

Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung

zur Erlangung des akademischen Grades DOKTOR DER INGENIEUR-
WISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.) der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Julian Hentze, M.Sc.
aus Paderborn

Tag des Kolloquiums:	02. Juli 2021
Referentin:	Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler
Korreferentin:	Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentstehung am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Sie basiert auf der Arbeit von fünf herausfordernden und dennoch fantastischen Jahren.

Die Arbeit in der Lehre, in diversen Industrie- und Forschungsprojekten sowie die Zusammenarbeit mit öffentlichen Einrichtungen und Vereinen haben nicht nur die Inhalte meiner Arbeit geprägt, sondern auch in großem Maße zu meiner persönlichen und fachlichen Entwicklung beigetragen. Für die Möglichkeit diese Erfahrungen sammeln zu dürfen und mit dieser Dissertation abschließen zu können, gilt mein besonderer Dank Frau Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler.

Für die Übernahme des Korreferats danke ich Frau Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold von der Universität der Bundeswehr in München (UniBw).

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl möchte ich für die tolle Zusammenarbeit und das offene, konstruktive und freundschaftliche Miteinander danken. Die vielen Herausforderungen, Reisen, Feiern und Erlebnisse aus der gemeinsamen Zeit sind nur durch euch zu einer fantastischen Erinnerung geworden. Dieser Dank gilt gleichermaßen für die Mitglieder des VDI Fachausschusses 4.10, welcher ein wichtiger Bestandteil meiner wissenschaftlichen Arbeit war.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für Unterstützung, die Geduld und die Ablenkung. Alle drei Bestandteile waren notwendig, um mit dieser Arbeit einen erfolgreichen Abschluss finden zu können. Besonderer Dank gilt hier meiner Frau und meinen Eltern, die immer an mich geglaubt und mich zu jeder Zeit bedingungslos unterstützt haben – Danke!

Borchen, August 2021

Julian Hentze

Vorveröffentlichungen

*Gräßler, Iris; Hentze, Julian: The new V-Model of 2206 and its validation. *Journal, at-Automatisierungstechnik*, 68: S. 312-324, Mai 2020

Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Hesse, Philipp: Anchoring Points as a Method for Interdisciplinary Systems Engineering with the New V-Model. In: *Proceedings of TMCE Conference 2020, TMCE 2020 Repository*, at tmce.io.tudelft.nl/proceedings, ISBN/EAN: 978-94-6384-131-3, 11.-15. May 2020, Delft University of Technology

Gräßler, Iris; Oleff, Christian; Hentze, Julian: Role Model for Systems Engineering Application. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*, Band 1, S. 1265-1274, DOI:10.1017/dsi.2019.132, Delft, The Netherlands, 5. - 8. Aug. 2019 Design Society

*Gräßler, Iris; Hentze, Julian: Transformations in product development to enable globally distributed self-organizing production systems. In: *Procedia CIRP - Proceedings of the 29th CIRP Design Conference*, ISSN: 2212-8271, PROCIR-D-19-00359R1, Póvoa de Varzim, 8. - 10. Mai 2019 CIRP (Centre for International Research in Production), Elsevier B.V.

Kaul, Thorben; Hentze, Julian; Sextro, Walter; Gräßler, Iris: Integration von Verlässlichkeitsmodellen der Entwicklung in einen Digitalen Zwilling zur Umsetzung einer vorausschauenden Instandhaltung. In: *Bertram, Torsten; Corves, Burkhard; Gräßler, Iris; Janschek, Klaus (Hrsg.) Fachtagung Mechatronik 2019 Paderborn*, S. 19-24, 27. - 28. Mrz. 2019

*Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Pöhler, Alexander: Self-organizing production systems: Implications for product design. In: *12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, Nr. 79, S. 546-550, Gulf of Naples, 18. - 20. Jul. 2018 CIRP (Centre for International Research in Production), *Procedia CIRP*

Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Oleff, Christian: Systems Engineering Competencies in Academic Education. In: *13th System of Systems Engineering Conference (SoSE)*, S. 542-547, ISBN: 978-1-5386-4875-9, DOI: 10.1109/SYSESE.2018.8428741, Paris, France, 19. - 22. Jun. 2018, IEEE

Gräßler, Iris; Scholle, Philipp; Hentze, Julian; Oleff, Christian: Semi-Automated Assessment of Requirement Interrelations. In: *Marjanovic, Dorian; Storga, Mario; Pavkovic, Neven; Bojctetic, Nenad; Skec, Stanko (Hrsg.) Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, S. 325-334, <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0298>, Mai 2018

*Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Bruckmann, Tobias: V-Models for Interdisciplinary Systems Engineering. In: *Marjanovic, Dorian; Storga, Mario; Pavkovic, Neven; Bojctetic, Nenad; Skec, Stanko (Hrsg.) Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, S. 747-756, <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0333>, Mai 2018

* insbesondere relevante Vorpublikation für diese Arbeit

Hentze, Julian; Kaul, Thorben; Gräßler, Iris; Sextro, Walter: Integrated modeling of behavior and reliability in system development. In: Maier, Anja; Skec, Stanko; McKesson, Chris; Van der Loos, Mike (Hrsg.) ICED17, 21ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, Nr. DS 87-USB, S. 385-394, Vancouver, Canada, 21. - 25. Aug. 2017 Design Society

Gräßler, Iris; Hentze, Julian: Application Potentials of Systems Engineering for small and middle-sized Enterprises. In: Proceedings of 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Ischia, 19. - 21. Jul. 2017 (CIRP) Center for international research in production, Procedia CIRP

Gräßler, Iris; Hentze, Julian: Structuring and Describing Requirements in a Flexible Mesh for Development of Smart Interdisciplinary Systems. In: 8th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials (SMART17), S. 1622-1631, Madrid, Spain, 5. - 8. Jun. 2017, International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE)

*Gräßler, Iris; Pöhler, Alexander; Hentze, Julian: Decoupling of product and production development in flexible production environments. In: Complex Systems Engineering and Development Proceedings of the 27th CIRP Design Conference Cranfield University, UK, S. 548-553, 10. - 12. Mai 2017 CIRP (Centre for International Research in Production)

Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Yang, Xiaojun: Eleven Potentials for mechatronic V-model. In: Production Engineering and Management, 6th International Conference, Band 01/2016, S. 257-268, 29. - 30. Sep. 2016 Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Ostwestfalen-Lippe University of Applied Sciences, Lemgo

Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Scholle, Philipp: Enhancing Systems Engineering by Scenario-based Anticipation of Future Developments. In: SoSe2016, 11th International Conference on System of Systems Engineering Conference, ISBN 978-1-4673-8726-2, 12. - 16. Jun. 2016 Kongsberg, Norway, IEEE

Hentze, Julian; Gräßler, Iris: Lebenszyklusgerechte Umfeldmodellierung. In: Krause, Dieter; Paetzold, Kristin; Wartzack, Sandro (Hrsg.) Design for X - Beiträge zum 26. DfX-Symposium, S. 245-254, ISBN 978-3-941492-93-6, Okt. 2015, TuTech Innovation GmbH (Details)

Gräßler, Iris; Hentze, Julian: Enriching Mechatronic V-Model by Aspects of Systems Engineering. In: Proceedings of the 7th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, SMART2015, ISBN 978-989-96276-8-0, Jun. 2015, IDMEC/IST, Ponta-Delgada, Azores, Portugal

Gräßler, Iris; Hentze, Julian: A V-model based comparison of Systems Engineering approaches. In: Proceedings of the 21st European Concurrent Engineering Conference, S. 80-86, ISBN 978-90-77381-88-5, Apr. 2015, EUROSIS-ETI, Lisbon, Portugal

* insbesondere relevante Vorpublikation für diese Arbeit

Zusammenfassung

Der Wandel in der industriellen Produktion durch die Rahmenbedingungen der vierten industriellen Revolution eröffnet neue Wege für Produkt- und Produktionstechnologien. Produktionssysteme, welche selbstorganisiert, dezentral und flexibel gestaltet werden können, verändern auch die Rahmenbedingungen für das entwicklungsmethodische Vorgehen der Produkte. Neben der zunehmenden Interdisziplinarität müssen Methoden zur Unterstützung für die Produktentwicklung erarbeitet werden, um eine effektive und effiziente Entwicklung trotz veränderter oder zusätzlicher Rahmenbedingungen gewährleisten zu können.

Die vorliegende Arbeit fokussiert den Anwendungsfall Selbstorganisierender Produktionssysteme (SOPS). Die interdisziplinäre Produktentwicklung für mechatronische und cyber-physische Systeme mit dem V-Modell der VDI Richtlinie 2206, wird um eine Methode zur Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung (CoSOPS) erweitert. Die Methode ermöglicht für den spezifischen Anwendungsfall der SOPS sowohl die strategische als auch die produktbezogene und entwicklungsbegleitende Analyse der individuellen Potenziale für die Nutzung von SOPS. Dazu wurden in der Arbeit konkrete Anforderungen an die Methode sowie Einflüsse der SOPS auf die Produktentwicklung erarbeitet und analysiert. Die neue Methode CoSOPS wird detailliert ausgearbeitet und die Ergebnisse in einer strukturierten Evaluation validiert.

Summary

The ongoing transformation of industrial production by conditions of the fourth industrial revolution creates new product- and production technologies. Self-organized, decentralized and flexible production systems change the framework conditions for product development methodologies. In addition to increasing interdisciplinarity, methods to enable and to support the product development process must be developed despite changing or additional conditions to ensure effective and efficient development.

This thesis focuses on the use case of Self-Organizing Production Systems (SOPS). The interdisciplinary product development for mechatronic and cyber-physical systems with the V-model of the VDI guideline 2206, is extended by a method for consideration of self-organizing production systems in early phases of interdisciplinary product development (CoSOPS). For the specific use case of SOPS, the method enables both the strategic and the product-related analysis of the individual potentials for the use of SOPS. For this purpose, specific requirements for the method as well as influences of SOPS on the product development process were elaborated and analyzed in this thesis. The new CoSOPS method is described in detail and the results are validated in a structured evaluation.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	2
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Vorgehen.....	5
2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft.....	9
2.1 Simultaneous Engineering.....	9
2.2 Entwicklungsmethodisches Vorgehen technischer Systeme.....	11
2.2.1 Interdisziplinäre Produktentwicklung mit dem V-Modell der Richtlinie VDI 2206.....	13
2.2.2 Systems Engineering.....	25
2.2.3 Design for X.....	27
2.3 Produktion und Produktionssysteme.....	28
2.3.1 Selbstorganisierende Produktionssysteme.....	28
2.4 Cyber-Physische (Produktions-) Systeme (CPS/CPSS).....	31
3 Charakterisierung und Systemgrenzen.....	35
3.1 Abgrenzung der Arbeit zum Stand der Wissenschaft.....	35
3.2 Betrachtungsgegenstand: Selbstorganisierende Produktionssysteme (SOPS).....	37
3.3 Charakteristische Anwendungsszenarien und Ausgangssituationen....	39
3.4 Betrachtungsgegenstand: Interdisziplinäre Entwicklungsmethodik....	42
3.5 Grundlegende Anforderungen an die Methode.....	43
4 Analyse der Auswirkungen von SOPS auf das entwicklungsmethodische Vorgehen.....	45
4.1 Analyse von Auswirkungen.....	45
4.1.1 Analyse auf Basis von Nachteilen.....	47
4.1.2 Analyse auf Basis von Vorteilen.....	50
4.2 Priorisierung der Auswirkungen.....	53
4.3 Zuordnung der Auswirkungen zu den Betrachtungsbereichen.....	56
4.4 Synthese resultierender Einflüsse für das Lösungssystem.....	59
4.4.1 Einflussgruppe 1: Strategische Planung.....	61

4.4.2	Einflussgruppe 2: Anforderungen - Anforderungserhebung und -management.....	63
4.4.3	Einflussgruppe 3: Systemarchitektur und Design.....	65
4.4.4	Einflussgruppe 4: Implementierung und Realisierung	66
4.4.5	Einflussgruppe 5: IV&V und Übergabe	67
5	Entwicklung der Methode CoSOPS.....	69
5.1	Vorgehen in der Methodenentwicklung.....	69
5.2	CoSOPS Methodenspezifikation.....	71
5.3	Die Methode CoSOPS als Denkmodell	73
5.4	Absicherung	75
5.5	Die Methode CoSOPS als Phasen-Meilensteinmodell	77
5.6	Detaillierung der Methode CoSOPS	80
5.6.1	Phase 1: Ausgangssituation	80
5.6.2	Phase 2: Methodentailoring	83
5.6.3	Phase 3: Business Check.....	84
5.6.4	Phase 4: HML Kategorie	88
5.6.5	Phase 5: Architekturoptionen.....	91
5.6.6	Phase 6: Digitales Abbild	97
5.6.7	Phase 7: Methodenabschluss	104
6	Evaluation der Methode CoSOPS.....	105
6.1	Vorbereitung der Evaluation.....	106
6.2	Durchführung der Evaluation.....	113
6.3	Auswertung der Evaluation.....	113
6.4	Diskussion der Evaluationsergebnisse	120
7	Zusammenfassung und Ausblick	122
7.1	Zusammenfassung.....	122
7.2	Fazit und Ausblick	124
8	Abkürzungsverzeichnis	126
9	Abbildungsverzeichnis.....	128
10	Tabellenverzeichnis	131
Anhang	133
10.1	Liste der betreuten Abschlussarbeiten	134

10.2 Originalabbildung Vorgehen bei der Überarbeitung der VDI Richtlinie 2206 und des V-Modells	136
10.3 Hauptmerkmalliste nach der Richtlinie VDI 2006	138
10.4 Vollständige Liste der Auswirkungen in Folge des Paarweisen Vergleichs	139
10.5 Paarweise Vergleich (vollständige Übersicht).....	141
10.6 Gesamtübersicht der Zuordnung der Priorisierten Auswirkungen auf detaillierte Betrachtungsbereiche	142
10.7 Analyse der Auswirkungen von SOPS auf das entwicklungsmethodische Vorgehen (Fortsetzung Kapitel 4.1)	143
10.7.1 Analyse auf Basis von Nachteilen (Fortsetzung Kapitel 4.1.1)	143
10.7.2 Analyse auf Basis von Vorteilen (Fortsetzung Kapitel 4.1.2)	145
10.8 Integration von Verlässlichkeitsmodellen der Entwicklung in einen Digitalen Zwilling zur Umsetzung einer vorausschauenden Instandhaltung (Kaul et al. 2019).....	148
10.8.1 WiGeP Definition des Digitalen Zwillings	148
10.8.2 Begriff und Definition des Digitalen Zwillings (aus (Kaul et al. 2019))	149
10.8.3 Methode zur Integration von Modellen der Produktentwicklung in einen Digitalen Zwilling.....	150
10.9 Anhang zur Evaluation.....	150
11 Literaturverzeichnis	166

1 Einleitung

Neue Technologien hinsichtlich Vernetzung und Automatisierung bringen neue Möglichkeiten mit sich: Begriffe wie Industrie 4.0, Big Data, Künstliche Intelligenz (KI) oder cyber-physische Systeme (CPS) prägen das Umfeld technischer Produkte (Abramovici und Herzog 2016; Acatech 2012; Roth 2016; Vogel-Heuser et al. 2017). Mit der Veränderung der Produkte durch Technologieinnovationen und Marktbedürfnisse verändert sich der gesamte Produktentstehungsprozess (PEP). Dieser stellt nach Feldhusen und Grote den Kern der ingenieurwissenschaftlichen Arbeit dar. Er beinhaltet den Weg „von der Produktidee bis zum fertigen Produkt“ (Feldhusen und Grote 2013) und damit die Phasen der Strategischen Planung (und Innovationsmanagement), der Produktentwicklung (Systems Engineering und Entwicklungsmanagement) sowie der Produktion (Realisierung und Produktionsmanagement). Diese sind im Handlungsfeld von Gräßler in Abbildung 1 angeordnet sowie logisch miteinander verknüpft, um die gegenseitigen Interaktionen zu illustrieren (Gräßler 2015a, 2015b). Der Produktentstehungsprozess mündet in der Produktnutzung, also der Anwendung des entwickelten Produkts zur Erbringung des in der Einsatzumgebung definierten Nutzens.

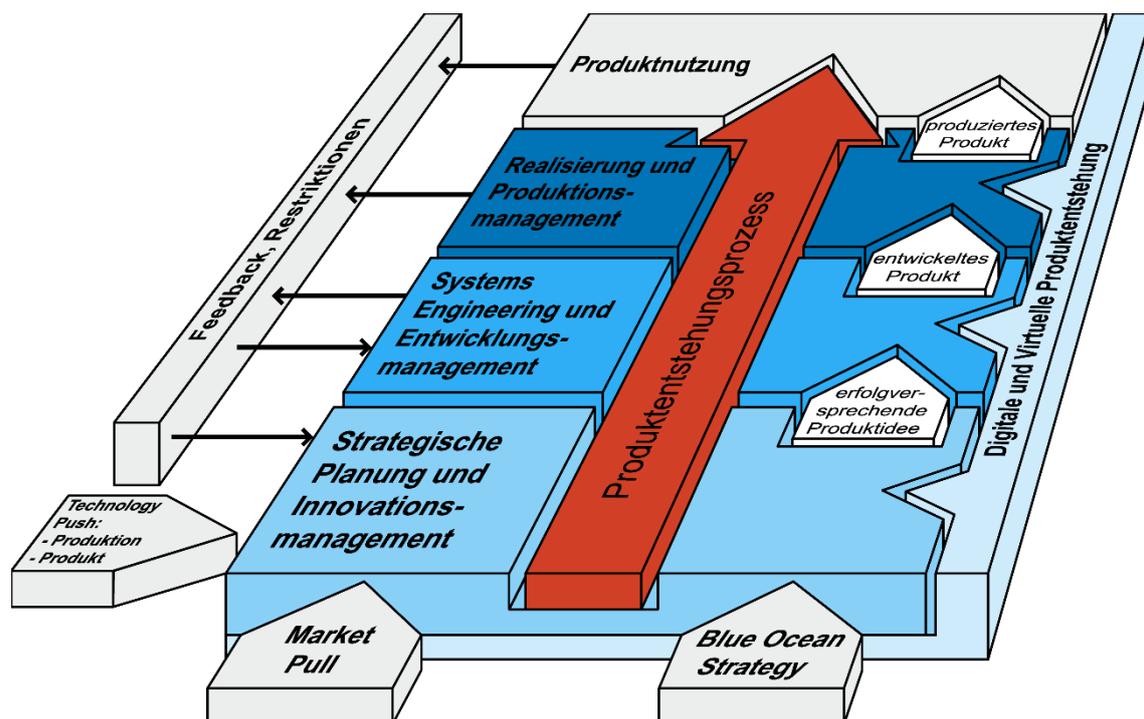


Abbildung 1: Handlungsfeld Produktentstehung (Gräßler 2015a, 2015b)

Durch neue technologische Möglichkeiten der vierten Industriellen Revolution und die Veränderungen der globalen Wirtschaft durch digitalisierte Kommunikations- und Handelswege werden neue Realisierungs- und Produktionskonzepte entwickelt und umgesetzt (Bellmann und Himpel 2008; Schuh und Schmidt 2014). Dabei spielen Dezentralität (Kaluzny 2014; Weyrich et al. 2014), veränderte Organisationsformen (Lödding 2008),

die Veränderung der Einbindung des Menschen in die Produktion (Gräßler und Pöhler 2017b) und die veränderte Arbeitsvorbereitung sowie Produktionsplanung (Hees 2017) wichtige Rollen.

Selbstorganisierende Produktionssysteme bringen Arbeitsaufträge ohne eine arbeitsvorbereitende Produktionsplanung durch Menschenhand in die Produktion und gelten als eine bedeutende Veränderung im Kontext Industrie 4.0 (Hallermayer et al. 2016). Der politisch durch die deutsche Forschungsunion Wissenschaft im Jahr 2011 geprägte Begriff Industrie 4.0 (BMBF 2012) steht dabei repräsentativ für die technologischen Neuerungen in der Automatisierung, der Digitalisierung, der Dezentralität in der Produktion, der Vernetzung der Systeme mit dem Internet der Dinge und Dienste (IoT) und vielem mehr (Acatech 2013; Geissbauer et al. 2014; Gräßler et al. 2015; Kagermann et al. 2011; Scholz-Reiter 2013; Spath et al. 2013; VDI/VDE-GMA 2013). Selbstorganisierende Produktionssysteme (SOPS) (Gräßler et al. 2018d; Klemke et al. 2010) beschreiben eine autonome Art der Organisation von Produktionsprozessen innerhalb eines geschlossenen Systems. Die Berücksichtigung dieser Selbstorganisierenden Produktionssysteme bereits in der strategischen Planung sowie im entwicklungsmethodischen Vorgehen eines Unternehmens bedarf einer zielgerichteten Vorgehensweise zur Analyse der individuellen Anwendungssituation für Selbstorganisierende Produktionssysteme, welche im Verlauf dieser Arbeit systematisch entwickelt wird.

1.1 Motivation

Das Zusammenspiel von Strategischer Planung, Produktentwicklung, Arbeitsvorbereitung und Produktion wandelt sich, da durch Software und technische Systeme global und unabhängig voneinander gearbeitet werden kann (Gräßler et al. 2017). Flexibilität in der Produktion, neue Geschäftsmodelle und individuellere Produkte verändern die globale Produktion und damit auch die Produktionssysteme sowie deren Organisation (Abele und Reinhart 2011, S. 1-3). Selbstorganisierende Produktionssysteme generieren anhand von definierten Inputs, durch selbstständige Organisation des Produktionsablaufs, ein zuvor definiertes Produkt als Output. Bei der Entwicklung solcher Produkte müssen, wie bei konventionellen Produktionsverfahren und deren Organisation, die individuellen Charakteristiken und Eigenschaften des Produktionssystems, hier des Selbstorganisierenden Produktionssystems, berücksichtigt werden (Vajna 2014, S. 318). Insbesondere aus wirtschaftlichen Gründen ist eine frühzeitige Berücksichtigung auf Grund der enormen Kostenbeeinflussungsmöglichkeiten in frühen Phasen zu gewährleisten, was durch die empirische Zehnerregel der Auswirkungen von Fehlern von der Planung bis zur Produktnutzung beschrieben wird (Schmitt und Pfeifer 2010, S. 5). Exemplarisch kann der hohe Vernetzungsgrad zur Umsetzung einer der Adaptionsfähigkeit des SOPS als Eigenschaft genannt werden, dessen Umsetzung und Implementierung mit großem Aufwand und hohen Kosten verbunden sind (Brettel et al. 2016).

Bestehende Planungs- und Entwicklungsmethoden müssen weiterentwickelt und angepasst werden, um diese Veränderungen in Betracht ziehen und die Selbstorganisierenden Produktionssysteme bereits in frühen Phasen als nutzbares Instrument für die spätere Produktion berücksichtigen zu können. Diese Anpassungen im Vorgehen zur Planung und Entwicklung sowie der reibungslosen Integration in ein Industrieunternehmen sind von zentraler Bedeutung (Bender und Steven 2015; Lindemann 2016, S. 401). Die Verbreitung, das Wissen und die Akzeptanz von Selbstorganisierenden Produktionssystemen wird durch die Repräsentanz und Berücksichtigung in der Planung und Entwicklung gefördert. Die Analyse im wissenschaftlichen Forschungskontext ist als Vorlage für Anwender unterschiedlicher Branchen für die kommerzielle Nutzung elementare Grundlage und Erkenntnisgewinn. Ein Auswahlkriterium zur Identifikation von Potenzialen und Risiken unterstützt Planer, Entscheidungsträger und Entwickler, innovative Selbstorganisierende Produktionssysteme unter Berücksichtigung des individuellen Status und des Geschäftsmodells in Betracht zu ziehen. Die frühzeitige Berücksichtigung führt dabei zur Möglichkeit, durch wirtschaftliche Betrachtungen hinsichtlich Investitionen und Zeiteinsparungen die Gesamtkosten des Produkts und insbesondere dessen Produktionskosten zu senken.

1.2 Zielsetzung

Basierend auf dem neuen V-Modell der VDI Richtlinie VDI 2206 des Fachausschusses 4.10 im Entwurf 2020 (VDI 2206:2020) und des in der Produktentwicklung angewendeten Ansatzes des System Engineerings (Walden et al. 2015) wird in dieser Arbeit eine angepasste, kombinierte Systems Engineering/ V-Modell Vorgehensweise zur Verfügung gestellt, welche die Hypothese über Herausforderungen und Potenziale der Selbstorganisierenden Produktion berücksichtigt. Diese Vorgehensweise analysiert konkrete Einflüsse der Änderung durch die Selbstorganisierende Produktion (z. B. Änderungen von Methoden, Prozessen, Vorgehensmodellen) und der Ablaufmethodik der interdisziplinären Produktentwicklung. Abbildung 2 stellt in Grundzügen Zusammenhänge zwischen dem Handlungsfeld Produktentstehung, dem V-Modell sowie den Selbstorganisierenden Produktionssystemen schematisch dar. Die Auswirkungen von Änderungen, beispielsweise bezüglich der Gestaltung und Veränderung von Geschäftsmodellen, der Anforderungserhebung, der System Architektur und dem Transfer des entwickelten Produkts in die Produktion werden berücksichtigt.

Die Arbeit unterstützt auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse das Verständnis der Selbstorganisierenden Produktionssysteme (SOPS): Die Entwicklung der Vorgehensweise, mit dem Ziel einer Methode zur „Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung“ ist die Grundlage, frühzeitig die Möglichkeit der selbstorganisierenden Produktionsorganisation zu analysieren und über eine konkrete Umsetzung im individuellen Anwendungsfall oder einer strategischen Nutzung solcher Produktionssysteme zu entscheiden.

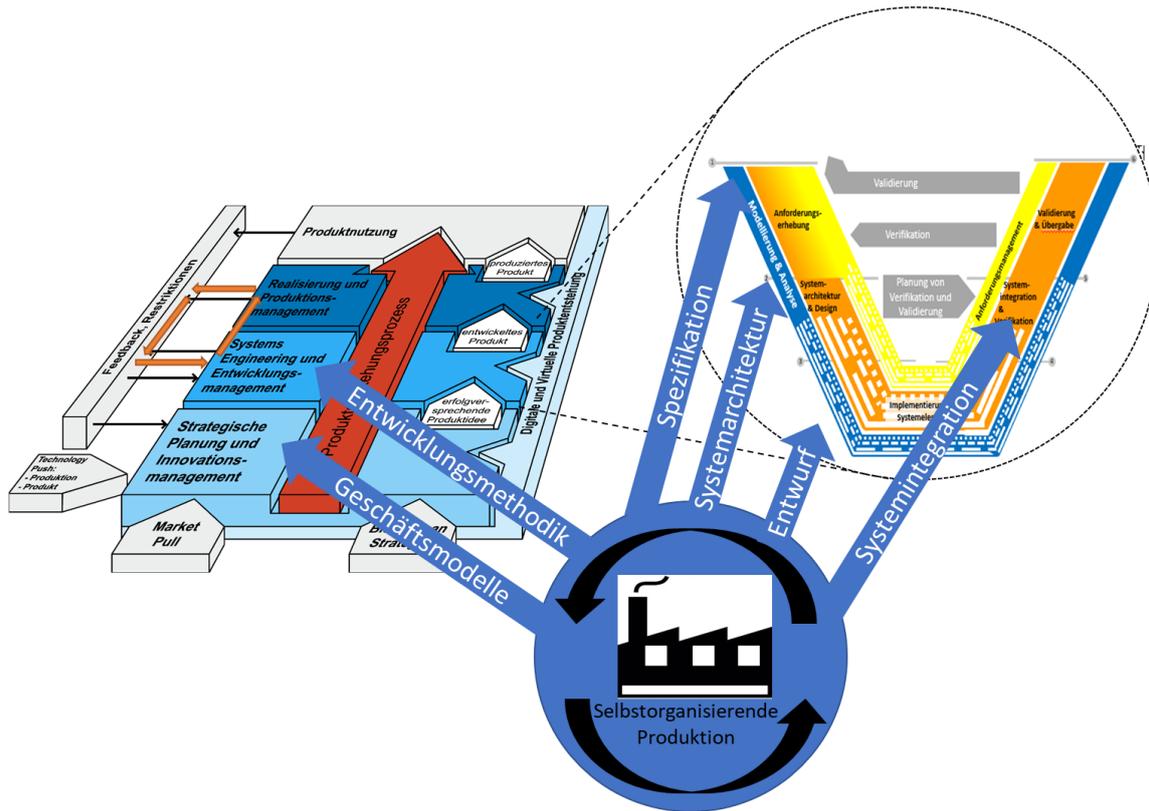


Abbildung 2: Einflüsse Selbstorganisierender Produktionssysteme (SOPS) (unter Verwendung von (Gräßler 2015a, 2015b; VDI 2206:2004))

Die Entwicklung der Methode zielt dabei auf eine Anpassung und weitergehende Nutzung des entwicklungsmethodischen Vorgehens mit dem V-Modell der neuen VDI Richtlinie 2206 ab, indem das generische Denkmodell des V-Modells in den konkreten Betrachtungsfall Selbstorganisierender Produktionssysteme überführt und um Ergänzungen zur Erfüllung der Anforderungen an die Methode erweitert wird (VDI 2206:2020).

Die Arbeit leistet in Ergänzung dessen einen wissenschaftlichen Beitrag, wie neue Produktionsorganisationsformen in den Fokus der Planer, Entscheider und Entwickler gelangen, somit der Zielgruppen, welche die Grundlagen für Technologien, Produkte und Produktionssysteme von morgen legen und damit die Entscheidungen der Strategen und Manager essentiell beeinflussen (Stark et al. 2010).

Abbildung 3 ordnet das Vorhaben im Kontext des „Design for X“ als dessen Untermenge ein, da es der Design for X Idee folgend, eine spezialisierte Ausprägung in der Produktentwicklung berücksichtigt. Dabei verdeutlicht die Grafik, dass nicht das entwicklungsmethodische Vorgehen verändert werden soll, sondern die relevante Teilmenge des Entwicklungsprozesses für Selbstorganisierende Produktionssysteme detailliert werden soll. Am illustrierten Punkt liefert die vorliegende Arbeit eine detaillierte Beschreibung und Anwendung der „Design for X“ Methodik zu einem definierten Zweck.

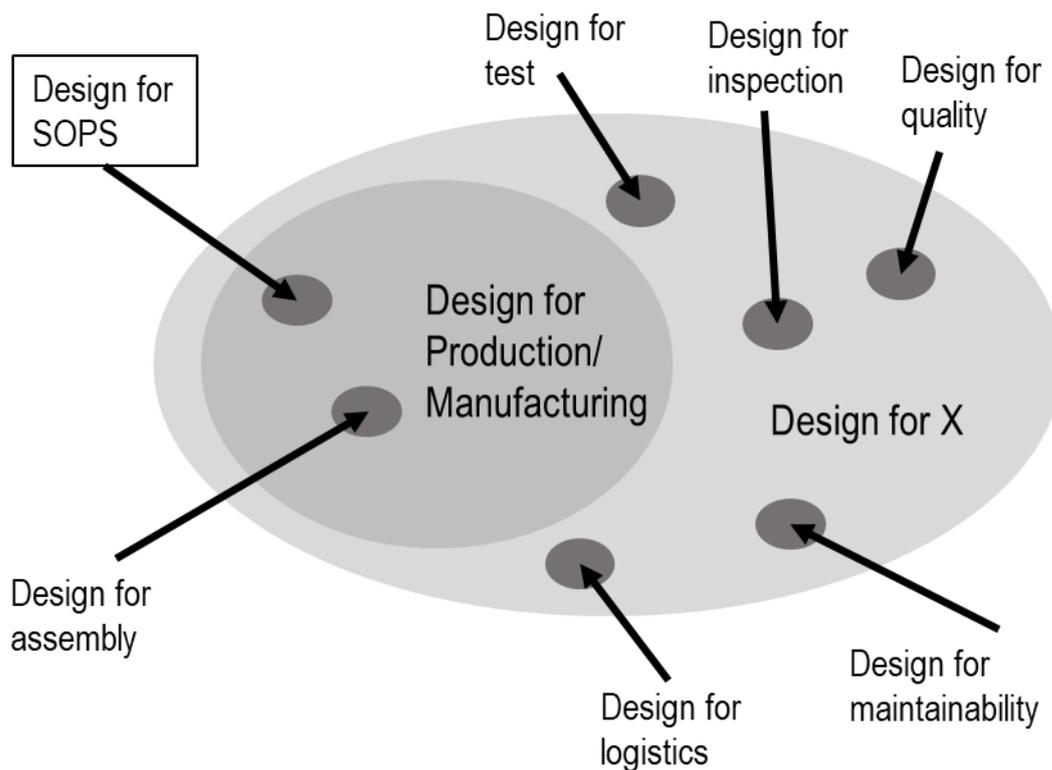


Abbildung 3: Design for Self-Organizing Production Systems (SOPS) als spezifische Ausprägung des Konzepts des „Design for X“

Aus Motivation und Zielsetzung leitet sich die Forschungsfrage ab, welche in den Folgekapiteln vom Stand der Technik abgegrenzt, diskutiert und beantwortet wird.

Forschungsfrage

Wie können Selbstorganisierende Produktionssysteme in frühen Phasen der Planung und Entwicklung von Produkten berücksichtigt werden?

1.3 Vorgehen

Zur Strukturierung der Arbeit und zur Sicherung des wissenschaftlichen Vorgehens wird eine geeignete theoretische Vorgehensgrundlage gesucht, welche den Rahmenbedingungen und Eigenschaften der vorliegenden Forschungsfrage entspricht. Das Vorgehen soll dabei ausreichend granular sein und bei der Strukturierung der Forschungsarbeit helfen. Gleichzeitig soll es den nötigen Spielraum für individuelle Gestaltung und das Einbringen neuer Lösungen eröffnen. Kriterien für die Identifikation einer wissenschaftlichen Vorgehensgrundlage sind bei der Suche insbesondere Vorgehen aus dem Forschungsfeld der Produktentwicklung, für Dissertationen im Ingenieurwesen anwendbare Vorgehen sowie eine mit etablierter Fachliteratur belegbare Beschreibung des wissenschaftlichen Vorgehensmodells sowie des geeigneten Anwendungsfeldes.

In der Recherche wurden Vorgehensbeschreibungen auf Basis der Grundzüge von Pahl/Beitz (Feldhusen und Grote 2013), von Eckert (Eckert et al. 2003), Ulrich und Hill (Ulrich und Hill 1976, S. 304–309) sowie von Blessing und Chakrabarti (Blessing, Lucienne T. M. und Chakrabarti 2009) durch Literaturrecherche identifiziert und in Betracht gezogen. Dabei fällt die Auswahl als grundlegendes wissenschaftliches Vorgehensmodell zur Bearbeitung der vorliegenden Aufgabenstellung auf das Design Research Methodology Framework (DRM) von Blessing und Chakrabarti (Blessing, Lucienne T. M. und Chakrabarti 2009). Dieses ist für den Umfang einer Dissertation geeigneter als das Vorgehenskonzept von Eckert, welches umfangreichere und langfristige Forschungsvorhaben fokussiert und damit für langjährige Projekte mit enormem Umfang und einer Vielzahl an Beteiligten in Frage kommt (Meyer-Schwickerath 2015). Vorteile bietet die DRM im Vergleich zu Pahl/Beitz besonders auf Grund des Anwendungsfalls: Während in Pahl/Beitz die Entwicklung von technischen Produkten und das allgemeine Vorgehen fokussiert werden, beschreibt die DRM ausschließlich ein Vorgehensmodell zur Erstellung wissenschaftlicher Arbeiten in der Produktentwicklung. Das den vorliegenden Rahmenbedingungen der Arbeit entsprechende Vorgehen nach Ulrich und Hill wird auf Grund des weniger intensiven Bezugs zur Entwicklung technischer Produkte verworfen. Der Anwendungsfall im Ingenieurwesen ist im Vergleich zur DRM nicht explizit beschrieben.

Das DRM-Modell, welche in Abbildung 4 dargestellt wird, bietet ein einfach strukturiertes Modell, welches sich auf das vorliegende Forschungsvorhaben sehr gut anwenden lässt. Es gibt dem Anwender bereits in Form der modellhaften Darstellung wichtige Orientierung, wie ein Forschungsvorhaben mit der DRM strukturiert wird.

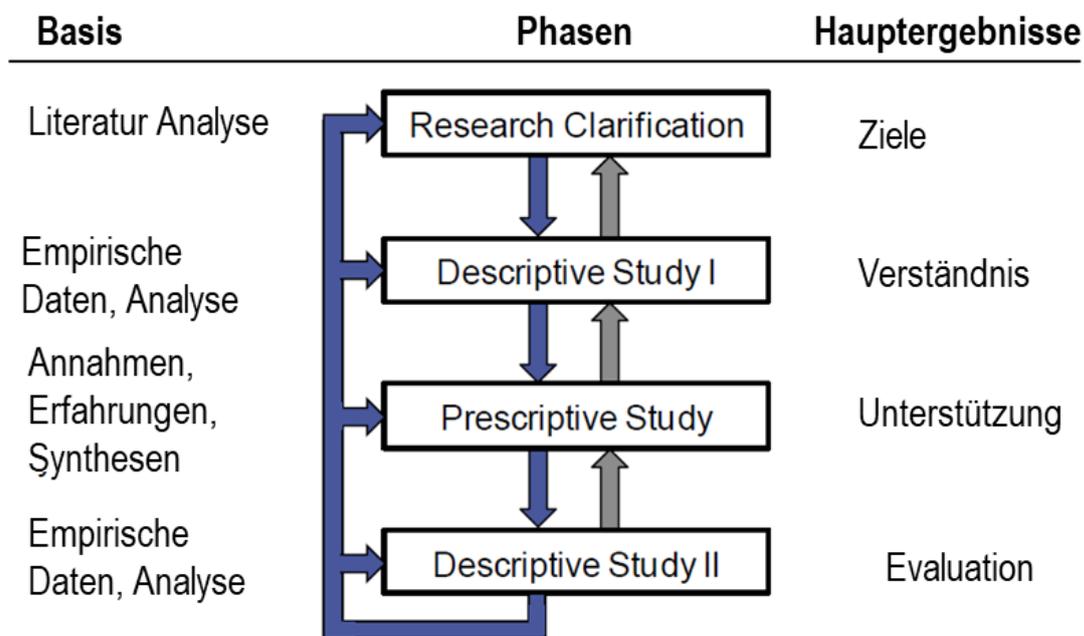


Abbildung 4: Design Research Methodology (DRM) Framework (Blessing, Lucienne T. M. und Chakrabarti 2009)

Um den individuellen Rahmenbedingungen der Arbeit Berücksichtigung zu verschaffen, ist die theoretische Grundstruktur aus Abbildung 4 in der folgenden Abbildung 5 dem vorliegenden Vorhaben, der Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung, angepasst. In der linken Spalte der Grafik wird der Lösungsweg der Arbeit beschrieben und die Arbeitsschritte den Phasen der DRM in der rechten Spalte zugeordnet. Der lineare Eindruck des Ablaufmodells spiegelt dabei die Phasen der DRM wider, welche in die in Abbildung 4 verdeutlichten Zusammenhänge und Iterationen rückgeführt werden können, um weiterführende Zusammenhänge im Lösungsweg zu identifizieren und zu berücksichtigen.

