anwendungen in der industriellen Praxis zu etablieren.

Digitaler Zwilling: Die Kombination von virtuellen Planungs- und Entwicklungsprozessen mit der zunehmenden Konnektivität der Systeme ermöglicht schon heute eine weitreichende Optimierung durch die digitale Abbildung von Produkten, Produktionsanlagen und ganzen Fabriken. Obwohl ein Großteil der befragten Unternehmen Digitale Zwillinge als Wettbewerbsvorteil betrachten, herrscht ein sehr heterogenes Verständnis über die Ausprägungen und Kernaspekte des Konzepts. Vor diesem Hintergrund sind verständliche Ansätze zu entwickeln und in praktische Anwendungen zu überführen.

Digitale Plattformen und Cloud-Technologien (Cloud): Digitale Plattformen und Cloud-Technologien zur Unterstützung des Engineerings werden nach der Meinung einiger Befragten ein strategischer Erfolgsfaktor in der Engineering-IT-Infrastruktur. Diese Auffassung entspricht weitestgehend den Entwicklungsaktivitäten der etablierten Software-Anbieter im Engineering. Hier entstehen Angebote wie Produktlebenszyklusmanagement oder Simulationssoftware in der Cloud. Besondere Vorteile werden in der verteilten, jedoch gemeinsamen Entwicklungsarbeit über Standorte und sogar Unternehmensgrenzen gesehen. Gleichwohl haben einige der Befragten noch keine vielversprechenden Lösungen für skalierbare und zuverlässige Dienste im Engineering gefunden.

Internet der Dinge (IoT): IoT-Technologien nehmen zunehmend Einzug in die Marktleistungen der befragten Unternehmen. Neben der Konnektivität der Systeme stellen nach Meinung einiger Befragten jedoch insbesondere die damit verbundenen Prozesse und Auswirkungen auf die IT-Infrastruktur eine Herausforderung dar. Vor diesem Hintergrund wird der Standardisierung von Programmierschnittstellen eine besondere Relevanz zugesprochen, um die Entwicklungssysteme und Betriebsdaten durchgängig verknüpfen zu können. Nach Meinung dieser Befragten besteht aktuell eine starke Heterogenität in der Systemlandschaft und ein entsprechender Forschungsbedarf an integrierenden Konzepten.

Software & Service: Eine Vielzahl der Befragten erwartet eine zunehmende Bedeutung des Servicegeschäfts ergänzend zu dem bestehenden Produktportfolio. Durch die kontinuierliche Erweiterung der Marktleistungen um softwarebasierte Komponenten wird sich der Wertschöpfungsprozess wandeln. Einige Befragte gehen davon aus, dass sich die Entwicklung datenbasierter Dienstleistungen als fester Bestandteil des Engineerings etablieren wird. Vor diesem Hintergrund müssen die Auswirkungen von asynchronen Entwicklungs- und Änderungszyklen sowie das Engineering neuer Funktionen während der Betriebsphase untersucht werden.

Safety & Security: Angesichts der zunehmenden Anzahl von digitalen Lösungen wird sowohl der Stellenwert von der Betriebssicherheit von IT-Systemen (Safety), als auch der Stellenwert von der Informationssicherheit und dem Datenschutz (Security) steigen. Eine Vielzahl der Unternehmen sieht sich in diesem Kontext mit zusätzlichen, bisher unklar definierten Herausforderungen konfrontiert. Ergänzend zu den bestehenden Bestrebungen, verschiedene und teilweise widersprüchliche Anforderungen im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen («Sustainability by Design», «Usability by Design» etc.), müssen Lösungsansätze für technische Systeme im Sinne von «Safety and Security by Design» erforscht werden.

Agilität: Die steigende Volatilität der Kunden- und Markt-anforderungen fordert nach Ansicht einiger Befragten die Unternehmen dazu auf, neue Arbeitsformen einzuführen. Infolgedessen sieht der Großteil der Unternehmen die agile Arbeitsweise als zentrales Thema. Gleichzeitig betonen diese Befragten, dass die agilen Methoden und Prozesse nicht ohne Anpassungen an den Unternehmenskontext übertragen werden können. Daher müssen skalierbare Ansätze aus agilen und klassischen Entwicklungsmethoden entwickelt werden.

Technologieakzeptanz: Die Offenheit und Akzeptanz der Mitarbeiter und Kunden bzgl. neuer Trends und Technologien sehen viele Befragte als einen kritischen Erfolgsfaktor für die Zukunft an. Dabei kommt es zwingend auf die entsprechende Gestaltung der technischen Lösungen an, um die Akzeptanz auf individueller und organisatorischer Ebene zu fördern.

4.1.3 Nachhaltigkeit im Engineering

Das Thema Nachhaltigkeit wird von den Befragten mittlerweile nicht mehr nur als Trend angesehen, sondern als eine zwingend erforderliche Maßnahme für einen umweltverträglichen und verantwortungsvollen Umgang mit den bestehenden Ressourcen. Die gegenwärtig besonders bei jungen Menschen geführte Nachhaltigkeitsdebatte wird im akademischen Umfeld mit höchster Relevanz bewertet. Einige Unternehmen sehen ebenfalls ein großes Potential, sich stärker für den Umweltschutz und gegen die Ressourcenverschwendung zu engagieren. Gleichzeitig befürchten diese Unternehmen jedoch, dass tiefgehende Eingriffe des Gesetzgebers in beträchtlichen Hürden bei der Zulassung von neuen Produkten resultieren. Die Sicherstellung der Balance zwischen den Anforderungen der Nachhaltigkeit und der gleichzeitig notwendigen Wirtschaftlichkeit und Attraktivität am Markt wird zunehmend als Herausforderung wahrgenommen.

Gerade die Industrie sieht sich in der Pflicht, ihre Bemühungen im Bereich der Reduzierung des Energieverbrauches zu stärken, um möglichst CO₂-neutral zu produzieren. Das Engineering muss vor diesem Hintergrund oftmals vollkommen neue Lösungen für die Produkte, Produktionsanlagen und Fabriken entwickeln. Ferner muss die gesamte Wertschöpfung und Produktnutzung im Sinne einer Circular Economy bereits bei der Planung und Entwicklung mehr an Bedeutung gewinnen und frühzeitig mitgedacht werden. Es besteht das Bestreben, die Produkte nach ihrem Betrieb, im Sinne der Kreislaufwirtschaft als z. B. Sekundär-Rohstoffe, wieder dem Produktionszyklus zuzuführen. Diese Entwicklungen resultieren in neuen Anforderungen an den Entstehungsprozess von nachhaltigen Systemen. Der Begriff der Nachhaltigkeit wird nicht mehr ausschließlich mit dem umweltschonenden Handeln und der Rücksicht auf zukünftige Generation assoziiert. Einzelne Befragte beziehen sich ebenfalls auf die Nutzung von Ressourcen wie Humankapital (Facharbeiter, Ingenieure etc.).

Im Folgenden werden einzelne Trends und dessen Auswirkungen auf das Engineering betrachtet:

Greentech: Einige der Befragten sprechen den Technologien für Umweltschutz, erneuerbare Energien und einer effizienten Ressourcennutzung eine besondere Bedeutung zu. Dabei beziehen sich diese Unternehmen zum einen auf die Verbesserung ihrer Produkte, wie z. B. eine Verbesserung der Ökobilanzen durch innovative Werkstoff- und Materialtechnologien. Zum anderen fertigen einige Großunternehmen bereits Nachhaltigkeitsberichte auf Unternehmensebene an. Dem Trend einer kompletten Klimaneutralität sprechen einzelne Befragte aus Wissenschaft und Wirtschaft zukünftig eine große Bedeutung zu. Eine systematische Integration von Greentech-Aspekten in das Engineering ist jedoch bei dem Großteil der Befragten noch nicht umgesetzt. Konkrete Planungs- oder Entwicklungskonzepte für klimaneutrale Produkte oder Produktionsstätten wurden von keinem Befragten genannt.

Altersstruktur: Die zunehmende Alterung der deutschen Gesellschaft führt zu einem kontinuierlichen und wettbewerbsrelevanten Abgang von Fachwissen, wodurch ein ganzheitliches und zweckmäßiges Wissensmanagement im Unternehmen zwangsläufig als Wettbewerbsvorteil gilt. Wie dies unter den Kriterien individueller Akzeptanz und notwendiger Effektivität realisiert werden kann, wird als wichtige Herausforderung für die Forschung gesehen.

Fachkräftemangel: Ausgelöst durch den demografischen Wandel rechnet die Mehrzahl der Unternehmen zukünftig mit mehr unbesetzten Stellen. Insbesondere KMU erwarten Schwierigkeiten bei der Rekrutierung geeigneter Mitarbeiter. Eine stets aktuelle, praxisrelevante Qualifikation und die Sicherung des Nachwuchses werden als zentrales Element des Unternehmenserfolgs angesehen.

Energieträger der Mobilität: Um den Kohlenstoffdioxid-austausch langfristig zu senken, sieht eine Vielzahl der Befragten große Potentiale in der Elektrifizierung auf Basis regenerativer Energien. Gleichzeitig merken einige Befragte die begrenzte Ressourcenverfügbarkeit und den CO₂-Fußabdruck bei der Batterieherstellung kritisch an. Vor diesem Hintergrund wird die Elektromobilität auf Basis von Batteriespeichern nicht als alleinige, langfristige Lösung angesehen. Vielmehr fordern einige Befragte einen Technologiemix aus unterschiedlichen Konzepten: vom Verbrennungsmotor mit synthetischen Kraftstoffen über die Wasserstoff-Brennstoffzelle bis hin zur Batterie. Die Befragten aus dem akademischen Umfeld sehen die Wende unserer Gesellschaft in eine Wasserstoffwirtschaft als zentrale Zukunftsoption, welche bereits durch die Politik in einer neuen Wasserstoffstrategie adressiert wird.

Sharing Economy: Die geteilte Nutzung von Produkten auf Basis digitaler Plattformen und neuer Geschäftsmodelle wurde als Trend von einer Vielzahl der Befragten aus dem Automobilssektor genannt. Einige Befragte im Bereich der Konsum oder Investitionsgüter betonen ebenfalls ein zunehmendes Interesse oder erste Umsetzungsversuche derartiger Geschäftsmodelle. Im Bereich der Investitionsgüter werden mit dem Trend teilweise nutzungsorientierte Geschäftsmodelle assoziiert, bei welchen die Maschine oder Anlage nicht in den Besitz des Kunden übergeht. Obwohl damit auch außerhalb der Mobilitätsanbieter ein zunehmendes Interesse der Anbieter an nutzungsorientierten Geschäftsmodellen besteht, berichten die Befragten von Herausforderungen bei der praktikablen Umsetzung und bei der Akzeptanz der Abnehmer.

Second Life: Die Lebenszyklusbetrachtung von Produkten ist ein etablierter Ansatz. Bisher wird dabei vorwiegend die Entwicklung eines Produkts von der Idee bis zur Rücknahme im Kontext einer Kostenanalyse betrachtet. Neben der Abschätzung der Gesamtkosten des Betriebs werden ebenfalls die Umweltwirkungen von Produkten (Verbrauch, Ökobilanz etc.) im Engineering berücksichtigt. Ein zentrales Problem ist dabei der valide Abgleich zwischen Simulation oder Berechnung und der Realität. Zudem sehen sich einige Befragte bei Produkten mit sehr langen Lebenszyklen zunehmend mit Kannibalisierungseffekten durch ihr Gebrauchsgeschäft konfrontiert. Gleichzeitig wurde insbesondere im Investitionsgüterbereich auf eine mögliche Verlängerung der Nutzungsdauer und Funktionserweiterung durch Software-Updates während der Betriebsphase hingewiesen. Teilweise werden diese Aspekte bereits während des Entstehungsprozesses antizipiert und eine mögliche Wiederverwendung einzelner Module eingeplant. Die Mehrheit der befragten Industrieunternehmen sieht jedoch noch kein tragfähiges Konzept und hat keine konkreten Umsetzungen im Engineering genannt.

Megatrends im Engineering – Digitalisierung, Globalisierung und Nachhaltigkeit

Diese haben sowohl einen starken Einfluss auf die zukünftigen Marktleistungen als auch auf deren Entstehungsprozesse. Insbesondere die Ausprägungen dieser Megatrends wie die Sharing Economy, Greentech, das Internet of Things, Künstliche Intelligenz und der Fokus auf ein globales Wissensmanagement als Folge des zunehmenden Fachkräftemangels werden die künftige Gestaltung des Engineerings nachhaltig prägen. Es eröffnen sich erhebliche Erfolgspotentiale, deren Erschließung aber gute Ideen und Umsetzungsstärke erfordern.

4.2 Advanced Systems Marktleistungen von morgen

Die genannten Trends beeinflussen sowohl die zukünftigen Marktleistungen, deren Gestaltung als auch die Wertschöpfung als Ganzes in einem hohen Maße. Aufgrund der starken, wechselseitigen Abhängigkeit zwischen der zu gestaltenden Marktleistung und dessen Entstehungsprozess gilt es, zunächst die zukünftigen Ausprägungen von innovativen, technischen Systemen zu identifizieren (VGL. BILD 7).

Die innovativen, soziotechnischen Systeme werden im Rahmen des ASE-Leitbilds als Advanced Systems bezeichnet. Advanced Systems gehen dabei weit über den aktuellen Stand der Mechatronik hinaus und eröffnen faszinierende Perspektiven. Dabei werden sie zukünftig

durch eine signifikante Steigerung von Adaptivität, Robustheit, ihrem vorausschauenden Verhalten und ihrer Benutzungsfreundlichkeit charakterisiert [DJG12]. Diese Eigenschaften bergen einerseits ein umfassendes Potential für Innovationen, stellen andererseits jedoch die Planung und Entwicklung der Marktleistungen vor gänzlich neue Anforderungen.

In Abschnitt 4.2.1 werden zunächst Perspektiven für Advanced Systems vorgestellt, welche auf Basis der Interviews identifiziert wurden. Anschließend werden in Abschnitt 4.2.2 damit verbundene Herausforderungen für Wirtschaft und Wissenschaft beschrieben.

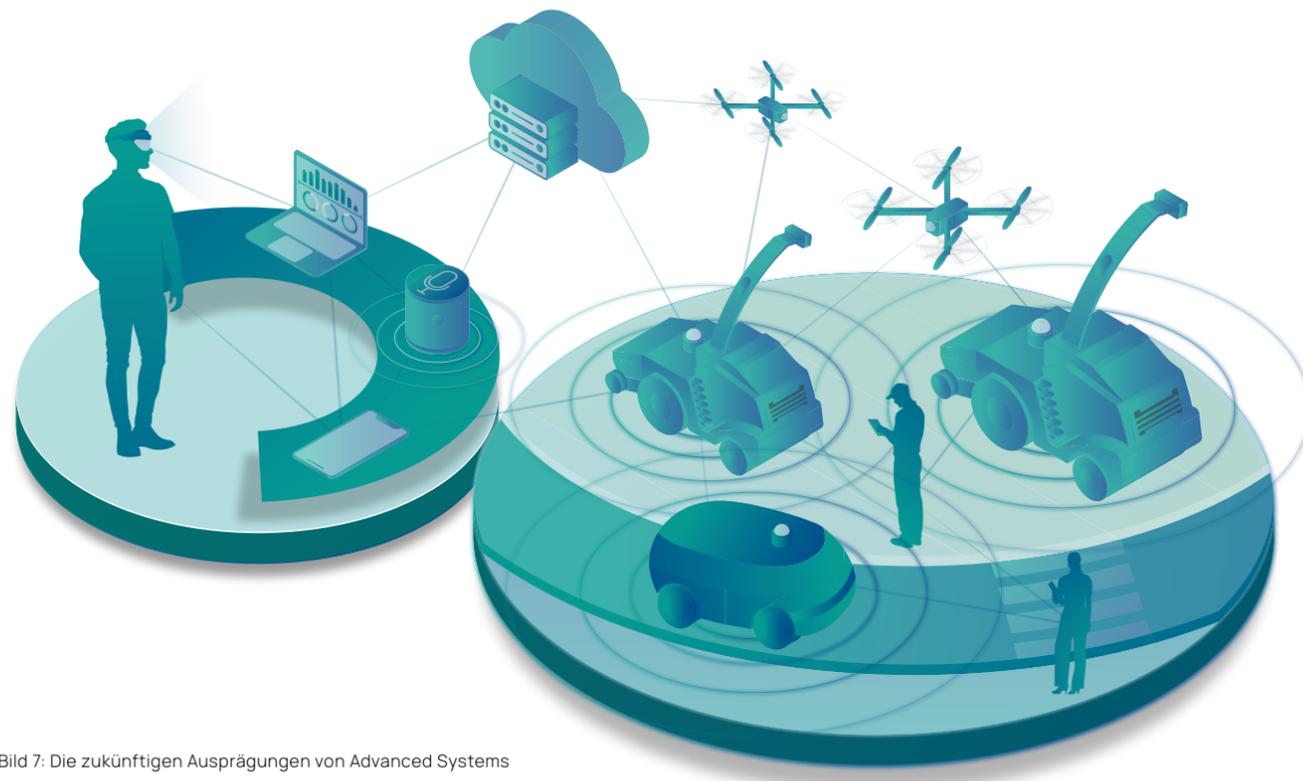


Bild 7: Die zukünftigen Ausprägungen von Advanced Systems

4.2.1 Perspektiven für Advanced Systems

Auf Basis der Interviews wurden die Erkenntnisse für Advanced Systems anhand der folgenden Perspektiven gegliedert:

- Autonome Systeme
- Dynamisch vernetzte Systeme
- Interaktive soziotechnische Systeme
- Produkt-Service-Systeme

Autonome Systeme erhöhen die Leistungsfähigkeit

Bei einem Teil der befragten Unternehmen werden die angebotenen Produkte zunehmend autonomer (VGL. INFOBOX 2). Wenige Befragte beschreiben ihre aktuellen Marktleistungen als hoch autonome Lösung im Rahmen einer bestimmten Aufgabe. Ein Vorreiter im Bereich der autonomen Systeme ist die Rüstungsindustrie. Auch die Automobilindustrie sieht autonome Fahrzeuge als Erfolgsfaktor für die Zukunft an, an denen sie intensiv forschen und arbeiten. Erste autonome, im Verkehr agierende Fahrzeuge werden erst nach 2035 erwartet (entsprechend des Level 5 des autonomen Fahrens).

Heutige autonome Systeme sind enorm leistungsfähig, aber auch hochgradig spezialisiert. Aktuell sind die verfügbaren Lösungen bei Weitem noch nicht geeignet, um außerhalb von kontrollierten Umgebungen, wie z. B. der automatisierten Lagerhalle, zu agieren. In den komplexen, hochdynamischen Umgebungen unseres Alltags, wie z. B. dem gemischten Stadtverkehr, können autonome Systeme aktuell nicht genutzt werden. Vor diesem Hintergrund sind noch weitreichende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung erforderlich.

INFO 2 Autonome Systeme

Autonome Systeme lösen komplexe Aufgaben innerhalb eines bestimmten Anwendungsbereichs selbstständig. Diese Systeme müssen dafür in der Lage sein, ohne Fernsteuerung oder ohne weitere menschliche Hilfe zielführend zu agieren. Die Steuerung kann dabei auf einem systeminternen Umfeldmodell beruhen, um während des Betriebs auf neue Ereignisse zu reagieren oder neue Aktionen zu lernen. Zur Umsetzung autonomer Systeme werden zahlreiche technologische Bausteine benötigt, wie z. B. Sensorfusion oder grundlegend neue Planungsverfahren [DGS+18].

Neben Technologien wie Robotik und Automatisierung sieht ein Teil der Befragten die Nutzung von KI-basierten Lösungen als einen zentralen Bestandteil von autonomen Systemen an. Aktuell befindet sich die Anwendung und Integration von KI zur Steigerung der Autonomie von Produkten bei den befragten Unternehmen (insbesondere bei KMU) noch im Versuchsstadium. Allgemein setzten nur wenige, befragte Unternehmen KI in marktreifen Produkten ein. Die Befragten aus dem akademischen Umfeld bestätigen diese Sicht und sehen großen Forschungsbedarf sowohl in den technologischen Aspekten der Autonomie als auch bei der Befähigung der Unternehmen, autonome Systeme zu gestalten.

Dynamisch vernetzte Systeme eröffnen neue Wertschöpfungsnetzwerke

Neben autonomen Systemen sehen viele Befragte aus Industrie und Forschung eine zunehmende Vernetzung und Konnektivität der Marktleistungen (VGL. INFOBOX 3). Vor diesem Hintergrund betonen einige Befragte, dass der Umgang mit Schnittstellen ein besonderes Differenzierungsmerkmal im Wettbewerb darstellen kann. Insbesondere in der Automatisierungsbranche nimmt die herstellerübergreifende Unterstützung von Schnittstellen und Standards einen besonderen Stellenwert ein. ➤

Obwohl die Vielzahl der Befragten eine zunehmende Standardisierung fordert, stoßen Standardisierungsvorhaben in der Umsetzung immer noch auf große Hürden. Teilweise setzen Hersteller z. B. weiterhin bewusst auf proprietäre Schnittstellen und Protokolle, um eine Wechselbarriere und Herstellerabhängigkeit zu schaffen.

Durch die zunehmende Vernetzung werden die zukünftigen, technischen Systeme nach der Meinung vieler Befragter vermehrt in einem Systemverbund agieren (z. B. flexible Produktionsstraßen). Unternehmen sind damit zunehmend gefordert, ihre Produkte für die Interaktion mit weiteren Systemen sowie für die Integration in einen Systemverbund zu qualifizieren. Ein Systemverbund von unabhängigen Systemen, welche zeit- und ortsabhängig miteinander kooperieren, wird als »System of Systems« (SoS) bezeichnet. Das Verständnis, als Teil eines System of Systems zu agieren, liegt vermehrt bei den Befragten in der Automobil- und Automatisierungsbranche vor. Nach Meinung einiger Befragter wird zukünftig die Kommunikation auf SoS-Ebene durch offene Architekturgestaltung ein relevanter Erfolgsfaktor sein.

INFO 3 Dynamisch vernetzte Systeme

Durch die zunehmende Vernetzung von Systemen entstehen neue, komplexere Systemverbünde, deren Funktionalität und Leistungsfähigkeit, die der Summe der Einzelsysteme übersteigen. In Abhängigkeit von dem Gesamtsystemziel können sowohl die Systemgrenzen, die Schnittstellen sowie die Rollen der Einzelsysteme variieren. Der vernetzte Systemverbund wird nicht mehr ausschließlich durch eine Einzelsystem-übergreifende Steuerung beherrschbar sein. Wenn diese selbständigen Einzelsysteme zeit- oder ortsabhängig miteinander wechselwirken, jedoch unabhängig bzw. von verschiedenen Anbietern entwickelt oder betrieben werden, spricht man von einem System of Systems (SoS) [PH14]. Beispiele dafür sind das Mobilitätssystem oder eine Smart City. Die unabhängigen Systeme (z. B. Fahrzeuge, Empfangsstationen entlang der Verkehrsinfrastruktur, Gebäude etc.) können zu einem beliebigen Zeitpunkt ihres Lebenszyklus in das SoS integriert und auch wieder entfernt werden.

Der beschriebene Wandel korreliert mit einer zunehmenden Vernetzung der sozialen Systeme und Wertschöpfungsnetzwerke (z. B. standortverteilte und unternehmensübergreifende Entwicklungsabteilungen). Wie die Entstehung und der Betrieb von solchen Systemen gestaltet werden können, ist vielen Befragten unklar. Für das Engineering von SoS liegen aktuell keine durchgängigen Ontologien, Modellierungsmethoden oder Ansätze für die Planung von mehreren Systemgenerationen vor. Die Validierung wird als eine der größten Herausforderungen wahrgenommen. Zudem wird bei dem Großteil der Unternehmen das Verständnis von SoS auf eine starre Vernetzung reduziert und somit zu stark vereinfacht. Vor diesem Hintergrund sind zum einen umfangreiche Methodenforschungen sowie zum anderen die Entwicklung von unterstützenden Werkzeugen zwingend erforderlich.

Interaktive, soziotechnische Systeme entlasten den Menschen

Trotz der steigenden Autonomie und des zunehmend automatisierten Informationsaustausches zwischen technischen Systemen spielt der Mensch weiterhin als Kunde und Nutzer eine wesentliche Rolle. Neben der Kundenzentrierung geht ein Teil der befragten Unternehmen stärker dazu über, das technische System und den Nutzer als soziotechnisches Gesamtsystem zu betrachten. Der Mensch und das Nutzererlebnis stehen damit im Zentrum der Entstehung von Produkten und Dienstleistungen (VGL. INFOBOX 4).

INFO 4 Interaktive soziotechnische Systeme

Ein soziotechnisches System beschreibt eine integrale und zusammenwirkende Einheit von Menschen und Technologien [ROP09]. Die technischen Teilsysteme zeichnen sich dabei zunehmend durch maschinelle Intelligenz aus, welche sich in Form von verbesserter Kognition, Selbstoptimierung und gesteigerter Autonomie ausprägt [DJG12]. Die skizzierte technologische Entwicklung resultiert in neuen Formen der Interaktion zwischen Menschen und Maschinen. Die Systeme können sich flexibel an die Bedürfnisse des Nutzers anpassen und

unterstützen diesen kontextbasiert. Ferner werden die Systeme zukünftig auch fähig sein, ihr Handeln zu erklären und dem Benutzer aufgaben- und situationsspezifische Handlungsmöglichkeiten anzubieten. Die Interaktion erfolgt dabei zunehmend multimodal (z. B. mittels Sprache oder Gestik) und auf Basis von neuen Interaktionstechnologien (z. B. Sentiment- oder Stimmen-Analyse) [DOR15].

Im Rahmen dieser Nutzerorientierung wird von den Advanced Systems eine hohe Ergonomie und eine intelligente, anpassungsfähige Interaktion mit dem Nutzer verlangt. Eine Vielzahl der Befragten erwartet von ihren zukünftigen Marktleistungen eine stärkere Entlastung des Nutzers. Dazu beschränken einige befragte Unternehmen die Nutzerinteraktion nicht mehr ausschließlich auf Gestaltung einer einzelnen, statischen Mensch-Maschine-Schnittstelle. Bei der Gestaltung der Produktinteraktion wird die Anwendung verschiedenster Geräte (z. B. Bedienfeld oder Webanwendung), Schnittstellen (z. B. Sprach- oder Gestensteuerung) und Technologien (z. B. erweiterte Realität oder Wearable Computing) getestet. Als konkrete Beispiele für die beschriebenen Entwicklungen von interaktiven, soziotechnischen Systemen haben die Befragten z. B. KI-Sprachassistenten im Infotainment-System eines Autos oder die Steuerung von Haushaltsgeräten per Smartphone genannt. Einzelne Befragte nutzen bereits eine systematische Erfassung der Benutzerinteraktion, um das Nutzererlebnis während des Betriebs sowie die Entwicklung zukünftiger Produktgenerationen zu optimieren.

Eine besondere Herausforderung ist, dass diese menschenzentrierte Gestaltung eine hochgradig multidisziplinäre Aufgabe ist, der es momentan laut einigen Befragten an geeigneten Validierungsmethoden fehlt. Hieraus ergibt sich ein erheblicher Forschungsbedarf zur konsequenten Berücksichtigung des Menschen als Entwickler von Advanced Systems als auch als Käufer und Nutzer dieser Systeme.

Produkt-Service-Systeme ermöglichen neue Geschäftsmodelle

Der Trend zur Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft resultiert in den befragten Unternehmen in einem zunehmenden Angebot an kombinierten Sach- und Dienstleistungen (VGL. INFOBOX 5). Dabei beziehen sich viele Befragte in der Regel auf eine zunehmende Relevanz von datenbasierten Services, welche das bestehende Dienstleistungsangebot (z. B. Entwicklung, Leasing oder Instandhaltung) ergänzen. Einige der befragten Unternehmen bieten bereits Lösungen mit immanenten Sach- und Dienstleistungsanteilen als Produkt-Service-Systeme (PSS) an. Die zunehmende Relevanz der PSS wird durch die Befragten aus dem akademischen Umfeld bestätigt. Ein Großteil der befragten Unternehmen mit Beratertätigkeit gewichtet die Funktionalität bzw. das Leistungsversprechen höher als das eigentliche Produkt. Dies geht mit der Einschätzung einiger Befragter einher, dass sich ihr Angebot von Standardprodukten und -komponenten zu kundenindividuellen Problemlösungen verlagert.

Mit dem Wandel des Leistungsangebots verändern sich die Wertschöpfungsprozesse und Ertragsmodelle der befragten Unternehmen. Ein Teil der befragten Unternehmen plant oder testet bereits Anwendungen von PSS. Als konkrete Beispiele für verfügbarkeitsorientierte Geschäftsmodelle aus der Automatisierungsbranche wurden Zustandsüberwachung, vorausschauende Wartung oder nutzungsabhängige Abrechnungsmodelle genannt. Gleichzeitig stehen viele Befragte der erwarteten Wirtschaftlichkeit neuer Dienstleistungen kritisch gegenüber. Zum einen können die Befragten die Akzeptanz der Kunden hinsichtlich der neuen Dienstleistungen schwer einschätzen. Zum anderen ist die Rentabilität schwer abschätzbar. Ein Teil der Befragten sieht eine mangelnde Zahlungsbereitschaft bei derzeit angebotenen Serviceleistungen. Vor diesem Hintergrund müssen Ansätze erforscht werden, welche eine Relevanzbewertung von datenbasierten Services unter Berücksichtigung des Kundennutzens und der Rentabilität des Lösungs- und Serviceangebots professionalisieren. >

INFO 5 Produkt-Service-Systeme

Produkt-Service-Systeme (auch hybride Leistungsbündel genannt) beruhen auf einer engen Verzahnung von Sach- und Dienstleistungen und bieten auf den Kundennutzen ausgerichtete Problemlösungen. Der Nutzen dieser Systeme entsteht unter anderem durch Dienstleistungen, welche auf der Erfassung, Verarbeitung und Auswertung von Umgebungs-, Betriebs- oder Nutzerdaten basieren. Die Auswertung der Daten einer Produktionsanlage kann beispielsweise zu einer Prognose eines Maschinenausfalls führen, auf deren Grundlage weitere Dienste wie präventive Wartung und automatische Bestellung von Ersatzteilen initiiert werden. Die geschickte Kombination von innovativen Diensten und intelligenten Systemen bietet ein vielversprechendes Nutzenpotential für neue Geschäftsmodelle [KRH+15].

Perspektiven für Advanced Systems: Autonome Systeme, Vernetzung intelligenter Systeme, soziotechnische Interaktion, datenbasierte Produkt-Service-Systeme

Die Autonomie von technischen Systemen entwickelt sich zu einem wichtigen Differenzierungsmerkmal am Markt. Insbesondere der Einsatz von autonomen Systemen in komplexen, hochdynamischen Umgebungen in nahezu allen Lebensbereichen eröffnet neue Wachstumsmärkte. Um diese Potentiale auszuschöpfen, müssen Unternehmen befähigt werden, ihre bestehenden Marktleistungen mit Schlüsseltechnologien wie Künstliche Intelligenz (KI), Robotik und Automatisierungstechnik zu aufzuwerten. Die zunehmende Vernetzung von interagierenden, intelligenten technischen Systemen eröffnet faszinierende Perspektiven für die Wertschöpfung von morgen. Dazu müssen die aktuellen Systeme mit Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) verzahnt sowie für die Integration in einem Systemverbund qualifiziert werden. Anwender, Nutzer und Konsumenten verlangen eine intelligente, anpassungsfähige Interaktion mit dem technischen System. Die menschenzentrierte Gestaltung unter Berücksichtigung neuer Formen der Mensch-Maschine-Interaktion stellt neue Anforderungen an Entstehungsprozesse der zukünftigen Marktleistungen. Ferner wird datenbasierten Produkt-Service-Systemen (PSS) eine zunehmende Relevanz zugeschrieben. Kontinuierliche Softwareaktualisierung von PSS ermöglicht z. B. eine Funktionserweiterung im Betrieb oder eine kritische Sicherheitsaktualisierung. Die Unternehmen stoßen bei der Ausgestaltung der Services jedoch auf erhebliche Herausforderungen hinsichtlich der Bewertung des Kundennutzens und der Rentabilität der Geschäftsmodelle. ➤

Der Großteil der Befragten sieht die kontinuierliche Softwareaktualisierung von PSS als einen zentralen Service und integralen Bestandteil der zukünftigen Marktleistungen. Dabei wurden sowohl die Möglichkeiten von Funktionserweiterungen im Betrieb als auch die Relevanz von kritischen Sicherheitsaktualisierungen genannt. Durch die Möglichkeit der Updatefähigkeit erwarten einige Befragte einen deutlichen Anstieg der Kundenzufriedenheit und -bindung. Gleichzeitig bieten Softwareaktualisierungen das Potential, dass die hochqualitativen, technischen Systeme mit langer Nutzungsdauer der zunehmenden Dynamik des Marktes gerecht werden. Diese Entwicklung erfordert jedoch, dass Unternehmen die Art und Weise überdenken müssen, wie zukünftige Systeme entwickelt, ausgeliefert und im Betrieb unterstützt werden. Es müssen neue Ansätze erforscht werden, welche die kontinuierliche Transformation der Systeme im Betrieb berücksichtigen. Dazu müssen sich Produkt und Serviceentwicklung, Produktion, Vertrieb und Kundensupport neu organisieren, um ein leistungsfähiges Release-Management umzusetzen. Dies erfordert neue Formen des Änderungsmanagements sowie des Testens und Validierens.

4.2.2 Herausforderungen bei der Gestaltung von Advanced Systems

Die beschriebenen Perspektiven von Advanced Systems bieten ein umfassendes Potential für Innovationen, resultieren jedoch gleichzeitig in Herausforderungen in der Planung und Entwicklung der Marktleistungen. Diese Herausforderungen gilt es durch gemeinsame Anstrengungen von Wirtschaft und Wissenschaft zu adressieren. Im Folgenden werden die diskutierten Herausforderungen zusammengefasst.

Zunehmende Entwicklungskomplexität

Die befragten Unternehmen sehen einen ungebrochenen Trend der ansteigenden Komplexität innerhalb ihrer Marktleistungen. Die Komplexitätssteigerung der Advanced Systems hat dabei mehrere Treiber. Zum einen nimmt die Interdisziplinarität der Systeme und die damit einhergehende, interne Komplexität zu. Zum anderen steigt auch die Vernetzung mit zusätzlichen, zum Teil während der Entwicklung noch unbekanntem, Systemen stetig an. Des Weiteren stellt das Zusammenspiel von Produkten und Services viele Unternehmen vor Herausforderungen. Gleichzeitig müssen die zukünftigen Systeme eine Vielzahl verschiedenste, teils widersprüchliche, Funktionen und Ziele erfüllen.

Der durch die Marktleistungen bedingte Komplexitätsanstieg in der Planung, Entwicklung, Produktion und im Betrieb der Systeme fordert eine neue Ausrichtung und Ausgestaltung der Entstehungsprozesse in den Unternehmen. Bisherige Aktivitäten, wie die Steigerung der Ressourcen und strikteres Projektmanagement, reichen zukünftig nicht mehr aus. Ein Großteil der befragten Unternehmen nimmt an, dass die aktuellen Entwicklungsprozesse für die Entwicklung der Advanced Systems nicht ausreichend sind. Einige Befragte merken an, dass evolutionäre Optimierung oder Extrapolation von bestehenden Methoden nicht zielführend ist. Die Gestaltung von unter anderem Sprunginnovationen erfordert ein gleichermaßen weitreichendes Umdenken in den damit verbundenen Entstehungsprozessen.

Durchgängiges Schnittstellenmanagement

Eine Vielzahl der Befragten sieht das Schnittstellenmanagement als eine zentrale Herausforderung im Kontext von Advanced Systems. Dabei beziehen sich die Interviewteilnehmer zum einen auf die zahlreichen Schnittstellen, welche sich in Bezug auf Prozess- und Organisationsstrukturen im Entstehungsprozess ergeben. Die Interdependenzen verschiedenster Akteure, Stakeholder, Abteilungen, Fachgebiete und Unternehmen müssen abgebildet und beherrscht werden. Zum anderen beziehen sich die Interviewteilnehmer auf die zunehmende Anzahl technischer Schnittstellen im und zum Engineering in Bezug auf die IT-Architektur. Die Anwendungsschnittstellen des technischen Systems, als auch die Vernetzung der Unternehmensarchitektur, erfordern eine kontinuierliche Weiterentwicklung, Pflege und Synchronisation. Ein Teil der Befragten sieht eine besondere Herausforderung in der Gestaltung der digitalen Durchgängigkeit innerhalb und zwischen der Organisation, den Wertschöpfungspartnern und den Advanced Systems.

Stärkere Individualisierung und Mass Customization

Als Reaktion auf die Volatilität des Marktes und dem damit einhergehend steigenden Wettbewerb werden nach Aussage der befragten Unternehmen die Marktleistungen individueller und zunehmend auf den jeweiligen Kunden zugeschnitten. Bei einer zunehmenden Variantenvielfalt können die bestehenden Skaleneffekte der Großserienfertigung in der heutigen Form nicht mehr genutzt werden. Daraus resultiert die Herausforderung, die stärkere Individualisierung unter gleichzeitigem Kostendruck auf globalisierten Märkten zu realisieren. Eine besondere Zunahme der Individualisierung wird insbesondere bei den befragten Interviewteilnehmern im Maschinen- und Anlagenbau erwartet. Obwohl der Großteil der Befragten bereits Modularisierungsansätze verfolgt, wird die kundenindividuelle ➤

Massenfertigung (Mass Customization) noch nicht weitreichend in der Planung und Entwicklung berücksichtigt.

Neben der kundenindividuellen Massenfertigung besteht das Potential, die Kunden-wahrnehmbare Individualisierung durch Software zu steigern, während die Hardwarevarianten reduziert werden. Um kundenindividuelle Funktionen oder Leistungen durch Software zu realisieren, müssen teilweise die dafür notwendigen Hardware- und Softwarekomponenten sowie die Kommunikations- und Sensortechnologien ergänzt werden. Diese Form der Individualisierung bietet laut einem Großteil der Befragten enormes Potential, wird jedoch noch nicht in der Breite angewendet. Hieraus ergibt sich ein erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich geeigneter Geschäftsmodelle und Architekturen.

Kürzere Innovationszyklen

Nach Angaben der Befragten werden vom Markt immer kürzere Innovationszyklen gefordert. Die Verkürzung der Zyklen führt zwangsläufig zu einer schnelleren Durchführung von Entwicklungsprojekten und einer Beschleunigung der Produktgenerationsfolge. Dies hat zur Folge, dass die Unternehmen die Entwicklungszeit für einzelne Markt- oder Kundenanforderungen reduzieren müssen. Als besondere Erfolgsfaktoren werden daher eine hohe Flexibilität des Unternehmens sowie eine Veränderung der Unternehmenskultur angesehen. Einige befragte Unternehmen sehen einen sich zuspitzenden Zielkonflikt zwischen dem erforderlichen Einsatz von innovativen Technologien und dem hohen Qualitätsanspruch deutscher Produkte hinsichtlich Qualität und Sicherheit. Vor diesem Hintergrund stößt das klassische Projekt- und Entwicklungsmanagement aktuell an seine Leistungsgrenzen. Dennoch betont der Großteil der Befragten, dass es nicht zielführend ist, mit unfertigen oder gar fehlerhaften Produkten am Markt aufzutreten. Es gilt, den Zielkonflikt aus kürzerer Entwicklungszeit bei gleichzeitiger hoher Entwicklungsreife und damit Produktsicherheit zu erforschen, um auch zukünftig eine schnelle Entwicklung von qualitativen und innovativen Systemen zu gewährleisten.

Erschwerend kommen die unterschiedlichen Entwicklungs- und Lebenszyklen von Software und Hardware hinzu. Eine Hardwaregeneration kann beispielsweise mit mehreren Lebenszyklen der Betriebssoftware einhergehen. Eine Vielzahl der Befragten sieht die agilen Arbeitsweisen und die damit einhergehenden asynchronen Entwicklungsiterationen im Rahmen der strategischen Produktplanung und Produktentwicklung bisher nur unzureichend methodisch und IT-seitig unterstützt.

Fehlende Kompetenzen

Die Entwicklung von Advanced Systems erfordert neue Kompetenzen und Qualifikationen in bestehenden Disziplinen sowie die Integration weiterer Fachbereiche. Ein Großteil der Unternehmen sieht bisher nur wenige Ingenieure auf die mit den Advanced Systems verbundene Komplexität ausreichend vorbereitet. Dabei beziehen sich die Unternehmen sowohl auf die aktuellen Mitarbeiter als auch auf Berufseinsteiger und Hochschulabsolventen aus dem Bereich der Ingenieurwissenschaften. Die Befragten aus der Wissenschaft stimmen dieser Einschätzung mehrheitlich zu, verweisen in der Regel jedoch auf die begrenzte Regelstudienzeit. Nicht alle erforderlichen oder wünschenswerten Kompetenzen können im Studium vermittelt werden. Vor diesem Hintergrund müssen curriculare Ergänzungen und eine sukzessive Verschiebung von Schwerpunkten angegangen werden. Dabei muss jedoch, wie ein Großteil der Befragten betont, die fachliche Tiefe der bewährten Ingenieurausbildung in Deutschland erhalten bleiben. Diesen Widerspruch zu lösen ist eine Herausforderung.

Neben der Ausbildung betonen die Befragten die zunehmende Relevanz der beruflichen Weiterbildung und des notwendigen Konzepts des lebenslangen Lernens. Hier müssen geeignete Weiterbildungsmodelle und -angebote erarbeitet werden, um die große Anzahl der heute in den Unternehmen beschäftigten Mitarbeiter mitzunehmen und auf die Entwicklung von Advanced Systems vorzubereiten.

Erfüllung aller Gesetzesanforderungen

Nach einem Großteil der Befragten wird der Umgang mit Gesetzesanforderungen und Regularien in Zukunft einen Großteil der Entwicklung prägen. Die Perspektiven der Advanced Systems bergen vollkommen neue Herausforderungen im Vergleich zu den bestehenden Marktleistungen. Im Kontext der Autonomie nennen die Befragten z. B. juristische Haftungsfragen und unbekannte Anforderungen von gesetzlichen Sicherheitsprüfungen. Insbesondere der Umgang mit Entscheidungsprozessen durch nicht-nachvollziehbare KI-Algorithmen ist unklar. Die Befragten betonen, dass die Nutzung dieser Technologien viele rechtliche und ethische Fragen aufwirft und damit ein hohes, finanzielles Risiko birgt. Falls die zukünftigen Systeme sich permanent an Umgebungssituationen anpassen und dazulernen, sind die etablierten Nachweisführungen nicht mehr ausreichend. Dies ist Teil der aktuell laufenden KI-Forschung.

Die zunehmende Vernetzung geht ebenfalls mit gesetzlichen Anforderungen an die Sicherheit informationstechnischer Systeme einher. Vor dem Hintergrund der zunehmend interaktiven Lösungen sehen sich viele Befragte z. B. mit Herausforderungen hinsichtlich der Nutzung von personenbezogenen Nutzerdaten konfrontiert. Die Ausgestaltung von PSS erfordert einen neuen Umgang mit der Haftung für Leistungserbringungen und der Veränderung von Eigentums- und langfristigen Besitzverhältnissen. Daher sehen sich die Befragten mit aktuell nicht kalkulierbaren Herausforderungen durch die hohe Dynamik der Gesetze konfrontiert.

Die Gesetzesanforderungen und deren Dynamik unterscheiden sich zudem je nach Markt. Als Beispiel wird häufig auf die komplexe Homologation in der Automobilbranche verwiesen. Einige Befragten sehen eine Gefährdung der Innovationskraft in Deutschland durch eine zunehmende Regulierung, insbesondere im Vergleich zu China und USA. Die befragten Interviewteilnehmer aus der Wissenschaft teilen zwar diese Sicht, sehen aber gerade in diesem Bereich auch Wettbewerbschancen im Sinne einer sicherheitsvalidierten Technik »Made in Germany«. Dazu muss es gelingen, die Handlungsfelder Technik und Recht grundsätzlich integrativ zu betrachten, um sich frühzeitig auf die Entwicklung von Advanced Systems einzustellen und entsprechende Methoden und Werkzeuge zu entwickeln.

Sicherstellung der Systemsicherheit und -verlässlichkeit

Neben den regulatorischen Aspekten beschreibt der Großteil der Befragten ein steigendes Sicherheitsverlangen der Kunden. Diese befürchten mögliche Manipulationen durch Dritte oder den Diebstahl vertraulicher Nutzungsdaten auf Grund der zunehmenden Vernetzung der Systeme. Durch die wachsende Bedeutung der IT-Sicherheit werden regelmäßige Produktupdates durch den Kunden akzeptiert. Bereits bei Designprinzipien sollten Aspekte der Systemverlässlichkeit berücksichtigt werden. Die Systemverlässlichkeit umfasst in diesem Kontext die Systemsicherheit, Systemzuverlässigkeit, -vertraulichkeit sowie -verfügbarkeit. Solche Anforderungen führen aber unter anderem dazu, dass eine vollständige Nachverfolgbarkeit (Traceability) in die Entwicklung eingeführt werden muss. Auch die befragten Interviewteilnehmer aus der Forschung sehen eine der größten Herausforderungen in der Sicherheit der vernetzten, hochautomatisierten Systeme in soziotechnischen SoS. Hier werden umgehend grundlagenorientierte und angewandte Forschungsaktivitäten gefordert. Insbesondere gilt dies für die Absicherung komplexer, autonomer Systeme. Der notwendige Validierungsaufwand ist basierend auf dem klassischen Vorgehen nicht mehr leistbar. >

**Herausforderungen bei der Gestaltung von Advanced Systems:
Bewältigung der Entwicklungskomplexität, nach wie vor hohe Relevanz
der klassischen Herausforderungen wie kurze Innovationszyklen und
Kostendruck, zunehmende Bedeutung von regulatorischen Aspekten
wie Haftung bei autonomen Systemen**

Mit der Komplexität der zukünftigen Marktleistungen wird auch die Entwicklungskomplexität steigen. Es besteht ein kontroverses Meinungsbild, ob der Aufbau auf den bestehenden Vorgehensmodellen des Engineerings den geforderten disruptiven Innovationen gerecht wird oder eine umfassende Neuausrichtung notwendig ist. Im Gegensatz dazu wird das durchgängige Schnittstellenmanagement gemeinschaftlich als zentrale Herausforderung wahrgenommen. Die beschriebenen Schnittstellen betreffen sowohl die Prozess- und Organisationsstrukturen, die technischen Schnittstellen in der Engineering-IT-Infrastruktur als auch die Schnittstellen zwischen der Marktleistung im Betrieb und dem Unternehmen.

Mehr denn je sind die Unternehmen gefordert, den Zielkonflikt zwischen einer Steigerung der kundenwahrnehmbaren Individualisierung der Marktleistung und dem gleichzeitigen Kostendruck auf globalen Märkten zu meistern. Es fehlt an Entwurfsmethoden für Produktarchitekturen, Produktionssysteme und Wertschöpfungsnetzwerke sowie für Geschäftsmodelle. Des Weiteren stehen die befragten Unternehmen weiterhin vor der Herausforderung, kürzere Innovationszyklen bei gleichbleibend hoher Qualität zu realisieren. Dabei sind sie zusätzlich mit unterschiedlichen Lebenszyklen der Anwendungssoftware (z. B. Apps), der eingebetteten Produktsoftware (z. B. Firmware) und der Hardware (z. B. mechanisches Grundsystem) konfrontiert. Um den genannten Herausforderungen zu begegnen, sind neue Kompetenzen und entsprechende Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen erforderlich.

