Definition eines Kompetenzmodells für nachhaltiges Engineering im Advanced Systems Engineering

Nils Weiher [1], Rushi Kalamkar [2], Theresa Riedelsheimer [3], Marvin Manoury [4], Kai Lindow [5], Volker Franco Steier [6]

[1] Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK), nils.weiher@ipk.fraunhofer.de
[2] Fraunhofer IPK, rushi.kalamkar@ipk.fraunhofer.de
[3] Fraunhofer IPK, theresa.riedelsheimer@ipk.fraunhofer.de
[4] Fraunhofer IPK, marvin.michael.manoury@ipk.fraunhofer.de
[5] Fraunhofer IPK, kai.lindow@ipk.fraunhofer.de
[6] OSYPKA AG, volker.steier@osypka.de

Track (Industriebeitrag/Wissenschaftlicher Beitrag): *Nachhaltigkeit und Anpassungsfähigkeit*

Keywords: *Advanced Systems Engineering (ASE), Sustainable Engineering, Digital Engineering, competence models*

Abstract: Advanced Systems Engineering (ASE) ist ein neuartiger Ansatz zur Integration digitaler Prozesse im Engineering auf Basis interdisziplinärer und modellbasierter Entwicklung. Im Rahmen des Projekts AdWiSE werden die Auswirkungen von Advanced Systems auf kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) aus der Perspektive von Industrie und Wissenschaft in einer Reihe von Verbundprojekten erforscht. Als eines der Ergebnisse präsentiert diese Studie ein Template für ASE-Kompetenzmodelle und definiert erste Kompetenzen, die für die Umsetzung von ASE in KMU - unter Einbeziehung von Nachhaltigkeitsaspekten - erforderlich sind. Schwerpunkt dieses Beitrags ist die methodische Beschreibung des wissenschaftlichen Forschungsansatzes für die Modellentwicklung.

1. Einleitung

Mit dem Fortschreiten der Digitalisierung und der künstlichen Intelligenz (KI) stehen Unternehmen vor neuen Hürden im Innovationswettbewerb. Mit neuen Produkten entstehen komplexe vernetzte Systeme mit entsprechenden Dienstleistungen. Viele Unternehmen werden daher ihre Produktentwicklungsstrategien an diese Entwicklungen anpassen müssen (vgl. Leistungsstanderhebung [1] zur aktuellen Situation in Wirtschaft und Wissenschaft). Der neuartige Ansatz des Advanced Systems Engineering (ASE) soll bei diesen Herausforderungen unterstützen. Nach Dumitrescu et al. [1] zeichnet sich ASE durch einen interdisziplinären und modellbasierten Entwicklungsansatz aus, der den gesamten Innovationszyklus abdeckt, von der Marktanalyse bis zur praktischen Umsetzung. Er beinhaltet modernste Engineering-Prozesse mit einem deutlichen Schwerpunkt auf KI und funktioniert als systemischer, modularer Rahmen, der drei Hauptstandpunkte umfasst:

- **Advanced Systems (AS)** – intelligent vernetzte Produkte, Dienstleistungen und Produktionssysteme als autonome Einheiten, dynamisch verbundene Konfigurationen oder interaktive soziotechnische Systeme und Kombinationen dieser;
- **Systems Engineering (SE)** – die Verschmelzung von Systemdesign und Projektmanagement durch modellbasierten Entwurf und Optimierung von Systemen über den gesamten Lebenszyklus; und
- **Advanced Engineering (AE)** – im Kontext der Digitalisierung die Einführung neuer Arbeitsmethoden, die auf Kreativität und Agilität beruhen.

Mit diesen hochdynamischen Systemen werden neue Wertschöpfungsbereiche erschlossen, die komplexe Informationsflüsse managen und nutzen. Die Komplexität wird durch Anforderungen der Nachhaltigkeit, im Rahmen der Sustainable Development Goals (SDG) [2], zusätzlich erhöht. Die Einhaltung bestehender und Vorbereitung auf kommende Regularien ist für Organisationen daher zentral bei der Gestaltung künftiger Systeme.