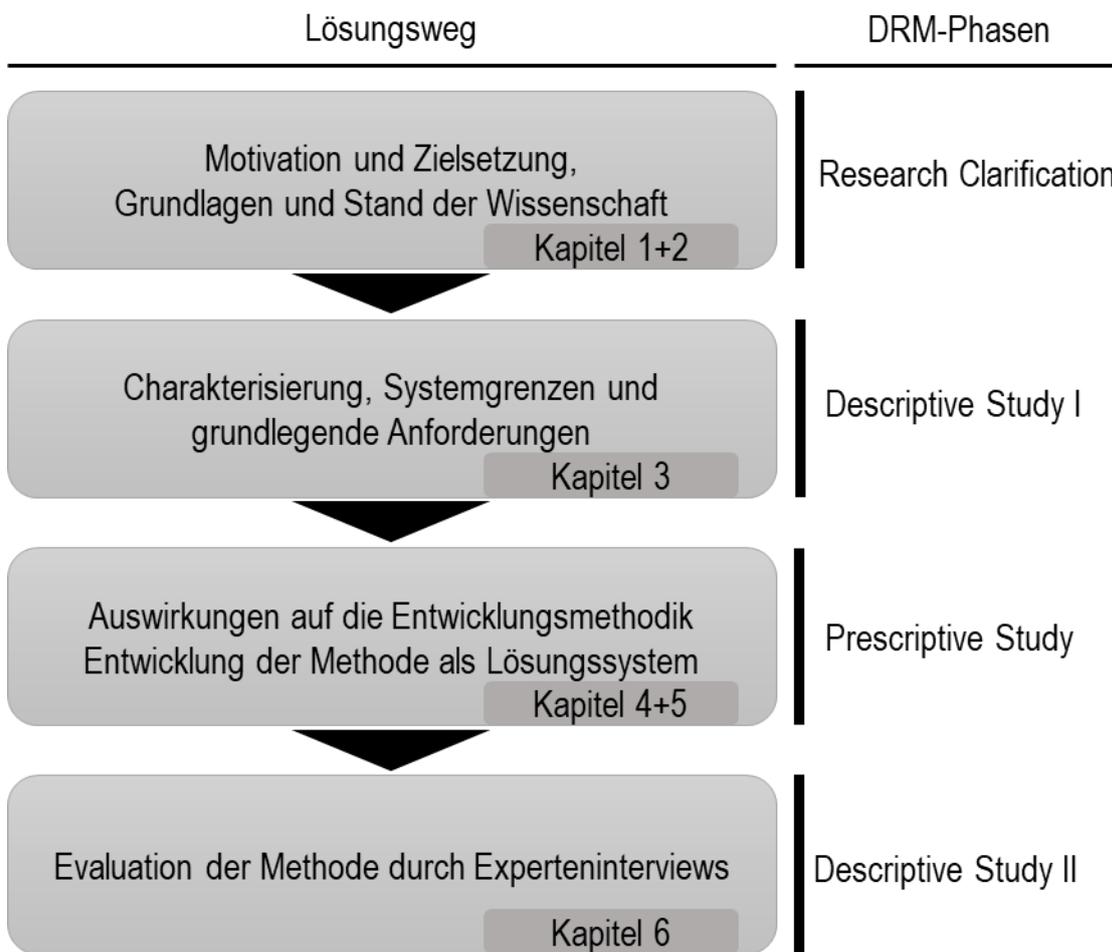


Abbildung 5: Vereinfachter Lösungsweg auf Basis der DRM, eigene Darstellung angelehnt an (Meyer-Schwickerath 2015)

Der Lösungsweg folgt dabei dem Ablauf der DRM: In der „Research Clarification“ werden die Grundlagen für die fortlaufende Analyse identifiziert. Die Motivation der Arbeit, die Zielsetzung und der Stand der Wissenschaft in den Themenbereichen Planungs- und Entwicklungsmethodik sowie Selbstorganisierende Produktionssysteme werden mit Hilfe strukturierter Recherchen zusammengetragen und abgebildet (Kapitel 1 und 2). Die

folgende „Descriptive Study I“ beschreibt und charakterisiert die Systemgrenzen der Planung und Entwicklung sowie der Selbstorganisierenden Produktionssysteme. Es wird festgelegt, welche Rahmenbedingungen gelten und welche Bestandteile für die Untersuchungen der Arbeit relevant sind. Zur Verdeutlichung werden charakteristische Anwendungsszenarien erläutert. Das Alleinstellungsmerkmal und der Neuheitsgrad der Arbeit werden durch Abgrenzung zum Stand der Wissenschaft herausgearbeitet. Abschließend werden zum Ende des Kapitels 3 und dem damit verbundenen Abschluss der „Descriptive Study I“ die grundlegenden Anforderungen an eine Methode als Lösungssystem festgelegt.

Die „Prescriptive Study“ folgt mit der Feststellung und Detaillierung von konkreten Einflüssen der SOPS auf die Planungs- und Entwicklungsmethodik. Durch differenzierte Analysen aus Literaturrecherchen sowie der im Vorfeld dieser Dissertation zur Diskussion und Validierung publizierten wissenschaftlichen Veröffentlichungen (Gräßler et al. 2018d; Gräßler et al. 2018b; Gräßler und Hentze 2019, 2020) werden die Auswirkungen von Selbstorganisierenden Produktionssystemen (SOPS) beschrieben, analysiert und strukturiert. Auf Basis der strukturiert erarbeiteten Ergebnisse des Kapitels 4 wird in Kapitel 5 ein Lösungssystem entwickelt, welches die Ziele dieser Arbeit erfüllen und damit die Forschungsfrage beantwortet. Kapitel 4 dient dabei der inhaltlichen Vorbereitung durch Analyse und Synthese in Ergebnisse, die in der Methodenentwicklung in Kapitel 5 strukturiert und detailliert werden. Das entwickelte Lösungssystem, in Form einer Methode, entspricht der von den Autoren der DRM definierten „Unterstützung“ (auch als Hilfestellung oder Support beschrieben) (Blessing, Lucienne T. M. und Chakrabarti 2009).

Die Methode sowie die Methodenanwendung werden in der „Descriptive Study II“ mit einer Evaluation untersucht und bewertet, um die Ergebnisse abzusichern (Kapitel 6). Hierfür werden repräsentative Experten verschiedener Branchen und Unternehmen herangezogen, um ein ausreichend diversifiziertes Meinungsbild zur Bewertung der Ergebnisse zu erhalten.

2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft

Die in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen und der Stand der Wissenschaft bilden die für die Entwicklung der Methode zur Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung notwendigen wissenschaftlichen Grundlagen und Themenfelder ab. Das Kapitel beinhaltet dabei Erläuterungen sowohl zu eingesetzten Methoden und Lösungsansätzen wie dem Simultaneous Engineering, dem Systems Engineering oder dem Design for X, als auch zu zentralen Begrifflichkeiten und Themenfeldern dieser Arbeit.

Die Betrachtung einer bestehenden Methode zur Berücksichtigung der Selbstorganisierenden Produktionssysteme in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung oder vergleichbarer Anwendungsfälle und Rahmenbedingungen, können auf Grund fehlender Existenz nicht referenziert werden. Dies wird in Kapitel 3 als Neuheitsgrad und Alleinstellungsmerkmal der vorliegenden Arbeit weitergehend begründet und erläutert.

2.1 Simultaneous Engineering

Grundlegend folgt die vorliegende Arbeit den Gedanken des Simultaneous Engineerings: Dies bedeutet hier, dass der Planungs- oder Entwicklungsprozess mit einem parallelen Prozess verzahnt wird, welcher die Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme beinhaltet. Es handelt sich also um eine zeitparallel hinzugefügte Arbeitsaufgabe, die ein bestimmtes Ziel verfolgt; in diesem Fall die Berücksichtigung der Selbstorganisierenden Produktionssysteme. Ziel der Strategie des Simultaneous Engineerings ist die Steigerung der Effizienz und somit die zeitliche Verkürzung des Produktentstehungsprozesses (Bochtler et al. 1995; Bullinger und Warschat 1997).

Simultaneous Engineering ist eine zeitparallele, integrierte Abwicklung von Produkt-, Prozess- und Produktionsmittelgestaltung (Eversheim und Schuh 2005; Gesellschaft Produktionstechnik 1989; Gräßler 2000). Zweck ist eine verkürzte Time-to-Market, die Steigerung der Effektivität und Effizienz des Produktentstehungsprozesses (Bochtler et al. 1995, S. 1) und des magischen Dreiecks aus Zeit, Kosten und Qualität durch Parallelisieren, Standardisieren und Integrieren (Bullinger und Warschat 1997, S. 15).

Abbildung 6 zeigt das Grundprinzip des Simultaneous Engineering auch in Abgrenzung zum Concurrent Engineering, welches nach Vajna eine einzelne Aufgabe auf mehrere Personen aufteilt, welche die Aufgabe parallel bearbeiten (Vajna 2014, S. 351). Zudem hebt die Grafik das Ziel der Zeitverkürzung durch Simultaneous sowie Concurrent Engineering hervor.

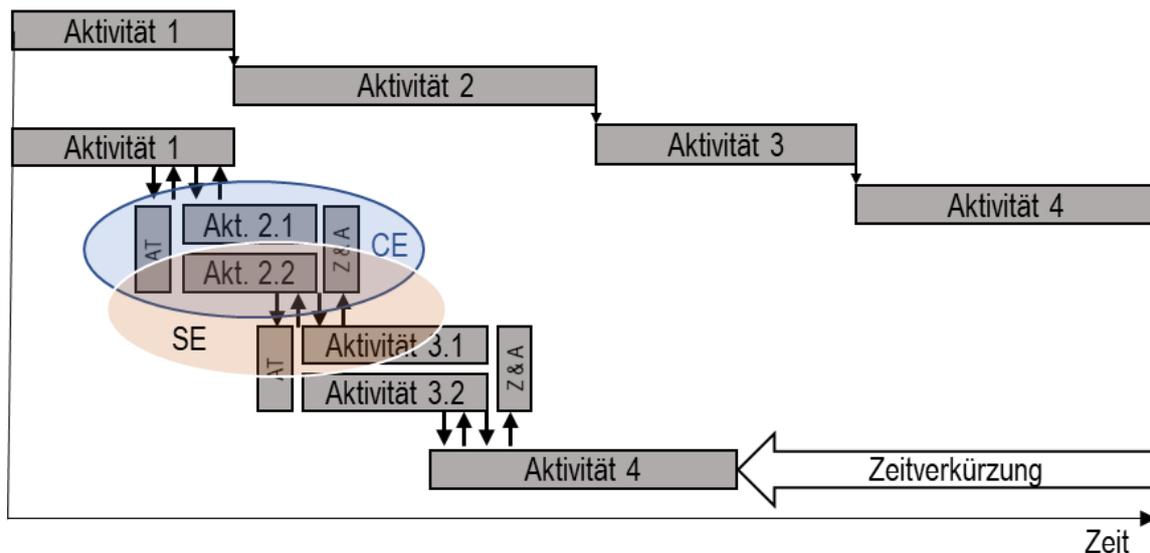


Abbildung 6: Simultaneous und Concurrent Engineering nach (Vajna 2014, S. 351)

Richard Gräßler gibt in der Beschreibung von zehn wesentlichen Leitlinien des Simultaneous Engineerings einen zusammenfassenden Überblick, der die Bedeutung und die Ideen des Simultaneous Engineerings vermittelt und die Anwendung unterstützt. Insbesondere die Leitlinien 4, 5, 6 und 9 sind für die vorliegende Arbeit von großer Relevanz (Tabelle 1)

Tabelle 1: Wesentliche Leitlinien des Simultaneous Engineering (Gräßler 1999; Gräßler 2000, S. 20)

1)	zeitliche Parallelisierung beziehungsweise Überlappung von Aktivitäten
2)	Integration von Aktivitäten
3)	Kompetenzzusammenführung durch interdisziplinäre Teamorganisation
4)	Verstärker frühzeitiger Aufwand in den frühen Entwicklungsphasen
5)	Frühzeitige Berücksichtigung von Anforderungen
6)	Planung und Steuerung des Entwicklungsprojekts
7)	Gezielter Einsatz von Informationstechnologien und IT-Systemen
8)	Standardisierung von Abläufen, Produktkomponenten und IT-Systemen
9)	Methodische Planung und Gestaltung von Produkt und Prozessen
10)	Integration Dritter in den Entwicklungsprozess

2.2 Entwicklungsmethodisches Vorgehen technischer Systeme

Im Rahmen der Entwicklung eines Produkts müssen Menschen durch ihr Denken und Handeln unterschiedliche Informationen er- und verarbeiten, damit aus einem Bedarf oder einem Auftrag ein funktionsfähiges und herstellbares Produkt entstehen kann. Im Produktentwicklungsprozess müssen somit diese Informationen sowie die zu dessen Erstellung und Bearbeitung erforderlichen Ressourcen in einen zweckmäßigen Zusammenhang gebracht werden (VDI 2221, S. 7).

Die Produktentwicklung ist dabei das im Vorfeld definieren einer Vielzahl an Situationen und Anwendungen, in denen das Produkt im Anwendungsfall eingesetzt werden kann (Paetzold 2007). Das Entwicklungsmethodische Vorgehen bildet das Rahmenwerk zur Umsetzung der Produktentwicklung, welche die Gesamtheit der Tätigkeiten zur Lösung technischer Aufgaben beschreibt, die zu einem vermarktbareren Produkt führen (Feldhusen und Grote 2013; Lindemann 2016). Entwicklungsmethodik liefert dabei nach (Lindemann 2016, S. 1) die fähigen Prozesse, gute Ideen und die besten Produkte, welche den Kunden begeistern. Dabei wird unbekanntes und neues Terrain betreten, dessen Unsicherheit durch die Unterstützung von Entwicklungsmethoden überwunden wird (Jantzer et al. 2019, S. 4). Verschiedene Vorgehensmodelle und -methoden mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Betrachtungsgegenständen existieren in der etablierten Literatur. Im durch den Maschinen- und Anlagenbau geprägten deutschsprachigen Raum sind besonders die VDI Richtlinien VDI 2221 „Entwicklung technischer Produkte und Systeme“ (VDI 2221), VDI 2206 „Entwicklung mechatronischer Systeme“ (VDI 2206:2004) sowie das Standardwerk „Pahl/Beitz Konstruktionslehre“ (Feldhusen und Grote 2013) bekannte Vorgehen zur Entwicklung technischer Systeme. Das in der VDI Richtlinie VDI 2206 beschriebene Vorgehen fokussiert, in Abgrenzung zum allgemeingültigen technischen Entwurfsprozess der VDI 2221, die interdisziplinäre Zusammenarbeit der beteiligten Disziplinen und die besondere Repräsentation der Eigenschaftsabsicherung (Lindemann 2016, S. 403).

Weitere klassische Ansätze für die Beschreibung von entwicklungsmethodischem Vorgehen beschreiben das Spiral- und das Wasserfallmodell sowie die aus der Softwareentwicklung adaptierten Agilen Vorgehensweisen (Grande 2011, 109ff.; Klein 2016, 25ff.; Lindemann 2016, 35ff.). Aus dem amerikanischen Raum ist der insbesondere im Militär und in der Luftfahrt entwickelte Ansatz des Systems Engineerings relevant, welcher im Zuge der steigenden Komplexität von Produkten und Prozessen auch in Europa verstärkt in den Fokus rückt (Gräßler und Hentze 2015; Gräßler et al. 2016b; U.S. Department of Transportation 2009; United States Department of Defense 2001; Walden et al. 2015).

Gegenstand des entwicklungsmethodischen Vorgehens in der Produktentwicklung ist die Betrachtung sämtlicher technischer Lebenszyklusphasen (Lindemann 2016, S. 3; Walden et al. 2015, S. 1). Die folgende Abbildung 7 zeigt ein exemplarisches generisches Lebenszyklusmodell aus dem Kontext des Systems Engineering und veranschaulicht die Zusam-

menhänge zwischen den verschiedenen Abschnitten mit Fokus auf die möglichen Interaktionen mit der Entwicklung. Darüber hinaus wird die zeitliche und kontextuelle Einbettung der Produktentwicklung in das Gesamtmodell eines exemplarischen Lebenszyklus dargestellt. Dies beschreibt, wie auch Abbildung 1 (Handlungsfeld Produktentstehung), die Bedeutung von Feedback und Restriktionen anderer Lebenszyklusphasen für die Entwicklung.

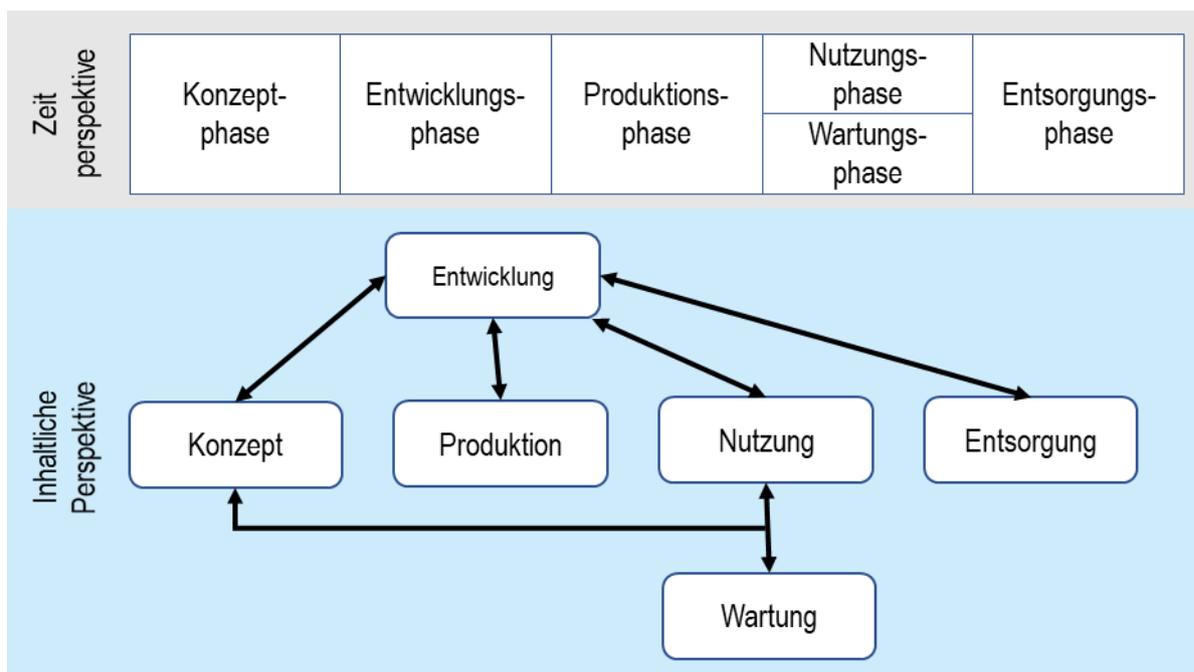


Abbildung 7: Zeitliche und inhaltliche Perspektive auf den generischen Lebenszyklus (basiert auf Walden et al. 2015).

Als Grundlage der Strukturierung verschiedener Richtlinien zur Entwicklung technischer Systeme stellt der VDI ein Lebenszyklusmodell in der geplanten Richtlinie VDI 2000¹ zur Verfügung. Der aktuelle Stand des sich in der laufenden Entwicklung befindlichen Modells des VDI Fachausschusses 702 ist aus einer Vorpublikation (Gräßler et al. 2018a) in Abbildung 8 dargestellt. Dieses benennt die fünf Abschnitte des Lebenszyklus mit Strategischer Planung, Produktentwicklung, Realisierung/Produktion, Produktnutzung und Produktlebensende. Vielfältige Überschneidungen und Einflüsse der Lebenszyklusabschnitte sind in Abbildung 8 grafisch illustriert. Alle Abschnitte sind über die Schnittstelle der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) vernetzt und hinterlegt mit der Berücksichtigung der Einflüsse von Mensch und Organisation (Gräßler et al. 2018a; Gräßler und Hentze 2020).

¹ Stand 12/2020 sind ausschließlich die genannten Vorveröffentlichungen referenzierbar sowie die Ankündigung auf der Website des VDI, siehe (VDI 2020)

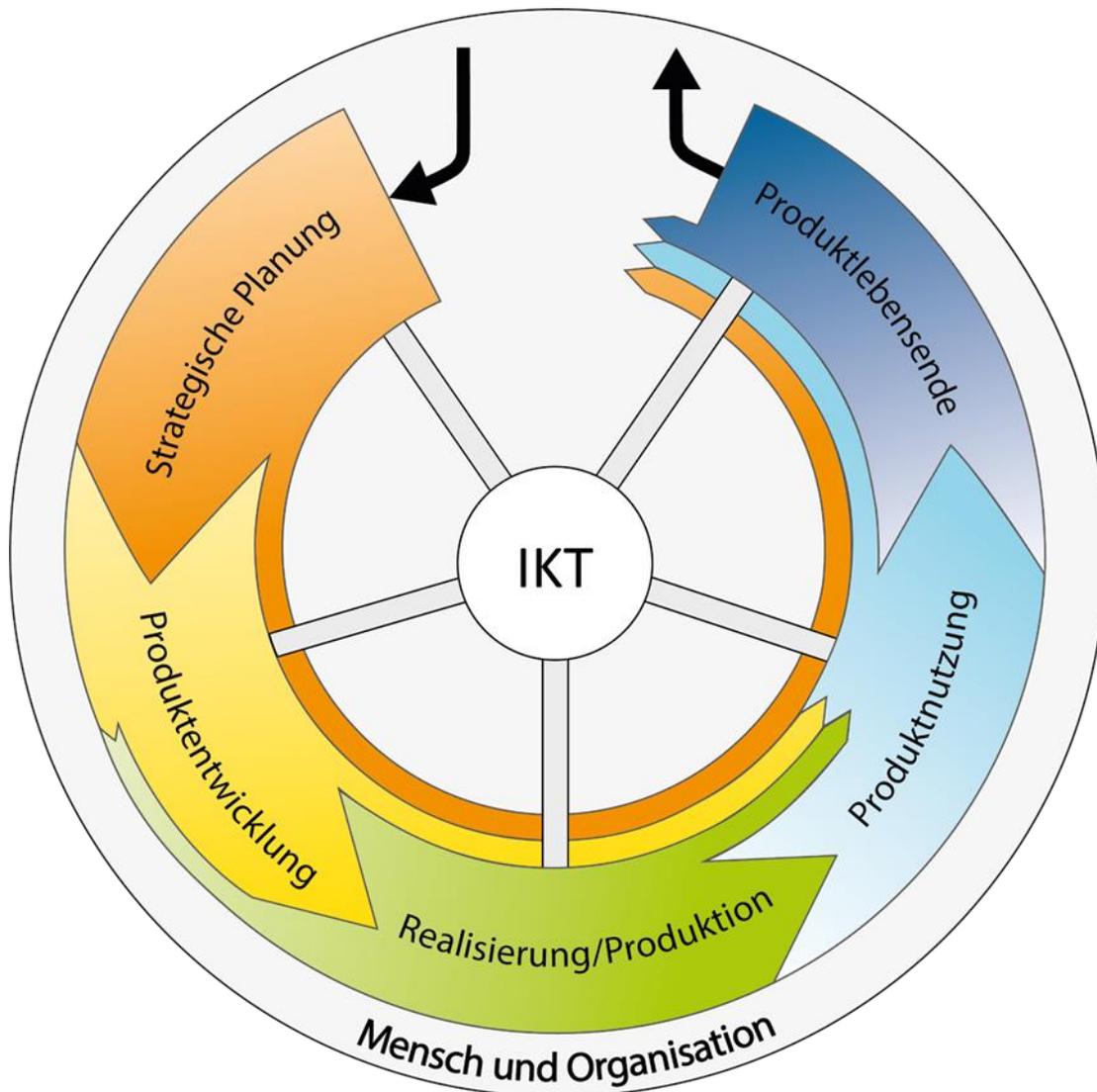


Abbildung 8: Holistischer Produktlebenszyklus für die Richtlinie VDI 2000 (verwendet in (Gräßler et al. 2018a; VDI 2206:2020))

2.2.1 Interdisziplinäre Produktentwicklung mit dem V-Modell der Richtlinie VDI 2206

Als Teil des „Holistischen Produktlebenszyklus“ der VDI 2000² (Abbildung 8) beschreiben die Inhalte der Richtlinie VDI 2206 „Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme“ (VDI 2206:2020) substanzielle Aufgaben der Lebenszyklusphase Produktentwicklung. Dabei wird ein besonderer Fokus auf die interdisziplinäre Zusammenarbeit und die gemeinsame Entwicklung interdisziplinärer mechatronischer und cyber-physischer Systeme gelegt. Das V-Modell als Kerngrafik und essentielles Abbild der

² Die finale Benennung und Veröffentlichung können Namensänderungen beinhalten. Die Inhalte basieren auf den angegebenen Vorveröffentlichungen der Inhalte durch Beteiligte.

Richtlinie beschreibt dabei die sachlogische Vernetzung von Aufgaben der interdisziplinären Produktentwicklung (Gräßler et al. 2018b). Dieses V-Modell, welches für die Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme beschrieben wird, basiert auf der Erstauflage der VDI 2206 Richtlinie aus dem Jahr 2004 (VDI 2206:2004). Das dort verwendete V-Modell ist in Abbildung 9 dargestellt. Viele Bestandteile und insbesondere die Form des Modells aus dem Jahr 2004 wurden übernommen. Die Überarbeitung des Modells und der Richtlinie ist nicht als Korrektur sondern als Erneuerung auf Basis diverser Veränderungen und Potenziale (Gräßler et al. 2016c) anzusehen.

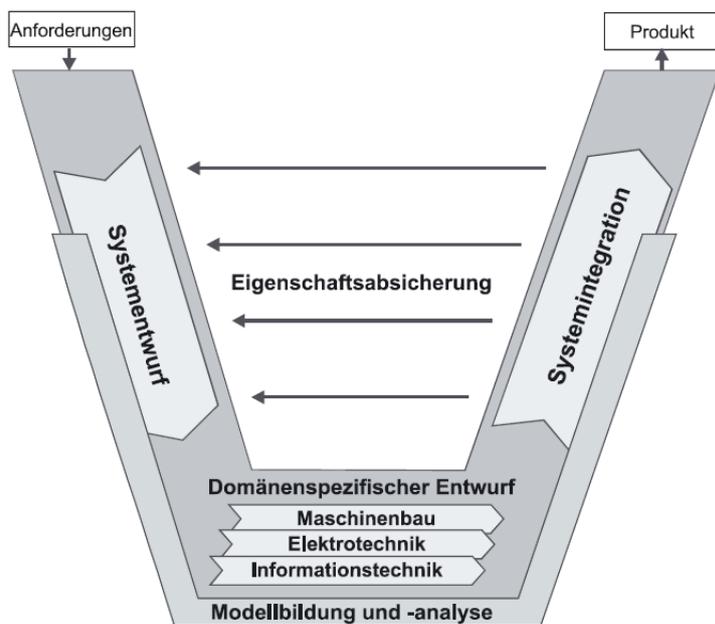


Abbildung 9: V-Modell der Richtlinie VDI 2206 in Erstauflage im Jahr 2004 (VDI 2206:2004)

Basierend auf den Inhalten und Grafiken der Erstauflage wurde durch die Experten des Fachausschusses VDI GMA FA 4.10 „Interdisziplinäre Produktentstehung“ die Neuaufgabe initiiert. Zentrale Inhalte der neuen Richtlinie und des neuen V-Modells werden in der Folge erläutert. Das Vorgehen, die Motivation und die Potenziale zur Überarbeitung sind in den Veröffentlichungen (Gräßler 2017; Gräßler und Hentze 2017; Gräßler et al. 2016c; Gräßler et al. 2018b) detailliert und beschrieben. Das angewendete wissenschaftliche Vorgehen der Überführung der Richtlinie aus dem Jahr 2004 in die aktuell im Grün-druck vorliegende Fassung der neuen Richtlinie 2206 ist in Abbildung 10 schematisch illustriert. Diese fasst die unterschiedlichen Aktivitäten hinsichtlich der Erarbeitung der Ergebnisse sowie der Validierung im wissenschaftlichen und industriellen Umfeld zusammen.

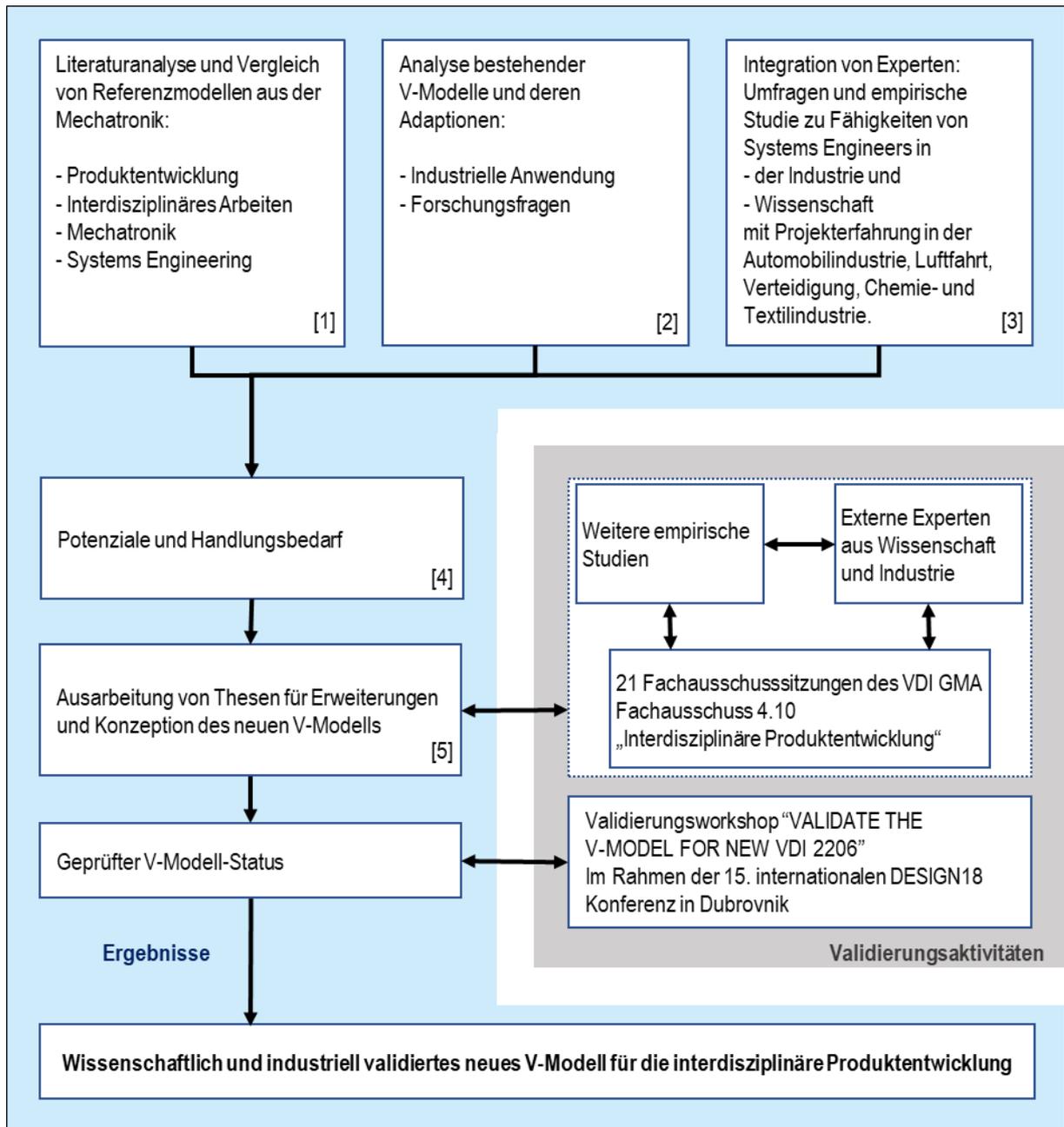


Abbildung 10: Vorgehen bei der Überarbeitung der VDI Richtlinie 2206 und des V-Modells^{3,4} vgl. (Gräßler und Hentze 2020); Quellenangaben im Anhang 10.2

Eine Richtschnur für das grundsätzliche Vorgehen der Richtlinie bietet weiterhin das aus der Softwareentwicklung stammende (Boehm 1976) und an die Anforderungen der Mechatronik angepasste V-Modell, welches wesentliche Teilschritte bei der Entwicklung

³ Literaturangaben: [1] bis [5] siehe Anhang 10.2; ebenfalls ist im Anhang 10.2, die Originalfassung aus der Vorveröffentlichung (Gräßler und Hentze 2020) die Originalfassung (englisch) hinterlegt

⁴ Anzahl der Fachausschusssitzungen Stand Mai 2020

mechatronischer Systeme beschreibt (Bröhl 1995). Die Modellform wurde aus der Erstfassung der VDI-Richtlinie 2206 Version 2004 (VDI 2206:2004) beibehalten und an die aktuellen Rahmenbedingungen und inhaltlichen Neuerungen angepasst (Abbildung 11). Bei der Anwendung dieses Modells in der Praxis ist zu beachten, dass die zeitliche Abfolge der Teilschritte von der logischen Reihenfolge abweichen kann: So kann es z. B. sinnvoll sein, kritische Teilsysteme zur Minimierung des Entwicklungsrisikos fast bis zur Serienreife zu bringen, bevor mit der Entwicklung des davon abhängigen komplexen Gesamtsystems begonnen wird.

Das überarbeitete V-Modell beschreibt eine sachlogische Verknüpfung von Aufgaben und Aktivitäten der interdisziplinären Produktentwicklung. Es ist kein Ablaufmodell, sondern dient als Rahmenwerk und Denkmodell, um den Produktentwicklungsprozess zu beschreiben. Lediglich das V-Modell in Betracht zu ziehen, verspricht keine ausreichend vollständige Vorgehensbeschreibung der mechatronischen und cyber-physischen Systementwicklung. Das Rahmenwerk des V-Modells muss mit disziplinspezifischen und detaillierten Entwicklungs- und Organisationsmethoden angereichert und kombiniert werden. Beispielsweise kann die Organisationsform in der Entwicklung mit dem V-Modell sowohl auf agilen Prinzipien als auch auf Projektmanagementmethoden beruhen. Das V-Modell beschreibt eine generische Ablauflogik für den Entwicklungsprozess, welche fallweise auszuprägen ist.

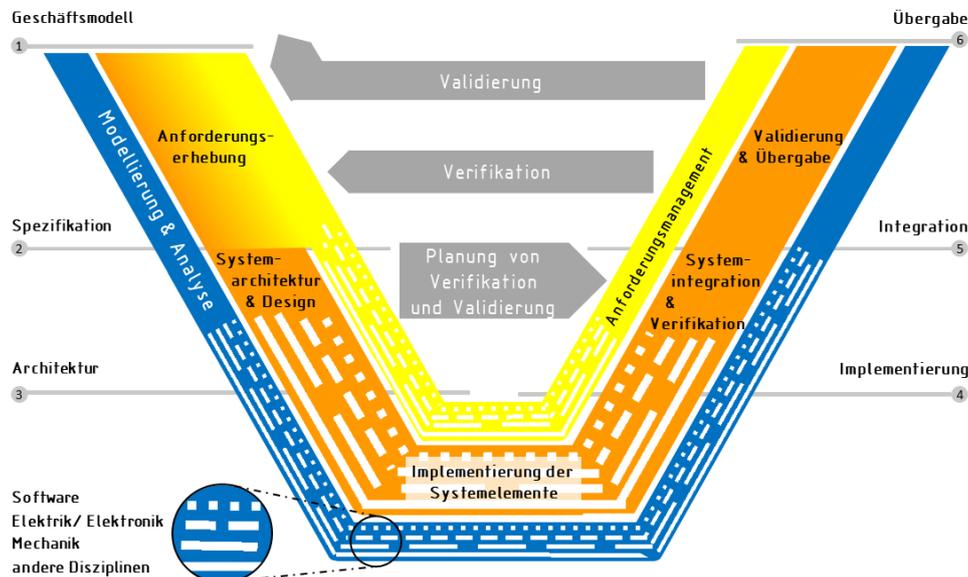


Abbildung 11: Das überarbeitete V-Modell für die Richtlinie VDI 2206 für die Neuauf-
lage (Gräßler et al. 2018a; Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)⁵

⁵ Arbeitsstand Mai 2020 des VDI GMA FA 4.10 „Interdisziplinäre Produktentstehung“ sowie Publikation im Gründruck/ Entwurf September 2020 (VDI 2206:2020)

Grundstruktur des V-Modells

Das V-Modell der Richtlinie VDI 2206 besteht grundlegend aus drei Strängen. Der zentrale Strang in orange beschreibt die Kernaufgaben der Produktentwicklung. Der innere, gelbe Strang beschreibt den Umgang und die Arbeit mit Anforderungen, das Anforderungsmanagement sowie dessen Absicherung. Der äußere, blaue Strang repräsentiert die Modellbildung und Analyse. Die drei Stränge unterteilen sich grafisch im unteren Bereich des V-Modells in verschiedene Disziplinen. Diese Teilung symbolisiert keine starre Trennung, sondern stellt dar, dass sich die System- und Systemelemententwicklung in unterschiedliche Disziplinen aufteilt, die aber vernetzt und integriert zusammenarbeiten. Dies wird durch einen durchgängigen Hintergrund unterstrichen, da die Verzahnung und Abstimmung unter den Disziplinen entscheidende Erfolgsfaktoren sind. Mögliche Disziplinen sind dabei die Mechanik, Elektrik, Elektronik, Software sowie beliebige weitere, wie Pneumatik, Hydraulik, Humanwissenschaften, etc. Diese Disziplinen sind im Hauptstrang ebenso relevant wie in der Modellbildung und Analyse sowie im Anforderungsmanagement. (Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)

Eine Übersicht der Kernaktivitäten des V-Modells, welche in der Folge aufgenommen werden, gibt Abbildung 12.

