

Advanced Systems Engineering

Wertschöpfung im Wandel

**Leistungsstand des Engineerings
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

**Leistungsstand des Engineerings
in Wirtschaft und Wissenschaft**

	Vorwort	4
	Extended Executive Summary	5
1	Einleitung	13
2	Advanced Systems Engineering	15
2.1	Wandel der Wertschöpfung	15
2.2	Die drei Handlungsfelder des Advanced Systems Engineerings	18
2.3	Anwendungsszenarien des Advanced Systems Engineerings	21
3	Voruntersuchungen und Zielsetzung	23
4	Leistungsstand des Engineerings in Wissenschaft und Wirtschaft	26
4.1	Megatrends mit Einfluss auf das Engineering	28
4.1.1	Globalisierung im Engineering	28
4.1.2	Digitalisierung im Engineering	29
4.1.3	Nachhaltigkeit im Engineering	31
4.2	Advanced Systems - Marktleistungen von morgen	33
4.2.1	Perspektiven für Advanced Systems	33
4.2.2	Herausforderungen bei der Gestaltung von Advanced Systems	37
4.3	Systems Engineering - Komplexität managen	41
4.3.1	Verständnis von Systems Engineering	42
4.3.2	Mehrwert des Systems Engineerings	44
4.3.3	Leistungsstand des Systems Engineerings in der Wirtschaft	47
4.3.4	Einführung von Systems Engineering	48
4.3.5	Rollen im Systems Engineering	51
4.3.6	Model-Based Systems Engineering	53

4.4	Advanced Engineering – Engineering neu denken	57
4.4.1	Digitale Technologien im Engineering	57
4.4.1.1	Digitale Durchgängigkeit und Produktlebenszyklusmanagement	58
4.4.1.2	Digitale Zwillinge und Betriebsdatennutzung im Engineering	62
4.4.1.3	Künstliche Intelligenz und Assistenzsysteme	65
4.4.2	Innovative Methoden im Engineering	69
4.4.2.1	Agilität im Engineering	70
4.4.2.2	Kreativitätsmanagement im Engineering	73
4.4.2.3	Produktgenerationsentwicklung	75
4.5	Auswirkungen von Advanced Systems Engineering auf die Organisation und den Menschen im soziotechnischen Gesamtsystem	77
4.5.1	Organisation im Wandel	78
4.5.1.1	Wandel der Organisationsstruktur und -kultur	78
4.5.1.2	Kollaboration im Engineering	80
4.5.1.3	Kooperation zwischen Wirtschaft und Wissenschaft	82
4.5.2	Der Mensch im Engineering	83
4.5.2.1	Rollen im Entstehungsprozess	84
4.5.2.2	Erforderliche Kompetenzen im Engineering	85
4.5.2.3	Bildungswege im Engineering	87

5

	Engineering im internationalen Vergleich	92
5.1	Systems Engineering	93
5.1.1	Systems Engineering in der Lehre	94
5.1.2	Systems Engineering in der Forschung	99
5.2	Advanced Engineering	104
5.2.1	Digitale Technologien im Engineering: Künstliche Intelligenz, Digitaler Zwilling und Produktlebenszyklusmanagement im Engineering	105
5.2.2	Innovative Methoden im Engineering: Kreativität und Agilität im Engineering	105
5.3	Erste Ansätze des Advanced Systems Engineerings	107

6

	Resümee und Ausblick	109
--	-----------------------------	-----

7

	Anhang	111
7.1	Begleitforschung AdWiSE	111
7.2	Abkürzungsverzeichnis	112
7.3	Glossar	113
7.4	Literaturverzeichnis (Arbeitsstand: 23.12.2020)	114
7.5	Bildverzeichnis	118
7.6	Mitwirkende	119

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 Leistungsstand von Systems Engineering 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: 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.

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.

Systems Engineering

Komplexität managen

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.

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 soziotechnischen Systemen und der verbundenen Prozesse ist und die Leistungsfähigkeit der Marktleistungsentstehung steigert. ➤

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.