Die vorliegende Studie präsentiert den aktuellen Stand der Entwicklung von ASE Kompetenzmodellen im Rahmen des Forschungsprojekts AdWiSE [3]. Schwerpunkt der Studie ist die Beschreibung der methodischen Ansätze zur Definition der Modelle sowie ein exemplarischer Anwendungsfall eines Medizinunternehmens. In einem begleitenden Whitepaper [4] werden die Kompetenzmodelle und die einzelnen Kompetenzen ausführlich diskutiert sowie eine Guideline für die Implementierung in KMUs bereitgestellt.

2. Aktueller Stand der Technik: ASE und Nachhaltigkeit

Laut Heinz et al. [5] stehen insbesondere KMU bei der Einführung von ASE in Unternehmen vor vier großen Herausforderungen: Der Mangel an Daten und analytischen Fähigkeiten, die Eintrittsbarrieren neuer Geschäftsfelder, das Navigieren in einem komplexen regulatorischen Umfeld und die zunehmende Komplexität der Systeme. Die Reaktion auf diese Herausforderungen erfordert eine kontinuierliche Anpassung der Strukturen und Strategien der Unternehmen bzw. eine Erweiterung ihrer Kompetenzen.

Digitales Engineering steht im Mittelpunkt von ASE. Nach Eigner [6] kann SysLM (System Lifecycle Management) als "Engineering Backbone" Daten und Prozesse über den gesamten Produktlebenszyklus integrieren. Stark [7] analysiert die Auswirkungen der Digitalisierung auf das Engineering innerhalb des Konzepts VPE (Virtuelle Produktentstehung). VPE als integrative Produktionsumgebung umfasst verschiedene Konzepte im Zusammenhang mit Digital Engineering und Industrie 4.0, wie DZ. Nach Stark [7] sollte Model-Based Systems Engineering (MBSE) für den Entwurf komplexer dynamischer und miteinander verbundener Systemmodelle eingesetzt werden, da auf diesem Wege Rückverfolgbarkeit und Interoperabilität entlang des gesamten Produktlebenszyklus etabliert werden.

Die Einbeziehung von Regularien und Anforderungen in Bezug auf die Nachhaltigkeit stellen zusätzliche Herausforderungen für KMU dar. Die meisten Vorschriften befinden sich zudem in der Entwicklung, womit künftige Compliance Themen noch unklar sind. Schneider et al. [8] identifizieren im Umfeld von Industrie 4.0 die Entwicklung nachhaltiger Produkte und

die Gestaltung einer nachhaltigen Organisation als zentrale Herausforderung. Bis zu 80% der Eigenschaften eines Produkts und damit des ökologischen Fußabdrucks werden bereits in der Entwicklungsphase festgelegt [8]. Mit der Verabschiedung der SDGs und dem Green Deal der Europäischen Union [9] sind Organisationen stärker in den Fokus gerückt und geraten unter Druck bis 2050 Nettoklimaneutralität zu erreichen. Die Ökodesign-Verordnung [10] der Europäischen Kommission stellt weitere Anforderungen an Reparierbarkeit, Haltbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Nachrüstbarkeit von Produkten. Die Ökodesign-Verordnung umfasst auch Kriterien wie Energieeffizienz, Ressourceneffizienz, Recyclinganteil, CO_2-Fußabdruck, Umweltfußabdruck, Informationspflichten und Digitale Produktpässe. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren verspricht ASE, Unternehmen mit einem robusten Datenmanagement bei der Bewältigung der Herausforderungen durch die Bereitstellung digitaler, modellbasierter fortschrittlicher Systeme zu unterstützen.