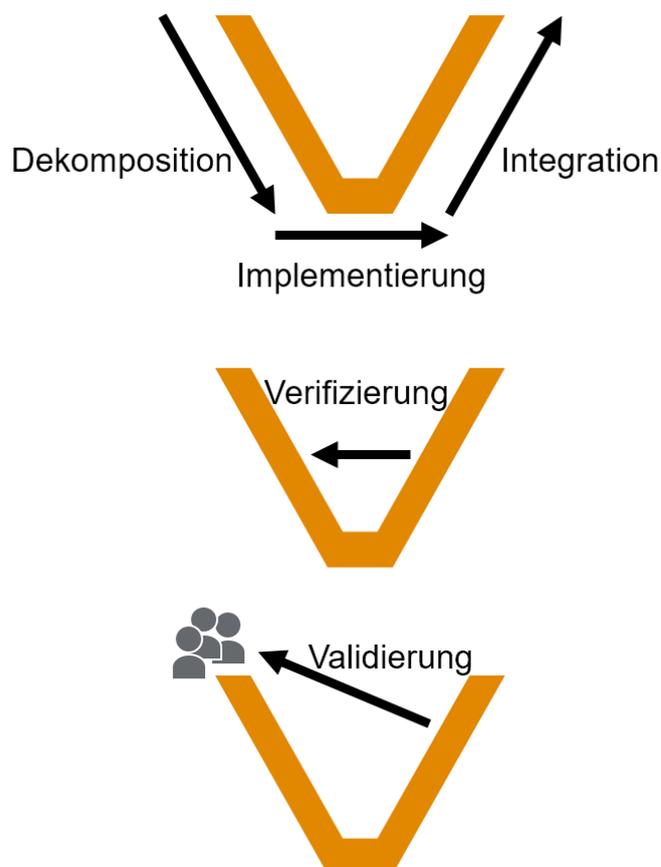


Abbildung 12: Kernaktivitäten des V-Modells (Gräßler 2018)

Diese stellt in vereinfachter Darstellungsform die wichtigsten Inhalte, die Dekomposition auf der linken Seite sowie die Integration auf der rechten Seite des V-Modells dar. Die Implementierung in der Spitze des V-Modells sowie die Verifizierung und Validierung in der Differenzierung der Bezugspunkte auf der linken Seite (Anforderungen und Bedürfnisse) werden erläutert.

Durchgängiges Requirements Engineering (RE)

Das durchgängige Requirements Engineering, auch Anforderungsentwicklung, setzt sich aus den Bestandteilen der Anforderungserhebung und des Anforderungsmanagements zusammen (Gräßler et al. 2016c). Die Anforderungserhebung, die Strukturierung und die Analyse von Anforderungen bilden die Grundlage des Entwicklungsmethodischen Vorgehens (Gräßler et al. 2018f). Aus den Bedürfnissen und Wünschen der unterschiedlichen Stakeholder, insbesondere des Kunden, werden Anforderungen abgeleitet und in strukturierter und technisch formalisierter Form dokumentiert (Ebert 2019). Die Anforderungen sind zunächst aus Sicht des Stakeholders formuliert und beschreiben nicht das System, sondern die Bedürfnisse und Wünsche der Stakeholder an das System. Diese werden in der Folge auf die Systemsicht transferiert (Walden et al. 2015): Das bedeutet, dass die Spezifikation, welche das Ergebnis der Anforderungserhebung ist, eine Sammlung der Anforderungen an das zu entwickelnde System darstellt. Stakeholder sind nicht nur externe Personen oder Gruppen, sondern auch an der Entwicklung beteiligte Abteilungen oder Personen. Die Anforderungssammlung ist durch die Befragung des Kunden niemals vollständig: Es bedarf stets einer intensiven und strukturierten Analyse, um eine vollständige Spezifikation zur Verfügung stellen zu können. Um eine so weit wie möglich vollständige Spezifikation zu erarbeiten, bietet die Richtlinie VDI 2206 als unterstützende Methode eine Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Produkte an. Diese soll den Anwender dabei unterstützen, eine Vollständigkeit und Güte der Spezifikation zu erreichen (Gräßler et al. 2018a); (vgl. auch Anhang 10.2, S. 136). Die Hauptmerkmalliste hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern stellt dem Anwender einen Rahmen zur Identifikation möglicher Einflüsse und Anforderungen für die Entwicklung eines interdisziplinären mechatronischen oder cyber-physischen Produkts zur Verfügung. Die Anwendung kann in Form einer Checkliste durchgeführt werden und dient dabei der Assoziation von Merkmalen für die Spezifikation. Die Hauptmerkmalliste ist in verschiedene Gruppen untergliedert, sodass je nach individueller Anwendung nur Fragmente der Liste eingesetzt werden können. Die Struktur der Hauptmerkmalliste orientiert sich an der ursprünglichen Liste (Pahl und Beitz 1997) und ergänzt die Assoziationsmerkmale, die für die Entwicklung von mechatronischen und cyber-physischen Systeme relevant sind. (Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)

Hauptmerkmal		Nebenmerkmal
Funktion	Stoff	<ul style="list-style-type: none"> Eigenschaften der eintretenden Stoffe Materialfluss und Materialtransport Vorgeschriebene Werkstoffe Speicherung Hilfsstoffe Eigenschaften austretender Produkte
	Energie	<ul style="list-style-type: none"> Eingangsenergie Leistung Zustandsgrößen Verluste Speicherung Wirkungsgrad Energiebilanz Transformation Energie, die das System verlässt
	Signal	<ul style="list-style-type: none"> Eingangsinformationen Ausgangsinformationen Betriebsgeräte Überwachungsgeräte Signalform Datenaustausch Datenspeicherung
	Schnittstellen	<ul style="list-style-type: none"> Mechanisch Software Elektrisch/Elektronisch Update/Upgrade Umwelt Digitale Kommunikation
	Stakeholder	<ul style="list-style-type: none"> Kompetenz Handhabung
		<ul style="list-style-type: none"> Geschäftsmodell

Hauptmerkmal		Nebenmerkmal
Organisation	Markt	<ul style="list-style-type: none"> Compliance Wettbewerbsanalyse Kundensegment Kundenverhalten und -bedürfnisse Marktübliche Standards Verkaufszahlen Marktanalyse/ Benchmarking
	Einkauf	<ul style="list-style-type: none"> Marke-or-Buy-Strategie A-Lieferanten Local-Content Katalogbaugruppen Operativer/strategischer Einkauf Datenaustausch
Realisierung (Produktion)	Fertigung	<ul style="list-style-type: none"> Einschränkungen durch Produktionsstätten Dimensionen Fertigungsverfahren Fertigungsmittel Mögliche Qualität und Toleranzen
	Montage	<ul style="list-style-type: none"> Montagevorschriften Zusammenbau Installation Prinzip Fundamentierung Werkzeuge Hilfsstoffe Sicherheitsdatenblätter
	Transport	<ul style="list-style-type: none"> Begrenzung durch Hebezeuge Transportmittel Wege Versandart und -bedingungen Lieferzeit
		<ul style="list-style-type: none"> Mess- und Prüfmöglichkeiten

Abbildung 13: Ausschnitt der Hauptmerkmalliste der neuen Richtlinie VDI 2006⁶ (VDI 2206:2020)

Als zweiter Bestandteil der Requirements Engineerings beschreibt das Anforderungsmanagement den Umgang mit Anforderungen während der gesamten Produktentwicklung (Ebert 2019; Gräßler et al. 2016c; Pohl und Rupp 2015). Das bedeutet, dass sowohl die Strukturierung, die Zuordnung, die Analyse und die Integration von Veränderungen von Anforderungen berücksichtigt werden müssen. Der Umgang mit Anforderungen wird da-

⁶ Auf die vollständige Hauptmerkmalliste wird im Anhang 10.2 verwiesen.

bei von diversen Tools, Datenbanken und Methoden unterstützt. Das Anforderungsmanagement ist dabei sowohl für die oberen Systemebenen des Gesamtsystems relevant als auch für das Design und die Implementierung von Systemelementen in oder zwischen mehreren Disziplinen. Diese unterschiedlichen Systemlevel beeinflussen sich gegenseitig, sodass Änderungen von Anforderungen aus einer Disziplin in das Gesamtprojekt zurückgespiegelt werden müssen. Dieser Prozess der Rückspiegelung von Änderungen an die Spezifikation ist ein wichtiger Bestandteil des Anforderungsmanagements. Die Kommunikation, Dokumentation und Definition von Änderungen nimmt mit der Komplexität des Gesamtsystems an Aufwand zu (Gräßler et al. 2018e; VDI 2206:2020).

Kontrollpunkte

Hinterlegt werden die drei Stränge des V-Modells von einer Struktur aus sechs Kontrollpunkten (Gräßler et al. 2018a; Gräßler und Hentze 2020). Diese repräsentieren den Reifegrad und beinhalten in ihrer Beschreibung Kontrollfragen, welche dem Anwender des V-Modells helfen sollen, den zugehörigen Entwicklungsprozess strukturiert planen und durchführen zu können. Sowohl der exakte Zeitpunkt der Anwendung als auch die Intensität der Nutzung der vorgegebenen Kontrollfragen bleibt dem Anwender überlassen. Im Gegensatz zum Projektmanagement, in welchem Meilensteine oder „Decision Gates“ als obligatorische Entscheidungspunkte beschrieben sind (Cooper 2008), geben die Kontrollpunkte dem Anwender lediglich einen inhaltlichen Leitfaden mit Hinweisen und Assoziationen zur Anwendung des entwicklungsmethodischen Vorgehens (Gräßler 2018; Gräßler et al. 2020).

Die Benennung der sechs Kontrollpunkte sowie die zugehörigen Kontrollfragen werden in Abbildung 14 wiedergegeben. Zugeordnet wurden die Kontrollpunkte der Darstellung des V-Modells in Abbildung 11, in welcher die Kontrollpunkte sowie deren Nummerierung angegeben wird. Die Erarbeitung der Kontrollfragen sowie die Zuordnung in das neue V-Modell der Richtlinie 2206 (VDI 2206:2020) wurde durch Mitglieder aus Industrie und Wissenschaft des VDI Fachausschusses 4.10 durchgeführt.

Kontrollpunkt 1: Geschäftsmodell



- Trägt der Entwicklungsauftrag zum Geschäftsmodell und zur Rendite bei?
- Ist der Zweck der Produktentwicklung bekannt?
- Sind alle Impulse für das Anforderungsprofil aufgenommen worden? – Use Cases, Stakeholderanalyse, Abgrenzung aus Sicht Produktprogrammplanung etc.
- Liegt ein digitales Geschäftsmodell oder eine Einbindung in Dienste eines solchen Modells vor?
- Ist allen Beteiligten klar, welches Geschäftsmodell warum verfolgt wird?
- Sind sämtliche relevanten Stakeholder identifiziert und eingebunden?
- Sind erfolgversprechende Use-Cases identifiziert? (Marktrelevanz, funktionaler Mehrwert etc.)
- Sind alle Impulse aus Technologieentwicklung, Markt-betrachtung, Wettbewerbsanalyse, Benchmark etc. berücksichtigt?
- Fördern und unterstützen die Produkt- und Prozessideen das verfolgte Geschäftsmodell?
- Sind die notwendigen Produkt-/ Produktionstechnologien bekannt?
- Ist die Technologie verfügbar? Wie gut beherrschen wir diese?
- Ist ein adäquates Risikomanagement-konzept aufgesetzt worden?

Kontrollpunkt 2: Spezifikation



- Sind aus der Hauptmerkmalliste alle relevanten Anforderungen abgeleitet worden? (alle Nebenmerkmale erfasst bzw. überprüft?)
- Sind die Anforderungen eindeutig formuliert und/oder messbar?
- Sind die Anforderungen vollständig, richtig und widerspruchsfrei?
- Sind die in den Anforderungen geforderten Spezifikationen nachvollziehbar und realistisch?
- Ist die Spezifikation lösungsneutral formuliert (unabhängig von Effekt/ Wirkprinzip)?
- Sind die spezifizierten Anforderungen absicherungsfähig und sind die Methoden und Mittel zur Verifikation und Validierung bekannt und verfügbar?
- Wurde zwischen Fest- und Wunschforderungen bzw. Optimierungszielen unterschieden?
- Ist ein Prozess zur Änderung der Anforderungen vereinbart?

Kontrollpunkt 3: Architektur



- Sind alle relevanten (Sub-)Systeme und Elemente vollständig spezifiziert?
- Sind die relevanten lokalen Schnittstellen spezifiziert und Übergabeinformationen beschrieben?
- Sind relevante Schnittstellen zur globalen Vernetzung des Systems (mit dem IoT) bekannt und beschrieben?
- Sind alternative Effektstrukturen und Wirkprinzipien analysiert und bewertet worden?
- Sind die Bewertungs- und Gewichtungsfaktoren für die Auswahl der Systemarchitekturalternativen vom Kunden bestätigt? Wurde die bestgeeignete Systemarchitektur-alternative ausgewählt?
- Sind die Anforderungen in der Funktionsstruktur repräsentiert?
- Wurden bestehende Elemente (durch geringe Anpassung) wiederverwendet?
- Ist die Planung der Eigenschafts-absicherung abgeschlossen?
- Gibt es Abweichungen von der Spezifikation und wurden erforderliche Änderungen kommuniziert?

Kontrollpunkt 4: Implementierung



- Wurden projektspezifische Vorgaben zu Fertigungsverfahren beachtet?
- Wurde eine einheitliche Beschreibungssprache zur Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den Systemen/ Systemelementen angewendet?
- Wurden Standards (Gesetze, Unternehmen, Kunden etc.) für die Implementierung berücksichtigt?
- Wurden vorhandene Maschinen und Anlagen berücksichtigt?
- Wurden bestehende Module (durch geringe Anpassung) wiederverwendet?
- Sind alle Systemelemente modelliert?
- Sind die vorgesehenen Zulieferteile verfügbar?
- Gibt es Abweichungen von der Spezifikation und wurden erforderliche Änderungen kommuniziert?

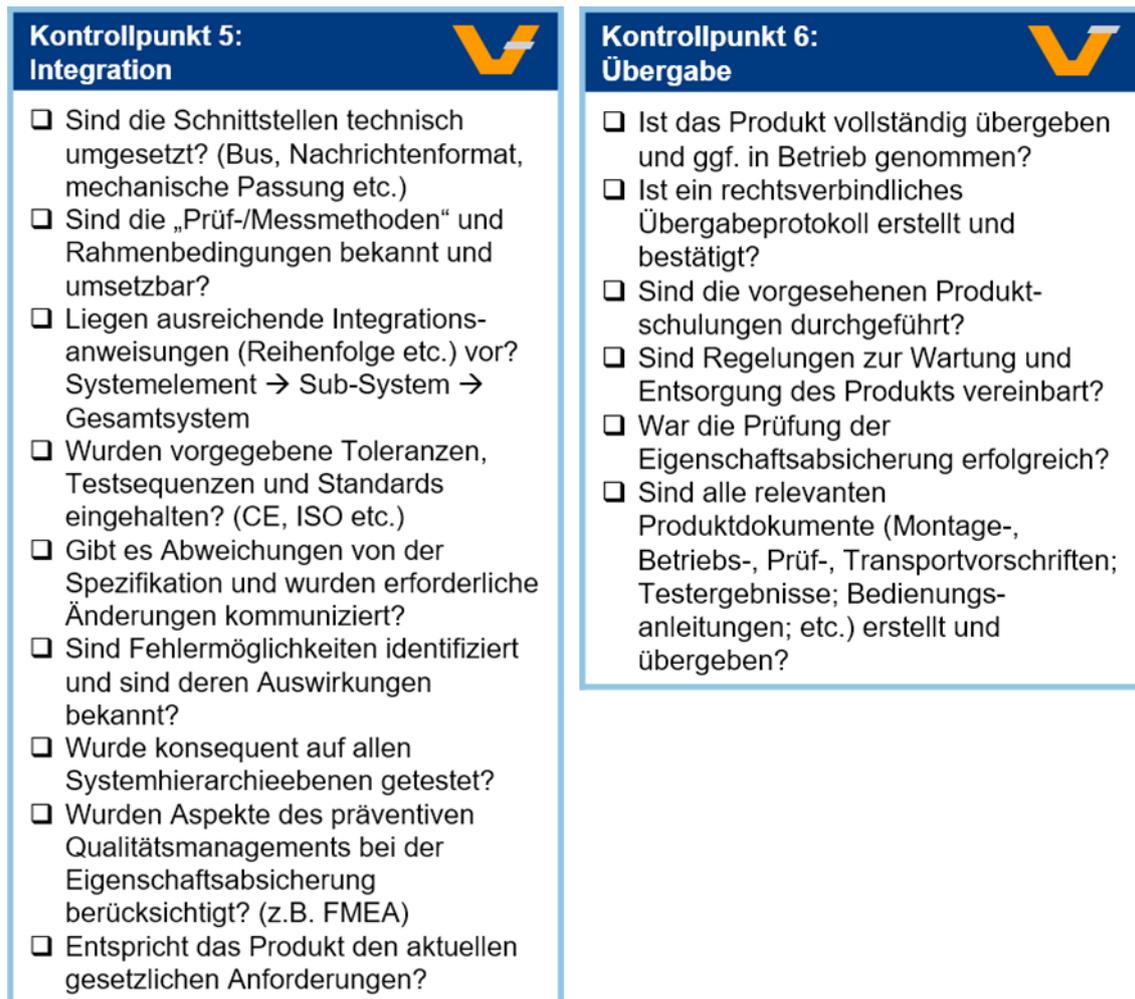


Abbildung 14: Die sechs Kontrollpunkte des V-Modells (Gräßler et al. 2018a; Gräßler et al. 2018b; Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)

Eigenschaftsabsicherung:

In der Mitte des Modells, zwischen den beiden Seiten des V's, verdeutlichen drei exemplarische Pfeile Aufgaben der Eigenschaftsabsicherung. Dabei stehen die einzelnen Pfeile jeweils repräsentativ für Aufgaben, die kontinuierlich, mehrfach und beliebig häufig von hoher Relevanz sein können. „Planung V&V“ beschreibt dabei die Notwendigkeit, bereits auf der linken Seite des V-Modells im Entwurf des Systems Kriterien für die Validierung und Verifikation festzulegen. Die Planung geht dabei über die Beschreibung einer „guten“ Anforderung (Ebert 2019; Feldhusen und Grote 2013; Pohl und Rupp 2015) hinaus. Diese beschreibt nicht nur, dass eine Anforderung abgesichert werden muss, sondern auch, in welcher Weise und mithilfe welcher Verfahren dies geschehen soll. Die repräsentativen Pfeile Validierung und Verifikation teilen die Eigenschaftsabsicherung in die Fragen "Haben wir richtig entwickelt?" in der Verifikation und "Haben wir das Richtige entwickelt?" in der Validierung. Validierung geschieht dabei, illustriert durch einen nach oben gerichteten Pfeil, gegenüber den Bedürfnissen des Kunden an das Gesamtsystem.

Hier wird nicht die Erfüllung der technischen Spezifikation überprüft, sondern die Erfüllung der Bedürfnisse des Kunden oder eines anderen Stakeholders an das System und dessen Funktionen. (Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)

Modellbildung und Analyse

Repräsentiert durch den blauen parallelen Strang im V-Modell wird das interdisziplinäre entwicklungsmethodische Vorgehen durch Modelle und Analysen unterstützt. Methoden der Anforderungserhebung und -analyse generieren bereits in frühen Phasen computer-gestützte Modelle: Anforderungszusammenhänge oder Stakeholder-Modelle sind gängige Beispiele⁷. In der Folge wird eine Vielzahl an Modellen in der Entwicklung der Systemarchitektur und des Designs erzeugt, welche die Entwicklung des Zielprodukts unterstützen. Wie grafisch illustriert, betrifft die Modellbildung und Analyse ebenso die einzelnen Disziplinen. Jede Disziplin verfügt dabei über eine Vielzahl von spezifischen Modellen. Im Kontext der modellbasierten Entwicklung und des MBSE (Model-Based Systems Engineering) sind die Modelle der Disziplinen mit den Modellen auf Systemebene verknüpft und verfügen über einen aktiven Austausch von Informationen und Eigenschaften. Neben der Produktentwicklung sind ebenfalls Modelle und Analysen in angrenzende Bereiche zu berücksichtigen und zu nutzen (Köbler und Paetzold 2018; Weilkiens und Soley 2014): Aspekte der Risikobewertung, der Qualität, des Projektmanagements oder des Controllings sind dabei nur wenige Beispiele für Modelle, die mit der Entwicklung verknüpft von großer Relevanz sein können. Zur Bildung der Modelle gehört eine aktive Analyse und Synthese. Dies betrifft die Auswertung, die Interpretation und die Simulation von Systemelementen, Subsystem und dem Gesamtsystem. Modellbildung und Analyse beinhaltet dabei auch die virtuelle und digitale Repräsentation des Produkts sowie der zugehörigen Prototypen und Muster. (Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)

Systemarchitektur und -design

Die Kernarbeit in der Gestaltung der interdisziplinären Systementwicklung findet in der Architektur und dem Design statt. Dabei unterscheidet sich die Architektur als Struktur und Verhaltensbeschreibung vom Design, der detaillierten Gestaltung der Elemente. Die Systemarchitektur zeichnet auf Basis der Dekomposition (vergleiche Abbildung 12) des Systems entlang der linken Seite des V-Modells, ein theoretisches Bild der verschiedenen Bestandteile (Subsysteme, Elemente) des Gesamtsystems sowie deren Verknüpfungen und Verhalten. Design beschreibt die Spezifikation, Ausarbeitung, Gestaltung und die Entwicklung von Systemelementen und Subsystemen. Diese Aufgaben beinhalten eine Vielzahl von Methoden, Modellen und Vorgehensweisen: Beispielsweise sind die Identifikation von Funktionen und Morphologien sowie das Zusammenspiel verschiedener

⁷ Realisiert beispielsweise in der Modellierungssprache SysML und in gängiger Anforderungssoftware wie „IBM rational Doors“ oder „Magic Draw“

Systemelemente und Subsysteme zu analysieren. Das Ziel ist die Systemarchitektur, welche eine Beschreibung des Systems mit Komponenten und Subsystemen sowie dem Verhalten darstellt. Die Anforderungen an das Gesamtsystem werden auf die verschiedenen Systemelemente der unterschiedlichen Systemebenen allokiert und in der Folge im Design und der Implementierung für die Realisierung spezifiziert.

Hier spielt die Aufteilung der Aktivitäten und Aufgaben in unterschiedliche Disziplinen eine entscheidende Rolle: Die Systemarchitektur muss als interdisziplinärer Entwurf vollständig abgestimmt sein, sodass die einzelnen Disziplinen oder mehrere Disziplinen gemeinsam die Ausarbeitung der Subsysteme und Systemelemente in der Implementierung beginnen können. Dabei ist zu beachten, dass eine Vielzahl an Subsystemen oder Systemelementen eine intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit erfordern. So kann, wie es das V-Modell in der Beschreibung als generisches Denkmodell zulässt, für ein Subsystem ein weiteres gesamtes V-Modell notwendig sein, um das Subsystem erfolgreich zu entwickeln. (Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)

Implementierung

Die Implementierung (vergleiche Abbildung 12) der Systemelemente meint die Erzeugung, Produktion, Programmierung oder die detaillierte Ausarbeitung eines Systemelements. Implementierung kann in unterschiedlichen Disziplinen grundsätzlich vollkommen unterschiedlich umgesetzt werden. Implementierung beschreibt nicht ausschließlich die Erzeugung von physischen Gegenständen, der Hardware, sondern darüber hinaus auch die Realisierung einer detailliert spezifizierten und geplanten Aktivität. Beispielsweise kann sowohl ein theoretisches Modell durch Code in Matlab implementiert werden als auch eine Konstruktionszeichnung erstellt werden. Gängiges Beispiel dafür ist die Umsetzung eines UML Diagramms als Architektur in eine Programmiersprache, welche die Implementierung darstellt.

Auch die Herstellung einer physischen Komponente in Form eines Musters oder Prototypen ist eine Implementierung. Implementieren wird dabei häufig als „Hands on“ beschrieben, was die tatsächliche Realisierung und nicht deren Planung oder Spezifikation beschreibt. Die Implementierung findet in den verschiedenen beteiligten Disziplinen statt, eine enge Verwobenheit und Kommunikation ist jedoch unumgänglich. (Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)

Integration

Unter Integration (vergleiche Abbildung 12) wird der Zusammenschluss von Elementen (Funktionen, Systemelemente, Subsysteme) zu einem übergeordneten Gesamtsystem (je nach Reifegrad z. B. Labormuster, Funktionsmuster, Vorserienprodukt oder Produkt) verstanden. Die Integration führt die implementierten Systemelemente zusammen. Ziel ist das Gesamtsystem zur Erfüllung der Stakeholder-Bedürfnisse, welches in der Folge validiert werden kann. Der Prozess der Integration ist ebenfalls bei Subsystemen, bei Mustern oder bei Prototypen von großer Relevanz, da diese einen Teilschritt auf dem

Weg zum Gesamtsystem darstellen. Die Integration ist stets ein Wechselspiel mit den Aufgaben der Eigenschaftsabsicherung. Unabhängig vom Systemlevel können sowohl Einzelelemente verifiziert werden als auch bereits integrierte Subsysteme. Die Integration der Elemente zu Subsystemen folgt dabei stets einem strukturierten Plan, der im Rahmen der Systementwicklung auf dem linken Schenkel des V-Modells erarbeitet und beschrieben wurde, bis das vollständige Gesamtsystem erreicht wird und dieses in all seinen Eigenschaften und Merkmalen abgesichert wird. (Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)

Übergabe

Die Übergabe beschreibt, dass das System bzw. das Ergebnis, unabhängig davon, ob es sich um ein physisches System, einen Prototyp, eine Simulation etc. handelt, an einen Stakeholder oder den folgenden Abschnitt des Lebenszyklus übergeben wird. Dies kann ein Kunde sein, ebenso eine andere Abteilung, ein Kollege oder auch ein folgender Abschnitt in der Produktentwicklung, in der das System weiterentwickelt wird. Die Übergabe stellt den Abschluss einer Entwicklungsaufgabe oder einer Entwicklung dar. Der Übergang in eine folgende HPLZ-Phase, siehe Abbildung 8 (Gräßler et al. 2018a) beispielsweise in die Realisierung und damit die Produktion des Systems ist eine mögliche Option. (Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)

2.2.2 Systems Engineering

„Systems Engineering ist eine strukturierte multidisziplinäre Vorgehensweise für die Entwicklung komplexer technischer Gesamtsysteme zur Erzielung eines disziplinübergreifenden Optimums in einem festgelegten Zeit- und Kostenrahmen.“ (Gräßler 2015b; Gräßler et al. 2018c)⁸

Diese Definition spiegelt die Kernaspekte etablierter Definitionen, Literatur und Handbücher wider. Besonders das Systemdenken auf Basis der Systemtheorie (Systems Thinking), die eindeutige Abgrenzung des System-of-Interest (SoI), die Einnahme einer gezielten Sichtweise (System views) auf das System und der Umgang mit Systemebenen (System levels) kennzeichnen die theoretische Beschreibung des Systems Engineerings (Checkland 1995; Händle und Jensen 1974).

Ein System (Abbildung 15) ist, wie bereits in den 1930er Jahren von Biologen zusammengefasst (van Bertalanffy 2003), eine eindeutig abgegrenzte Einheit und besteht aus verschiedenen Subsystemen und (System-)Elementen und deren Beziehungen. Es besitzt eine Systemgrenze, welche zu definieren ist und aus verschiedenen Perspektiven unterschiedliche Ausprägungen annehmen kann. Das (System-)Element stellt dabei die kleinste Einheit in der Systemtheorie dar (Ashby 1947; Hubka 1984; Walden et al. 2015).

⁸ Erstveröffentlichung in (Gräßler 2015b), überarbeitet und ergänzt in (Gräßler et al. 2018c).

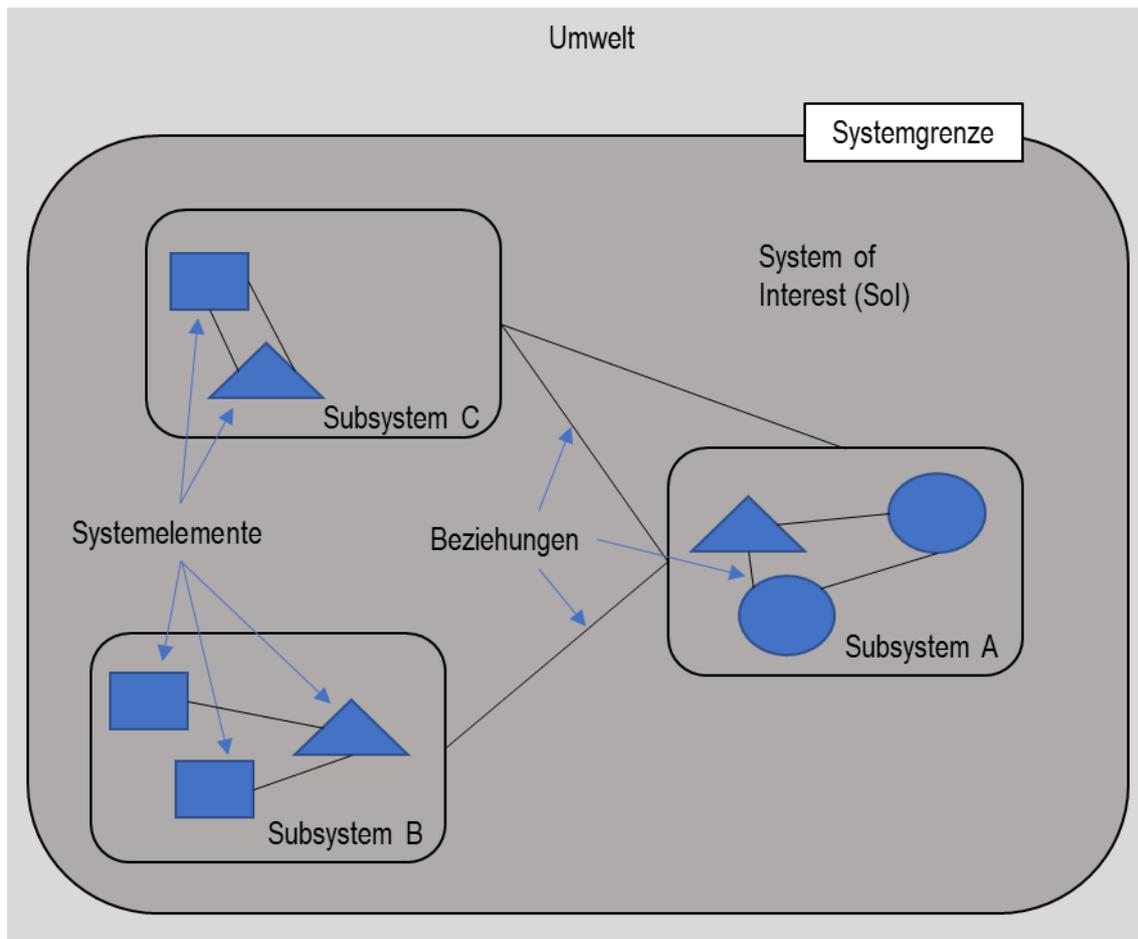


Abbildung 15: System of Interest, Subsysteme, (System-)Elemente und Beziehungen (Eigene Darstellung ähnlich zu (van Bertalanffy 2003; Walden et al. 2015, 7-8)

Hinsichtlich der vorliegenden Komplexität eines Systems werden Systeme in drei Arten aufgeteilt (Walden et al. 2015): Einfache Systeme bestehen aus wenigen Elementen mit wenigen Beziehungen. Die Elemente interagieren dabei gar nicht oder wenig. Komplizierte Systeme setzen sich aus einer Vielzahl von Elementen und Beziehungen zusammen, deren Interaktionen auf der Basis definierter Wege durchgeführt werden. Die Interaktionen sind damit vielfältig, jedoch vorhersehbar und berechenbar. Komplexe Systeme erweitern das komplizierte System um eine erhöhte Dynamik: Die Interaktion der Elemente ist nicht vorhersehbar und berechenbar. Die Elemente können selbstorganisierende Eigenschaften haben. (Walden et al. 2015, 9, 82)

Neben der normierten Basis der ISO/IEC/IEEE 15288 (ISO 15288) beschreiben gängige Handbücher in generischen Prozessen, in welcher Art und Weise Systems Engineering durchzuführen ist und wie diese für das individuelle Unternehmen und das individuelle Projekt ausgewählt und angepasst werden müssen. Dieser Anpassungsprozess wird als „Tailoring“ bezeichnet. Tailoring bietet dem Anwender die Möglichkeit, ein generisch beschriebenes Vorgehen an die branchen-, unternehmens- und produktspezifischen Gegebenheiten und Randbedingungen anzupassen. Gängig ist ein zweistufiges Vorgehen

(Abbildung 16), welches ein Tailoring der generischen Beschreibung zunächst auf Unternehmens- oder Organisationsebene vorsieht. Diese Anpassungen sind in der Folge Grundlage für die zweite Stufe, das Tailoring für das individuelle Projekt (Haberfellner 2012; NASA 2008; Tschirner 2016; U.S. Department of Transportation 2009; United States Department of Defense 2001; Walden et al. 2015, 162f.).

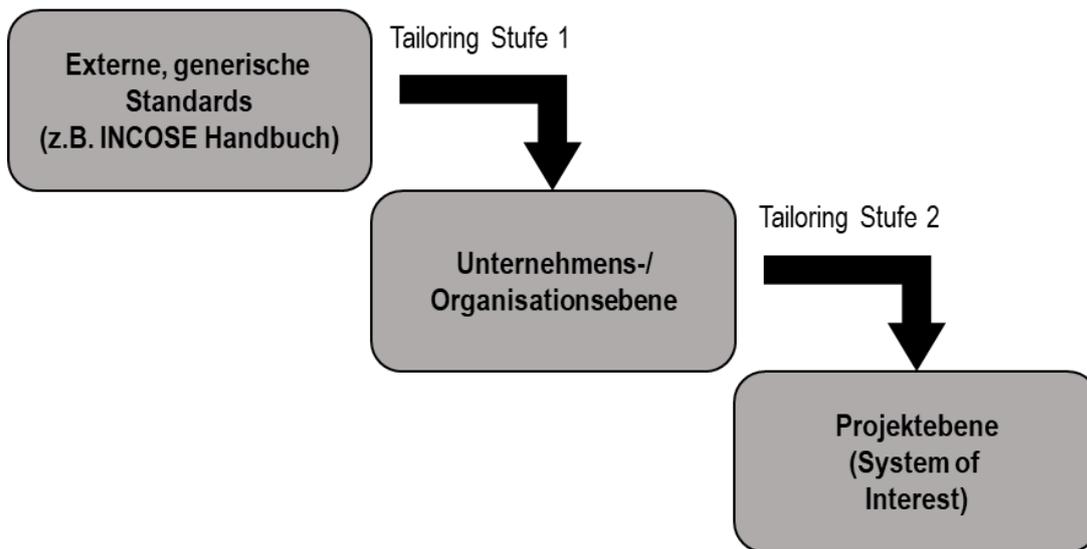


Abbildung 16: Tailoring als zweistufiger Anpassungsprozess (in Anlehnung an (Walden et al. 2015, 162ff.))

Systems Engineering ist ein ganzheitlicher Ansatz und nicht auf die Entwicklung klassischer technischer Produkte beschränkt. Auch im Bauwesen oder in der Sozialwissenschaft werden Systems Engineering und dessen Methoden angewendet, wenn es gilt, komplexe und interdisziplinäre Probleme zu lösen (Schutz 2012). Dabei ist Systems Engineering eine methodische Komponente in der Problemlösung, welche einen Beitrag zur Lösungsfindung leisten kann (Haberfellner 2012, S. 27).