In Ergänzung zu den technischen Anforderungen ergeben sich neue Anforderungen in Bezug auf die Erfüllung von regulatorischen Aspekten. Dabei werden Aspekte wie 1) Haftung und Verantwortlichkeiten bei autonomen Systemen, 2) Datenschutz und Datensicherheit sowie 3) Homologation und Zulassung maßgeblich den Erfolg zukünftiger Marktleistungen beeinflussen. Neben der IT-Sicherheit stellt die Aktualisierung der zukünftigen Systeme im Betrieb neue und umfangreichere Anforderungen an die Absicherung vernetzter Systemverbünde und System of Systems. ●

4.3 Systems Engineering Komplexität managen

Die Analyse der Megatrends und die Herausforderungen der Advanced Systems zeigen auf, dass eine Anpassung und zum Teil neue Ausrichtung der Entstehungsprozesse in den Unternehmen erforderlich sind. Die zukünftigen Systeme werden durch das enge Zusammenwirken von vielen Fachgebieten wie den Ingenieurwissenschaften, den Naturwissenschaften, der Informatik, Soziologie, Psychologie und Arbeitswissenschaft entstehen. Die zunehmende Einbindung und Vernetzung der Fachgebiete sowie die damit einhergehende, steigende Komplexität in der Planung, Entwicklung, Produktion und im Betrieb der Systeme erfordern ein ganzheitliches und interdisziplinäres Systems Engineering (SE) (VGL. BILD 8).

Systems Engineering ist ein erfolgversprechender, interdisziplinärer Lösungsansatz zur Erstellung komplexer technischer Systeme und umfasst die Gesamtheit aller

Entwicklungsaktivitäten. Es erhebt den Anspruch, die Akteure in der Entwicklung komplexer Systeme zu managen. Dazu integriert es die Systemgestaltung und das Projektmanagement unter Berücksichtigung der unternehmensspezifischen Organisation [GDE+18].

Zum Zeitpunkt der Befragung wird Systems Engineering unter verschiedensten Gesichtspunkten von Hochschulen, Forschungsinstituten, Interessengemeinschaften und Unternehmen gefördert. Daher haben sich eine Vielzahl verschiedener Definitionen, Einsatzmöglichkeiten und Vorgehensmodelle des Systems Engineering etabliert. Für die Ausgestaltung des Leitbilds Advanced Systems Engineering werden daher der aktuelle Status quo und die sich abzeichnenden Entwicklungen des Systems Engineerings untersucht. ➤

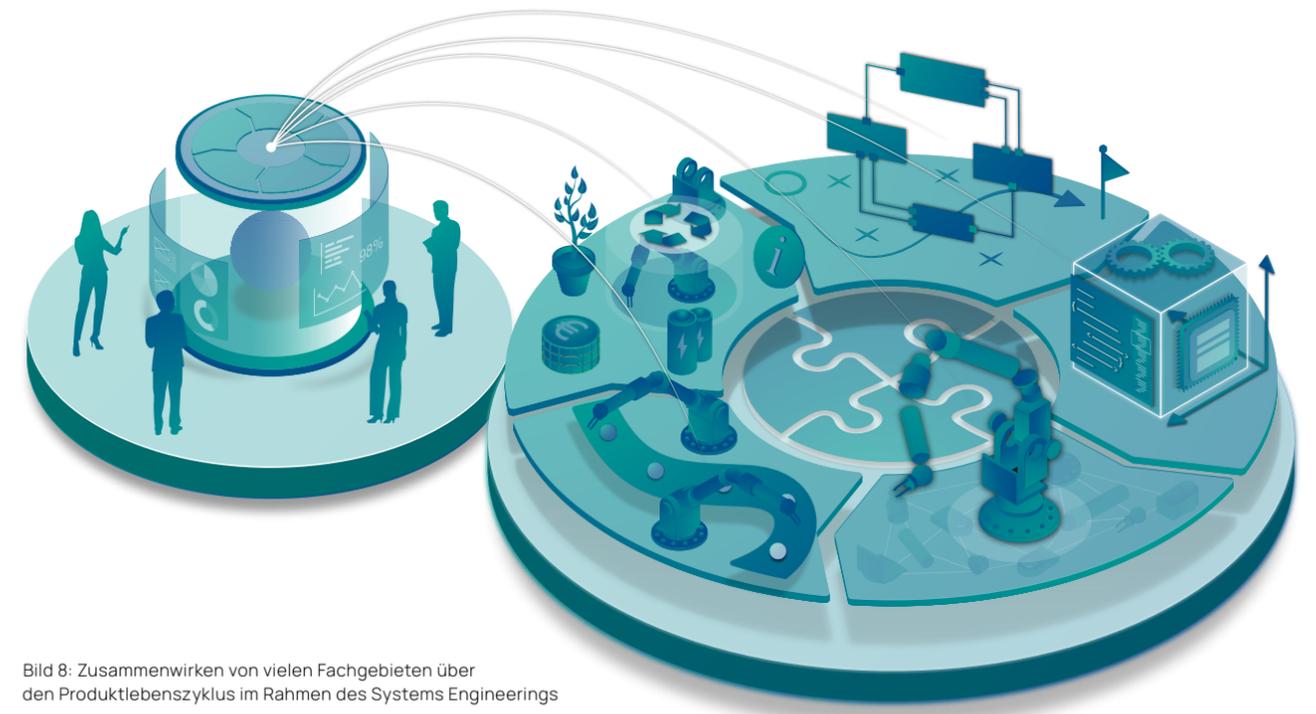


Bild 8: Zusammenwirken von vielen Fachgebieten über den Produktlebenszyklus im Rahmen des Systems Engineerings

Dazu wurden im Rahmen der Befragung die folgenden Aspekte adressiert:

- Verständnis von Systems Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.3.1)
- Mehrwert des Systems Engineerings (VGL. ABSCHNITT 4.3.2)
- Leistungsstand des Systems Engineerings in der Wirtschaft (VGL. ABSCHNITT 4.3.3)
- Einführung von Systems Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.3.4)
- Rollen im Systems Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.3.5)
- Model-Based Systems Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.3.6)

4.3.1 Verständnis von Systems Engineering

Die geführten Interviews zeigen, dass der Begriff Systems Engineering in der Praxis branchenübergreifend geläufig ist. Das Verständnis der Interviewpartner ist dabei jedoch sehr heterogen. Insbesondere die Luft- und Raumfahrt sowie die Automobilindustrie orientieren sich stark an dem Verständnis des INCOSE (International Council on Systems Engineering) (VGL. INFOBOX 6). Ein Großteil der Befragten nutzt oder verweist auf die grundlegende Definition des internationalen Dachverbandes für Systems Engineering. Davon ausgehend variieren allerdings der gelegte Fokus sowie die konkrete Ausgestaltung. Für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus gilt zudem, dass der Begriff Systems Engineering weniger verbreitet ist. Es werden zwar wesentliche Aspekte des Systems Engineerings angewendet, jedoch nicht so bezeichnet (z. B. im Bereich des Anforderungsmanagements oder des Risikomanagements). Das Verständnis der Befragten wird im Folgenden näher beschrieben.

INFO 6 Definition Systems Engineering nach INCOSE

»Systems Engineering ist ein transdisziplinärer und integrativer Ansatz, um die erfolgreiche Realisierung, Nutzung und Außerbetriebnahme von technischen Systemen zu ermöglichen. Dabei werden systemorientierte Prinzipien und Konzepte sowie wissenschaftliche, technologische und Managementmethoden verwendet.« – INCOSE (VGL. [INT20])

Der Großteil der Befragten versteht Systems Engineering als Ansatz für die interdisziplinäre Zusammenarbeit. Mehrere Befragten sprechen von Interdisziplinarität und erfolgreicher interdisziplinärer Zusammenarbeit, wenn durch die effektive und effiziente, übergreifende Zusammenarbeit technischer Disziplinen (Mechanik, Elektrik/Elektronik, Software, Hydraulik etc.) ein Mehrwert geschaffen wird. Im Gegensatz zur INCOSE-Definition ist in den befragten Unternehmen das Verständnis von Systems Engineering als transdisziplinärer Ansatz kaum ausgeprägt. Ein transdisziplinärer Ansatz unterscheidet sich von einem interdisziplinären Ansatz, in dem sich der interdisziplinäre Ansatz hauptsächlich auf die Arbeit über mehrere Disziplinen hinweg konzentriert, wobei jede Disziplin ihre eigenen Methoden und Ansätze anwenden kann. Ein einheitliches Verständnis, dass zwei oder mehr Disziplinen ineinander übergehen und damit einen neuen ganzheitlichen, transdisziplinären Ansatz zur Problemlösung bilden können, existiert nicht.

Systems Engineering wird von vielen Befragten als durchgängiger Ansatz zur Systementwicklung von den Anforderungen bis zum »End-of-Life« wahrgenommen. Im Systems Engineering wird somit den gesamten Lebenszyklus der zu entwickelnden Marktleistung betrachtet. Eine Vielzahl der Befragten aus der Wirtschaft orientiert sich bei der Beschreibung der Lebenszyklusphasen an dem V-Modell. Allerdings fokussiert das hier häufig genannte, klassische V-Modell nach VDI 2206 nur die eigentliche Entwicklungsaufgabe. Gerade in größeren Unternehmen existiert typischerweise ein spezifisch

angepasstes V-Modell, welches im Detail unterschiedlich ausgeprägt ist. Einzelne Befragte erweitern den Betrachtungshorizont des V-Modells und integrieren z. B. die strategische Planung vor den Entwicklungsauftrag, in dem die Markt- und Kundenanforderungen spezifiziert werden. Unabhängig von der konkreten Ausprägung des V-Modells besteht die Ansicht, dass Systems Engineering viele etablierte Konzepte, die bislang voneinander losgelöst waren, zu einem durchgängigen Ansatz verbinden muss. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Befragten dem Thema Anforderungen eine besondere Bedeutung für das Systems Engineering zusprechen. Im Vordergrund stehen dabei insbesondere die Identifikation und Analyse von Anforderungen unter Berücksichtigung aller relevanten Stakeholder, die umfassende Dokumentation sowie die durchgängige Nachverfolgung. Viele Befragte aus der Wissenschaft sehen im Systems Engineering deutlich mehr als nur das Anforderungsmanagement, während weite Teile der Industrie Systems Engineering weitestgehend mit dem Anforderungsmanagement gleichsetzen. Diese Diskrepanz in den Einschätzungen zeigt sehr deutlich, dass die Forschung stärker anwendungsorientierte Lösungen erarbeiten muss, um das Verständnis für Systems Engineering zu erweitern und mögliche Potentiale aufzuzeigen.

Obwohl der Fokus der befragten Unternehmen auf der Entwicklungsphase liegt, sind die meisten Befragten zumindest sensibilisiert für die Betrachtung der nachgelagerten Lebenszyklusphasen wie Produktion, Distribution, Betrieb, Service und Rücknahme. Aus Sicht einiger Befragten besteht hier dringender Handlungs- und Forschungsbedarf, um die Produktionssystementwicklung im Kontext des Systems Engineerings konsequenter zu integrieren. Die Integration der kunden- und marktgerechten Entwicklung von Dienstleistungen wird im Kontext des Systems Engineerings von den befragten Unternehmen bisher kaum berücksichtigt. Vor diesem Hintergrund ergibt sich der Forschungsbedarf hinsichtlich der integrativen Entwicklung von Produkt, Produktionssystem und Service, um eine transdisziplinäre Gestaltung der zukünftigen Marktleistungen zu forcieren.

Bei dem Großteil der befragten Unternehmen herrscht das Verständnis, dass Systems Engineering die Ablauforganisation und Prozesse (P, englisch process), Methoden (M, englisch method) und IT-Werkzeuge (T, englisch

tools) betrifft. Gerade Großunternehmen bilden daher zunehmend PMT-Teams oder Abteilungen mit dem Ziel, eine interne Dienstleistungsstelle zur Unterstützung der Entwicklungsabteilungen zu etablieren (VGL. BILD 9). Einige Befragte ergänzen diese PMT-Tätigkeitsschwerpunkte um die Gestaltung der Ablauf- und Aufbauorganisation (O, englisch organization). Insbesondere die Veränderung der Ablauf- und Aufbauorganisation wird aber gleichzeitig als große Herausforderung gesehen, da es hier zu erheblichen Widerständen in den Unternehmen kommen kann. Ein wesentliches Ziel der Systems-Engineering-PMTO ist laut der Befragten die Sicherstellung der Kollaboration sowohl innerhalb des Unternehmens als auch über die Unternehmensgrenzen hinaus. Unternehmensintern gilt es, die Abhängigkeiten zwischen den Unternehmensbereichen sowie die gemeinsame Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Unternehmensbereiche zu optimieren. Die unternehmensexterne Perspektive erweitert diesen Ansatz auf alle relevanten Stakeholder vom Entwicklungspartner über den Kunden zum Service und darüber hinaus. Die Minderheit der Befragten verbindet die Systems Engineering die PMT-Tätigkeitsschwerpunkte mit der zwingend erforderlichen Gestaltung von Informationsstandards (I, englisch information) im Engineering. Die Standardisierung von Informationen (z. B. im Kontext von Teilebezeichnungen) oder Austauschformaten zur Beschreibung von technischen Systemen stellt in den befragten Unternehmen insbesondere in der interdisziplinären Zusammenarbeit eine wesentliche Herausforderung dar.

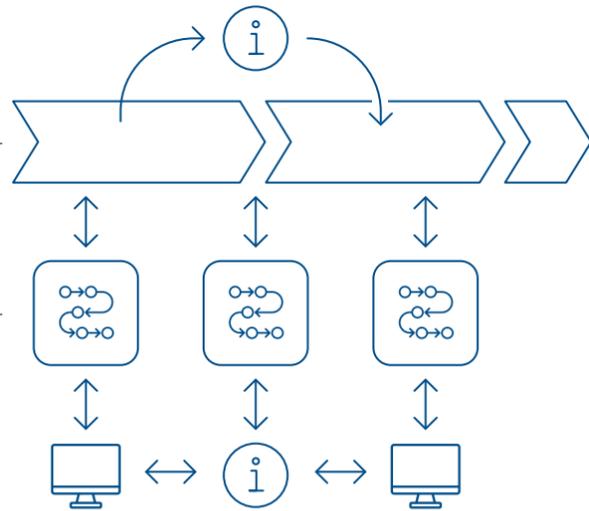
Ein entscheidender Aspekt zur Umsetzung von durchgehenden SE-Konzepten ist ein zielführendes Verhältnis von Nutzen zu Aufwand bei den PMTIO-Tätigkeitsfeldern. Vor diesem Hintergrund müssen die Wirtschaftlichkeit und die Akzeptanz von dedizierten PMTIO-Dienstleistungsstellen für das Engineering evaluiert werden. >

P

Prozesse beschreiben, was in welcher Reihenfolge geleistet wird.

I

Informationsstandards unterstützen die zielgerichtete Nutzung und Weitergabe von Information zwischen Aktivitäten eines Prozesses, sowie die Interoperabilität von IT-Systemen.



M

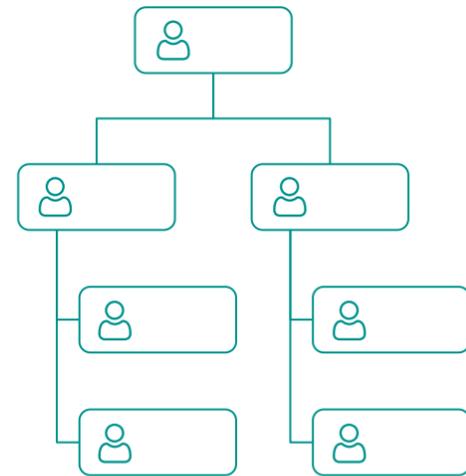
Methoden unterstützen die Prozessdurchführung und beschreiben, wie eine Aufgabe ausgeführt werden kann.

T

IT-Werkzeuge unterstützen die Ausführung der Prozesse und Methoden.

O

Die **Aufbauorganisation** beschreibt die Hierarchien und den Fluss von Direktiven in der Organisation.



→ **PMTIO** steht für Prozesse, Methoden, IT-Werkzeuge, Informationsstandards und Organisation. Gerade Konzerne bilden PMTIO-Teams, um das Systems Engineering zu gestalten.

Bild 9: Tätigkeitsfelder einer PMTIO-Dienstleistungsstelle für das Engineering

Verständnis von Systems Engineering: Viele halten Systems Engineering für ein potentiell mächtiges Werkzeug, die Vorstellungen sind aber eher vage.

Der Begriff Systems Engineering (SE) ist branchenübergreifend geläufig. Viele verbinden SE mit Großprojekten der USA wie dem Apollo-Programm. Das Verständnis ist sehr heterogen. Der Großteil der Befragten assoziiert mit Systems Engineering die fachgebietsübergreifende Zusammenarbeit bei der Entwicklung von komplexen multidisziplinären Produkten. Ein Einsatz in späteren Phasen der Entstehung wie der Produktionssystementwicklung (Fertigungsplanung) sowie die integrative Betrachtung von Produkt, Produktionssystem und Dienstleistung sind nicht etabliert. ●

4.3.2 Mehrwert des Systems Engineerings

Viele Befragte aus der Wirtschaft erhoffen sich verschiedene Nutzenpotentiale durch den Einsatz von Systems Engineering. Im Kern verfolgen die Unternehmen eine Verbesserung der Qualität sowie eine Reduktion von Kosten und Zeit. Wie diese Verbesserungen aus Sicht der Befragten erreicht werden können, wird im Folgenden beschrieben.

Verbessertes Systemverständnis

Einen signifikanten Nutzen sehen nahezu alle Befragten aus Wirtschaft und Wissenschaft in einem verbesserten, gemeinsamen Systemverständnis der involvierten Stakeholder und Disziplinen, welches durch Systems Engineering gefördert wird. Hieraus ergeben sich drei wesentliche Vorteile:

1. Identifikation von Fehlern: Das verbesserte Systemverständnis ermöglicht das frühzeitigere Erkennen von Risiken und Fehlern. Gemäß der Rule of Ten führt die frühzeitige Identifikation und Behebung von Fehlern zu erheblichen Einsparungen bei den Kosten und der Entwicklungszeit. Die eingesparten Kosten gehen dabei über die reinen Entwicklungskosten hinaus, da auch Fertigungs- oder Betriebskosten durch frühzeitig erkannte Fehler reduziert werden können. Bestimmte Fehler in der grundlegenden Systemarchitektur können später unter Umständen nicht mehr behoben werden. Sie reduzieren demnach die Qualität signifikant.

2. Parallelisierung von Aktivitäten: Ein verbessertes Systemverständnis kann die Parallelisierung von Entwicklungsaktivitäten und die Zusammenarbeit während des Entwurfs unterstützen. Dabei fordert und fördert das Systems Engineering die Kommunikation zwischen den verschiedenen Stakeholdern im Entwicklungsprozess durch ein gemeinsam beschriebenes Systemverständnis sowie durch klare Schnittstellen zwischen den verschiedenen Prozessschritten und Disziplinen. Ohne klare Schnittstellen ist die angestrebte Parallelisierung und die damit verbundene Sicherung der Konsistenz der Entwicklungsaktivitäten laut vieler Interviewteilnehmer kaum möglich, da unter anderem die verschiedenen Disziplinen in unterschiedlich langen Zyklen arbeiten und dennoch konsistente Ergebnisse liefern müssen. Ein häufig genanntes Beispiel ist der Vergleich der langen Änderungszyklen inklusive Beschaffungszeiten für Werkzeuge in der Mechanik gegenüber den kurzen Iterationen bei der Entwicklung von zugehöriger Software.

3. Gestaltung innovativer und kundenorientierter Lösungen: Einzelne Befragte erwarten zudem eine Steigerung der Innovationskraft auf Basis eines verbesserten Systemverständnisses. Dabei bieten Tätigkeiten wie die Systemanalyse, Architekturgestaltung und Trade-off-Studien die Möglichkeit, Verbesserungspotentiale zu erkennen und diese schneller auszuschöpfen. Gleichzeitig wird die Rolle des Systems Engineerings in Bezug auf die Kollaboration und disziplinübergreifende Zusammenarbeit hervorgehoben. Mit einem gemeinsamen Systemverständnis der Marktleistung können die verschiedenen Abteilungen koordiniert an dem übergeordneten Ziel arbeiten, um das eigentliche Nutzenversprechen einer Marktleistung zu realisieren. Dabei heben einige Befragte hervor, dass mittels Systems Engineerings das globale Optimum der Kundenlösung erreicht werden kann, während aktuell viele Abteilungen nach dem lokalen Optimum ihrer Teillösung streben.

Rückverfolgbarkeit (Traceability) und Transparenz

Viele Befragten erwarten, dass Systems Engineering einen erheblichen Beitrag zur Verbesserung der Transparenz in der Produktentwicklung leistet. Durch die gleichzeitige Dokumentation von Entwicklungsentscheidungen und der technischen Zusammenhänge können auch noch in späteren Phasen Änderungen transparent nachvollzogen werden. So wird zum einen dokumentiert, warum Entscheider zu bestimmten Ergebnissen gekommen sind. Zum anderen können die Auswirkungen von notwendigen Änderungen auf Anforderungen und Stakeholder aufgrund der Verknüpfung aller wichtigen Informationen schneller abgeschätzt werden.

Diese Rückverfolgbarkeit der Zusammenhänge und Beziehungen zwischen Artefakten des Entwicklungsprozesses (z. B. Anforderungen, Systemelementen, Test oder Entscheidungsträgern) wird als Traceability bezeichnet. Die Rückverfolgbarkeit durch vernetzte Entwicklungsartefakte ist insbesondere in der Medizintechnik, Luft- und Raumfahrt und in der Automobilindustrie zunehmend durch Gesetze, Richtlinien und Standards gefordert. Nach Aussage vieler Befragten aus dem Automobilsektor unterstützt Systems Engineering beispielsweise die Qualitätssicherung für die Software im Auto mit der Norm Automotive SPICE® (vgl. INFOBOX 7). Allgemein ist eine Einhaltung von Gesetzen und Homologationsanforderungen aus Sicht vieler Befragter nur mit einem leistungsfähigen Anforderungsmanagement inklusive der Verknüpfung der Anforderungen hin zu späteren Entwicklungsartefakten möglich. Auch zur Zulassung von Medizinprodukten sind Nachweise zu führen, die durch die Anwendung von Systems Engineering deutlich effizienter geliefert werden können.

INFO 7 Automotive SPICE® nach [15504]

Das ASPICE (»Automotive Software Process Improvement and Capability dEtermination«) ist ein speziell für den Automotive-Bereich angepasstes Prozessbewertungsframework. ASPICE umfasst Referenzprozesse und ein Reifegradmodell zur Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Softwareentwicklungsprozesses. Die Vorteile eines ASPICE-konformen Prozesses sind u. a. eine bessere Planbarkeit des Entwicklungsaufwands und entstehender Kosten. Des Weiteren können einheitliche Reviews und Qualitätsüberprüfungen von Arbeitsergebnissen durchgeführt werden, um eine hohe Qualität in vorgegebener Projektlaufzeit zu erhalten. Die Einstufung der Prozesse erfolgt in die Level 0 bis 5. Durch die Bewertung jedes einzelnen Prozesses entsteht ein detailliertes Bild von den Stärken und Verbesserungspotentialen des untersuchten Projekts. Ein konsolidierter Level für ein Projekt oder ein Unternehmen existiert jedoch nicht.

Komplexitätsbeherrschung

Angesichts der rasanten Entwicklung der technischen Systeme stellt schon der Wandel von dem Mechanikzentrierten Maschinenbau zu mechatronischen Lösungen eine Herausforderung für einen Teil der befragten Unternehmen dar. Vor dem Hintergrund der zukünftigen Advanced Systems werden die Ansprüche an die Entstehungsprozesse entsprechend steigen. Einige Befragte befürchten, dass das Leistungsvermögen der etablierten Entwicklungsmethoden der zukünftigen Komplexität der technischen Systeme nicht gerecht wird. Daher sieht eine Vielzahl der Befragten Systems Engineering auch als einen Lösungsansatz zur Beherrschung der zunehmenden Komplexität. Das Systems Engineering ergänzt dabei die bestehenden Methoden der mechatronischen Systementwicklung und bietet das Potential, weitere Disziplinen (z. B. die Dienstleistungsentwicklung) über den gesamten Lebenszyklus zu integrieren. In Abhängigkeit von der Komplexität der technischen Systeme steigt ebenfalls die organisatorische Komplexität >

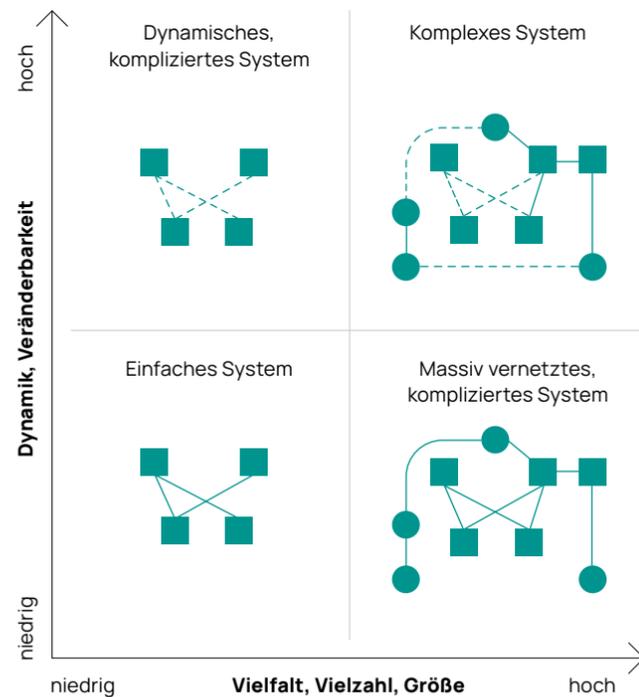


Bild 10: Systemtypen nach [HWF+12; UP95]

INFO 8 Komplexität

Komplexität ist ein im Unternehmenskontext häufig verwendeter Begriff, der auch zur Charakterisierung eines Systems genutzt wird. Der Begriff wird je nach Auffassung und Disziplin unterschiedlich definiert. Es werden sowohl die technischen Systeme als auch die Entstehung dieser als komplex bezeichnet. Im Kontext der Veröffentlichung ist ein System komplex, wenn es zum einen eine hohe Anzahl und Heterogenität von Elementen und Beziehungen aufweist und sich zum anderen sein zeitabhängiges Verhalten mit hoher Dynamik verändert. Dies gilt beispielsweise für technische Systeme, in welchen eine Vielzahl mechatronischer Komponenten interagieren, um im Betrieb häufig wechselnde Funktionalitäten zu realisieren. Entstehungsprozesse weisen dementsprechend eine hohe Komplexität auf, wenn eine Vielzahl von Mitarbeitern, Abteilungen oder Wertschöpfungspartnern involviert sind und die Aktivitäten einem kontinuierlichen Wandel unterliegen. [HWF+12; UP95]

der Marktleistungsentstehung (VGL. BILD 10: SYSTEMTYPEN NACH [HWF+12] UND [UP95]). Schon heute basiert die Entstehung von Produkten und Dienstleistungen in der industriellen Wertschöpfung auf komplexen globalen Unternehmensnetzwerken. Ein Teil der Befragten sieht sich mit besonderen Herausforderungen durch global verteilte Entwicklungsstandorte konfrontiert. Verschiedene Sprachen, Zeitverschiebung und die unterschiedlichen, kulturellen Einflüsse in Kommunikation und Kooperation werden als Komplexitätstreiber beschrieben. Des Weiteren steigt die organisatorische Komplexität durch das zunehmende Zusammenwirken der erforderlichen Disziplinen. Vor diesem Hintergrund sieht ein Teil der Befragten ein Potential, die Methoden des Systems Engineering für die Beherrschung der prozessualen und organisatorischen Aspekte im Unternehmen zu nutzen. Einzelne Befragte nutzen Systems Engineering bereits für die Modellierung der gesamten Unternehmensarchitektur mit den entsprechenden Prozessen, Daten und Akteuren.

Insgesamt herrscht Einigkeit unter den Befragten, dass Systems Engineering einen besonderen strategischen Stellenwert einnimmt, um zukünftig alle Aktivitäten der Leistungserstellung besser zu managen. Dementsprechend existiert bei vielen befragten Unternehmen die Erwartungshaltung, mittels Systems Engineering die Leistungsfähigkeit der Entwicklung innovativer Marktleistungen zu erhöhen. Die Forschung muss hier einen entsprechenden Beitrag leisten, um dieser Erwartungshaltung gerecht zu werden. Insbesondere gilt es zu evaluieren, in welchem Rahmen Systems Engineering als Ansatz zur Unternehmenstransformation genutzt werden kann und welche Schnittstellen zwischen den Natur-, Geistes- und Sozialwissenschaften notwendig sind.

Mehrwert von Systems Engineering: Systems Engineering fördert das gemeinsame Systemverständnis. Das ist die Voraussetzung für die professionelle Entwicklung der multidisziplinären Systeme von morgen.

Durch Systems Engineering erhoffen sich die Unternehmen ein verbessertes Systemverständnis, um beispielsweise Inkonsistenzen und Fehler frühzeitig zu identifizieren, die Entwicklungsaktivitäten zu parallelisieren und innovativere Kundenlösungen zu gestalten. Weitere Nutzenpotentiale des Systems Engineerings werden insbesondere in der Rückverfolgbarkeit der Zusammenhänge und Beziehungen zwischen Artefakten des Entwicklungsprozesses (Traceability) und der Verbesserung der Transparenz in der Produktentwicklung gesehen. Es herrscht die Auffassung vor, dass Systems Engineering ein erforderlicher Ansatz zur Komplexitätsbeherrschung von technischen und sozio-technischen Systemen und der verbundenen Prozesse ist und die Leistungsfähigkeit der Marktleistungsentstehung steigert. ●

4.3.3 Leistungsstand des Systems Engineerings in der Wirtschaft

Trotz der hohen Erwartungshaltung und der zahlreichen Nutzenpotentiale werden die Methoden und Werkzeuge des Systems Engineerings aktuell nur in einzelnen Pionierunternehmen bereits durchgängig über den gesamten Lebenszyklus und in verschiedenen Unternehmensbereichen genutzt. Einige Befragte berichten von einem partiellen Einsatz oder der Einführung des Systems Engineerings. Bei bereits bestehender Nutzung von Methoden des Systems Engineerings konzentrieren sich diese vorrangig auf die Anforderungsspezifikation und mit Einschränkungen auf die Architekturgestaltung.

Eine Vielzahl der befragten Unternehmen erwartet durch die durchgängige Anwendung von Systems Engineering einen Wettbewerbsvorteil. Zentrale Voraussetzung für die durchgängige Anwendung sei eine breite Akzeptanz bei den Mitarbeitern. Um diese zu erreichen, muss Systems Engineering als strategisches Leitbild in der Organisation verankert werden. Dementsprechend häufig und intensiv wird neben der Systemgestaltung und dem Projektmanagement auch die Organisationsentwicklung hin zur umfassenden Anwendung von Systems Engineering als

strategisches Zielbild für die Entwicklung diskutiert.

Der Leistungsstand der Unternehmen in Bezug auf Systems Engineering variiert branchenspezifisch. Während in der Luft- und Raumfahrtindustrie Systems Engineering schon zu großen Teilen eingesetzt wird, befindet sich die Automobilindustrie überwiegend in den Phasen der Einführung, Pilotierung und Befähigung. Dementsprechend wird Systems Engineering hier nur in Pilotprojekten oder im Rahmen einzelner Prozessschritte eingesetzt. Im Maschinen- und Anlagenbau liegt ein sehr heterogenes Bild vor. Insbesondere kleine Maschinen- und Anlagenbauer setzen zwar einzelne Aktivitäten um, bezeichnen diese jedoch nicht explizit als Systems Engineering. Wenige Befragte erwarten in ihrer Branche keine Komplexitätssteigerung der Marktleistungen und sehen daher keinen Bedarf für Systems Engineering (wie z. B. die Hersteller von Norm- und Zukaufteilen oder die Hersteller elektrischer Ausrüstungen). Vor diesem Hintergrund muss untersucht werden, was einem umfassenden, branchenübergreifenden Einsatz von Systems Engineering entgegensteht und wie die bestehenden Hürden überwunden werden können. ➤

Über alle Branchen hinweg wird deutlich, dass der Einsatz von Systems Engineering in den Projekten und Unternehmen am weitesten fortgeschritten ist, in denen hohe Projektvolumen, eine hohe Komplexität sowie hohe Anforderungen an den Entstehungsprozess vorliegen (z. B. aufgrund normativer Vorgaben wie in dem Medizinproduktegesetz). Weitere Vorteile für einen verstärkten Einsatz von Systems Engineering sehen einige Befragte auch bei Projekten mit einem hohen Neuheits- und Innovationsgrad

oder wenn die Marktleistungen für die Interaktion in einem Systemverbund qualifiziert werden muss. Insgesamt ergibt sich aus der Befragung der Unternehmen, dass einer weitreichenden Nutzung der Potentiale des Systems Engineerings noch in keiner Weise erkennbar ist. An dieser Stelle ist eine intensive Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft erforderlich, um die Unternehmen zu befähigen, die Komplexität der zukünftigen Marktleistungen und deren Entstehungsprozess zu managen.

Leistungsstand von Systems Engineering in der Wirtschaft: Abgesehen von wenigen avantgardistischen Einsätzen wie in der Luft- und Raumfahrt steht Systems Engineering erst an der Schwelle zu einer Verbreitung.

Trotz der hohen Erwartungshaltung und der zahlreichen Nutzenpotentiale ist der Leistungsstand abhängig von Unternehmensgröße und Branche im Befragungszeitraum sehr heterogen. In der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie ist Systems Engineering wesentlich etablierter als im Maschinenbau oder der Automatisierungsbranche. In Großkonzernen wird Systems Engineering tendenziell eher genutzt als in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU). Unabhängig von der Größe und der Branche fokussiert sich der Einsatz auf das Anforderungsmanagement und den Systementwurf. 

4.3.4 Einführung von Systems Engineering

Eine Vielzahl der befragten Unternehmen ist dabei, Systems Engineering einzuführen oder plant die Einführung in den nächsten Jahren. Die Einführung von Systems Engineering wird von den befragten Interviewteilnehmern sowohl aus der Wirtschaft als auch aus der Wissenschaft als ein hochanspruchsvoller Transformationsprozess angesehen. Im Folgenden werden zunächst die mit der Einführung verbundenen Herausforderungen beschrieben und anschließend genannte Erfolgsfaktoren der Einführung erläutert.

Für viele Befragten aus der Wirtschaft und Wissenschaft resultiert eine Vielzahl der Herausforderungen bei der Einführung von Systems Engineering aus der Größe und

Reichweite des Themenfelds. Folgende Befunde beschreiben die in dem Status quo erhobenen Herausforderungen aus Wirtschaft und Wissenschaft.

Die Einführung von Systems Engineering bedingt weitreichende Veränderung

Im Gegensatz zu einzelnen Technologien oder spezifischen Methoden betrifft Systems Engineering eine Vielzahl von Personen und Organisationseinheiten, sowohl innerhalb eines Unternehmens als auch darüber hinaus – beispielsweise durch Partnernetzwerke und Zuliefererketten. Dieser Vielzahl von Stakeholdern gerecht zu wer-

den, erfordert sowohl ein umfassendes Verständnis des Systems Engineerings als auch der unternehmensinternen Abläufe. Die Koordination dieses Wissens, das heute auf verschiedenste Personen in unterschiedlichen Fachbereichen verteilt ist, stellt eine Herausforderung dar. Stark verzahnte und verteilte Entwicklungsverantwortungen und unstrukturierte sowie unkoordinierte Schnittstellen erschweren laut einigen Befragten die Einführung von Systems Engineering. Über Fachbereichsgrenzen hinweg und in Wertschöpfungsnetzwerken können zudem sehr unterschiedliche Anforderungen an SE-Lösungen bestehen. Vor diesem Hintergrund muss der Einfluss des Systems Engineerings auf die bestehende Arbeitsweise und Arbeitsorganisation sowie ein geeignetes Veränderungsmanagement erforscht werden.

Die Einführung von Systems Engineering erfordert eine umfassende Qualifikation und Motivation der Mitarbeiter

Neben einer Veränderung der Arbeitsweise und Arbeitsorganisation müssen die Stakeholder über alle Unternehmensebenen vom Entwickler bis hin zur Geschäftsführung verstehen, welchen Mehrwert das Systems Engineering bietet. Eine fehlende, intrinsische Motivation stellt nach einer Vielzahl der Befragten eine enorme Hürde bei der Einführung von Systems Engineering dar. Einzelne Befragte heben hervor, dass insbesondere bei Entwicklern die Akzeptanz von Systems Engineering fehlt, welche ihre Entwicklungsaktivitäten eigenständig und ohne externe Abhängigkeiten bewältigen können. Für eine erfolgreiche Einführung von Systems Engineering sind daher die Individuen, die einzelnen Motivationen und die jeweilige Führungskraft entscheidend. Eine Vielzahl der befragten Großunternehmen beschreibt einen besonders hohen Aufwand bei der Überzeugung der mittleren Führungsebene, welche die Einführung von Systems Engineering aufgrund mangelnder Akzeptanz ausbremsen oder zumindest aus Gründen des Tagesgeschäfts nicht fördern. Einzelne Befragte weisen darauf hin, dass die mit der SE-Einführung verbundene Umstrukturierung zudem mit einem Verlust vom bestehenden Einfluss des mittleren Managements in der Linienorganisation einhergeht. Daher erfordert eine optimale SE-Aufbauorganisation eine ausgeprägte Veränderungsbereitschaft aller Akteure. Vor

diesem Hintergrund gilt es, die wesentlichen Erfolgsfaktoren und geeignete Motivatoren für die Einführung von Systems Engineering zu erforschen, welche die potentiellen Zielkonflikte zwischen einzelnen Mitarbeitern, den Organisationseinheiten und dem Gesamtunternehmen berücksichtigen.

Auch die notwendige Qualifikation der Mitarbeiter im Unternehmen stellt für viele Befragte eine Herausforderung dar. Erfahrene Mitarbeiter wie auch Absolventen haben aus Sicht der Befragten häufig nicht die notwendige SE-Expertise. Wenn erste Erfahrungen mit Systems Engineering vorliegen, sind diese häufig theoretischer Natur. Dies erschwert die aus Sicht vieler Befragter notwendige Anpassung der generischen Ansätze des Systems Engineerings an die konkreten Unternehmensbedarfe.

Die Einführung von Systems Engineering wird durch strukturelle Rahmenbedingungen beschränkt

Die Einführung von Systems Engineering beeinflusst umfassend die Aufbau- und Ablauforganisation sowie Methoden und IT-Werkzeuge. Gerade Prozesse und IT-Werkzeuge setzen zum Teil nur schwer veränderliche Rahmenbedingungen, die den Spielraum für die Einführung von Systems Engineering begrenzen. Als Gründe nennen viele Befragte z. B. normative Rahmenbedingungen oder langfristige Verträge mit Herstellern von IT-Werkzeugen. Verstärkt wird dieser Effekt aus Sicht einiger Befragten durch das kurzfristige Denken in evolutionären Produktentwicklungszyklen. Die Notwendigkeit, möglichst große Teile bestehender Produkte wiederzuverwenden, führt zu der Tendenz, dass ebenfalls die bestehenden Prozesse, Methoden und Werkzeuge wiederverwendet werden. Größere Veränderungen sind vor diesem Hintergrund schwer umsetzbar und die Einführung von Systems Engineering muss sich der Weiterentwicklung der bestehenden strukturellen Rahmenbedingungen beugen. Insbesondere die befragten Großunternehmen und Konzerne sehen es als Herausforderung an, dass Systems Engineering nicht ohne Beeinträchtigung der aktuellen Geschäftsprozesse implementiert werden kann. Eine Vielzahl der Befragten sehen sich mit dem Problem konfrontiert, dass die bestehenden 

SE-Methoden und -Prozesse nicht ohne Anpassungen auf das eigene Unternehmen übertragen werden können. Nach einigen Befragten ist für eine erfolgreiche Einführung zwangsläufig ein Wandel der gesamten Denkweise im Unternehmen erforderlich, da eine komponenten- und disziplinentorientierte Denkweise wahrscheinlich nicht zu einem langfristigen Erfolg führt. Vor diesem Hintergrund muss die prozessbegleitende Einführung und die flexible Anpassbarkeit von den Methoden und Prozessen des Systems Engineerings an verschiedene Organisationen und Projektumfelder erforscht werden. Es besteht der Bedarf für Transformationsansätze, welche bestehende Methodenbausteine zu einem geeigneten Systems-Engineering-Rahmen für die erforderliche Projektsituation kombiniert.

Der Mehrwert und die Amortisationsdauer von Systems Engineering sind bei der Einführung schwer quantifizierbar

Eine Vielzahl der Befragten betont, dass die erfolgreiche Einführung von Systems Engineering nur an projektspezifischen Kriterien gemessen werden kann. Diese Kriterien sind so projektspezifisch, dass der Erfolg in erster Linie nur durch die beteiligten Entwickler und nicht durch das Management bewertet werden kann. Gleichzeitig lassen sich verschiedene Entwicklungsprojekte aufgrund individueller Rahmenbedingungen in der Regel nur bedingt vergleichen. Einige Befragte heben hervor, dass sich Projektmetriken wie Produktqualität oder Entwicklungsdauer vor dem Hintergrund der steigenden Anforderungen der Advanced Systems nur eingeschränkt interpretieren lassen. Zudem wird die Einführung häufig aus einzelnen Entwicklungsbereichen vorangetrieben. Ohne die Unterstützung des Managements fehlen jedoch Möglichkeiten, andere Bereiche zur Mitarbeit zu bewegen. Nach Aussage einiger befragter Unternehmen wird der Mehrwert der Einführung erst mittel- bis langfristig sichtbar. Da Systems Engineering den gesamten Lebenszyklus einer Marktleistung umfasst, werden positive Auswirkungen etwa erst nach Abschluss eines kompletten Entwicklungsprojekts oder während des Betriebs erkennbar. Ein Teil der Befragten betont, dass die Aufmerksamkeit des Managements zu diesen Zeitpunkten teilweise bereits auf neuen Projekten liegt. Aus diesem Grund gilt es zu untersuchen, welchen quantifizierbaren, positiven Ein-

fluss Systems Engineering kurz-, mittel- und langfristig auf Entwicklungsprojekte sowie das Leistungspotential einer gesamten Organisation hat.

Erfolgsfaktoren für die Einführung von Systems Engineering

Einige wenige Unternehmen können bereits auf eine erfolgreiche partielle Einführung von Systems Engineering zurückblicken oder haben erste Teilziele erreicht. Im Rahmen der Befragung wurden erste Erfolgsfaktoren identifiziert, welche den Transformationsprozess unterstützen.

Für einige befragte Unternehmen ist der wichtigste Erfolgsfaktor für die erfolgreiche Einführung von Systems Engineering ein inkrementelles, evolutionäres Vorgehen. Demnach sollten einzelne Aspekte des Systems Engineerings ausgearbeitet und schrittweise im Unternehmen eingeführt und verstetigt werden. Anschließend erfolgt der nächste Schritt. Dies reduziert die Größe der Veränderung und den Kreis der betroffenen Personen. Ist der Handlungsdruck z. B. aufgrund normativer Vorgaben groß, ist ein solches Vorgehen unter Umständen schwer zu vermitteln.

Neben der inkrementellen Vorgehensweise haben die befragten Unternehmen eine projektbezogene Einführung als weiteren Erfolgsfaktor genannt. Hierbei werden die betrachteten Aspekte des Systems Engineerings in Projekte eingeführt, in denen neue Produktkonzepte entwickelt werden und damit in der Regel weniger Abhängigkeiten zu existierenden Systemen bestehen. Einzelne Befragte betonen, dass die Einführung in bestehende oder neue Projekte über zuvor definierte Stufen und eine Fokussierung auf bestimmte Themenfelder erfolgen muss (z. B. Architekturgestaltung). Die Erfolge einer gelungenen Einführung können genutzt werden, um weitere Stakeholder und Funktionseinheiten im Unternehmen zu motivieren. Zudem besteht die Möglichkeit vor einer weiteren Verstetigung erforderliche Anpassungen vorzunehmen.

Laut vielen Befragten erweist sich eine Einführung von Systems Engineering als zielführend, wenn diese gleichzeitig einen Top-down- und einen Bottom-up-Ansatz verfolgt. Bei dem Top-down-Ansatz wird die Einführung

von dem Management gesteuert, indem z. B. das Zielbild in Form einer SE-Strategie definiert wird. Dies legitimiert den Einsatz von Systems Engineering durch die Unternehmensleitung und fordert die notwendige Unterstützung und Veränderung ein. Bei einem Bottom-up-Ansatz setzen die Mitarbeiter in aktiver Mitgestaltung die Einführung von Systems Engineering um. Dieser Ansatz sorgt durch Pionierarbeit auf der operativen Arbeitsebene für die geeignete Unterstützung auf Arbeitsebene. Ein kontinuierlicher Austausch und das Zusammenspiel dieser beiden Ebenen ist unerlässlich.

Fortgeschrittene Unternehmen weisen zudem auf zwei weitere wichtige Punkte hin: Die Methoden und Ansätze des Systems Engineerings müssen auf die konkreten Bedarfe des Unternehmens zugeschnitten werden. Eine Übernahme von Lösungen ohne Anpassungen führt häufig nicht zu den gewünschten Ergebnissen, was zu reduzierter Akzeptanz führt. Nach Aussage einiger Unternehmen sollte die Anpassung bestehender Prozesse, eingesetzter Methoden und Werkzeuge durch Coaching und ein organi-

satorisches Veränderungsmanagement begleitet werden. Zudem sollte ein Zielbild für die ganzheitliche Nutzung von Systems Engineering im Unternehmen forciert werden. Wenn nur vereinzelte Organisationseinheiten Systems Engineering umsetzen, ist der nachhaltige Nutzen für das Gesamtsystem gering.

Nach den Aussagen der befragten Unternehmen sind insbesondere die inkrementelle und projektbezogene Einführung des Systems Engineerings erfolgreich und dies vor allem, wenn die Einführung durch systematische Ansätze des Veränderungsmanagements und der Organisationsentwicklung begleitet wird. Gleichwohl besteht weiterhin die Herausforderung, dass ein Einführungsprozess ein hochindividuelles Unterfangen ist, welches den verschiedensten Rahmenbedingungen unterliegt (z. B. Unternehmensgröße, Branche oder Entwicklungsziel). Vor diesem Hintergrund gilt es, leistungsfähige Konzepte zu erforschen, welche den Methodentransfer von empfohlenen oder erfolgreichen Vorgehensweisen bei der Systems Engineering Einführung unterstützen.

Einführung von Systems Engineering: Auf dem Weg zum erfolgreichen Systems Engineering sind noch viele Hürden zu nehmen, wie methodische Defizite und geringe Erfahrung im Nachweis der Wirtschaftlichkeit. Offensichtlich bewährt ist eine inkrementelle, projektbezogene Einführung.

Eine Vielzahl der befragten Unternehmen plant oder führt Systems Engineering ein. Allerdings fehlt es an Methoden für ein begleitendes Veränderungsmanagement. Gleichzeitig stehen die Unternehmen vor der Herausforderung, dass eine umfassende Qualifikation und Motivation der Entwickler und über alle Führungsebenen erforderlich sind. Des Weiteren entstehen erhebliche Kosten, um die Methoden und Prozesse des Systems Engineerings an das Unternehmen und die Projektgegebenheiten anzupassen. Wichtige Kenngrößen wie die Amortisationsdauer über die Entwicklung mehrerer Systemgenerationen hinweg sowie der nachhaltige Mehrwert einer SE-Einführung lassen sich bislang kaum fundiert quantifizieren.

Einzelne Unternehmen haben Systems Engineering teilweise erfolgreich eingeführt. Dabei hat sich insbesondere eine inkrementelle und projektbezogene Einführung bewährt. Ferner kann ein Einführungsvorhaben durch einen simultanen Top-down- und Bottom-up-Ansatz über alle Führungsebenen hinweg, eine externe Methodenunterstützung sowie begleitendes Veränderungsmanagement unterstützt werden. ●

4.3.5 Rollen im Systems Engineering

Eine unterstützende Maßnahme zur Einführung von Systems Engineering ist die Definition der Rolle des »Systems Engineers« im Unternehmen. [ALLGEMEINE ROLLEN IM ENGINEERING WERDEN IM NACHFOLGENDEN ABSCHNITT 4.5.2.1 ZUSAMMENGEFASST.] Nach Ulmer übernehmen die Mitarbeiter mit einer Rolle dynamisch ändernden und wechselnden Aufgaben [ULM19]. Demnach haben bestimmte Rollen die Autorität, spezifische Aufgaben zu erfüllen und besondere Ziele verfolgen zu können. In der Literatur sind spezifisch auf das Systems Engineering zugeschnittene Rollenprofile zu finden. Ein bekanntes Beispiel für Rollen im Systems Engineering ist der Ansatz nach Sheard, welcher 12 verschiedene Rollen des Systems Engineerings beschreibt (VGL. BILD 11) [SHE96].