3. Forschungsansatz

Die Forschung für die vorgestellten Ergebnisse zum ASE-Kompetenzmodell erstreckte sich über einen Zeitraum von gut zwei Jahren (2022-2024). Zunächst wurde eine explorative Literaturrecherche (1) zu Kompetenzen und Rollen in der Organisationsstruktur durchgeführt. Die vorhandenen Konzepte wurden zu einem anwendbaren Kompetenzmodell konsolidiert (2), wobei ASE-Expert:innen in die Entwicklung des Kompetenzmodells einbezogen wurden (3). Schließlich wurden die ASE-Kompetenzen in einem Use Case aus den AdWiSE-Verbundprojekten verifiziert (4).

1) Die *explorative Literaturrecherche* basiert auf der vorangehenden Forschung zu Rollen und Kompetenzen im ASE, wie im Stand der Technik zusammengefasst. Die theoretische Forschung wurde erweitert, um bestehende Rollen- und Kompetenzmodelle im ASE zu untersuchen. Die Auswahl der Paper (n=9) wurde hinsichtlich ihrer Definitionen von Rollen und Kompetenzen, der Anzahl der identifizierten Rollen und Kompetenzen sowie der vorgeschlagenen Rollen- oder Kompetenzmodelle analysiert.

2) Im *Konsolidierungsprozess* wurden die innerhalb der ASE-Community als relevant identifizierten Rollen mit den erforderlichen Kompetenzen abgeglichen, was zu einer Bündelung der für KMU relevanten Kompetenzen in drei Bereiche führte.

3) Die *Entwicklung des Kompetenzmodells* erfolgte als kollaborativer Prozess mit den Verbundprojekten von AdWiSE (CyberTech, Amelie, DiProLeA, ConSensE, CAM2030, MoSyS, FuPEP, RePaSE, bi.smart [11]). In der Arbeitsgruppe "Bildung und Kompetenzen", wurden mehrere Workshops, Expert:innen-Interviews und Feedback-Befragungen organisiert, um praktische Einblicke zu gewinnen, ihr Fachwissen zu integrieren und Feedback zu sammeln. In der Arbeitsgruppe "Nachhaltigkeit" wurden die Grundlagen für das erweiterte Kompetenzmodell entwickelt, das Nachhaltigkeitsaspekte integriert und die 6 Kompetenzen um eine Kompetenz für "Nachhaltigkeitsmanagement" ergänzt.

4) Abschließend wurde in einem exemplarischen Anwendungsfall aus dem Projekt AdWiSE eine *Validierung und Verifizierung* des ASE-Kompetenzmodells durchgeführt,

um die Konsistenz der Definitionen zu überprüfen und mit den tatsächlichen Rollen zu vergleichen.

4. Ergebnisse: ASE im Kontext der Nachhaltigkeit

4.1. Rollen und Kompetenzen im ASE

Zur Bewertung der Kompetenzanalyse wurden die folgenden Studien (n=9) im Detail analysiert: [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20].

Von den 9 betrachteten Arbeiten identifizieren 2 spezifische Rollen im ASE: Gräßler et al. [12] nennen 66 semantisch unterschiedliche Rollen als benutzungsneutrale Beschreibung einer Funktion, Aufgabe oder Aktivität aus einer Liste von 213 Rollen für Systems Engineering, Enterprise Management und Projektmanagement. Gräßer et al. [13] definieren nachfolgend 15 verschiedene Rollen als spezifische Verantwortlichkeiten innerhalb eines SE-Rollenmodells, wobei ein Systems Engineer mehrere Rollen haben und eine Rolle von verschiedenen Personen ausgefüllt werden kann.