2.2.3 Design for X

Design for X beschreibt das Vorgehen mit dem Ziel einer definierten Gerechtheit für die Entwicklung (Geupel 2001). Das Vorgehen vereint dabei verschiedene Methoden, sowie Wissen, wie das Produkt oder System so zu gestalten ist, dass das Kriterium „X“ oder der Bereich „X“ unterstützt wird (Huang 1996; Tichem 1997; Wartzack und Meerkamm 2000). Dieses „X“ kann unterschiedliche Ausprägungen annehmen, wie beispielsweise den Fokus auf Qualität (Design for Quality), auf Fertigbarkeit (Design for Manufacturing) oder auf Zuverlässigkeit (Design for Reliability) (Geupel 2001). Das „X“ kann dabei als Platzhalter für eine Lebenszyklusphase oder eine wesentliche Eigenschaft des Produkts oder Prozesses stehen (Huang 1996; Tichem 1997; Wartzack und Meerkamm 2000). Die Methoden und das Wissen über eine Methode des DfX sind dabei nicht widerspruchsfrei, weil die Anforderungen aus den unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus an

die Produktentwicklung nicht konsistent sein können, sondern sich je nach Interessenlage ausrichten (Bauer 2003; Vajna 2014, 327f., 2020, 81ff.)

2.3 Produktion und Produktionssysteme

Produktion wird als innerbetrieblicher Transformationsprozess von Inputs in einen höherwertigen Output verstanden (Kern 1992, S. 10). Produktion bezeichnet im Allgemeinen die Herstellung von Gütern und beschränkt sich nicht nur auf den industriellen Bereich. Der Begriff ist ebenfalls für beispielsweise die Landwirtschaft oder auch künstlerische Bereiche gebräuchlich. Im engeren technischen Sprachgebrauch steht er für die Erzeugung, Be- und Verarbeitung von Rohstoffen zu Halb- und Fertigerzeugnissen (Abele und Reinhart 2011, S. 233; Thommen et al. 2017, S. 168). Ein Produktionssystem ist ein System, welches einen zielorientierten Kombinations- und Transformationsprozess von eingesetzten Produktionsfaktoren vollzieht und auf diese Weise eine Leistung erbringt (Dyckhoff 2006, S. 4; Kiener 2006, S. 27). Nach Klemke et al. handelt es sich um ein soziotechnisches System mit der Aufgabe, gegebenen Input in wertschöpfenden und assoziierten Prozessen in Output, also beispielsweise Zwischen- oder Endprodukte, umzuwandeln (Klemke et al. 2010, S. 7).

Komplexe Produktionssysteme werden definiert als mehrere sich ergänzende Einzelfunktionen oder Produktionsschritte, die selbstständig Produktionsprozesse durchführen. Die Funktionen stammen aus den Gebieten Teilefertigung, Montage sowie Material-, Energie- und Informationsfluss (Brandis 2014, S. 12; REFA 1990).

2.3.1 Selbstorganisierende Produktionssysteme

Selbstorganisation und selbstorganisierende Systeme sind bereits seit den 1940er Jahren ein von der Wissenschaft untersuchtes Phänomen. Der Begriff wurde von W. Ross Ashby geprägt, der die Organisation in einem System als die Regel sieht, die aktuelle in zukünftige Stati überführt. Ein selbstorganisierendes System muss seinen Status von selbst aktiv ändern können (Ashby 1947; Seebach 2011). Ergänzende Definitionen sind die Folgen nach Barton und Lewis:

- „Unter Selbst-Organisation versteht man den Prozess, durch den eine Struktur oder ein Muster in einem offenen System ohne Spezifikation von außen entsteht.“ (Barton 1994)
- „Selbst-Organisation ist das Generieren neuer – häufig unvorhersehbarer – Formen aus der Interaktion von Komponenten niedriger Ordnung. Individuelle Unterschiede können nicht von ihren Vorläufern vorhergesagt werden.“ (Lewis 1995)

Selbstorganisierende Produktionssysteme können schematisch in ihren Grundzügen durch ein IPO Diagramm⁹ (Abbildung 17) charakterisiert werden (Gräßler et al. 2018d).

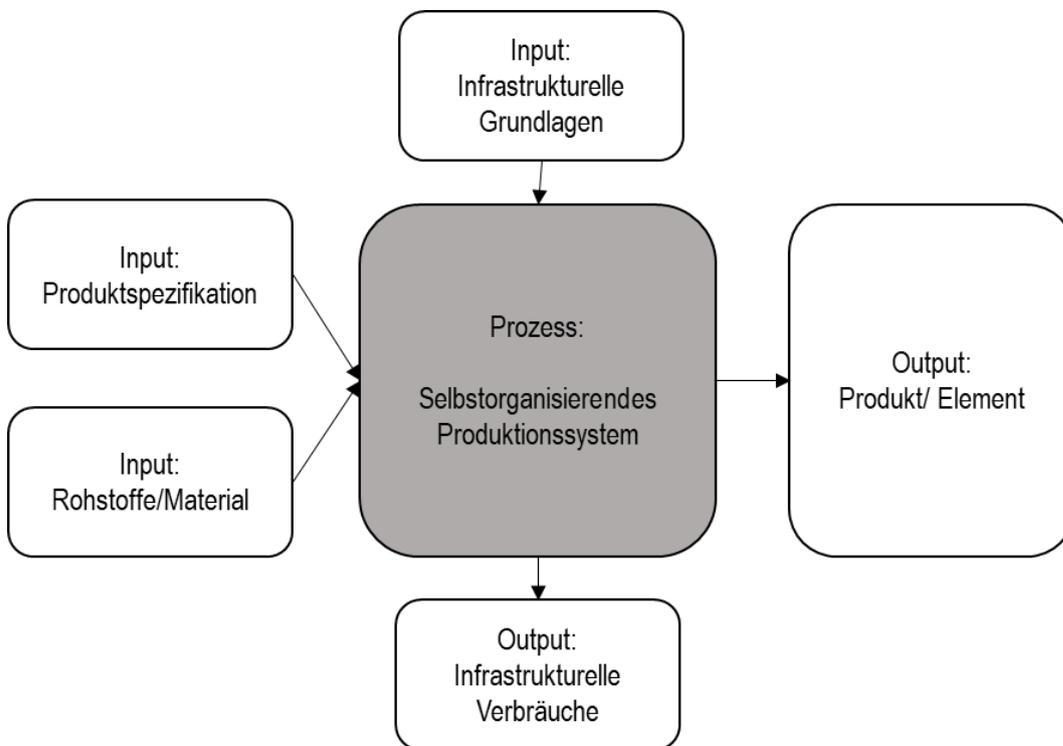


Abbildung 17: Selbstorganisierende Produktionssysteme als vereinfachte Input-Prozess-Output (IPO)-Darstellung

Bekannt sind bei der Organisation der Input und der theoretisch spezifizierte Output des Produktionssystems (Brettel et al. 2016). Der Ablauf der im Produktionssystem durchgeführten Prozesse wird vom System selbst definiert (Bussmann und Schild 2000). Das System besitzt die Fähigkeit und Möglichkeit, autonom und spontan eine Reaktion im Bereich der inneren Prozesse durchzuführen ohne eine zentrale Autorität zu benötigen (Barbosa et al. 2015; Camazine 2003). Computeralgorithmen und maschinelle Lernalgorithmen verteilen die notwendigen Prozesse und Aufgaben auf vorhandene sowie verfügbare Anlagen (Sousa et al. 2007; Thomas et al. 2015). Der Ablauf ist unbekannt und kann nicht vorhergesehen werden (Lewis 1995). Das System kann sowohl eine dezentrale Steuerung als auch eine zentrale Recheneinheit besitzen (Gräßler et al. 2018d).

Für ein Selbstorganisierendes Produktionssystem ist die Digitale Produktion (Westkämper et al. 2013, S. 12), welche durch die Digitalisierung und zunehmenden technischen Möglichkeiten (z. B. Künstliche Intelligenz, Echtzeitfähigkeit) aktuell stark an Bedeu-

⁹ IPO Diagramm: Diagramm zur Darstellung von Input, Prozess und Output. Das IPO Diagramm basiert dabei auf dem EVA-Prinzip (Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe), einem Grundprinzip der Datenverarbeitung und dient der Abgrenzung und eindeutigen Zuordnung von Informationen Dworatschek 1973, 48ff.

tung gewinnen, eine Grundvoraussetzung: Diese beschreibt die Tatsache, dass Informationen jederzeit, an jedem Ort mit sicherer Kommunikation zur Verfügung gestellt werden können. Dessen Grundlage ist eine vollständige digitale Repräsentation des Produkts in digitaler Form (Westkämper et al. 2013, S. 11).

Die Fähigkeit der Selbstorganisation eines Systems beschreibt das Kooperationsverhalten komplexer technischer und organisationaler Prozesse und Vorgänge. Die Kooperation mehrerer Systemelemente (z. B. Anlagen, Roboter etc.) oder das Zusammenwirken mobiler Transportsysteme nach Prinzipien der Selbstorganisation senkt die Aufwendungen einer detaillierten, deterministischen Planung und Steuerung (Gräßler und Hentze 2019; Gräßler et al. 2017). Diese Prinzipien setzen eine unmittelbare Kommunikation teilautonomer Systemelemente voraus und erreichen damit ein situationsabhängiges Verhalten (Westkämper et al. 2013, S. 311–312). Selbstorganisierende Produktionssysteme sind skalierbar und können aufwandsarm zusätzliche Produktionskapazitäten in die Organisation aufnehmen. Voraussetzung ist die Einbindungsmöglichkeit in das SOPS mit dessen Algorithmik sowie die Anknüpfung mit einem Transport- oder Logistiksystem. Westkämper (Westkämper et al. 2013, S. 311) beschreibt die Fähigkeit der Selbstorganisation als eine der sieben Innovativen IKT (Informations- und Kommunikationstechnologien) Lösungen für Produktionssysteme der Zukunft (Abbildung 18).

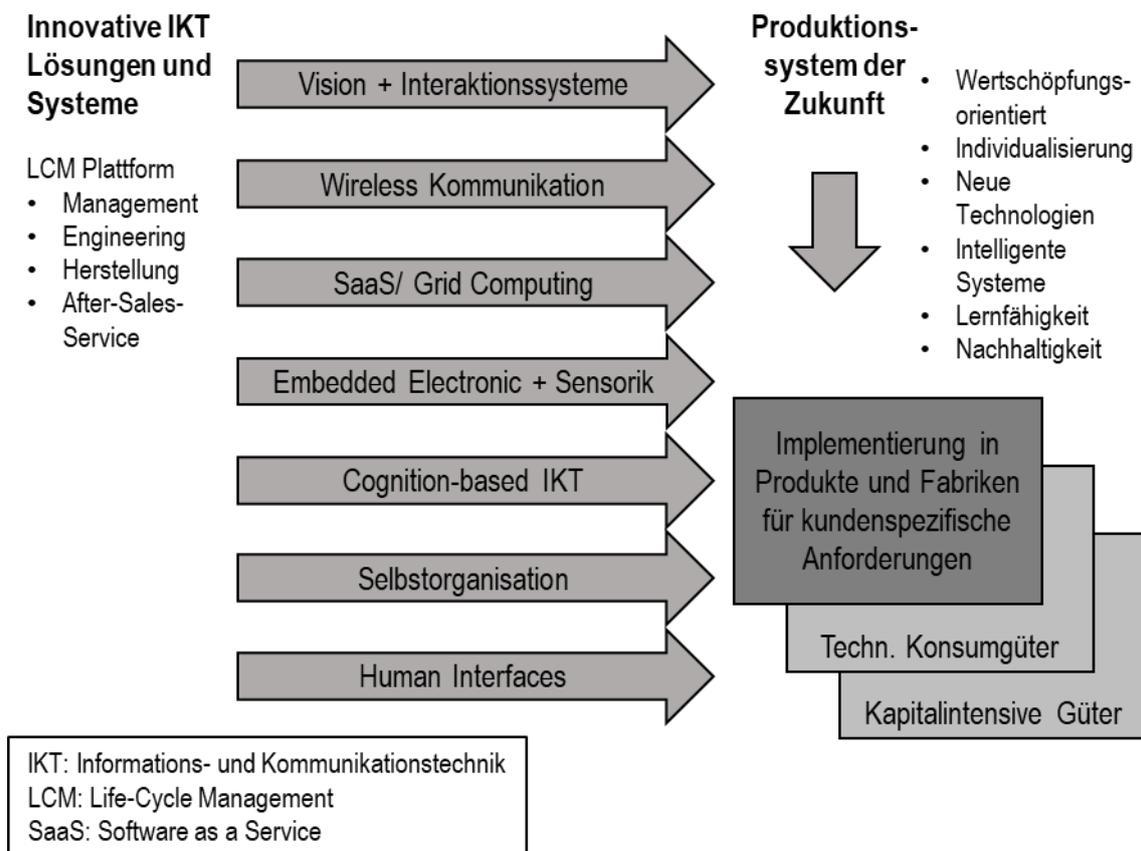


Abbildung 18: Zukunftsperspektiven der Produktion: Innovationen für die digitale Produktion (Westkämper et al. 2013, S. 311)

Selbstorganisierende Produktionssysteme (SOPS) lassen sich zusammenfassend anhand folgender Eigenschaften von klassischen Produktionssystemen beschreiben (Gräßler et al. 2018d, S. 548):

- Flexible Auslegung des Produktionssystems und die Fähigkeit, eine große Produktvielfalt zu produzieren
- Automatische Planung der Produktions- und Montageprozesse sowie die Produktion einer Vielzahl von verschiedenartigen Produkten innerhalb des Systems
- Aufteilung des Produktionssystems in autonome Module statt eines (physisch) verbundenen Systems
- Verteilte Steuerungsansätze beispielsweise durch Agenten anstelle von zentralen Planungssystemen
- Robustheit des SOPS, auf nicht eingeplante und unvorhersehbare Störungen oder Ereignisse zu reagieren
- Verbindung zur Umwelt – beispielsweise zu anderen Systemen, Zulieferern oder Kunden – und die Fähigkeit, mit diesen, betreffend des aktiven Prozesses, zu kommunizieren

2.4 Cyber-Physische (Produktions-) Systeme (CPS/CPSS)

Grundlage für den Aufbau von automatisiert verwendeten Selbstorganisierenden Produktionssystemen (SOPS) sind cyber-physische Systeme (CPS). Der Begriff des „cyber-physischen Systems“ wurde im Jahr 2006 durch Helen Gill von der National Science Foundation (NSF) der Vereinigten Staaten geprägt (Lee und Seshia 2017, S. 5). CPS stellen die nächste Entwicklungsstufe der Integration von Softwaresystemen in technischen Systemen hin zu vollständig softwaretechnisch integrierten und miteinander vernetzen Systemen dar (Abbildung 19).

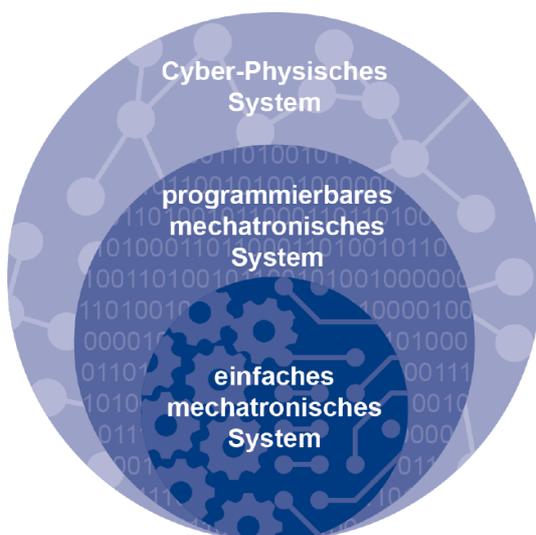


Abbildung 19: Vom einfachen mechatronischen System zum cyber-physischen System (Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)

Die Abbildung ist dabei nicht als Alternative oder Abgrenzung zu interpretieren, sondern als eine auch historische Weiterentwicklung und Funktionserweiterung des mechatronischen Systems (VDI 2206:2021).

CPS sind vernetzte mechatronische Systeme, die zusätzlich mit dem Internet der Dinge und Dienste verbunden sind und selbstlernende Eigenschaften aufweisen (Abbildung 20) (Acatech 2012; Gräßler und Hentze 2020). Diese Eigenschaften werden durch neuartige Technologien wie Maschinellem Lernen (ML) oder mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz (KI)¹⁰ erreicht. CPS können sowohl miteinander kommunizieren als auch Internetdienste nutzen, da sie über eine Schnittstelle zum Internet der Dinge und Dienste (IoT) verfügen. CPS erfassen, wie auch mechatronische Systeme, ihre Umgebung mit geeigneter Sensorik, werten sie mit Hilfe verfügbarer Daten und Dienste aus und beeinflussen ihre physikalische Umgebung mit Hilfe von Aktoren (Bauernhansl 2014). Eingebettete Datenverarbeitungen überwachen und steuern die physikalischen Prozesse, meist mit Unterstützung von Feedbackschleifen, bei denen physikalische Prozesse die Berechnungen beeinflussen und umgekehrt (Lee 2008). Die Abgrenzung und Evolution vom Mechatronischen System wird in Abbildung 19 und Abbildung 20 erläutert (VDI 2206:2021).

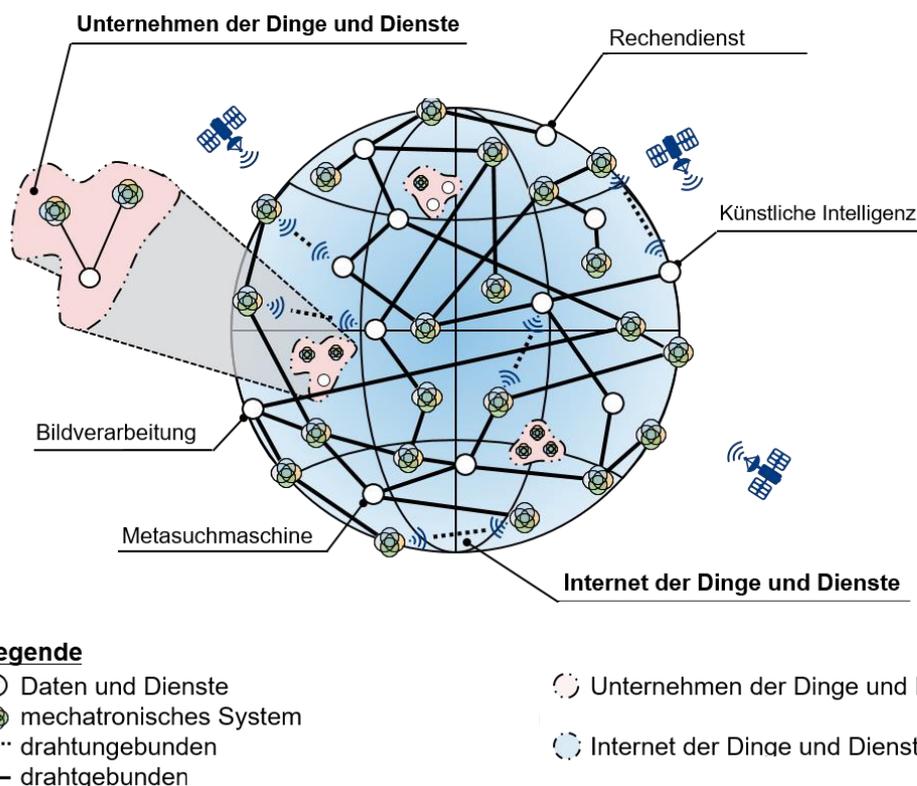


Abbildung 20: Eco-System eines cyber-physischen Systems (Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)

¹⁰ Häufig synonym für Englisch Artificial Intelligence (AI)

Neben dem Wandel der Produkte zu CPS wird der Einsatz von CPS in der Produktion als cyber-physische Produktionssysteme (CPPS) zu einem grundlegenden Wandel der Planung und Steuerung in der Produktion führen. Diese Auswirkungen werden unter anderem auch durch den Begriff „Industrie 4.0“ ausgedrückt (Kagermann et al. 2011).

Industrie 4.0 steht hierbei für die vierte industrielle Revolution. Aufbauend auf der Einführung von CPPS und die damit einhergehende Vernetzung aller Produktionsmittel untereinander sowie mit dem Internet der Dinge und Dienste (IoT) wird im Rahmen von Industrie 4.0 eine disruptive technologische Entwicklung in der Produktion vorhergesagt (Reinhart 2017, S. 19). Abbildung 21 zeigt die Transformation von der klassischen Automatisierungspyramide der industriellen Produktion zur „Smart Factory“, welche nicht in einer hierarchischen Organisationsform aufgebaut ist.

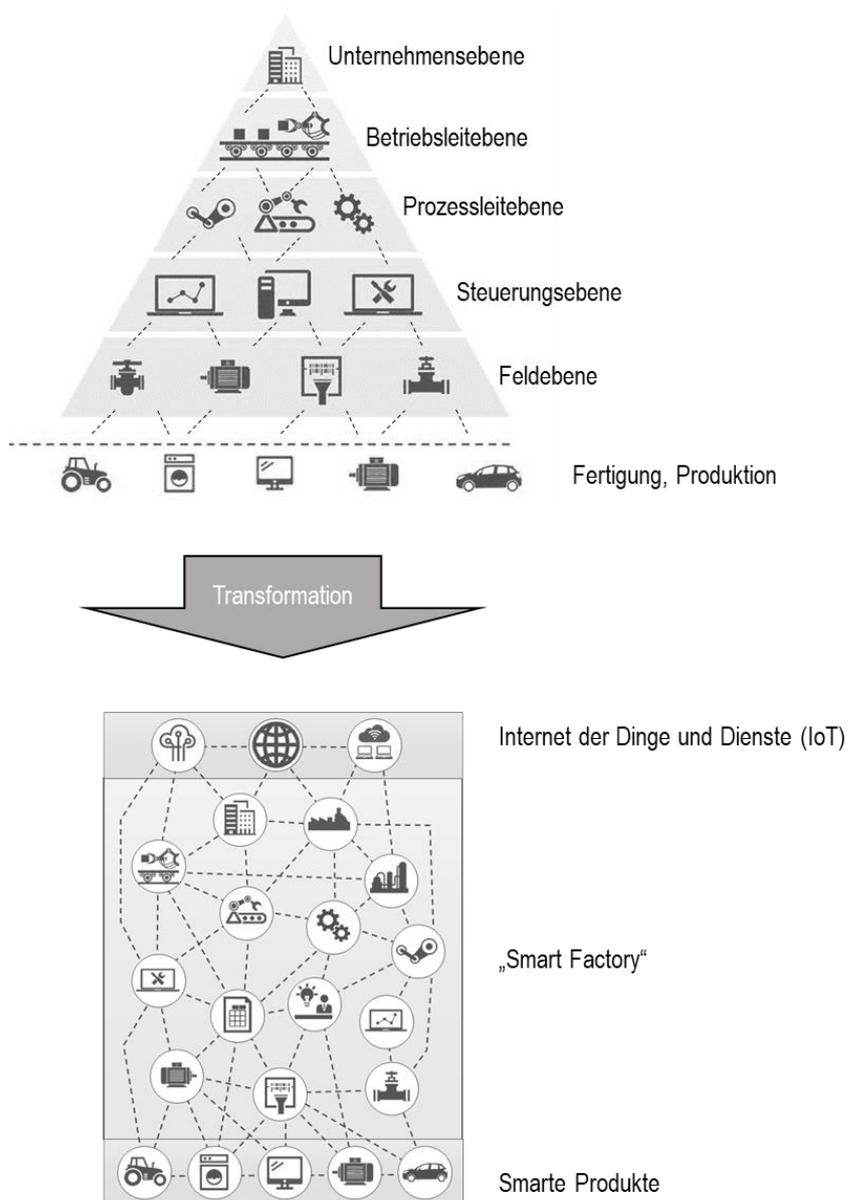


Abbildung 21: Die Automatisierungspyramide und die Transformation zur „Smart Factory“ (in Anlehnung an (BMW/BMBF 2019; Reinhart 2017; Roth 2016))

Resultat dieser Transformation sind flexible Produktionssysteme bestehend aus CPPS dessen Funktionen und Fähigkeiten sich in einem Netzwerk verteilen. Die beteiligten CPPS kommunizieren direkt miteinander, unabhängig von der Einordnung in die klassischen Hierarchielevel der Automatisierungspyramide. Im CPPS werden Daten, Dienste und Funktionen dort gespeichert und verwaltet, wo es im Sinne einer flexiblen und effizienten Produktion den größten Vorteil bringt. Das Produkt ist dabei Teil des Netzwerks und kommuniziert mit den CPPS des Produktionssystems (BMW/BMBF 2019). Adaptive, sich selbst konfigurierende und selbstorganisierende, flexible Produktionsanlagen einer „Smart Factory“ führen zu einer kostengünstigeren und effizienteren Produktion. Wie in Abbildung 21 dargestellt, kann eine Smart Factory ein SOPS sein oder zumindest SOPS oder Bestandteile dessen beinhalten. SOPS sind dabei eine Idealvorstellung einer Smart Factory. Mit der Einführung von CPPS werden zwei wesentliche Vorteile gegenüber bisherigen Produktionssystemen verbunden: Erstens eine selbstständige Konfiguration der Produktionssysteme zur eigenständigen Ausrichtung auf die Auftrags- und Umgebungssituation und zweitens die Steuerung zur Anpassung auf veränderte Umgebungsbedingungen durch eine kontinuierliche Überwachung der Umgebung (Acatech 2012, S. 35; Petry und Jäger 2018, S. 243). Die vollständige Implementierung der beschriebenen Transformation wird schrittweise und evolutionär Einzug halten (Westkämper et al. 2013, S. 311–312). CPPS, mit den Eigenschaften der CPS im Produktionsumfeld, sind Kernbestandteile eines SOPS. Die Technologie der CP(P)S ermöglicht die Realisierung von SOPS im industriellen Kontext. Durch die Integration von CP(P)S in ein SOPS, kann das SOPS eine vollständig automatisierte Einheit darstellen.

3 Charakterisierung und Systemgrenzen

3.1 Abgrenzung der Arbeit zum Stand der Wissenschaft

Die folgende Tabelle 2 zeigt die Abgrenzungsmatrix der vorliegenden Arbeit. Die grundlegende Recherchestrategie beruht auf der Analyse von Veröffentlichungen in Form von Konferenzbeiträgen, Journals und Büchern. Diese Veröffentlichungen haben einen großen Leserkreis unter Fachexperten und werden zitiert, wodurch eine gute Qualität und Aussagefähigkeit angenommen werden kann. Zudem werden die Arbeiten (Veröffentlichungen, insbesondere Dissertationen und Habilitationen) einschlägiger Personenkreise aus dem Fachgebiet der Produktentwicklung analysiert. Dies sind Mitglieder der DESIGN Society, CIRP Design, WiGeP und WGP. Operative Mittel zur Suche sind Bibliotheksangebote, Veröffentlichungsdatenbanken, CVs einschlägig ausgewiesener Forscher sowie unterschiedliche Onlinesuchverfahren und Datenbanken (beispielsweise researchgate, google scholar, elsevier)¹¹. Verworfen werden literarische Artefakte, die einen sehr kleinen Teil eines entwicklungsmethodischen Vorgehens abbilden oder nicht auf fundierten wissenschaftlichen Grundlagen aufgebaut sind. Beispiele dafür sind die individuell angepassten Anwendungsbeschreibungen von Unternehmen oder Vorgehensmodelle für einen spezifischen Anwendungsfall.

Zunächst werden die vier allgemeingültigen Entwicklungsvorgehen VDI 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ (VDI 2221), VDI 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ (VDI 2206:2004), das „INCOSE Systems Engineering Handbook V4“ (Walden et al. 2015) und das aus dem Forschungsprojekt mecPro² (BMBF gefördert) entstandene Buch „Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme“ (Eigner et al. 2017) mit dem eigenen Vorhaben verglichen. Des Weiteren sind vier relevante Dissertationen aus dem Themenfeld der Produktentwicklung aufgeführt. Dabei stellt das „Rahmenwerk zur Integration des modellbasierten Systems Engineering in die Produktentstehung mechatronischer Systeme“ von Tschirner (Tschirner 2016) einen übergreifenden und nicht spezialisierten Ansatz dar, während die Dissertationen von Benz (sicherheitsrelevante Systeme) (Benz 2004), Kipp (variantengerechte Entwicklung) (Kipp 2012) und Neumann (risikoorientierte Entwicklung) (Neumann 2016) unterschiedliche Schwerpunktthemen fokussieren.

Zur Bewertung werden elf Kriterien identifiziert, welche die bestehenden Arbeiten vom eigenen Vorhaben abgrenzen und zudem die Thematik und das Forschungsfeld des entwicklungsmethodischen Vorgehens abbilden.

¹¹ Online vertreten und auffindbar: researchgate.net; scholar.google.com; elsevier.com

Tabelle 2: Abgrenzungsmatrix der vorliegenden Arbeit

	(VDI 2206:2004)	(VDI 2221)	(Walden et al. 2015)	(Eigner et al. 2017)	(Tschirner 2016)	(Benz 2004)	(Kipp 2012)	(Neumann 2016)	Vorliegende Arbeit
Variabler Komplexitätsgrad des Zielprodukts	○	○	●	◐	○	◐	◐	○	●
Anwendung für die Entwicklung von CPS/ ITS/ CTS	—	—	—	●	◐	—	—	—	●
Fokus auf spezifische Eigenschaften (Design for X)	—	—	—	◐	—	●	●	●	●
Berücksichtigung von Restriktionen aus Produktionssystemen	—	—	○	◐	○	—	—	—	●
Integration von Eigenschaften Selbstorganisierender Produktionssysteme	—	—	—	○	—	—	—	—	●
Unterstützung bei der Integration von verschiedenen Produktionsorganisationsformen	◐	—	—	○	—	—	—	—	●
Interdisziplinäre Entwicklungsmethode	●	◐	●	○	○	○	○	○	●
Berücksichtigung von Geschäftsmodellen	—	—	—	○	—	—	—	—	●
Detaillierte Abbildung des Ablaufs von Entwicklungsprozessen	●	●	●	—	—	◐	○	○	◐
Neue Spezifikationssprachen und Methoden	—	—	○	◐	◐	—	—	—	◐
Explizite Evaluation durch Experten	◐	◐	—	●	○	◐	—	—	●

<u>Legende</u>	
Fett	Hauptabgrenzungskriterium
Normal	Beschreibungskriterium
—	Nicht behandelt
○	Nutzung existierender Ansätze / In der Arbeit genutzt
◐	Behandelt (teilweise) / Teil der Arbeit
●	Vollumfänglich behandelt (Indiz für Alleinstellungsmerkmal) / Kern der Arbeit

Die Kriterien in Tabelle 2 schließen dabei sowohl Inhalte des entwicklungsmethodischen Vorgehens, wie die Granularität des Zielprodukts und die Ausprägung der Interdisziplinarität ein, als auch die Verbindung zur (selbstorganisierenden) Produktion, um das Alleinstellungsmerkmal der vorliegenden Arbeit hervorzuheben.

Bei der Erarbeitung der Kriterien steht die Identifikation von Besonderheiten der eigenen Arbeit in Abgrenzung gegenüber dem Stand der Technik im Mittelpunkt. Die Motivation zur Erstellung der Arbeit sowie die Forschungsfrage sind Grundlagen für die Formulierung der Kriterien. Die Kriterien werden unter Einbeziehung des Wissens über Erneuerungspotenziale und deren Stand in der interdisziplinären Entwicklung formuliert¹². Auffällig ist, dass nur ein sehr geringer Anteil der referenzierten Literatur konkret die Produktion, deren Restriktionen für die Entwicklung und deren Vorgehensprozesse als Kerneigenschaft zur Verfügung stellt. Zwar weisen in den Arbeiten verwendete Konstruktionsrichtlinien und übergeordnete Modelle des Produktentstehungsprozesses, wie zum Beispiel das Handlungsfeld von Gräßler (Gräßler 2015b), das Vier-Zyklen-Modell von Gausemeier (Gausemeier und Plass 2014) oder das iPeM (Albers und Braun 2011) von Albers auf die Verknüpfung und die Existenz von möglichen Einschränkungen und Möglichkeiten hin, integrieren diese Aspekte aber nicht inhaltlich und methodisch in das jeweils beschriebene entwicklungsmethodische Vorgehen. Die genannten Modelle erläutern somit das Verständnis des Zusammenhangs zwischen Produktion und Entwicklung, entwickeln aber kein methodisches Vorgehen, wie es in dieser Arbeit erfolgt.

3.2 Betrachtungsgegenstand: Selbstorganisierende Produktionssysteme (SOPS)

Zur Charakterisierung von Selbstorganisierenden Produktionssystemen (SOPS) werden im Folgenden deren Eigenschaften auf Basis der theoretischen Beschreibungen des Stands der Wissenschaft genannt und für den Kontext diese Arbeit herausgestellt und

¹² Der Autor Julian Hentze ist berufenes Mitglied im Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) Fachausschuss 4.10 „Interdisziplinäre Produktentstehung“.

geschärft. Um eine einheitliche Terminologie für Selbstorganisierende Produktionssysteme (SOPS) für diese Arbeit zu schaffen, wird der in Kapitel 2.3.1 definierte Begriff des SOPS aufgegriffen und der Betrachtungsraum sowie die Systemgrenzen an die zu entwickelnde Methode wie folgt festgelegt:

Eigenschaften und Systemgrenzen der betrachteten Selbstorganisierenden Produktionssysteme (SOPS):

- SOPS produzieren materielle Güter in Form von Hardware. Die Integration von erstellter Software kann ein Arbeitsschritt im SOPS sein, wird aber in der Analyse nicht explizit betrachtet.
- SOPS repräsentieren ausschließlich die Organisationform der Fertigung, nicht die einzelnen Fertigungsverfahren und -prozesse
- SOPS organisieren, steuern und koordinieren die Produktionsprozesse ohne aktive äußere Einflussnahme.
- Das SOPS ist nicht das Zielsystem der Entwicklung, auch SoI (hier gemäß Kapitel 1.3 das Lösungssystem/Ziel), sondern der Auslöser für die Erweiterung der Entwicklungsmethodik. Es besteht als System – der Systemdefinition folgend – aus Subsystemen und Systemelementen (Checkland 1995; Händle und Jensen 1974). Das Ziel der Arbeit ist eine Methode zur Berücksichtigung von SOPS in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung.
- Das Digitale Abbild ist die detaillierte Beschreibung, Datensammlung und Spezifikation aller zur Produktion notwendigen Daten und Informationen, die zur Produktion des Systems oder Systemelements notwendig sind. Dies beinhaltet neben den Eigenschaften des Produkts beispielsweise auch Informationen zu Produktionsverfahren, Ruhe- und Lagerzeiten, Logikinformationen und, spätestens zum Abschluss der Hardwareproduktion, die benötigte Software des Systems.
- SOPS sind abhängig vom Input: Dieser besteht aus dem Digitalen Abbild sowie den verwendeten Rohstoffen, Materialien, Stoffen, Daten und einzubringenden Arbeitsleistungen.
- Die Integration der finalen Systemelemente und Subsysteme bzw. die Montage des Gesamtsystems ist nicht zwingend Teil des SOPS. Dieses betrachtet im Kern die Realisierung (vergleiche Abbildung 1: Handlungsfeld Produktentstehung (Gräßler 2015a, 2015b)) durch die Produktion.
- SOPS können eine Vielzahl und hohe Varianz von Fertigungsverfahren beinhalten. Die DIN-Norm 8580 (DIN 8580) gibt einen strukturierten Überblick über Bandbreite von Fertigungsverfahren.
- SOPS können in der Theorie ausschließlich nur aus Menschen bestehen: Diese Form wird in der Analyse der Arbeit jedoch nicht betrachtet, da es um die Entwicklung technischer Systeme geht, für die Fertigungstechnologien vor einem industriellen, maschinenbaulichen Kontext eingesetzt werden. Als beeinflussender Bestandteil in einem SOPS, beispielsweise als Maschinenführer, ist der Mensch in dieser Arbeit von großer Relevanz.

Selbstorganisierende Produktionssysteme (SOPS) verfügen nicht über dieselben Eigenschaften wie cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS): CPPS beschreiben die technische Realisierung des Produktionssystems durch die Zusammensetzung verschiedener CPS und CPD. SOPS fokussieren das prozessuale Prinzip der Selbstorganisation. SOPS können dabei aus einer Vielzahl von CPS/CPPS bestehen, welche das SOPS in der beschriebenen Ausprägung durch Technologien der Vernetzung und Kommunikation möglich machen. Die technische Realisierung des Produktionssystems sowie die Durchführung der Vernetzung ist für die Betrachtung des SOPS und dessen Einfluss auf die interdisziplinäre Entwicklungsmethodik in dieser Arbeit im Gegensatz zu organisationalen Aspekten kein inhaltlicher Bestandteil.

3.3 Charakteristische Anwendungsszenarien und Ausgangssituationen

Charakteristische Anwendungsszenarien für die Nutzung der zu entwickelnden Methode sind produzierende Unternehmen mit hohem Innovationsgrad und der Produktion von insbesondere individuell angepassten Produkten (Systemen), Subsystemen oder Systemelementen (Gräßler et al. 2018d).

Ausgangssituation und Bedarf, die Methode zu verwenden, ist die Überprüfung, ob Selbstorganisierende Produktionssysteme einerseits für die Strategie des Unternehmens oder andererseits für ein individuelles Produkt oder dessen Bestandteile (Systemelemente) relevant sind. Die Ausgangssituation ist unterschiedlich charakterisiert: Die Überprüfung der Unternehmensstrategie hinsichtlich SOPS ist im Hinblick auf sämtliche, beziehungsweise eine Gruppe, zu produzierender Produkte des Unternehmens zu beziehen. Diese Analyse wird in Form einer Machbarkeitsstudie/Vorentwicklung durchgeführt. Diese ist, unter Berücksichtigung des V-Modells der Richtlinie VDI 2206, eine Vorstufe des klassischen Produktentwicklungsprozesses. Das V-Modell als Denkmodell bietet dieser Machbarkeitsstudie/Vorentwicklung die notwendigen Rahmenbedingungen, sodass das Denkmodell des V-Modells in der Machbarkeitsstudie/Vorentwicklung Gültigkeit besitzt. Es handelt sich hierbei um eine Form der sequenziellen Nutzung der V-Modell Illustration, da dem V-Modell des Produktentwicklungsprozesses der Durchlauf einer Vorentwicklung, ebenfalls dem Denkmodell des V-Modells folgend, vorangesetzt wird. Dieses ist losgelöst vom V-Modell des Produktentwicklungsprozesses (Abbildung 22 Zeitraum 2) als individuelles Projekt (Abbildung 22 Zeitraum 1) zu betrachten. Die sequenzielle Anwendung von zwei Durchläufen durch das V-Modell ändert nicht die Methode oder das Denkmodell, sondern den Anwendungsfall und Zeitpunkt der generischen Ablaufmethodik im V-Modell und differenziert die Perspektive hinsichtlich der Anwendung in der strategischen Planung. Abbildung 22 verdeutlicht die Vorentwicklung sowie die Produktentwicklung in den Zeiträumen 1 und 2. Um den zeitlichen Verlauf darzustellen wurde ein zusätzlicher Durchlauf durch ein V-Modell ergänzt, welcher eine zusätzliche Variante des Produkts für den Markt oder den Kunden bereitstellt.