Grundsätzlich ist die stark in der Wissenschaft verankerte Rolle des Systems Engineers kaum in der Praxis implementiert. Für eine Vielzahl der Befragten ist das Rollenprofil eines System Engineers nicht eindeutig oder nicht auf ihr Unternehmen übertragbar. Vielfach blieb die Frage offen, welche konkreten Aufgaben und Verantwortlichkeiten der Systems Engineer besitzt. Dennoch haben viele Befragte eine klare Vorstellung, welche notwendigen Kompetenzen und Qualifikationen erforderlich sind und welcher entsprechende Bildungsweg zielführend ist.

Hinsichtlich der Qualifikation herrscht Einigkeit unter vielen Befragten, dass ein grundsätzliches Verständnis der

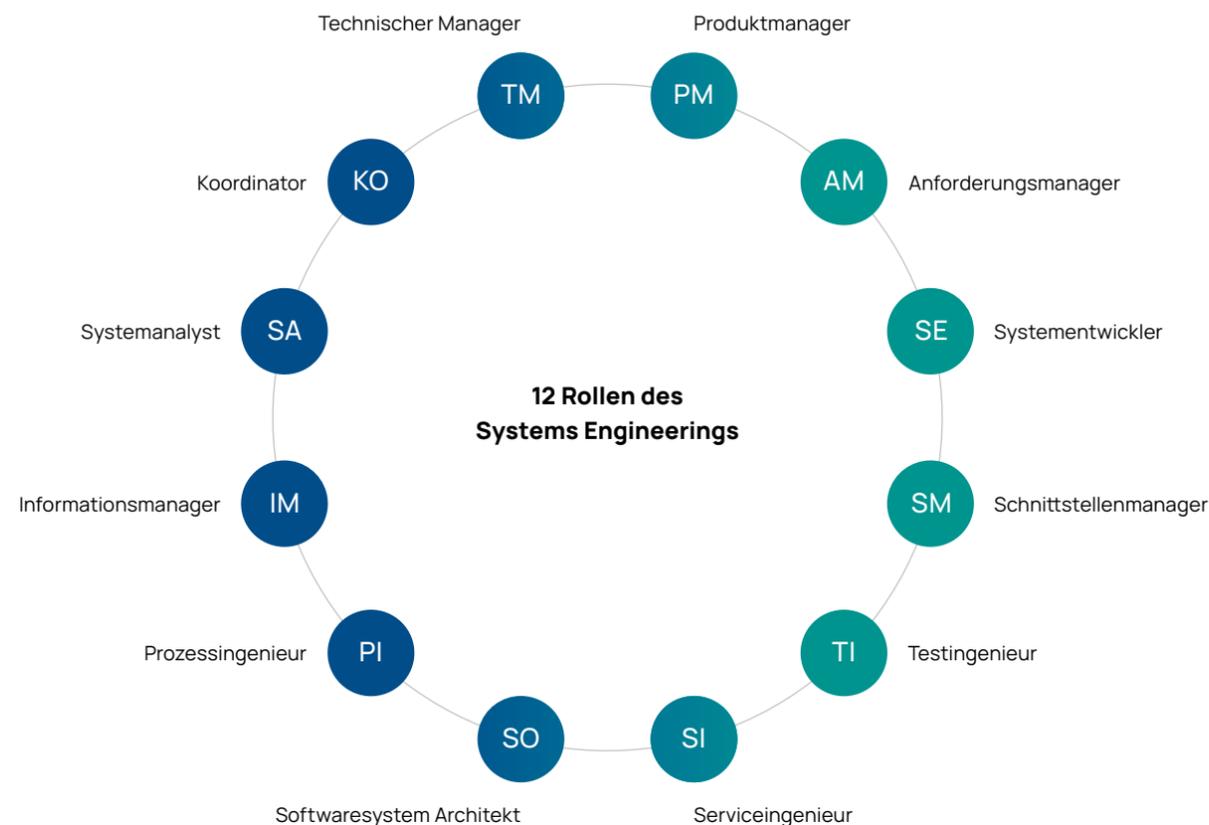


Bild 11: 12 Rollen im Systems Engineering in Anlehnung an [SHE96]

Denkweisen, Prozesse, Methoden und Tools des Systems Engineerings unerlässlich ist. Ein Systems Engineer muss die Prozesse und Methoden beherrschen und wissen, wann welche Methode wie anzuwenden ist. Ein tiefes technisches Verständnis wird nicht von allen Befragten gefordert, da nach Aussage einiger Befragter die Fachspezialisten im Unternehmen dieses Defizit ausgleichen. Eine Vielzahl der Befragten hebt die Relevanz von sozialen Kompetenzen und Soft Skills hervor. Kenntnisse in Kommunikationstechniken und im Konfliktmanagement sichern eine erfolgreiche interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Stakeholdern. Nach einigen Befragten erfordert die Rolle des Systems Engineers außerdem Führungskompetenzen und ein weitreichendes Netzwerk in der Organisation. Analysefähigkeiten und das systemische Denken sind weitere Kompetenzen nach Aussagen der Befragten. Vor diesem Hintergrund gilt es zu erforschen, warum die bestehenden Rollenprofile selbst in den Unternehmen noch nicht etabliert sind, welche bereits erste Systems Engineering Ansätze adaptieren.

Bei der Frage nach dem richtigen Bildungsweg stehen sich zwei grundsätzlich verschiedene Meinungen gegenüber. Auf der einen Seite fordern viele der Befragten ein fundiertes Studium als Fachexperte in einer Disziplin der Ingenieurwissenschaften mit anschließender Berufserfahrung im Unternehmen. Ergänzt wird dies um eine geeignete berufsbegleitende Weiterbildung zum Systems Engineer. Auf der anderen Seite wünschen sich einige der Befragten eine spezifische Ausbildung zum Systems Engineer im Rahmen des Studiums. Dementsprechend heterogen ist auch die Bewertung des bestehenden Studienangebots. Einige Befragte sehen einen zu starken Fokus auf Studiengänge, die Generalisten ausbilden und das tiefe Fachwissen vernachlässigen. Andere nehmen eine zu geringe Anzahl an Studiengängen für die Ausbildung von Systems Engineers wahr. Dieser Teil der Befragten bemängelt zudem, dass die Studiengänge des Systems Engineerings zum Teil keine Systems-Engineering-Denkweisen und -Methoden vermitteln, sondern lediglich mehrere etablierte Disziplinen vereinen (vergleichbar mit der Mechatronik). In Hinblick auf ein erfolgsversprechendes Studium von Systems Engineers ergibt sich ein besonderer Forschungsbedarf, welcher im Dialog zwischen Wissenschaft und Wirtschaft untersucht werden muss. Es gilt zunächst zu identifizieren, ob oder in welchen Teilbereichen das bestehende

Ausbildungsangebot der Erwartungshaltung der Unternehmen im Kontext des Systems Engineerings gerecht wird. Des Weiteren muss untersucht werden, welche der erforderlichen Qualifikationen und Kompetenzen durch eine universitäre Lehre vermittelt werden können und welche auf Basis von Erfahrungswissen erlangt werden müssen. In Bezug auf die bestehenden Weiterbildungsmöglichkeiten liegt laut einiger Befragter aktuell nur ein unzureichendes Angebot an Schulungen im Bereich des Systems Engineerings vor. Die Notwendigkeit von Zertifizierungen wird durch die Befragten nicht hervorgehoben.

Die Einführung und die konkrete Ausprägung der Rolle des Systems Engineers ergibt sich laut einer Vielzahl der Befragten in Abhängigkeit der Unternehmensgröße. In kleinen Unternehmen wird die Rolle des Systems Engineers häufig mit der Rolle des technischen Projektleiters gleichgesetzt. Um den Systems Engineer als eigenständige Rolle in einem mittelständischen Unternehmen einzuführen, sind laut einigen Befragten zu große finanzielle Aufwände erforderlich. Während die Relevanz einer dedizierten Rolle in KMU eher gering eingeschätzt wird, sehen die befragten Großunternehmen einen klaren Bedarf. In mitarbeiterstarken Unternehmen wird die Rolle des Systems Engineers teilweise differenzierter betrachtet und die Aufgaben werden auf verschiedene Rollen verteilt. Am häufigsten genannt werden der »Systemarchitekt«, welcher die Architektur des Systems sowie die Schnittstellen der Teilsysteme verantwortet, und der »Product Owner«, welcher stellvertretend für den Kunden Anforderungen an das System stellt und das System abnimmt. Eine weitere wichtige Rolle für große Unternehmen ist darüber hinaus der »Systems-Engineering-Methoden-Coach«. Die Verortung der entsprechenden Rollen unterscheidet sich von Unternehmen zu Unternehmen. Die Mehrheit der Befragten ist sich jedoch einig, dass nicht nur die Rollen im Systems Engineering, sondern alle Rollen – vom Entwickler bis zum Management – ein grundsätzliches und einheitliches Verständnis für die Denkweise des Systems Engineerings aufbauen müssen. ➤

**Rollen im Systems Engineering: Konsens herrscht über die Notwendigkeit der Rolle Systems Engineer und der daraus abgeleiteten Rollen wie dem Systemarchitekten. Einiges deutet darauf hin, dass die entsprechenden Qualifikationen im Sinne von »Learning by Doing« und durch berufsbe-
gleitende Maßnahmen erworben werden müssen.**

Ein klares Berufsbild eines Systems Engineers hat sich in der Wirtschaft noch nicht etabliert. Vom Systems Engineer abgeleitete Rollen sind u. a. Systemarchitekt und Verantwortlicher für Kundenanforderungen. Es herrscht kein eindeutiges Meinungsbild über die Profile, die Aufgaben und die Verantwortlichkeiten der involvierten Rollen. So wird von einem Systems Engineer eine ausgeprägte Methoden- und Sozialkompetenz erwartet, um die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten zu gewährleisten. In KMU decken sich diese Kompetenzen häufig mit der Rolle eines technischen Projektleiters. Es herrscht keine Einigkeit, ob diese Kompetenzen durch Lehre an den Hochschulen vermittelt werden können oder auf Basis von Erfahrungen in der Praxis erlangt werden müssen. ●

4.3.6 Model-Based Systems Engineering

Viele Unternehmen sehen Model-Based Systems Engineering (MBSE) als entscheidend für einen effizienten Einsatz des Systems Engineerings an. Ebenso wird es als Grundlage für die Realisierung einer umfassenden digitalen Durchgängigkeit beschrieben. Die Systemmodelle sollen zukünftig als zentrale Quelle der wesentlichen Entwicklungsartefakte zu Anforderungen, Architektur und Test dienen. Dabei sehen die befragten Unternehmen ein besonderes Potential darin, das Systemmodell als Kommunikations- und Kooperationsbasis aller beteiligten Disziplinen im Entwicklungsprozess zu nutzen. Obwohl damit eine hohe Erwartungshaltung an den Einsatz von MBSE besteht, wird es aktuell primär für die formale Modellierung von Systemarchitekturen genutzt und dabei stark mit der Systems Modeling Language (SysML) assoziiert. Einige Interviewpartner betonen, dass MBSE teilweise mit dem modellbasierten Engineering (MBE) verwechselt wird (VGL. INFOBOX 9).

INFO 9 Model-Based Engineering

Das Ziel des Model-Based Engineerings (MBE) ist es, die relevanten Aspekte eines Produktes im Entwicklungsprozess modellbasiert zu beschreiben. Im Kontext der Produktentwicklung werden komplexe Systeme mit Hilfe von digitalen Modellen entwickelt, getestet und verbessert. Verschiedene Technologien wie z. B. CAD haben sich zur Unterstützung von konstruktiven Aufgaben mittels 3D-Geometrien etabliert. Neben den etablierten Ansätzen spielt die Systemmodellierung eine zunehmend wichtigere Rolle.

Das Ziel des Model-Based Systems Engineerings (MBSE) ist es, die interdisziplinären Entwicklungsprozesse und deren Ergebnisse mit einem ganzheitlichen Systemmodell zu organisieren.

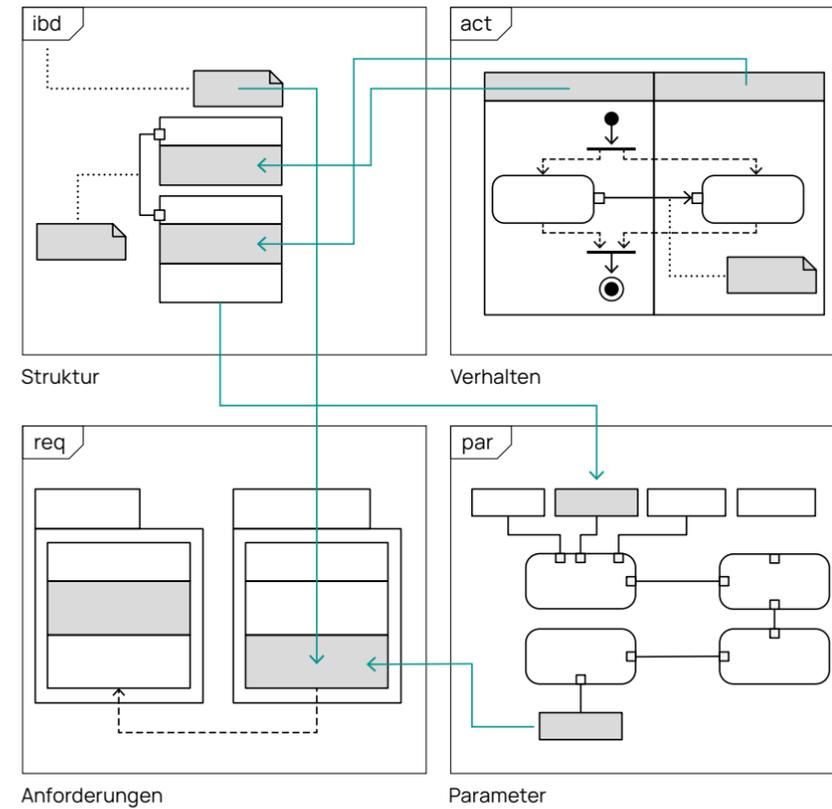


Bild 12: Die vier Aspekte der SysML nach [FMS14]

MBSE nutzt die formalisierte Anwendung der Modellierung, um die Aktivitäten zu den Systemanforderungen, zur Architektur, Analyse, Verifikation und Validierung von Beginn der konzeptuellen Phase über die Entwicklung bis zu den späten Phasen des Systemlebenszyklus zu unterstützen. Das Systemmodell ist dabei ein abstraktes Abbild eines realen oder noch zu entwickelnden Systems, welches den Entstehungsprozess mit fachdisziplinübergreifenden und konsistent-vernetzten Teilmodellen unterstützt. [DGS+18]

Viele Befragte sehen einen besonderen Nutzen in dem Ansatz, Systeme mithilfe von Modellen zu verstehen. Dabei nennen sie verschiedene Vorteile, welche durch die Einführung von MBSE ermöglicht werden. MBSE wird in den einigen befragten Unternehmen häufig verwendet,

um die Interpretation von Systeminformationen zu unterstützen und damit die wahrgenommene Systemkomplexität zu verringern. Durch die visuelle Modellierung wird die Systemspezifikation verbessert und damit die Qualität des Systementwurfs gesteigert. Die Nutzung von einheitlichen Modellen schafft zusätzliche Transparenz zwischen verschiedenen Akteuren im Entwicklungsprozess und ermöglicht eine explizite Wissensdarstellung. Durch die Verwendung einer gemeinsamen Sprache im MBSE wird die Kommunikation und Kollaboration innerhalb und zwischen Entwicklungsteams verbessert. Zusätzlich wird die digitale Durchgängigkeit in Form einer Rückverfolgbarkeit durch die Verknüpfung von Modellelementen unterstützt.

Vergleichbar mit dem Systems Engineering im Allgemeinen variiert der Leistungsstand der Unternehmen in Bezug auf MBSE branchenspezifisch. Bei den befragten Unternehmen aus der Luft- und Raumfahrtbranche >

sowie dem Fahrzeugbau findet vielfach aktuell eine schrittweise Migration von Systems Engineering zu den modellbasierten Ansätzen des MBSE statt. Diese Migration umfasst die Ausgestaltung eigener Modellierungsmethoden sowie eine weitreichende Schulung der Mitarbeiter in den erforderlichen Modellierungswerkzeugen. Dabei betont eine Vielzahl der Unternehmen, dass bei ihren Mitarbeitern größtenteils eine dokumentenbasierte Denkweise verankert ist. In diesem Kontext beschreiben die Befragten die Herausforderung, dass die Komplexität mechatronischer Systeme schwierig durch Dokumente wie den etablierten, aber an der Mechanik orientierten Stückliste abbildbar ist. Vor diesem Hintergrund besteht die Erwartungshaltung, durch modellbasierte Systembeschreibung eine Vielzahl von Dokumenten zu substituieren, in denen dann die zukünftigen Marktleistungen mitsamt ihren interdisziplinären Interdependenzen abgebildet werden können. In diesem Zusammenhang nutzen einige Unternehmen bereits formale Modellierungssprachen, welche durch unterschiedliche Abstraktions- und Detailebenen die Verständlichkeit für den Menschen unterstützen. Als De-facto-Standard für die Modellierungssprache hat sich in den Branchen der Luft- und Raumfahrt sowie des Fahrzeugbaus die Systems Modeling Language (SysML) etabliert (VGL. INFOBOX 10). In den befragten Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau, der Automatisierungstechnik und der Medizintechnik sind darüber hinaus auch weitere Modellierungssprachen verbreitet und bereits operativ eingesetzt. Als Beweggrund für die Nutzung anderer Sprachen statt der SysML wird vorwiegend die einfachere Nutzung genannt, welche sich unter anderem aus einem geringeren Sprachumfang (z. B. Business Process Model and Notation) oder der Verwendung von disziplinspezifischen Elementen (z. B. AutomationML) ergibt (VGL. BILD 12). Vor diesem Hintergrund müssen Ansätze erforscht werden, welche die Unternehmen bei der Auswahl und Adaption der bestehenden Modellierungsmethoden, -sprachen und -werkzeuge unterstützen.

INFO 10 Systems Modeling Language (SysML)

Die Systems Modeling Language (SysML) entwickelte sich als Modellierungssprache für komplexe, interdisziplinäre Systeme basierend auf der Sprache Unified Modeling Language (UML), welche wie auch die SysML von der Object Management Group (OMG) verantwortet wird. In der SysML basieren die Beschreibung und die Spezifikation von komplexen Systemen auf den folgenden vier Aspekten:

Anforderungen: Die SysML ermöglicht eine Modellierung der Systemanforderungen, welche mit weiteren Entwicklungselementen und Testfällen verknüpft werden können. In der Praxis werden für das Anforderungsmanagement jedoch oft spezialisierte Werkzeuge ohne die SysML verwendet.

Struktur: Mit Hilfe der Beschreibung der strukturellen Zusammenhänge des Systems kann die Architektur analysiert und evaluiert werden. Dadurch können Anforderungs- und Entwicklungsaspekte berücksichtigt und Alternativen bewertet werden.

Verhalten: Durch die Beschreibung der dynamischen Aspekte werden das Verhalten und die Funktionen des Systems abgebildet. Dabei können mit der SysML Aktivitäten und Abläufe sowie Interaktionen und Prozesse modelliert werden.

Parameter: Die SysML bietet die Abbildung von parametrischen Relationen zwischen den Systemelementen. Parametrische Relationen können z. B. naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten darstellen, welche die Struktur und das Verhalten von technischen Systemen determinieren.

Ein Ziel der SysML ist es, mit Hilfe dieser vier Aspekte die Systeminformationen zwischen unterschiedlichen Stakeholdern einheitlich zu kommunizieren. Dafür bietet die SysML Sprachelemente und Sichten (Diagramme), die das systematische Arbeiten und die grafische Modellierung komplexer Systeme unterstützen. Dabei ermöglicht der Sprachumfang

des Standards den Aufbau von umfangreichen und detaillierten Modellen. Gleichzeitig besteht damit die Gefahr, dass nur eine kleine Nutzergruppe von Spezialisten die SysML in der Tiefe versteht und anwendet. [FMS14]

Auch wenn der Einsatz von MBSE als sinnvoller Ansatz in der Entwicklung komplexer Systeme wahrgenommen wird, ergeben sich bei den befragten Unternehmen verschiedene Herausforderungen bei der Einführung. Die zusätzlichen Aufwände in der Modellierung werden als eines der größten Hindernisse angesehen. Vor diesem Hintergrund fehlt es aktuell an geeigneten Amortisationskonzepten für den erhöhten Modellierungsaufwand, wodurch sich eine quantitative Abschätzung der Wirtschaftlichkeit als schwierig gestaltet.

Im Hinblick auf die dem System zugrundeliegende IT-Struktur wurde vermehrt eine fehlende Integration in die bestehenden Engineering-IT-Infrastrukturen angesprochen. Es fehlen geeignete Ansätze, um die Informationen aus den formalen Modellen des MBSE (z. B. SysML-Modelle) ganzheitlich mit den etablierten Modellen des MBE (z. B. Simulationsmodelle) zu vernetzen. Insbesondere Unter-

nehmen der Luft- und Raumfahrt und Automotive OEMs entwickeln für den Einsatz von MBSE eine unternehmensspezifische Modellierungsmethodik und adaptieren daher die verwendeten Modellierungssprachen unterschiedlich. Dadurch bedingt gestaltet sich der unternehmensübergreifende Austausch von Modellen als problematisch. Die Zusammenarbeit auf Basis von Lasten- und Pflichtenheften bleibt ein etabliertes Vorgehen. Die derzeit verfügbaren MBSE-Werkzeuge sind nach Aussage der Befragten zum Großteil für Experten ausgelegt. Laut mehreren Unternehmen fehlen die erforderlichen Kompetenzen im Umgang mit den Werkzeugen und Sprachen des MBSE. Aufgrund der mangelnden Nutzerfreundlichkeit besteht ebenfalls eine fehlende Akzeptanz in der Breite, in den Aufbau von Wissen und Erfahrung mit den Werkzeugen und Sprachen zu investieren. Zusammenfassend werden für eine unternehmensweite Umsetzung von MBSE insbesondere die folgenden Forschungsbedarfe von den Befragten adressiert: Zum einen ist die Integration von MBSE in die bestehende Engineering-IT-Infrastruktur erforderlich. Zum anderen müssen die Unternehmen bei der Auswahl, Einführung und Adaption geeigneter MBSE-Ansätze unterstützt werden. Dabei gilt es insbesondere die Benutzerfreundlichkeit von Modellierungswerkzeugen und -sprachen bei gleicher Leistungsfähigkeit zu steigern.

Model-Based Systems Engineering: MBSE ist die Voraussetzung für die Durchgängigkeit des Entwicklungsgeschehens und ist somit der konzeptionelle Schlüssel für den Erfolg von Systems Engineering. Allerdings behindern eine Reihe von Defiziten wie ein fehlendes Amortisationskonzept für die Modellbeschreibung die zügige Verbreitung von MBSE.

Die Beschreib- und Beherrschbarkeit der zunehmenden Systemkomplexität sowie die Organisation des entsprechenden, interdisziplinären Entwicklungsprozesses auf Basis eines ganzheitlichen Systemmodells kommt durch den Begriff Model-Based Systems Engineering (MBSE) zum Ausdruck. Damit einher geht eine hohe Erwartungshaltung nach einem durchgängigen Entwicklungsgeschehen. MBSE wird aktuell primär nur für die formale Modellierung von Systemarchitekturen genutzt. Obwohl sich die Systems Modeling Language (SysML) als De-facto-Standard etabliert hat, muss in der Regel eine unternehmensspezifisch angepasste Modellierungsmethode eingeführt werden, um die systemischen Zusammenhänge vollständig zu erfassen. Weitere Hürden bei der Einführung von MBSE in der heutigen Form sind die fehlenden Amortisationskonzepte für den erhöhten Modellierungsaufwand, die unzureichende Benutzungsfreundlichkeit der IT-Werkzeuge und die mangelhafte Integration in die bestehende Engineering-IT-Infrastruktur. ●

4.4 Advanced Engineering Engineering neu denken

Neben dem interdisziplinären und ganzheitlichen Systems Engineering entwickeln sich kontinuierlich neue technische und methodische Ansätze im Engineering. Advanced Engineering berücksichtigt die Prozesse, Methoden und Werkzeuge sowie die Arbeitsorganisation, um etablierte Engineering-Ansätze z. B. mit Kreativität, Agilität und Digitalisierung neu zu denken (VGL. BILD 13).

Im Fokus des Advanced Engineerings stehen aktuell aufstrebende Technologien wie Künstliche Intelligenz zur Unterstützung der Entwicklungsaktivitäten und erfolgversprechende Methoden und Kollaborationsmodelle wie die agile Arbeitsweise. Rasante methodische und techno-

logische Fortschritte führen kontinuierlich zu Innovationen in der Marktleistungsentstehung. Für die Ausgestaltung des Leitbilds Advanced Systems Engineering wird daher der aktuelle Status quo und die sich abzeichnenden Entwicklungen des Advanced Engineerings untersucht. Um ein einheitliches Verständnis der wichtigen Themen und Entwicklungen zu gewinnen, wurde die Leistungsstandserhebung anhand der folgenden Strukturierung durchgeführt:

- Digitale Technologien im Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.4.1)
- Innovative Methoden im Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.4.2)



Bild 13: Advanced Engineering: etabliertes Engineering mit Kreativität, Agilität und Digitalisierung neu denken

4.4.1 Digitale Technologien im Engineering

Unter digitalen Technologien wird die technologie-basierte Unterstützung der Entstehungsprozesse mithilfe der Digitalisierung zusammengefasst. Es bezeichnet die durchgängige Nutzung digitaler Werkzeuge im Produktentwicklungs- und Produktionsprozess sowie die weitgehende Verwendung von digitalen, automatisierten Prozessen. Die hierzu genutzten digitalen Technologien basieren unter anderem auf der digitalen Durchgängigkeit über vernetzte IT-Werkzeuge und einer zunehmenden Virtualisierung der Entwicklungsaktivitäten. Zudem wird das ganzheitliche Management der Produktdaten von der Planung bis zur Validierung und Produktnutzung durch den Einsatz von intelligenten Assistenzsystemen unterstützt.

Im Rahmen des Leistungsstands wurden folgende Themenfelder beleuchtet:

- Digitale Durchgängigkeit und Produktlebenszyklusmanagement (VGL. ABSCHNITT 4.4.1.1)
- Digitale Zwillinge und Betriebsdatennutzung im Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.4.1.2)
- Künstliche Intelligenz und Assistenzsysteme (VGL. ABSCHNITT 4.4.1.3)

4.4.1.1 Digitale Durchgängigkeit und Produktlebenszyklusmanagement

Die Vision der digitalen Durchgängigkeit beschreibt einen durchgängigen Informationsfluss zwischen allen wertschöpfenden Aktivitäten im Unternehmen (VGL. INFOBOX 11). Dieser Informationsfluss erfordert eine Vernetzung der IT-Systeme. Die Verfügbarkeit der Informationen bietet das Potential, die einzelnen Aktivitäten der Marktleistungsentstehung kontinuierlich zu optimieren. Vor diesem Hintergrund wird die digitale Durchgängigkeit von vielen Unternehmen als entscheidender Erfolgsfaktor angesehen. Die befragten Unternehmen nennen verschiedene Vorteile einer Vernetzung und Rückverfolgbarkeit zwischen den Daten, Modellen und Informationen durch die Schaffung einer digitalen Durchgängigkeit. Eine erhöhte Transparenz bietet Effizienzvorteile im Änderungsmanagement und bei der Fehleridentifikation. Des Weiteren vereinfacht eine digitale Durchgängigkeit die Nachweisfähigkeit und das systematische Arbeiten. Die digitale Durchgängigkeit wird als Katalysator für die Automatisierung von Prozessen sowie für eine disziplin- und lebenszyklusübergreifende Dokumentation wahrgenommen. Laut mehrerer Befragten bietet die Vernetzung von Informationen über mehrere Produktgenerationen hinweg und die Vernetzung mit Daten aus der Produktnutzung besondere Potentiale. Dadurch können z. B. Erkenntnisse für die Entwicklung der nächsten Produktgenerationen abgeleitet werden. Einzelne Befragte nutzen bereits vernetzte Produktdaten für die Entwicklung neuer Produktgenerationen. Der Einsatz erfolgt derzeit jedoch nicht systematisch und lediglich punktuell, sodass die vollständigen Potentiale im Einsatz von bestehendem Produktwissen nicht ausgenutzt werden. >

Eine Vielzahl der befragten Unternehmen befindet sich aktuell in einem Transformationsprozess hin zu einer umfassenden Durchgängigkeit. Der Großteil der Befragten bestätigt, dass aktuell jedoch vermehrt vereinzelte Inselösungen in den Unternehmen zu finden sind. Einzelne Unternehmen setzen bereits Unterstützungssysteme ein, welche modellierte Arbeitsabläufe automatisieren. Bei einer Vielzahl der Befragten werden die verschiedenen IT-Systeme über lose und teilweise manuelle Schnittstellen gekoppelt.

INFO 11 Digitale Durchgängigkeit

Von der initialen Planung bis zum Ende des Lebenszyklus einer Marktleistung entsteht eine Vielzahl von Artefakten wie Daten, Modelle und Informationen. Diese Artefakte entstehen in den verschiedenen Disziplinen in unterschiedlichen IT-Systemen und zunehmend über Entwicklungsstandorte sowie Unternehmensgrenzen hinweg [SBA+14]. Im Rahmen des Entstehungsprozesses entsteht zunehmend der Bedarf, die Daten, Modelle und Informationen auf vielfältige Art und Weise miteinander zu vernetzen, zu verändern und zu integrieren. In Hinblick auf Zertifizierungen ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Dokumentation sowie den auf den Daten ausgeführten Operationen.

Die Vision der digitalen Durchgängigkeit beschreibt einen durchgängigen Informationsfluss zwischen allen Aktivitäten im Entstehungsprozess und der Vernetzung aller erforderlichen Daten und Modelle. Die Vernetzung der Artefakte bietet das Potential, dass die richtigen Informationen zur richtigen Zeit in der richtigen Qualität am richtigen Ort vorliegen. Sowohl eine wohldefinierte Informationslogistik als auch der Grad der digitalen Durchgängigkeit sind damit entscheidende Effizienzfaktoren der digitalen Technologien [SBM+13].

Die nahtlose Integration sämtlicher Informationen wird im Kontext des Engineerings und insbesondere in der Produktentwicklung mit dem Produktlebenszyklusmanagement (PLM) assoziiert. Einige der Befragten verstehen PLM-Aktivitäten als das durchgängige Management von Daten und Modellen über verschiedene IT-Systeme mitsamt der Verknüpfung der Methoden, Prozesse und Organisationsstrukturen (VGL. BILD 14). Eine Vielzahl der Befragten verbindet mit PLM jedoch nur eine integrierende IT-Plattform für Entwicklungsdaten. Damit ist das PLM in vielen Unternehmen zumeist auf das engere Verständnis des Produktdatenmanagements (PDM) eingeschränkt. Während sich das PDM auf die Sicherung, Versionierung und Bereitstellung von produktbezogenen Daten begrenzt, erweitert PLM dieses Konzept um eine nahtlose Integration sämtlicher Informationen im Lebenszyklus der Marktleistung (VGL. INFOBOX 12).

Die wesentlichen Potentiale des Einsatzes von PLM werden durch die Befragten wie folgt beschrieben: Ein informationstechnisch durchgängiges und methodisch integriertes PLM gilt als Grundvoraussetzung für die Entwicklung der Marktleistungen von morgen. So wird beispielsweise eine erleichterte evidenzbasierte Entscheidungsfindung ermöglicht, weil die Menge der verfügbaren Informationen und deren Zugänglichkeit zunimmt. Das große Potential besteht zudem in einer vereinfachten Integration von Daten aus der Nutzungsphase und über verschiedene Produktgenerationen hinweg für eine schnelle Anpassung an die Marktbedürfnisse. Diese Integration wird teilweise sogar als Befähigung der Unternehmen zur Entwicklung neuer Wertschöpfungsprozesse und neuer Geschäftsmodelle angesehen.

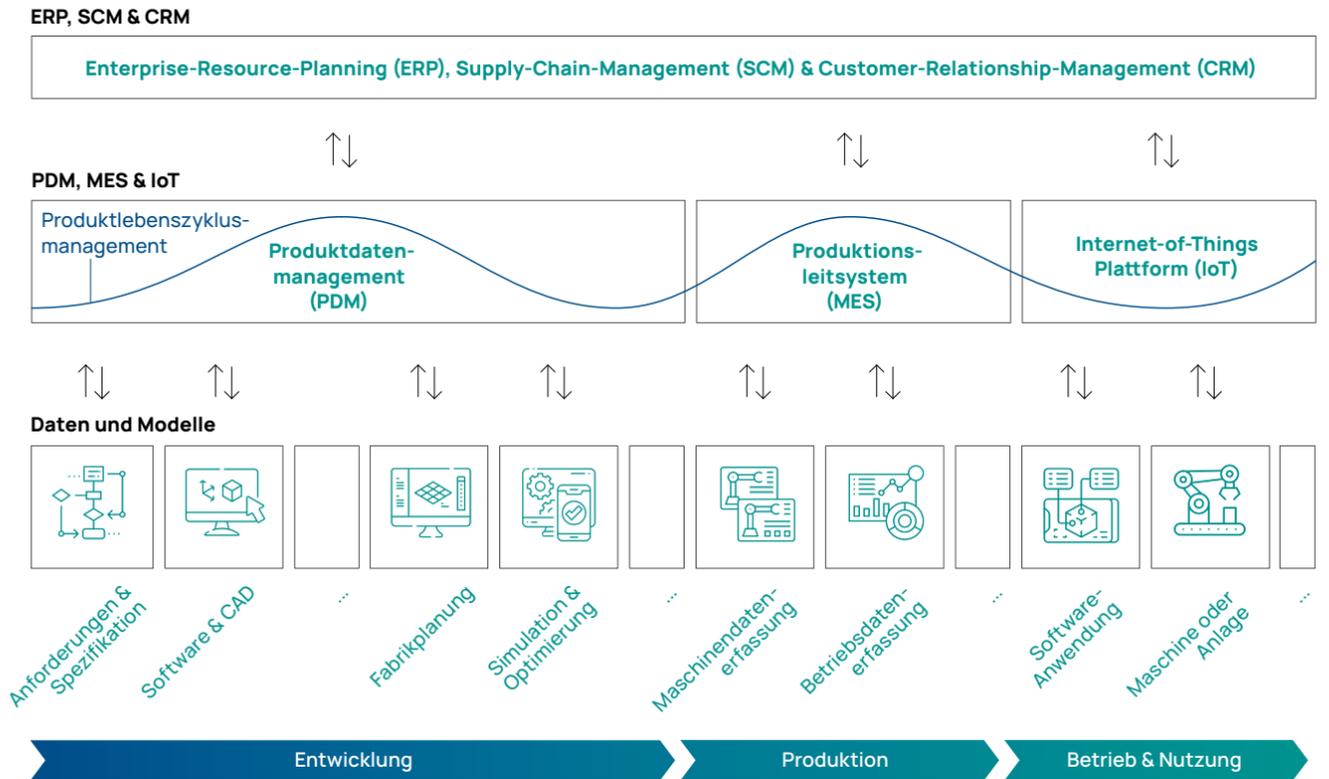


Bild 14: PLM-Konzept im Kontext der verschiedenen IT-Systeme über den Lebenszyklus einer Marktleistung

INFO 12 Produktdatenmanagement (PDM) und Produktlebenszyklusmanagement (PLM)

Der Begriff Produktdatenmanagement (PDM) entstand im Umfeld des rechnerunterstützten Konstruierens von mechanischen Produkten mittels Computer-Aided Design (CAD). PDM-Systeme dienten zunächst nur der datentechnischen Verwaltung von CAD-Dokumenten und insbesondere deren Versionierung. Relevante CAD-Dokumente sind vor allem 3D-Modelle von Einzelteilen und Baugruppen sowie technische Zeichnungen. Später wurden PDM-Systeme um Funktionen wie Stücklistenmanagement sowie Freigabe- und Änderungsmanagement ergänzt. Das PDM ist üblicherweise mit einem konkreten IT-System verknüpft, das PDM-System besteht dabei aus einer Datenbank, einer Anwendungslogik und einer Benutzerschnittstelle.

Der Begriff Produktlebenszyklusmanagement (PLM) entstand in der Weiterentwicklung von PDM und beschreibt kein IT-System, sondern ein Konzept. PLM ist das strategische, prozesstechnische sowie daten- und systemtechnische Management von Produktdaten über den gesamten Lebenszyklus. Eine PLM-Lösung besteht in der Regel immer aus mehreren IT-Systemen wie Autorensystemen (mechanisches CAD, elektrisches CAD, CAE-Simulationssysteme etc.) sowie Datenmanagementsystemen (wie z. B. PDM-Systemen). Diese Systeme sind über Schnittstellen integriert und ermöglichen so die digitale Durchgängigkeit entlang des Produktlebenszyklus. Ein PLM-System als eigenständige IT-Lösung existiert nicht, obwohl dies immer wieder beworben wird. ➤

Obwohl der Großteil der Befragten die Vorteile einer PLM-Lösung erkennt, sind die Unternehmen bei der Gestaltung und Pflege der benötigten IT-Infrastruktur und der eingesetzten IT-Systemen mit verschiedenen Herausforderungen konfrontiert.

Hohe Aufwände bei der Administration und Orchestrierung der Softwarewerkzeuge: Der Aufbau einer umfassenden digitalen Durchgängigkeit und die Implementierung einer PLM-Lösung sind mit einem erheblichen finanziellen Aufwand verbunden. Während eine Vielzahl der befragten Großunternehmen bereits aktiv an dem Themenfeld arbeitet, steht bei KMU die Abwägung zwischen den erwarteten Aufwänden (z. B. durch Lizenz- oder Personalkosten) und dem direkten Nutzen im Vordergrund. Vor diesem Hintergrund müssen geeignete Ansätze zur anwendungsorientierten Kosten-Nutzen-Analyse erforscht werden.

Zunehmende Anzahl an IT-Systemen: Die zunehmende Einbindung weiterer Fachgebiete in den Entstehungsprozess der Marktleistungen resultiert in einer Vielzahl spezialisierter IT-Systeme und Autorenwerkzeuge. Vor diesem Hintergrund sehen viele befragte Unternehmen die vollständige Durchgängigkeit über alle Phasen von der Planung bis zum Recycling als kritisch an. Besonders die Verwaltung der vielen IT-Systeme mit fehlenden Informationsstandards und uneinheitlichen Datenformaten stellt eine zentrale Herausforderung dar. Durch die Kooperation mit weiteren Unternehmen in einem Wertschöpfungsnetzwerk steigen die Anzahl und Heterogenität der eingesetzten IT-Systeme, was eine nahtlose Zusammenarbeit erschwert. Aktuell besteht jedoch insbesondere für KMU die große Herausforderung, die richtigen Entscheidungen zu treffen, wenn es um die Ausgestaltung der Systemlandschaft geht. Es liegt grundsätzlich ein Zielkonflikt zwischen Durchgängigkeit und Unabhängigkeit von einzelnen IT-Systemherstellern vor. Vor diesem Hintergrund fordert eine Vielzahl der befragten Unternehmen gemeinsame Standards für Austauschformate und Programmierschnittstellen. Es besteht der Bedarf, wissenschaftlich fundierte Ansätze für die Ausgestaltung der Engineering-IT-Infrastruktur zu erforschen. Gleichzeitig müssen sowohl die IT-System-Anbieter als auch die Unternehmen als Nutzer bei der Standardisierung unterstützt werden.

Medienbrüche und unzureichende Standardformate:

Ein Großteil der Befragten schreibt Standardformaten einen hohen Stellenwert bei der unternehmensinternen und -übergreifenden Kollaboration zu. Bereits vorhandene Standards werden von den befragten Unternehmen jedoch nur teilweise genutzt. Eine Begründung hierfür ist die unzureichende Unterstützung der Standards durch die eingesetzten IT-Systeme. Als einen weiteren Grund nennen einige Befragte, dass auch bei der Nutzung von Standards Medienbrüche entstehen. Durch den ständigen Wandel und die kontinuierliche Funktionserweiterung der IT-Systeme werden die erstellten Informationen häufig durch ein standardisiertes Austauschformat nur unzureichend abgebildet. Vor diesem Hintergrund gilt es zu untersuchen, inwiefern der Zielkonflikt zwischen einer schnellen Entwicklung und Implementierung von Funktionen einzelner IT-System-Anbieter und der erforderlichen Akzeptanz von einer großen Interessengemeinschaft aufgelöst werden kann.

Gestaltung und Verwaltung geeigneter Schnittstellen:

Standardisierte Austauschformate genügen in der Regel nicht den Anforderungen einer digitalen Durchgängigkeit. Vor diesem Hintergrund heben einige Befragte die zunehmende Relevanz von bidirektionalen Schnittstellen hervor. Eine Vielzahl der Befragten beanstandet, dass die IT-Systeme nur teilweise offene Schnittstellen anbieten und viele Anbieter weiterhin monolithische Lösungen forcieren. Viele befragte Unternehmen nehmen eine zunehmende Integration in Form von disziplinübergreifenden, monolithischen IT-Systeme meist als Einschränkung der IT-Systemvielfalt wahr. Neben dem mangelnden Angebot an Schnittstellen sind für viele befragte Unternehmen die unzureichende Definition und Dokumentation sowie die Verwaltung geeigneter Programmierschnittstellen zentrale Herausforderungen. Einzelne Befragte sehen einen besonderen Bedarf an Lösungen, welche den exponentiellen Zusammenhang zwischen der Anzahl der IT-Systeme und der erforderlichen Anzahl an bidirektionalen Schnittstellen adressieren. Daher gilt es zu erforschen, wie das Zusammenwirken von disziplinspezifischen Standardformaten und harmonisierten Austauschformaten gestaltet werden muss, um eine digitale Durchgängigkeit zwischen zunehmend heterogenen IT-Systemen zu erreichen.

Informationssicherheit bei unternehmensübergreifenden Kooperationen:

Bei vielen befragten Unternehmen wird die Entstehung von Marktleistungen nicht durch eine vollständige Eigenfertigung aller Komponenten abgebildet. Je höher der Anteil der Zulieferung und des Outsourcings ist, desto höher ist der Bedarf an speziellen IT-Systemen für den Datenaustausch über Unternehmensgrenzen hinweg. Die übergreifende Durchgängigkeit verstärkt die zuvor beschriebenen Herausforderungen. Einige Befragte sehen eine besondere Herausforderung im Schutz des geistigen Eigentums und bei der Monetisierung der Bereitstellung von produktbegleitenden Daten an Zulieferer und Kunden. Einzelne Befragte berichten, dass die erforderliche Ausgestaltung einer digitalen Durchgängigkeit von den aktuellen Geschäftsmodellen der Unternehmen unterwandert wird. Vor diesem Hintergrund muss erforscht werden, wie die Eigentumsverhältnisse von gemeinschaftlich genutzten Informationsmodellen in einem Wertschöpfungsnetzwerk ausgestaltet werden. Dabei gilt es zu beachten, welche Formen von Abrechnungs- und Geschäftsmodellen erforderlich sind, wenn Dritte auf Daten und Modelle zugreifen möchten.

Benutzerfreundliche Integration in die Unternehmensarchitektur:

Neben den technischen Herausforderungen sehen einige Unternehmen den zunehmenden Bedarf, methodische Fragestellungen als auch menschenorientierte Kriterien wie die Bedienerfreundlichkeit bei der Gestaltung der digitalen Durchgängigkeit zu integrieren. Aus Sicht vieler befragter Unternehmen muss PLM zukünftig für unternehmensspezifische Vorgehensweisen der Produktentstehung befähigt werden. Dies bedingt, dass die Vernetzung der eingesetzten IT-Systeme nicht die zu nutzende Vorgehensweise stringent vorgibt und zumindest teilweise eine Adaption der unternehmensspezifischen Methoden erlaubt.

Nutzung von Synergien zwischen PLM und Systems Engineering:

Eine Vielzahl von Unternehmen beschreibt, dass sowohl Systems Engineering als auch PLM tendenziell vergleichbare Ziele adressieren – die Zielerreichung jedoch verschieden ausgestaltet wird. Während Systems Engineering ein Ansatz zum Umgang mit Komplexität durch Berücksichtigung aller Fachgebiete und Stakeholder über den gesamten Lebenszyklus bietet, versucht der PLM-Ansatz sämtliche Informationen, die im Verlauf des

Lebenszyklus eines Produktes anfallen, nahtlos zu integrieren. Nur einzelne Unternehmen verfolgen Aktivitäten zur Verbindung von Systems Engineering und PLM. Vor diesem Hintergrund müssen Ansätze untersucht werden, die eine methodische Vereinbarkeit und integrative Prozesse von Systems Engineering und PLM schaffen.

Grundsätzlich besteht unternehmensseitig häufig die Erwartungshaltung, dass die beschriebenen Herausforderungen bei der Gestaltung einer digitalen Durchgängigkeit durch die Anbieter von IT-Systemen zu lösen sind. Die Befragten aus der Wissenschaft vertreten andererseits die Meinung, dass ohne eine methodische Fundierung auch die etablierten Anbieter die digitale Durchgängigkeit nicht umsetzen können. >

Digitale Durchgängigkeit und Produktlebenszyklusmanagement (PLM): Durch die Verbreitung der Konzepte Produktlebenszyklusmanagement, Virtualisierung der Produktentstehung und jüngst MBSE ist eine Vielfalt an IT-Tools und Datenbasen entstanden, die zu integrieren sind. Dies bindet in den Unternehmen hohe Personalkapazitäten. Dem muss mit Standards z. B. für Austauschformate, zur Gewährleistung von Datenschutz und Datensicherheit sowie für Programmierschnittstellen entgegengewirkt werden.

Die Vision einer digitalen Durchgängigkeit beschreibt einen ungehinderten Informationsfluss zwischen allen Aktivitäten des Entwicklungsgeschehens durch die Vernetzung der IT-Systeme in den Unternehmen und in Entwicklungspartnerschaften. Als Vorteile dieser Vernetzung werden Transparenz durch Rückverfolgbarkeit, Effizienzgewinn durch Prozessautomatisierung und Qualitätsverbesserung durch Informationsverfügbarkeit erwartet. Damit ergänzen die digitale Durchgängigkeit und Vernetzung die bestehenden Ansätze der virtuellen Produktentstehung und des Produktlebenszyklusmanagements (PLM) durch eine umfassende Integration sämtlicher Informationen der Marktleistungsentstehung und dessen Nutzung. Eine Vielzahl der befragten Unternehmen befindet sich in einem permanenten Transformationsprozess, mit dem Ziel, einen hohen Vernetzungsgrad zu erreichen. Einer vollständigen Vernetzung wirken mehrere Herausforderungen entgegen. So wird beispielsweise für die Gestaltung komplexer interdisziplinärer Systeme eine zunehmende Anzahl an IT-Systemen eingesetzt. Dies resultiert in hohen Aufwänden bei der Administration und Orchestrierung der Softwarewerkzeuge. Medienbrüche zwischen den IT-Systemen sind mangels standardisierter Austauschformate an der Tagesordnung. Ferner können die Unternehmen nicht alle erforderlichen Programmierschnittstellen gestalten und pflegen. Diese Herausforderungen verstärken sich bei unternehmensübergreifenden Kooperationen und gemeinschaftlich genutzten Informationen, welche gewissen Sicherheitsstandards genügen müssen. Neben den technischen Hürden müssen unternehmensspezifische Vorgehensweisen der Produktentstehung und die Zusammenhänge innerhalb der IT-Infrastruktur berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund gilt es, zukünftig insbesondere die Synergien zwischen PLM, virtueller Produktentstehung und MBSE zu nutzen. ●

4.4.1.2 Digitale Zwillinge und Betriebsdatennutzung im Engineering

Der Digitale Zwilling wird von einer Vielzahl der Befragten als ein zentraler Trend im Engineering wahrgenommen (VGL. INFOBOX 13). Viele Unternehmen bestätigen, dass das Konzept des Digitalen Zwillings zukünftig einen Wettbewerbsvorteil bieten wird. Obwohl die Vorteile erkannt werden, liegt bei den Befragten ein sehr heterogenes Verständnis vor. Viele verstehen unter dem Digitalen Zwilling die Nutzung der Betriebsdaten eines ausgelieferten Produkts für verschiedene Anwendungen und Dienstleistungen. Die digitale Abbildung der gesamten Produktdaten, Simulationsmodelle zur Eigenschaftsabsicherung oder anspruchsvolle Visualisierungen mittels Augmented Reality lassen sich laut der Befragten ebenfalls unter dem Begriff des Digitalen Zwillings auffassen.