Von den 9 betrachteten Arbeiten identifizieren 5 spezifische Kompetenzen. Kauffeld [16] nennt 12 Kompetenzaspekte, die in Fach-, Methoden-, Sozial- und Selbstkompetenz unterteilt sind. Müller-Frommeyer et al. [18] nennen 12 Schlüsselkompetenzen (Wissen, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Fertigkeiten), die in Fach-, Methoden-, Sozial- und Selbstkompetenz unterteilt sind. Gräßler et al. [12] ordnen die identifizierten Rollen 23 Schlüsselaktivitäten (Kompetenzen: Wissen und Fähigkeiten) zu, die vom International Council On Systems Engineering (INCOSE) [21] definiert werden und das Rollenmodell für Systems Engineering Application (RM-SEA) erweitern. Paulsen et al. [19] nennen 7 Schlüsselkompetenzen, die im Kontext von Industrie 4.0 und virtueller Inbetriebnahme relevant sind: Koordination von Arbeitsabläufen, autonome Entscheidungsfindung, Kommunikation, Selbstmanagement, Fähigkeit zur technischen Nutzung von Medien, strukturiertes Arbeiten und Interesse an Veränderungen. Impertro et al. [15] nennen 30 Kompetenzbereiche als Fähigkeit und Bereitschaft des Einzelnen, fachliche, persönliche, soziale und methodische Fähigkeiten und Fertigkeiten zur Problemlösung in variablen Situationen einzusetzen und skizzieren vier Kompetenzdimensionen: Selbst-, Fach-, Methoden- und Sozialkompetenz.

In Bezug auf das vorgeschlagene Rollen- und Kompetenzmodell schlagen Grote et al. [14] die Nutzung der RACI-Matrix (Responsible, Accountable, Consulted, Informed) für die Entwicklung und Zuweisung dieser Rollenprofile vor. Rollenmodelle sollten dabei Gruppen von unternehmensspezifischen Rollenprofilen mit klaren Aufgaben, Kompetenzen, Verantwortlichkeiten und Befugnissen umfassen. Gräßler et al. [12] stellen ein Rollenmodell als Anleitung für die praktische Anwendung von MBSE vor. Die dreistufige Methodik umfasst 1) die Identifizierung von Rollen, 2) die Kategorisierung und Clusterung zu MBSE-Schlüsselaktivitäten und 3) die Implementierung auf der Grundlage der Assoziation von Personas. In einer weiteren Studie stellen Gräßler et al. [13] einen Ansatz vor, um Verantwortlichkeiten für Systems Engineering Artefakte (Prozesse mit Inputs und Outputs) bestimmten Rollen zuzuordnen. Der Beitrag schlägt ebenfalls die Verwendung des RACI-Schemas vor, die zu einer Empfehlung für die optimale Teamzusammensetzung (technisches

Management, Architektur, Projektmanagement, Spezialistenteams) unter Verwendung einer Clusteranalyse und einer Verantwortungszuweisungsmatrix führt, validiert an einem Anwendungsfall in der Automobilindustrie. Kauffeld [17] schlägt ein Kompetenz-Reflexions-Inventar (KRI) vor, um die selbstberichtete berufliche Kompetenz in vier Schlüsselbereichen zu messen: fachlich, methodisch, sozial und persönlich. Impertro et al. [15] schlagen ein Kompetenzportfolio für zukünftige ASE Führungskräfte vor. Die 30 Kompetenzen (siehe oben) sind weiter unterteilt nach Relevanz für Führungskräfte, speziell für ASE und für die Umsetzung neuer Arbeitskonzepte.

In der Literatur werden folgende Kompetenzframeworks und -modelle referenziert: INCOSE [21], NASA [22], und MITRE [23]. In dieser Arbeit wird ein Kompetenzmodell als Kombination aus relevanten Kompetenzkategorien und deren Ausprägungsgrad definiert.