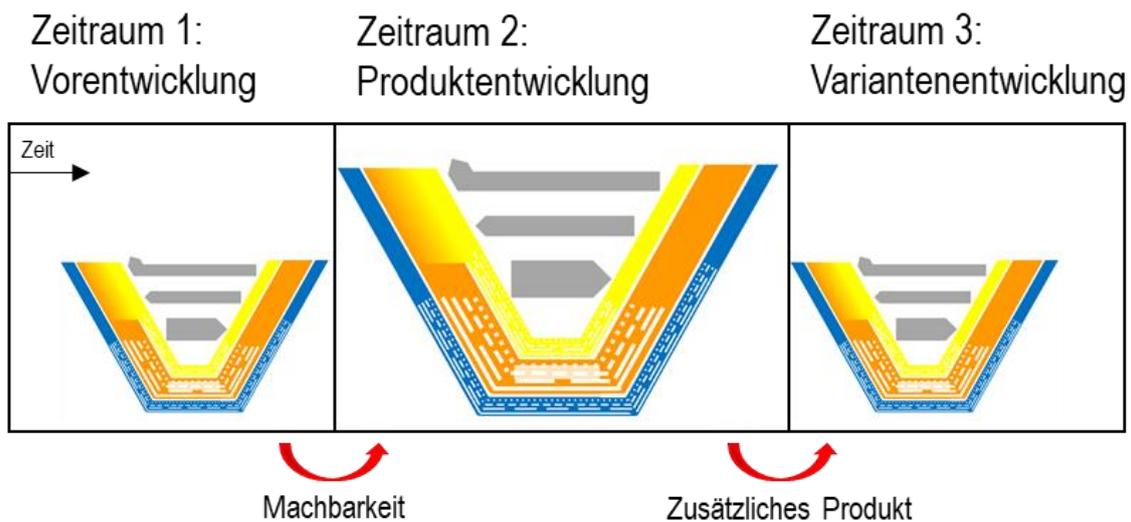


Abbildung 22: Sequenzielle Verwendung des V-Modells (basiert auf (VDI 2206:2020))

Die Ausgangssituation der Analyse der Berücksichtigung eines individuellen Produkts ist in der Regel nicht durch eine vorgelagerte Machbarkeitsstudie/Vorentwicklung abgedeckt. Dieser Anwendungsfall bildet einen die Produktentwicklung begleitenden Prozess ab, um die Anwendbarkeit von SOPS an einem konkreten Produkt zu prüfen. Das bedeutet, dass die Methode zur Berücksichtigung von SOPS in frühen Phasen der Produktentwicklung mit dem Prozess der interdisziplinären Produktentwicklung mit dem V-Modell parallel verzahnt abläuft. Somit findet der Durchlauf des V-Modells nicht sequenziell, sondern als inhaltlich und zeitlich parallel integrierter Prozess statt (vergleiche Simultaneous Engineering Kapitel 2.1).

Um die zwei Ausgangssituationen und die Zielgruppen der Anwendung der Methode zu verdeutlichen, werden im Folgenden zwei fiktive Szenarien beschrieben, wie verschiedene Personas die Methode einsetzen. Damit werden die prognostizierte Anwendung und die Ausgangssituation für die Charakterisierung des Lösungsraums für die Entwicklung der Methode erläutert. Die Forschungsfrage wird auf zwei Anwendungsbereiche konkretisiert.

Szenario A: Strategische Ausrichtung der Produktion von morgen

Gerd Husemann (52) verantwortet die strategische Ausrichtung des Unternehmens RollerBaller AG. Seit 25 Jahren ist er Mitarbeiter des Unternehmens, welches internationaler Marktführer von Geräten für Beschriftungen, Labels und Druck von Etiketten ist. Gerd's Unternehmen produziert an 15 Standorten auf allen Kontinenten. Das Unternehmen fertigt in Modulbauweise und individualisiert die Schnittstellen zur Fertigungstechnik verschiedener Kunden aus unterschiedlichen Branchen. Der Automatisierungsgrad in der Produktion ist in fast allen Werken der RollerBaller AG sehr hoch. Häufig werden in unterschiedlichen Werken die gleichen oder ähnliche Produkte gefertigt und nur die

Adaption für den Kunden, beispielsweise die Spracheinstellungen oder besondere Formate, wird individuell gestaltet. Gerd hat vor einigen Wochen an einer wissenschaftlichen Tagung über die Zukunft der Produktion am Heinz Nixdorf Institut teilgenommen. Ein Vortrag über Selbstorganisierende Produktionssysteme hat ihn begeistert. Schnell konnte Gerd den im Vortrag geschilderten Anwendungsfall für sein Unternehmen als vergleichbar bewerten. Im folgenden Gespräch mit dem Referenten konnte Gerd einige Potenziale für die Rahmenbedingungen bei der RollerBaller AG aus weiteren Erfahrungsberichten erläutern. Gerd weiß aber auch um die Besonderheiten der RollerBaller AG und beschließt ein internes Projekt zu starten, in dem er die strategische Ausrichtung für die Zukunft der Produktion im Unternehmen untersuchen möchte. Ein Teilprojekt widmet er den Selbstorganisierenden Produktionssystemen. Er möchte dieses Potenzial nicht unberücksichtigt lassen und seinem Vorstand eine systematisch erstellte Auswertung der Bedeutung der Thematik zur Verfügung stellen. Nach kurzer Recherche findet Gerd die Arbeit „Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme in frühen Phasen der Produktentwicklung“. Da sein Unternehmen Produkte mit dem V-Modell der deutschen VDI Richtlinie 2206 entwickelt, fällt es ihm leicht, die beinhaltende Methode als Vorgehen für sein strategisches Projekt festzulegen.

Szenario B: Entwicklungsbegleitende Analyse der Produktionsform

Simone Franke (41) entwickelt seit nunmehr 6 Jahren Systemlösungen für Rollladen- und Markisenmotoren beim Unternehmen SmartHomies. Sie ist verantwortlich für das gesamte System aus mechanischen, elektrischen/elektronischen und Softwarekomponenten. Die Produkte von SmartHomies werden auf der ganzen Welt eingesetzt und derzeit an zwei verschiedenen Standorten in Asien und Europa produziert. Die neue Produktgeneration der Luxuslinie „Prime2“ wird das nächste große Entwicklungsprojekt für Simone sein. Auf Grund massiver Umstrukturierungen und Standortschließungen des Unternehmens sind weder ein Produktionsstandort noch Fertigungstechnologien vorgegeben. Simones Chef hat bereits angedeutet, dass eine neue Fabrik für Premiumprodukte in Deutschland entstehen soll. Diese soll ein Aushängeschild sein und die Kunden von den Technologien des Unternehmens begeistern. Dazu haben sich Simone und ihr Chef bereits die gläserne Manufaktur der Volkswagen AG in Dresden angesehen und sich mit diversen Forschungsinstituten über die Produktion der Zukunft und Industrie 4.0 ausgetauscht. Als mögliches erstes Produkt der neuen Produktion in Deutschland, ist die Systemlösung „Prime2“ geplant. Während der Entwicklung von „Prime2“ werden Simone und ihr Team die grundlegenden Vorgaben für die Gestaltung der neuen Fabrik erarbeiten. Die Vision des Chefs liegt auf Simones Schreibtisch: „Eine vollautomatisierte und digitalisierte Fabrik, selbstfahrende Transportsysteme, höchste Flexibilität für Kundenanforderungen und die Möglichkeit, wirtschaftlich Groß-, Mittel-, und Kleinserien zu produzieren“. Simone soll kurzfristig mit der Entwicklung der „Prime2“ Systemlösung starten. Also beschließt sie, das Produkt im Hinblick auf verschiedene Eigenschaften wie dezentrale Produktionssteuerung und selbstorganisierende Eigenschaften zu untersuchen. Ihr Kollege Max Fischer hat bereits Erfahrungen auf diesem Gebiet: Er hat vor 2 Jahren

ein Selbstorganisierendes Produktionssystem in China entwickelt und aufgebaut. Seither werden dort sämtliche Kunststoff- und Druckgussteile für Schalter, Abdeckungen und Verkleidungen gefertigt. Da Max in China arbeitet und derzeit eine weitere Fabrik aufbaut, kann er Simone nur beratend zur Seite stehen. Max empfiehlt Simone, sich mit der Arbeit „Berücksichtigung von Selbstorganisierenden Produktionssystemen in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung“ auseinanderzusetzen. Die Rahmenbedingungen und Hinweise der Methode hätten ihn damals unterstützt, seine Aufgabe zu strukturieren und wichtige Anreize geliefert. Simone beschließt, die Methode in das Entwicklungsprojekt „Prime2“ zu integrieren, um die Potenziale von Selbstorganisierenden Produktionssystemen für „Prime2“ und die zugehörige Fabrik zu prüfen.

3.4 **Betrachtungsgegenstand: Interdisziplinäre Entwicklungsmethodik**

Als Grundlage des entwicklungsmethodischen Vorgehens werden das V-Modell sowie die Inhalte der überarbeiteten VDI Richtlinie 2206 (VDI 2206:2020), beschrieben und in den Grundlagen (2.2.1) verwendet. Der Betrachtungsfokus und damit der Schwerpunkt der Analyse der Entwicklungsmethodik, ist dabei die linke Seite des V-Modells: Diese beinhaltet sämtliche Aufgaben von der Überprüfung des zu Grunde liegenden Geschäftsmodells im ersten Kontrollpunkt bis zur Definition und Beschreibung des dekompositionierten Systems im disziplinspezifischen Entwurf in Vorbereitung der Implementierung der Systemelemente. Dieser Teil des V-Modells ist dabei maßgebend für die Gestaltung des Systems/Produkts und daher aus entwicklungsmethodischer Sicht der relevante Kern der Arbeit. Einflüsse, Restriktionen und Eigenschaften werden aus dem gesamten Entwicklungsprozess beziehungsweise aus dem gesamten holistischen Lebenszyklus (HPLZ) des Produkts berücksichtigt (Gräßler et al. 2018a). Die relevanten Bereiche im illustrierten V-Modell sowie die weiteren Einflussbereiche im Entwicklungsprozess sind in Abbildung 23 dargestellt.

Der Betrachtungsfokus der interdisziplinären Entwicklungsmethodik mit dem V-Modell ist das allgemeine Vorgehen sowie das Zusammenspiel von in der Entwicklung notwendigen Aufgaben. Es wird keine Aufgabenplanung auf Mikroebene durchgeführt, sondern ein Rahmenwerk beziehungsweise ein Denkmodell für die logischen Zusammenhänge zur Verfügung gestellt. Die breite Anwendbarkeit des verwendeten V-Modells für verschiedene Produkte und Branchen ist in Abgrenzung zu anderen Richtlinien und Vorgehensweisen elementar für die Entwicklungsmethodik. Dem Anwender der Richtlinie sollen – entgegen der Wortverwendung von „Richtlinie“ – keine Vorschriften gemacht werden, sondern wertvolle Assoziationen und Unterstützungen für eine erfolgreiche Entwicklung des individuellen Produkts zur Verfügung gestellt werden. Die beschriebenen Eigenschaften sollen für das Zielsystem einer Methode zur Berücksichtigung von SOPS in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung übernommen werden.

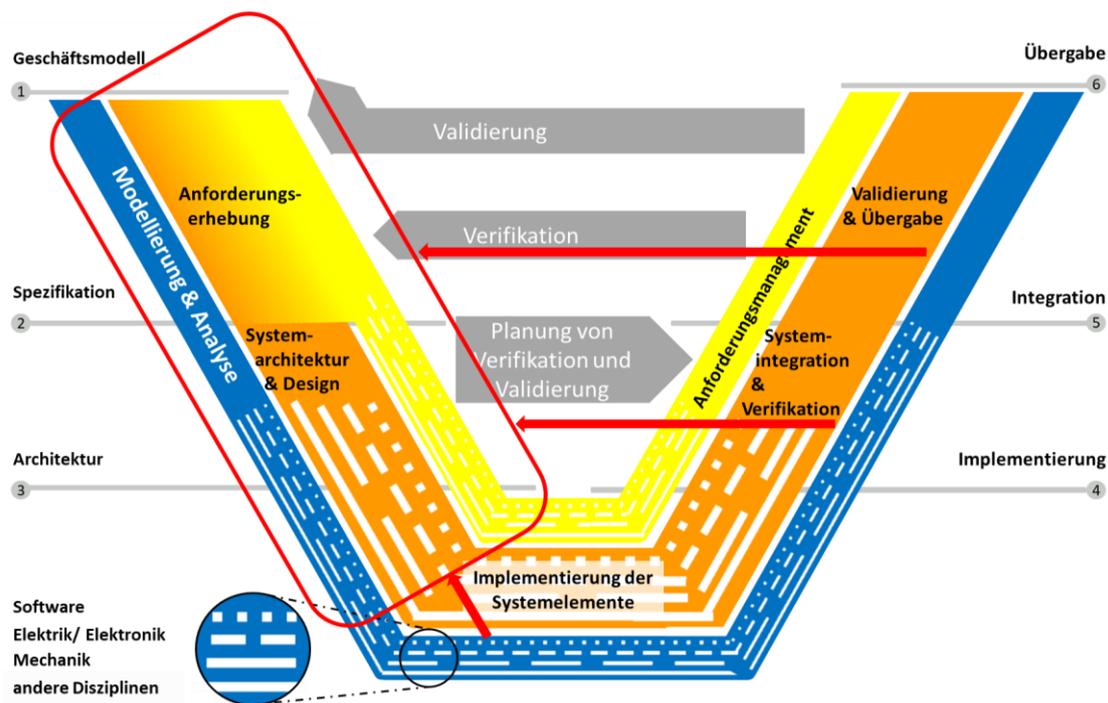


Abbildung 23: Schwerpunkte in der Berücksichtigung des entwicklungsmethodischen Vorgehens im V-Modell (Gräßler et al. 2018a; Gräßler und Hentze 2020)

3.5 Grundlegende Anforderungen an die Methode

Grundlegende Anforderungen betreffen die Anwendung der Methode, deren Aufbau sowie die Zielgruppe. Die Anforderungen basieren auf einer Stakeholderanalyse, der subjektiven Einschätzung möglicher Anwender – auch aus iterativer Rückführung der Erkenntnisse der Interviews aus der Evaluation – sowie der Beurteilung des Autors und dessen Erfahrung in der Definition von Vorgehensmodellen und Methoden. Die Anwender entsprechen der Zielgruppe, welche auch für die VDI Richtlinie 2206 beschrieben sind und zudem einen Fokus auf die Auswahl des Produktionssystems legen. Hier handelt es sich um die in den Anwendungsszenarien beschriebenen Rollen der Entwickler oder Personen, die die strategische Weiterentwicklung des Produktportfolios oder eines Produkts begleiten. Wichtige Inputs sind dabei die geleisteten Vorveröffentlichungen des Autors mit Teillösungen sowie die aus der Vorstellung der Ergebnisse auf internationalen Fachkonferenzen resultierenden Diskussionen und Anregungen. Zudem liefern die erarbeiteten Szenarien wichtigen Input für grundlegende Anforderungen an die Methode (Tabelle 3). Die Berücksichtigung der Bedürfnisse der Anwender ist dabei elementare Voraussetzung (Walter et al. 2015). Es muss verhindert werden, dass die Methode für die Anwender unverständlich, unklar oder in der Anwendung zu aufwendig ist. Es muss sich um eine allgemeingültige und unabhängige Methode handeln, die losgelöst von einer Branche, einem Unternehmen oder einem Produkt entwickelt und ausgearbeitet wird.

Tabelle 3: Grundlegende Anforderungen an die Gestaltung und Ausarbeitung der Methode CoSOPS

A1	Anwendbar für die <u>Zielgruppen des Entwicklers (Parallel zur Produktentwicklung)</u> sowie des <u>strategischen Portfoliomanagers (Vorentwicklungsprojekt)</u> (vergleiche Anwendungsszenarien)
A2	So <u>einfach wie möglich</u> , so komplex wie nötig in Umfang, Stil und Menge der zur Verfügung gestellten Informationen, um eine übersichtliche Struktur zu gewährleisten
A3	Rahmenwerk zur Orientierung <u>für den Entwickler</u> (Anwendungsbezogene Sichtweise/ Perspektive)
A4	<u>Sprache des Entwicklers</u> (sowie der Richtlinie VDI 2206) sprechen, somit die Benennung von Fachbegriffen aufgreifen und verwenden.
A5	Verwendung <u>etablierter und bekannter Ansätze</u> als Grundlagen für die Neuentwicklung der Methode
A6	<u>Durchgängigkeit</u> in der interdisziplinären Produktentwicklung (entsprechend auch den Grundlagen des Simultaneous Engineering)
A7	<u>Keine Einschränkung der Innovativität oder Kreativität</u> durch zu enge Vorgaben, sondern assoziative Anreize zur Verfügung stellen
A8	Eindeutig und <u>passgenaue Struktur</u> in Bezug auf die Richtlinie VDI 2206
A9	Anschauliches und verständliches (Denk-) Modell mit <u>Wiedererkennungswert</u>
A10	Im Kern <u>sequenzielle Methodendarstellung</u> zur leichten Verständlichkeit mit frühzeitiger Erkennung und Möglichkeit der Durchführung von <u>Abbruchkriterien</u>
A11	<u>Interpretation wissenschaftlicher Erkenntnisse über den Stand der Technik hinaus</u> in Bezug auf Vor- und Nachteile von SOPS sowie in der Anwendung von Methoden.
A12	<u>Branchen- und produktübergreifendes</u> Vorgehen (im Rahmen der interdisziplinären Entwicklung technischer Produkte)
A13	<u>Fokussierung auf die Fähigkeit der Selbstorganisation</u> und nicht auf existierende Systeme oder bestehende Lösungen zur Wahrung der allgemeinen Gültigkeit
A14	Beeinflussung der Gestaltung durch <u>Eingriff in die linke Seite des V-Modells</u>
A15	<u>Flexibilität</u> in der individuellen Anwendung und Auslegung der Methode und ihrer Bestandteile

4 Analyse der Auswirkungen von SOPS auf das entwicklungsmethodische Vorgehen

Kapitel 4 identifiziert die inhaltlichen Grundlagen für die Implementierung der Methode zur Berücksichtigung von SOPS in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung (Akronym CoSOPS¹³). Die Analyse geht dabei deutlich über den Stand der Technik hinaus, da neben der strukturierten wissenschaftlichen Auswertung und Beschreibung eine Bewertung sowie eine Priorisierung der Auswirkungen durchgeführt wird. In der Folge werden diese Auswirkungen Betrachtungsbereichen zugeordnet, um als elementare Grundlage für die Entwicklung der Methode CoSOPS die Einflüsse, gebündelt in Einflussgruppen, von SOPS auf das entwicklungsmethodische Vorgehen zur Verfügung zu stellen. Die Erarbeitung dieser Ergebnisse und Dokumentation in Einflussgruppen stellt einen wichtigen Bestandteil der Synthese dar. Die Ergebnisse der Einflussgruppen stellen die erarbeiteten Inhalte für die Methodenentwicklung des folgenden Kapitels 5 dar und damit den Kontext der Faktoren, welche die Methode beeinflussen (Gericke et al. 2013).

Die zusammengefassten Ergebnisse der Einflussgruppen gehen dabei über die Formulierung einer Anforderung hinaus, da sie durch die Analyse, Synthese und Ausarbeitung im Verlauf des Kapitels 4 bereits ausgearbeitet und als Lösungsbeschreibung definiert wurden. Kombiniert mit den grundlegenden Anforderungen an die Methode CoSOPS aus Kapitel 3.5, bilden die Ergebnisse der Einflussgruppen den Rahmen für die inhaltliche und strukturelle Spezifikation der Methode CoSOPS.

4.1 Analyse von Auswirkungen

Um die Eigenschaften der in Kapitel 3 definierten und abgegrenzten Betrachtungsgegenstände der SOPS (Kapitel 3.2) und der interdisziplinären Entwicklungsmethodik (Kapitel 3.4) zu berücksichtigen, werden in der Folge die Einflüsse von SOPS auf die Produktentwicklung identifiziert. Diese werden als zunächst Auswirkungen bezeichnet und repräsentieren damit sowohl positive als auch negative Assoziationen, Einflüsse oder Rahmenbedingungen für die interdisziplinäre Produktentwicklung und das entwicklungsmethodische Vorgehen.

Im ersten Schritt der Identifikation, Analyse und Synthesen der Auswirkungen im Kapitel 4 werden die Vor- und Nachteile zusammengetragen, welche Selbstorganisierenden Produktionssysteme (SOPS) mit sich bringen. Grundlage dafür sind die analytische Betrachtung gegebener Literatur¹⁴ sowie insbesondere die Ergebnisse aus wissenschaftlich

¹³ In englischer Sprache: Method for Consideration of Self-Organizing Production Systems in early phases of interdisciplinary product development.

¹⁴ In den folgenden Abschnitten stets als Quellen angegeben.

begutachteten Vorveröffentlichungen dieser Arbeit (Gräßler und Hentze 2019; Gräßler et al. 2018d), die eine valide Basis für das weitere Vorgehen bilden.

In Tabelle 4 wird eine Übersicht dieser Vor- und Nachteile gegeben. Die Reihenfolge der folgenden Dokumentation wird ohne Intention einer Gewichtung oder Priorisierung festgelegt. Die Formulierung der Vor- und Nachteile basiert auf den ursprünglichen Literaturquellen, um den Wiedererkennungswert zu steigern und mögliche inhaltliche Verwechslungen oder Missverständnisse zu vermeiden.

Tabelle 4: Übersicht der literaturbasierten Vor- und Nachteile bei der Verwendung Selbstorganisierender Produktionssysteme

#	V: Vorteile:	#	N: Nachteile
V1	Zentrale oder dezentrale Organisation	N1	Keine Prognosefähigkeit der Durchlaufzeit und Produktionsreihenfolge
V2	Räumlich globale Verteilung	N2	Datenschutz und Manipulation
V3	Integration oder Anbindung an Transportsysteme	N3	Aufwand und Komplexität in der Erstellung des digitalen Abbildes
V4	Adaptive Statusänderungen in Echtzeit	N4	Fehlerkorrektur im (Anlauf-) Prozess und Qualitätssicherung
V5	Erfüllung von Funktionen durch differenzierte Fertigungsverfahren realisierbar	N5	Finanzieller Aufwand
V6	Flexibilität und Auslastung	N6	Fokussierung auf geringe Fertigungstiefe
V7	Entlastung der Fertigungsplanung bei hoher Komplexität	N7	Akzeptanzprobleme
V8	Arbeitsergonomie an der Schnittstelle von Menschen und Maschine	N8	Fehlinterpretation von Situationen
V9	Ganzheitliche Planung über die gesamte Wertschöpfungskette	N9	Wegfall/Verschiebung von Arbeitsplätzen
V10	Kontrolle und Verhaltenssteuerung von Anlagen und Mitarbeitern	N10	Komplexität des Systems

Die Vor- und Nachteile werden in den folgenden Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 (sowie zur Vervollständigung im Anhang 10.7) mit je einem Absatz beschrieben und in der Folge analysiert und interpretiert (Anforderung A11). Durch Zitation wird auf grundlegende sowie erläuternde Literaturquellen verwiesen. Die in der Analyse der Vor- und Nachteile

herausgestellten Auswirkungen, werden auf Basis der genannten Vorveröffentlichungen dieser Publikation sowie weiteren identifizierten Literaturstellen wertfrei beschrieben. In der Analyse werden die Auswirkungen repräsentativ für den Kontext und dessen Aussage im Text (fett/kursiv) hervorgehoben. Die Auswirkung beziehungsweise die hervorgehobene Textpassage steht dabei repräsentativ für den analysierten und erläuterten Sachverhalt. Die Formulierung der festgelegten Auswirkung kann damit inhaltlich deutlich über den genannten Stichpunkt hinausgehen.

Um eine gute Lesbarkeit der Arbeit zu gewährleisten, werden in der Folge fünf Vor- und fünf Nachteile beschrieben und analysiert. Die je fünf weiteren Vor- und Nachteile der Tabelle 4 sind im selben Format im Anhang 10.7 angefügt. Die Auswahl entspricht keiner Wertung oder Priorisierung. Der Transfer in den Anhang dient dabei ausschließlich der Wahrung einer angemessenen Form dieser Arbeit, da eine sehr umfangreiche Aufzählung über eine Vielzahl von Seiten damit vermieden wird.

4.1.1 Analyse auf Basis von Nachteilen

N1: Keine Prognosefähigkeit der Durchlaufzeit und Produktionsreihenfolge

Die in 2.3.1 und 3.2 beschriebene Perspektive auf den Input und den Prozess als „Black-box“ führt zu Herausforderungen in der Prognosefähigkeit von exakten Durchlaufzeiten, der durch das System durchgeführten Produktionsreihenfolgen und dem tatsächlichen Output der produzierten Produkte. Die autonome Entscheidung des Systems mit echtzeitfähiger Adaptivität auf Basis einer Vielzahl von Informationen und Einflüssen erschwert die Fähigkeit und Genauigkeit einer zeitlichen und inhaltlichen Prognose (Hirsch-Kreinsen 2014, S. 421; Hülsmann und Windt 2007; Scholz-Reiter et al. 2004).

Das Digitale Abbild (vgl. Kapitel 3.2) muss zwingend notwendige Reihenfolgen von Produktionsprozessen beinhalten, welche zur Funktionserfüllung des Produkts obligatorisch sind (z. B. Rüstmatrizen). Dadurch ist das Wissen über die Produktion und deren Spezifikation im Digitalen Abbild bereits in der Entwicklung notwendig und elementarer Bestandteil. Es findet eine **Kompetenzverlagerung in die Entwicklung** statt, welche im Systems Engineering als „Frontloading“ bezeichnet wird (Walden et al. 2015, S. 207). Frontloading bedeutet dabei die Verlagerung von Aufgaben und damit verbunden auch Kompetenzen in möglichst frühe Phasen der Produktentwicklung. Die Vorhersehbarkeit der Reihenfolge und der Laufzeit ist aus Sicht der Folgeplanung im Anschluss an produzierte Systemelemente nicht möglich. Beispielsweise kann der termingerechte und mit der Produktion abgestimmte Montageprozess, der nicht (zwangsläufig) Teil des SOPS ist, zwar berücksichtigt werden, muss aber in ähnlicher oder integrierter Organisationsform durchgeführt oder zumindest an das SOPS angebunden werden. Andernfalls würde es an der Schnittstelle zu enormen Aufwänden oder Schwierigkeiten kommen, womit die Vorteile eines integrierten SOPS hinfällig sind. Dies gilt nicht nur für die Montage, sondern auch für den Verkauf, den Versand und die Vorhersagen zur Lieferfähigkeit, die sich final auf die Unternehmensplanung und die wirtschaftliche Situation auswirken. **Hochvernetzte**

und digitalisierte Prozesse im Umfeld des SOPS sind notwendig. Besonders herausfordernd ist dies bei nicht kontinuierlich verlaufenden Wertschöpfungsketten, beispielsweise einer einzelnen Maschine des Sondermaschinenbaus, eines individuellen Einzelstücks oder einer Kleinserie nach Kundenwunsch. Durch die Unvorhersagbarkeit sind Produktionsreihenfolgen unabhängig vom Integrationsstatus der Gesamtsystemmontage möglich: Besonders bei SOPS mit großen Produktionskapazitäten und hoher Vielfalt an Produkten sind **große und individuelle Lagerflächen** zur Verfügung zu stellen. Dies erhöht in der wirtschaftlichen Auswirkung die Kapitalbindung und die Lagerhaltungskosten sowohl im Hinblick auf den Stellplatz (z. B. Hochregallager) als auch in Bezug auf die Transaktionskosten (z. B. SAP Warehouse (e)WM, Staplerbewegungen).

N2: Datenschutz und Manipulation

Die Arbeitsplätze, Maschinen und Anlagen sowie gegebenenfalls auch das Produkt sind jederzeit mit dem Organisationsalgorithmus des SOPS vernetzt. Die Offenlegung der Daten gegenüber Zulieferern, Kunden und Dienstleistern ist zwangsläufig notwendig und kann zu politischen (z. B. vertraglich, Image, etc.) und rechtlichen Problemen (z. B. ableitbare Personendaten) führen oder große Aufwände in der konformen Datenfreigabe notwendig machen. Die Möglichkeit, bewusst oder unbewusst falsche oder fehlerhafte Daten einzuspielen, kann bei Missbrauch zudem Aufwände und Fehler in der Produktionsorganisation mit sich bringen (Bendel 2015; Hirsch-Kreinsen 2014, S. 427). Zwar werden insbesondere bei dezentral organisierten Systemen weniger Daten auf den individuellen beteiligten Systemen abgelegt, diese können trotz geringeren Umfangs dennoch kritisch sein. Beispiele sind personenbezogenen Daten, Unternehmensgeheimnisse oder Daten, aus denen Mitarbeiter unrechtmäßig überwacht werden könnten.

Die effektive und effiziente Nutzung sämtlicher verfügbarer Daten ist besonders in Bezug auf beteiligte Mitarbeiter mit Blick auf globale rechtliche Unterschiede nicht vollständig gewährleistet. Die Berücksichtigung des Datenschutzes führt zu einer intensiven **Integration weiterer Disziplinen wie Software und Rechtswissenschaften** für den Produktionsbetrieb. Datensicherheit gilt nicht ausschließlich für das SOPS und seine Algorithmik, sondern auch für das Digitale Abbild des zu produzierenden Produkts sowie sämtliche angeschlossenen Prozesse. Die **Qualitätssicherung und Überprüfung der Passfähigkeit des Digitalen Abbildes in der Entwicklung** ist für eine erfolgreiche Produktion unumgänglich. Regionale Unterschiede und Kulturen erschweren den Implementierungsprozess und sind in der Standortwahl als Restriktionen zu berücksichtigen.

N3: Aufwand und Komplexität in der Erstellung des Digitalen Abbildes

Durch das notwendige Frontloading, durch das sämtliche Daten und Informationen für das SOPS frühzeitig zur Verfügung gestellt werden müssen, nimmt der inhaltliche und organisatorische Aufwand and Komplexität zu. Die Vorausplanung und die Absicherung verschiedener Fälle und Möglichkeiten lässt durch die geringen und aufwendigen Kor-

rekturmöglichkeiten in der Produktion weniger Fehler zu als manuell korrigierbare, konventionelle Produktionssysteme. Das konventionelle Produktionssystem kann in der Regel iterativ manuell angepasst und optimiert werden. Klassisches Beispiel dafür ist die Fertigungen von Kunststoff-Spritzgussteilen. Ein für den Anwendungsfall unvollständiges „Digitales Abbild“ führt zu einer fehlerhaften oder gar nicht realisierbaren Produktion durch das SOPS.

Die *geringe Fehlertoleranz der Vorgaben für die Produktion* und das *zunehmende Frontloading* verschieben den *Anteil der Wertschöpfung verstärkt in die Entwicklung* des Produkts. Die Vollständigkeit, welche das von der Entwicklung spezifizierte Digitale Abbild erreichen muss, ist von zentraler Bedeutung, um fehlerfrei und effizient produzieren zu können. Eine konventionell übliche Vorserienproduktion (oder Muster und Prototypen auf der Produktionsanlage) ist bei noch unvollständigen Daten nicht oder nur mit großem Aufwand realisierbar. Das *erschwerte „Prototyping“* führt zu einer *Verlagerung in simulative und virtuelle Umgebungen*. Typische Auswirkungen eines für den Anwendungsfall nicht ausreichend spezifizierten Digitalen Abbilds sind äquivalent zu den Auswirkungen mangelnder Spezifikation von beispielsweise Fertigungszeichnungen und Modellen. Der Unterschied besteht darin, dass die Erfahrung des Produktionsmitarbeiters und dessen Hinterfragen der Spezifikation bei höherem Automatisierungsgrad an Bedeutung verlieren oder gar nicht mehr, beispielsweise auf Grund räumlicher Trennung, umsetzbar sind. Fehler können so erst spät oder gar nicht erkannt werden, was insbesondere bei geringen Stückzahlen oder hohen Produkteinzelkosten wirtschaftlich nicht vertretbar ist.

N4: Fehlerkorrektur im (Anlauf-) Prozess und Qualitätssicherung

Die Korrektur des Digitalen Abbildes beispielsweise der ersten produzierten Systemelemente führt zu großen Aufwänden, da die Nachvollziehbarkeit der Produktionsorganisation gegebenenfalls nicht ausreichend ist, nicht als reproduzierbar angenommen werden kann oder der Eingriff in das Digitale Abbild große Aufwände verursacht (vergleiche auch N1). Die Qualitätssicherung kann zwar im Anschluss an die Produktion für das individuelle Systemelement oder Produkt durchgeführt werden, hat aber erheblich größere Aufwände in der Fehlerkorrektur, da der Produktionsprozess von Gleichteilen sowohl zeitlich als auch anlagentechnisch (verschiedene Produktionsverfahren) unterschiedlich durchgeführt werden kann (siehe auch N3). Die Korrektur des organisationalen Prozesses, also eine holistische Anpassung der Produktionsbedingungen, kann allein durch das SOPS durchgeführt werden oder muss im Digitalen Abbild als Regelwerk hinterlegt worden sein.

Mit der Übergabe des Digitalen Abbildes ist nur im theoretischen Idealfall die Entwicklung des Produkts abgeschlossen. Vergleichbar dem konventionellen Produktionssystem zur Erreichung des spezifizierten Sollprodukts, sind je nach Produktkomplexität *Iterationen des Digitalen Abbildes in der Übergabe* erforderlich. Dabei spielt auch die Affinität

in der Entwicklung von Software eine Rolle, die Entwicklung und Implementierung iterativ zu gestalten und Simulation/ Kompilation zur Statusüberprüfung zu nutzen. Die Bedeutung der interdisziplinären Zusammenarbeit aus Entwicklern, Produktionsingenieuren und IT-Experten nimmt zu.

N5: Finanzieller Aufwand

Das finanzielle Investment (CapEx) für die Schaffung eines effektiven und effizienten sowie wirtschaftlichen SOPS ist als sehr hoch anzusehen, insbesondere im Vergleich zur konventionellen Fertigungsorganisationsformen: Begründet werden kann dies sowohl durch das Investment in vernetzte Maschinen und Anlagen, Hard- und Software sowie dem Aufwand in die Programmierung der SOPS-Algorithmik. Hinzu kommen die Aufwände bei der Erstellung des Digitalen Abbildes der zu fertigenden Produkte. Insgesamt kann sowohl durch die Veränderung der benötigten Kompetenzen als auch durch die zunehmende Interdisziplinarität eine Steigerung der Komplexität angenommen werden.

Die wirtschaftliche Entscheidung für ein SOPS sollte in der Regel nicht für einzelne Produkte getroffen werden, sondern *integraler Bestandteil der Geschäftsstrategie des Unternehmens* sein. Ausnahmen sind Produkte mit hohen Margen oder sehr großen Stückzahlen, die eine Wirtschaftlichkeitsrechnung positiv ausfallen lassen. Die Kalkulation des Return-on-Invest (RoI) basiert auf langfristigen Überlegungen und Strategien, kann aber einen besonderen *Mehrwert bei großer Individualität der Produkte* darstellen. Die Gegenüberstellung der Investitionen (CapEx) mit den Betriebskosten pro Stück (Betriebskosten OpEx) ist die Grundlage für die Bewertung¹⁵.

4.1.2 Analyse auf Basis von Vorteilen

V1: Zentrale oder dezentrale Organisation

SOPS können entweder über eine zentrale Steuerungseinheit verfügen oder über ein verteiltes, dezentral organisiertes System aus verschiedenen miteinander kommunizierenden CPS beziehungsweise CPD (Gräßler und Pöhler 2017a, 2017c; Gräßler et al. 2017). Die Organisationsform ist flexibel und auf beide Steuerungskonzepte anwendbar. Grundprinzipien der Selbstorganisation sind damit auch in bestehenden Systemen umsetzbar. Eine entsprechende Automatisierung kann den Wandel zu einem SOPS auch nachträglich ermöglichen.

In der theoretischen Betrachtung ist die Umsetzung eines SOPS als dezentral oder zentral organisiertes Produktionssystem denkbar. Relevant sind die Schnittstelle und die Spezifikation, in die das Digitale Abbild eingespielt wird und welche in der Folge für die Beschaffung und die Bereitstellung von Materialien, Prozessen etc. verantwortlich sind.

¹⁵ Weiterführende Unterstützung bei der ROI Berechnung (Griffin 2014 sowie Erläuterungen von CapEx und OpEx sind beispielsweise in (Eichhorn 2000) oder (Gutenberg 1951, 1983) auffindbar.