INFO 13 Digitaler Zwilling

Der Begriff Digitaler Zwilling ist definiert als digitale Repräsentation eines eindeutigen Produktes (z. B. einer Anlage, Dienstleistung oder eines Objektes) oder eines eindeutigen Produkt-Service-Systems. Die digitale Repräsentation umfasst dabei ausgewählte Charakteristiken, Zustände und Verhaltensweisen anhand von Modellen, Informationen und Daten [SD19]. Digitale Zwillinge grenzen sich von Simulationsmodellen bzw. digitalen Prototypen dadurch ab, dass sie ein reales, sich im Betrieb befindliches Produkt repräsentieren. Jedoch können sie die in der Entwicklung entstandenen

Modelle weiter nutzen. Die Verwendungszwecke von Digitalen Zwillingen sind sehr vielfältig: Von einfacher Zustandsüberwachung bis hin zu Lösungen für autonome Systeme, die das digitale Abbild und die den Entwicklungsmodellen innewohnende Logik und Intelligenz im Sinne der Selbstoptimierung kombinieren [RLS18].

Obwohl bei den Befragten kein gemeinsames Verständnis vorliegt, ermöglicht das Meinungsbild der Befragten eine klare Abgrenzung des Digitalen Zwillings zum Konzept der Digitalen Durchgängigkeit (VGL. BILD 15). Der Digitale Zwilling stellt eine digitale Abbildung einer eindeutigen Marktleistung dar, welcher ausgewählte Informationen über den gesamten Lebenszyklus für verschiedene Anwendungen erfasst, verarbeitet und vernetzt. Zum Großteil beziehen sich die Befragten auf die Abbildung von physischen Marktleistungen wie technischen Systemen (z. B. Komponenten, Baugruppen, Produkten, Maschinen oder Produktionsanlagen). Einige Befragte assoziieren die Anwendung von Digitalen Zwillingen mit den Ansätzen der digitalen Produktentstehung wie z. B. dem Virtual Prototyping. Die Mehrheit der befragten Unternehmen beschreibt jedoch die Betriebsdatennutzung von vernetzten Produkten als zentralen Anwendungsbereich von Digitalen Zwillingen. Die Betriebsdatenerfassung hat bei einer Vielzahl der befragten Unternehmen infolge einer zunehmenden Verfügbarkeit von Kommunikationsstandards, sinkender Kosten der Mikroelektronik und der Etablierung von Cloud-Infrastrukturen an Bedeutung gewonnen. Vor diesem Hintergrund liegt häufig eine Assoziation des Digitalen Zwillings dem Internet der Dinge (engl. Internet of Things – IoT) vor. ➤



Bild 15: Abgrenzung der Digitalen Durchgängigkeit und des Digitalen Zwillings

Neben der Nennung der verschiedenen Anwendungsfälle in der Entwicklung, der Produktion und dem Betrieb steht in der Regel die Lebenszyklusphasen-übergreifende Verknüpfung von Daten und Modellen im Vordergrund.

Die befragten Unternehmen zeigen mit verschiedenen Anwendungen spannende Potentiale auf. Bei vielen besteht die Erwartungshaltung, dass der Digitale Zwilling eine technologische Basis für eine umfassende Datengewinnung und -nutzung bietet. Darauf aufbauend werden neue Formen von datenbasierten Dienstleistungen oder Geschäftsmodellen wie die prädiktive Instandhaltung oder die datenunterstützte Entscheidungsfindung ermöglicht. Bei der Erschließung dieser Potentiale sind die Unternehmen jedoch mit verschiedensten Herausforderungen konfrontiert:

Heterogenes Verständnis: Dadurch, dass der Begriff Digitaler Zwilling in verschiedenen Bereichen und Disziplinen für unterschiedliche Anwendungen eingesetzt wird, haben sich verschiedene Ausprägungen etabliert. Vor diesem Hintergrund besteht kein einheitliches Verständnis bei den befragten Unternehmen, Wissenschaftlern und IT-System-Anbietern. Es ergeben sich vielfältige Anforderungen und Ziele für einen Digitalen Zwilling. Daher müssen Konzepte erforscht werden, welche die verschiedenen Ausprägungsformen strukturieren, um Potentiale in der Marktleistungsentstehung nutzen zu können.

Bewertung der Anwendungsfälle: In der Befragung wurden verschiedenste Anwendungsfälle identifiziert – von den Verhalten beschreibenden, digitalen Modellen in der Produktentwicklung bis zu anspruchsvoller Datenfernverarbeitung im Betrieb von autonomen Systemen. Die Anwendungsfälle differenzieren sich durch ihren Fokus auf verschiedenen Lebenszyklusphasen, den adressierten Einsatzbereichen, der Modell- und Datenqualität sowie Interoperabilität. Der Großteil der Befragten hat noch kein systematisches Vorgehen zur Identifikation und Auswahl von relevanten Anwendungsfällen eingeführt.

Modellbildung und -vernetzung: Einige Befragte aus der Wissenschaft beschreiben den Digitalen Zwilling als ein datenbasiertes Modell, welches sich über den Entstehungsprozess einer Marktleistung kontinuierlich weiterentwickelt und mit Informationen angereichert wird. In der praktischen Anwendung besteht die Herausforderung, dass der erforderliche Detaillierungsgrad, der Modellumfang, die Übereinstimmung mit der realen Struktur oder dem Verhalten sowie die Wiederverwendbarkeit von Modellinformationen nicht definiert sind. Zur genaueren Definition dieser Aspekte im Kontext des Digitalen Zwillings besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Ohne kompatible und modulare Architekturen können die Aufwände bei der Modellbildung und der Vernetzung aktuell nicht abgeschätzt werden.

Verifikation und Validierung: Der Digitale Zwilling wird von vielen befragten Unternehmen als ein Werkzeug für die Eigenschaftsabsicherung und Optimierung ihrer Marktleistungen wahrgenommen. In diesem Kontext besteht die Erwartungshaltung, dass die Verifikation und Validierung zunehmend virtuell durchgeführt werden. Um den aufwendigen Aufbau von physischen Prototypen kontinuierlich zu reduzieren, setzen die befragten Unternehmen vermehrt (Multidomänen-)Simulationen ein. Des Weiteren nutzen viele Befragte zunehmend Ansätze wie X-in-the-Loop (XiL), bei denen z. B. eingebettete Systeme unter Nachbildung ihrer realen Umgebung abgesichert werden. Durch XiL besteht das Potential, dass für die Validierung nur einzelne Teilsysteme physisch vorliegen müssen und die Interaktion des Gesamtsystems über definierte Schnittstellen auf der Basis echtzeitfähiger Modelle simulativ abgebildet werden kann. Aktuell und in naher Zukunft lassen sich physische Prototypen jedoch nicht vollständig vermeiden. Gesetzesvorgaben und zu starke Abweichungen zwischen realem und simuliertem Verhalten machen physische Tests weiterhin notwendig. Des Weiteren weisen einige Unternehmen darauf hin, dass sich sehr spezifische Sachverhalte und interdisziplinäre Wechselwirkungen bisher schlecht oder nur mit unwirtschaftlichem Aufwand abbilden lassen. Nach Aussage mehrerer Unternehmen hat die Komplexität der Marktleistungen in einem solchen Ausmaß zugenommen, dass ein Fehler im Betrieb in einer Vielzahl der Fälle nicht mehr konkret auf eine Ursache zurückgeführt werden kann. Vor diesem Hintergrund sind neue Methoden und Werkzeuge

erforderlich, um komplexe interdisziplinäre Systeme, auch im Systemverbund, abzusichern und mit vertretbarem Aufwand virtuell zu verifizieren und zu validieren.

Einzelne Pionierunternehmen nutzen bereits rückgekoppelte Betriebs- und Umfelddaten, um Simulationen des Verhaltens der Mechanik, Mechatronik und der Software zu optimieren. Die Betriebsdatennutzung im Engineering ermöglicht damit bereits in frühen Entwicklungsaktivitäten eine realitätsnahe Simulation und somit eine frühere Validierung der Kundenwünsche. Dabei analysieren die Unternehmen die erfassten Daten, um auf Basis von Korrelationen robuste und treffende Vorhersagen zu treffen. Aktuell fehlt es jedoch an einem systematischen Vorgehen für die Kombination von analytischen Methoden (Simulationsmodell) und empirischen Methoden (Datenmodell) bei der Absicherung durch Digitale Zwillinge.

Gestaltung der IT-Infrastruktur: Die erforderlichen Daten und Modelle für einen Digitalen Zwilling sind in der Regel durch voneinander unabhängige IT-Systeme erstellt, welche auf verschiedenen Servern in verteilten Umgebungen oder auf Cloud-Plattformen operieren. Nach Aussage einiger Unternehmen resultiert dies in einer zunehmenden Anzahl und Heterogenität der Daten und Modelle. Gleichzeitig wurde in keinem Unternehmen ein standardisiertes Austauschformat, eine integrierende IT-Plattform oder eine Datenstruktur identifiziert, welche diese Herausforderung ausreichend adressieren. Die Problematik wird durch die zunehmende Vernetzung der Wertschöpfungsnetzwerke verstärkt, in welchen die IT-Infrastruktur nicht ausschließlich durch einen Akteur gestaltet wird. Einzelne Befragte bieten bereits Marktleistungen an, durch die Nutzungsdaten vom Anwender über Unternehmensgrenzen hinweg zum Anbieter übertragen werden. Seitens der Anbieter und Anwender besteht die klare Herausforderung, eine geeignete IT-Infrastruktur zu gestalten, welche den zukünftigen Anforderungen an die Datenübertragung und Datensicherheit eines Digitalen Zwillings genügt. Vor diesem Hintergrund muss die technisch- und wirtschaftlich-effiziente Umsetzung der Engineering-IT-Infrastruktur für Digitale Zwillinge erforscht werden. Dabei gilt es, relevante Zielkonflikte zu identifizieren (z. B. Cloud vs. Lokal, Austauschformate vs. Programmierschnittstelle) und entsprechende Handlungsempfehlungen, insbesondere für KMU, abzuleiten.

Unternehmensübergreifende Implementierung: Durch Zulieferung und Outsourcings werden die (Zwischen-)Produkte von verschiedenen Unternehmen in höherwertige Marktleistungen integriert. Vergleichbar mit der Integration eines Maschinenmoduls in eine Fertigungslinie müssen die Digitale Zwillinge ebenfalls zu einer Einheit aggregiert werden. Daraus ergeben sich Anforderungen an den Informationsaustausch und die Kompatibilität der digitalen Abbilder. Einzelne Befragte nennen die digitale Verwaltungsschale als einen möglichen Lösungsansatz für die Interoperabilität und Integration von Digitalen Zwillingen (VGL. [PLA18]). Insbesondere bei der unternehmensübergreifenden Gestaltung und Nutzung von Digitalen Zwillingen besteht demnach noch erheblicher Forschungsbedarf.

Nutzung von Betriebsdaten in der Entwicklung: Bereits heute erfassen und analysieren einige befragte Unternehmen zunehmend Daten aus der Produktions- und Nutzungsphase. Diese Datenerfassung dient jedoch mehrheitlich dem Zweck, datenbasierte Dienstleistungen anzubieten. Die befragten Unternehmen nutzen die Daten bislang aber kaum für die Optimierung von bestehenden oder zukünftigen Marktleistungen. Ausschließlich in Einzelfällen oder Pilotanwendungen werden Daten aus dem Validierungsprozess und von Lieferanten erhoben und systematisch in den Entwicklungsprozess der folgenden Produktgeneration integriert. In diesem Kontext weisen mehrere befragte Unternehmen darauf hin, dass sich die systematische Weitergabe von Informationen auf nachgelagerte Aktivitäten der Wertschöpfung fokussiert. Ein mehrfach genanntes Beispiel hierfür ist die Nutzung von Entwicklungsmodellen in der Produktion (z. B. bei der automatisierten Erstellung der numerischen Steuerungscode von Werkzeugmaschinen). Die Rückführung der Daten in vorgelagerte Aktivitäten der nächsten Produktgeneration wird laut Befragungen aktuell nur in vereinzelt Anwendungen adressiert. Vor diesem Hintergrund besteht der Bedarf, die relevanten Anwendungsfälle für eine systematische Rückführung von Modellen und Daten durch den Digitalen Zwilling zu untersuchen und deren Validierung sicherzustellen. >

Digitale Zwillinge und Betriebsdatennutzung im Engineering: Das Konzept Digitaler Zwilling ergänzt MBSE, indem der Fokus auf Modellen eines Produkts über den Produktlebenszyklus liegt. Es herrscht Konsens über die hohe Bedeutung dieses Konzepts. Die Implementierung in der Praxis steckt jedoch in den Kinderschuhen; nur in wenigen Fällen wird seitens der Produktentwicklung auf Betriebsdaten beispielsweise für Zwecke der Produktoptimierung zugegriffen.

Dem Konzept Digitale Zwilling wird von vielen Befragten eine zentrale Bedeutung im Engineering beigemessen. Ergänzend zur digitalen Durchgängigkeit liegt der Fokus auf der Vernetzung der spezifischen Daten und Modelle über den Lebenszyklus einer Marktleistung. Obwohl kein einheitliches Verständnis des Konzepts vorliegt, werden vielfältige Nutzenpotentiale insbesondere in der Betriebsdatennutzung und bei der Gestaltung von datenbasierten Dienstleistungen oder Geschäftsmodellen erkannt. Für die Erschließung dieser Potentiale müssen zunächst die Anwendungsfälle identifiziert, strukturiert und bewertet werden. In der praktischen Anwendung bestehen besondere Herausforderungen bei der Modellbildung und deren Vernetzung über den gesamten Lebenszyklus. Eine virtuelle Eigenschaftsabsicherung auf Basis vernetzter Modelle ist derzeit nur sehr bedingt möglich. In der Entwicklung werden nach jetzigem Stand nur in Ausnahmefällen Betriebs- und Umfelddaten genutzt, um dadurch die Marktleistungen von Generation zu Generation zu optimieren. Vor diesem Hintergrund kommt der technischen und wirtschaftlichen Umsetzung der Engineering-IT-Infrastruktur für Digitale Zwillinge eine sehr hohe Bedeutung zu. Dabei muss für eine unternehmensübergreifende Nutzung und insbesondere die Interoperabilität von Digitalen Zwillingen sichergestellt werden. ●

4.4.1.3 Künstliche Intelligenz und Assistenzsysteme

Assistenzsysteme oder auch Technologien wie die Künstliche Intelligenz (KI) sind zunächst nicht neu. Assistenzsysteme werden in vielen Anwendungen bereits sehr erfolgreich eingesetzt und helfen Unternehmen und deren Mitarbeiter durch regelbasierte Entscheidungsunterstützung und automatisierte Entscheidungsprozesse in ihrer Leistungserbringung (VGL. INFOBOX 14). Künstliche Intelligenz beschreibt IT-Lösungen und Methoden, die selbstständig Aufgaben erledigen, die dynamische Entscheidungen und bisher menschliche Intelligenz erforderten. Die den Aufgaben zugrundeliegenden Regeln werden nicht mehr explizit durch den Menschen vorgegeben. Vielmehr lernt die KI anhand von Daten, eigenständig Aufträgen und Arbeitsabläufen zu erledigen (VGL. BILD 16) [GWS+19-OL; MCK17-OL]. KI wird von dem Großteil der Befragten als ein zentraler Trend sowie als hochrelevante Schlüsseltechnologie

angesehen. Einzelne Unternehmen setzen bereits KI in ihren Entstehungsprozess und teilweise in ihre Produkte und Dienstleistungen ein.

INFO 14 Neuronale Netze

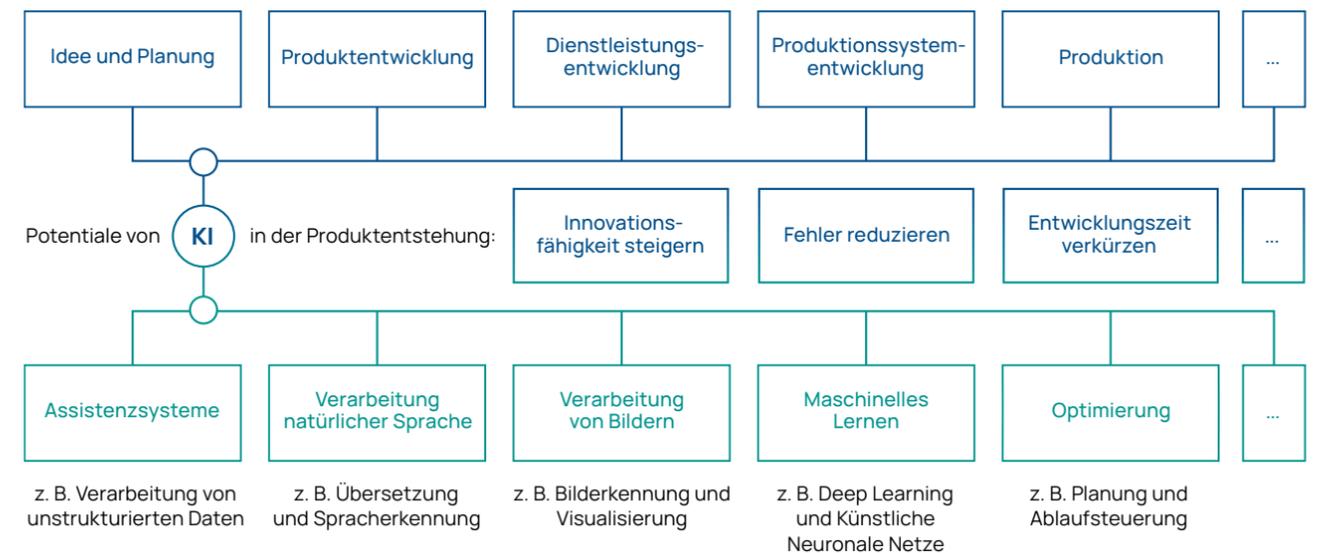
Künstliche neuronale Netze sind Modelle des maschinellen Lernens. Sie lösen Problemstellungen durch den Einsatz von künstlichen Neuronen, deren Verschaltung und Gewichtung anhand von Trainingsdaten automatisch für die gegebene Aufgabenstellung optimiert wird. Daraus resultierend können Systeme mit einem vergleichbar geringen Programmierungsaufwand komplexe Aufgaben lösen, indem das Definieren von starren Entscheidungsregeln von einem Lernalgorithmus übernommen wird. Die Grundlage der Entscheidungsfindung ist jedoch in der Regel nicht mehr oder nur sehr

schwer nachvollziehbar. Es kann beispielsweise anhand von Trainingsdaten überprüft werden, mit welchem Prozentsatz in Zukunft richtige Entscheidungen zu erwarten sind. Entscheidungen werden in neuronalen Netzen im Vergleich zu regelbasierten Systemen nicht deterministisch getroffen. Dies kann bei Anwendern Unsicherheit erzeugen und im Konflikt zu regulatorischen Anforderungen stehen [ACA20].

CAD-Daten oder eine begleitende Echtzeit-Kostenprognose. Der erwartete Funktionsumfang von Assistenzsystemen reicht von der reinen Analyse von Daten und ihrer transparenten, bedarfsgerechten Darstellung bis zur KI-gestützten Ermittlung von Handlungsempfehlungen (INFOBOX 15). Die Unternehmen erwarten nicht, dass eine KI den Menschen in naher Zukunft bei den Aktivitäten der Produktentstehung ersetzen wird. Vielmehr wird von einigen befragten Unternehmen ein Paradigmenwechsel in der Arbeit der Ingenieure erwartet. Dabei werden Entwickler oder Ingenieure in Zukunft die Verantwortung tragen, die KI-basierten IT-Systeme zu überwachen und Ergebnisse zu analysieren. Dabei wird verstärkt darauf hingewiesen, sich nicht zu sehr auf die Unterstützungsleistung zu verlassen und die Entscheidungsvorschläge kritisch zu beurteilen. >

Eine Vielzahl der Befragten erwartet, dass KI zukünftig den Menschen in wissensintensiven Engineering-Tätigkeiten in Form von Assistenzsystemen unterstützen wird. Die Befragten nennen verschiedene Potentiale wie z. B. das Aufbereiten von kontextbasiertem Wissen aus verschiedenen Quellen, eine kontinuierliche Analyse von

Phasen der Produktentstehung



Mögliche Anwendungsbereiche von Künstlicher Intelligenz (KI)

Bild 16: Nutzenpotentiale von KI in der Produktentstehung in Anlehnung an [GWS+19-OL; MCK17-OL; HNI21]

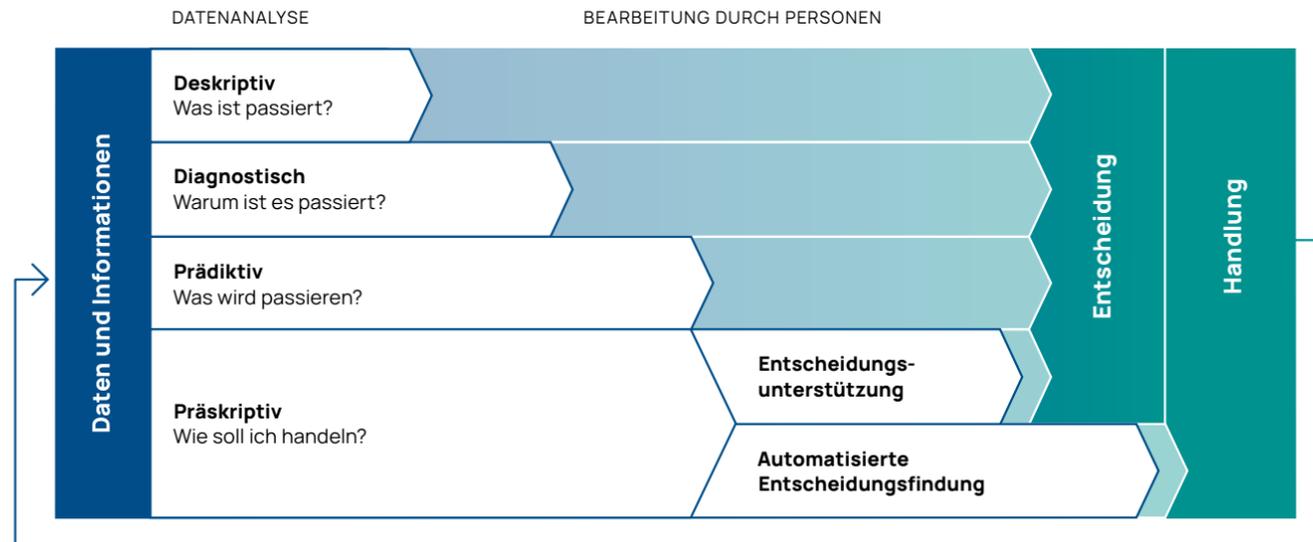


Bild 17: Ausbaustufen der Informationsverarbeitung nach [SSE+14]

INFO 15 Assistenzsysteme

Im Kontext der Marktleistungsentstehung und -erbringung umfassen Assistenzsysteme alle Arten von Informationen, die einen bei der Arbeit unterstützen. Sie können ihren Fähigkeiten und ihrer zugrundeliegenden Informationsverarbeitung entsprechend in vier Ausbaustufen unterschieden werden (vgl. BILD 17). Die verschiedenen Stufen beschreiben, zu welchem Grad der Anwender in seiner Aufgabe durch ein Assistenzsystem unterstützt wird. Die Ausbaustufen werden im Folgenden anhand eines Beispiels aus dem Umfeld der vorausschauenden Wartung in der Produktion erläutert [ACA20; OBE19]:

Ein deskriptiv agierendes Assistenzsystem informiert den Anwender darüber, was in der Vergangenheit passiert ist; z. B., dass eine Maschine ausgefallen ist.

Ein diagnostisch agierendes Assistenzsystem informiert den Anwender darüber, warum etwas passiert ist; z. B., welche Fehlerursache zu einem Ausfall geführt hat.

Ein prädiktiv agierendes Assistenzsystem prognostiziert dem Anwender, was in Zukunft passieren wird; z. B., wann voraussichtlich eine Maschine ausfallen wird.

Ein präskriptiv agierendes Assistenzsystem unterstützt den Anwender in der Reaktion auf aus Daten gewonnenen Erkenntnissen; z. B., wie auf einen bevorstehenden Maschinenausfall zu reagieren ist. Diese Unterstützung kann entweder in Form einer Handlungsempfehlung oder einer automatisierten Entscheidung abgebildet werden.

Als Bestandteil von Assistenzsystemen ist die KI ein vielversprechendes Hilfsmittel, um das Engineering in Zukunft noch effizienter zu gestalten. Einzelne Befragte schreiben Assistenzsystemen durch die Integration von KI ein besonderes Potential zur Steigerung der Produktivität und Effizienz in der Produktentwicklung zu. Die Effizienzsteigerung kann z. B. durch Übernahme von sich wiederholenden Routineaufgaben, der Verarbeitung unstrukturierter Daten sowie der Bild-, Sprach- und generellen Mustererkennung realisiert werden. Ebenso wird ein Potential in der Abbildung und Bereitstellung von gewonnenem Erfahrungswissen aus vergangenen Projekten gesehen. Beispiele hierfür sind

die KI-gestützte Optimierung von Konstruktionsmodellen oder aber die Aufbereitung von unstrukturierten Bestandsdaten zur Migration in neue IT-Umgebungen. Durch die Übernahme von sich stark wiederholenden Tätigkeiten und das gezielte Bereitstellen von Hilfestellungen und Vorschlägen soll der Entwickler entlastet werden. Ob der Einsatz von Assistenzsystemen in wissensintensiven Entwicklungstätigkeiten den Entwicklern die Möglichkeit gibt, sich durch freiwerdende kognitive Kapazitäten stärker auf kreative Aspekte der Problemlösung zu fokussieren, wird von Befragten nicht eindeutig beantwortet.

Bei der Erschließung dieser Bereiche sehen sich viele befragte Unternehmen mit verschiedensten Herausforderungen konfrontiert:

Schwerer Einstieg in das Themenfeld: Viele Unternehmen haben Schwierigkeiten bei der Identifikation relevanter Anwendungsfälle, der Bildung disziplinspezifischer KI-Modelle sowie mit der teilweise unzureichenden fachlichen Kompetenzen in den Unternehmen. Für den Einsatz von KI-gestützten Assistenzsystemen in der Produktentstehung zeichnen sich erste erfolgversprechende Einsatzbereiche ab. Dennoch sehen viele der Befragten Herausforderungen bei der Identifikation relevanter Anwendungsfälle, der Bildung disziplinspezifischer KI-Modelle sowie in den teilweise unzureichenden fachlichen Kompetenzen in den Unternehmen. KI wird hier von den Mitarbeitern bisher oftmals nur unbewusst oder indirekt eingesetzt (z. B. bei der Handschrifterkennung). Hier gilt es, Leitfäden zu entwickeln, die die Unternehmen unterstützen.

Einsatz von verlässlichen KI-Werkzeugen: In Bezug auf die Produktentstehung merken einzelne Befragte an, dass das Angebot an KI-basierten Assistenzsystemen zunehmend ist. Diese Systeme sind aber zum Großteil noch nicht auf unternehmensspezifische Entwicklungsprozesse angepasst. Neben dem unzureichenden Reifegrad ist für viele Unternehmen das Vertrauen, welches dem IT-System entgegengebracht werden muss, eine große Herausforderung. Vor allem die Unsicherheiten in Bezug auf die Funktionsweise und die Transparenz der Entscheidungsfindung von neuronalen Netzen stellen hier Hindernisse dar. Aus der Tatsache, dass einige Arten von Künstlicher Intelligenz nicht deterministisch und damit für den Nutzer nicht eindeutig nachvollziehbar agieren, ent-

stehen Herausforderungen insbesondere bei der Haftung für von einer solchen KI getroffenen Entscheidung. Diese technologisch bedingten Unsicherheiten sowie die oftmals fehlenden Kompetenzen führen bei Unternehmen hinsichtlich der Implementierung von KI in der Produktentstehung zu vielfältigen offenen Fragestellungen. Diese offenen Fragestellungen können den Einsatz von Assistenzsystemen in der Produktentstehung sowie die Integration in die Marktleistungen verhindern. Vor diesem Hintergrund gilt es zu erforschen, wie KI-Systeme spezifiziert, validiert und nutzenstiftend in bestehende IT-Systeme sowie in Entwicklungsprozesse zu integrieren sind.

Unzureichende Datengrundlage: Mehrere befragte Unternehmen betonen, dass KI-basierte Assistenzsysteme die bestehenden Ansätze der modellbasierten und digitalen Produktentstehung sowohl fördern als auch fordern. Eine intelligente kontextsensitive Methodenunterstützung in den MBSE-Systemen kann z. B. die Lernbarrieren insbesondere für disziplinspezifische Entwickler reduzieren und Akzeptanz über alle Anwender fördern. Neben der Integration in bestehende Systeme besteht nach Aussage einiger Befragter ein besonderes Potential, wenn die Assistenzsysteme auf eine Vielzahl von Informationsquellen zurückgreifen, um für den Anwender bisher unbekannt Zusammenhänge zu identifizieren. Diese Unterstützung im Umgang mit großen und zum Teil unstrukturierten Daten wird nach den befragten Unternehmen momentan sehr durch heterogene IT-Systemlandschaften und fehlende Schnittstellen erschwert. Insbesondere Medienbrüche in der digitalen Durchgängigkeit begrenzen aktuell den Funktionsumfang. Vor diesem Hintergrund gilt es zu untersuchen, in welchem Umfang und unter welchen technischen Gegebenheiten zukünftige KI-Systeme entwicklungsrelevantes Wissen aus unstrukturierten Daten und heterogenen Modellen des Engineerings analysieren können.

Rechtssicherer und menschenzentrierter Einsatz von KI: Viele Befragte sehen aktuell eine wesentliche Herausforderung in Bezug zu rechtlichen Rahmenbedingungen und unklaren regulatorischen Aspekten. Dazu zählt z. B. der unklare Datenschutz bei der Nutzung von KI-basierten Assistenzsystemen, welche auf Cloud-Infrastrukturen mit Rechenzentren außerhalb von Europa arbeiten. Des Weiteren beschreiben einige Unternehmen potentielle Konflikte mit Persönlichkeitsrechten bei Systemen, ➤

welche personenbezogene Nutzerdaten verarbeiten (bspw. Sprachassistenten). Gleichzeitig betonen einzelne Befragte, dass eine mögliche Überregulierung der Datennutzung ein Hemmnis für die Innovationsfähigkeit darstellen kann. Verschiedene Forschungs- und Industrieprojekte wie das Leuchtturmvorhaben GAIA-X versuchen, diese Herausforderungen zu adressieren (VGL. INFOBOX 16).

INFO 16 GAIA-X

Bei GAIA-X handelt es sich um ein europäisches Projekt mit dem Ziel, gemeinsame Anforderungen an eine europäische Dateninfrastruktur zu entwickeln. An dem Projekt wirken über 300 Organisationen und Vertreter aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft verschiedener Länder mit. Um eine vernetzte Datenstruktur zu erschaffen, sollen Daten und Dienste in einem offenen und transparenten digitalen Ökosystem ausgetauscht und zusammengeführt werden. Dabei müssen unter anderem Aspekte der Datensicherheit, aber auch die Nutzerfreundlichkeit des Systems berücksichtigt werden, damit Daten vertrauensvoll verfügbar gemacht und geteilt werden können. Ein langfristiges Ziel des Projekts GAIA-X ist die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Unternehmen und die Förderung der Zusammenarbeit in Europa. [BUN20]

Künstliche Intelligenz (KI) und Assistenzsysteme: KI ist im Engineering angekommen; es gibt viele erfolgreiche Anwendungen, insbesondere im Bereich der Assistenzsysteme. Der Einsatz von nicht-deterministischen Lernalgorithmen wird noch kritisch gesehen.

Die Schlüsseltechnologie Künstliche Intelligenz eröffnet auch im Engineering neue Perspektiven. Assistenzsysteme werden schon von vielen Unternehmen erfolgreich eingesetzt. Damit einher geht die Erwartung, dass die offensichtlichen Erfolgspotentiale von KI in nächster Zeit weiter erschlossen werden. Das gilt beispielsweise für die Übernahme von sich wiederholenden Routineaufgaben, die Verarbeitung unstrukturierter Daten, das Lernen aus Erfahrungswissen und für die starke Verbesserung bestehender IT-Anwendungen. Bei der Erschließung dieser Potentiale bestehen Herausforderungen wie die Identifikation relevanter Anwendungsfälle, die Bildung domänenspezifischer KI-Modelle sowie unzureichende Kompetenzen in den Unternehmen. Des Weiteren besteht eine starke Unsicherheit bei dem Einsatz von nicht-deterministischen Lernalgorithmen, die im Konflikt zu sicherheitsrelevanten oder regulatorischen Anforderungen entstehen können. Vergleichbare Herausforderungen ergeben sich in Bezug auf den Datenschutz und die Persönlichkeitsrechte bei Systemen, welche Daten der Mitarbeiter oder Nutzer verarbeiten. ●

Neben den technischen und rechtlichen Herausforderungen ist bei einem zunehmenden Einsatz von Assistenzsystemen auf die Aufrechterhaltung und Aktivierung der kognitiven Fähigkeiten des Anwenders zu achten. Mehrere Befragte kritisieren, dass Assistenzsysteme schon heute dazu führen, dass die Nutzer dem System übermäßig vertrauen. Einige Befragte sehen hier das Risiko eines Entwöhnungseffekts in Form eines Abbaus kognitiver Fähigkeiten, sollten große Teile der bisherigen Arbeitsinhalte durch Automatismen übernommen werden. Als Beispiel wird ein mangelnder Orientierungssinn ohne Navigationssysteme genannt.

Auch wenn es von der Mehrheit der Befragten nicht ausgeschlossen wird, dass KI in Zukunft einen Teil der heutigen Aufgaben von Ingenieuren übernehmen kann, herrscht Einigkeit, dass der Mensch die zentrale Rolle im Engineering von morgen bleibt. Ziel ist eine synergetische Arbeitsteilung, in der ein KI-gestütztes Assistenzsystem den Anwender unterstützt, während kreative Aufgaben in der Produktentstehung weiterhin vom Menschen übernommen werden.

4.4.2 Innovative Methoden im Engineering

Innovative sowie zukunftsweisende Methoden und Vorgehensweisen unterstützen die Entstehung der zukünftigen Advanced Systems. Hierbei handelt es sich um nicht-technische Innovationen im Engineering, welche mit organisatorischen, administrativen und planerischen Fähigkeiten das soziotechnische Engineering-System eines Unternehmens fördern. Innovative Methoden im Engineering fokussieren sich sowohl auf agile Prozesse und Kreativitätsmethoden als auch auf die systematische Integration des Innovationsmanagements in die Arbeitsorganisation des Engineerings.

Bei einer Vielzahl der Befragten liegt noch keine oder nur eine lose Verknüpfung des Innovationsmanagements und des Engineerings vor. Der Begriff Innovationsmanagement ist nach einer Vielzahl der Befragten nur unzureichend definiert und liegt ebenso wie das Systems Engineering in unterschiedlichen Leistungsstufen in den Unternehmen vor. Hier ist es wichtig, die Schnittstelle zwischen Innovationsmanagement und Systems Engineering zu formalisieren.

Im Rahmen des Leistungsstands wurden folgende Themenfelder näher beleuchtet:

- Agilität im Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.4.2.1)
- Kreativität im Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.4.2.2)
- Produktgenerationsentwicklung im Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.4.2.3)

4.4.2.1 Agilität im Engineering

Die Erstellung der Marktleistungen von morgen ist durch die Dynamik der Märkte sowie die Beteiligung vieler Disziplinen geprägt. Insbesondere in der Entwicklung von vernetzten Systemen und System of Systems liegen viele unbekannte Wechselwirkungen zwischen den Marktleistungen und deren Umfeld vor, die während der Entwicklung nur unzureichend antizipiert und daher nicht ausreichend in der Validierung berücksichtigt werden können. Daraus resultiert ein hohes Entwicklungsrisiko, welches eine frühzeitige Absicherung von Konzepten erfordert. Gleichzeitig ist es wichtig, flexibel auf neu gewonnene Erkenntnisse hinsichtlich Kunden- und Anwenderanforderungen reagieren zu können. Basierend auf diesen Feststellungen hält laut vielen Befragten die agile Vorgehensweise vermehrt Einzug in die Unternehmen (VGL. INFOBOX 17). In der vorliegenden Veröffentlichung wurden der Status quo in den Unternehmen sowie Potentiale und Herausforderungen untersucht.

Die Mehrheit der Befragten betont, dass agiles Arbeiten nicht mit einem chaotischen Vorgehen assoziiert werden sollte. Auch beim agilen Arbeiten ist eine hinreichende Planung und eine angemessene Dokumentation der Vorgehensweise und der Arbeitsergebnisse hochrelevant. Agile Methoden eignen sich nach Aussagen vieler Interviewpartner insbesondere dann, wenn ein klar definierter Aufgabenbereich in einem klar definierten Team bearbeitet wird. Die befragten Unternehmen haben agiles Arbeiten sowohl in kleinen als auch in großen Projektvorhaben erprobt. Obwohl es teilweise zu Herausforderungen mit der Skalierbarkeit von agilen Vorgehensmodellen kommt, sieht eine Vielzahl der Befragten Potential darin, Agilität auf Entwicklungs- und Produktionsprojekte zu übertragen. In sicherheitsrelevanten Anwendungen (z. B. in der Luft- und Raumfahrtbranche) und Mechanik orientierten Projekten (z. B. im Sondermaschinenbau) wird der Einsatz kritisch hinterfragt. Eine Vielzahl der Unternehmen bestätigt, dass die Übertragung von agilen Vorgehensmodellen ohne Adaption der Charakteristika von mechatronischen Entwicklungsprojekten nicht zu den erwarteten Verbesserungen führt. Daher wird häufig nur eine >

reduzierte Auswahl angepasster Methoden genutzt (z. B. ein Kanban-Board). Teilweise betonen die befragten Unternehmen, dass die Nutzung einzelner Methodenfragmente nicht für einen erforderlichen Wandel zur agilen Mentalität der Mitarbeiter ausreicht.

INFO 17 Agilität im Engineering

Agilität ist das Merkmal einer Organisation oder einer Person, flexibel und proaktiv auf Veränderungen zu reagieren. Im Kontext der Produktentstehung beschreibt die Agilität die Fähigkeit, während eines ungeplanten Ereignisses eine situations- und bedarfsorientierte Anpassung der Aktivitäten umzusetzen. Dadurch werden Kunden-, Nutzer- und Anbieter-Nutzen gezielt gesteigert [AHM+19]. Dies wird durch eine interdisziplinäre und flexible Zusammenstellung von Entwicklungsteams sowie einer iterativen Gestaltung von Inkrementen einer Marktleistung gefördert [HOF18].

Eine stark verbreitete agile Methode ist das aus der Softwareentwicklung stammende Rahmenwerk Scrum. Ziel dieses Rahmenwerks ist das Ausliefern und das Überprüfen von Teilfunktionen (Produktinkrementen) in festen Intervallen (Sprints). Im Rahmen eines Sprints wird eine erlebbare Funktion mit dem höchstmöglichen Kundenwert entwickelt. Die Transparenz über den Projektfortschritt, die regelmäßige Überprüfung von Projektergebnissen und die kontinuierliche Anpassung durch selbstorganisierte Teams soll die Innovationsfähigkeit steigern und eine schnelle Reaktion auf Anforderungsänderungen ermöglichen [SS11].

Aktuell befindet sich eine Vielzahl der befragten Unternehmen in der Einführung oder Befähigung von agilen Methoden im Engineering. Eine abteilungsübergreifende Einführung war ausschließlich in Einzelfällen abgeschlossen. Bei dem Großteil der Befragten beschränkt sich die Einführung momentan auf einzelne Abteilungen oder erste abteilungsübergreifende Projekte. Vereinzelt wurde das agile Arbeiten als zentrale Voraussetzung für die erfolgreiche Erstellung der zukünftigen Marktleistungen

beschrieben. Bei einer Vielzahl der Einführungsvorhaben wurde das Rahmenwerk Scrum oder eine angepasste Form dieses Modells genutzt. Extreme Programming stellt eine der seltener genannten Alternativen dar. Ein spezialisiertes Vorgehensmodell für agile mechatronische Systementwicklung aus der Wirtschaft oder Wissenschaft wurde von keinem der befragten Unternehmen genannt. Einzelne Unternehmen planen derzeit noch keinen Einsatz von agilen Methoden. Als Gründe nannten diese Unternehmen, dass es ihnen an einer Systematik zur Einführung und an Fachwissen über eine geeignete Softwareunterstützung mangelt. Hier besteht der Bedarf weiterer Forschungsaktivitäten sowie intensiver Aufklärungs- und Unterstützungsarbeit in den Unternehmen.

Bei der Analyse des Leistungsstands wurden die folgenden Potentiale und Erwartungshaltungen durch die befragten Unternehmen beschrieben:

Schnellere Produktentwicklung: Viele Befragten erwarten durch die Einführung agiler Methoden langfristig eine schnellere Produktentwicklung, die durch iterative Arbeitszyklen strukturiert wird.

Verbesserte Zusammenarbeit und Kommunikation: Eine Vielzahl der Befragten assoziiert mit agilem Vorgehen das Arbeiten in interdisziplinären oder cross-funktionalen Teams. Vor diesem Hintergrund wird erwartet, dass der Austausch von Mitarbeitern mit unterschiedlichen Fähigkeiten und verschiedenen Hintergründen die Zusammenarbeit über Abteilungsgrenzen hinweg fördert.

Verbesserte Transparenz in der Planung, der Dokumentation und den Verbindlichkeiten: Durch das häufig verwendete Scrum-Rahmenwerk mit einem iterativen und inkrementellen Vorgehen erwartet ein Großteil der Befragten eine transparente Planung, Strukturierung und Dokumentation der einzelnen Arbeitsaufträge im Projekt. Durch regelmäßige Abstimmungsgespräche zwischen den Teams, Kundenvertretern und Projektverantwortlichen soll die Verbindlichkeiten gesteigert werden.

Erhöhte Reaktionsgeschwindigkeit und kontinuierliche Verbesserung: Die Befragten erwarten eine kontinuierliche Verbesserung der Arbeit, indem in regelmäßigen Feedback-Gesprächen Erfolge und Misserfolge thematisiert werden. Durch das Arbeiten in kürzeren Intervallen besteht die Möglichkeit, auf veränderte Rahmenbedingungen, wie z. B. die Ergänzung einer Produktfunktion, umgehend reagieren zu können. Hierdurch erwartet eine Vielzahl der Befragten eine schnellere und flexiblere Reaktion auf sich ändernde Kunden- oder Marktanforderungen.

Neben zahlreichen Potentialen ist die Einführung von Agilität mit unternehmensinternen und -externen Hürden verknüpft. Die zentrale Herausforderung besteht nach Aussage von vielen Befragten in dem umfassenden Veränderungsmanagement und der Umstrukturierung der bestehenden Strukturen.

Auswahl und Anpassung geeigneter Vorgehensmodelle und Werkzeuge: Eine Vielzahl der befragten Unternehmen steht vor der Herausforderung, ein geeignetes agiles Vorgehensmodell auszuwählen und an die unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen anzupassen. Gleichzeitig betonen mehrere Befragte, dass die Einführungsprojekte nicht auf die Implementierung eines neuen IT-Systems für das agile Arbeiten (z. B. agiles Aufgabenmanagement) beschränkt sein dürfen. Vor diesem Hintergrund müssen Ansätze zur Auswahl von geeigneten Vorgehensmodelle und IT-Systemen untersucht werden, welche insbesondere die Charakteristika von der Entstehung von komplexen, interdisziplinären Marktleistungen berücksichtigen.

Anpassung an die Organisation und das Projektumfeld: Ein Großteil der befragten Unternehmen bestätigt, dass es kein allgemeingültiges Modell gibt, welches ohne Anpassungen für verschiedene Organisationsformen und -größen sowie an die spezifischen Projektumfelder anwendbar ist. Daher sehen viele Befragte die Anpassung als entscheidenden Erfolgsfaktor für die Einführung von Agilität an. Die Prozesse und Methoden sind nach Aussage der Befragten bisher nicht ausreichend von der Wissenschaft in die Anwendung übertragbar. Die Entwicklung geeigneter Ansätze für eine systematische Auswahl und Anpassung seitens der Forschung kann die Einführungsvorhaben unterstützen. Dabei müssen insbesondere die unterschiedlichen Entwicklungsgeschwindigkeiten sowie

die verschiedenen Lebenszyklusdauern berücksichtigt werden. Nach Aussage einiger Unternehmen führt insbesondere in interdisziplinären Teams aus der Hard- und Softwareentwicklung die Festlegung von Zeitrahmen wie Sprints zu Herausforderungen. Priorisierungsansätze für die Auswahl der zu liefernden Funktionalitäten im Rahmen eines Sprints sind im Bereich von komplexen technischen Systemen noch nicht ausgereift. Vor diesem Hintergrund müssen Ansätze erforscht werden, welche Unternehmen befähigen, dynamisch Methodenbausteine zu einem geeigneten Systementwicklungsansatz für die erforderliche Projektsituation zu kombinieren.

Interne und externe Akzeptanz: Mit der Einführung von Agilität werden, ähnlich wie bei der Einführung von Systems Engineering (siehe Abschnitt 4.3.4), Veränderungen in der Arbeits- und Organisationsgestaltung erwartet. Laut einer Vielzahl der befragten Interviewpartner erfolgt die agile Zusammenarbeit meistens abteilungsübergreifend. In der agilen Zusammenarbeit mit Kunden und anderen Unternehmen in der Wertschöpfungskette sehen die Befragten größere Hürden. Oftmals fehlen Akzeptanz sowie Methoden- und Werkzeugunterstützung. Es besteht Forschungsbedarf, um zu einer strukturierten Herangehensweise für agiles Zusammenarbeit in einem Wertschöpfungsnetzwerk zu gelangen. Ein weiteres Forschungsfeld ist in diesem Kontext die Entwicklung von agilen Verträgen und deren Ausgestaltung.

Für erfolgreiches agiles Arbeiten müssen nach Aussage vieler Befragter die bestehende Unternehmenskultur und die über Jahrzehnte gewachsenen Wertschöpfungsketten berücksichtigt werden. Die Akzeptanz für agile Ansätze und die damit verbundene veränderte Arbeitsweise müssen über alle Unternehmensebenen verankert sein. Es werden zum Teil eine deutlich höhere Selbstorganisation und Disziplin in der methodischen Durchführung erwartet. Ebenso entscheidend sind die notwendigen Kompetenzen wie Flexibilität und Kommunikation sowie das Verständnis für die mit der Agilität verbundenen Rollenverteilung. >

Agiles Systems Engineering: Da agile Ansätze vermehrt im Entwicklungsvorhaben von mechatronischen Systemen erprobt und vereinzelt eingesetzt werden, erkennen mehrere befragte Unternehmen Synergien in einem kombinierten Einsatz mit Systems Engineering. Die Unternehmen nutzen dabei Systems Engineering als abstrakter Ansatz zur Entwicklung komplexer Marktleistungen und die agilen Ansätze in der operativen Prozessgestaltung. Während Systems Engineering nach Aussage der befragten Unternehmen die Denk- und Handlungsweisen im Umgang mit der hohen Komplexität unterstützt, ermöglichen agile Teamstrukturen und Prozesse eine hohe Flexibilität sowie

eine kontinuierliche Validierung von Entwicklungsergebnissen unterschiedlicher Reifegradstufen auf Basis von frühen Prototypen. Obwohl einzelne Befragte von ersten Erfolgen bei der Zusammenführung der Methoden berichten, ist agiles Systems Engineering noch nicht sehr verbreitet. Vor diesem Hintergrund besteht der Bedarf, mögliche Widersprüche zu identifizieren und adressieren, Synergien zu erschließen und in einem angemessenen Grad die wechselseitige Integration von Agilität und Systems Engineering zu bestimmen. Einen ersten Ansatz bietet in diesem Kontext z. B. das Agile Systems Design [AHS+19].