4.2. Konsolidierung der ASE Kompetenzen

Die Leistungsstanderhebung [1] verwendet die 12 von Sheard [24] identifizierten Rollen im SE-Umfeld als Grundlage. Hutchison et al. [25] erweitern den Rahmen auf 18 Rollen. Innerhalb der AdWiSE-Arbeitsgruppe "Bildung und Kompetenzen" wurden daraus 16 Rollen identifiziert, welche die relevanten SE-Funktionen abbilden. Die Funktionen wurden durch ihre Anforderungen an Fähigkeiten und Qualifikationen ergänzt, die auf recherchierten Stellenausschreibungen aus der Industrie sowie auf den Feedback-Iterationen innerhalb des Projekts basieren. Da die Umsetzung von 16 Kompetenzen für KMUs nicht realisierbar wäre wurden diese zu 6 Kompetenzen in 3 Hauptgruppen zusammengefasst: a) Fokus auf die Systementwicklung und -konstruktion, b) Fokus auf Prozesse und Organisation, und c) Fokus auf die Unterstützung der Systementwicklung und -konstruktion. Abbildung 1 zeigt den entsprechenden Konsolidierungsprozess.

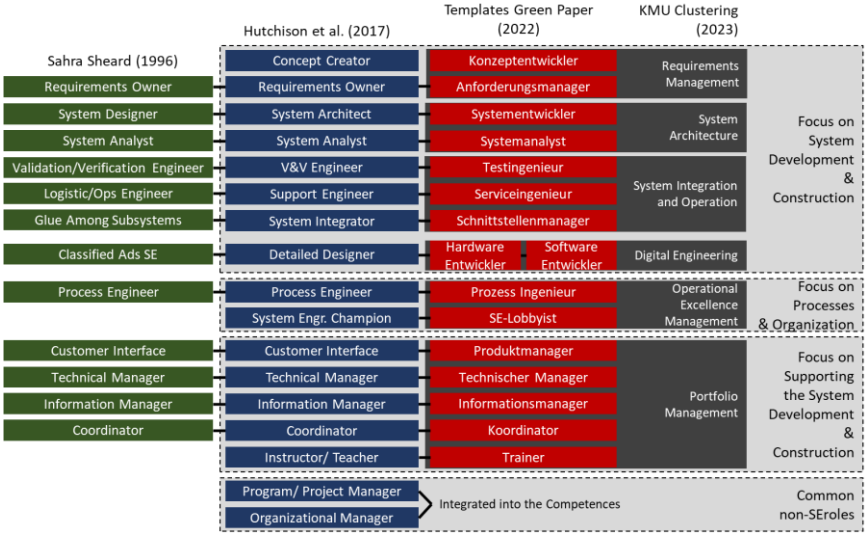

Abbildung 1: Konsolidierung der 6 ASE-Kompetenzen und Hauptgruppen

4.3. ASE Kompetenzmodell

Basierend auf der vorhergehenden Literaturrecherche beinhaltet das Template der ASE Kompetenzmodelle folgende Kompetenz-Kategorien: Bezug zu ASE, Job-Beschreibung, Methodenkompetenz, Fachkompetenz und Tool-Kategorien. Tabelle 1 enthält entsprechende Definitionen dieser Kategorien.

Tabelle 1: Vorlage für eine ASE-Kompetenz

<Kompetenz Name>	
Bezug auf ASE	Relevanz einer Kompetenz für ASE und Verortung im Kompetenzmodell
Job-Beschreibung	Konkrete Aufgaben der Kompetenz und die Verantwortlichkeiten innerhalb des Kompetenzmodells
Methoden-kompetenz	Spezifische Methoden sowie erforderliche Kenntnisse über Strategien und Techniken zur Lösung von Problemen, mit denen die ASE-Kompetenz konfrontiert ist.
Fach-kompetenz	Berufsspezifisches Wissen, Fähigkeiten und Qualifikationen, um die erforderlichen Aufgaben und Verantwortlichkeiten effektiv ausführen zu können.
Tool-Kategorien	Erforderliche Tools und Tool-Kategorien für die Ausführung der Aufgaben (bewertet mit 1-5 Punkten)