Eine definierte Schnittstelle als Übergabe legt die weiteren Prozesse und die weitere Organisation fest. Im dezentral organisierten SOPS kann die Schnittstelle beispielsweise auch ein Transportsystem sein (Gräßler et al. 2016d). Zur Schnittstelle gehört auch die Spezifikation der Kommunikation mit Systemelementen des SOPS beispielsweise in Form der Datenstruktur mit zugehöriger Semantik und Syntax.

V2: Räumlich globale Verteilung

Für das SOPS ist die physische und räumliche Anordnung der Systemelemente, die zum SOPS gehören, in der Ausübung der Planung irrelevant. Diese ist ein Parameter, der in der Umsetzung von Effizienz und Effektivität berücksichtigt wird und zur Integration von Logistiksystemen als Bestandteil des SOPS führt (Gräßler und Hentze 2019; Hirsch-Kreinsen 1998, S. 21). Zudem besteht die Möglichkeit, verschiedene SOPS miteinander zu verknüpfen.

Die Möglichkeit der räumlichen Verteilung basiert einerseits auf der *Loslösung der Entwicklung von der Produktion* (Gräßler et al. 2017) und andererseits auf der Integration von Logistikelementen in das SOPS. Sowohl die Entwicklung als auch die Produktion, können losgelöst voneinander durchgeführt werden, wenn die Schnittstelle und das Digitale Abbild aus der Entwicklung für das SOPS geeignet sind. Die *globale Aufspaltung von Entwicklung und Produktion* führt dabei zu Möglichkeiten, *Systeme oder Systemelemente in unmittelbarer Nähe des Absatzmarktes* zu produzieren. *Entwicklungsstandorte können so an Orten mit hoher Verfügbarkeit von Kompetenzen* angesiedelt werden, Produktionsstandorte hingegen in unmittelbarer Nähe zum Absatzmarkt. Dies führt zur Reduktion von Transport- und Logistikkosten. Ein Beispiel für die Relevanz von Transportwegen ist der Flugzeughersteller Airbus, welcher aus politischen Gründen an verschiedenen Standorten in Europa produziert und ein ausgeprägtes Netz an Transportsystemen für Flugzeugteile mit großen Ausmaßen vorhalten muss (Airbus BELUGA XL). Etabliertes und alltägliches Beispiel ist die Entwicklung von Produkten in Europa und die anschließende Produktion in Asien.

V3: Integration oder Anbindung an Transportsysteme

Die echtzeitfähige Anbindung und exakte Bereitstellung der produzierten Systemelemente für Logistikdienstleistungen und -systeme innerhalb oder außerhalb der Fertigung kann als Parameter in der SOPS berücksichtigt werden. So kann eine effektive Schnittstelle adaptiv gestaltet werden, wodurch Warte- und Leerlaufzeiten im SOPS vermieden werden können (Gräßler und Hentze 2019; Scholz-Reiter et al. 2004).

Die *Integrationsfähigkeit des SOPS in die Wertschöpfungskette* und der automatisierte Abgleich mit den für die Produktion relevanten Daten des Umfelds verbessert die Produktionsprozesse. Die Möglichkeit, Transportsysteme oder -prozesse in das SOPS zu integrieren, wie bereits in V2 erläutert, eröffnet beispielsweise die Option der *zusätzlichen Akquisition von Produktionsleistungen* durch SOPS. Dabei werden Produktionssys-

teme, die auf digitalen Produktionsmarktplätzen Leistungen anbieten, einbezogen (Winkelhake 2017, 122ff.). Die Veränderung des Geschäftsmodells der klassischen Produktion ist dabei als „verlängerte Werkbank“ gängig. Das SOPS und die Verwaltung des eingespielten Digitalen Abbilds, können hier neue weitreichende Potenziale offenlegen, indem die Adaption nicht mehr auf langfristiger Basis geschieht, sondern auf kurzfristiger oder sogar echtzeitfähigen Realdaten.

V4: Adaptive Statusänderungen in Echtzeit

SOPS können in Echtzeit auf Veränderungen wie Ausfälle, Störungen an Anlagen, fehlende Materialien oder sonstige Mängel an Kapazitäten reagieren. Das SOPS strebt die optimale Balance des Systems an und optimiert seine vielfältigen Ziele in Echtzeit. Eine vergleichbare Reaktionszeit in der Planung durch Menschen ist ausgeschlossen.

Hohe Flexibilität und Adaptivität der Produktionsorganisation in Echtzeit lässt das Produktionssystem zu einem dynamisch stark veränderlichen und damit flexiblen System werden. Die Möglichkeit *automatisierte Mehrzieloptimierung* durchzuführen, ist Chance und Risiko zugleich und erfordert in der Entwicklung eine *Einschätzung, Beschreibung und Spezifikation möglicher Produktionsszenarien und/ oder Qualitätsstandards*. Leistungsstarke Prozessoren können ein Vielfaches an Datenmengen verarbeiten, wie es Einzelpersonen oder Personengruppen in dieser Position leisten können. Insgesamt wird durch einen hohen Automatisierungsgrad und durchgängige Digitalisierung eines Produktionssystem die Möglichkeit geschaffen, das System und den Produktionsprozess Transparent zu analysieren. Beispiel ist die Anbindung eines klassischen MES System mit Funktionalitäten der Maschinen- und Betriebsdatenerfassung (MDE/BDE).

V5: Erfüllung von Funktionen durch differenzierte Fertigungsverfahren realisierbar

Auf Basis des Digitalen Abbilds ist die Festlegung auf ein einzelnes Fertigungsverfahren für einen Schritt eines Arbeitsplans nicht zwingend erforderlich. Bei vorliegenden Informationen im Digitalen Abbild kann das System sowohl die Anlagenauswahl als auch die Fertigungstechnologien variieren (Gräßler et al. 2018d). Etabliertes Beispiel ist der Ausgleich von Kapazitätsspitzen der Subtraktiven Fertigung (z. B. Trennen, Spanen, Fräsen, Drehen, etc.) durch Generative Fertigung (z. B. Urformen, Additive Fertigung, etc.) (DIN 8580; Kohlhuber et al. 2016, S. 9; Lachmayer et al. 2018, 115ff.).

Flexible Möglichkeiten der Auswahl von Produktionsverfahren sind in der Lage, Kapazitätsspitzen oder Engpässe in der Produktion zu glätten. Notwendig sind dafür die *Inputdaten verschiedener möglicher Verfahren im Digitalen Abbild*, was den Aufwand der Beschreibung der Produkt- und Produktionsprozessspezifikation, dessen Simulation etc. erhöht. Die Potenziale sind insbesondere beim Einsatz von additiven Fertigungsverfahren groß und in vielfältigen Forschungsprojekten und Veröffentlichungen thematisiert (Kohlhuber et al. 2016). Beinhaltet ein SOPS beispielsweise diese Möglichkeit, ist eine

Bemusterung oder ein Prototyping für Elemente möglich und bei bereits bestehendem SOPS eine sinnvolle und kostengünstige Alternative zur individuellen Produktion eines Musters oder Prototypen. Ein Muster oder Prototyp des Digitalen Abbilds ist entsprechend notwendig, kann aber je nach vorliegendem Anwendungsfall unvollständig sein. Beispiele dafür sind Muster oder Prototypen, welche keine Funktionalitäten erfüllen müssen, sondern ausschließlich der Überprüfung des optischen Erscheinungsbildes dienen (z. B. Mock Up, Design Review, etc.).

4.2 Priorisierung der Auswirkungen

Die in der Analyse identifizierten Auswirkungen¹⁶ werden in der Folge mit Perspektive auf das Zielsystem dieser Arbeit, die Methode Berücksichtigung von SOPS in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung (CoSOPS), im direkten Paarweise Vergleich zueinander bewertet. Die vom Autor dieser Arbeit durchgeführte subjektive Bewertung mit Hilfe der Methode des Paarweisen Vergleichs dient der Reduktion relevanter Auswirkungen sowie der Priorisierung und gezielteren Analyse und Synthese der Inhalte beispielsweise hinsichtlich geringer Relevanz im Verhältnis zu anderen Auswirkungen. Zudem können durch die Methode des Paarweisen Vergleichs mögliche Dopplungen identifiziert werden, da diese im Bewertungsergebnis Ähnlichkeiten zueinander aufzeigen (REFA 2015, 103ff.).

Die Durchführung des Paarweisen Vergleichs, angelehnt an die Beschreibung der Methode nach Günther (Günther 2010, 257f.), ist in Tabelle 5 als Ausschnitt sowie im Anhang 10.5 vollständig dokumentiert. Der Paarweise Vergleich bewertet in jedem Schritt je zwei Auswirkungen (z. B. A & B) zueinander und beschreibt das Ergebnis mit 1 ($A=B$), 0 ($A<B$) und 2 ($A>B$), wobei größer oder kleiner in diesem Anwendungsfall die Bewertung der größeren oder kleineren Relevanz der Auswirkungen auf das entwicklungsmethodische Vorgehen für die interdisziplinäre Produktentwicklung festlegt. Durch die geringe Anzahl von nur zwei Auswirkungen im jeweiligen Entscheidungsfall, kann der Autor in der Betrachtung mit dem Wissen aus der vorhergegangenen Literaturanalyse für diese Arbeit sowie den Ergebnissen und dessen Diskussionen der relevanten Vorveröffentlichungen auf internationalen Fachkonferenzen valide Aussagen für den Paarweisen Vergleich treffen. Bei mehr als zwei Auswirkungen im Betrachtungsbereich ist das Abwägen deutlich schwieriger und aufwendiger, was den Vorteil der Methode des Paarweisen Vergleichs hervorhebt. Auf Grund der teilweise starken Zusammenhänge der Auswirkungen, wird die Gleichbewertung ermöglicht, da auf Grund der Anzahl an Auswirkungen davon auszugehen ist, dass ein sinnvolles und nachvollziehbares Bewertungsergebnis vorliegt.

¹⁶ Die Übertragung der Auswirkungen in die Auswirkungsliste wurde ausschließlich aus Gründen der Verständlichkeit und Lesbarkeit im Vergleich zum vorliegenden Text ohne inhaltliche Veränderungen überarbeitet.

Tabelle 5: Paarweiser Vergleich der Auswirkungen (Ausschnitt 1 bis 19, 1-44 im Anhang)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	...
1	■	1	2	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	
2	1	■	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2
3	0	0	■	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	1	1	2	■	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	2	
5	2	2	2	1	■	1	1	2	2	1	1	0	2	2	0	1	0	1	2	
6	2	2	2	2	1	■	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	
7	1	1	2	2	1	0	■	1	1	0	0	0	2	2	0	1	0	0	2	
8	1	2	2	1	0	0	1	■	0	0	0	0	2	2	0	1	0	0	2	
9	1	2	2	1	0	0	1	2	■	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2	
10	2	2	2	1	1	1	2	2	2	■	1	1	2	2	1	2	1	1	2	
11	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1	■	0	2	2	0	1	0	1	2	
12	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	■	2	2	0	2	0	1	2	
13	2	2	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	■	1	0	0	0	0	2	
14	1	1	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	■	0	0	0	0	2	
15	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	■	2	0	1	2	
16	2	2	2	1	1	0	1	1	2	0	1	0	2	2	0	■	0	1	2	
17	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	■	2	2	
18	1	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	0	■	2	
19	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	■	
...																				■

Aus der Auswertung des Paarweisen Vergleichs wird die Aktivsumme der Bewertungen gebildet, welche aus der Skala vom möglichen Minimalwert 0 bis zum möglichen Maximalwert von 88 Punkten besteht. Zur intuitiveren Verständlichkeit wird die Skala mit dem Dreisatz auf 100 Punkte normiert. Die Auswirkungen werden zur Strukturierung in vier Gruppen unterteilt. Diese subjektive Klassifizierung wird vorgenommen, um die Menge an Auswirkungen und deren Relevanz beschreibbarer und übersichtlicher zu machen.

Definiert werden die Gruppen:

- A: 80 bis 100 Punkte: Sehr große Auswirkungen auf die Entwicklung
- B: 60 bis 80 Punkte: Große Auswirkungen auf die Entwicklung
- C: 40 bis 60 Punkte: Mittlere Auswirkungen auf die Entwicklung
- D: 0 bis 40 Punkte: Geringe Auswirkungen auf die Entwicklung

Die Einteilung der Aktivsummenskala ist dabei mit der Absicht definiert, den Fokus auf die Gruppen der stärksten Relevanz zu legen, um eine kleinteilige Analyse der Einzelauswirkungen zu vermeiden und ein sinnvolles Ergebnis zu aggregieren. Die Hauptbetrachtung, welche auf den Gruppen A, B und C liegt, berücksichtigt auch Werte unterhalb 50%

der Aktivsumme (50 Punkte bei Normierung), um trotz der Gruppierung eine ausreichend große Menge an Auswirkungen in Betracht ziehen zu können. In diesem Schritt wird die Auswirkungsliste um die Gruppe D reduziert, um die Menge für die Analyse handhabbarer und übersichtlicher zu machen. Um diesen Schritt valide durchführen zu können, wurde die Gruppe D zunächst intensiv auf Auffälligkeiten oder Fehler in der Bewertung untersucht, um in der weitergehenden Betrachtung keine relevanten Auswirkungen oder Fehlbewertungen zu übersehen. Da diese Prüfung aus Sicht des Autors keine zusätzlich zwingend erforderliche Auswirkung identifiziert, ist das Ergebnis des Paarweisen Vergleichs als qualitativ und valide anzusehen. Die vollständige Liste der Auswirkungen der Gruppe D ist ebenfalls im Anhang 10.6 zu finden.

Tabelle 6: Priorisierte und in Gruppen (A(dunkelblau), B(hellblau), C(grau)) unterteilte Auswirkungen (vollständige Liste im Anhang)

#	Auswirkung	normiert auf 100
17	<i>Schnittstellendefinitionen in der Systemarchitektur</i>	92,05
42	<i>Lebenszyklusgerechte Entwicklung</i>	92,05
15	<i>Numerische Aufweitung der Systemarchitektur</i>	85,23
34	<i>Einschätzung, Beschreibung und Spezifikation möglicher Produktionsszenarien und/oder Qualitätsstandards</i>	85,23
6	<i>Geringe Fehlertoleranz für die Vorgaben an die Produktion</i>	82,95
26	<i>Eine definierte Schnittstelle als Übergabe erforderlich</i>	82,95
36	<i>Inputdaten verschiedener möglicher Verfahren im Digitalen Abbild</i>	81,82
10	<i>Verlagerungen in simulative und virtuelle Umgebungen</i>	80,68
12	<i>Integraler Bestandteil der Geschäftsstrategie des Unternehmens</i>	80,68
11	<i>Iterationen des Digitalen Abbildes in der Übergabe</i>	76,14
38	<i>Individuelles Digitales Abbild</i>	76,14
5	<i>Qualitätssicherung und Überprüfung der Passfähigkeit des Digitalen Abbildes für das SOPS in der Entwicklung</i>	73,86
43	<i>Vorausschau der Aktivitäten der Lebenszyklusphasen</i>	73,86
16	<i>Fokus auf vereinfachte Systemelemente</i>	69,32
35	<i>Flexible Möglichkeiten der Auswahl von Produktionsverfahren</i>	69,32

18	<i>Mehraufwand für die Systemintegration</i>	67,05
7	<i>Zunehmendes Frontloading</i>	54,55
27	<i>Loslösung der Entwicklung von der Produktion</i>	54,55
8	<i>Verstärkter Anteil der Wertschöpfung in der Entwicklung</i>	53,41
9	<i>Erschwertes „Prototyping“</i>	50,00
13	<i>Mehrwert bei großer Individualität der Produkte</i>	50,00
37	<i>Bemusterung oder Prototyping für Elemente möglich</i>	50,00
4	<i>Integration weiterer Disziplinen beispielsweise Software und Rechtswissenschaften</i>	46,59
1	<i>Kompetenzverlagerung in die Entwicklung</i>	44,32
30	<i>Entwicklungsstandorte an Orten mit hoher Verfügbarkeit von Kompetenzen</i>	44,32
14	<i>Fokussierung auf Standard Produktionsverfahren</i>	43,18
29	<i>System oder Systemelementproduktion in unmittelbarer Nähe des Absatzmarktes</i>	43,18
28	<i>Globale Aufspaltung von Entwicklung und Produktion</i>	42,05

4.3 Zuordnung der Auswirkungen zu den Betrachtungsbereichen

Im nächsten Schritt werden die reduzierten Auswirkungen der Gruppen A, B und C Betrachtungsbereichen zugeordnet. Ziel ist es, in Identifikation von relevanten Einflüssen an die Methodenentwicklung Eingriffspunkte zu identifizieren. Zudem sollen besonders kritische Abschnitte der interdisziplinären Entwicklung sowie Auswirkungen von hoher Relevanz herausgestellt werden. Die Perspektive liegt dabei, wie bereits bei der Bewertung der Auswirkungen, auf der Relevanz für die Berücksichtigung von SOPS in der interdisziplinären Entwicklung. Mehrfachzuordnungen sind sinnvoll und methodisch möglich. Basierend auf dem Holistischen Lebenszyklusmodell (HPLZ), vergleiche HPLZ-Modell in Abbildung 8, und der Detaillierung der interdisziplinären Entwicklung im V-Modell der Richtlinie VDI 2206, vergleiche Kapitel 2.2.1, werden zwei übergeordnete Betrachtungsbereiche angenommen und detailliert. Dabei steht die Betrachtung der interdisziplinären Produktentwicklung als direkter Einfluss auf das entwicklungsmethodische Vorgehen im Vordergrund. Der Holistische Produktlebenszyklus (HPLZ) stellt indirekte Einflüsse aus Lebenszyklusphasen abseits der klassischen Phasen der Produktentwicklung für die Berücksichtigung von SOPS in der interdisziplinären Entwicklung dar:

- 1.) **Betrachtungsbereich 1: Interdisziplinäre Produktentwicklung** mit dem V-Modell (vergleiche 2.2.1 und 0) bestehend aus den in der VDI 2206 definierten und im V-Modell dargestellten Aufgaben und Aktivitäten bezüglich:
 - a.) Anforderungserhebung
 - b.) Anforderungsmanagement
 - c.) Modellierung und Analyse
 - d.) Systemarchitektur und Design
 - e.) Implementierung der Systemelemente
 - f.) Systemintegration und Verifikation
 - g.) Übergabe und Validierung
- 2.) **Betrachtungsbereich 2: Holistischer Produktlebenszyklus (HPLZ)** ausgenommen Produktentwicklung (vergleiche 2.2)
 - h.) Strategischer Planung
 - i.) Realisierung/Produktion
 - j.) Produktnutzung
 - k.) End-of-Life

Entsprechend der Detaillierungen a.) bis k.) der beiden genannten übergeordneten Betrachtungsbereiche wird für jede Auswirkung individuell eine Bewertung von „0: nicht relevant“, „1: relevant“ und „2: sehr relevant“ zugeordnet. Die Zuordnung geschieht dabei durch den Autor dieser Arbeit. Um die bei der Priorisierung erhaltenen Ergebnisse und die unterschiedliche Bedeutungsschwere der Auswirkungen zu berücksichtigen, werden die drei Gruppen A (mal Faktor 3), B (mal Faktor 2) und C (mal Faktor 1) mit Faktoren belegt. Diese Faktorregel wurde iterativ entwickelt und mit alternativen Faktorhöhen (Beispiel 5, 3, 1)¹⁷ durchgeführt. Da im Ergebnis keine relevanten Veränderungen erkennbar sind, wird die angegebene Auswahl für diesen Anwendungsfall als valide betrachtet. Die Gesamtübersicht ist im Anhang 10.6 zu finden.

¹⁷ Die unterschiedlichen Ergebnisse der Faktorvariation wurden in Microsoft Excel durchgeführt und sind mit Hilfe der zugehörigen Excel-Datei reproduzierbar.

Tabelle 7: Zuordnung der priorisierten Auswirkungen auf detaillierte Betrachtungsbe-
reiche (mit Faktor)

# (Priorisierte Auswirkung)	Faktor	a.) Anforderungserhebung	b.) Anforderungsmanagement	c.) Modellierung und Analyse	d.) Systemarchitektur und Design	e.) Implementierung der Systemelemente	f.) Systemintegration und Verifikation	g.) Übergabe und Validierung	h.) Strategischer Planung	i.) Realisierung/Produktion	j.) Produktnutzung	k.) End of Life
17	3	6	3	3	6	3	6	3	0	6	3	3
42	3	6	3	0	0	0	0	3	6	3	3	3
15	3	6	3	3	6	6	6	3	3	6	0	0
34	3	6	6	3	3	6	3	6	0	6	0	0
6	3	6	6	6	6	6	6	6	3	6	0	0
26	3	6	6	6	3	6	3	6	6	6	0	0
36	3	6	3	6	3	6	6	6	3	6	0	0
10	3	3	0	6	0	3	6	6	3	0	0	0
12	3	6	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0
11	2	0	4	0	2	2	0	4	0	4	0	0
38	2	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	0
5	2	4	2	4	2	2	4	4	0	0	0	0
43	2	4	4	2	0	0	0	2	4	2	2	2
16	2	4	2	0	4	4	4	2	4	2	0	0
35	2	4	2	4	0	4	0	0	2	4	0	0
18	2	0	0	4	4	2	4	0	4	4	0	0
7	1	2	1	2	1	1	2	1	2	0	0	0
27	1	0	0	0	0	0	2	2	2	2	0	0
8	1	1	0	1	1	2	1	1	2	1	0	0
9	1	2	1	2	2	2	2	0	1	1	1	0
13	1	2	2	2	2	2	1	1	2	0	0	0
37	1	1	1	2	1	2	1	2	0	2	1	0
4	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
1	1	2	1	0	0	0	0	0	2	1	0	0
30	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
14	1	2	0	0	2	2	0	0	1	2	0	0
29	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0
28	1	0	0	0	0	0	2	2	2	1	0	0
Summe (normiert auf 100)		81	53	58	49	63	61	62	63	67	14	7

Bei Auswertung der Ergebnissummen ist auffällig, dass die Lebenszyklusabschnitte Produktnutzung sowie End-of-Life im Verhältnis zu den übrigen Detaillierungen der Betrachtungsbereiche keine hohe Gewichtung für die Einflüsse von SOPS auf die interdisziplinäre Produktentwicklung aufzeigen. Dies bedeutet einerseits, dass diese Lebenszyklusabschnitte keinen großen aktiven Einfluss auf das entwicklungsmethodische Vorgehen haben oder sich andererseits in ihrem Einfluss nicht bedeutsam von der konventionellen Produktion unterscheiden. Ein Mangel an identifizierten Auswirkungen der genannten Abschnitte kann trotz wissenschaftlicher Vorveröffentlichungen und deren Diskussion auf internationalen Fachkonferenzen vorhanden sein, jedoch nicht nachvollziehbar nachgewiesen werden.

Die höchste Bewertung (81) erhält in Tabelle 7 die Anforderungserhebung. Da in dieser zu Beginn des Projekts sämtliche Eigenschaften und Merkmale identifiziert, entwickelt und gesammelt werden, die zur Spezifikation des zu entwickelnden Systems notwendig sind, zeigt die hohe Bewertung den Eingriff der Veränderungen durch das SOPS für den gesamten Entwicklungsprozess. Die nächsthöhere Bewertung (67) erhält der Produktlebenszyklusabschnitt Produktion/ Realisierung. Dies impliziert die Betrachtung des SOPS und dessen Restriktionen für die interdisziplinäre Produktentwicklung, also die Ergebnisse und die Relevanz der zuvor durchgeführten Auswirkungsanalyse (Kapitel 4.1).

Auf Grund der hohen Bewertungen aller verbleibenden Detaillierungen der Betrachtungsbereiche zeigt sich, dass sämtliche Einflüsse auf die interdisziplinäre Produktentwicklung unter Berücksichtigung von SOPS eng miteinander verknüpft sind. Das angestrebte Lösungssystem, eine Methode zur Berücksichtigung von SOPS in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung, muss die verschiedenen Angriffspunkte und Auswirkungen berücksichtigen können. Ein Eingriff in ausschließlich eine Detaillierung eines Betrachtungsbereiches ist nach der Analyse nicht ausreichend. Die kontinuierliche und durchgängige Integration der Berücksichtigung von SOPS in der interdisziplinären Produktentwicklung ist neben der aktiven Förderung des Frontloadings und der Wissensvermittlung in frühen Phasen der Produktentwicklung bereits zu diesem Zeitpunkt der Synthese als notwendig zu beschreiben.

4.4 Synthese resultierender Einflüsse für das Lösungssystem

Um aus den zugeordneten analysierten Auswirkungen auf die detaillierten Betrachtungsbereiche Ansätze zur Lösung der Forschungsfrage der Arbeit zu transferieren oder zu detaillieren, wird in der Folge die Systemperspektive verändert: Für das Zielsystem der Arbeit, die Methode CoSOPS, werden Einflüsse abgeleitet, die für die Entwicklung der Methode CoSOPS relevante inhaltliche Ergebnisse zur Berücksichtigung zur Verfügung stellen. Diese werden in der anschließenden Methodenentwicklung und -ausarbeitung integriert. Dafür werden die Erkenntnisse der Vor- und Nachteile, der Auswirkungen und der Zuordnung zu den Betrachtungsbereichen genutzt, um die Einflüsse zu formulieren

und zusammenzufassen. Einflüsse differenzieren sich von den zuvor identifizierten Auswirkungen, da sie sich konkret auf das entwicklungsmethodische Vorgehen, dessen beschriebene Aufgaben, Aktivitäten und Methoden beziehen und auf Basis der Analyse und Synthese bereits Vorgaben für die Gestaltung der Methode CoSOPS enthalten. Zusammengefasst werden die Einflüsse anhand der grundlegenden Struktur des entwicklungsmethodischen Vorgehens mit dem V-Modell in verschiedenen Einflussgruppen. Dies ist auch strukturell bereits ein Vorgriff auf eine Lösung in der Methode CoSOPS. Es zeigt sich bereits, dass keine vollständig neue Form einer Entwicklungsmethodik zu erarbeiten ist, da die Einflussgruppen auch strukturell auf das entwicklungsmethodische Vorgehen mit dem V-Modell einwirken. Es wird entsprechend nicht das Ziel verfolgt eine neue Entwicklungsmethode ausschließlich für SOPS zu erarbeiten, sondern eine individuelle Lösungsausprägung mithilfe der VDI Richtlinie 2206 zu ermöglichen (Anforderung A5 und A8).

Die aus der zuvor durchgeführten Analyse abgeleiteten und transferierten gewählten fünf Einflussgruppen resultieren aus der zuvor durchgeführten Zuordnung und sind in Abbildung 24 in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm nach Ishikawa¹⁸ angeordnet (Schmidt 2014, S. 312). Die Darstellung unterstützt dabei die Intention der fünf Einflussgruppen, den notwendigen Input für die Gestaltung und Ausarbeitung der Methode CoSOPS zur Verfügung zu stellen. Die Einflussgruppen werden in der Folge ausführlich erläutert und beschrieben.

Die Erläuterung der folgenden Einflussgruppen wird jeweils mit einer Tabelle abgeschlossen, welche die Ergebnisse der jeweiligen Einflussgruppe auf SOPS exemplarisch zusammenfasst. Diese Darstellung ist nicht in Form einer lösungsneutralen Anforderung gewählt, sondern beinhaltet die im Kapitel 4 erarbeiteten Lösungsansätze. Die Tabellen sollen auch dazu dienen, die Ergebnisse in der Evaluation abzusichern und zu prüfen, dass die in der Analyse erarbeiteten Inhalte in der Methode repräsentiert werden.

¹⁸ Die Beschreibung des Vorgehens sowie der Anwendung des Ursache-Wirkungs-Diagramms ist in (Schmidt 2014, 312ff.) nachlesbar.

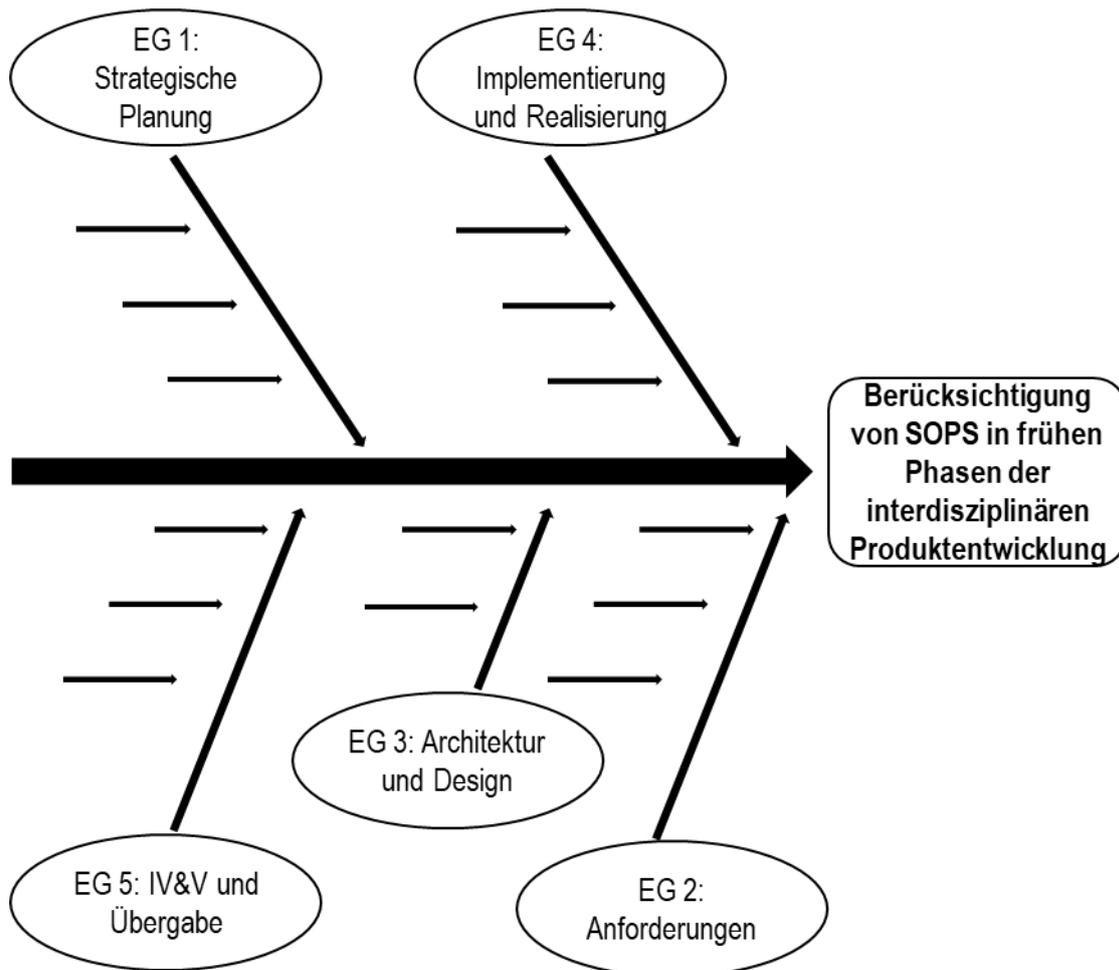


Abbildung 24: Übersicht der Einflussgruppen im Ursache-Wirkungs-Diagramm nach Ishikawa

4.4.1 Einflussgruppe 1: Strategische Planung

Die Einführung oder Nutzung eines SOPS für die Produktion eines Systems oder eines Systemelements muss Berücksichtigung im Geschäftsmodell der strategischen Planung finden. Beschriebene Aspekte und Möglichkeiten, die Produktion oder Teilbereiche und Aktivitäten der Produktion an Dienstleister auszulagern und die eigenen Aktivitäten auf die Entwicklung des Produkts in Form des Digitalen Abbilds zu konzentrieren, beeinflussen die strategische Planung des Systems und des Entwicklungsprojekts erheblich. Die Möglichkeit, einzelne Systemelemente losgelöst von der sonstigen Produktion herzustellen, beispielsweise zur Reduktion von Transport und Logistikkosten durch die mögliche Nähe zum Absatzmarkt, muss bereits in der Strategischen Planung und der Planung der gesamten Wertschöpfungskette Berücksichtigung finden und auf Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit geprüft werden. Sollten solche Optionen nicht bereits in der strategischen Planung geprüft werden, wird die nachträgliche Realisierung und Analyse im weiteren Verlauf des Produktentwicklungsprozesses aufwändiger oder die Betrachtung wird auf Grund des vorliegenden Aufwands unmittelbar verworfen. Frühzeitige Betrachtungen

und Einbeziehung relevanter Stakeholder können unnötige Iterationen vermeiden, die für eine spätere Berücksichtigung von SOPS notwendig werden.

Resümiert werden kann, dass in der Definition des Rahmens für den Entwicklungsprozess durch die Strategische Planung Alternativen zur Verfügung gestellt werden müssen, welche in der Folge gemeinsam analysiert werden: Wird dem Entwickler seitens der Strategischen Planung keine Option oder kein Hinweis zur Nutzung von SOPS gegeben, wird dieser die Option auf Grund des Aufwands der Betrachtung eher vernachlässigen und die tatsächlichen Potenziale für das individuelle Produkt nicht weiter untersuchen.

Diese innovativen Impulse sind eine der Kernaufgaben der Strategischen Planung, die den gesamten Lebenszyklus eines Produkts vorausdenken und in iterativer Zusammenarbeit mit der Produktentwicklung die Konkretisierung und Detaillierung des Produkts beziehungsweise des gesamten Produktportfolios mitgestalten muss. So spielen Daten aus der Nutzung, die Montage der Produkte durch Dienstleister außerhalb der üblichen Montage oder deren Unterstützung durch digitale und virtuelle Technologien wie VR/AR bereits in der strategischen Planung eine entscheidende Rolle. Den Lebenszyklus zu betrachten bedeutet dabei auch, die entsprechenden Schnittstellen der Wertschöpfungskette zu Zulieferern, Produzenten und Kunden zu identifizieren und zu definieren, um diese auf die Nutzung von Daten- oder Materialtransfer vorzubereiten (Bauernhansl et al. 2015).

Ein in der Anwendung bekanntes Geschäftsmodell, welches durch die Eigenschaften von SOPS unterstützt werden kann, ist die Versorgung des Kunden in der Nutzungsphase mit Ersatz- oder Gebrauchsteilen (Beispiel: Razor and Blade Geschäftsmodell (Gassmann et al. 2017)). Die Möglichkeit der individuellen Produktion an verschiedenen Standorten zur Reduktion der Logistikkosten oder Steigerung der Verfügbarkeit sowie automatisierte Arbeitsvorbereitung für Einzelanfertigungen oder Kleinserien sind Beispiele zur wirtschaftlichen Umsetzung eines SOPS.

Auf Unternehmens- oder Produktportfolioebene ist die strategische Ausrichtung in Bezug auf SOPS ein wichtiger Faktor: Beispielsweise die Loslösung der Produktion von der Entwicklung (Gräßler et al. 2017) führt zu Überlegungen, das bisher beispielsweise als OEM auftretende Unternehmen in ein reines Entwicklungsunternehmen zu transferieren oder alternativ die Produktion als Fokus und Alleinstellungsmerkmal festzulegen. Die Organisationsstruktur beziehungsweise das gewählte Geschäftsmodell verändert dabei das entwicklungsmethodische Vorgehen. Als Beispiel sind hier neue relevante Stakeholder, das tatsächliche Zielprodukt der Produktentwicklung oder neue Möglichkeiten zur Realisierung von Mustern, Prototypen und Vorserien zu nennen.

Tabelle 8: Ergebnisse EG1

#	Zusammengefasste Einflüsse auf SOPS der EG1:
E1.1	Geschäftsmodelle sollen hinsichtlich Seriengröße und Lebenszyklusphase analysiert werden.
E1.2	Der strategische Einsatz von Prototypen, Mustern und Kleinserien ist vor Entwicklungsbeginn zu prüfen.
E1.3	Die Auslagerung von (Teilen) der Produktion muss als strategische Vorgabe in Betracht gezogen werden.
E1.4	Die Möglichkeit, ausschließlich die Entwicklung durchzuführen und die Produktion auszulagern, muss bewertet werden.
E1.5	Subsystems oder Elemente können bereits frühzeitig strategisch anders betrachtet werden als übrige (z. B. auf Grund der Logistik, des Transports oder Nähe zum Absatzmarkt).
E1.6	Stakeholder der Wertschöpfungskette sollen einbeziehen und auf Schnittstellen vorbereitet werden.
E1.7	Die lebenszyklusgerechte Planung (Berücksichtigung späterer Phasen in der Strategie sowie im Geschäftsmodell) ist Teil der Analyse
E1.8	Der gezielte Einsatz von neuer Technologie (Digitales Abbild, VR/AR, Simulation etc.) wird geprüft.

4.4.2 Einflussgruppe 2: Anforderungen - Anforderungserhebung und -management

Zur Berücksichtigung von SOPS müssen geeignete Werkzeuge zur Überprüfung der Anforderungen und Restriktionen aus der Lebenszyklusphase der Produktion (Realisierung) zur Verfügung stehen: Die Überprüfung, ob diese Produktionsorganisationsform grundsätzlich ausgeschlossen wird oder als eine Option weiter in Betracht gezogen werden kann, kann in Folge der Strategischen Planung durch die Ergebnisse der Analyse in der Anforderungsfestlegung angereichert werden. Zwar werden erst in der Architektur und dem Design sowie der (disziplinspezifischen) Implementierung die detaillierte Gestaltung der Systemelemente und deren Produktionsverfahren ausgewählt und definiert, diese werden jedoch von den Anforderungen elementar beeinflusst und können auf Basis sowohl strategischer Entscheidungen, als auch technischer oder wirtschaftlicher Restriktionen, welche in Anforderungen formuliert sind, beeinflusst werden. Diese Berücksichtigung ist die logische Fortführung der Einflussgruppe 1.