Agilität im Engineering: Agile Arbeitsweisen fördern die Kommunikation und die Kooperation im Engineering – im Unternehmen und unternehmensübergreifend. Allerdings fehlt es noch an Vorgehensmodellen, um Agilität auf breiter Front einzuführen. Ferner bedarf es noch einer Abstimmung agiler Arbeitsweisen mit Systems Engineering.

Der Großteil der Unternehmen plant oder erprobt aktuell den Einsatz agiler Vorgehensmodelle. Die Einführung beschränkt sich in der Regel auf einzelne Teams, Abteilungen oder Projekte. Bei einer Vielzahl der Unternehmen wird das Scrum-Rahmenwerk adaptiert und genutzt. Mit der Einführung von Agilität besteht die durch Erfahrungen gestützte Erwartungshaltung, dass die agile Arbeitsweise die Kommunikation und die Kooperation im Engineering sehr fördert. Ferner erwarten die Unternehmen eine verbesserte Transparenz in der Planung und Dokumentation des Vorgehens sowie eine erhöhte Verbindlichkeit für Arbeitsergebnisse. Die Transparenz und das regelmäßige Feedback sollen zu einer kontinuierlichen Verbesserung führen. Zu guter Letzt soll das agile Vorgehen die Unternehmen befähigen, flexibler und schneller auf sich ändernde Kunden- oder Marktanforderungen zu reagieren. Die damit verbundene Umstrukturierung der bestehenden Arbeitsweise führt zu einer Vielzahl von Herausforderungen. Die bestehenden Vorgehensmodelle und Werkzeuge stoßen an ihre Grenzen. Gleichzeitig fehlt es häufig an Akzeptanz über alle Unternehmensebenen hinweg und in unternehmensübergreifenden Vorhaben. Es fehlt auch an systematischen Vorgehensmodellen für die Einführung der agilen Arbeitsweise in Unternehmen, die den Anforderungen an die Organisation (z. B. Skalierbarkeit über viele Entwicklungsabteilungen) und an das Projektumfeld (z. B. interdisziplinäre Produkte) gerecht werden. Vor diesem Hintergrund gilt es, Synergien mit dem Systems Engineering zu identifizieren und zu nutzen. ●

4.4.2.2 Kreativitätsmanagement im Engineering

Das Kreativitätsmanagement dient als ein Katalysator für Innovationen, indem es sowohl das schöpferische Erfinden von technischen Lösungen unterstützt als auch deren wirtschaftliche Umsetzung ermöglicht. Es beruht auf der Fähigkeit, systematisch neue originelle Ideen aus der Verknüpfung des bestehenden Wissens zu schaffen. Das Wissen kann hierbei denkbare Entwicklungen von Märkten, Technologien und Geschäftsmodellen, neuartige technische Problemlösungen sowie konkrete Kundenfunktionen umfassen. Der Mensch steht hier als zentrales Element im Entwicklungsprozess. Kreativitätsmethoden geben ihm ein systematisches Vorgehen, Handlungsempfehlungen und Leitlinien vor, um die gewohnten Denk- und Entwicklungspfade zu verlassen und gute Ideen noch weiter zu verbessern.

Die Mehrheit der befragten Unternehmen teilt die Ansicht, dass Kreativität eine förderbare Fertigkeit eines Mitarbeiters ist und dass kein Widerspruch zwischen kreativem und analytischem Denken besteht. Obwohl eine Vielzahl der befragten Unternehmen kaum oder keine Kreativitätstechniken im Tagesgeschäft nutzt, besteht die Erwartungshaltung, dass kreative Freiräume in der Arbeitsorganisation die Innovationskraft steigern. Obgleich die befragten Unternehmen eine andere Kultur und Historie haben, werden in diesem Kontext häufig Erfolgsmethoden von Pionierunternehmen aus dem Innovationsökosystem des Silicon Valley genannt. Zum Beispiel bieten einige befragte Unternehmen ihren Mitarbeitern an, zu bestimmten Arbeitszeiten eigenständig neue kreative Ideen zu entwickeln. Bei Erfolgsaussicht werden den Mitarbeitern teilweise weitere Ressourcen und Freiräume für eine Umsetzung zugesprochen.

Obwohl die Relevanz von kreativem Spielraum von vielen Befragten erkannt wird, sind vergleichbare Modelle bei den Interviewpartnern noch nicht weit verbreitet. In diesem Kontext haben einzelne Befragte berichtet, dass einzig die Freistellung nicht zum gewünschten Erfolg geführt hat, da die Mitarbeiter das Zeitfenster weiterhin für operative Tätigkeiten genutzt haben. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass die Übernahme von Kreativitätsmaßnahmen ohne Anpassung an die gegebenen Rahmenbedingungen nicht zielführend ist. Es gilt zu erforschen, wie die Erfolgsmethoden von erfolgreichen Digitalunternehmen auf

andere Arbeitswelten mit anderen Grundvoraussetzungen und Werten übertragen werden können.

In Hinblick auf den gezielten Einsatz von Kreativitätsmethoden im Engineering ergibt sich unter den Befragten ein heterogenes Stimmungsbild. Einzelne Unternehmen sehen momentan keinen Bedarf für den Einsatz von speziellen Methoden. Schon das Angebot, Arbeitszeit und -raum für das kreative Arbeiten zu nutzen, würde ihre Mitarbeiter zur kreativen Lösungsfindung anregen. Andere Befragte weisen darauf hin, dass ein zu stark systematisiertes Vorgehen teilweise eine gegenteilige Wirkung hervorruft und Kreativitätstechniken daher besser indirekt in bestehende Ansätze integriert werden sollten. In einigen Unternehmen ist der Einsatz von Kreativitätsmethoden bereits etabliert und die Wahrnehmung der Mitarbeiter ist sehr positiv. Genannte Methoden sind z. B. Brainstorming, Brainwriting, Methode 635, Mindmap und Design Thinking (VGL. BILD 18; INFOBOX 18). Besonders beliebt ist die Methode Design Thinking in Kombination mit Systems Engineering.

INFO 18 Design Thinking

Design Thinking ist eine Kreativitätsmethode, welche zur kundenzentrierten Lösung von komplexen Problemen und zur Findung origineller Ideen angewendet wird. Design Thinking ist ein iterativer Prozess mit sechs Phasen, welcher in vielen Bereichen Anwendung findet. Insbesondere im Bereich komplexer interdisziplinärer Systeme kann Design Thinking den Umgang mit unsicheren Anforderungsänderungen und chaotischen Problemstellungen unterstützen, um z. B. die Kundenbedarfe zu identifizieren. Für die Entwicklung von Advanced Systems Engineering mit einem auf Basis von Design Thinking abgewandeltem Vorgehen kombiniert. Damit kann z. B. ein Entwicklungsauftrag hinsichtlich Machbarkeit analysiert werden. Die Wirkungsweise von Design Thinking kann auch für eine zielgerichtete und kontinuierliche Definition und Beantwortung von Fragestellungen unterschiedlicher Detailstufen entlang des Entwicklungsprozesses genutzt werden. Mit diesem Vorgehen lässt sich die Komplexität von Entwicklungsvorhaben reduzieren und die Handhabbarkeit steigern. [NM19] ➤

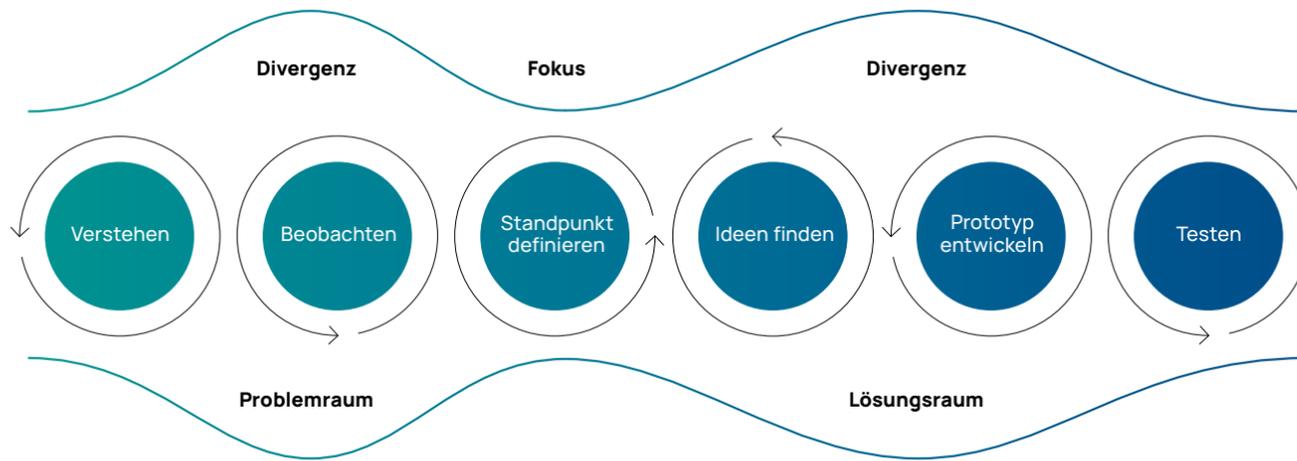


Bild 18: Die sechs Phasen des Design Thinkings in Anlehnung an [NM19]

Neben der fehlenden Systematisierung des Kreativitätsmanagements scheitert die erfolgreiche Nutzung von Kreativitätsmethoden nach Aussage vieler Befragter an der fehlenden Akzeptanz der Mitarbeiter und der mangelnden Unterstützung durch die Führungsebene. Vor diesem Hintergrund beschreiben viele Befragte, dass die Kreativitätsmethoden teilweise eine intensive, moderierende Begleitung erfordern. Als Beispiel wird die Methode LEGO SERIOUS PLAY® genannt, mit der Besprechungen und Problemlösungsprozesse unterstützt werden sollen. Die Teilnehmer werden mit Fragen angeleitet, sich einem vorher definierten Thema abstrahiert zu nähern. Auf Grundlage der Fragen baut jeder Teilnehmer physisches Modell, an dem in der anschließenden Diskussionsrunde die Antworten auf die Fragen der Gruppe vorgestellt werden können. Nach Aussage der befragten Unternehmen besteht die Herausforderung, dass diese Methode die Mitarbeiter ohne systematische Anleitung nicht überzeugt oder überfordert. Vor diesem Hintergrund besteht der Bedarf, geeignete Kreativitätsmethoden in der Entstehung komplexer interdisziplinärer Systeme zu erforschen und geeignete Ansätze für die Weiterbildung und Überzeugung der Trainer und Coaches in den Unternehmen bereitzustellen. Einige Befragte nannten hier das Problemlösungsmodell SPALTEN (VGL. [ARB+16]).

Um Kreativität in der Produktentstehung zu fördern, bedarf es laut einer Vielzahl der Befragten einen Mentalitätswandel sowohl in den Führungspositionen als auch bei den Entwicklern. Teilweise bestätigen die Befragten, dass kreatives Denken nicht als selbstverständlich in den Tätigkeiten der Mitarbeiter verankert ist. Auch die Überwindung historisch gewachsener, eher stringenter Denk- und Handlungsweisen beschreiben einzelne Interviewpartner als zentrale Herausforderung. Um den Wandel der Mentalität zu befähigen, erproben erste Unternehmen kreativitätsfördernde Infrastrukturen. Die befragten Unternehmen haben die Erwartungshaltung, dass außerhalb des operativen Tagesgeschäfts mehr Gestaltungsmöglichkeiten für Innovationen entstehen können. Vor diesem Hintergrund haben mehrere Unternehmen neben den bestehenden Büros sogenannte Digitallabore oder Innovation Hubs eingerichtet. Mithilfe von moderner Ausstattung und Validierungsmethoden können in diesen Umgebungen neue Ideen mit geringem Aufwand erprobt werden. Dazu werden z. B. 3D-Drucker, IoT-Kits und Bastelmaterial für das Prototyping verwendet. Da eine Vielzahl der befragten Unternehmen über keine eigene entsprechende Infrastruktur verfügt, wird teilweise auf externe Angebote und Infrastrukturen zurückgegriffen. Neben Workshops werden die befragten Unternehmen vermehrt auf Veranstaltungen wie Hackathons und Makeathons aufmerksam (VGL. INFOBOX 19). Diese werden sowohl unternehmensintern und als auch gemeinsam mit Hochschulen oder anderen Unternehmen organisiert.

INFO 19 Makeathon

Ein Makeathon (Kofferwort aus »Making« + »Marathon«) ist eine kollaborative Veranstaltung, die zur Ideenfindung eingesetzt wird. Unter Anleitung versuchen verschiedene Teams innerhalb eines begrenzten Zeitrahmens möglichst kreative Lösungen zu einer bestimmten Aufgabenstellung zu erarbeiten. Die Dauer kann von einigen Stunden bis zu mehreren Tagen variieren. Die Teams des Workshops sind interdisziplinär aufgestellt und arbeiten gemeinsam an einem Problemlösungsansatz. Dabei kommen Techniken wie z. B. Brainstorming zum Einsatz. Innerhalb eines Makeathons werden nicht nur ausschließlich Programmieraufgaben behandelt, sondern es geht um die allgemeine Entwicklung kreativer Lösungen für technische Probleme. Im Vergleich zum Hackathon wird beim Makeathon der Fokus stärker auf die Umsetzung der Ideen in Form von ersten Prototypen und deren Validierung gelegt. [AWR+19]

Kreativitätsmanagement im Engineering: Innovationen beruhen auf Kreativität. Obwohl das hinreichend bekannt ist und eine Fülle an Kreativitätstechniken inklusive überzeugender Success Stories existiert, ist Kreativität in vielen Unternehmen nur ein Randthema. Hier bleiben viele Erfolgspotentiale bisher unerschlossen.

Kreativität führt zu innovativen Marktleistungen. Es kommt darauf an, das Kreativitätspotential einer Organisation zu erkennen und systematisch auszuschöpfen. Obwohl die Unternehmen grundsätzlich diese Meinung teilen, ergibt sich im Hinblick auf den gezielten Einsatz von Kreativitätsmethoden im Engineering ein uneinheitliches Stimmungsbild. Eine Vielzahl der Unternehmen verwendet kaum bzw. keine Kreativitätstechniken. Trotz der erkannten Relevanz von kreativem Freiraum sind die dafür erforderlichen Infrastrukturen oder Arbeitszeitmodelle noch nicht verbreitet. Um Kreativität in der Produktentstehung zu fördern, bedarf es eines Mentalitätswandels sowohl in den Führungspositionen als auch bei den Entwicklern. Dadurch kann die Akzeptanz gesteigert werden. Positiv ist die sehr große Auswahl an Kreativitätstechniken, die sich in der Praxis bewährt haben, beispielsweise das Design Thinking und Kreativitätsworkshops wie Makeathons. Hier zeichnet sich die Herausforderung ab, die für den spezifischen Einsatzfall bestgeeignete Technik auszuwählen. ●

4.4.2.3 Produktgenerationsentwicklung

Der Wandel zu Advanced Systems verspricht umfassende Innovationspotentiale durch die Einführung neuer Produkt-Features oder ergänzender, datenbasierter Dienstleistungen. Dies resultiert in einer großen Anzahl von verschiedenen Produktversionen und -generationen, deren Release durch einen systematischen Planungs- und Entwicklungsprozess gesteuert werden muss. Dabei gilt es, die Gestaltung lebenszyklusgerechter Produktplattformen, die Modellpflege im bestehenden Produktportfolio und die Entwicklung neuer Produktgenerationen zu unterstützen. Mit dem Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung kann die Produktentwicklung beschrieben und entsprechend strukturiert werden (vgl. [ABW15]). Die Entwicklung einer neuen Produktgeneration basiert auf der Grundlage bereits existierender Lösungen, welche die Teile des Referenzsystems bilden. Diese Lösungen sind z. B. unternehmenseigene Vorgängerprodukte, Prototypen aber auch Systeme von Wettbewerbern oder Produkte aus anderen Branchen. Das Referenzsystem entspricht dabei der Gesamtheit der Elemente, die die Grundlage für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration bilden. [ARS+19]

Als Vorteil der generationsübergreifenden Planung der Entwicklung neuer Produkte nennen einzelne Befragte die Risikominimierung in der Entwicklung sowie neue Möglichkeiten zur Wettbewerbsdifferenzierung. Nach Aussage einzelner Befragter aus der Wissenschaft folgt auf eine Produktgeneration mit einem hohen Neuentwicklungsanteil häufig eine Generation mit einem geringeren

Neuentwicklungsanteil. Dadurch lassen sich relevante Differenzierungsmerkmale identifizieren, welche variiert, überarbeitet oder in die folgende Generation übernommen werden. Dies ermöglicht die Aufteilung der Validierungsaufwände auf mehrere Generationen.

Ansätze des MBSE können bei der Produktentwicklung unterstützen (z. B. bei der Analyse des Referenzsystems). Gleichzeitig befähigt die Beschreibung der vorherigen Produktgenerationen nach Aussage einzelner Befragter die ganzheitliche Einführung und Umsetzung von MBSE in Unternehmen. Die Entwicklung einer neuen Generation technischer Produkte erfordert ein konsistentes, methodisches Vorgehen zwischen der strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung. Besonderes Potential schreiben einzelne Befragte dabei der integrativen, strategischen Planung von Generationen des Produkts, der Dienstleistung und des Produktionssystems zu. Damit können eine wirtschaftliche Planung und Realisierung eines Produktprogramms mit vernetzten Produktlinien zeitlich über mehrere Generationen erfolgen.

Als relevantes Forschungsfeld wird das Wechselspiel der generationsübergreifenden Entwicklung mit agilen Ansätzen der Produktentwicklung genannt. Insbesondere bei der Entwicklung von komplexen Produkt-Service-Systemen können mithilfe der PGE realisierbare Inkremente definiert werden. Ein Referenzsystem aus Vorgängerprojekte kann den beteiligten Entwicklern eine Struktur als Ausgangsbasis vorgeben, innerhalb derer die agilen Ansätze zielgerichtet umgesetzt werden können.

Produktgenerationsentwicklung: Ein durchgängiges Verständnis der Produktentwicklung als PGE – Produktgenerationsentwicklung unterstützt die effiziente und effektive Gestaltung des Entwicklungsgeschehens.

Die zunehmende Anzahl von verschiedenen Produktversionen und -generationen und deren Release kann durch einen systematisch-integrierten Planungs- und Entwicklungsprozess (z. B. dem Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung) beschrieben, strukturiert und gesteuert werden. Dies bietet Vorteile hinsichtlich der Risikominimierung in den Entwicklungsaktivitäten, Reduktion von Validierungsaufwänden sowie neue Möglichkeiten der Wettbewerbsdifferenzierung. Obwohl die Modelle und Potentiale der generationsübergreifenden Entwicklung in der Wissenschaft konstituiert sind, haben sich die Ansätze in der Praxis noch nicht umfassend etabliert. ●

4.5 Auswirkungen von Advanced Systems Engineering auf die Organisation und den Menschen im soziotechnischen Gesamtsystem

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Entwicklungen in den Handlungsfeldern des Systems Engineering und des Advanced Engineerings befindet sich die Produktentstehung in einem kontinuierlichen Transformationsprozess, um den Herausforderungen in der Gestaltung der Advanced Systems begegnen zu können. Die strategische Ausrichtung der Organisation und des darin eingebetteten Engineerings spielen eine entscheidende Rolle bei der nachhaltigen Entwicklung von innovativen Marktleistungen und dem Einsatz von Technologien zum wirtschaftlichen Nutzen von Unternehmen (vgl. INFOBOX 20).

Bezogen auf die zukünftigen Ausprägungen der Advanced Systems besteht der Bedarf, geeignete Organisationsmodelle und deren Prozesse, Rollen, Aufgaben, IT-Werkzeuge, leistungsstarke Methoden und neue Formen der Kollaboration für ein digitales und agiles Miteinander zu erforschen. Dies erfordert die Gestaltung einer tragfähigen Engineering-Strategie, welche im Zusammenspiel mit den bereits bestehenden Produkt-, Technologie- und Innovationsstrategien in das Management eines Unternehmens integriert wird. ➤

	Mensch	Organisation	Technik
System der Marktleistung gestaltet durch die Produkt- und Marktstrategie	Endverbraucher B2C-Kunde Nutzer etc.	Unternehmensumfeld B2B-Kunde Distributionspartner etc.	Produktportfolio Produkte (Sachgüter) (Datenbasierte) Dienstleistungen etc.
System der Marktleistung gestaltet durch die Engineering-Strategie	Mitarbeiter Ingenieure Manager etc.	Unternehmen Aufbauorganisation Ablauforganisation etc.	Technische Ressourcen IT-Systeme und IT-Infrastruktur Fertigungslinien etc.

Bild 19: Einordnung der Marktleistung und dessen Entstehung in das soziotechnische Gesamtsystem

INFO 20 Engineering als soziotechnisches System

Unter einem soziotechnischen System wird eine organisierte Menge von Menschen (z. B. Nutzer und Mitarbeiter) und Technologien (z. B. IT-Systeme) verstanden [Rop9]. In der Entstehung von Marktleistungen arbeiten unterschiedliche Akteure unternehmensintern und -übergreifend zusammen. Ein soziotechnisches System kann daher einerseits das Ergebnis aus einem Entstehungsprozess (System der Marktleistung) als auch die Organisation der Entstehung selbst (System der Marktleistungsentstehung) sein. Dabei besteht eine enge Abhängigkeit zwischen der Marktleistung und der Organisation der Entstehung. Dies zeigt sich beispielsweise in einem direkten Zusammenhang zwischen der Komplexität der zwei Systeme. So erfordert eine interdisziplinäre Marktleistung offensichtlich auch einen interdisziplinären Entstehungsprozess, in dem die wechselseitigen Zusammenhänge sowohl zwischen den Komponenten als auch zwischen den verantwortlichen Abteilungen oder Mitarbeitern zunehmen.

In diesem Zusammenhang wird die Ausrichtung der Entstehungsprozesse und der damit verbundenen Arbeitsorganisation im Engineering immer wichtiger. Die Investitionen und Anstrengungen bei der Gestaltung der Marktleistungen müssen mit den Auswirkungen auf die Organisation und den Menschen im soziotechnischen Gesamtsystem in Einklang gebracht werden und bei neuen Dienstleistungen oder Geschäftsmodellen berücksichtigt werden (VGL. BILD 19). Erste Ansätze zur Unterstützung dieses Transformationsprozesses wurden bereits in vorherigen Abschnitten beschrieben.

Im Rahmen des Status quo wurden folgende Themenfelder beleuchtet:

- Organisation im Wandel (VGL. ABSCHNITT 4.5.1)
- Der Mensch im Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.5.2)

mation der Organisation in Verbindung mit der Einführung von flachen Hierarchien sowie cross-funktionaler Arbeitsstrukturen (VGL. BILD 20). Im Fokus sollte hier die Orientierung der Organisation an übergreifenden End-to-End-Geschäftsprozessen stehen, um dadurch die Abläufe aufeinander abstimmen und auf das Ziel der optimalen Erfüllung der Kundenbedürfnisse ausrichten zu können. Ein End-to-End-Prozess reicht von der Ermittlung der Kundenbedarfe bis zur Leistungserbringung und ist in der Regel abteilungsübergreifend.

Diese umfassende Transformation bedingt hohe Aufwände und setzt eine Wandlungsbereitschaft seitens der Mitarbeiter und Führungskräfte voraus, welche jedoch von einzelnen Interviewteilnehmern als kritisch beschrieben worden ist. Die Angst vor Veränderungen und eine fehlende Risikobereitschaft hemmen im Allgemeinen die Innovationsfähigkeit von Unternehmen. Daher ist es nach Aussage vieler Befragter notwendig, die Mitarbeiter frühzeitig in den Transformationsprozess einzubinden, damit diese die Veränderungen mitgestalten können. Den von den Veränderungen betroffenen Mitarbeitern müssen Sicherheit und Zuversicht vermittelt werden. Ferner erfordern die Transformationsprozesse einen starken

Rückhalt im Management und müssen ganzheitlich und koordiniert ablaufen. Die größten Widerstände werden von einigen Befragten im mittleren Management verortet, da in diesem durch eine Reorganisation in flachere Hierarchien die größten Veränderungen bevorstehen. Als weitere Herausforderungen werden von einer Vielzahl der Befragten auch die Synchronisation der verschiedenen Arbeitsweisen und die unterschiedlichen Iterationszyklen der Fachdisziplinen wahrgenommen. Der Wandel hin zu End-to-End-Prozessen bedeutet weiterhin eine Abkehr von der klassischen Optimierung in einzelnen Fachbereichen, die sich in vielen Unternehmen über einen langen Zeitraum etabliert hat. Hier sind organisatorische Ansätze zu entwickeln, welche die Transformation von Unternehmen zu dem Leitbild Advanced Systems Engineering unterstützen und begleiten.

Ein Großteil der Interviewpartner schreibt der Etablierung einer offenen Unternehmens- und Fehlerkultur mit transparenter Kommunikation eine hohe Bedeutung zu. Die aus der Digitalisierung der Prozesse resultierende, steigende Transparenz kann zeitgleich eine Herausforderung für die Mitarbeiter darstellen. So können mögliche Fehler schneller aufgedeckt und zugeordnet werden. >

4.5.1 Organisation im Wandel

Unter einer Organisation wird in der Regel ein formales Regelwerk eines arbeitsteiligen soziotechnischen Systems verstanden, durch welches die zielorientierte Arbeit von Menschen entsteht. Die Betriebswirtschaftslehre unterscheidet traditionell zwischen einer Aufbau- und einer Ablauforganisation. Advanced Systems sowie deren Entstehung fordern und fördern kontinuierlich die Entstehung neuer Konzepte der Organisations- und Arbeitsgestaltung.

Im Rahmen des Leistungsstands wurden folgende Themenfelder beleuchtet:

- Wandel der Organisationsstruktur und -kultur (VGL. ABSCHNITT 4.5.1.1)
- Kollaboration im Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.5.1.2)

4.5.1.1 Wandel der Organisationsstruktur und -kultur

Mit Blick auf den Wandel zu Advanced Systems und den damit einhergehenden Anforderungen agieren Unternehmen in einem Marktumfeld, welches volatil als jemals zuvor ist. Viele der heute noch weitverbreiteten Organisationsstrukturen sind noch nicht auf dieses Umfeld angepasst. Daher stehen viele Unternehmen grundsätzlich vor der Herausforderung, die notwendige Neuausrichtung der Organisation, Methoden und Prozesse mit dem operativen Tagesgeschäft in Einklang zu bringen.

Einzelne Interviewpartner beschreiben die aktuelle Aufbauorganisation als klassische Hierarchie mit isolierter Linienorganisation. Gefordert wird daher eine Transforma-



Bild 20: Wandel der etablierten Aufbauorganisation zu einem cross-funktionalen Team aus Teams in Anlehnung an [MCS+15]

Die befragten Unternehmen betonen, dass in diesem Kontext entsprechende Maßnahmen erforderlich sind, damit die Unternehmenskultur dem Gefühl einer Überwachung entgegenwirkt. Der Großteil der Befragten schreibt der Unternehmenskultur eine zentrale Rolle für die Akzeptanz von Veränderungen zu. Eine klare Zuweisung von Verantwortlichkeiten ein hohes Maß an Vertrauen, das die Unternehmen ihren Mitarbeitern entgegenbringen, sind hierbei laut vielen befragten Interviewteilnehmern ebenso wichtig wie eine gute Eigenorganisation und Eigenverantwortung der Mitarbeiter. Einige Unternehmen geben an, dass Ingenieure vermehrt räumlich unabhängig und zeitlich maximal flexibel arbeiten wollen. Erste Unternehmen erwarten, dass eine Reduzierung der Arbeitszeit die Mitarbeitermotivation bei gleicher Arbeitsleistung und Ergebnisqualität steigern kann.

Obwohl nach Aussage einzelner Interviewpartner junge ehrgeizige Beschäftigte einerseits vielfach einen zu starken Fokus auf die Arbeitstätigkeit legen, besteht andererseits ein wahrnehmbarer Trend hinsichtlich der Vereinigung von Lebens- und Arbeitswelt (Work-Life-Blending). Das damit verbundene eigenverantwortliche Handeln und das selbstständige Festlegen des Arbeitsrhythmus stellt das global verteilte Engineering vor neue Herausforderungen. Insbesondere verteilte Teams nutzen momentan fest definierte Abstimmungen zum Informationsaustausch. Des Weiteren sollten die Formalisierung und die steigende Notwendigkeit des methodenunterstützten Vorgehens kontinuierlich hinterfragt werden. Hier herrscht nach Aussage mehrerer Befragter ein schmaler Grat zwischen einem kreativitätshemmenden Methodenzwang und erforderlicher Vorgaben, die bei der unternehmensspezifischen Ausgestaltung zu berücksichtigen sind. Angebote wie Kinderbetreuung, Freizeit- und Gesundheitsangebote sowie eine gut funktionierende Infrastruktur werden von den Mitarbeitern meistens als Standard wahrgenommen.

Wandel der Organisationsstruktur und -kultur: Die Bewältigung der Engineering-Komplexität erfordert mitdenkendes Personal, ein hohes Kooperationsvermögen sowie Denken und Handeln in End-to-End-Prozessen. In den meisten Unternehmen bedeutet das auch eine Weiterentwicklung der Unternehmenskultur, was erfahrungsgemäß Zeit und Beharrlichkeit verlangt.

Viele Unternehmen befinden sich in einer Phase der Neuausrichtung der Organisationsstruktur im Engineering, in deren Verlauf die Einführung von flachen Organisationsstrukturen sowie ein Wandel von funktionsorientierten zu prozessorientierten Arbeitsstrukturen angestrebt wird. Der Etablierung einer offenen Unternehmens- und Fehlerkultur mit transparenter Kommunikation wird dabei eine hohe Relevanz zugewiesen. Des Weiteren rückt die Rolle der Unternehmenskultur als Grundlage für die Förderung von Kreativität und Zusammenarbeit in den Fokus. Es herrscht die Meinung vor, dass der tief greifende Wandel im Engineering Hand in Hand mit der Weiterentwicklung der Unternehmenskultur gehen muss, die alle Führungsebenen erfasst und von den Führungspersonlichkeiten vorgelebt wird. Die Führung muss sich bewusst sein, dass eine Veränderung der Unternehmenskultur viel Zeit und ein hohes Maß an Beharrlichkeit erfordert. ●

4.5.1.2 Kollaboration im Engineering

Für eine erfolgreiche Wertschöpfung müssen Kompetenzen und Erfahrungswissen unternehmensintern und -übergreifend zusammengeführt werden. Dies geht einher mit einer zunehmenden Auflösung traditioneller Abteilungs- oder Branchengrenzen. Dabei entstehen neue Formen von Partnerschaften und Organisationsformen. Die identifizierten Auswirkungen von Advanced Systems Engineering in Bezug auf die Kollaboration im Engineering lassen sich in die Bereiche unternehmensinterne Kollaboration und Kollaboration innerhalb von Wertschöpfungsnetzwerken differenzieren (VGL. BILD 21).

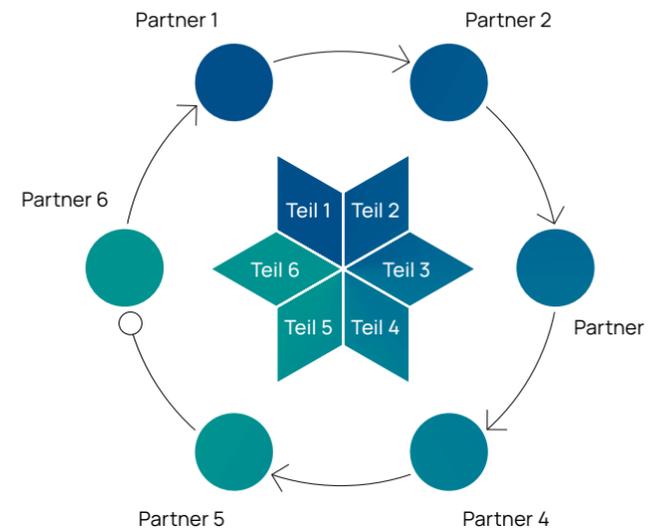
Gemeinschaftliches Arbeiten ist ein zentraler Aspekt für den wirtschaftlichen Erfolg einer Unternehmung. Bei einer Kooperation arbeiten Unternehmen, Teams oder Mitarbeiter asynchron an unterschiedlichen Teilaufgaben eines Ergebnisses, wie z. B. einer Marktleistung. Dabei sind jedoch nicht alle Kooperationspartner an dem Endergebnis eines Projektes beteiligt und verfol-

gen nicht zwangsläufig ein gemeinsames Ziel. Bei einer Kollaboration arbeiten die Partner hingegen parallel und gemeinsam an einem Teil des Endergebnisses. Gleichzeitig verfolgen die Partner bei der Kollaboration ein gemeinsames Ziel.

Unternehmensinterne Kollaboration

Insbesondere im Hinblick auf die ansteigende Entwicklungskomplexität sehen viele Befragte verstärkt Bedarf, ihre unternehmensinterne Kollaboration zu verstärken. Einige Befragte bestätigen, dass momentan die mechatronische Systementwicklung einer Kooperation mit stringent getrennten Teilergebnissen entspricht. Eine zwingend erforderliche Zusammenarbeit in Form einer kollaborativen Entwicklung ist noch nicht etabliert. In diesem Kontext betonen die Befragten, dass ein globales Optimum aus Kundenperspektive mit dem aktuellen Vorgehen nur schwer erreichbar ist, solange einzelne Abteilungen ausschließlich nach der disziplinspezifisch

Kooperation



Kollaboration

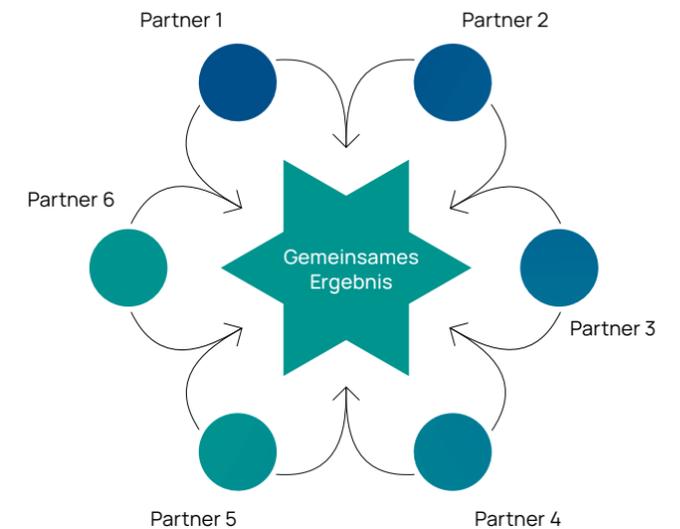


Bild 21: Kooperation und Kollaboration in Engineering-Vorhaben

besten Lösung streben. Vor diesem Hintergrund sehen mehrere Befragte die Kollaboration inklusive gemeinsamer Sprache als zentrale Voraussetzung für die interdisziplinäre Entwicklung von Advanced Systems. Für das gemeinsame Verständnis müssen die Mitarbeiter zunehmend über gemeinsame mentale Modelle über mentale Modelle kommunizieren (VGL. INFOBOX 21).

INFO 21 Mentale Modelle

Ein mentales Modell ist eine Repräsentation eines Objekts oder eines Prozesses, mit dessen Hilfe Aufgaben und Probleme durch Analogiebetrachtung am Objekt gelöst werden können. Für die Lösung von Problemen sind mentale Modelle von großer Bedeutung, da sie wesentlich zum Verständnis eines komplexen Systems beitragen [mos03]. In der Produktentstehung sind mentale Modelle von großer Bedeutung, um immer komplexer werdende technische Systeme zu verstehen. Sie bilden ein Grundverständnis in der Produktentstehung auf Basis von Denk-, Beschreibungsmustern und Ontologien. Insbesondere für die Kommunikation sind mentale Modelle relevant. Mittels ihrer Unterstützung können eine Intersubjektivität und eine gemeinsame Sprache geschaffen werden, welche zum gemeinsamen Verständnis des Problems beitragen [MEB08].

Durch die notwendige interdisziplinäre Entwicklungsarbeit werden die nach Aussage vieler Befragter bestehenden Linienorganisationen aufgelöst. Auch das standortverteilte Arbeiten gewinnt an Zuspruch. Mitarbeiter müssen in der Lage sein, in verschiedenen Teams an verschiedenen Standorten zusammenzuarbeiten. Einige Befragte fordern zudem eine Verstärkung der Zusammenarbeit zwischen der Produkt-, Dienstleistungs- und Produktionssystementwicklung.

Diese Entwicklungen setzen eine verstärkte und standortübergreifende Kommunikation voraus. Eine Vielzahl der befragten Unternehmen hat bereits Kommunikations- und Dokumentationssysteme mit entsprechender IT-Infrastruktur eingeführt. Microsoft Teams hat durch

die COVID-19-Pandemie einen großen Aufschwung erlebt. Wissensmanagementsysteme mit Wiki-Funktionalitäten, Kommunikationsplattformen und Aufgabenmanagement-Systeme wurden besonders häufig genannt.

Einige Befragte kritisieren die aktuellen Entwicklungen der Kollaborationstools. Durch die Vielzahl der parallel genutzten Kommunikationskanäle (z. B. Chat, Telefon, Videokonferenz, E-Mail etc.) kann die Kommunikation deutlich erschwert werden und wichtige Aspekte werden nicht strukturiert dokumentiert. Zum aktuellen Zeitpunkt fehlen hier methodische Vorgehen zur Strukturierung der Schnittstellen zwischen Kollaborationsmöglichkeiten sowie Ansätze zur Dokumentation relevanter Entscheidungen. Einzelne Unternehmen fordern ein cloudbasiertes Kollaborationssystem, welches alle Aktivitäten der interdisziplinären Produktentstehung auf Prozess- und Datenebene adressiert. Weitere einzelne Befragte betonen, dass aktuelle Lösungen wie »Social Intranet« Plattformen nicht den Anforderungen der Produktentstehung entsprechen.

Kollaboration innerhalb von Wertschöpfungsnetzwerken

Die Kollaboration innerhalb von Wertschöpfungsnetzwerken ist nach Aussage vieler Interviewpartner ein Erfolgsfaktor für die Gestaltung von komplexen technischen Systemen. Bei einer Kollaboration mit dem Ziel einer gemeinsamen Marktleistung kann sich jeder Partner auf seine Kernkompetenz konzentrieren und seine Erfahrungen in den Entstehungsprozess einbringen. Einzelne Befragte konnten bereits positive Erfahrungen beim Zusammenschluss von Unternehmen in einem Joint Venture sammeln. Andere befragte Unternehmen betonen, dass die Zusammenarbeit mit Zulieferern und Kunden noch nicht ausreichend ist und damit Potentiale ungenutzt bleiben.

Vergleichbare Vorhaben setzen jedoch verschiedene Rahmenbedingungen voraus. Alle Kollaborationspartner müssen sich auf schnell veränderte Prozesse, Methoden, IT-Werkzeuge und Informationsstandards einstellen können. Das Arbeiten in kollaborativen Wertschöpfungsnetzwerken stellt neue Herausforderungen an die Eigenschaftsabsicherung der gemeinsamen Marktleistung, da bei einem ungewünschten Verhalten ein Konsens über

das weitere Vorgehen zur Qualitätssicherung der Partner erforderlich ist. Gleichzeitig führen heterogene IT-Systemlandschaften, IT-Infrastrukturen und Schnittstellen sowie fehlende Standards für Datenaustauschformate zu steigenden Integrationsaufwänden.

Der zunehmende Einsatz von agilen Vorgehensmodellen erfordert eine neue Form der Arbeits- und Organisationsgestaltung in Wertschöpfungsnetzwerken. Bei einem internen Vorhaben mit einem agilen Projektmanagement können unternehmensspezifische Vorgaben wie die Sprint-Dauer definiert werden. Erfolgt die agile Kollaboration jedoch über Unternehmensgrenzen hinweg, nehmen die Formen der Zusammenarbeit und Kommunikation sowie die Abstimmungsaufwände neue Dimensionen an. Einzelne Befragte wünschen sich bereits eine agile Zusammenarbeit mit ihren Zulieferern und Kunden. Für eine erfolgreiche Zusammenarbeit müssen jedoch neue Ansätze und Modelle sowie Verträge entwickelt werden, die z. B. eine agile Abnahme adressieren. Im Kontext der agilen Zusammenarbeit mit den Kunden merkten viele Befragte an, dass die notwendige Zuarbeit durch den Kun-

den nur schwer realisierbar ist. Ausschließlich in Einzelfällen wird ein agiles Vorgehen explizit vom Kunden gefordert.

Im Zuge der Globalisierung und der steigenden Internationalisierung besitzen gerade die größeren Unternehmen in der Erhebung mehrere global verteilte Entwicklungsstandorte. Englisch als Kommunikationssprache wird daher in den Entwicklungsabteilungen weiter zunehmen. Erste Großkonzerne in der Automobilbranche stellen bereits ihre Unternehmenssprache auf Englisch um. Neben verschiedenen Sprachen erschweren auch die Zeitverschiebung und die unterschiedlichen kulturellen Einflüsse die Kommunikation und Kollaboration und können für Missverständnisse sorgen. Hier bedarf es einer höheren Kompetenz hinsichtlich der geforderten global verteilten Zusammenarbeit, um diese Herausforderungen zu beherrschen. Neben global verteilten Entwicklungsstandorten werden von einigen Befragten auch internationale Kooperationen mit anderen Wertschöpfungspartnern als Hürde beschrieben. Hier bedarf es klarer derangierter und politischer Rahmenbedingungen für internationale Kollaborationen.

Kollaboration in Engineering: Innovationskraft beruht zu einem erheblichen Teil auf dem Leitbild »Lernende Organisation« sowie auf gemeinsamen Ausdrucksmitteln und Praktiken.

Erfolgreiche Wertschöpfung erfordert kollaboratives, gemeinschaftliches Arbeiten und die unternehmensinterne und -übergreifende Zusammenführung von Kompetenzen und Erfahrungswissen. Die Kollaboration bei der Entstehung von Advanced Systems bedarf einer gemeinsamen, disziplinübergreifenden Entwicklungssprache sowie eines gemeinsamen Meta-Modells für Produkte, Dienstleistungen und Produktionssysteme. Entsprechende Methoden und IT-Systeme für das unternehmensinterne Wissensmanagement und die Kommunikation müssen etabliert werden. Des Weiteren gilt es, Best Practices für Prozesse, Methoden, IT-Werkzeuge und Informationsstandards zu identifizieren und zu kommunizieren, um voneinander zu lernen und um global verteilte Entwicklungsstandorte und unternehmensübergreifende Kollaboration innerhalb von Wertschöpfungsnetzwerken zu ermöglichen. ●

4.5.1.3 Kooperation zwischen Wirtschaft und Wissenschaft

Nahezu alle befragten Unternehmen begrüßen die Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und schätzen das allgemeine Kollaborationspotential zwischen Wissenschaft und Wirtschaft als sehr hoch ein. Viele Befragte erwarten, dass die Bedeutung von Kollaborationen im Hinblick auf eine weitere Spezialisierung der Technologien und eine zunehmende Komplexität der Anwendungen in Zukunft weiter steigen wird. Allerdings werden bestehende Potentiale oftmals nur unzureichend genutzt. Seitens einiger befragter Unternehmen besteht die eindeutige Forderung, neue Kollaborationsmodelle oder Austauschprogramme zu etablieren. Als Positivbeispiele wurden z. B. das Future Work Lab der Fraunhofer-Institute IPA und IAO oder die Forschungs- und Entwicklungs-Kooperationsprojekte des Spitzenclusters Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe (it's OWL) genannt. In den Kooperationsprojekten arbeitet ein Wissenschaftler für einen begrenzten Zeitraum in einem Unternehmen mit den dortigen Mitarbeitern an einer konkreten Aufgabenstellung, welche auf vorherigen Forschungsergebnissen aufbaut. Durch die Kollaboration können implizites Wissen und Erfolgsmethoden transferiert werden. Gleichzeitig fördern die gemischten Teams aus Wissenschaftler und dortigen Mitarbeitern die Entwicklung von innovativen Problemlösungen. Einige befragte Unternehmen betonen jedoch

Defizite im Hinblick auf anwendungsorientierte Transferkonzepte für Technologien und Methoden. Ein Erfolgsfaktor ist zum einen ein ausreichender Weitblick der Unternehmen in der Technologieplanung. Zum anderen ist es wichtig, den Transfer von Ergebnissen in die Unternehmen hinein bereits während der Laufzeit eines Forschungsvorhabens zu initiieren. Aus Sicht der Befragten müssen dabei immer die unterschiedlichen Maßstäbe und Bewertungsmetriken der Wirtschaft und Wissenschaft beachtet werden. Während für die Unternehmen dem wirtschaftlichen Erfolg Rechnung getragen werden muss, stehen für viele Forscher der Erkenntnisgewinn und die sich daraus ergebende akademische Reputation im Vordergrund. Diesem möglichen Interessenkonflikt sollte bei gemeinsamen Projekten durch eine offene Kommunikation der jeweiligen Ziele sowie der Motivation begegnet werden. Höchste Priorität aus wissenschaftlicher Sicht hat dabei, die Grundsätze von grundlagenorientierter Forschung und Lehre nicht zu unterwandern. Dazu müssen Vertreter aus Wirtschaft und Wissenschaft eine weiterhin gemeinsame Forschungs- und Innovationskultur etablieren. Dies erfordert nach Aussage mehrerer Befragter neue Formen zwischen Unternehmen, Universitäten, Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Infrastrukturen, in denen anwendungsnah zusammen an gemeinsamen Technologie- und Methodenentwicklung gearbeitet wird, können ein wichtiger Schritt in Richtung von umfassenden Innovations-Ökosystemen sein.

Kooperation zwischen Wirtschaft und Wissenschaft: Eine erfolgreiche Zusammenarbeit als Schlüssel zum erfolgreichen Transfer von Innovationen muss unternehmerische Zielen mit volkswirtschaftlichen und wissenschaftlichen Zielen in Einklang bringen

Die Befragten schätzen die Zusammenarbeit aus Wirtschaft und Wissenschaft und erwarten eine zunehmende Relevanz der Kollaboration. Neben den bestehenden erfolgreichen Beispielen für eine Zusammenarbeit besteht vereinzelt auch die Forderung nach neue Kollaborationsmodellen oder Austauschprogrammen. Bei der Zusammenarbeit muss insbesondere der Zielkonflikt zwischen dem wirtschaftlichen Erfolg der Unternehmen und dem Erkenntnisgewinn der Forschung berücksichtigt werden. Diesem Zielkonflikt können z. B. Innovations-Ökosysteme gerecht werden, in welchen gemeinschaftlich und anwendungsnah an Technologie- und Methodenentwicklung gearbeitet wird.

4.5.2 Der Mensch im Engineering

Bei der Gestaltung des Engineerings müssen strategische Überlegungen im Hinblick auf die Mitarbeiter und das Personalwesen getroffen werden. Zukunftsweisende Fragestellungen wie z. B. »Wie verändert sich die Rolle des Ingenieurs in Zukunft?« und »Welche Kompetenzen und Qualifikationen sind für die Entwicklung der Produkte und Dienstleistungen von morgen entscheidend?« müssen berücksichtigt werden (VGL. BILD 22).

Über alle Branchen und Unternehmensgrößen hinweg sind sich die Befragten einig, dass der Ingenieur weiterhin die zentrale Rolle im Engineering hat. Im Kern steht dessen Aufgabe als kreativer Problemlöser. Jedoch müsse zukünftig verstärkt darauf geachtet werden, hierfür entsprechende Freiräume zu schaffen.