Das Modell der 6 ASE-Kompetenzen aus dem oben beschriebenen Konsolidierungsprozess wird unter Einbeziehung der Nachhaltigkeitsaspekte mit einer Kompetenz für Nachhaltigkeitsmanagement erweitert. Das erweiterte 6+1 Kompetenzmodell hilft Organisationen bei der digitalen Transformation im ASE: Im Anforderungsmanagement definiert die Organisation konkrete, umsetzbare Ziele und Anforderungen. In der Systemarchitektur wird die Architektur und Struktur eines Systems entworfen. Digital Engineers implementieren diese durch Systemintegration und -betrieb in die Organisation. Die Überwachung, Steuerung und Verwaltung des Gesamtprozesses erfolgt im Operational Excellence Management. Vision und die Ausrichtung dieses Prozesses werden vom Portfolio Management geleitet. Das Nachhaltigkeitsmanagement überwacht die Umsetzung und Prozesse, die Umweltauswirkungen und Kosten reduzieren, die Einhaltung von Vorschriften gewährleisten sowie das Image verbessern. Die Umsetzung des Nachhaltigkeitsmanagements wirkt sich zudem auf alle anderen Kompetenzen aus, da Nachhaltigkeitskriterien in allen Phasen der Systementwicklung einbezogen werden müssen.

5. Use Case: ASE-Implementierung in der Medizintechnik

Um die 6 ASE-Kompetenzen zu validieren und zu verifizieren, wurde der Anwendungsfall für das Engineering medizinischer Geräte anhand der Kompetenzbeschreibungen analysiert, wie sie im Whitepaper [4] beschrieben sind. Die OSYPKA AG [26] unterstützte mit ihren Erkenntnissen zur ASE-Implementierung. Als Kernprobleme wurden die vielen Verantwortlichkeiten der projektleitenden Ingenieur:innen sowie die pauschale Abrechnung von Projekten identifiziert, die zu Abrechnungsverlusten führten. Ziel der Einführung von ASE war es daher, die Strukturen zu verbessern, das Wachstum des Unternehmens zu

managen, klare Rollen und Verantwortlichkeiten zu entwickeln und eine Ressourcenplanung zu integrieren, um zukünftige Erkenntnisse für eine Verbesserung von Ressourcenmanagement und Abrechnungen zu generieren. Die Analyse war insbesondere hilfreich um verbleibende Lücken in der Struktur aufzudecken. Die Bereitschaft zur Veränderung ist im Unternehmen vorhanden, sodass der Transformationsprozess erfolgreich eingeleitet wurde und nun iterativ verbessert wird. Die wichtigsten vorgenommenen Änderungen waren die Neuverteilung der Zuständigkeiten, beispielsweise die interne Spezialisierung der Verifizierungs- und Validierungsabteilung, sowie die Einführung einer neuen Software und entsprechender Strukturen für die Ressourcenverwaltung. Um die Zuständigkeiten abzudecken wurden zwei neue Stellen geschaffen, eine für die spezielle Ressourcenplanung und das Projektmanagement und eine für die Verwaltung dieser Software. Geplante Maßnahmen für die Zukunft sind die Fortbildung der Mitarbeitenden und die Verbesserung der internen Dokumentation entsprechend der angepassten Prozesse. Die vollständige Tabelle der Analyse ist der Fordatis-Datenbank [27] zu entnehmen.

6. Schlussfolgerung und Ausblick

In der Studie werden die konkreten Auswirkungen der Digitalisierung auf KMUs diskutiert. ASE-Kompetenzmodelle werden als Lösungsansatz vorgestellt, um zukünftigen Anforderungen im Sustainable und Digital Engineering gerecht zu werden. Im Rahmen der Forschungsgruppe sind anschließende Studien geplant, um die Anwendbarkeit für KMUs weiter zu untersuchen und die Spezifikation der Kompetenzmodelle darauf aufbauend zu verbessern. Darin beinhaltet sind weitere Use Cases, insbesondere mit Fokus auf die Integration der Nachhaltigkeitsziele.