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 sind 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.

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 berufs begleitende 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.

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.

Advanced Engineering Engineering neu denken

Digitale Durchgängigkeit und Produktlebenszyklusmanagement (PLM): Durch die Verbreitung der Konzepte Produktlebenszyklusmanagement, Virtualisierung der Produktentstehung und jüngst MBSE ist eine Vielfalt an IT-Tools und Datenbanken 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 entgegen gewirkt 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.

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 Zwillinge 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.

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 Persön-

lichkeitsrechte bei Systemen, welche Daten der Mitarbeiter oder Nutzer verarbeiten.

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.

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. >

Produktgenerationsentwicklung (PGE): Die Innovationswirklichkeit wird in den meisten Unternehmen durch ein Denken und Handeln in Produktgenerationen geprägt. Dies fördert eine hohe 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 Advanced Systems Engineering auf die Organisation und den Menschen im soziotechnischen Gesamtsystem

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 tiefgreifende 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.

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.

Kooperation von Wirtschaft und Wissenschaft: Aus der Interaktion und Zusammenarbeit von Unternehmen mit Hochschulinstituten resultieren häufig Innovationen. Dabei kommt es darauf an, unternehmerische Ziele mit volkswirtschaftlichen und wissenschaftlichen Zielen in Einklang zu bringen.

Die Befragten schätzen die Zusammenarbeit aus Wirtschaft und Wissenschaft und erwarten eine zunehmende Relevanz der Kollaboration. Vor dem Hintergrund erfolgreicher Beispiele für eine Zusammenarbeit besteht vereinzelt 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: 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 Qualifizierungsplanung im Entwicklungsgeschehen entsprechend angepasst werden. >

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.

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.

Engineering im internationalen Vergleich

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.

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.

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. ●

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 Leistungsstand 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 Leistungsstand 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 Leistungsstands im Engineering. Die verschiedenen Voruntersuchungen zeigen dabei den Forschungsbedarf auf.

Kapitel 4 stellt die Befunde der durchgeführten qualitativen Erhebung dar, in welcher der Leistungsstand 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 Leistungsstand 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).

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.