Im Rahmen des Leistungsstands wurden folgende Themenfelder beleuchtet:

- Rollen im Entstehungsprozess (VGL. ABSCHNITT 4.5.2.1)
- Erforderliche Kompetenzen im Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.5.2.2)
- Bildungswege im Engineering (VGL. ABSCHNITT 4.5.2.3)

4.5.2.1 Rollen im Entstehungsprozess

Der Wandel der Wertschöpfung stellt die Wirtschaft und Wissenschaft vor eine Vielzahl verschiedener Herausforderungen. Gleichzeitig sorgt der erwartete demografische Wandel für einen Fachkräftemangel in den Entwicklungsabteilungen und insbesondere in kritischen Bereichen wie der Softwareentwicklung. Kompetenz- und Wissensmanagement werden vor diesem Hintergrund zunehmend zu entscheidenden Erfolgsfaktoren.

Nach Aussage vieler befragter Unternehmen müssen deren Mitarbeiter verschiedene Aufgaben flexibel bearbeiten und in unterschiedlichen Tätigkeitsbereichen eingesetzt werden können. Die Kompetenzprofile und Aufgaben der jeweiligen Mitarbeiter müssen hierfür definiert, klar abgegrenzt und über alle Ebenen verstanden werden. Gerade in diesem Bereich sehen manche Befragte Forschungsbedarf und erwarten klarere Leitlinien zu den einzelnen Rollenprofilen (VGL. INFOBOX 22; BILD 23). Der Rollenbegriff wird von mehreren Befragten missinterpretiert. ➤

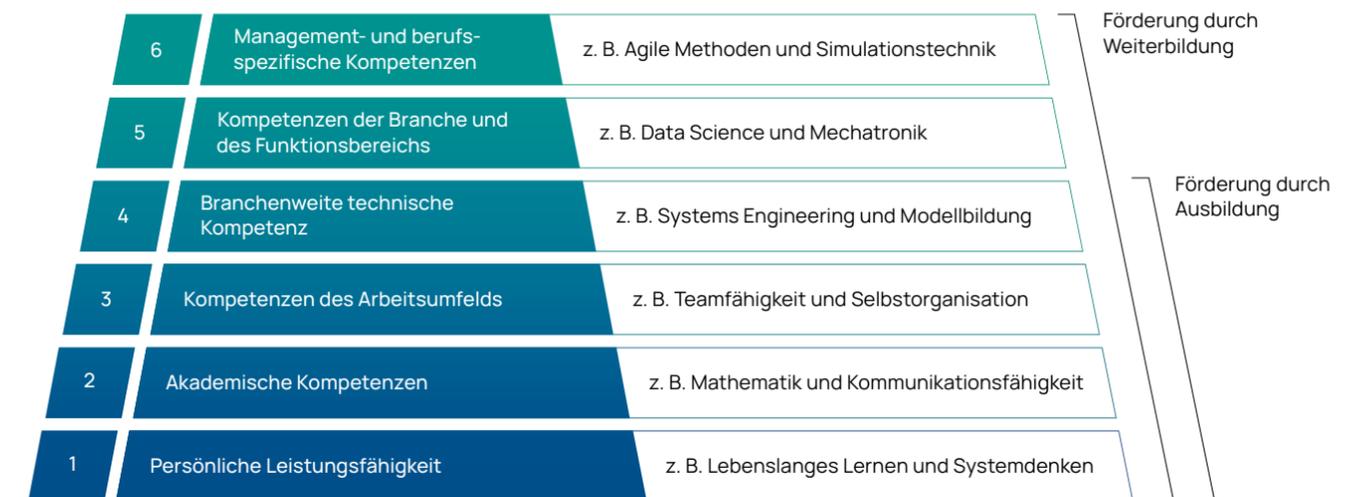


Bild 22: Kompetenzen im Engineering in Anlehnung an [AYM18]

INFO 22 Rolle

Eine Rolle ist ein häufig verwendeter Begriff im Alltag oder Berufsleben, welcher aus sozialwissenschaftlicher Perspektive unterschiedlich definiert ist [ST14]. Nach Broy et al. bezeichnet der Begriff der Rolle im Engineering-Umfeld eine bestimmte Funktion, die eine Person in einer Organisation wahrnimmt. Zu jeder Rolle wird ein spezifisches Aufgaben- und Fähigkeitsprofil definiert. Rollen können darüber hinaus von Einzelpersonen, Teams und Organisationseinheiten ausgeübt werden [BK13]. Nach Schmidt et al. umfasst das Rollenprofil Aufgaben, Rollenerwartungen, Verantwortung, Persönlichkeitsstruktur sowie Kompetenzen und Fähigkeiten [SJ20].

Zentrales Problem ist, dass eine Diskrepanz zwischen definierten und gelebten Rollen im Unternehmen und deren tatsächlichem Aufgabenspektrum besteht. Von vielen Befragten werden Rollen inzwischen nicht mehr anhand der einzelnen Tätigkeiten, sondern funktionsorientiert strukturiert. Dies hat Einfluss auf die geforderten Kompetenzprofile. Zusätzlich muss die Personaleinsatzplanung, die Projektteam-Zusammensetzungen und organisatorische Rahmenbedingungen entsprechend angepasst werden.

Die Klärung des Rollenprofils gilt vor allem bei der Einführung neuer Rollen. Beispielhaft genannte Rollen sind die des Produktmanagers, Innovationsmanagers, Scrum Masters oder die des Systemarchitekten. Nach Aussage einzelner Befragter bleiben Unternehmen zukunfts- und wettbewerbsfähig, wenn sie Aufgaben, Rollen und Verantwortungen offen gegenüberstehen und diese neu verteilen. Auch wenn Offenheit gegeben ist, müssen die notwendigen Änderungen erkannt und zeitnah reagiert werden. Durch den Wandel der Wertschöpfung verschieben sich die Inhalte der Rollenprofile und neue Kompetenzen sind gefordert. Insbesondere agile Methoden fordern ein völlig neues Rollenverständnis. In Hinblick auf diese neuen Rollen befinden sich viele der befragten Unternehmen aktuell in einer Definitions- oder Transformationsphase.

Im Zuge dessen werden sich zu den bereits bestehenden Rollen neue Rollenprofile ausbilden. Diese verantworten beispielsweise eine organisatorische Schnittstellenfunktion, um die verschiedenen Disziplinen zu koordinieren, oder fokussieren das Management von Prozessen, Methoden und Werkzeugen (PMT-Rollen). Besonders stark wird sich dies bei den OEMs der Automobilindustrie in ihrer Rolle als Systemintegratoren ausprägen, da hier ein besonderer Bedarf durch den Trend zur Auslagerung der Entwicklung von Subsystemen an Zulieferer entsteht. Weitere genannte, neue Rollenprofile sind z. B. der Engineering-IT-Leiter, der Engineering-Methoden-Coach und ein Verantwortlicher für emergente Eigenschaften auf Gesamtsystemebene. Einige Interviewpartner vertreten darüber hinaus die Meinung, dass auch von Fachexperten zukünftig vermehrt Expertise hinsichtlich systemübergreifender Aufgaben erwartet wird.

Aufgaben

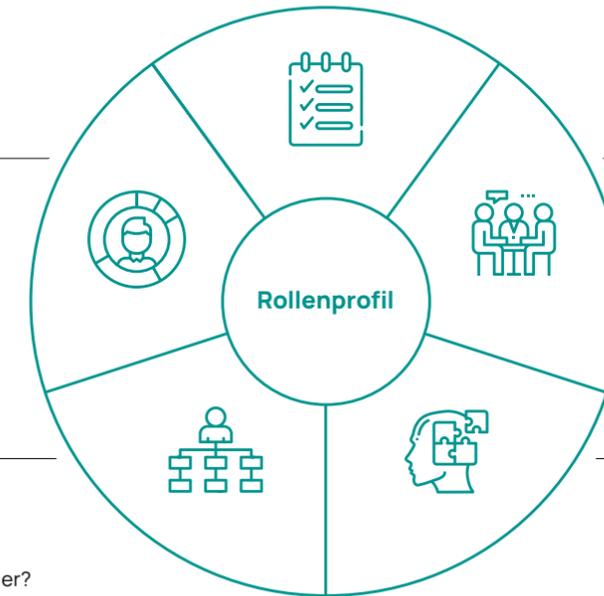
- In welchen Themen-, bzw. Arbeitsbereichen ist der Rolleninhaber tätig?
- Welche Aufgaben erfüllt er dabei?

Kompetenzen und Fähigkeiten

- Über welche Kompetenzen muss der Rolleninhaber verfügen?
- Welche Fähigkeiten sollte er besitzen?

Verantwortung und Befugnisse

- Für was ist der Rolleninhaber verantwortlich?
- Welche Entscheidungen trifft er?
- Wie weit reichen seine Befugnisse?
- Mit wem muss er sich abstimmen?



Rollenerwartungen und Verhalten

- Welche Erwartungen haben andere an die Rolle?
- Welches Verhalten muss er zeigen, um die Erwartungen zu erfüllen?

Persönlichkeit

- Welche Persönlichkeitsmerkmale muss der Rolleninhaber aufweisen?
- Was treibt ihn an?
- Welche Bedürfnisse hat er?

Bild 23: Bestandteile eines Rollenprofils in Anlehnung an [SJ20]

Rollen im Entstehungsprozess: Das Engineeringumfeld verändert sich stetig. Das erfordert eine regelmäßige Nachjustierung der Rollen im Engineeringgeschehen, mit der eine situationskonforme Personaleinsatzplanung und Teamnominierung sowie eine vorausschauende Qualifikationsplanung einhergehen muss.

Zukünftig werden die Akteure im Entwicklungsgeschehen in zunehmend wechselnden und teilweise vollkommen neuen Tätigkeitsbereichen eingesetzt. Dies fordert zum einen eine hohe Flexibilität und Lernbereitschaft der Entwickler. Zum anderen ist eine kontinuierliche Einführung und Verstetigung der Weiterentwicklung von neuen Rollenprofilen im Engineering und den damit verbundenen Verantwortlichkeiten durch die Unternehmen notwendig. Eine besondere Relevanz wird in diesem Zuge organisatorischen Schnittstellenfunktionen im Engineering und unterstützende Stabsstellen wie einem Coach für das Management von Prozessen, Methoden und Werkzeugen zugeschrieben. Um dabei eine Diskrepanz zwischen den definierten und gelebten Rollen zu vermeiden, müssen die Personaleinsatzplanung, die Projektteam-Zusammensetzungen und die Qualifikationsplanung im Entwicklungsgeschehen entsprechend angepasst werden. 🟦

4.5.2.2 Erforderliche Kompetenzen im Engineering

Infolge der fortschreitenden Digitalisierung und des Wandels hin zu hochvernetzten soziotechnischen Systemen verändern sich die Anforderungen an die Kompetenzprofile der Mitarbeiter. Durch die Komplexität der Advanced Systems und der steigenden Interdisziplinarität sieht eine Vielzahl der Befragten zukünftig einen höheren Bedarf an Mitarbeitern mit T-förmigen Kompetenzprofilen (VGL. BILD 24). Ingenieure müssen in Zukunft noch stärker als bisher den Zielkonflikt zwischen tiefer technischer Versiertheit in einer Fachdisziplin und dem abstrakten Verständnis des Gesamtsystems meistern. Zeitgleich fordern mehrere befragte Unternehmen Generalisten, die in komplexen Entwicklungsprojekten die modellbasierte Vermittlung zwischen den Fachdisziplinen unterstützen und eine koordinative Rolle übernehmen. Nach Aussage vieler Interviewteilnehmer aus der Wissenschaft sind Fachgebietsspezialisten mit ausgeprägter Kompetenz in der interdisziplinären Kommunikation über Modelle ein zunehmend zentraler Bestandteil des Engineerings.

Neben dem Wandel der Profile werden zunehmend auch andere Kompetenzen gefordert. Eine Kompetenz ist z. B. die Fähigkeit, Probleme zu lösen bei gleichzeitiger Bereitschaft, dies auch zu tun. Die geforderten Kompetenzen lassen sich nach Fach-, Methoden-, Personal- und Sozialkompetenz strukturieren.

Fach- und Methodenkompetenz: Die befragten Unternehmen fordern von ihren zukünftigen Mitarbeitern eine technische Versiertheit bei einem gleichzeitig lösungsneutralen Verständnis von Gesamtzusammenhängen. Insbesondere in den Fachdisziplinen Mathematik, Statistik und der Softwareentwicklung wird disziplinspezifisches und -übergreifendes Wissen erwartet. Das Zusammenspiel dieser Kompetenzen unterstützt nach Aussage mehrerer Befragter die Fähigkeit des analytischen Denkens. Das analytische Denken und das Systemdenken umfassen insbesondere die Fähigkeit, einen komplexen Zusammenhang mit dessen Strukturen und Verhalten zu erkennen, zu analysieren und zu modellieren. Nach Aussagen einiger Befragter sind dies Kernkompetenzen für die Problemerkennung und Lösungsentwicklung.

Zusätzlich zu Kenntnissen im Bereich der Softwareentwicklung sollte der Ingenieur von morgen nach Aussage vieler Befragter über weitere IT-spezifische Kenntnisse verfügen. Teilbereiche der Informatik wie z. B. Wissen über Algorithmen, Methoden und Vorgehensweisen der Datenanalyse (Data Science) werden immer relevanter. Das erforderliche Fachwissen betrifft ein grundlegendes Anwendungsverständnis, welches einen besonderen Mehrwert mit fachdisziplinspezifischem Wissen ergibt. Ferner werden Kenntnisse zur simulationsgestützten Validierung, über agile Vorgehensweisen und Entwicklungsmethoden sowie im Bereich Systems Engineering und des modellbasierten Entwickelns vermehrt nachgefragt.

Viele Befragte fordern ein zunehmendes Verständnis über den Produkt-, Kunden- und Unternehmenskontext. Neben einem Verständnis über die Marktleistungen wird Erfahrungswissen über die unternehmensinternen Aktivitäten des Entstehungsprozesses relevant. Die Arbeit als Fachexperte in interdisziplinären Teams setzt ein Systemdenken sowie ein Kontextverständnis voraus (VGL. INFOBOX 23). Im Hinblick auf das disziplinübergreifende modellbasierte Entwickeln sind Fähigkeiten gefragt, mit denen anhand übergreifender Modelle insbesondere Schnittstellen zwischen den Disziplinen eindeutig festgelegt und beschrieben werden können. >

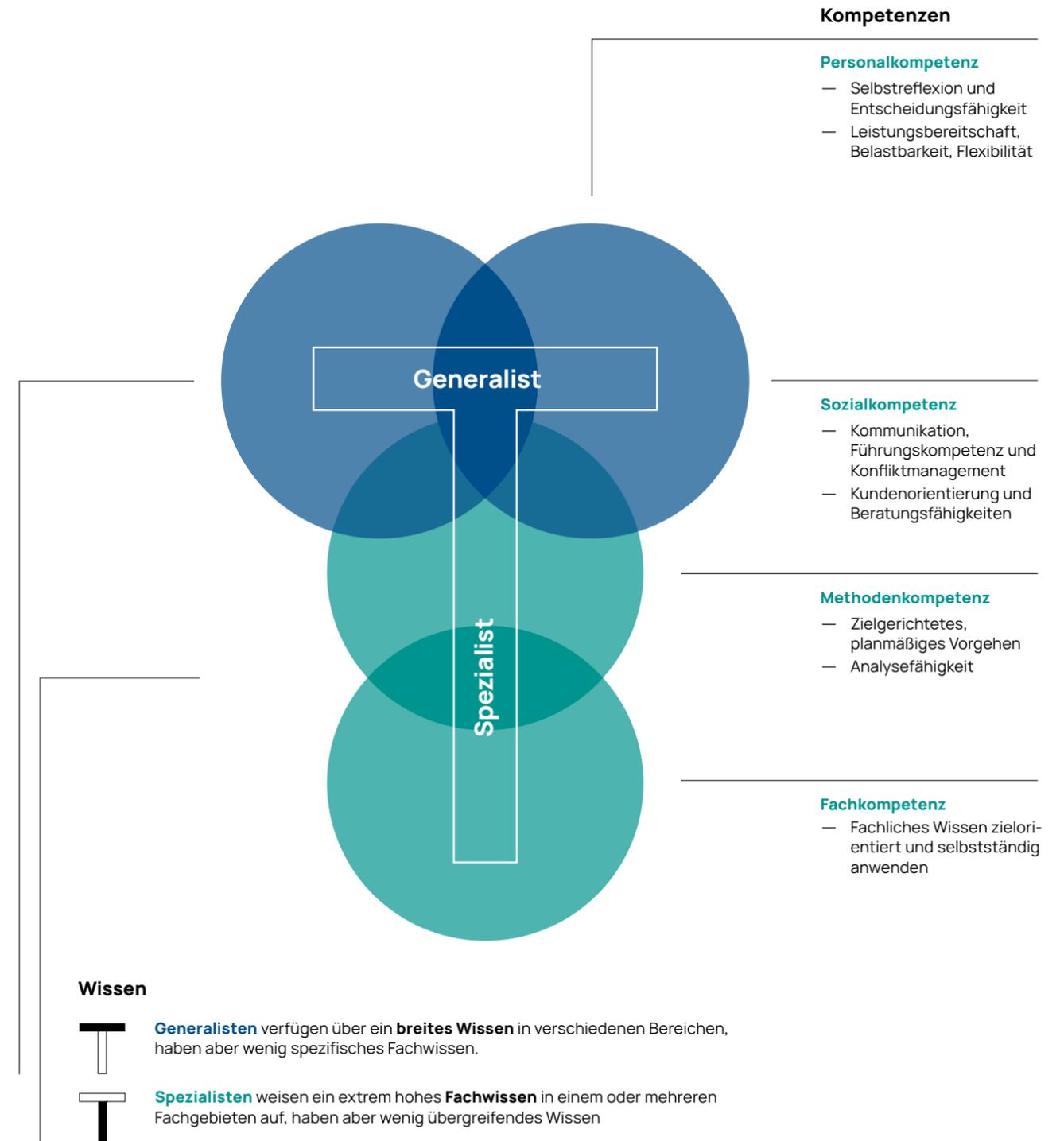


Bild 24: Erforderliches Wissen und Kompetenzprofile im Engineering in Anlehnung an [EHM+07; PB96; KAU06; HK07]

INFO 23 Systemdenken – Die ganzheitliche Sicht auf das System

Ziel des Systemdenkens ist eine Veranschaulichung der komplexen inneren Zusammenhänge und Interaktionen mit dem Umfeld durch modellhafte Abbildungen. Dabei werden durch eine ganzheitliche Sicht auf das System alle relevanten Funktionen und Teilkomponenten miteinbezogen. Je nach Problemstellung und Situation werden dazu unterschiedliche Abstraktionsniveaus gewählt, die von der Zweckmäßigkeit und der Problemrelevanz abhängen [GDE+18].

Personal- und Sachkompetenz: Nach der Meinung vieler Befragter sollten Mitarbeiter neben kommunikativen Fähigkeiten vor allem eine gute Eigenorganisation sowie eine hohe intrinsische Motivation aufweisen. Weiterhin fordern Unternehmen nach Aussage einiger Befragten von jedem Mitarbeiter, sich stetig und zügig in neue Fachthemen einzuarbeiten. Es werden zudem die Bereitschaft und Aufgeschlossenheit erwartet, als Fachexperte innerhalb eines interdisziplinären Teams zu agieren. Obwohl eine interdisziplinäre Zusammenarbeit schon heute an vielen Stellen in den Unternehmen erfolgt, wird sich dies nach Aussage vieler Befragter zukünftig noch verstärken. Aufgrund der engen Verflechtung der Hardware- und Softwarefunktionen in Produkten müssen die Entwicklungsteams interdisziplinär aufgestellt werden, um das für die Bereitstellung einer Produktfunktion erforderliche Wissen in einem Team abbilden zu können.

Vor diesem Hintergrund steigt die Notwendigkeit, zukünftige Kompetenzbedarfe zu erforschen sowie die Kompetenzmodelle weiterzuentwickeln, um sie anschließend in die Aus- und Weiterbildung übertragen zu können.

Erforderliche Kompetenzen: Die Akteure in den Entstehungsprozessen von Innovationen werden mehr denn je gefordert sein, den Zielkonflikt von fundiertem Fachwissen in dem jeweils involvierten Fachgebiet auf der einen Seite und einem ganzheitlichen Systemdenken auf der anderen Seite zu meistern.

Mehr denn je kommt es auf den ausgewogenen Dreiklang von Fach-, Methoden- und Sozialkompetenz an. Darüber hinaus werden die Akteure in zukünftigen Entstehungsprozessen gefordert sein, den Zielkonflikt von tiefer technischer Versiertheit in einer Disziplin und einem ganzheitlichen Verständnis über das Gesamtsystem zu meistern. Systemdenken wird eine herausragende Schlüsselkompetenz. Die Basis dafür ist ein gutes Verständnis über den jeweiligen Anwendungskontext sowie die prinzipiellen, systemischen Lösungsansätze. Wenngleich die involvierten Fachdisziplinen im Prinzip gleich relevant sind, spielt in Zeitalter der Digitalisierung die Informatikkompetenz eine besonders erfolgskritische Rolle, insbesondere als integrierende Querschnittskompetenz. Zu guter Letzt nimmt die Bedeutung von Sozialkompetenz stark zu; dazu zählen insbesondere Kommunikationsfähigkeit und Kooperationsvermögen. Trotz dieser Breite von neuen, teils weichen Kompetenzen zählen in Zuge der Konkretisierung eines komplexen Systems fundierte Fachkompetenzen, sodass nicht der Trugschluss gezogen werden darf, dass »weiche« Kompetenzen »harte« Kompetenzen ablösen. Daher werden die Akteure im Entwicklungsgeschehen mehr denn je gefordert sein, ihre Stärken in fundiertem Fach- und Methodenwissen mit »weichen« Kompetenzen zu untermauern. ●

4.5.2.3 Bildungswege im Engineering

Damit die Mitarbeiter über die erforderlichen Kompetenzen für die zukünftigen Entstehungsprozesse verfügen, müssen gezielte Maßnahmen in der Aus- und Weiterbildung umgesetzt werden. Dazu wurde im Rahmen des Leistungsstands erhoben, ob das aktuelle Bildungswesen und die berufliche Weiterbildung den aufkommenden Anforderungen gerecht werden.

Studium

Im Hinblick auf die geforderten Fach- und Methodenkompetenzen sehen viele der befragten Unternehmen bei Hochschulabsolventen Verbesserungspotentiale. Nach Angabe der Interviewpartner aus der wissenschaftlichen Lehre sollen die zukünftigen Ingenieure während des Studiums ein breites Verständnis für die interdisziplinäre Kommunikation aufbauen. Einzelne Befragte wünschen sich eine stärkere Praxisorientierung der Studiengänge. Dabei berücksichtigen die Befragten selten, dass die Lehre an den Universitäten und Fachhochschulen unterschiedliche Ziele verfolgen. Es besteht ein breites Spektrum zwischen einer wissenschaftlichen Ausbildung und einer Ausbildung, welche auf den unmittelbaren Einsatz der Studierenden in Unternehmen abzielt. Des Weiteren betonen viele Interviewpartner die immer noch wachsende Bedeutung der Sozialkompetenz wie z. B. im Bereich team- oder fachdisziplinübergreifender Kommunikationsfähigkeiten. Hier stellen viele der Befragten Defizite bei den Absolventen fest.

Auch die Anzahl der Absolventen stellt die Unternehmen vor Herausforderungen. Den rückläufigen Trend der Studienanfänger in technischen Studiengängen beschreiben auch einige Befragte aus der Wissenschaft eine zunehmende Herausforderung. Doch während die Anzahl der Maschinenbaustudenten in Deutschland tendenziell rückläufig ist, steigt die Anzahl der Studierenden in Studiengängen mit hohem Informatikanteil. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, da sich dies mit einiger Verzögerung in den Bereichen Wirtschaft und Wissenschaft im Fehlen ausgebildeter Ingenieure zeigen kann (VGL. INFOBOX 24).

INFO 24 MINT Nachwuchsbarometer 2020

Das MINT Nachwuchsbarometer 2020 der acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften) und der Körber-Stiftung belegt, dass die Anstrengungen in Deutschland für eine bessere MINT-Bildung und mehr Nachwuchs in den naturwissenschaftlichen und technischen Fächern nicht ausreichen. Das Interesse und die Leistungen der Schüler an und in diesen Fächern sinken; einem Drittel der befragten Jugendlichen fehlen grundlegende computerbezogene Kenntnisse und Fähigkeiten. Bei den Handlungsempfehlungen der Umfrage handelt es sich unter anderem um eine Steigerung der Unterrichtsqualität sowie der Qualität der Lehrkräfte. Die digitale Bildung muss systematisch und fachübergreifend verankert werden. Weitere Handlungsempfehlungen sind im ausführlichen Bericht des MINT Nachwuchsbarometers 2020 zu finden [AK20].

Mehrere Befragte teilen die Meinung, dass die öffentliche Wahrnehmung von Technikwissenschaften verbessert werden muss, um diesem Trend entgegenzuwirken. Dazu sollte das Interesse an Technik bereits frühzeitig in den Schulen gefördert werden. Vermeintliche Stereotypen würden das Interesse an MINT-Bereichen einschränken. Nach Meinung einzelner Interviewteilnehmer aus der Wissenschaft ist die frühzeitige Vermittlung von MINT-Grundlagen eine gute Möglichkeit, um ein Technikinteresse zu wecken. Die Inhalte sollten dabei um Aspekte wie systemisches Denken und Problemlösungskompetenz ergänzt werden. Hierzu sind forschungsseitig neue Kompetenzmodelle zu entwickeln und in die Lehre zu übertragen. >

Die zunehmende Anzahl an Studiengängen mit intransparenten oder mehrdeutigen Bezeichnungen (z. B. Data Scientist, Data Analyst, Data Engineer) ist eine Herausforderung für mehrere befragte Unternehmen, da die geweckten Erwartungen durch die neuen Studiengänge teilweise nicht erfüllt werden. Dies erhöht auf Seiten der Unternehmen die Aufwände bei der Suche nach geeigneten Mitarbeitern und birgt die Gefahr von Stellenfehlbesetzungen. Nach Aussage mehrerer Befragter sollte der Fokus weniger auf der Entwicklung neuer, sondern der Weiterentwicklung bestehender, etablierter Studiengänge liegen. Hier gilt es, sowohl aus Sicht der Wirtschaft als auch aus der Sicht der Wissenschaft, eine gute und aktuelle Kombination aus Fach-, Methoden-, Personal und Sozialkompetenzen zu schaffen. Zu berücksichtigen sind hierbei die begrenzte Aufnahmekapazität der Studierenden sowie die Vermittlungskapazität der Universitäten und Hochschulen in einer limitierten Studiendauer. Es zeichnet sich ab, dass die Vermittlung von Sozialkompetenzen unter Umständen neue kapazitätsintensive Lehrformate erfordert. Dies gilt es zu erforschen.

Eine Vielzahl der befragten Unternehmen sieht die Notwendigkeit eines deutlichen Anstiegs interdisziplinärer Veranstaltungen während des Studiums, wie z. B. einer Kombination aus Thermodynamik und Informatik. Dadurch könne es gelingen, bereits frühzeitig Kompetenzen für die interdisziplinäre Zusammenarbeit zu schaffen. Dies sei ferner mit der Vermittlung eines ausgeprägten Systemdenkens zu kombinieren. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Studierenden nach Aussage der Befragten weiterhin umfassende fachliche Kernkompetenzen besitzen müssen. Die Befragten konnten in der Regel nicht aufzeigen, wie dieser Zielkonflikt bei gleichbleibender Studiendauer aufgelöst werden könnte. Einzelne forderten, dass Studierende aus verschiedenen Fachdisziplinen mehrfach an gemeinsamen Projekten arbeiten sollten. Gleichzeitig fordern einzelne Befragte, dass die Fakultätsgrenzen in den Hintergrund treten müssen, um eine interdisziplinäre Ausbildung anzubieten.

Nach Aussagen einiger Interviewpartner aus der Lehre sind die Hochschulen mit ihren Fakultäten hervorragend für die Vermittlung von Fach- und Systemwissen aufgestellt. Die Herausforderung besteht allerdings darin, diese Spezialisten in die Lage zu versetzen, auf Systemebene des Gesamtsystems erfolgreich und ohne große Kommunikationshürden miteinander agieren zu können. Es gilt die Vermittlung dieser Systemkompetenz in das Grundstudium zu integrieren. Andere Stimmen aus Großkonzernen befürworten weiterhin die klassischen grundständigen Maschinenbau-, Elektrotechnik- und Informatik-Studiengänge. Erforderliche Fachkenntnisse aus anderen Fachdisziplinen würden die Mitarbeiter im ersten Arbeitsjahr im Unternehmen aufbauen.

Durch semesterbegleitende Team- und Projektarbeiten können nach Meinung vieler Befragter wichtige Sozialkompetenzen gesammelt werden. Im Fokus stehen hier etwa die fachdisziplinübergreifende Kommunikation, Erfahrungen im Projektmanagement oder die Erlernung von Präsentationstechniken. Kompetenzen zur Selbstorganisation für die Bearbeitung komplexer Themen sollen weiterhin ebenso geprägt werden wie das Systemdenken und ein Verantwortungsbewusstsein für das Gesamtergebnis des Teams. Zur Vermittlung dieser Kompetenzen eignen sich z. B. Fallstudien und Projektarbeiten, im Rahmen derer verschiedene Fachdisziplinen zusammenarbeiten können. Die bisherigen Angebote an Fachhochschulen und Universitäten sind hier zu erweitern. Aus Sicht mehrerer befragter Unternehmen besteht die Erwartungshaltung, dass die Hochschulen neue Formate im Studienverlaufsplan etablieren. Gleichzeitig sehen sie die Notwendigkeit, sich als Unternehmen für kollaborative Formate zu engagieren, z. B. mit spannenden Aufgabenstellungen oder als Partner während der Bearbeitung. Stimmen aus der Forschung beschreiben die Forderung nach einem stärkeren Fokus auf eine interdisziplinäre Ausbildung als nachvollziehbar und verständlich. Die Hochschulstrukturen werden von vielen Befragten aus der Wirtschaft mitunter als konservativ und zu wenig flexibel wahrgenommen.

Einen Stellhebel zur Erleichterung des Berufseinstiegs sehen die befragten Unternehmen in einem höheren Praxisanteil während des Studiums. Ihrer Meinung nach sind bereits die vorlesungsbegleitenden Übungen zu wenig praxisorientiert ausgelegt. Nach Aussage einer Vielzahl

der befragten Unternehmen wird den Studierenden empfohlen, mindestens ein Halbjahrespraktikum während des Studiums einzulegen. Dieses sollte auch von den Universitäten in der Studienordnung vorgesehen und klar strukturiert werden. Ebenso werden von Industrieseite auch Abschlussarbeiten und Promotionen vielfach befürwortet, welche die Problemstellungen der Industrie aufgreifen. Diese Forderungen der Befragten aus der Wirtschaft können nicht ohne Weiteres erfüllt werden. Studierende der Ingenieursdisziplinen, die mit ihrer Abschlussarbeit Praxiserfahrungen sammeln möchten, werden mitunter durch fehlende Betreuungsmöglichkeiten seitens der Lehrstühle eingeschränkt. Nach Aussage einzelner Befragter aus der Wissenschaft ist für die Lehrstühle jedoch eine weitere Ausdehnung des Betreuungsangebotes über den derzeitigen Stand hinaus nur sehr schwer möglich, da solche kooperativen Arbeiten oft nicht die notwendigen Voraussetzungen einer wissenschaftlichen Qualifikationsarbeit bieten. Insbesondere der wirtschaftliche Mehrwert darf keine Bedingung der Arbeit sein.

Weiterbildung

Vor dem Hintergrund, dass nicht alle erforderlichen Kompetenzen für das zukünftige Entwicklungsgeschehen ausschließlich durch das Studium vermittelt werden können, gilt es, geeignete Weiterbildungsmaßnahmen zu initiieren. Bei der Vermittlung neuer Kompetenzen an Mitarbeiter und Führungskräfte ermöglicht die Digitalisierung eine Neugestaltung der Formate und der Vermittlungswege selbst. So ist eine deutliche Zunahme an digitalen Angeboten erkennbar. Die Angebote zur Vermittlung von Wissen werden zunehmend individueller und sind zudem jederzeit verfügbar, um der Forderung nach einer Verschmelzung der Kompetenzentwicklung und der Anwendung in der täglichen Arbeit gerecht zu werden. Infolge der steigenden Vielfalt an Technologien und IT-Werkzeugen unterstreichen viele Interviewpartner, dass eine kontinuierliche Anpassung der Kompetenzprofile mit daran geknüpften Qualifizierungsmaßnahmen unerlässlich ist. Die Kompetenzbedarfe entwickeln sich im Zuge der Digitalisierung dynamisch und hochindividuell. Dabei sind situationsbezogene und arbeitsplatznahe Maßnahmen notwendig, die idealerweise fließend in den Arbeitsalltag integriert werden. Hierfür bietet sich das Konzept des Training-on-the-job an. Mitarbeiter können im Training gelernte Methoden direkt im Alltag anwenden. Ein weiteres Konzept ist das Bilden von Tandems aus erfahrenen und jungen, in neuen Technologien versierten, Mitarbeitern, die sich gegenseitig ergänzen und Erfahrungen austauschen können.

Einzelne Befragte aus der Wissenschaft betonen, dass die hohe Dynamik in den digitalen Kompetenzen des Engineerings eine Herausforderung für den erfolgreichen Wissenstransfer darstellt. Da diese Kompetenzen nur eingeschränkt durch spezifische Vertiefungsrichtungen in der Ausbildung vermittelt werden können, muss die Weiterbildung unmittelbar nach dem Studium fortgeführt werden. Diese wissenschaftsorientierte lebenslange Wissensvermittlung auf einem akademischen Niveau kann u. a. durch Hochschulen angeboten und begleitet werden. Dazu sind jedoch neue Konzepte der Wissensvermittlung an den Hochschulen über den Studienabschluss hinaus notwendig. >

Externe Weiterbildungsanbieter verspüren aktuell eine große Nachfrage, insbesondere in den Bereichen Projektmanagement, Agilität und Systems Engineering. Die Notwendigkeit für Zertifizierungen im bestimmten Themenfeldern wie Systems Engineering sehen mehrere Befragte nicht. Auch Schulungskonzepte von und mit Lieferanten, Kunden oder IT-System-Anbietern werden zunehmend wahrgenommen. Im Hinblick auf die Vermittlungswege der Lerninhalte werden sowohl Schulungen vor Ort als auch E-Learning-Plattformen genutzt. Große Unternehmen haben umfangreiche interne Weiterbildungsprogramme etabliert und verfolgen den Lernfortschritt der Mitarbeiter. Hierbei wird auf einen ausgeglichenen Aufbau an Fach-, Methoden- und Sozialkompetenzen Wert gelegt.

Einzelne Unternehmen kritisieren den fehlenden Erfolg bestehender Qualifizierungsmaßnahmen. Der Transfer der Schulungsinhalte in den Arbeitsalltag ist zum Teil nicht gegeben. Als Ursache nennen die Befragten unzu-

reichende oder nicht unternehmensspezifisch zugeschnittene Schulungsinhalte. Weitere Befragte berichten, dass häufig eine falsche Erwartungshaltung des Unternehmens im Hinblick auf Qualifizierungsmaßnahmen von Systems Engineering Methoden und Prozessen vorliegt. Der Wandel der Organisation erfordert umfangreichere Programme, welche durch Weiterbildungsmaßnahmen ausschließlich unterstützt werden können. Dabei sind individuelle Lernpfade zu definieren, um den Mitarbeitern die relevanten Kompetenzen zu vermitteln. Forschungsseitig sollten hier die bestehenden Weiterbildungskonzepte analysiert und optimiert werden. Neben den planmäßig durch das Personalwesen organisierten und durchgeführten Weiterbildungen sieht eine Vielzahl der befragten Unternehmen auch die Mitarbeiter selbst im Hinblick auf ihre Kompetenzentwicklung in der Pflicht. Daher werden vermehrt Mitarbeiter nachgefragt, welche sich proaktiv mit neuen Themen befassen und die gewonnenen Erkenntnisse im Unternehmen streuen.

Bildungswege im Engineering: Im Bereich der Hochschullehre erscheinen Projektarbeiten mit Aufgabenstellungen aus der Praxis, die in interdisziplinären Teams bearbeitet werden, als probates Mittel Fach-, Methoden- und Sozialkompetenzen einzusetzen und zu vertiefen. Ferner sind in der berufsbegleitenden Weiterbildung mit neuen Angeboten wirkungsvolle Akzente zu setzen.

In der Ausbildung von Ingenieuren sollte zunehmend ein umfangreiches Verständnis für die Wichtigkeit von interdisziplinärer Zusammenarbeit und Kommunikation etabliert werden. Dazu sollte die Lehre an den Hochschulen innerhalb einer etablierten Fachdisziplin kontinuierlich durch neue Lehrformate wie z. B. Fachgebietsübergreifende Projektarbeiten im Team mit Problemstellungen aus der Wirtschaft weiterentwickelt werden. Derartige Formate zielen darauf ab, Methodenkompetenz an konkreten Aufgabenstellungen einzusetzen und Sozialkompetenzen zu trainieren. Gleichzeitig gilt es, mehr junge Menschen für Technikwissenschaften zu begeistern, um einem sich abzeichnenden Fachkräftemangel frühzeitig entgegenzuwirken. Hier ist nach neuen Wegen zu suchen, die zu einer sichtbaren Attraktivität der Systemgestaltung führen.

Nicht alle erforderlichen Kompetenzen können in der erforderlichen Reife ausschließlich durch das Studium vermittelt werden. Praktische Kenntnisse und Fähigkeiten müssen daher durch Weiterbildungen im Beruf vermittelt und erprobt werden. Die Weiterbildungsprogramme müssen sowohl der Dynamik neuer Technologien und Methoden gerecht werden als auch einen nachhaltigen Transfer von Erfahrungswissen ermöglichen. ●

5 Engineering im internationalen Vergleich

Das Engineering von innovativen Marktleistungen in komplexen soziotechnischen Systemen spielt eine entscheidende Rolle in der zukünftigen Wertschöpfung. Die Ergebnisse der qualitativen Erhebung (VGL. KAPITEL 4) zeigen den aktuellen Leistungsstand des Engineerings in Deutschland sowie die damit verbundenen Herausforderungen auf. Gleichzeitig bestätigt die qualitative Erhebung, dass die zukünftigen Produkte, Dienstleistungen und Systeme sowie deren Entstehung einem starken Wandel unterliegen. Die bestehenden Innovationserfolge werden sich auf Dauer nur dann verstetigen lassen, wenn Unternehmen befähigt werden, die zukünftigen Marktleistungen erfolgreich zu gestalten und zum Markterfolg zu bringen. Vor diesem Hintergrund wurde festgestellt, dass die ganzheitliche Gestaltung der zukünftigen Marktleistungen neue Ansätze im Kontext des Advanced Systems Engineerings erfordert.

Es eröffnet sich die Frage, wie gut Deutschland bei den relevanten Zukunftsthemen wie dem Advanced Systems Engineering im globalen Wettbewerb aufgestellt ist. Der internationale Vergleich zeigt, wie sich die Handlungsfelder des ASE und insbesondere das Systems Engineering in den letzten Jahren entwickelt haben, und bietet damit eine Orientierungshilfe (VGL. INFOBOX 25, BILD 25).

INFO 25 Deutschlands Position in Innovationsindizes

Die Innovationsfähigkeit der Länder in verschiedenen Kategorien wird jährlich in verschiedenen Studien miteinander verglichen. Nach dem Bloomberg Innovation Index 2020 ist Deutschland das innovativste Land im weltweiten Vergleich. Der Bloomberg Innovation Index analysiert dutzende Kriterien anhand von sieben Metriken. Bewertet werden unter anderem die Höhe der Ausgaben für Forschung und Entwicklung, die Produktionskapazität und die Konzentration von börsennotierten High-Tech-Unternehmen [JL20].

Dem Innovationsindikator des Bundesverbands der Deutschen Industrie e.V. zufolge belegt Deutschland in 2020 den vierten Platz nach Schweiz, Singapur und Belgien [FSF+20]. Bewertet wurden hier unter anderem die fünf Subindikatoren Wirtschaft (Rang 7), Wissenschaft (Rang 12), Bildung (Rang 11), Staat (Rang 9) und Gesellschaft (Rang 12). Im Mittel verschiedener Berichte über Innovationsindizes befindet sich Deutschland in den letzten 20 Jahren in den TOP 10. >

Wesentliche Basis für die Innovationskraft bilden die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten am Standort Deutschland. Die Position als Innovationsführer zeigt deutlich, dass in Deutschland der Prozess von der Idee bis zur Marktdurchdringung der aktuellen Produkte und Systeme beherrscht wird. In den vergangenen Jahren befindet sich das globale Umfeld der Innovationsnationen und Wis-

senschaftsstandorte jedoch in einem spürbaren Wandel. Schwellenländer wie Südkorea oder Singapur entwickeln sich zu starken Wettbewerbern. Dies wird zunehmend durch die Erfolge dieser Nationen in wissensintensiven Themenfeldern wie der Elektromobilität oder der Künstlichen Intelligenz deutlich.

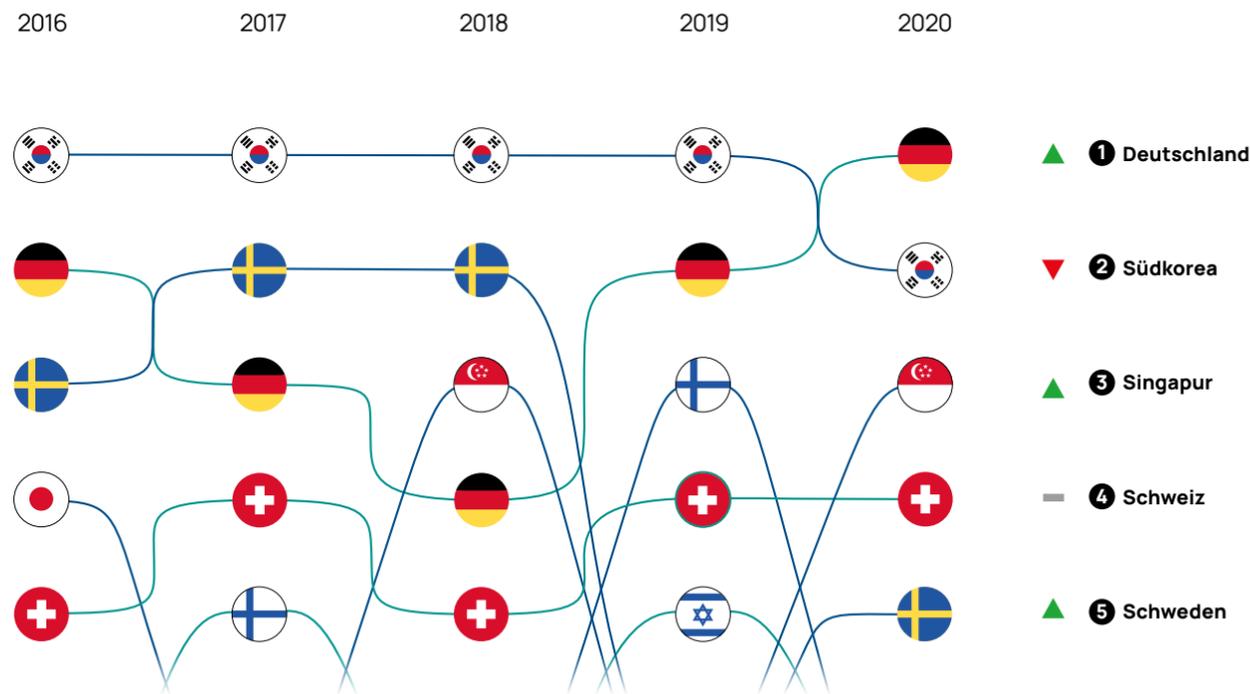


Bild 25: Deutschland führt die Liste der innovativsten Länder im 5-Jahresvergleich in Anlehnung an [JL20]

Grundlage der quantitativen Kennzahlenerhebung ist ein mehrstufiger Ansatz in einer systematischen Literaturrecherche (vgl. Bild 26). Im ersten Schritt wurde die Verbreitung und Durchdringung von Systems Engineering in der Forschung (z. B. durch die Anzahl der SE-Veröffentlichungen) und Lehre (z. B. durch die Anzahl von SE-Vorlesungen) in Deutschland sowie in vorab definierten Ländern erhoben und detailliert analysiert. Ergänzend dazu

wurde der internationale Leistungsstand des Advanced Engineerings in der Forschung auf Basis der identifizierten Themenfelder aus Abschnitt 4.4 wie Künstliche Intelligenz oder Agilität untersucht. Eine abschließende Evaluierung adressiert die gemeinschaftliche Betrachtung der zwei Handlungsfelder Systems Engineering und Advanced Engineering und bietet einen Ausblick auf notwendigen Handlungsbedarf. ●

Methodisches Vorgehen: Engineering im internationalen Überblick

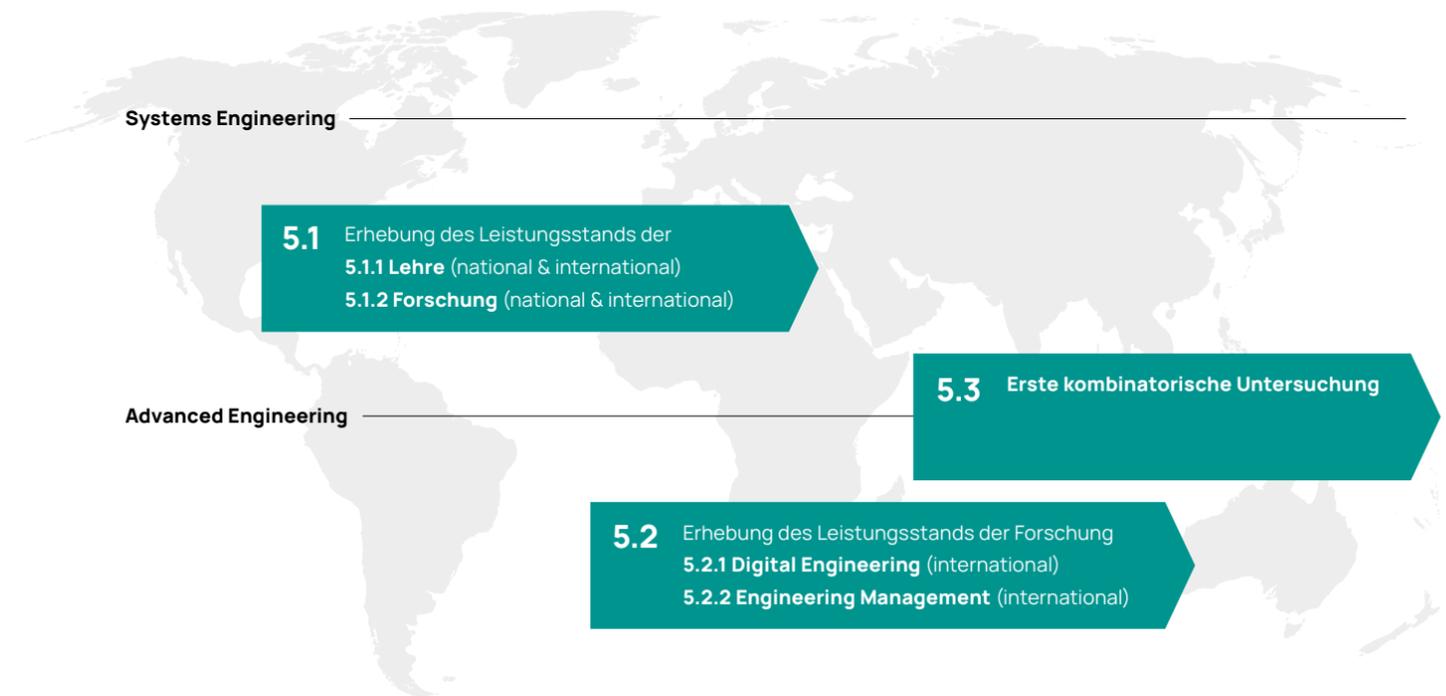


Bild 26: Methodisches Vorgehen der quantitativen Erhebung des Engineerings im internationalen Vergleich

5.1 Systems Engineering

Die qualitative Erhebung unterstreicht den Stellenwert des Systems Engineerings bei der Entstehung von komplexen Marktleistungen. Zusätzlich zu den geführten Interviews in der industriellen Praxis und dem akademischen Umfeld wurden daher quantitative Befunde aus der Forschung und Lehre mittels einer Kennzahlenerhebung abgeleitet. Mithilfe dieser Erhebung wird die aktuelle Durchdringung von Systems Engineering in Forschung und Lehre an Hochschulen national als auch international untersucht.