7. Danksagung

Die Autor:innen danken der OSYPKA AG für die gewährten Einblicke in den Prozess der Implementierung. Ein weiterer Dank geht an alle Expert:innen aus der ASE-Community und den Verbundprojekten, die an der Entwicklung beteiligt waren. Die vorgestellte Forschung ist Teil des Projekts AdWiSE (02P19B000). Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms "Zukunft der Wertschöpfung - Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit" gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) geleitet. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Publikation liegt bei den Autor:innen.

8. Literaturverzeichnis

[1] R. Dumitrescu, A. Albers, O. Riedel, R. Stark, und J. Gausemeier, „Advanced Systems Engineering: Wertschöpfung im Wandel“, *Engineering in Deutschland-Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft. Paderborn*, Bd. 15, S. 2021, 2021.

[2] A. Newell, P. Nuttall, und E. A. Holland, „United nations global sustainable development report 2015“, United Nations (UN), 2015. Zugegriffen: 3. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://sdgs.un.org/publications/global-sustainable-development-report-2015-advance-unedited-version-gsdr-2015-17874

[3] IPK, „Project AdWiSE“, Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology (IPK). Zugegriffen: 12. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ipk.fraunhofer.de/en/references/adwise.html

[4] N. Weiher *u. a.*, „Advancements on competence models for Advanced Systems Engineering“, Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK), to be published, 2024. Zugegriffen: 12. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: http://dx.doi.org/10.24406/publica-3132

[5] D. Heinz, H.-R. Park, C. Benz, und G. Satzger, „Innovating Smart Product-Service Systems in Manufacturing SMEs: Current Practices, Affordances, and Constraints“, in *2022 IEEE 24th Conference on Business Informatics (CBI)*, Amsterdam, Netherlands: IEEE, Juni 2022, S. 33–40. doi: 10.1109/CBI54897.2022.10046.

[6] M. Eigner, *System Lifecycle Management: Digitalisierung des Engineering*. Berlin [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2021.

[7] R. Stark, *Virtual Product Creation in Industry: The Difficult Transformation from IT Enabler Technology to Core Engineering Competence*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022. doi: 10.1007/978-3-662-64301-3.

[8] B. Schneider, M. Kayser, E. Gelec, und H. Hirsch-Kreinsen, „Der Meister in Industrie-4.0-Fabriken“, in *Die Digitalisierungshürde lässt sich Meister(n)*, T. Knothe, P. Gering, S. O. Rimmelspacher, und M. Maier, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 13–40. doi: 10.1007/978-3-662-60367-3_3.

[9] S. Wolf, J. Teitge, J. Mielke, F. Schütze, und C. Jaeger, „The European Green Deal — More Than Climate Neutrality“, *Intereconomics*, Bd. 56, Nr. 2, S. 99–107, März 2021, doi: 10.1007/s10272-021-0963-z.

[10] EC, „RICHTLINIE 2009/125/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte“, European Commission (EC), 2009. Zugegriffen: 12. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0125&qid=1718208458476

[11] IEM, „Advanced Systems Engineering Community“, Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik (IEM). Zugegriffen: 23. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://community.advanced-systems-engineering.de/

[12] I. Gräßler, D. Wiechel, und J. Pottebaum, „Role model of model-based systems engineering application“, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Bd. 1097, Nr. 1, S. 012003, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1097/1/012003.

[13] I. Gräßler, H. Thiele, B. Grewe, und M. Hieb, „Responsibility Assignment in Systems Engineering“, *Proc. Des. Soc.*, Bd. 2, S. 1875–1884, Mai 2022, doi: 10.1017/pds.2022.190.