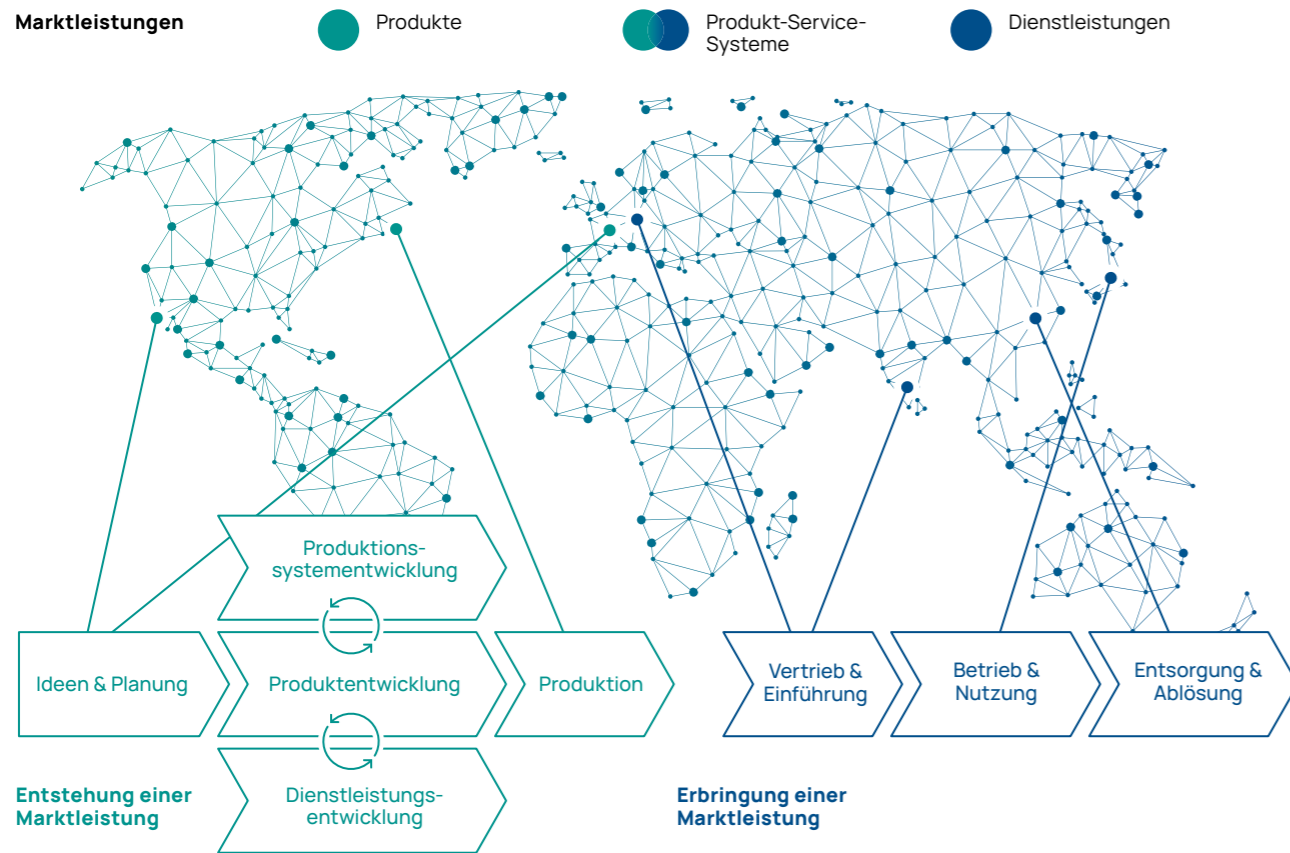


Bild 1: Aspekte des Wandels der Wertschöpfung

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 [9]. 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. [8]. 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 Leistungsstand und die sich abzeichnenden Trends des Engineerings im Rahmen dieses Leistungsstands 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. ●

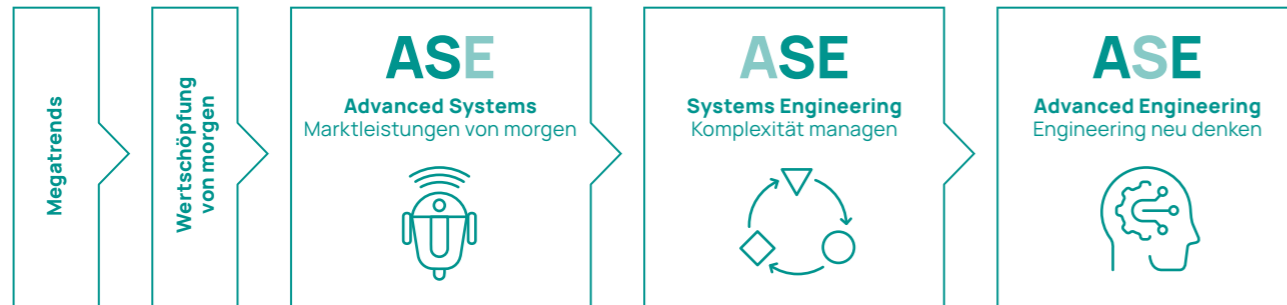


Bild 2: Handlungsfelder des Advanced Systems Engineerings

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 spezifische 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 sukzessive 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