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit wurde zunächst eine Reihe von Kennzahlen zur differenzierten Beschreibung der Durchdringung von Forschung und Lehre durch Systems Engineering definiert. Diese Kennzahlen wurden in verschiedenen Ausprägungen sowohl national als auch international erhoben (VGL. TABELLE 1).

Titel	Beschreibung	National	Intern.
Lehre			
Anzahl der Hochschulen	Anzahl Hochschulen mit Studiengängen, in denen SE thematisiert wird	X	X
Anzahl der Studiengänge	Anzahl Studiengänge, in denen SE thematisiert wird	X	X
Anzahl der Lehrstühle	Anzahl Lehrstühle, an denen SE thematisiert wird	X	-
Anzahl der Vorlesungen	Anzahl Vorlesungen an Hochschulen, in denen SE thematisiert wird	X	X
Anzahl der Studierenden	Anzahl Studierender in Studiengängen, in denen SE thematisiert wird	X	-
Forschung			
Anzahl der Veröffentlichungen	Anzahl Veröffentlichungen mit SE-Bezug p.a.	X	X
Anzahl der Zitationen	Anzahl Zitationen von Veröffentlichungen mit SE-Bezug p.a.	X	X
Anzahl der Autoren	Anzahl Autoren, die zu SE veröffentlichen p.a.	X	X
Veröffentlichungen pro Autor	Anzahl Veröffentlichungen mit SE-Bezug / Anzahl beteiligter Autoren p.a.	X	X
Anzahl der Konferenzen	Anzahl wissenschaftlichen Konferenzen mit SE-Bezug p.a.	X	-
Anzahl der Forschungsprojekte	Anzahl öffentlich geförderten Forschungsprojekte mit SE-Bezug p.a.	X	-
Konferenzbeiträge pro Konferenz	Anzahl Konferenzbeiträge mit SE-Bezug pro Konferenz mit SE-Bezug p.a.	X	-
Anzahl der Dissertationen	Anzahl Dissertationen mit SE-Bezug p.a.	X	-

Tabelle 1: Kennzahlen zur Beschreibung der Durchdringung von Systems Engineering in Forschung und Lehre

5.1.1 Systems Engineering in der Lehre

Methodisches Vorgehen der Kennzahlenerhebung in der Lehre

Zur Erhebung der notwendigen Datenbasis für die Kennzahlenermittlung wurden nationale und internationale Datenquellen herangezogen. Für die Kennzahlen aus dem Bereich Lehre wurde auf Studierendenstatistiken und Modulhandbücher einzelner Studiengänge zurückgegriffen. Die Durchdringung von Systems Engineering in der universitären Lehre in Deutschland wurde initial für die führenden technischen Universitäten im TU9-Verbund untersucht. Dabei wurden Daten aus dem Jahr 2019 verwendet. Untersucht wurde die Verbreitung von Systems Engineering auf der Ebene von Studiengängen, Lehrstühlen und Vorlesungen. Eine Vorlesung wurde immer dann als eine für Systems Engineering relevante Veranstaltung gewertet, sobald die Beschreibung der Vorlesung im Modulhandbuch den Ausdruck »Systems Engineering« enthält. Studiengängen und Lehrstühlen wurde dann ein Bezug zu Systems Engineering anerkannt, wenn sie mindestens eine Vorlesung mit SE-Bezug beinhalten bzw. anbieten. Dabei wurden sowohl die absoluten Zahlen für die Studiengänge, Lehrstühle und Vorlesungen mit SE-Bezug als auch die relative Anzahl pro 10.000 Studierende ausgewertet.

Systems Engineering in der Lehre in Deutschland

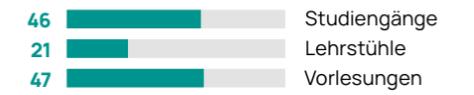
Die Auswertung zeigt, dass sich im Jahr 2019 für alle Universitäten des TU9-Verbunds Studiengänge Vorlesungen und Lehrstühle mit einem Bezug zu Systems Engineering finden lassen (VGL. BILD 27). Die Durchdringung in absoluten Zahlen sowie bezogen auf die Anzahl der Studierenden variiert jedoch stark unter den neun Universitäten. Eine besonders hohe Zahl SE-bezogener Studiengänge, Vorlesungen und Lehrstühle weisen die technischen Universitäten Berlin, Braunschweig und München sowie die Universität Stuttgart auf. Pro 10.000 Studierende werden an diesen Hochschulen zwischen 13 und 15 Studiengänge mit SE-Bezug angeboten. ➤



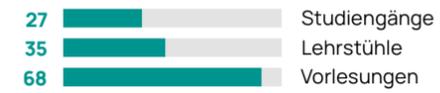
Leibniz Universität Hannover



Technische Universität Berlin



Technische Universität Braunschweig



RWTH Aachen



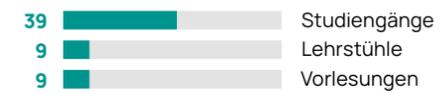
Technische Universität Dresden



Technische Universität Darmstadt



Universität Stuttgart



Karlsruher Institut für Technologie



Technische Universität München

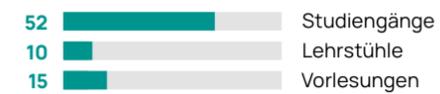


Bild 27: Durchdringung von Systems Engineering in der universitären Lehre der TU9 im Jahr 2019

Ein ähnliches Bild ergibt sich aus der Betrachtung der relativen Zahlen. Auch hier weisen die technischen Universitäten Berlin, Braunschweig und München sowie die Universität Stuttgart den höchsten relativen Anteil an Studiengängen mit SE-Bezug unter den TU9 auf. Bei allen vier Universitäten liegt dieser Anteil bei über 20 % in Bezug auf alle an der jeweiligen Hochschule angebotenen Studiengänge. Beim Blick auf die relativen Anteile der Lehrstühle und Vorlesungen mit SE-Bezug fällt auf, dass diese mit höchstens 4 % an fast allen anderen Universitäten der TU9 verhältnismäßig niedrig ausfallen, was auf die breite inhaltliche Aufstellung der Universitäten zurückgeführt werden könnte. Die einzige Ausnahme bildet hier die TU Braunschweig mit einem Anteil von 15 % aller Lehrstühle, die einen SE-Bezug aufweisen.

Insgesamt wurden an den neun technischen Universitäten in Deutschland 206 Studiengänge mit SE-Bezug identifiziert. 50 % dieser Studiengänge lassen sich den Fakultäten der Informatik und Maschinenbau (inkl. Maschinenwesen und Verkehrssysteme) mit jeweils 25 % zuschreiben. Die Fakultäten Naturwissenschaft / Mathematik der TU9-Universitäten weisen mit 16 % den dritthöchsten Bezug zu SE-Themen auf. Weitere 13 % der identifizierten Studiengänge gehören der Fakultät Elektrotechnik an. Die restlichen Studiengänge verteilen sich auf die Fakultäten Wirtschaftswissenschaften (10 %), Bauwesen (7 %) und Lehramt / Geisteswissenschaften (3 %).

Systems Engineering in der internationalen Lehre

Um den Leistungsstand der Lehre in Deutschland im internationalen Vergleich zu bewerten, wurde das Lehrangebot in folgenden Ländern analysiert:

- USA
- China
- Großbritannien
- Niederlande
- Japan
- Skandinavien
- Frankreich
- Schweiz

Entsprechend der Analyse in Deutschland wurde die Durchdringung der universitären Lehre durch Systems Engineering auf der Ebene von Studiengängen, Lehrstühlen und Vorlesungen untersucht. Da es keinen allgemeingültigen Konsens darüber gibt, was einen Bezug zum SE ausmacht, werden in dieser Zusammenfassung lediglich die Hochschulen aufgeführt, welche eindeutig einen Abschluss, eine Vorlesung, einen Lehrstuhl oder eine Fakultät mit der Bezeichnung »Systems Engineering« führen. Aufgrund sprachlicher Barrieren in den Datenbeständen oder des fehlenden Zugangs zu dem Lehrprogramm wurden teilweise systematische Übersichtsarbeiten und Sekundärliteratur verwendet. In diesen Fällen wurden die verwendeten Arbeiten auf ihre Eignung überprüft und die verfügbare Literaturübersicht kritisch bewertet. Falls nicht auf bestehende Datensätze zurückgegriffen werden konnte, wurden primär die technischen Hochschulen untersucht. Damit erlaubt die Erhebung der Kennzahlen keinen Vergleich zwischen den Ländern, bietet jedoch einen ersten Überblick über das verfügbare Lehrangebot im internationalen Vergleich. >

111

USA

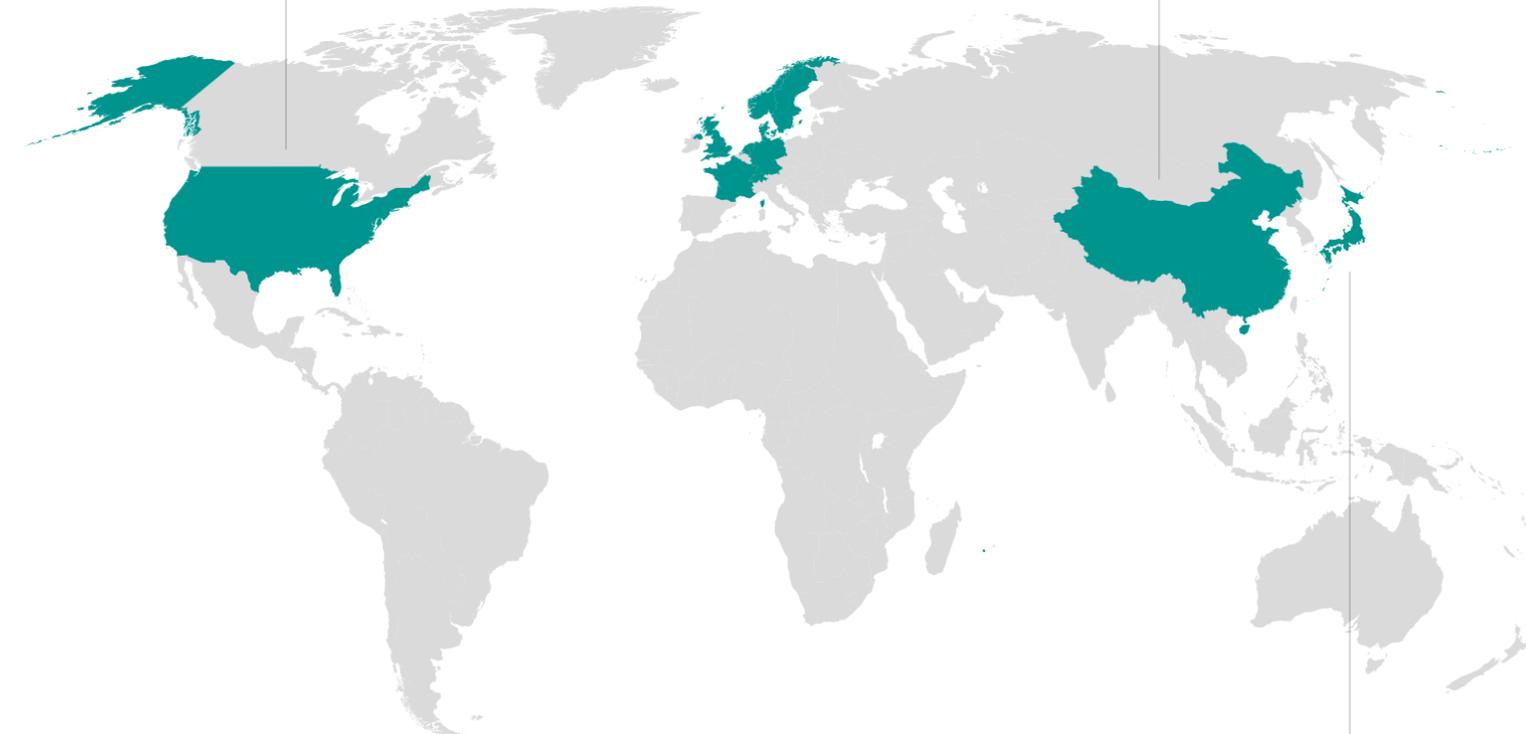
In den Vereinigten Staaten haben 2017 mehr als 111 Hochschulen Grund- und Aufbaustudiengänge in Systems Engineering angeboten. Damit ist SE im internationalen Vergleich ein verbreiteter Studiengang und kann an vielen verschiedenen Hochschulen und Universitäten belegt werden. Viele Hochschulen bieten spezialisierte Systems Engineering Programme an. Bei der Erhebung konnte sowohl auf Daten des Systems Engineering Research Center (SERC) des Stevens Institute of Technology, des International Council on Systems Engineering (INCOSE) als auch der Plattform Data USA zurückgegriffen werden.

43

von 83 Universitäten

China

Nach den Klassifizierungskriterien des chinesischen Bildungsministeriums ist Systems Engineering eine Teildisziplin der Ingenieurwissenschaften und insbesondere der Steuerungstechnik. In diesem Kontext bezieht sich die Steuerungstechnik auf verschiedenste Ausprägungen von technischen Systemen (Energiesysteme, Versorgungssysteme, Industrieprozesse, Produktionsmanagementsysteme etc. Im Jahr 2012 beteiligten sich 83 chinesische Universitäten mit und ohne Promotionsberechtigung an einer Bewertung der Ausbildung in den Ingenieurwissenschaften. Dabei haben 47 von 83 Universitäten Systems Engineering als einen Forschungsschwerpunkt eingestuft und es im Rahmen ihres Lehrprogramms angeboten.



50

von 792 Universitäten

Japan

Nach der Studie der »Japan Student Services Organization« weisen drei von sieben Universitäten in der Spitzengruppe »National Seven« einen SE-Bezug auf. Insgesamt weisen 50 von insgesamt 729 universitären Einrichtungen in Japan einen Bezug zum Themenfeld Systems Engineering auf.

Bild 28: Überblick über das internationale Lehrangebot im Systems Engineering

4**von 13 Universitäten****Niederlande**

In den Niederlanden wird Systems Engineering insbesondere an der Delft University of Technology gelehrt. Das Angebot für die Studierenden umfasst zehn Studiengänge mit SE-Bezug. Insgesamt vier von dreizehn untersuchten niederländischen Universitäten haben einen SE-Bezug in Form von entsprechenden Studiengängen, Vorlesungen oder Lehrstühlen, die sich mit dem Thema beschäftigen. Insbesondere in den technischen Hochschulen ist Systems Engineering vertreten.

20**von 41 Universitäten****Großbritannien**

In Großbritannien wurden 41 Universitäten im Rahmen der Analyse untersucht. 20 dieser Universitäten weisen einen SE-Bezug auf, 10 davon sind der Russell Group (britische Forschungsuniversitäten mit akademischem Exzellenz-Status) zuzuordnen. Die University of Nottingham, das University College London und die University of Birmingham sind die größten Universitäten mit SE-Bezug. Die University of Nottingham bietet ihren Studierenden beispielsweise 12 unterschiedliche Studiengänge mit einem SE-Bezug an und verfügt über vier Lehrstühle, die sich im Kontext Systems Engineering bewegen.

11**von 22 Universitäten****Frankreich**

Die meisten Lehrveranstaltungen mit Bezug zum Themenfeld Systems Engineering bietet zugleich die kleinste der untersuchten Universitäten, die Université Central Nantes, an. Insgesamt bieten 11 der 22 untersuchten Universitäten Lehrveranstaltungen im Bereich SE an.

11**von 19 Universitäten****Skandinavien**

Das Themenfeld Systems Engineering wird in der universitären Lehre in Schweden insbesondere an dem KTH Royal Institute of Technology angeboten. Hier können Studierende sieben Studiengänge mit SE-Bezug wählen und werden von fünf Lehrstühlen im Themenfeld SE betreut.

In **Norwegen** bietet u. a. die Norwegian University of Science and Technology 15 Studiengänge im Themenfeld Systems Engineering an. Drei Lehrstühle an der Universität weisen in ihrer Beschreibung den Begriff »Systems Engineering« aus. An drei der untersuchten norwegischen Universitäten werden Studiengänge mit einem SE-Bezug gelehrt.

In **Dänemark** konzentriert sich die Lehre im Themenfeld Systems Engineering mit drei Lehrstühlen an der University of Copenhagen und mit einem Lehrstuhl an der Technical University of Denmark auf die Hauptstadt Kopenhagen. Zusätzlich bietet die Aarhus University zwei Studiengänge an, denen sich ein SE-Bezug zuordnen lässt.

In **Finnland** konnten keine den direkten Analyse-kriterien entsprechenden Studiengänge, Vorlesungen oder Lehrstühle ermittelt werden.

16**von 17 Universitäten****Deutschland**

In Deutschland bieten fast alle technischen Universitäten Vorlesungen mit einem Bezug zum SE an. Dabei ist die Durchdringung insbesondere außerhalb der TU9 sehr heterogen

2**von 2 Universitäten****Schweiz**

Beide der zwei untersuchten Universitäten in der Schweiz bieten Lehrveranstaltungen im Themenfeld Systems Engineering an. Darüber hinaus bietet die École Polytechnique Fédérale de Lausanne den Studierenden Systems Engineering als Vertiefungsrichtung oder Minor für den Studiengang »Management, Technology and Entrepreneurship« an.

Im Vergleich: Im Rahmen der internationalen Erhebung hat die USA absolut die größte Anzahl an Hochschuleinrichtungen, die Abschlüsse in Systems Engineering vergeben. Diese Zahl kann sowohl durch die hohe Verfügbarkeit von Informationen als auch durch die starke Verbreitung und hohe Beliebtheit des Themenfelds bedingt sein. Sowohl in China als auch in Japan besteht ebenfalls eine hohe Anzahl an Lehrangeboten im Systems Engineering. Die identifizierte Anzahl der Hochschulen ist vergleichbar mit dem kumulierten Lehrangebot im europäischen Raum. Die technischen Hochschulen in Deutschland haben einen größeren absoluten und relativen Anteil an Studiengängen und Lehrstühlen mit Bezug zum Systems Engineering im Vergleich zu den führenden technischen Hochschulen in Großbritannien, Frankreich, den Niederlanden und Skandinavien. Trotzdem zeigt die Erhebung, dass Systems Engineering in den untersuchten europäischen Ländern präsent ist. Allerdings hat die Analyse auch gezeigt, dass das Verständnis über die konkreten Inhalte, Forschungsschwerpunkte und Ausprägungen vielfältig interpretiert werden kann und daher die Vergleichbarkeit insbesondere der Studiengänge und der Abschlüsse nur bedingt gegeben ist. ●

Bild 28: Überblick über das internationale Lehrangebot im Systems Engineering

5.1.2 Systems Engineering in der Forschung

Methodisches Vorgehen der Kennzahlenerhebung in der Forschung

Die Durchdringung der Forschung durch Systems Engineering wurde anhand der Anzahl von Veröffentlichungen im Zeitraum zwischen 2010 und 2018 untersucht, welche einen entsprechenden thematischen Bezug zu Systems Engineering aufweisen. Ein SE-Bezug einer Veröffentlichung wurde dann als gegeben angesehen, wenn Titel, Abstract oder Keywords den Begriff »Systems Engineering« enthalten. Für die Datenerhebung wurde auf die Literaturdatenbank Scopus zurückgegriffen. Für die identifizierten Veröffentlichungen mit SE-Bezug wurden zudem die Zitationszahlen sowie die Anzahl der beteiligten Autoren ermittelt.

Systems Engineering in der Forschung in Deutschland

Für die Anzahl der Veröffentlichungen mit SE-Bezug im betrachteten Zeitraum von 2010 bis 2018 zeigt die Auswertung einen Anstieg von durchschnittlich 8 % pro Jahr (VGL. BILD 29). Da die Anzahl der Veröffentlichungen pro Autor in diesem Zeitraum annähernd konstant blieb, steigt auch die Zahl der Autoren, die zum Thema Systems Engineering veröffentlichen mit durchschnittlich 7 % pro Jahr. Die Zahlen deuten auf eine steigende Relevanz von Systems Engineering in der deutschen Forschungslandschaft hin, zumal sich jedes Jahr mehr Autoren mit dem Thema beschäftigen und entsprechend mehr Veröffentlichungen dazu entstehen. Gleiches gilt auch für die Dissertationen mit SE-Bezug, für die sich im Zeitraum von 2010 bis 2018 ebenfalls ein Anstieg beobachten lässt. Für die Zahl der dazugehörigen Zitationen lässt sich ein solcher Anstieg hingegen nicht erkennen.

Die Durchdringung der Forschung von Systems Engineering in Deutschland lässt sich neben den Veröffentlichungszahlen auch an der Präsenz des Themas auf deutschsprachigen Fachkonferenzen festmachen: Neben dem »Tag des Systems Engineering (TdSE)« fokussieren auch das Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung

und das DfX-Symposium das Thema Systems Engineering (VGL. INFOBOX 26). Mit dem TdSE ist in der deutschsprachigen Forschung eine Fachkonferenz etabliert, die sich speziell dem Thema Systems Engineering widmet. Dies spiegelt sich in einer entsprechend hohen Anzahl von Beiträgen mit direktem SE-Bezug wider.

INFO 26 Tag des Systems Engineering (TdSE)

Der »Tag des Systems Engineering« (TdSE) ist eine Konferenz für Systems Engineering und dient als zentraler Treffpunkt für Interessierte, Entscheider und Systems Engineering Experten. Das Thema Systems Engineering wird mit Hilfe von Workshops, Vorträgen und Diskussionen spezifischer Fragestellungen vertieft. Veranstalter der Konferenz ist die Gesellschaft für Systems Engineering (GfSE), die deutsche Sektion des International Council on Systems Engineering (INCOSE).

Auch die Berücksichtigung von Systems Engineering in öffentlich geförderten Forschungsprojekten in Deutschland ist ein Zeichen für den Stellenwert des Themas in der deutschen Forschung. Hier wurde die Anzahl der durch den Bund und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekte mit SE-Bezug ermittelt. Als Projekte mit SE-Bezug wurden dabei solche Projekte gezählt, deren Beschreibung den Begriff »Systems Engineering« enthält. Die Auswertung, die anhand des Förderkatalogs des Bundes und der Projektdatenbank der DFG erstellt wurde, zeigt jedoch, dass das Thema im Zeitraum 2010 bis 2019 keine gleichbleibende Beachtung findet. So schwanken sowohl die Zahl geförderter Projekte mit SE-Bezug wie auch die damit verbundenen Fördersummen stark.

Systems Engineering in der internationalen Forschung

Um den Blick über auf die Forschungsaktivitäten im Kontext Systems Engineering über Deutschland hinauszuerweitern, wurde stellvertretend die Durchdringung der Forschung durch Systems Engineering folgender Länder untersucht:

- USA
- China
- Großbritannien
- Niederlande
- Japan
- Skandinavien
- Frankreich
- Schweiz

Betrachtungsgegenstand der Analyse waren analog zur Analyse in Deutschland die Anzahl der Veröffentlichungen mit SE-Bezug, die Zitationszahlen dieser sowie die Anzahl der beteiligten Autoren. Die Analyse hat folgende Erkenntnisse hervorgebracht:

USA: Seit 2010 ist die Zahl der Veröffentlichungen mit SE-Bezug in den USA geringfügig um etwa 4 % p.a. gestiegen. Dabei liegt die Anzahl der Publikationen in der Regel bei 850 Veröffentlichungen pro Jahr. Hervorzuheben ist die hohe Anzahl an Zitationen (z. B. 9202 im Jahr 2012), welche auf eine hohe Relevanz der Forschungsarbeiten schließen lässt. Die Anzahl der Publikationen pro Autor liegt relativ konstant zwischen 0,3 und 0,4. Dementsprechend steigt die absolute Anzahl der Autoren mit 4 % p.a. nur marginal.

China: Die Anzahl der Publikationen mit SE-Bezug stieg zwischen 2010 (295) und 2017 (2237) um das Achtfache. Dies spiegelt sich ebenfalls in der durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von etwa 33 % p.a. wider. Gleichzeitig hat sich die Anzahl der Zitationen von 2010 (2036) zu 2017 (4696) verdoppelt. Die hohe Quantität der Publikationen und der kontinuierliche Anstieg der Zitationen verdeutlichen Chinas große Dynamik in dem Forschungsfeld SE. Dabei liegt die Anzahl der Publikationen pro Autor konstant zwischen 0,3 und 0,4. Demzufolge ist die Anzahl der Autoren von 2010 bis 2018 um 30 % p.a. gestiegen.

Großbritannien: Die Anzahl der Veröffentlichungen im Themenfeld Systems Engineering ist in Großbritannien von 2010 (159 Veröffentlichungen) bis 2017 mit leichten Schwankungen gestiegen. Mit 291 in der Datenbank Scopus gelisteten Veröffentlichungen sticht das Jahr 2017 besonderes hervor. 2017 waren 1144 Autoren an Veröffentlichungen im Kontext SE beteiligt. 2018 reduzierte sich die Anzahl auf 163 Publikationen. Insgesamt ist die Anzahl der Autoren, die Publikationen im Themenfeld SE verfasst haben, zwischen 2010 und 2018 um durchschnittlich 3 % p.a. gestiegen.

Niederlande: Der Anstieg von 80 (2010) auf 95 (2018) wissenschaftliche Publikationen pro Jahr unterstreicht die zunehmende Relevanz des Themas SE in der wissenschaftlichen Diskussion. Während 2014 467 Autoren aus dem Kontext SE verzeichnet waren, ist die Anzahl der beteiligten Autoren im Jahr 2018 auf 375 Autoren gefallen.

Japan: In Japan ist seit 2010 die Zahl der Veröffentlichungen, die das Thema SE adressieren, zunächst von 85 (2010) auf 61 Publikationen im Jahr 2012 gesunken. Seit 2013 gibt es eine Trendwende und die Anzahl der Publikationen hat sich auf 111 Veröffentlichungen im Jahr 2016 fast verdoppelt. In diesem Jahr waren 344 Autoren an den in Scopus gelisteten Veröffentlichungen beteiligt. Seit 2017 sinkt die Zahl der Publikationen wieder. Im Jahr 2018 wurden 78 Publikationen im Themenfeld Systems Engineering aus Japan in die Scopus-Literaturdatenbank aufgenommen.

Skandinavien: Die Anzahl der Veröffentlichungen mit SE-Bezug aus skandinavischen Ländern ist zwischen 2010 und 2018 mit 14 % p.a. deutlich gestiegen. Dies ist durch den stetigen Anstieg der Autorenanzahl von +22 % p.a. zwischen 2010 und 2018 begründet. Der Anstieg zeigt deutlich, dass Systems Engineering in der Forschung in Skandinavien massiv an Bedeutung gewonnen hat.

Frankreich: Die Anzahl der Publikationen mit SE-Bezug, welche in Frankreich veröffentlicht und jährlich in die Scopus Datenbank aufgenommen wurden, hat sich im Vergleich von 2010 (99) zu 2018 (235) mehr als verdoppelt. Damit ist ein jährlicher Anstieg von 15 % zu beobachten. Ein noch stärkerer Anstieg ist bei der Anzahl der Autoren zu finden. Waren es 2010 noch 135 Autoren mit Veröffentlichungen im Themenfeld SE, schrieben 2018 528 Autoren über Systems Engineering. >

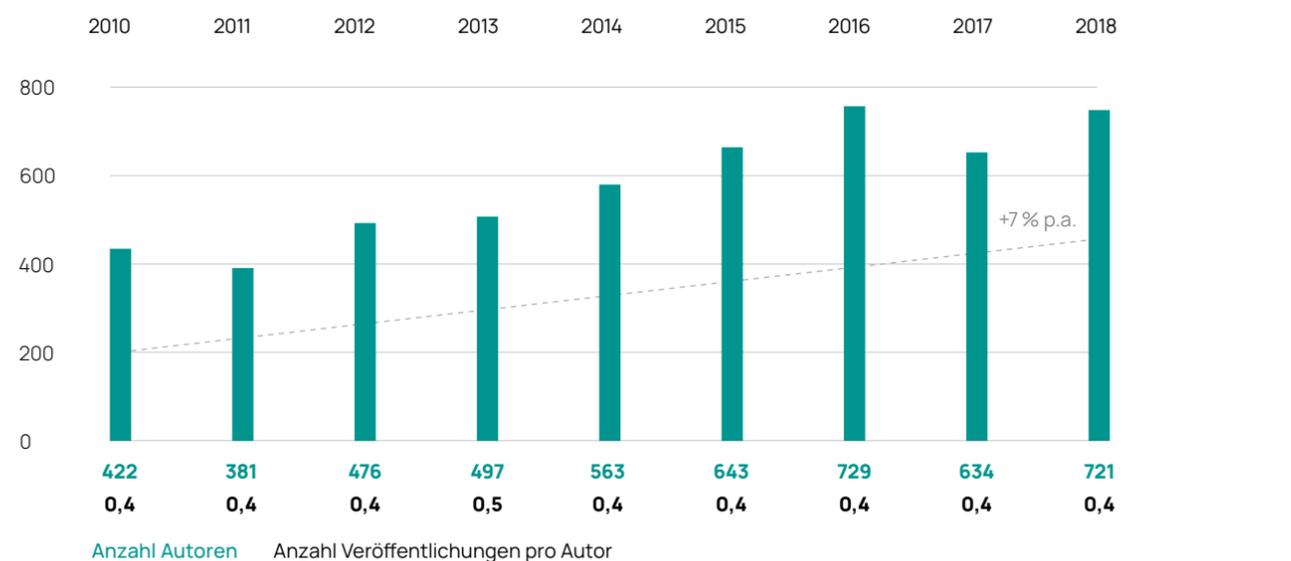
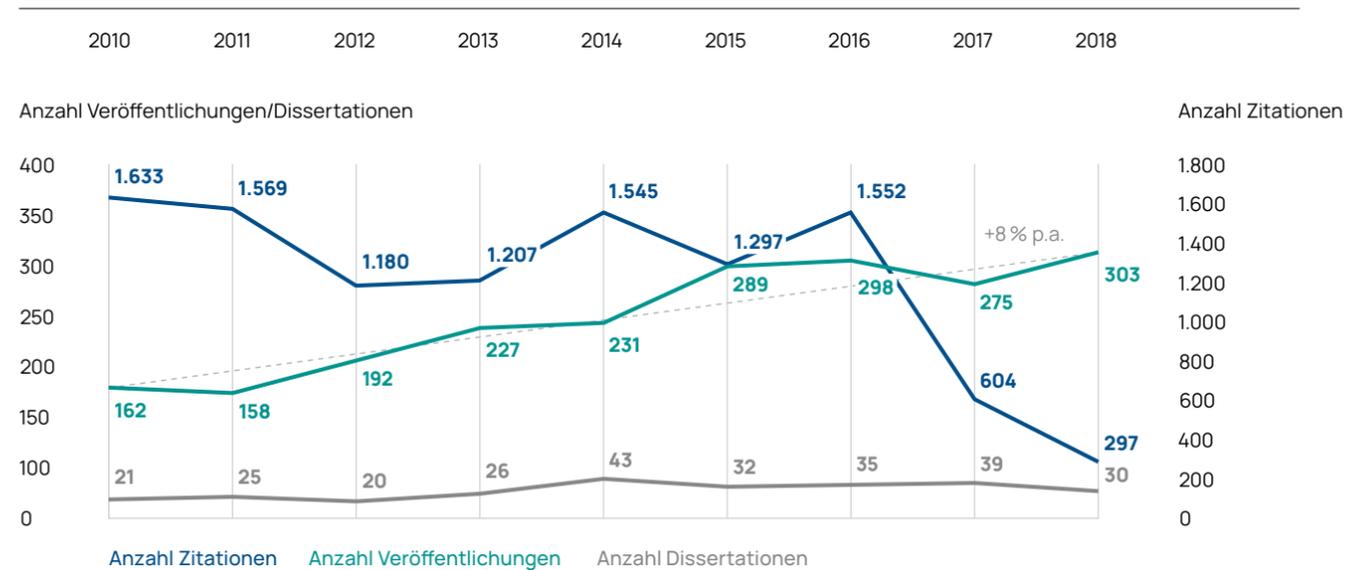


Bild 29: Entwicklung von Veröffentlichungen, Zitationen und Dissertationen zum Thema Systems Engineering in Deutschland

Schweiz: Die Anzahl der wissenschaftlichen Publikationen mit SE-Bezug stieg im Durchschnitt zwischen den Jahren 2010 und 2018 um 7,4 % p.a. Das Jahr 2016 verzeichnet mit 54 Veröffentlichungen eine überdurchschnittlich hohe Anzahl an Veröffentlichungen. Ähnlich verhält es sich mit der Entwicklung der Autoren. Hier ist ein durchschnittlicher Anstieg von 23 % p.a. zwischen 2010 und 2018 zu beobachten. Allgemein lässt sich sagen, dass das Thema Systems Engineering zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Im Vergleich: China und die USA führen bei der absoluten Anzahl der Publikationen mit SE-Bezug; China verzeichnet im internationalen Vergleich die höchste, jährliche Wachstumsrate. Damit bestätigt sich der generelle Trend, dass China im wissenschaftlichen Wettbewerb enorm aufgeholt hat. Im Vergleich zu Deutschland zeichnen sich in Japan, Großbritannien und den Niederlanden schwächere Anstiege an Veröffentlichungen mit SE-Bezug ab. Die absolute Anzahl an Veröffentlichungen ist in Deutschland und Großbritannien vergleichbar – die Anzahl der Zitationen der Veröffentlichungen aus Großbritannien ist jedoch höher. Gründe dafür könnten in verwendeten Sprachen liegen. Der Blick auf die an den Publikationen beteiligten Autoren zeigt, dass die Anzahl der Autoren in allen untersuchten Ländern gleichmäßig steigt; die Anzahl der Publikationen pro Autor liegt zwischen 0,3 und 0,4.

INFO 27 Studie: The rise of systems engineering in China

Die vom China Aerospace Laboratory of Social System Engineering gesponserte Broschüre mit dem Titel »The rise of systems engineering in China« aus dem Jahr 2016 illustriert die hohe Bedeutung von Systems Engineering in China. Die umfangreiche Publikation beschreibt Chinas Aktivitäten rund um die Forschung im Systems Engineering. Neben einer Erläuterung von Systems Engineering werden die Anfänge der Forschungsaktivitäten in China dargelegt. Des Weiteren werden die Entstehung der Systems Engineering Theorien in China und deren Bedeutungsgewinn erläutert. Zusätzlich zu der historischen Betrachtung wird auch ein Blick in die Zukunft des SE in China geworfen. Der Bericht stellt außerdem wichtige Forschungspartner im Bereich Systems Engineering vor. Laut der Broschüre hat die Systems Engineering Society of China (SESC) 21 anerkannte Komitees. Es werden außerdem 15 ausgewählte Forschungseinrichtungen aus dem Kontext SE aufgeführt und über 40 Universitäten genannt, die Ausbildungen im Bereich Systems Engineering anbieten. >

USA

7.455 **56.064**
Veröffentlichungen Zitationen

4 % p.a. ↗
Wachstumsrate der Veröffentlichungen

China

8.906 **29.756**
Veröffentlichungen Zitationen

33 % p.a. ↑
Wachstumsrate der Veröffentlichungen

Niederlande

751 **5.486**
Veröffentlichungen Zitationen

5 % p.a. →
Wachstumsrate der Veröffentlichungen

Skandinavien

1.005 **6.712**
Veröffentlichungen Zitationen

14 % p.a. ↗
Wachstumsrate der Veröffentlichungen

Großbritannien

1.786 **14.740**
Veröffentlichungen Zitationen

3 % p.a. ↑
Wachstumsrate der Veröffentlichungen

Frankreich

1.569 **13.262**
Veröffentlichungen Zitationen

15 % p.a. ↗
Wachstumsrate der Veröffentlichungen

Schweiz

269 **2.553**
Veröffentlichungen Zitationen

7,4 % p.a. →
Wachstumsrate der Veröffentlichungen

Deutschland

2.134 **10.884**
Veröffentlichungen Zitationen

7 % p.a. →
Wachstumsrate der Veröffentlichungen

Japan

735 **2.866**
Veröffentlichungen Zitationen

0,5 % p.a. →
Wachstumsrate der Veröffentlichungen

Veröffentlichungen

Absolute Anzahl an Veröffentlichungen zwischen 2010 und 2018

Zitationen

Absolute Anzahl an Zitationen zwischen 2010 und 2018

Wachstumsrate der Veröffentlichungen

Durchschnittliche Jährliche Wachstumsrate der Veröffentlichungen zwischen 2010 und 2018

Bild 30: Überblick über die internationale Forschung im Themenfeld Systems Engineering

China und die USA führen bei der absoluten Anzahl der Publikationen mit SE-Bezug; China verzeichnet im internationalen Vergleich die höchste, jährliche Wachstumsrate. Damit bestätigt sich der generelle Trend, dass China im wissenschaftlichen Wettbewerb enorm aufgeholt hat. Im Vergleich zu Deutschland zeichnen sich in Japan, Großbritannien und den Niederlanden schwächere Anstiege an Veröffentlichungen mit SE-Bezug ab. Die absolute

Anzahl an Veröffentlichungen ist in Deutschland und Großbritannien vergleichbar – die Anzahl der Zitationen der Veröffentlichungen aus Großbritannien ist jedoch höher. Gründe dafür könnten in verwendeten Sprachen liegen. Der Blick auf die an den Publikationen beteiligten Autoren zeigt, dass die Anzahl der Autoren in allen untersuchten Ländern gleichmäßig steigt; die Anzahl der Publikationen pro Autor liegt zwischen 0,3 und 0,4.

Systems Engineering in Forschung und Lehre im internationalen Vergleich: Die führenden Industrienationen haben Systems Engineering als Schlüsselkompetenz im Wettlauf um die Zukunft erkannt und handeln dementsprechend. China und die USA führen deutlich bei den Absolventen und den Publikationen, die ein Indiz für die Forschungsintensität sind. Deutschland folgt, hält aber nicht Schritt mit den Führenden.

Deutschland nimmt im europäischen Vergleich eine Vorreiterposition im Systems Engineering ein. Sowohl in der Lehre als auch in der Forschung gewinnt das Thema Systems Engineering weltweit zunehmend an Bedeutung. Die Durchdringung des Themenfeldes Systems Engineering ist zwar in den Lehrprogrammen der neun technischen Universitäten (TU9) in Deutschland sehr heterogen, dennoch bereits jetzt in den verschiedenen Fakultäten wiederzufinden. International werden die meisten Absolventen im Bereich Systems Engineering in den USA, China und Japan ausgebildet. Eine Vergleichbarkeit der Bildungslandschaften ist durch die vielfältigen Interpretationsmöglichkeiten der Lehrinhalte nicht gegeben.

Mit einem jährlichen Anstieg der wissenschaftlichen Veröffentlichungen von 8 % gewinnt das Systems Engineering zunehmend an Relevanz in der deutschen Forschungslandschaft. Im internationalen Vergleich weisen die USA und China die sowohl höchste Anzahl als auch die höchste Qualität von Publikationen, gemessen an der Anzahl der Zitationen auf. Dabei verzeichnet China mit etwa 30 % die höchste jährliche Wachstumsrate. ●

5.2 Advanced Engineering

Neben der zunehmenden Relevanz einer ganzheitlichen Entwicklungsmethodik im Sinne des Systems Engineerings haben die Interviews verschiedene Entwicklungen und Trends im Engineering bestätigt: Model-Based Systems Engineering, Künstliche Intelligenz und Assistenzsysteme, cloudbasierte Kollaboration, Produktlebenszyklusmanagement und der Digitale Zwilling werden zukünftig die Entwicklung von innovativen Marktleistungen prägen. Das zukünftige Engineering umfasst nicht nur optimierte IT-Werkzeuge, sondern muss im Rahmen des Advanced Engineerings auch die Prozesse, Methoden und die Arbeitsorganisationen berücksichtigen, um die Innovationsfähigkeit durch Kreativität und Agilität zu gewährleisten.

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen gilt es zu identifizieren, wie Deutschland im Hinblick auf die Entwicklungstrends des Advanced Engineerings aufgestellt ist. Daher wurden auf Basis der Interviewergebnisse relevante Themengebiete im Themenkomplex des Advanced Engineerings abgeleitet. Mithilfe der Erhebung wird die aktuelle Durchdringung der folgenden Entwicklungen im internationalen Vergleich untersucht:

- Digitale Technologien im Engineering – Künstliche Intelligenz, Digitaler Zwilling und Produktlebenszyklusmanagement im Engineering
- Innovative Methoden im Engineering – Kreativität und Agilität im Engineering

Aufgrund des hohen Neuheitsgrads und einer breiten Verankerung in den Lehrprogrammen an den Hochschulen beschränkt sich die Erhebung der Kennzahlen auf die Forschung. Dabei ist die Untersuchung im Gegensatz zur länderspezifischen Betrachtung des Systems Engineering nach den beschriebenen Themenfeldern strukturiert.

Methodisches Vorgehen bei der Kennzahlen-erhebung in der Forschung

Für die systematische Kennzahlenerhebung im Advanced Engineering wurde die Literaturlieferantenbank Scopus verwendet. Die Intensität der Forschung wird anhand der Anzahl der Veröffentlichungen analysiert, welche einen entsprechenden thematischen Bezug zu den einzelnen Themengebieten aufweisen.

Bei der Festlegung der Suchbegriffe wurden die relevanten Fachausdrücke für die Themengebiete auf Basis der qualitativen Erhebung definiert. Im Themengebiet Advanced Engineering wurden die Ausdrücke Agilität, Kreativität, Künstliche Intelligenz, Digitaler Zwilling und Produktlebenszyklusmanagement (PLM) verwendet. Die Ausdrücke wurden ausschließlich in dem Kontext des Fachgebiets »Engineering« untersucht.

Als Kennzahl dient jeweils die absolute Anzahl der Nennungen der Ausdrücke im Titel, in der Zusammenfassung oder in den Keywords einer Veröffentlichung. Dabei wurden primär englischsprachige Veröffentlichungen anhand der übersetzten Ausdrücke betrachtet. Die Veröffentlichungszahlen wurden in dem Zeitraum von 2010 bis 2018 untersucht.

5.2.1 Digitale Technologien im Engineering: Künstliche Intelligenz, Digitaler Zwilling und Produktlebenszyklusmanagement im Engineering

Die Untersuchung des internationalen Leistungsstands der digitalen Technologien im Engineering erfolgt anhand der Anzahl der Veröffentlichungen mit Bezug zu den folgenden Themenfeldern im Engineering (VGL. BILD 31):

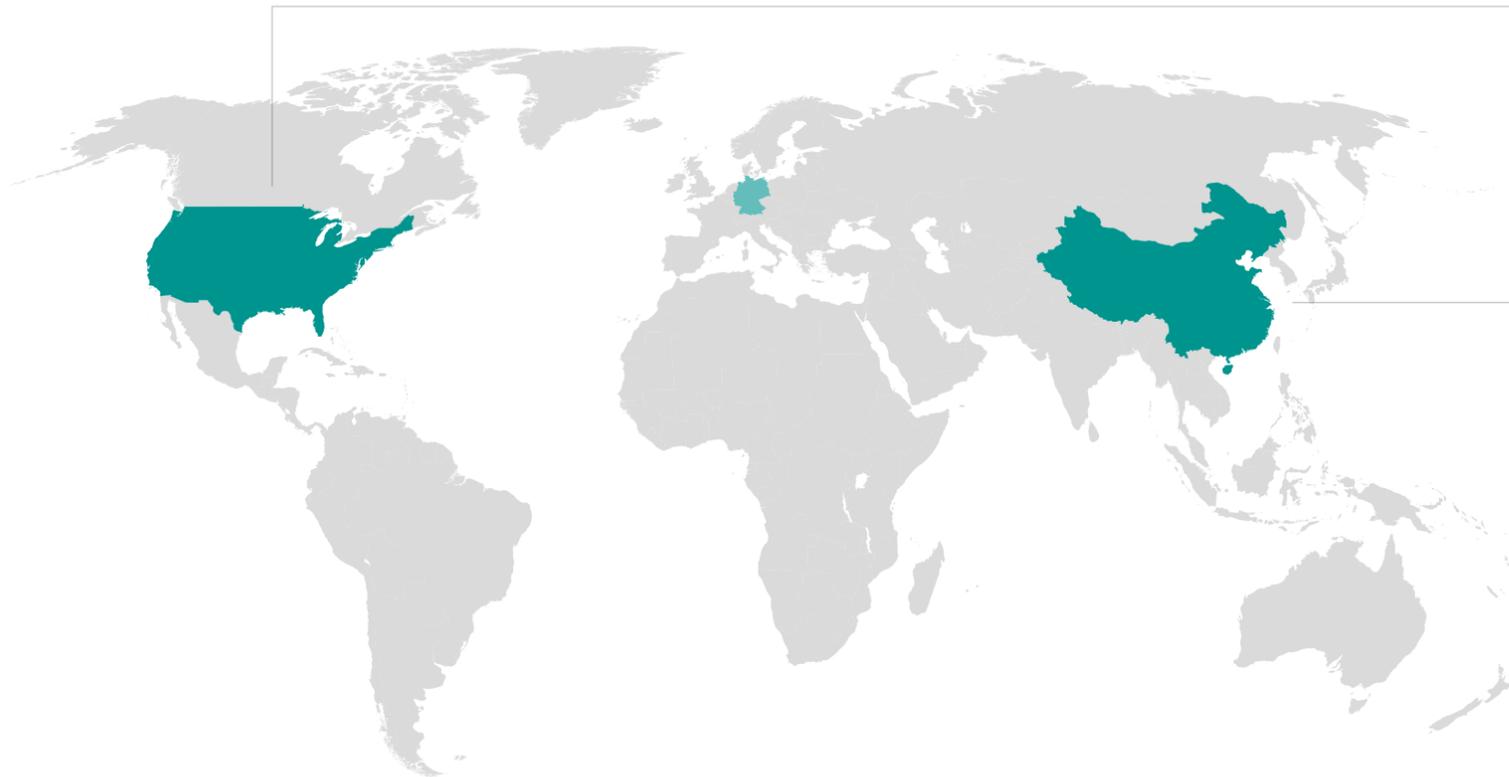
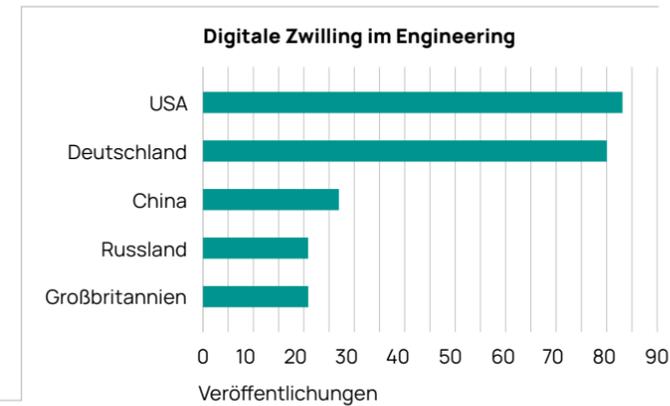


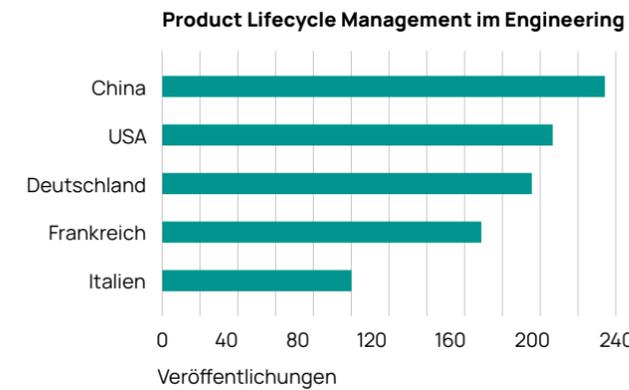
Bild 31: Ausgewählte digitale Technologien im Engineering im internationalen Vergleich

Führende Forschung im Themenfeld

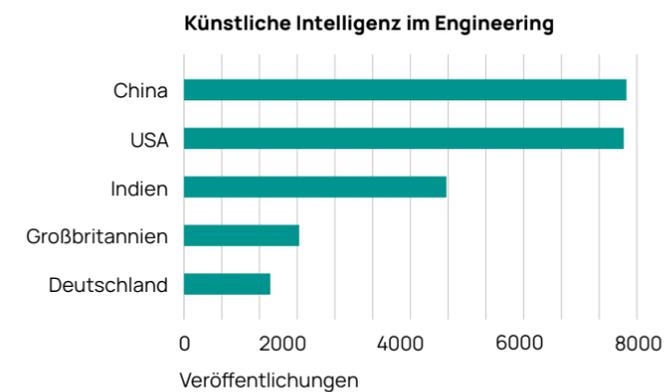


Künstliche Intelligenz im Engineering: Der Einsatz von KI ist ein globaler Trend, welcher in einer zunehmenden Relevanz von KI-Ansätzen im Engineering resultiert. Dies spiegelt sich in der steigenden Anzahl der Veröffentlichungen mit Bezug auf Künstlicher Intelligenz im Engineering wider. Die weltweiten Veröffentlichungen weisen ab 2015 einen starken Anstieg auf. Deutschland liegt mit einer kumulierten Anzahl von 56 Publikationen im Zeitraum 2010 bis 2018 weit hinter China (299), den USA (213) und Indien (193).