Die Bedürfnisse und Anforderungen sind in der Eigenschaftsabsicherung, der Verifikation und Validierung, die entscheidende Vergleichsgröße in der Absicherung der Eigenschaften des Systems. Eine Unterstützung des Entwicklers durch Hinweise, welche Anforderungen für die Nutzung der für ihn neuen Organisationsform SOPS sinnvoll sind,

senkt die Hemmschwelle zur Nutzung eines solchen Produktionssystems und eröffnet dem Entwickler eine zusätzliche Perspektive. Die Bereitstellung von strukturiertem Wissen und Erfahrungen helfen dem Entwickler, eine Alternative in Betracht zu ziehen, deren Vor- und Nachteile zu verstehen und für den individuellen Anwendungsfall zu berücksichtigen.

Die Anforderungserhebung ist der definierende Schritt, in dem die Anforderungen ermittelt, gesammelt und definiert werden. Dieser wird in der Folge intensiv durch das Anforderungsmanagement unterstützt: Gilt die Betrachtung der Relevanz für SOPS für die Anforderungserhebung, so gilt sie auch für das Anforderungsmanagement im weiteren Verlauf des Entwicklungsprojektes. Die Rückspiegelung von Änderungen oder Detaillierungen der Anforderungen, beispielsweise aus den unterschiedlichen beteiligten Disziplinen in die Spezifikation/ Anforderungsliste des Gesamtsystems, ist Aufgabe des Anforderungsmanagements. Wird beispielsweise in der Implementierung eines Systemelements entschieden, dass ein SOPS für ein Systemelement zum Einsatz kommen soll, so muss das Anforderungsmanagement dafür sorgen, dass die produktionsorganisationsspezifischen Anforderungen in die Spezifikation /Anforderungsliste integriert werden. Je eher die Entscheidung durch Frontloading getroffen werden kann, je geringer sind der Aufwand und die Kosten von Anforderungsänderungen im Verlauf des Entwicklungs- und Realisierungsprojekts.

Tabelle 9: Ergebnisse EG2

#	Zusammengefasste Einflüsse auf SOPS der EG2:
E2.1	Die strukturierte Orientierung anhand von Merkmalen für die Identifikation SOPS-spezifischer Anforderungen (HML für SOPS) ist Bestandteil der Methode, beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> • Granularität / Anzahl der Systemelemente • Variantenanzahl und individualisierte Systemelemente
E2.2	Anforderungen an die dezentrale Integration, Test und Inbetriebnahme des Systems sind zu bewerten.
E2.3	Die (virtuelle) Eigenschaftsabsicherung des SOPS sowie des Produkts (Verifikation und Validierung) durch das Digitale Abbild ist in erster Abschätzung realistisch.
E2.4	Es werden Anforderungen an den Zeitpunkt der Entscheidung für oder gegen die Nutzung eines SOPS vorgegeben (insbesondere aus wirtschaftlicher Perspektive)
E2.5	Die veränderte Definition von Anforderungen und deren Absicherung bei rein digitalen Absicherungsmethoden wird in der Anforderungserhebung berücksichtigt.

4.4.3 Einflussgruppe 3: Systemarchitektur und Design

In der Systemarchitektur werden für das Produkt damit auch die Produktion wichtige Entscheidungen getroffen, womit diese das zentrale Konzept in der Produktentwicklung beschreibt (Inkermann et al. 2019). Die Verwendung von Standardkomponenten (COTS), die Definition von Schnittstellen zwischen den Subsystemen und Systemelementen sowie die Zuordnung der zu erfüllenden Anforderungen an die Systemelemente. Damit werden auch die Granularität des Produkts und der Funktionsintegration sowie die Komplexität in der Architektur festgelegt. Ausgehend von der These, dass SOPS besondere wirtschaftliche Potenziale bei einfachen und wenig integrierten Systemelementen haben, ist diese Zuordnung der Anforderungen entscheidend für die Nutzung von SOPS und muss in der Architekturgestaltung berücksichtigt werden. Standardisierte Schnittstellen bieten nicht nur die Möglichkeit, COTS zu verwenden, sondern vereinfachen die Spezifikation des Digitalen Abbildes für die Produktion von Komponenten und deren Integration. Da in der Architektur nicht nur eine Lösung als festgelegte Architektur entwickelt wird, sondern verschiedene Lösungsalternativen entwickelt und weiterfolgt werden, können auch völlig unterschiedliche Konzepte des Vorgehens in der Produktion abgebildet sein. Damit in der Auswahl und Gestaltung der alternativen Architekturen ausreichendes Wissen zur Berücksichtigung von SOPS zur Verfügung steht, muss das Wissen, wie bei anderen Gerechtheiten und Einflüssen, nachvollziehbar aufbereitet und die Analyse methodisch unterstützt werden.

Liegt im Anwendungsfall ein globales Netzwerk oder ein globaler Zugriff auf ein Netzwerk von SOPS vor, besteht die Möglichkeit, standardisierte Systemelemente durch die Fertigung produzieren zu lassen, die in diversifizierten global verteilten Produktionssystemen realisiert werden. Hier spielt ebenfalls der mit der Lebenszyklusphase Nutzung verknüpfte Aspekt der Ersatzteilversorgung eine Rolle: Die global dezentralisierte Möglichkeit, Ersatzteile oder Systemelemente herzustellen (Montero et al. 2020), kann besonders für kritische und häufig vom Ausfall betroffene Systemelemente wertvoll sein. Bekannte Beispiele dafür sind diverse Automobilkomponenten wie Abgasanlagen, Zahn- und Keilriemen, die einen regelmäßigen Austausch erfordern. Die Versorgung kann eng mit einem Geschäftsmodell verknüpft sein, obliegt aber einer eindeutigen und möglichst einfachen Definition von Schnittstellen in der Architektur. Als Beispiel für diese Anwendung wird häufig die Additive Fertigung genannt, welche auf Basis von Daten und standardisierten Rohmaterialien die Eigenschaften besitzt, aufwendige und individuelle Geometrien zu erzeugen.

Tabelle 10: Ergebnisse EG3

#	Zusammengefasste Einflüsse auf SOPS der EG3:
E3.1	Die strukturierte Orientierung für alternative Systemarchitekturen für SOPS wird durch die Vorgaben von SOPS Architekturoptionen unterstützt.

E3.2	Die Gestaltung einer Architekturalternative mit SOPS für die mögliche Berücksichtigung wird durchgeführt.
E3.3	Bei bestehenden SOPS ist die Gestaltung der Architektur an bestehende Bedingungen angepasst.
E3.4	Die Schnittstellen für eine dezentrale ggf. externe Montage entsprechen Standards oder sind ausreichend spezifiziert.
E3.5	Die Fokussierung auf die Entwicklung des Systems oder von Ersatzteilen/ Verschleißteilen, bestimmt durch das Geschäftsmodell, wird in der Auslegung berücksichtigt.
E3.6	Die Festlegungen für COTS, externe Zulieferung von Subsystemen und Elementen sowie deren Anbindung an mögliches SOPS Produktions- und Montagesystem sind spezifiziert und validiert.

4.4.4 Einflussgruppe 4: Implementierung und Realisierung

Die Implementierung definiert die finale Gestalt des Systemelements und damit, wie das Systemelement produziert beziehungsweise realisiert werden soll. Besteht die Möglichkeit, für ein Systemelement verschiedene Produktionsverfahren im SOPS anzuwenden, so sind die nötigen Informationen für die Produktion im Digitalen Abbild zur Verfügung zu stellen. Dies sind neben der Spezifikation des Produkts auch die Definition der Produktions- und Logistikprozesse. Beispielsweise betrifft dies die mechanische Konstruktion, die eine Komponente im Additiven Fertigungsverfahren oder durch subtraktive Verfahren, wie Drehen oder Fräsen, generieren kann. Dafür sind grundsätzlich unterschiedliche Materialien als Input notwendig, wie auch Werkzeuge und Beschreibungen der Zugänglichkeiten für die Bearbeitung des Systemelements, welche die Gestalt beeinflussen können (Fertigungsbedingte Restriktionen). Die enge Vernetzung mit Materialien und Fertigungsverfahren macht in der Implementierung die Definition und Spezifikation des gewählten Verfahrens sowie die interdisziplinäre Zusammenarbeit z. B. mit dem Einkauf von Materialien und Anlagen erforderlich. Da bei einer Übergabe an das Produktionssystem die benötigten Materialien und Werkzeuge definiert und beschrieben sein müssen, ist die Festlegung und Planung der Beschaffungsprozesse der Materialien und Werkzeuge ein elementarer Bestandteil der Aufgaben bei der detaillierten Implementierung der Systemelemente. Die anhand der in der Architektur allokierten Anforderungen implementierten Systemelemente oder (Sub-)Systeme, welche mit SOPS gefertigt werden sollen, sind auf Grund der geringeren Funktionsintegration und Fertigungstiefe in der Regel weniger interdisziplinär in der Gestaltung. Diese Annahme sollte in jedem Fall hinsichtlich der innovativen und leistungsfähigen Funktionserfüllung des Systems überprüft werden. Eine Abwägung der Aufwände zur Spezifikation von Fertigungsverfahren in einem SOPS im Verhältnis zur klassischen Produktionsorganisation muss durchgeführt und wirtschaftlich analysiert werden.

Tabelle 11: Ergebnisse EG4

#	Zusammengefasste Einflüsse auf SOPS der EG4:
E4.1	Der Einfluss der Qualität des Digitalen Abbilds für die physische Realisierung ist beherrschbar.
E4.2	Die Variation im Fertigungsprozess von gleichen Teilen (z. B. additiv oder subtraktiv) ist im Digitalen Abbild implementiert.
E4.3	Die finale Integration und damit Qualitätssicherung bei dezentraler Montage liegen nicht in eigener Hand und Kompetenz. Das Risiko ist evaluiert und akzeptiert.
E4.4	Der Einkauf von Rohmaterialien, Werkzeugen etc. ist ausschließlich abhängig von einer ausreichenden Spezifikation im Digitalen Abbild.
E4.5	Der Betrieb paralleler Verfahren und Anlagen für einen äquivalenten Fertigungsschritt ist qualitativ im Digitalen Abbild betrachtet.
E4.6	Die Qualität des Systemelements ist unabhängig vom Ablauf der Fertigungsorganisation und dessen Verfahren gegeben.

4.4.5 Einflussgruppe 5: IV&V und Übergabe

Wird die interdisziplinäre Produktentwicklung unter Berücksichtigung von SOPS in den vorherigen Einflussgruppen auf der linken Seite des V-Modells betrachtet, so zeigt sich der erläuterte starke Fokus auf die Aspekte des Frontloadings, die Integration der für die Produktion notwendigen Informationen in das Digitale Abbild und die Gestaltung der Architektur und der Anforderungen des Systems sowie als Grundlage dessen, die Überlegungen der Strategischen Planung.

Für die Einflussgruppe der rechten Seite des V-Modells, IV&V und Übergabe, folgt daraus eine sehr geringe Fehlertoleranz sowie die Notwendigkeit, ein vollständiges Digitales Abbild zu gestalten. Zur Erreichung dieser Faktoren, muss die Absicherung der Eigenschaften der Systemelemente und des Systems frühzeitig und mit erhöhter Priorisierung und Aufwand integriert werden. Der Einsatz von virtueller und digitaler Simulation und Analyse zur Erreichung einer qualitativ hochwertigen Aussage über die Integrations- und Verifikationsfähigkeit ist notwendig. Hinzu kommt die mögliche Erhöhung der Anzahl von Schnittstellen durch die Vereinfachung der Systemelemente und dadurch die Erhöhung der Anzahl der Systemelemente durch die Architekturänderungen, welche die Aufwände und Arbeitsschritte in der Integration und den Absicherungsprozessen steigern.

Zur Vorbereitung der Übergabe des Digitalen Abbilds ist die vollständige Simulation des Produkts und dessen Produktionsprozesses in einem Modell (vgl. Definition des „Digitalen Zwilling“ (WIGEP 2020)) des SOPS sinnvoll. Dies kann sowohl ein Nutzen sein, da die tatsächliche Inbetriebnahme des Produktionssystems vorbereitet ist, jedoch auch ein

Nachteil, da die Simulation bei Fehlern in der Dokumentation beziehungsweise der Semantik des Digitalen Abbilds große Aufwände in der Nacharbeitung erfordert. Bei wiederholter Anwendung kann auf die Erfahrungen aus bestehenden Digitalen Abbildern in der Anwendung in einem SOPS zurückgegriffen werden, falls das Produktionssystem bereits existiert. Je nach Zeitpunkt der Simulation kann es sich um die Erstellung und Beschreibung verschiedener Szenarien handeln, welche z. B. auch auf vereinfachter Basis die unterschiedlichen Produktionskonzepte gegenüberstellen und deren prozessualen Durchlauf beschreiben. Somit können bereits frühzeitig anhand digitaler Strukturen Aussagen über die Produktion getroffen werden, beispielsweise bei Mustern oder Prototypen.

Je nach gewähltem Geschäftsmodell für die Produktion mit einem SOPS ist die Qualitätssicherung und deren Durchführung in der theoretischen Betrachtung, also auch für die Simulation, zu spezifizieren. Diese muss, wie auch das Testen des SOPS selbst, durch Simulation und weitreichende Fehler- und Einflussanalysen untersucht werden. Die Korrekturfähigkeit durch die mögliche Distanz zum realen (verteilten) Produktionssystem sinkt, wodurch größere Aufwände für das fehlerfreie und integrale Digitale Abbild erbracht werden müssen. Die Abbildung, die Simulation und Beschreibung sämtlicher notwendiger Prozesse der Wertschöpfungskette, welche zur Produktion im SOPS notwendig sind, ist als digitales Modell zu berücksichtigen.

Ziel ist ein Digitales Abbild, welches widerspruchsfrei, eindeutig und vollumfänglich den Anwendungsfall beschreibt und sämtliche notwendigen Informationen und Spezifikationen für die Produktion in einem SOPS zur Verfügung stellt.

Tabelle 12: Ergebnisse EG5

#	Zusammengefasste Einflüsse auf SOPS der EG5:
E5.1	Das Digitale Abbild als Grundlage der Nutzung von SOPS ist realisierbar.
E5.2	Die Simulation von Rahmenbedingungen und Einflüssen kann das reale Testen des SOPS oder dessen Bestandteilen ersetzen.
E5.3	Die Möglichkeit der Absicherung durch Prototypen/ Muster bei existierendem SOPS wird adressiert.
E5.4	Die Virtualisierung der Absicherung sowie die Virtualisierung der Vorgabe für die mögliche externe Integration und Inbetriebnahme erfüllt die qualitativen Rahmenbedingungen.
E5.5	Der Verlust des Kundenkontakts durch die Übergabe bei dezentraler Montage hat keine nachhaltigen Auswirkungen auf das Unternehmen.

5 Entwicklung der Methode CoSOPS

Zur Entwicklung der Methode zur Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme (SOPS) in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung (CoSOPS) werden die grundlegenden Anforderungen aus Kapitel 3.5 sowie Ergebnisse der Analyse der Auswirkungen und der Zuordnung in Einflussgruppen in ein konkretes Lösungssystem überführt, welches in der Methode CoSOPS vorliegt.

Dabei wird zunächst ein Rahmenmodell erarbeitet, welches durch verschiedene Bausteine zur vollständigen Methode ausgearbeitet und detailliert wird. Die Einflussgruppen und Auswirkungen der SOPS auf die interdisziplinäre Produktentwicklung werden dadurch in konkrete Lösungen überführt, welche als Bestandteile und Inhalte der Methode repräsentiert sind. Die inhaltliche Detaillierung geschieht in der Folge in der Beschreibung der Bestandteile der Methode anhand der Ergebnisse der Einflussgruppen.

Die analysierten und ausgearbeiteten inhaltlichen Grundlagen der Methode wurden in Kapitel 4.4 in fünf Einflussgruppen zusammengefasst und strukturiert. Die Einflussgruppen greifen dabei teilweise der Zuordnung anhand des V-Modells der Lösungsstruktur der Methode voraus: Durch die Benennung und Beschreibung der Einflussgruppen und der Analyse der Zuordnung der grundlegenden Auswirkungen in Kapitel 4.3 ergeben sich die Zuordnungspunkte für Eingriffe in das entwicklungsmethodische Vorgehen für die Einflussgruppen EG1 (Kontrollpunkt Geschäftsmodell), EG2 (Anforderungserhebung) und EG 3 (Systemarchitektur). Da die Systemabgrenzung für die Methode (vergleiche Kapitel 3) den Fokus auf die gestaltende, linke Seite des V-Modells legt, werden die Inhalte der Einflussgruppen EG4 „Implementierung & Realisierung“ und EG5 „IV&V und Übergabe“ in die Gesamtbeschreibung der Methode integriert oder als Bestandteile dessen in die Allokation der EG1, EG2 und EG3 überführt.

5.1 Vorgehen in der Methodenentwicklung

Zur Entwicklung und Ausarbeitung der Methode CoSOPS ist ein Vorgehen mit einer Vielzahl an Iterationen notwendig. Dabei werden sowohl die Inhalte und Ergebnisse der Einflussgruppen als auch die grundlegenden Anforderungen an die Methode in regelmäßigen Zyklen zum Abgleich mit dem Arbeitsstand hinzugezogen. Da die Entwicklung und Ausarbeitung durch den Autor als Einzelperson durchgeführt wird und entsprechend keine Gruppendiskussion stattfinden kann, dienen die Tabellen der Anforderungen als auch die Tabellen der Zusammenfassungen der Einflussgruppen als Grundlage für den Abgleich. Bei Änderungen eines Bestandteils oder der Methode selbst, werden die Listen jeweils vollständig überprüft. Dieses Vorgehen soll dazu dienen, dass keine der Erarbeiteten Anforderungen oder Ergebnisse der Einflussgruppen in der Entwicklung und Beschreibung der Methode keine Berücksichtigung finden. Zur finalen Absicherung der Ergebnisse im Rahmen der Evaluation dieser Arbeit, wird im Kapitel 6.3 der Rückgriff auf den finalen Stand der zur iterativen Entwicklung der Methode genutzten Verfahren zum Abgleich mit Hilfe von Tabellen erläutert.

Abbildung 25 stellt zur Verdeutlichung des gewählten Vorgehens ein Ablaufmodell der Methodenentwicklung dar. Resultierend aus dem erarbeiteten Input und den Grundlagen, wird in der Arbeitsphase die Methode detailliert ausgearbeitet und beschrieben. In der Abgleichsphase werden die erarbeiteten Ergebnisse mit den genannten Artefakten abgeglichen. Im Entscheidungspunkt E1 wird der Stand bewertet. Entscheidend ist, dass alle formulierten Anforderungen und Ergebnisse der Einflussgruppen in der Methode integriert sind. Entsprechend kommt es zur Iteration, oder zur Absicherungsphase. Hier wird durch den Autor zusätzlich mit der Liste der Priorisierten Auswirkungen ein Test durchgeführt, der die Berücksichtigung oder die bewusste Streichung oder Missachtung einer Auswirkung prüfen soll. E2 kann erneut zur Iteration führen oder in die Evaluation starten. Dies meint die Durchführung der Experteninterviews, auf Basis derer in der Anpassungsphase Inhalte angepasst, erweitert oder klargestellt werden. Abgleichsphase 2 prüft in der Folge, ob die die Anpassungen negative Auswirkungen auf die Methode hinsichtlich der grundlegenden Anforderungen und Ergebnisse der Einflussgruppen hat. Nach dieser Entscheidung kann die Anpassung iteriert werden, um beispielsweise Anpassungen zurückzunehmen oder erneut zu bewerten. Finaler Output des Vorgehens ist die erarbeitete Methode CoSOPS. Durch die vielen Iterationsmöglichkeiten und klare Strukturierung des Vorgehens, soll eine möglichst gute Erfüllung der Anforderungen und Ergebnisse der Einflussgruppen erreicht werden.

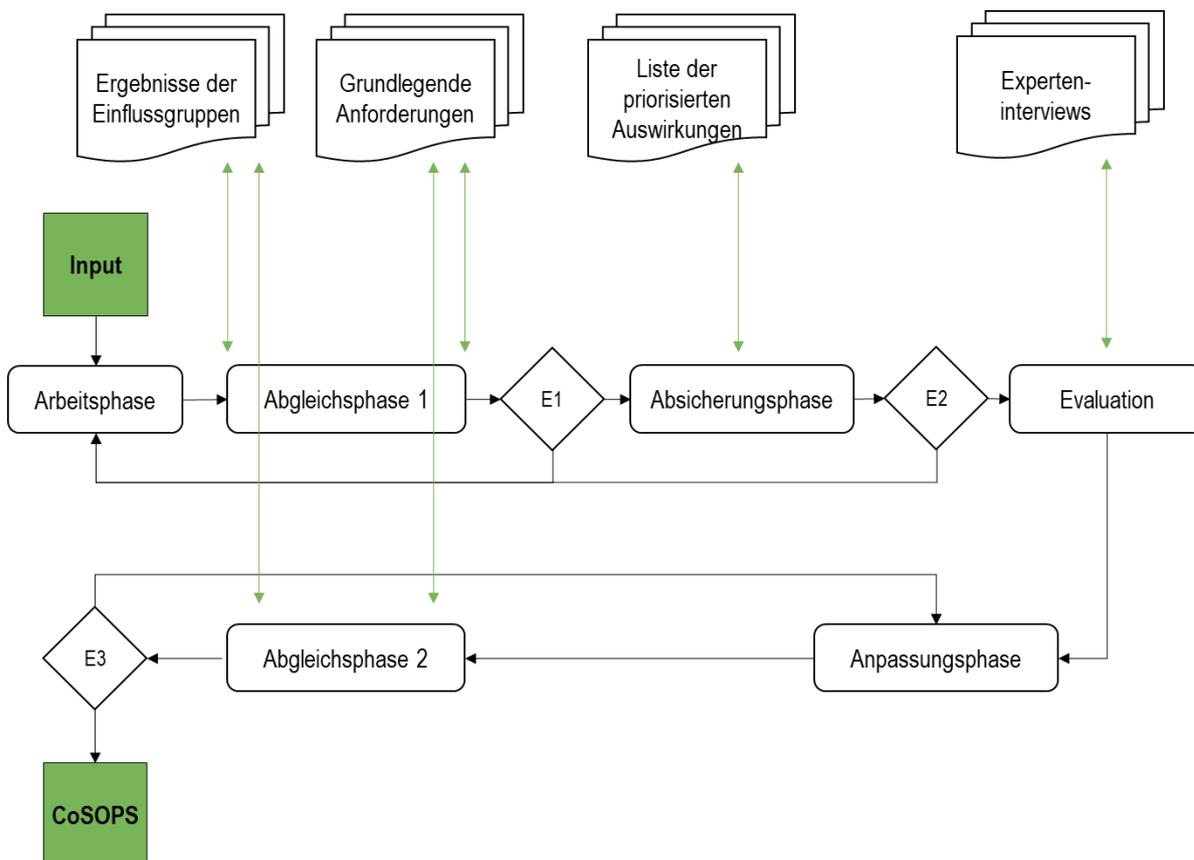


Abbildung 25: Ablaufmodell der Methodenentwicklung

5.2 CoSOPS Methodenspezifikation

Bei der Entwicklung der Methode steht das Vorgehen aus der Beschreibung des Produktentwicklungsprozesses mit dem V-Modell der neuen Richtlinie VDI 2206 (VDI 2206:2020) im Mittelpunkt der Betrachtung. Zentrale Anforderung an die Methode sind eine inhaltliche sowie stilistische Integration der Methode in die Richtlinienbeschreibung (Anforderungen A4 und A8). Aus diesem Grund werden bei der Umsetzung der Methode die Schwerpunkte auf die Erweiterung der bereits eingesetzten Hilfsmittel und Werkzeuge der Richtlinie VDI 2206 für die Integration von SOPS gelegt. Dies soll den Aufwand für den Anwender durch das Erlernen und Anwenden weiterer, völlig neuer Hilfsmittel, Methoden und Werkzeuge reduzieren und damit den grundlegenden Anforderungen an die Methode entsprechen (Anforderung A5). Die Adaption der Rahmenbedingungen der bestehenden Richtlinie VDI 2206 (VDI 2206:2020) trägt zudem dazu bei, den Anspruch der Gültigkeit über einzelne Unternehmen, Branchen oder Produktgruppen hinaus zu gewährleisten (Anforderung A12).

Die Werkzeuge „Kontrollpunkte“ und „Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische Systeme“ (HML) sind durch den Fachausschuss GMA FA410 „Interdisziplinäre Produktentstehung“ sowie den Validierungsworkshop auf der internationalen DESIGN 2018 Konferenz in Dubrovnik validiert (Gräßler und Hentze 2020) und dessen Anwendung als hilfreiche und sinnvolle Instrumente in der interdisziplinären Produktentwicklung bestätigt worden. Der Transfer dieser validen Hilfsmittel zur Berücksichtigung von SOPS in der interdisziplinären Produktentwicklung erfüllt damit die Anforderungen an die Methode in Bezug auf Passfähigkeit zu bestehenden Richtlinieninhalten (Anforderungen A4 und A8). Die gegebenen Werkzeuge müssen entsprechend der in den vorherigen Kapiteln ermittelten Auswirkungen und Ergebnisse der Einflussgruppen um die Randbedingungen für SOPS erweitert, angepasst und erläutert werden. Die Zuordnung und Positionierung im V-Modell ist dabei Ergebnis der in Kapitel 4.4 zusammengefassten Einflussgruppen, welche aus der Zuordnung der Auswirkungen zum entwicklungsmethodischen Vorgehen mit dem V-Modell und dem HPLZ in Kapitel 4.3 resultieren.

Zur Beschreibung der Methode CoSOPS wurde eine Einteilung in zwei Arten von Methodenbestandteilen (Perspektiven/ Werkzeuge) gewählt. Zwei Perspektiven, Vorgehensbeschreibung und Absicherung sowie vier Werkzeuge sind Bestandteile der Methode:

Die Vorgehensbeschreibung der Methode, welche den Prinzipien des Simultaneous Engineering folgt und damit einer parallelen Aufgabe zu den in der Richtlinie VDI 2206 beschriebenen Entwicklungsaufgaben durchgeführt wird, unterstützt die Entwicklung auf der linken Seite des V-Modells und damit die Systemdefinition und Spezifikation des Systems (Anforderung A14). Die Methode liefert dabei einen Mehrwert in Bezug auf die Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung, ohne die gegebenen Zusammenhänge von Aufgaben der Entwicklung der VDI 2206 Richtlinie zu verändern.

Dabei ist der Anwendungsfall der strategischen Planung für SOPS abgedeckt, obwohl eine Parallelisierung des eigentlichen Produktentwicklungsprozesses in diesem Anwendungsfall nicht vorliegt. In der für die strategische Planung durchgeführten Analyse in einer Vorentwicklung müssen, parallel zum Denkmodell des V-Modells, die gleichen Aufgaben, jedoch in geringerer Granularität, abgearbeitet werden. Diese Bearbeitung findet in der Vorentwicklung auf einem allgemeineren und gröberen inhaltlichen Niveau statt. So sind die Anforderungen, die über eine theoretische Betrachtung des SOPS hinausgehen, hier nicht vollständig abzubilden und in der Systemarchitektur beispielsweise keine Bedarfe vorhanden, Varianten für die Ausarbeitung der Architektur zur Verfügung zu stellen. (Anforderung A1)

Die Perspektive der Vorgehensbeschreibung strukturiert das Vorgehen der Methode und allokiert die Zielüberprüfung, die Methodenanpassung sowie die vier unterschiedlichen Werkzeuge in den interdisziplinären Entwicklungsprozess des Anwendungsfalls (beispielsweise einem Unternehmen oder einem konkreten Projektauftrag). Damit integriert die Vorgehensbeschreibung eine ununterbrochene und ganzheitliche Repräsentation der Berücksichtigung von SOPS im interdisziplinären Entwicklungsprozess; dies gilt sowohl in der illustrativen Darstellung der Methode im V-Modell als auch in der inhaltlichen Ausarbeitung und Anwendung. Die Vorgehensbeschreibung wird in der Beschreibung wie erläutert als erste Perspektive (linke Seite des CoSOPS Modells Abbildung 27) definiert.

Die zweite Perspektive ist eine Repräsentation der Absicherungsaktivitäten auf der rechten Seite des CoSOPS Modells (Abbildung 27). Diese induziert eine durchgängige Berücksichtigung der veränderten Aktivitäten in der Absicherung bei der Durchführung der Methode CoSOPS. Die Perspektive der Absicherung dient einerseits der Absicherung der Inhalte, die in der Methode analysiert und erarbeitet werden, andererseits der Absicherung des methodischen Vorgehens. Beispielsweise soll ein Werkzeug nicht auf Grund seiner selbst durchgeführt, sondern stets auf Sinnhaftigkeit überprüft und gegebenenfalls abgebrochen oder angepasst werden. Entsprechend besteht stets die Anforderung einen Anpassungsprozess (Tailoring) durchzuführen (Anforderung 15).

Zweiter Bestandteil der Methode sind die vier Werkzeuge, welche eingesetzt werden, um die Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung gewährleisten zu können. Diese werden entsprechend der Beschreibung der Vorgehensweise für den Einsatz in definierten Situationen beziehungsweise zu definierten (Vor-) Entwicklungsständen vom Anwender angepasst und eingesetzt. Die Werkzeuge unterstützen dabei die Analyse der Berücksichtigung und fördern das Verständnis durch Wissensanreicherung für die Produkt- und Strategieentwicklung in Bezug auf die Umsetzung der Prinzipien der Selbstorganisation in der Produktionsorganisation (Anforderung A13).

Abbildung 26 vermittelt eine schematische Einordnung der Perspektiven und Werkzeuge in die generische Ablauflogik des V-Modells. Die vier Werkzeuge sind als „grüne Puzzlestücke“ in der Grafik illustriert. Die Perspektiven sind, der Grundidee des V-Modells folgend, jeweils durch grüne Pfeile an der linken und rechten Seite des V-Modells dargestellt. Der horizontale grüne Pfeil zwischen den Perspektiven symbolisiert die bereits in der Dekomposition des Systems auf der linken Seite des V-Modells durchgängig notwendige Repräsentation der Absicherung (Eigenschaftsabsicherung, V&V).

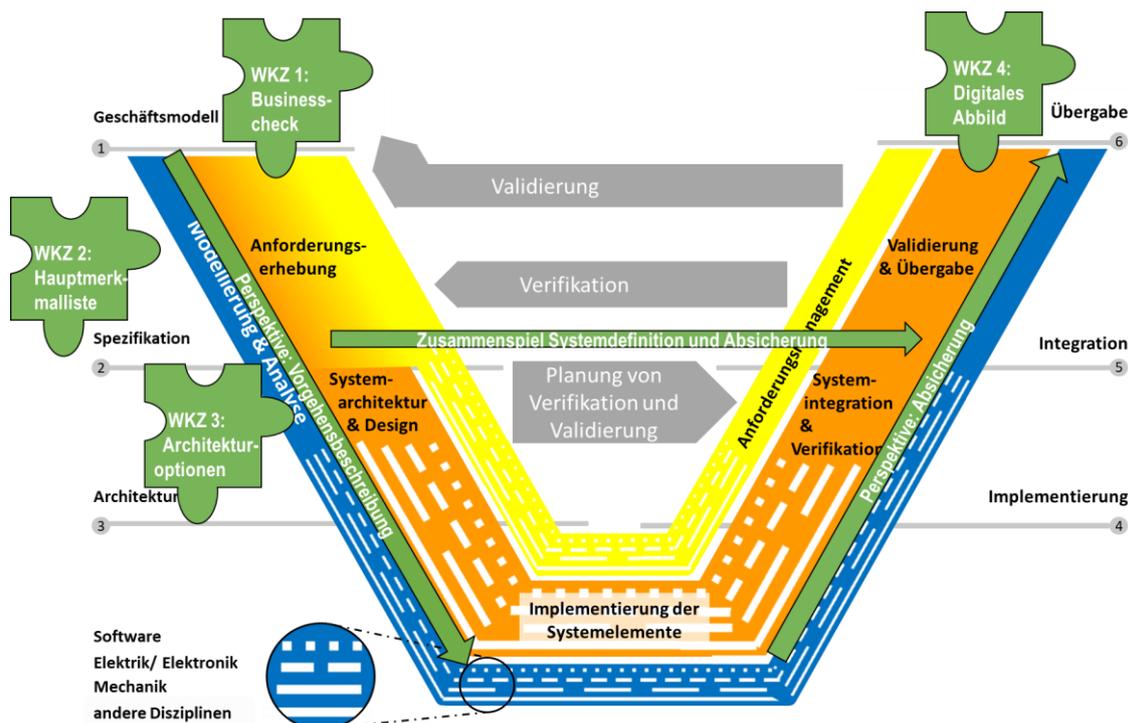


Abbildung 26: Zwei Perspektiven und vier Werkzeuge der Methode CoSOPS im V-Modell (basierend auf (Gräßler et al. 2018a; Gräßler und Hentze 2020))

5.3 Die Methode CoSOPS als Denkmodell

Abbildung 27 zeigt als schematische Darstellung das Denkmodell der entwickelten Methode als vereinfachtes logisches Ablaufmodell in der Übersicht. Die Entwicklung der Methode und die Ausgestaltung der verschiedenen Elemente der Methode werden in der Folge beschrieben (Anforderung A2). Das Modell gibt die Idee und die Denkprinzipien der Methode wieder. Eine Darstellung als Modell ist für eine Entwicklungsmethode obligatorisch und sinnvoll, wie bestehende und etablierte Modelle entwicklungsmethodischer Ansätze zeigen (Anforderung A9). Zu nennen sind hier beispielhaft das Münchner Vorgehens Modell (MVM) (Lindemann 2016), die Richtlinien VDI 2206 (VDI 2206:2004), VDI 2221 (VDI 2221) sowie das Integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) (Albers und Braun 2011), welche in Kapitel 2.2 Erwähnung finden.

Das Modell unterscheidet dabei die außenliegenden zwei Perspektiven sowie die innenliegenden vier Werkzeuge. Es zielt final auf die Berücksichtigung von SOPS in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung ab, wodurch in der Modellentwicklung das bereits eingeführte Akronym CoSOPS entstanden ist. Die Integration in das V-Modell der VDI Richtlinie 2206 ist durch das V-förmige Zusammenlaufen der Perspektiven sowie die analoge Anordnung der Seiten symbolisiert. Dieser Wiedererkennungswert wurde bewusst initiiert.

Werkzeuge sind stets im Wechselspiel mit den Perspektiven der Vorgehensweise und der Absicherung zu betrachten. Die losgelöste Anwendung eines Werkzeugs ohne Vorgehens- oder Absicherungsberücksichtigung ist nicht sinnvoll und zielführend. Die Methode ist stets ganzheitlich unter Berücksichtigung der Vorgehensbeschreibungen anzuwenden (Anforderung A6). Das Werkzeug des Digitalen Abbilds wurde exemplarisch hervorgehoben und mit einem Bewegungskreuz versehen: Dies repräsentiert, dass ein Werkzeug flexibel in der Methode eingesetzt werden kann. Die Nennung an vierter Stelle ist zunächst keine Wertung der Rangfolge, Reihenfolge oder der Relevanz, sondern spiegelt die Reihenfolge der Aufgaben in der Beschreibung der VDI Richtlinie 2206 (VDI 2206:2020) wider. Die Anwendung ist in der Folge erläutert. Um die Bedeutung des Tailorings für die Methode herauszustellen, wird durch den roten Startpfeil auf das Methodentailoring der obligatorische Startpunkt der Methode hervorgehoben. Endpunkte bzw. Outputs sind im Denkmodell nicht illustriert, da diese zu Missverständnissen führen könnten, da es hier differenzierte Möglichkeiten. Diese werden in der detaillierteren Beschreibung im Phasen-Meilensteinmodell abgebildet und erläutert.

Um die Inhalte und die Anwendung der Methode verstehen und durchführen zu können, ist einerseits weitreichendes Wissen über die in dieser Arbeit beschriebene Theorie der interdisziplinären Produktentwicklung mit dem V-Modell und der Berücksichtigung von SOPS notwendig, andererseits muss der Anwender praktisches Wissen über das vorliegende Entwicklungsprojekt beziehungsweise das Unternehmen und dessen aktuelle Strategie in Bezug auf den Anwendungsfall besitzen. Diese Rahmenbedingungen und das Umfeld der individuellen Anwendung müssen bekannt sein, da die Anpassung, das Tailoring der Methode, stets die Grundlage für dessen Anwendung ist (Anforderung A15).

Die theoretische Beschreibung der Methode in Form von Perspektiven und Werkzeugen ist, wie auch das V-Modell, ein Rahmenwerk zur Umsetzung einer Entwicklung. Tailoring setzt daher voraus, die theoretische Methode zu kennen und deren Inhalte und Vorgehensweisen auf das individuelle Umfeld anzupassen: Das kann bedeuten, dass Prozesse oder Methoden gestrichen, hinzugefügt oder in alternativer Weise durchgeführt werden (Anforderung A15). Vor der Nutzung der Methode sowie vor der Anwendung jedes Werkzeugs sind diese individuell zu prüfen und entsprechend anzupassen. Um Einflüsse in einer Organisation, welche bei jeder Durchführung auftreten, beziehungsweise stets gleichartig sind, abzubilden, wird ein zweistufiges Tailoring auf Organisations- sowie Projektlevel in der Durchführung empfohlen (siehe Systems Engineering, Tailoring, Kapitel 2.2.2.).