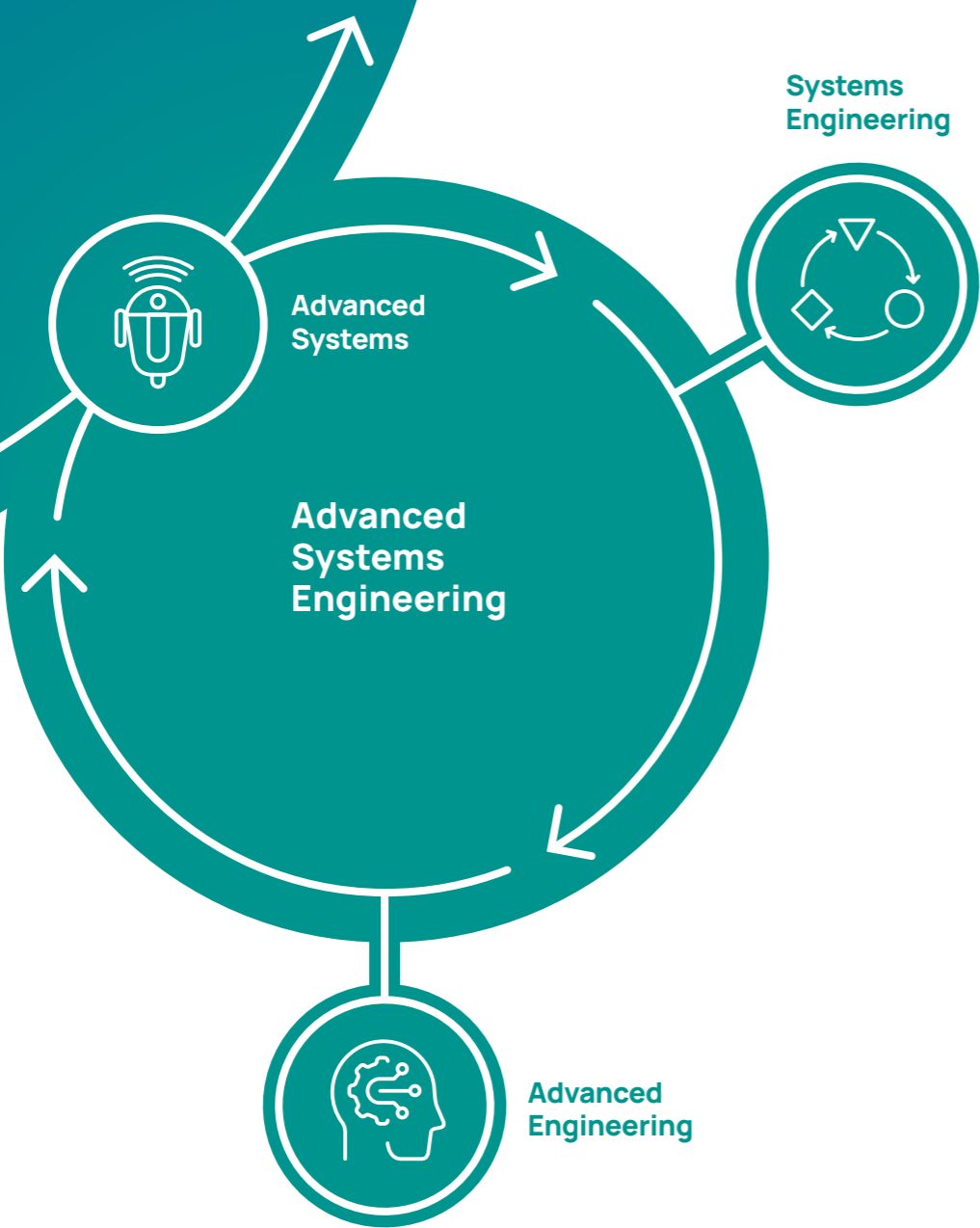
machen Gebrauch von aktuellen Erkenntnissen in und zwischen den ingenieur- und wirtschaftswissenschaftlichen sowie informationstechnologischen Disziplinen. Diese grundlegenden Veränderungen im Engineering werden unter dem Begriff Advanced Engineering zusammengefasst. Advanced Engineering berücksichtigt 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 Standorte,


Wertschöpfung von morgen als sozio-technisches Gesamtsystem



Advanced Engineering

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

Advanced Systems

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

Systems Engineering

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

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 (vgl. Bild 3). 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.

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 sozio-technischen Gesamtsystems adressiert. ●