Digitaler Zwilling im Engineering: Ein vergleichbarer Anstieg ist auch bei Publikationen im Themenfeld Digitaler Zwilling zu beobachten. Die geringe Anzahl der Publikationen von 2010 bis 2016 und der anschließende starke Anstieg in den Jahren 2017 und 2018 lassen darauf schließen, dass das Thema Digitaler Zwilling zukünftig eine hohe Relevanz in der Forschung aufweisen wird. Im globalen Vergleich führen an erster Stelle die USA (38) gefolgt von Deutschland (34) und China (21).



Produktlebenszyklusmanagement: Die Anzahl der Veröffentlichungen im Themenfeld PLM ist im Vergleich zu den Publikationen zu KI und dem Digitaler Zwilling im Zeitraum von 2010 bis 2018 relativ konstant geblieben. Mit 235 Veröffentlichungen in den Jahren 2010 bis 2018 liegt China knapp vor den USA (221). Deutschland zählt mit 192 Publikationen ebenfalls zu den führenden Nationen in dem Themenfeld PLM. Darüber hinaus lässt sich festhalten, dass die länderspezifische Verteilung der Veröffentlichungen zu dem Themenfeld PLM deutlich homogener ist als bei anderen Themenfeldern.



5.2.2 Innovative Methoden im Engineering: Kreativität und Agilität im Engineering

Die Forschungsrelevanz von Kreativität und Agilität im Engineering wurde ebenfalls anhand der Veröffentlichungen in den genannten Themenfeldern untersucht (VGL. BILD 32):

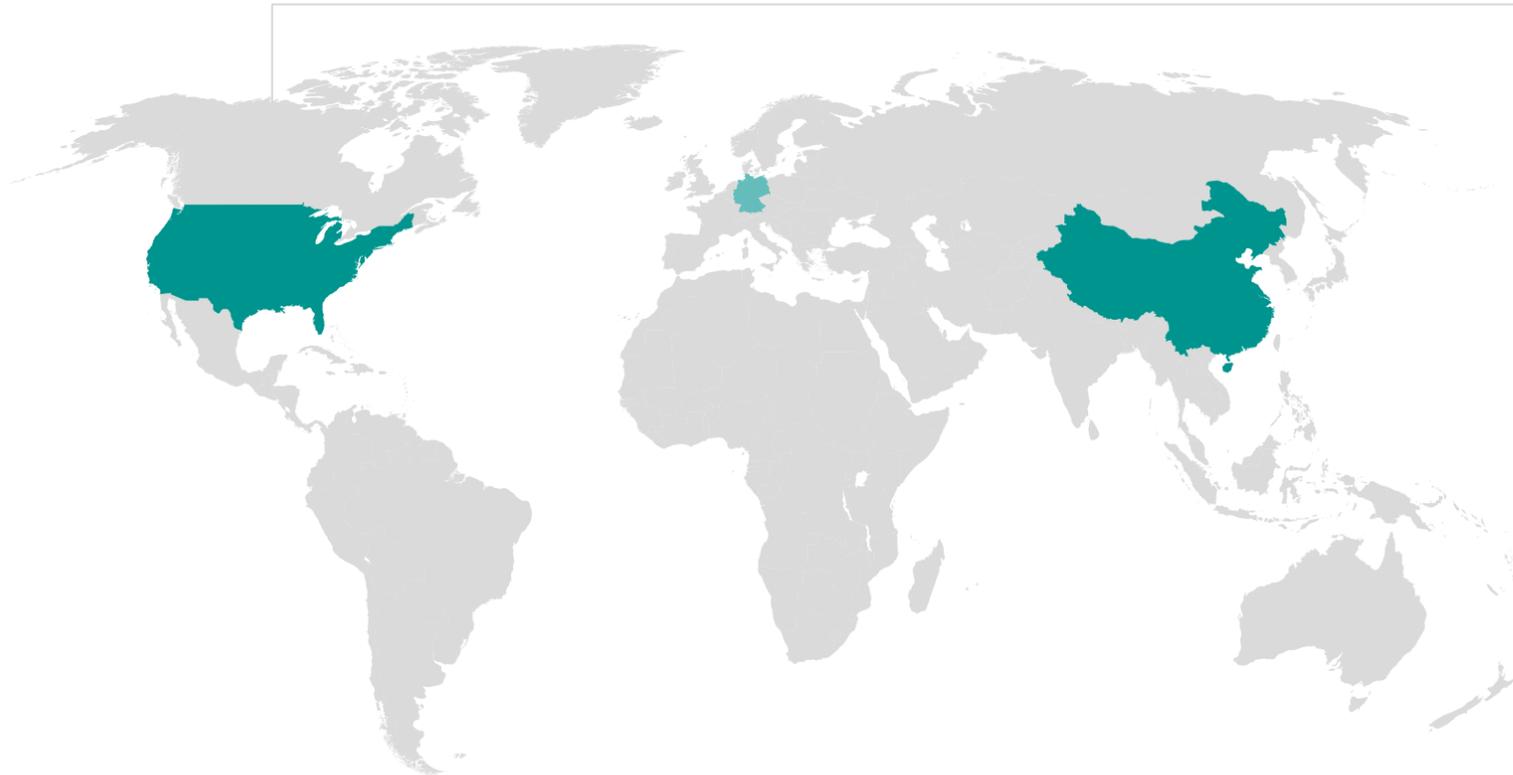
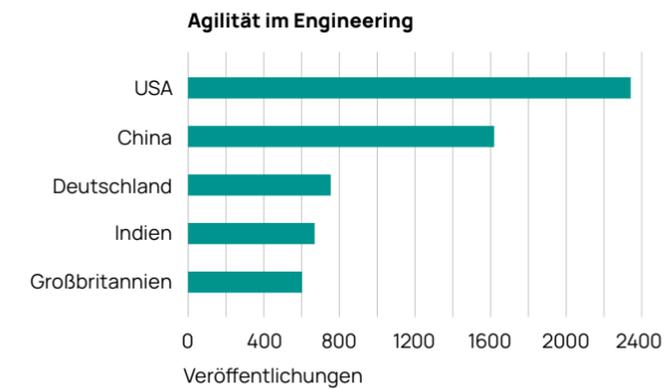
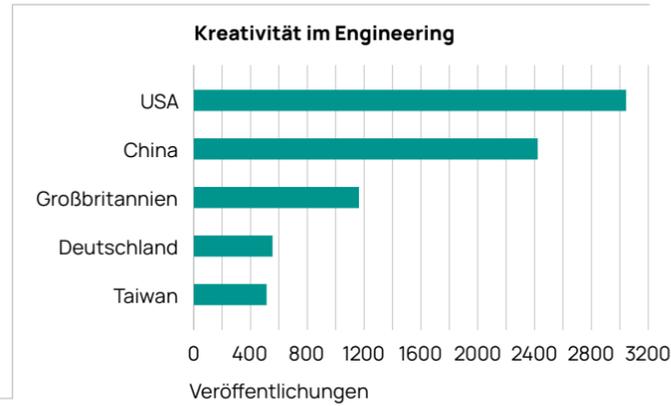


Bild 32: Ausgewählte innovative Methoden im Engineering im internationalen Vergleich

Führende Forschung im Themenfeld



Agilität: Eine Erhebung hinsichtlich der Anzahl an Veröffentlichungen zum Themenfeld Agilität im Kontext des Engineerings lässt auf eine steigende Relevanz schließen. Seit 2010 steigt die Anzahl an Veröffentlichungen kontinuierlich. Für das Jahr 2018 konnten 442 Veröffentlichungen mit Bezug zur Agilität erhoben werden, während es 2010 lediglich 243 waren. Mit 576 Publikationen zwischen den Jahren 2010 und 2018 werden in den USA die meisten Forschungsergebnisse zum Themenfeld Agilität veröffentlicht. China (383) und Deutschland (252) folgen bei der kumulierten Anzahl der Veröffentlichungen auf den Plätzen zwei und drei.

Kreativität: Seit 2010 steigt die Anzahl an Publikationen in dem Themenfeld Kreativität im Engineering konstant und hat sich von 217 Veröffentlichungen im Jahr 2010 auf 345 Publikationen im Jahr 2018 erhöht. Analog zu den Ergebnissen im Themengebiet Agilität führt die USA im globalen Vergleich mit 480 Publikationen auch das Themengebiet Kreativität an, gefolgt von China mit 291 Veröffentlichungen und Großbritannien mit 234 Veröffentlichungen. Deutschland (86) ist mit einer vergleichsweise geringen Anzahl der Publikationen in dem Themengebiet Kreativität abgeschlagen.

Advanced Engineering im internationalen Vergleich: Deutschland fällt gegenüber USA und China zurück. Signifikante Stärken sind noch in den Bereichen PLM und Digitaler Zwilling zu verzeichnen.

Die Erhebung der Forschungskennzahlen im Bereich des Advanced Engineerings unterstreicht die Vormachtstellung der USA und China. Die USA sind führend bei der Anzahl der Veröffentlichungen in den Bereichen Kreativität und Agilität im Engineering. China dominiert das Themengebiet Digitalisierung im Engineering. Deutschland ist hinsichtlich der Quantität von Veröffentlichungen in den Bereichen KI und Kreativität weit abgeschlagen, hat jedoch in den Bereichen PLM und Digitaler Zwilling eine führende Position.

5.3 Erste Ansätze des Advanced Systems Engineerings

Die quantitative Erhebung des Leistungsstands in den Themenfeldern des Systems Engineerings und des Advanced Engineerings verdeutlicht die Dominanz der USA und die zunehmende Technologieführerschaft Chinas. Deutschland nimmt insbesondere in Bezug auf den europäischen Vergleich eine führende Position bei der Anzahl der Veröffentlichungen im Engineering ein. Zur Entwicklung zukünftiger Advanced Systems eröffnen eine systematische Verknüpfung und Integration der Themengebiete Systems Engineering und Advanced Engineering eine besondere Chance, die Produktentstehung effizienter und effektiver zu gestalten. Vor diesem Hintergrund wurden abschließend die Publikationen untersucht, die sowohl einen Bezug zum Systems Engineering als auch zu den genannten Teilaspekten des Advanced Engineerings haben (VGL. BILD 33).

Diese Erhebung hat gezeigt, dass besonders die Kombination aus Systems Engineering und Agilität sowie Systems Engineering und Künstliche Intelligenz auf ein zunehmendes Interesse stößt. Die Anzahl der Publikationen in diesen Themenfeldern ist im Vergleich zur Anzahl in den Bereichen Systems Engineering und Kreativität, Systems Engineering und Digitaler Zwilling sowie Systems Engineering und PLM erheblich höher.

Zum Untersuchungszeitpunkt führen die USA in Bezug auf die Anzahl der Veröffentlichungen in allen genannten Kombinationen mit der einzigen Ausnahme Systems Engineering und PLM. Auch hier verdeutlicht die Anzahl der Veröffentlichungen die zunehmende Relevanz von China im wissenschaftlichen Wettbewerb. China liegt bei vier der fünf Erhebungen unter den führenden drei Forschungsnationen. Deutschland führt bei der kumulierten Anzahl der Publikationen im Themenfeld Systems Engineering und PLM. Des Weiteren findet Deutschland mit 17 Publikationen direkten Anschluss an die USA (20) im Themenfeld Systems Engineering und Digitaler Zwilling. Dies unterstreicht mögliche Erfolgsfaktoren Deutschlands im Kontext der digitalen Durchgängigkeit im Engineering. Gleichzeitig sprechen diese Kennzahlen für eine erfolgreiche Verbreitung der Forschungsergebnisse im Rahmen der Plattform Industrie 4.0 als Teil der Hightech-Strategie der Bundesregierung. Darüber unterstreichen die aktuellen Aktivitäten der INCOSE im Themenfeld Künstliche Intelligenz für das Systems Engineering die zunehmende Relevanz dieses Themenfelds. Vor diesem Hintergrund muss die starke Divergenz bei der kombinatorischen Betrachtung von Systems Engineering und KI in der Forschung zwischen den USA (158), China (124) sowie Deutschland (35) kritisch hinterfragt werden.

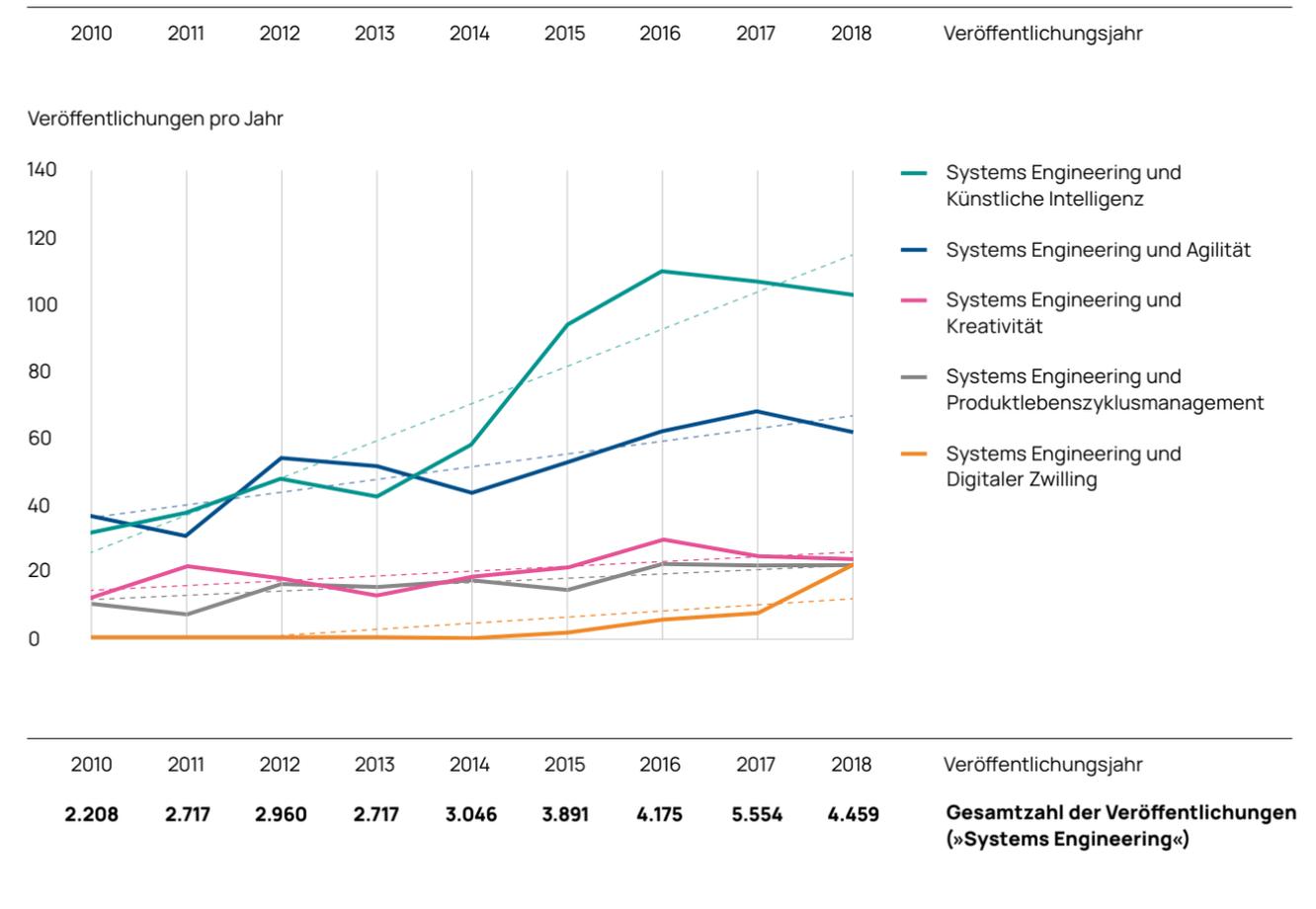


Bild 33: Erste Ansätze des Advanced Systems Engineerings im internationalen Vergleich

Erste Ansätze Advanced Systems Engineering im internationalen Vergleich: Dem dynamischen Wandel der Technologielandschaft und der Arbeitsweisen kann mit ASE wirkungsvoll begegnet werden.

Die Untersuchung zeigt eine besondere Zunahme der Veröffentlichungen in den kombinatorischen Betrachtungen der Themenfeldern KI und SE sowie Agilität und SE. Das bestätigt die Auffassung, dass wir mit KI und Agilität die richtigen Akzente setzen und sich die entsprechenden Nutzenpotentiale nur im Schulterschluss mit ASE schnell genug erschließen lassen.

6 Resümee und Ausblick

Aus den Gesprächen mit den Vertretern aus Wirtschaft und Wissenschaft ergibt sich das Meinungsbild, dass Deutschland in vielen Bereichen der Digitalisierung noch Nachholbedarf hat. Die aktuelle Studienlage unterstreicht dies. Insbesondere bei Schlüsseltechnologien wie KI wird häufig gewarnt, dass ein zunehmender Rückstand im internationalen Vergleich die zukünftige Wertschöpfung maßgeblich beeinflussen kann. Gleichzeitig wird immer wieder hervorgehoben, dass die Innovationen von morgen nur durch das synergetische Zusammenwirken verschiedener Fachdisziplinen möglich werden. Die befragten Führungskräfte und Wissenschaftler sehen daher eine **besondere Innovationkraft in der Gestaltung von komplexen, interdisziplinären Systemen**. Auf diese Weise können die tatsächlichen Markt- und Kundenbedürfnisse adressiert und die Wertschöpfung in Deutschland langfristig gesichert werden.

Die Produkte der deutschen Kernbranchen wie der Automobilindustrie oder dem Maschinenbau sind international weiterhin sehr gefragt und basieren auf erfolgreichen Geschäftsmodellen. Die wissensbasierten Kompetenzen und Qualifikationen des Ingenieurwesens entlang der industriellen Wertschöpfung können nur schwer von internationalen Konkurrenten adaptiert oder kurzfristig aufgebaut werden. **Der Wettbewerb der Wirtschaftsmächte bei der Gestaltung innovativer Marktleistungen ist folglich noch nicht entschieden**. Der Schlüssel werden technische Lösungen sein, die insbesondere durch smarte, datenbasierte Dienstleistungen einen hohen Kundennutzen stiften und zu erfolgreichen Geschäftsmodellen führen.

Die Digitalisierung, der globale Wettbewerb und der Wandel von Arbeitsstrukturen werden die Organisationen vor neue Herausforderungen stellen. Vor diesem Hintergrund muss **die Stärke deutscher Unternehmen in der Planung, Entwicklung und Produktion komplexer Systeme mit hohem Anspruch an Qualität, Innovation und Verbindlichkeit nachhaltig gestärkt werden**. Der Wandel zu autonomen, interaktiven und dynamisch vernetzten Produkten mit steigendem Software- und Service-Anteil wird Unternehmen nur durch ebenso innovative und technisch brillante Lösungen im zugehörigen Wertschöpfungsprozess gelingen.

Die Befragung zeigt dabei zwei wichtige Punkte hinsichtlich der Rolle des Engineerings: 1) es kann eine entscheidende Rolle als Innovator der Wertschöpfung in Deutschland einnehmen und 2) wurde es bislang meistens nur implizit oder gar zweitrangig vorangetrieben (sowohl in Forschung als auch in der Praxis). Dabei könnten gerade erst neue Entwicklungsmethoden und -werkzeuge die im globalen Wettbewerb notwendigen Fähigkeiten wie Kreativität, Agilität oder Resilienz für die Wertschöpfung von morgen ermöglichen. **Aus diesem Grund steht »Advanced Systems Engineering« für den Wandel des Engineerings in Deutschland**. Es schafft einen Handlungsrahmen, um die systemorientierten und hoch-innovativen Ansätze des Engineerings zu integrieren und bietet ein Leitbild für die erfolgreiche Gestaltung von innovativen Produkten, Dienstleistungen und Produkt-Service-Systemen sowie deren Entstehungsprozess. Es steht für eine exponierte Rolle der Planung, der Entwicklung und dem Betrieb der technischen Systeme von morgen. >

Dabei gilt es, die auf Seite der Marktleistungen häufig geforderten Sprunginnovationen ebenfalls im Bereich des Entstehungsprozesses zu forcieren. Es wäre fatal, die erforderlichen innovativen Marktleistungen auf Grundlage inkrementeller Verbesserungen in der Planung und Entwicklung zu gestalten. Dies bedingt ein **radikales Umdenken und einen Paradigmenwechsel im Engineering**. Wirtschaft und Wissenschaft müssen Pionierarbeit leisten, um gleichzeitig neue Formen des digitalisierten und vernetzten Engineerings zu erforschen.

Dieser Aufgabe werden sich verschiedene Forschungsvorhaben und Aktivitäten mit Unterstützung des Leitbilds »Advanced Systems Engineering« im Laufe der folgenden Jahre widmen. Zur Umsetzung des Leitbilds müssen die Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft gemeinschaftlich an einer ganzheitlichen und zukunftsorientierten Engineering-Strategie für Deutschland arbeiten. ●

7 Anhang

7.1 Begleitforschung AdWiSE

Megatrends wie Digitalisierung, Nachhaltigkeit und Resilienz prägen die Wertschöpfung von morgen. Die Wirtschaft steht vor der Herausforderung, die Entstehung digitalisierter Marktleistungen zukunftsorientiert zu organisieren. Damit dies gelingt, bedarf es neuer, innovativer Methoden und Werkzeuge für den Entwurf komplexer technischer Systeme. Aus diesem Grund hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung Anfang 2019 eine Bekanntmachung veröffentlicht, in dessen Rahmen verschiedene Verbundprojekten Lösungen im Rahmen des Advanced Systems Engineering (ASE) entwickeln. Der strategische und nachhaltige Erfolg der Verbundprojekte wird durch das wissenschaftliche Begleitprojekt »Wissenschaftliches Projekt »Vernetzung der Akteure zur disziplinübergreifenden Entwicklung komplexer vernetzter soziotechnischer Systeme für die Wertschöpfung von morgen (Advanced Systems Engineering)« (AdWiSE) unterstützt. Das Projektkonsortium von AdWiSE umfasst die acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, das IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie die Fraunhofer-Institute für Arbeitswissenschaft und Organisation (IAO), für Entwurfstechnik Mechatronik (IEM) und für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK).

Übergeordnetes Ziel von AdWiSE ist die wissenschaftliche Vorbereitung, Begleitung, Nachbereitung und Verstetigung der ASE-Verbundprojekte. Zudem erfolgt die wissenschaftliche Analyse und zukunftsorientierte Aufbereitung der Entwicklungen im geförderten Themenfeld Advanced Systems Engineering sowie weiterer inhaltlich relevanter FuE-Aktivitäten. Weiterhin dient das Projekt der Begleitung der geförderten ASE-Verbundprojekte in der Fördermaßnahme im Sinne einer effektiven und innovativen Unterstützungsleistung bei deren Vernetzung, Synergieverstärkung, Außendarstellung und bei der Ressourcenbündelung in Transfer und Nachbereitung von Ergebnissen.

Die Begleitforschung AdWiSE gliedert sich in der Projektlaufzeit von Juni 2019 bis Dezember 2023 in drei Handlungsstränge:

Handlungsstrang I

Wissenschaftliche Vorbereitung und Benchmark

Die wissenschaftliche Vorbereitung umfasst eine systematische Aufbereitung des Themenfeldes Advanced Systems Engineering, eine Erhebung des Ist-Standes in der Wissenschaft und Wirtschaft, einen internationalen Benchmark und mündet in der Erarbeitung einer ASE-Strategie sowie einer Roadmap 2035 inklusive Handlungsempfehlungen. Ebenfalls wird ein Transferkonzept erarbeitet, welches in den anschließenden Handlungssträngen operationalisiert wird. ➤

Handlungsstrang II

Wissenschaftliche Begleitung

Im zweiten Handlungsstrang erfolgt die kontinuierliche interne und externe Verwertung der Ergebnisse der ASE-Verbundprojekte. Die kontinuierliche Zusammenarbeit und der Ergebnisaustausch mit und zwischen den Verbundprojekten erfolgt dabei in Gruppen mit unterschiedlichem inhaltlichem Fokus, sodass Handlungsempfehlungen problem- und zielgruppenspezifisch entwickelt werden können. Zur externen Verwertung erfolgen die Umsetzung des Transferkonzeptes, die strukturierte Ergebnisaufbereitung sowie die fokussierte als auch öffentlichkeitswirksame Kommunikation von Themen und Inhalten in unterschiedlichen Formaten.

Handlungsstrang III

Wissenschaftliche Nachbereitung,
Verstetigung und Verwertung

Nach Abschluss der ASE-Verbundprojekte erfolgt die wissenschaftliche Nachbereitung und Verstetigung der Gesamtergebnisse. Hierzu werden beispielsweise Projektkonsortien in Gremien überführt, ein Konzept zur Bündelung der Transferformate erstellt sowie eine Aktualisierung des Zielbildes und der Strategie umgesetzt. ●

7.2 Abkürzungsverzeichnis

acatech	Akademie der deutschen Technikwissenschaften
AE	Advanced Engineering
AS	Advanced Systems
ASE	Advanced Systems Engineering
ASPICE	Automotive Software Process Improvement and Capability dEtermination
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer-Aided Design
CPS	Cyber-physische Systeme
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
GfSE	Gesellschaft für Systems Engineering
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
INCOSE	International Council on Systems Engineering
IoT	Internet der Dinge
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MBE	Model-Based Engineering
MBSE	Model-Based Systems Engineering
OEM	Original Equipment Manufacturer
PDM	Produktdatenmanagement
PGE	Modell der Produktgenerationsentwicklung
PLM	Produktlebenszyklusmanagement
PMTIO	Prozesse, Methoden, Tools, Informationsstandard, Organisation
PSS	Produkt-Service-System
PTKA	Projekträger Karlsruhe
SysML	Systems Modeling Language
SE	Systems Engineering
SoS	System of Systems
TdSE	Tag des Systems Engineerings
TU9	Verbund von neun technischen Universitäten in Deutschland
UML	Unified Modeling Language
XiL	X-in-the-Loop

7.3 Glossar

Infobox 1	Verständnis »Engineering«	S.
Infobox 2	Autonome Systeme	S.
Infobox 3	Dynamisch vernetzte Systeme	S.
Infobox 4	Interaktive soziotechnische Systeme	S.
Infobox 5	Produkt-Service-Systeme	S.
Infobox 6	Definition Systems Engineering nach INCOSE	S.
Infobox 7	ASPICE	S.
Infobox 8	Komplexität	S.
Infobox 9	Model-Based Engineering	S.
Infobox 10	Systems Modeling Language (SysML)	S.
Infobox 11	Digitale Durchgängigkeit	S.
Infobox 12	Produktdatenmanagement und Produktlebenszyklusmanagement	S.
Infobox 13	Digitaler Zwilling	S.
Infobox 14	Neuronale Netze	S.
Infobox 15	Assistenzsysteme	S.
Infobox 16	GAIA-X	S.
Infobox 17	Agilität im Engineering	S.
Infobox 18	Design Thinking	S.
Infobox 19	Makeathon	S.
Infobox 20	Engineering als soziotechnisches System	S.
Infobox 21	Mentale Modelle	S.
Infobox 22	Rolle	S.
Infobox 23	Systemdenken – ganzheitliche Sicht auf das System	S.
Infobox 24	MINT Nachwuchsbarometer 2020	S.
Infobox 25	Deutschlands Position in Innovationsindizes	S.
Infobox 26	Tag des Systems Engineering (TdSE)	S.
Infobox 27	Studie: The rise of systems engineering in China	S.

7.4 Literaturverzeichnis

- [ABW15]** Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP): Stuttgart, 19. Juni 2015; Hrsg.: H. Binz. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP), 19. Juni 2015, Stuttgart, Fraunhofer Verlag, 2015
- [ACA20]** acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.: Lernende Systeme. Unter: <https://www.plattform-lernende-systeme.de/glossar.html>, 01. Dezember 2020
- [AHM+19]** Albers, A.; Heimicke, J.; Müller, J.; Spadinger, M.: Agility and its features in mechatronic system development: A systematic literature review. In: The International Society for Professional Innovation Management (ISPIM) (Ed.): ISPIM Conference Proceedings, 2019
- [AHS+19]** Albers, A.; Heimicke, J.; Spadinger, M.; Reiss, N.; Breitschuh, J.; Richter, T.; Bursac, N.; Marthaler, F.: A systematic approach to situation-adequate mechatronic system development by ASD – Agile Systems Design. Procedia CIRP, Vol. 84, 2019, p. 1015–1022
- [AHW+18]** Albers, A.; Heimicke, J.; Walter, B.; Basedow, G. N.; Reiß, N.; Heitger, N.; Ott, S.; Bursac, N.: Product Profiles: Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. Procedia CIRP, Vol. 70, 2018, p. 253–258
- [AK20]** acatech; Körber-Stiftung: MINT Nachwuchsbarometer 2020, Hamburg, 2020
- [ARB+16]** Albers, A.; Reiß, N.; Bursac, N.; Breitschuh, J.: 15 years of SPALTEN problem solving methodology in product development. In: Boks, C. (Ed.): Proceedings of NordDesign 2016 – August 10-12, 2016, Trondheim, Norway, 2016, The Design Society, Bristol, United Kingdom
- [ARS+19]** Albers, A.; Rapp, S.; Spadinger, M.; Richter, T.; Birk, C.; Marthaler, F.; Heimicke, J.; Kurtz, V.; Wessels, H.: The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. Karlsruhe, 2019
- [AWR+19]** Asmar, L.; Wortmann, F.; Röltgen, D.; Niewöhner, N.; Kühn, A.; Dumitrescu, R.: Framework for the configuration of an engineering based Makeathon: Proceedings of ISPIM Innovation Conference, 2019, The International Society for Professional Innovation Management (ISPIM), Ottawa, 2019

- [AYM18]** Aini Najwa Azmi; Y. Kamin; M. Noordin: Competencies of Engineering Graduates: What are the Employer's Expectations? undefined, 2018
- [BK13]** Broy, M.; Kuhmann, M.: Projektorganisation und Management im Software Engineering. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013 – ISBN 9783642292903
- [BUN16]** Deutschland 2030 – Zukunftsperspektiven der Wertschöpfung. BDI – Bundesverband der Deutschen Industrie e.V, Nr. 458, Berlin, 2016 – ISBN 978-3-00-036796-0
- [BUN20]** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): GAIA-X. Unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/gaia-x.html>, 21. Dezember 2020.728Z
- [DBF+17]** Schwerpunkt Digitale Transformation. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V, Vol. 2017, Berlin, 2017 – ISBN 978-3-942044-86-8
- [DEU18]** Advanced Systems Engineering – Eine Leitlinie zur Stärkung der Innovationskraft (Stand: 02. März 2018), 2018
- [DFH+19]** Dorst, W.; Falk, S.; Hoffmann, M. W.; Lehmann-Brauns, S.; Löwen, U.; Plass, C.; Polenz, C.; Posselt, T.; Ripperda, C.; Schmidt, F.: ERGEBNISPAPIER – Digitale Geschäftsmodelle für die Industrie 4.0, Berlin, 2019
- [DGS+18]** Dumitrescu, R.; Gausemeier, J.; Slusallek, P.; Cieslik, S.; Demme, G.; Falkowski, T.; Hoffmann, H.; Kadner, S.; Reinhart, F.; Westermann, T.; others: Studie »Autonome Systeme«, Berlin, 2018
- [DJG12]** Dumitrescu, R.; Jürgehake, C.; Gausemeier, J.: Intelligent Technical Systems OstWestfalenLippe: 1st Joint International Symposium on System-Integrated Intelligence 2012, Hannover, 2012
- [DOR15]** Dorst, W.: Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0. Bitkom Research GmbH, 2015
- [EHM+07]** Erpenbeck, J.; Heyse, V.; Meynhardt, T.; Weinberg, J.: Die Kompetenzbiographie – Wege der Kompetenzentwicklung. Waxmann, Münster, 2., aktualisierte und überarb. Aufl., 2007 – ISBN 3830918089
- [FMS14]** Friedenthal, S.; Moore, A.; Steiner, R.: A Practical Guide to SysML – The Systems Modeling Language. Morgan Kaufmann, 2014 – ISBN 9780128008003

- [FSF+20]** Frietsch, R.; Schubert, T.; Feidenheimer, A.; Rammer, C.: Innovationsindikator 2020, Berlin, 2020
- [GDE+18]** Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Echterfeld, J.; Pfänder, T.; Steffen, D.; Thielemann, F.: Innovationen für die Märkte von morgen – Strategische Planung von Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen. Hanser, München, 2018 – ISBN 978-3-446-42824-9
- [GDS13]** Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Steffen, D.: Systems Engineering in der industriellen Praxis, 2013
- [GWS+19-OL]** Geissbauer, Reinhard; Wunderlin, Jens; Schrauf, Stefan; Krause, Jens Henning; Morr, Jochen-Thomas; Odenkirchen, Andreas: Industrie 4.0: Digitale Produktentwicklung verschafft Industrieunternehmen klare Wettbewerbsvorteile. Unter: <https://www.pwc.de/de/pressemitteilungen/2019/industrie-4-0-digitale-produktentwicklung-verschafft-industrieunternehmen-klare-wettbewerbsvorteile.html>, 15. Juli 2020
- [HOF18]** Arbeit 4.0 – Digitalisierung, IT und Arbeit – IT als Treiber der digitalen Transformation
- [HK07]** Hartig, J.; Klieme, E.: Möglichkeiten und Voraussetzungen technologiebasierter Kompetenzdiagnostik: Eine Expertise im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. BMBF, Referat Öffentlichkeitsarbeit, 2007
- [HNI21]** Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn: Whitepaper Künstliche Intelligenz in der Produktentstehung. Unter: https://ki-marktplatz.com/wp-content/uploads/2021/02/KI-MP_Whitepaper.pdf, 27. März 2021
- [HWF+12]** Haberfellner, R.; Weck, O. de; Fricke, E.; Vössner, S.: Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung. 12. Auflage. Zürich: Orell Füssli, 2012, p. 978-3280040683
- [INT20]** International Council on Systems Engineering: Systems Engineering – Definition. Unter: <https://www.incose.org/systems-engineering>, 22. Dezember 2020.073Z
- [15504]** ISO/IEC 15504-5:2012, 2012

- [JL20]** Jamrisko, Michelle; Lu, Wei: Bloomberg Innovation Index – Germany Breaks Korea's Six-Year Streak as Most Innovative Nation. Unter: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-01-18/germany-breaks-korea-s-six-year-streak-as-most-innovative-nation>, 01. Dezember 2020
- [KAU06]** Kauffeld, S.: Kompetenzen messen, bewerten, entwickeln – Ein prozessanalytischer Ansatz für Gruppen. Schäffer-Poeschel Verlag, Neue Folge, Band 128, Stuttgart, 2006 – ISBN 3791025082
- [KRH+15]** Kagermann, H.; Riemensperger, F.; Hoke, D.; Schuh, G.; Scheer, A. W.; Spath, D.; Leukert, B.; Wahlster, W.; Rohleder, B.; Schweer, D.: Smart Service Welt. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft (Abschlussbericht), 2015
- [KUR14]** Kurrer, K.-E.: Technikwissenschaften. Erkennen-Gestalten-Verantworten. Von acatech (Hrsg.). Stahlbau, Vol. 83, Iss. 5, 2014, p. 361–362
- [MCK17-OL]** McKinsey & Company: Smartening up with Artificial Intelligence (AI) – What's in it for Germany and its Industrial Sector. Unter: [https://www.mckinsey.de/~media/McKinsey/Locations/Europe%](https://www.mckinsey.de/~media/McKinsey/Locations/Europe%2015), 15. Juli 2020
- [MCS+15]** McChrystal, S. A.; Collins, T.; Silverman, D.; Fussell, C.: Team of teams – New rules of engagement for a complex world. Portfolio/Penguin, New York, NY, 2015 – ISBN 1591847486
- [MEB08]** Meboldt, M.: Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM). Mental and formal modelling, a contribution to the integrated product development model (iPeM). Karlsruhe, 2008
- [MOS03]** Moser, K. S.: Mentale Modelle und ihre Bedeutung. Schriften zur Symbolforschung, Schriftenreihe der Schweizerischen Gesellschaft für Symbolforschung, Vol. 13, 2003, p. 181–205
- [MS14]** Integrated engineering of products and services – Layer-based development methodology for product-service systems
- [NM19]** Ney, S.; Meinel, C.: Putting Design Thinking to Work – How Large Organizations Can Embrace Messy Institutions to Tackle Wicked Problems, 1st ed. 2019, 2019 – ISBN 9783030196080

- [OBE19]** Obermaier, R.: Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation – Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen, 1st ed. 2019, 2019 – ISBN 978-3-658-24576-4
- [PB96]** Pawlowsky, P.; Bäumer, J.: Betriebliche Weiterbildung – Management von Qualifikation und Wissen. Beck, Vol. 6, München, 1996 – ISBN 978-3-406-40043-8
- [PH14]** Porter, M. E.; Heppelmann, J. E.: How smart, connected products are transforming competition. Harvard business review, Vol. 92, Iss. 11, 2014, p. 64–88
- [PILO7]** Piller, F. T.: Mass Customization. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2007 – ISBN 978-3-8350-9204-4
- [PLA18]** Plattform Industrie 4.0: Die Verwaltungsschale im Detail – von der Idee zum implementierbaren Konzept. Unter: https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/verwaltungsschale-im-detail-pr%C3%A4sentation.pdf?__blob=publicationFile&v=13, 01. Dezember 2020
- [RBD+17]** Rammer, C.; Berger, M.; Doherr, T.; Hud, M.; Hünermund, P.; Iferd, Y.; Peters, B.; Schubert, T.: Innovationsverhalten der deutschen Wirtschaft – Indikatorenbericht zur Innovationserhebung 2016, 2017
- [RLS18]** Riedelsheimer, T.; Lindow, K.; Stark, R.: Feedback to Design with Digital Lifecycle-Twins – literature review and concept presentation: Design for X, Institut für Technische Produktentwicklung, Universität der Bundeswehr München
- [RMW18]** Redlich, T.; Moritz, M.; Wulfsberg, J. P.: Interdisziplinäre Perspektiven zur Zukunft der Wertschöpfung, 2018
- [ROG03]** Rogers, E. M.: Diffusion of innovations. Free Press, New York, London, Toronto, Sydney, Fifth edition, Free Press trade paperback edition, 2003 – ISBN 978-0743222099
- [ROPO9]** Ropohl, G.: Allgemeine Technologie : eine Systemtheorie der Technik. KIT Scientific Publishing, s.l., 2009 – ISBN 9783866443747
- [SBA+14]** Sünnetcioglu, A.; Brandenburg, E.; Auricht, M.; Stark, R.: Durchgängiger Traceability-Prozess im Systems Engineering. Tag des Systems Engineering, 2014, p. 133

[SBG+13] Spath, Dieter; Bauer, Wilhelm; Ganz, Walter: Arbeit der Zukunft – Wie wir sie verändern. Wie sie uns verändert.
Unter: <https://www.iao.fraunhofer.de/images/iao-news/arbeit-der-zukunft-studie.pdf>, 27. März 2019

[SBM+13] Stark, R.; Bedenbender, H.; Müller, P.; Pasch, F.; Drewinski, R.; Hayka, H.: Kollaborative Produktentwicklung und digitale Werkzeuge – Defizite heute – Potenziale morgen; eine Studie der Contact Software GmbH, des Fraunhofer IPK und des VDI, 2013

[SCH13] Schumpeter, J. A.: Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung – Eine Untersuchung über Unternehmervergewinn, Kapital, Kredit, Zins und den Konjunkturzyklus. Duncker & Humblot, Berlin, 9. Aufl., 2013 – ISBN 3-428-07725-3

[SD19] Stark, R.; Damerau, T.: Digital Twin. In: Chatti, S.; Tolio, T. (Eds.): CIRP Encyclopedia of Production Engineering, 2019, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

[SHE96] Sheard, S. A.: Twelve systems engineering roles: INCOSE International Symposium, 1996

[SJ20] Schmidt, S.; Janzon, M.: Der Organisations-Shift – Evolution und Transformation Ihres Unternehmens, 1. Auflage, 2020 – ISBN 9783791048024

[SS11] Schwaber, K.; Sutherland, J.: The scrum guide. Scrum Alliance, Vol. 21, 2011, p. 19

[SSE+14] Sallam, Rita; Steenstrup, Kristian; Eriksen, Leif; Jacobson, Simon: Industrial Analytics Revolutionizes Big Data in the Digital Business. Unter: <https://www.gartner.com/en/documents/2826118/industrial-analytics-revolutionizes-big-data-in-the-digi>, 01. Dezember 2020

[ST14] Schiersmann, C.; Thiel, H.-U.: Organisationsentwicklung – Prinzipien und Strategien von Veränderungsprozessen. Springer VS, Wiesbaden, 4., überarb. und aktualisierte Aufl., 2014 – ISBN 9783658034856

[ULM19] Ulmer, G.: Führen mit Rollenbildern. Springer, 2019

[UP95] Ulrich, H.; Probst, G.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: Ein Brevier für Führungskräfte (4., unveränderte Aufl.). Bern: Haupt, 1995

[WRF+15] Systems engineering handbook – A guide for system life cycle processes and activities ; INCOSE-TP-2003-002-04, 2015

7.5 Bildverzeichnis

Bild 1	Aspekte des Wandels der Wertschöpfung	17
Bild 2	Handlungsfelder des Advanced Systems Engineerings	18
Bild 3	Das Leitbild Advanced Systems Engineering	20
Bild 4	Vorgehen bei der Durchführung der Erhebung des vorliegenden Leistungsstands	26
Bild 5	Untersuchungsfeld und Verteilung der Interviewteilnehmer	27
Bild 6	Trendradar des Engineerings als Resultat der qualitativen Leistungserhebung	28
Bild 7	Die zukünftigen Ausprägungen von Advanced Systems	33
Bild 8	Zusammenwirken von vielen Fachgebieten über den Produktlebenszyklus im Rahmen des Systems Engineerings	41
Bild 9	Tätigkeitsfelder einer PMTIO-Dienstleistungsstelle für das Engineering	43
Bild 10	Systemtypen nach [HWF+12] und [UP95]	46
Bild 11	12 Rollen im Systems Engineering in Anlehnung an [SHE96]	51
Bild 12	Die vier Aspekte der SysML nach [FMS14]	55
Bild 13	Advanced Engineering: etabliertes Engineering mit Kreativität, Agilität und Digitalisierung neu denken	57
Bild 14	PLM-Konzept im Kontext der verschiedenen IT-Systeme über den Lebenszyklus einer Marktleistung	59
Bild 15	Abgrenzung der Digitalen Durchgängigkeit und des Digitalen Zwillings	63
Bild 16	Nutzenpotentiale von KI in der Produktentstehung in Anlehnung an [GWS+19-OL], [MCK17-OL]	66
Bild 17	Ausbaustufen der Informationsverarbeitung nach [SSE+14]	67
Bild 18	Die sechs Phasen des Design Thinkings in Anlehnung an [NM19]	74
Bild 19	Einordnung der Marktleistung und dessen Entstehung in das soziotechnische Gesamtsystem	77
Bild 20	Wandel der etablierten Aufbauorganisation zu einem cross-funktionalen Team aus Teams in Anlehnung an [MCS+15]	79

Bild 21	Kooperation und Kollaboration in Engineering-Vorhaben	80
Bild 22	Kompetenzen im Engineering in Anlehnung an [AYM18]	84
Bild 23	Bestandteile eines Rollenprofils in Anlehnung an [SJ20]	84
Bild 24	Erforderliches Wissen und Kompetenzprofile im Engineering in Anlehnung an [EHM+07] [PB96] [KAU06] [HK07]	86
Bild 25	Deutschland führt die Liste der innovativsten Länder im 5-Jahresvergleich in Anlehnung an [JL20]	93
Bild 26	Methodisches Vorgehen der quantitativen Erhebung des Engineerings im internationalen Vergleich	93
Bild 27	Durchdringung von Systems Engineering in der universitären Lehre der TU9 im Jahr 2019 in absoluten Zahlen sowie bezogen auf die Zahl der Studierenden	95
Bild 28	Überblick über das internationale Lehrangebot im Systems Engineering	98
Bild 29	Entwicklung von Veröffentlichungen, Zitationen und Dissertationen zum Thema Systems Engineering in Deutschland	99
Bild 30	Überblick über die internationale Forschung im Themenfeld Systems Engineering	103
Bild 31	Ausgewählte digitale Technologien im Engineering im internationalen Vergleich	105
Bild 32	Ausgewählte innovative Methoden im Engineering im internationalen Vergleich	106
Bild 33	Erste Ansätze des Advanced Systems Engineerings im internationalen Vergleich	107

7.6 Mitwirkende

Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM



UNTER DER LEITUNG VON
Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu

AUTOREN
Eva-Maria Grote
Rik Rasor
Dr.-Ing. Harald Anacker

IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



UNTER DER LEITUNG VON
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers

AUTOREN
Simon Rapp
Jonas Heimicke
Christoph Kempf
Markus Spadinger

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO



UNTER DER LEITUNG VON
Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel

AUTOREN
Benjamin Schneider
Mehmet Kürümlüoğlu

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK



UNTER DER LEITUNG VON
Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark

AUTOREN
Dr.-Ing. Kai Lindow

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften



UNTER DER LEITUNG VON
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier

AUTOREN
Dr. Steffen Steglich
Dr. Johannes Winter

Wir danken auch den weiteren Mitwirkenden aus den beteiligten Instituten

Anell Bernard (Fraunhofer IEM)
Lukas Bretz (Fraunhofer IEM)
Aschot Kharatyan (Fraunhofer IEM)
William Neufeld (Fraunhofer IEM)
Maurice Meyer (Heinz Nixdorf Institut)
Dr.-Ing. Jonas Reinemann (IPEK)
Marvin Michael Schmidt (Fraunhofer IPK)
Helge Spindler (Fraunhofer IAO)

Herausgeber:**Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu**

Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik
Mechatronik IEM
Zukunftsmeile 1, 33102 Paderborn

Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel

Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft
und Organisation IAO
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier

acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften
Karolinenplatz 4, 80333 München

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

IPEK – Institut für Produktentwicklung am
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Campus Süd
Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin

Koordination: Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu

Redaktion: Rik Rasor; Eva-Maria Grote

Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik
Mechatronik IEM
Zukunftsmeile 1, 33102 Paderborn

Gestaltung und Satz:

NORDSONNE IDENTITY GmbH
Linienstraße 153, 10115 Berlin

Empfohlene Zitierweise:

Dumitrescu, R.; Albers, A.; Riedel, O.; Stark, R.;
Gausemeier, J. (Hrsg.): Engineering in Deutschland –
Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft,
Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering,
Paderborn, 2021

Die Originalfassung der Publikation

ist verfügbar unter:

www.advanced-systems-engineering.de

Alle Rechte vorbehalten. Vervielfältigung und Verbreitung
– auch von Auszügen – nur mit Genehmigung der Redaktion.

© Fraunhofer IEM, Paderborn 2021 | Erscheinungstermin: April 2021