[14] E.-M. Grote, S. A. Pfeifer, D. Roltgen, A. Kuhn, und R. Dumitrescu, „Towards Defining Role Models in Advanced Systems Engineering“, in *2020 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, Vienna, Austria: IEEE, Okt. 2020, S. 1–7. doi: 10.1109/ISSE49799.2020.9272225.

[15] S. Impertro, K. Duehr, H. Rust, A. Albers, und N. Bursac, „A COMPETENCE PORTFOLIO FOR FUTURE LEADERS IN ADVANCED SYSTEMS ENGINEERING“, *Proc. Des. Soc.*, Bd. 3, S. 69–80, Juli 2023, doi: 10.1017/pds.2023.8.

[16] S. Kauffeld, „Self-directed work groups and team competence“, *J Occupat & Organ Psyc*, Bd. 79, Nr. 1, S. 1–21, März 2006, doi: 10.1348/096317905X53237.

[17] S. Kauffeld, „Das Kompetenz-Reflexions-Inventar (KRI) – Konstruktion und erste psychometrische Überprüfung eines Messinstrumentes“, *Gr Interakt Org*, Bd. 52, Nr. 2, S. 289–310, Juni 2021, doi: 10.1007/s11612-021-00580-y.

[18] L. C. Müller-Frommeyer, S. C. Aymans, C. Bargmann, S. Kauffeld, und C. Herrmann, „Introducing Competency Models as a Tool for Holistic Competency Development in Learning Factories: Challenges, Example and Future Application“, *Procedia Manufacturing*, Bd. 9, S. 307–314, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.015.

[19] H. Paulsen *u. a.*, „Soziotechnische Analyse und Gestaltung von Virtualisierungsprozessen: Ein Fallbeispiel zur virtuellen Inbetriebnahme“, *Gr Interakt Org*, Bd. 51, Nr. 1, S. 81–93, März 2020, doi: 10.1007/s11612-020-00507-z.

[20] J. S. Shippmann *u. a.*, „THE PRACTICE OF COMPETENCY MODELING“, *Personnel Psychology*, Bd. 53, Nr. 3, S. 703–740, Sep. 2000, doi: 10.1111/j.1744-6570.2000.tb00220.x.

[21] INCOSE, D. D. Walden, G. J. Roedler, K. Forsberg, R. D. Hamelin, und T. M. Shortell, „Systems Engineering Competency Framework“. International Council On Systems Engineering (INCOSE), 2015. Zugegriffen: 12. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.incose.org/publications/products/competency-framework

[22] NASA, „SEH 2.0 Fundamentals of Systems Engineering - NASA“, The National Aeronautics and Space Administration (NASA). Zugegriffen: 12. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.nasa.gov/reference/2-0-fundamentals-of-systems-engineering/

[23] MITRE, „MITRE Systems Engineering (SE) Competency Model v1.13E“. The MITRE Corporation, 2010. Zugegriffen: 12. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mitre.org/sites/default/files/publications/10_0678_presentation.pdf

[24] S. A. Sheard, „TWELVE SYSTEMS ENGINEERING ROLES“, *INCOSE International Symposium*, Bd. 6, Nr. 1, S. 478–485, Juli 1996, doi: 10.1002/j.2334-5837.1996.tb02042.x.

[25] N. Hutchison, J. Wade, und S. Luna, „The Roles of Systems Engineers Revisited“, *INCOSE International Symposium*, Bd. 27, Nr. 1, S. 200–213, Juli 2017, doi: 10.1002/j.2334-5837.2017.00354.x.

[26] „Kardiovaskuläre Lösungen - OSYPKA“. Zugegriffen: 11. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://osypka.de/

[27] N. Weiher, R. Kalamkar, T. Riedelsheimer, und K. Lindow, „Forschungsdatendaten zum use case ‚Implementierung von ASE in einem Medizintechnik-Unternehmen‘“, Juni 2024, *Fraunhofer-Gesellschaft*. doi: 10.24406/fordatis/352.