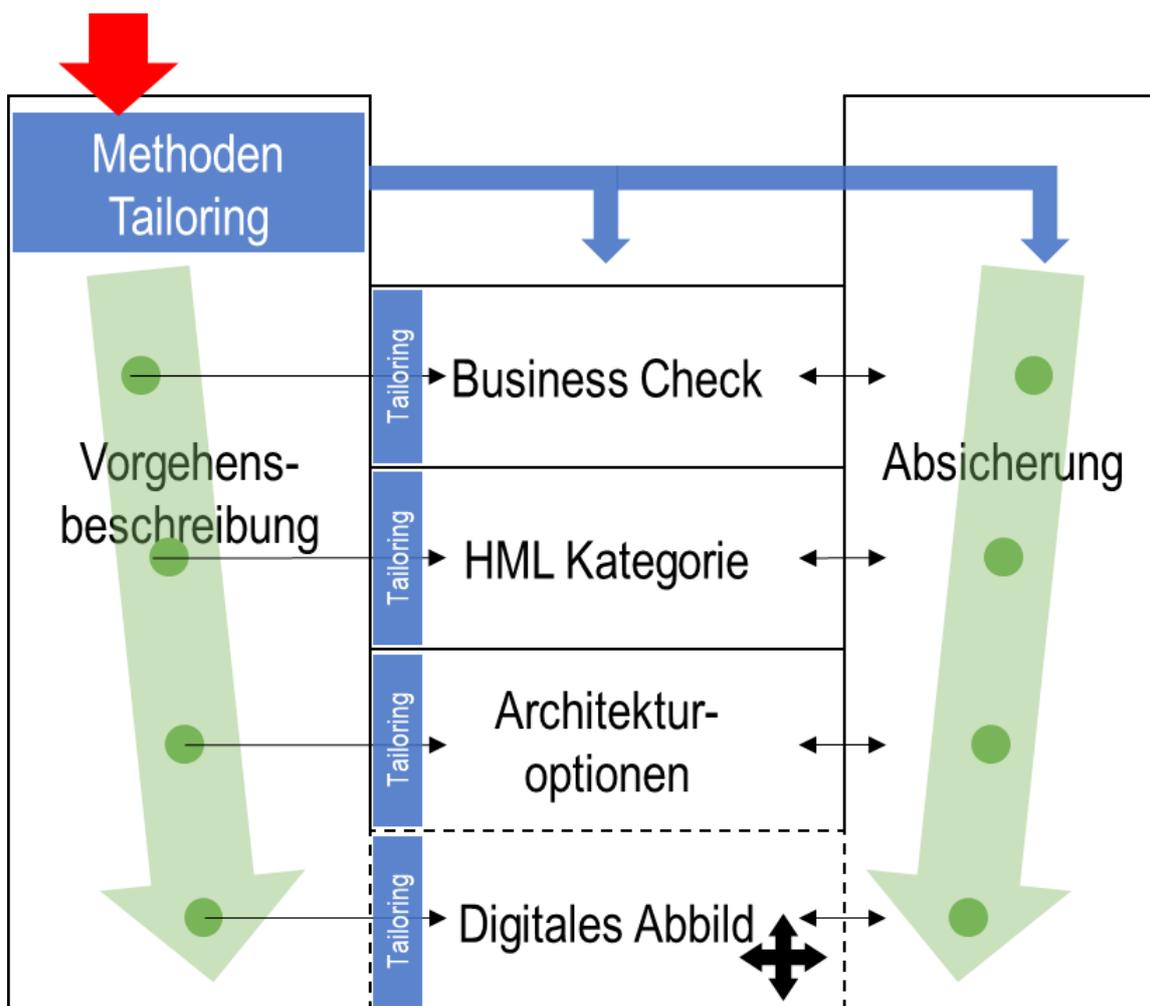


Abbildung 27: Modell der Methode CoSOPS

5.4 Absicherung

Die Perspektive der Absicherung beschreibt im Rahmen der Methode CoSOPS die Integration und ausreichende Repräsentation von Maßnahmen der Verifikation und Validierung (V&V) des Produkts oder der Produktgruppe auf Basis der EG5 (Kapitel 4.4.5). Diese Berücksichtigung ist durchgängig und zu jedem Zeitpunkt der Produktentwicklung relevant. Die Methode sieht vor, entsprechend den Anforderungen hinsichtlich Flexibilität und Reduktion des Gesamtaufwands, nach jeder Phase (siehe Abbildung 28) eine Absicherung durchzuführen. Bereits frühzeitig wird so eine zwingend erforderliche Auseinandersetzung mit der Absicherung von erarbeiteten Lösungen, Gestaltungen oder Anforderungen an das Produkt/ die Produktgruppe betont. Diese Durchführung nach jeder Phase wurde abgrenzend zur einmaligen und umfangreichen Gesamtabstimmung am Ende des Vorhabens gewählt, um sowohl das Bewusstsein für die Absicherung frühzeitig zu schärfen als auch einen Abbruch der Methode im Rahmen einer Absicherung zu ermöglichen. Diese Form der Integration der Absicherung repräsentiert die identifizierten

Einflüsse des Frontloadings, der frühzeitigen Virtualisierung und virtuellen Repräsentation sowie die Überprüfung der Machbarkeit, welche im Kapitel 4.4 in den Einflussgruppen als Ergebnisse identifiziert und erarbeitet wurden.

Übergeordnete Fragen der Absicherung sind die Grundfragen der Verifikation „Entwickeln wir richtig?“ und der Validierung „Entwickeln wir das Richtige?“¹⁹. Diese sollten bei jeder Entwicklung technischer Systeme stets im Fokus stehen, wie es in der Richtlinie VDI 2206 (VDI 2206:2020) sowie im Kontext des Systems Engineerings (Walden et al. 2015) beschrieben wurde.

Ergänzend zu den Inhalten wird auch das Vorgehen in der Methode selbst systematisch abgesichert. Um die Anwendung der Absicherung, welche sich in sämtlichen Phasen wiederfindet, für die Methode zu erleichtern, sind in der Folge drei Blickwinkel (Tabelle 13) genannt. Diese sind insbesondere an Meilensteinen zu berücksichtigen, da diese die Methode und das in der Anwendung zugehörige Projekt steuern. In der Ausarbeitung der drei Blickwinkel sind sowohl Fragen aus dem klassischen Projektmanagement, beispielsweise bezüglich der Stakeholder und des Risikos integriert worden, aber insbesondere auch inhaltliche Abfragen, welche aus der Ausarbeitung der Ergebnisse der Einflussgruppen resultieren. Beispielhaft zu nennende Möglichkeiten sind die Veränderungen des Geschäftsmodells, das zunehmende Frontloading, die ausgelagerte Produktion sowie die notwendige Veränderung von Kompetenzen.

Tabelle 13: Drei Blickwinkel der CoSOPS Absicherung

Blickwinkel des Entscheiders:
<ul style="list-style-type: none"> • Entscheiden die richtigen Beteiligten? (Kompetenz, Entschlussfähigkeit, strategischer Weitblick, Offenheit, Verantwortungsbereich)
<ul style="list-style-type: none"> • Wurde die strategische Planung und Geschäftsstrategie einbezogen beziehungsweise sind diese Aspekte ausreichend berücksichtigt?
<ul style="list-style-type: none"> • Kann das Risiko (positiv oder negativ) der Verwendung von SOPS abgeschätzt, eingeschätzt und getragen werden?
Blickwinkel des Vorhabens:
<ul style="list-style-type: none"> • Ist der Erhalt der Systemintegrität gewährleistet? (technische Aspekte, wirtschaftliche Aspekte, zeitliche Aspekte)
<ul style="list-style-type: none"> • Sind die vollständigen I, V&V Aktivitäten der Produktion in einer nicht zentralisierten (OEM) Montage/ Absicherung realisierbar?

¹⁹ Angelehnt und übersetzt aus (Walden et al. 2015) Validierung “Do we built the right thing?” und Verifikation „Do we built the thing right?”

<ul style="list-style-type: none"> • Ist die simulative Absicherung des Digitalen Abbilds im SOPS/ Absicherung in bestehendem SOPS möglich?
<ul style="list-style-type: none"> • Sind die notwendigen Kompetenzen, Kapazitäten sowie der entsprechende Rückhalt bei innovativen Technologien wie SOPS vorhanden?
Blickwinkel der Planung:
<ul style="list-style-type: none"> • Kann die Entwicklung alle I, V&V Aktivitäten ausreichend und zuverlässig abbilden? (Zusammenspiel mit dem Digitalen Abbild)
<ul style="list-style-type: none"> • Wie wird die Absicherung (auch Qualität) bei individualisierten Bauteilen durchgeführt? Ist eine 100% Prüfung notwendig oder kann ausreichend virtuell abgesichert werden?
<ul style="list-style-type: none"> • Ist die Montagespezifikation ausreichend detailliert und umfangreich für die Realisierung durch geplante Einheit (z. B. auch nicht-Fachpersonal, Dienstleister, Kunde) und damit eine Montage abseits des OEM möglich?

5.5 Die Methode CoSOPS als Phasen-Meilensteinmodell

Um einen Überblick über die Schritte der Methode CoSOPS in der Anwendung zu bekommen, ist diese in Abbildung 28 als Phasen-Meilensteinmodell dargestellt. Das Phasen-Meilensteinmodell wurde gewählt, da es einen einfachen, sequenziellen Ablauf der Methode beschreibt, welcher einer ständigen Überprüfung des Status in Folge von Phasen durch Meilensteine unterliegt (Anforderungen A2 und A10). Obwohl das Vorgehen grundlegend sequenziell erläutert wird, ist die Integration von Iterationen in der Darstellung und Erläuterung möglich. Die Form des Phasen-Meilensteinmodells ist zudem in Wissenschaft und Industrie etabliert, wie auch der insbesondere im Projektmanagement als Standard geltende Einsatz von Meilensteinen. (Alternativ auch Entscheidungspunkte, Decision Gates etc.; dem Stage-Gate Modell nach Cooper (Cooper 2002) folgend, alternativ (Schwindt und Zimmermann 2015))

Auf Grund des Tailorings der Methode ist dies keine allgemeingültige Darstellung, sondern soll der Orientierung und Erläuterung der Anwendung dienen (Anforderung A3). Wie in der Methode vorgesehen, bedarf die Anwendung stets individueller Anpassungen. Diese Anpassungen werden auf zwei Ebenen im Phasen-Meilensteinmodell, wie auch im Denkmodell (hier blau, Abbildung 27), dargestellt: Einerseits geschieht das Tailoring der Methode in der grau hinterlegten Methodenvorbereitung (siehe in Abbildung 28; sowie in Abbildung 27 in blau „Methodentailoring“), andererseits ist Tailoring die Grundlage für die Anwendung jedes der vier ausgearbeiteten Werkzeuge.

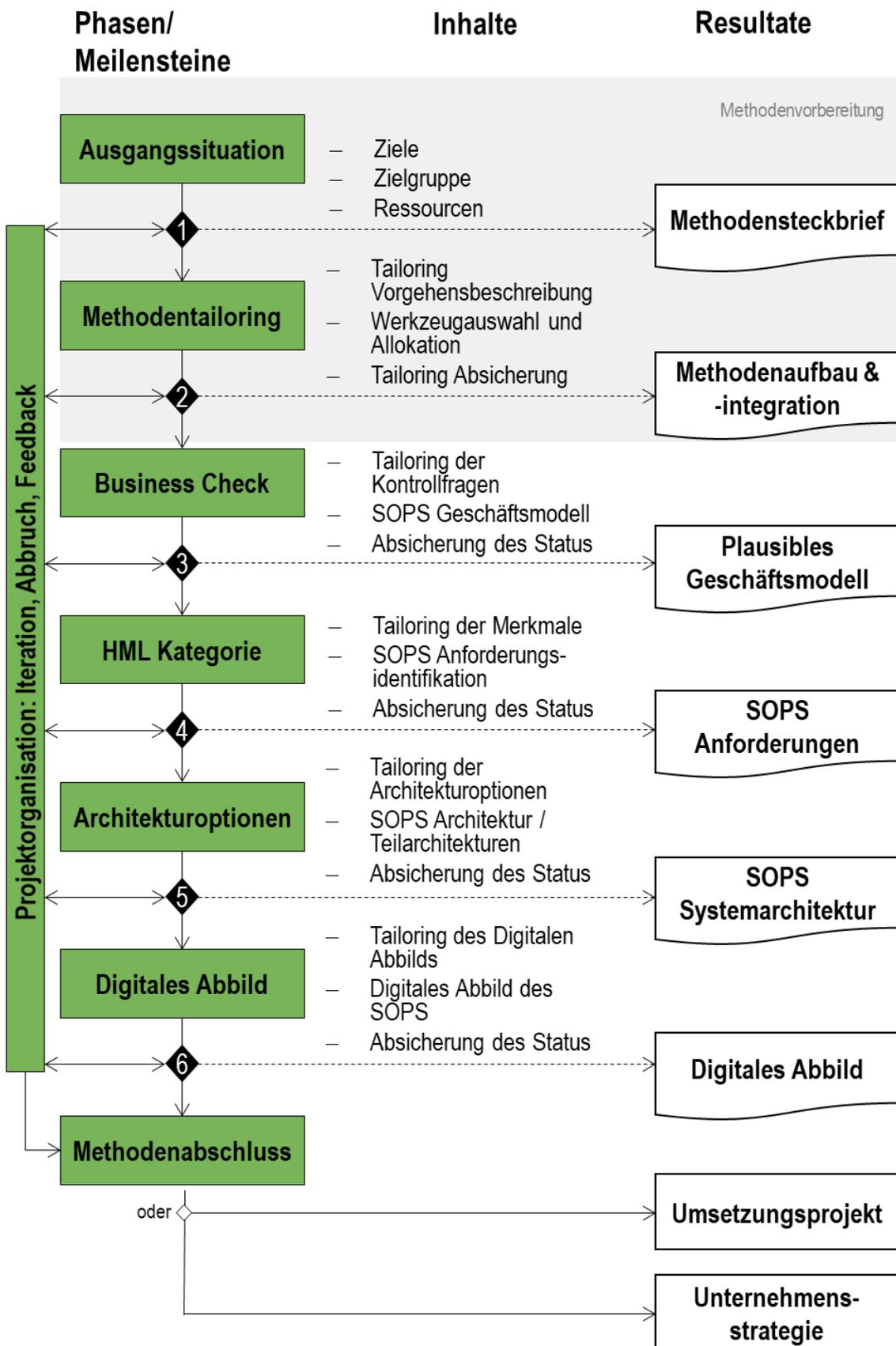


Abbildung 28: Phasen-Meilensteinmodell der Methode CoSOPS

Phasen der Methode CoSOPS

Die Phasen beschreiben die sieben möglichen Abschnitte der Methode. Sie beinhalten Aktivitäten, um im darauffolgenden Meilenstein ein (Zwischen-) Ziel zu erreichen. Dieses Zwischenziel wird in Resultaten (rechte Seite Abbildung 28) dokumentiert. Exemplarisch sind die zu erarbeitenden Inhalte bereits in Abbildung 28 aufgeführt und werden in der Beschreibung weiter detailliert. Nach der abschließenden Phase, dem „Methodenabschluss“, sollte eines der beiden Methodenergebnisse „Umsetzungsprojekt“ oder „Unternehmensstrategie“ erarbeitet worden sein, welches die Grundlage für oder gegen eine Entscheidung zum Einsatz von SOPS ist. Die „Projektorganisation: Iteration, Abbruch, Feedback“ illustriert Entscheidungen über Iterationen, Feedback, den Abbruch der Methode und gegebenenfalls Änderungen der individuellen Gestaltung der Methode durch das Tailoring. Diese Entscheidungen können, wie im Projektmanagement üblich, ausschließlich in Meilensteinen durch ein definiertes Lenkungsgremium getroffen werden.

Meilensteine der Methode CoSOPS

Die Vorgaben für einen Meilenstein sind einfach gestaltet und müssen, beispielsweise auch im Einklang mit der Projektmanagementstruktur des Anwenders, für den individuellen Anwendungsfall und das Anwenderunternehmen festgelegt werden. Tabelle 14 gibt einen Überblick, welche Abfragen für die Durchführung der Methode CoSOPS im Meilenstein zwingend erforderlich sind und wie die resultierenden Bewertungsmöglichkeiten beschrieben werden können. Die Zusammensetzung der Entscheidungsträger für einen Meilenstein sind individuell auszuprägen. Es sollte den Vorgaben für die Ausprägung eines Lenkungsgremiums für Projekte vergleichbaren Umfangs gefolgt werden. Das Involvieren des Verantwortlichen der Methodendurchführung ist Grundvoraussetzung (in der Regel Projektleitung). Dieser soll nicht gleichzeitig alleiniger oder führender Entscheider sein, um die inhaltliche Ausarbeitung z. B. von der Unternehmensstrategie getrennt und objektiv betrachten zu können.

Tabelle 14: Mindestbestandteile der Meilensteine für die Anwendung der Methode0

Inhalt	Entscheidungsoptionen
Steuerung des methodischen Vorgehens und Durchführung möglicher Anpassungen	<ul style="list-style-type: none"> • Methodenfortschritt im Plan • Anpassung des Methodenaufbaus • Anpassung Phase • Iteration Phase
Überprüfung der vorliegenden Resultate	<ul style="list-style-type: none"> • Freigabe der Resultate • Iteration der Resultate/der Phase • Methodenabbruch <ul style="list-style-type: none"> ○ technisch ausgeschlossen ○ wirtschaftlich ausgeschlossen

Abgleich mit dem Stand der Produkt-/ Strategieentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Synchron: Freigabe • Nachholbedarf: Iteration • Abbruch der Methode <ul style="list-style-type: none"> ○ Keine Lösung ○ Strategieanpassung
Phasenabschluss	Entscheidungsoptionen: <ul style="list-style-type: none"> • Ja, nächste Phase starten • Nein, weil: <ul style="list-style-type: none"> ○ Abbruch der Methode ○ Iteration notwendig ○ Methode/Projekt pausieren

5.6 Detaillierung der Methode CoSOPS

Aufbauend auf dem Denkmodell sowie der Darstellung der Methode im Phasen Meilenstein Model, wird die Methode CoSOPS sowie das Vorgehen in der Anwendung der Methode detailliert beschrieben. Für die sieben Phasen der Methode werden jeweils die notwendigen Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen in einfachen Ablaufdiagrammen spezifiziert. Für sämtliche Phasen, insbesondere für die Anwendung der Werkzeuge der Methode CoSOPS, werden Vorgaben zur Verfügung gestellt, welche aus den Erkenntnissen der Analyse und Synthese relevante Inhalte für die Berücksichtigung von SOPS in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung liefern. Die Phasen 3, 4 und 5 sind mit den im Denkmodell der Methode beschriebenen Werkzeuge beziehungsweise dessen Anwendung gleichzusetzen. Die Phasen 1 (Ausgangssituation) und 7 (Methodenabschluss) richten den Fokus weniger auf die inhaltliche Analyse der vorliegenden Aufgabe, sondern bieten vielmehr einen organisatorischen Rahmen für die Durchführung der Methode in einem erfolgreichen Anwendungsprojekt. Die Phase 2 (Tailoring) beinhaltet das Vorgehen für die individuelle Anpassung der Methode und ihrer Inhalte für den spezifischen Anwendungsfall.

5.6.1 Phase 1: Ausgangssituation

Abbildung 29 beschreibt die drei Schritte zur Bearbeitung der Phase Ausgangssituation. Ziel dieser Phase ist die Identifikation und Formulierung der Ziele, der Zielgruppe sowie die Planung der zur Erreichung dieser Ziele notwendigen Ressourcen und Kompetenzen. Diese Informationen, welche auch im klassischen Projektmanagement zusammengetragen werden, werden im Resultat des Methodensteckbriefs für den „Meilenstein 1“ aufbereitet und dokumentiert. Außerdem ist es von großer Bedeutung die Ausgangssituation in Bezug auf SOPS zu verstehen, um Aufgaben in späteren Phasen schneller und einfacher bearbeiten zu können. So Sollte die Existenz und die Erfahrungen mit SOPS hinterfragt und für die Beteiligten Projektmitglieder zugänglich gemacht werden.

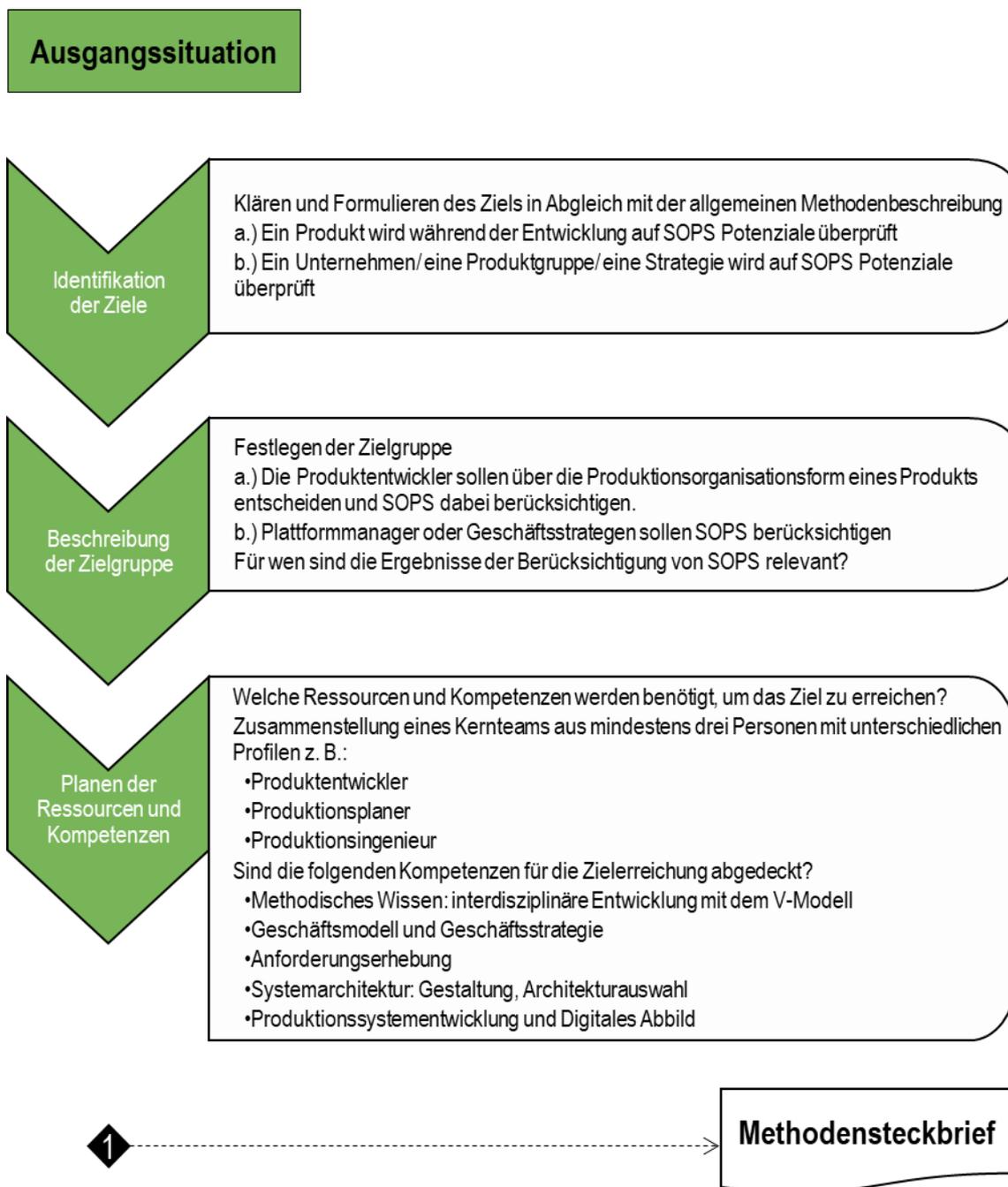


Abbildung 29: Phase 1: Ausgangssituation – Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen zur Orientierung

Der Methodensteckbrief (im Unternehmenskontext in der Regel vergleichbar mit dem Projektsteckbrief/-antrag) soll die Bestandteile aus Tabelle 15 enthalten. Individuelle Ergänzungen und Rahmenbedingungen aus der industriellen Praxis sollten den Methodensteckbrief erweitern.

Tabelle 15: Anforderungen an einen Methodensteckbrief

Bestandteil des Methodensteckbriefs	Erläuterung
Ziel	Das Ziel ist mit den Fähigkeiten der Methode bezüglich Vorentwicklungsprojekt zur Strategischen Evaluation oder begleitend der Produktentwicklung abzugleichen.
Zielgruppe	Die Zielgruppe (häufig auch der Projektsponsor oder Auftraggeber) muss identifiziert und kommuniziert werden. Die Erwartungen der Zielgruppe beispielsweise hinsichtlich Aufbereitung der Ergebnisse müssen berücksichtigt werden. Ergebnisse für einen Geschäftsführer haben in der Regel insbesondere in der Dokumentationsform und der Kommunikation eine andere inhaltliche Granularität als für die technische Detaillierung eines Problems für einen Entwickler technischer Produkte.
Kernteam	Das Kernteam besteht unabhängig vom Ziel aus mindestens drei Personen. Zur fachgerechten Bewertung der technischen Fragen ist zwangsläufig mindestens ein erfahrener Entwickler im Kernteam notwendig. Bei der begleitenden Produktentwicklung ist dies idealerweise der leitende Entwickler oder Systems Engineer. Empfehlenswert ist zudem ein Projektmanager für Entwicklungsprojekte, um auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigen zu können. In strategischen Projekten sind Experten zwingend hinzuzuziehen. Je nach Unternehmen und Situation sind Mitglieder aus den Bereichen Produktion, Produktionsplanung, Logistik, Qualitätsmanagement und der Strategie im Kernteam oder als Experten zu integrieren. Im Team sollte wie üblich ein Projektleiter ausgewählt werden.
Lenkungsgremium	Das Lenkungsgremium beinhaltet mindestens einen Vertreter der Zielgruppe sowie mindestens einen Vertreter des Kernteams (in der Regel der Projektleiter).
Ressourcen	Die Ressourcen für die Durchführung der Methode in einem Projekt sind zu kalkulieren, um den Umfang und die resultierenden Kosten abschätzen zu können. Die Ressourcen sind entsprechend der benötigten Kompetenzen auszuwählen.
Kompetenzen	Es wird angegeben, welche Kompetenzen zur Lösung der vorliegenden Aufgabe benötigt werden. Insbesondere adressiert werden Kompetenzen, die in der gegebenen Ressourcenplanung nicht vorhanden sind und daher besondere Aufmerksamkeit fordern und zusätzliche Bedarfe zeigen.

Stakeholderanalyse	Eine Stakeholder Analyse ist abseits der Stakeholder der Zielgruppe und des Kernteams beispielsweise entsprechend dem Vorgehen der Gesellschaft für Projektmanagement ²⁰ (GPM) oder alternativer Vorgehensweisen (z. B. (Barrow 2017; Krips 2017)) durchzuführen.
--------------------	--

5.6.2 Phase 2: Methodentailoring

Nach der erfolgreichen Bewältigung des Meilensteins 1 mit der Freigabe durch das Lenkungsgremium, werden in der Phase des Methodentailorings das geplante Vorgehen, die Auswahl der Werkzeuge und das Vorgehen in der Absicherung der Ergebnisse erarbeitet und geplant. Gewünschtes Resultat ist der Methodenaufbau, welcher einen Arbeits- und Zeitplan enthält, der die Schritte und Inhalte dokumentiert sowie die zur Verfügung stehenden Ressourcen allokiert.

Abbildung 30 beschreibt die drei notwendigen Schritte und gibt Arbeitsanweisungen sowie Leitfragen zur Orientierung. Ein besonderer Fokus muss in dieser Phase neben dem Methodenaufbau auf die Integration der Methode in den Gesamtkontext der Unternehmensstrategie oder das (Gesamt-)Entwicklungsprojekt gelegt werden. Dies gilt unabhängig davon, ob das Ziel eine Strategieuntersuchung oder die Untersuchung eines konkreten Produkts im Verlauf der Produktentwicklung ist. Mit erfolgreicher Bewältigung des „Meilenstein 2“ ist die Methodenvorbereitung abgeschlossen. Damit sind die notwendigen Rahmenbedingungen für den Start in die inhaltliche Arbeit der Methode CoSOPS erfüllt.

Der in Phase 2 beschriebene Prozess des Tailorings ist dabei an die Anforderungen bezüglich eines flexiblen Vorgehens und einer branchen- und produktunabhängigen sowie übergreifenden Methode angelehnt. Der Tailoring Prozess ist eine Adaption der Idee des Tailorings, welches insbesondere im Systems Engineering nach (Walden et al. 2015) von großer Bedeutung ist. Das beschriebene Methodentailoring gibt dabei in drei Arbeitsschritten eine pragmatische Orientierung zur Durchführung des Tailoring Prozesses für die Anwendung der Methode CoSOPS. Zu beachten ist, dass je nach Ausgangssituation in zwei Ebenen des Tailorings gedachte und gehandelt werden muss (siehe dazu Abbildung 16 in Kapitel 2.2.2)

²⁰ GPM – Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement e.V.; Die Internetseite (www.gpm-ipma.de) gibt regelmäßig aktualisierte Vorgehensbeschreibungen und Informationen zum Projektmanagement und zur Stakeholder Analyse

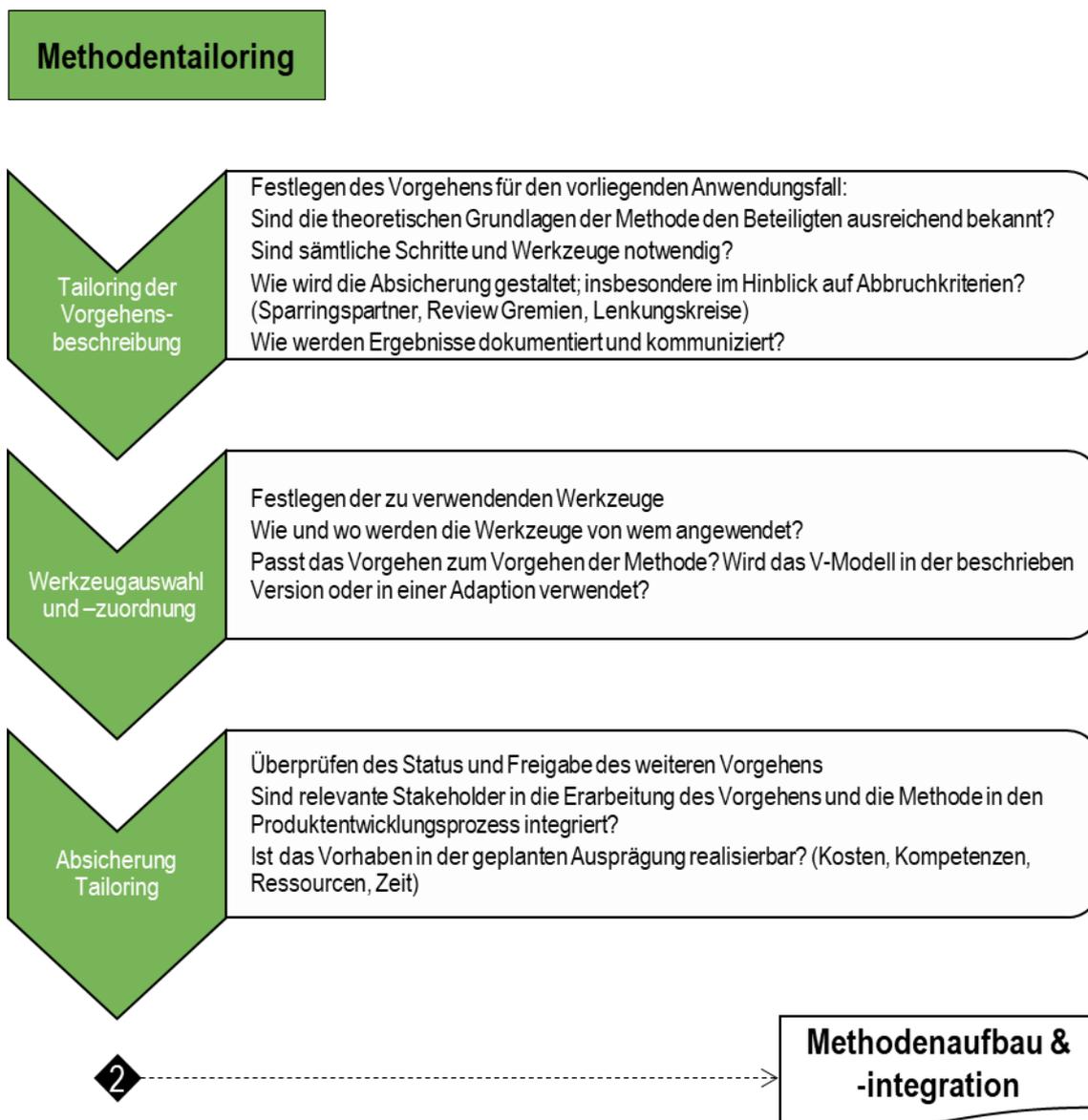


Abbildung 30: Phase 2: Methodentailoring – Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen zur Orientierung

5.6.3 Phase 3: Business Check

Phase 3 beschreibt die Anwendung und Durchführung des Werkzeugs „Business Check“. Dieses wird im Rahmen des in der VDI 2206 vorgesehenen Kontrollpunkts „Geschäftsmodell“ durchgeführt. Das Vorgehen der Phase 3 ist in Abbildung 31 in vier Schritten beschrieben und erläutert. Das Werkzeug des Business Checks verfolgt das Ziel, die vorliegenden Gegebenheiten im Unternehmen oder im Entwicklungsprojekt hinsichtlich wirtschaftlicher Fragestellungen bezüglich SOPS sehr frühzeitig zu berücksichtigen. Es soll die Frage beantwortet werden, ob es ein vielversprechendes Geschäftsmodell ist und damit einen wirtschaftlichen Nutzen für den Einsatz von SOPS im individuellen Anwendungsfall geben kann.

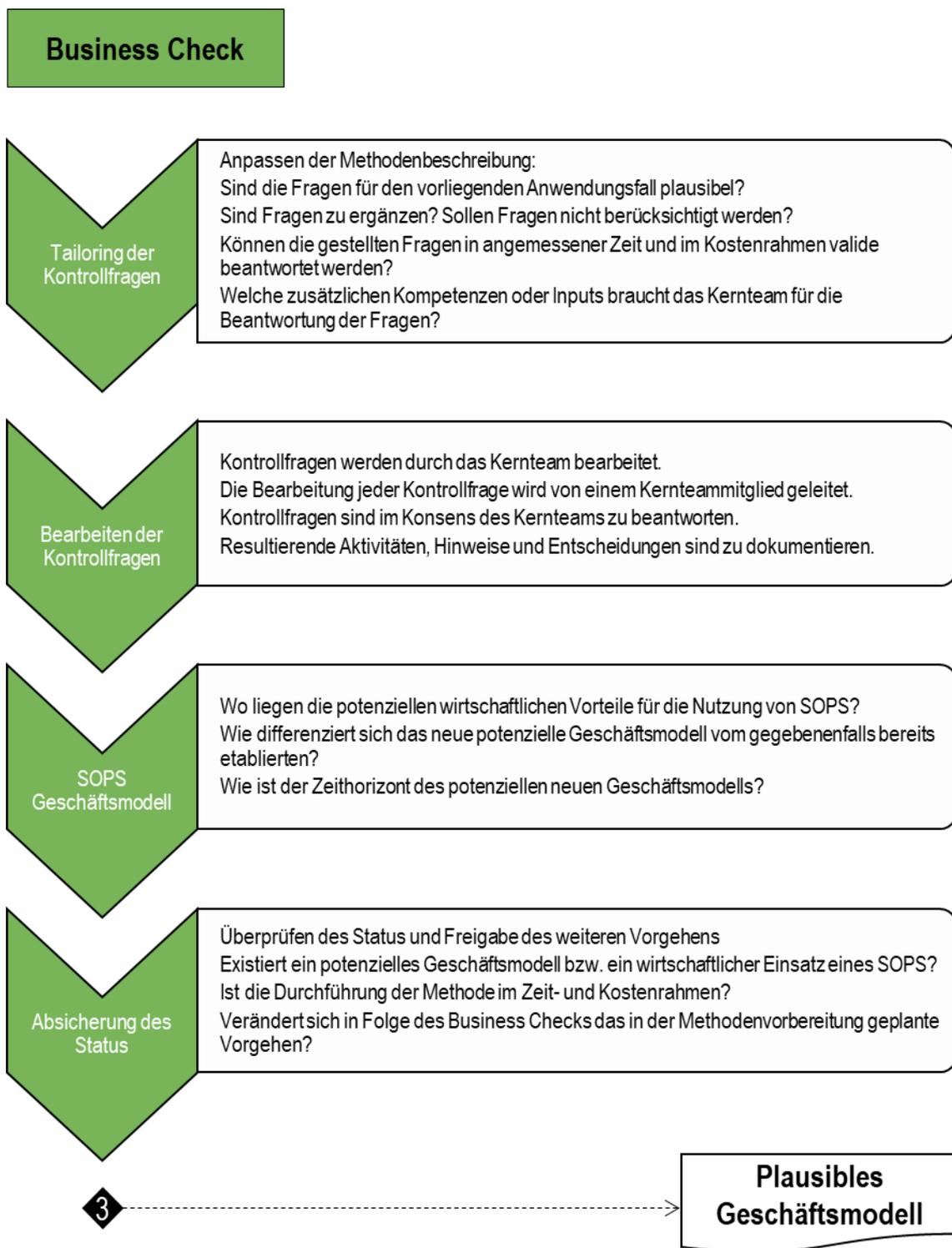


Abbildung 31: Phase 3: Business Check – Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen zur Orientierung

Der Kern der zu leistenden Arbeit liegt auf dem zweiten Schritt, der Bearbeitung der Kontrollfragen: Die Richtlinie VDI 2206 eröffnet die inhaltliche Arbeit mit dem V-Modell mit einem Kontrollpunkt „Geschäftsmodell“. Die Erweiterung des Kontrollpunkts

(Gräßler 2018) um die Belange der Integration von SOPS dient der frühzeitigen Berücksichtigung der Thematik durch Frontloading. Es ist von großer Bedeutung, einen ganzheitlichen Blick auf das Entwicklungsprojekt bzw. das Unternehmen einzunehmen. Die Fragen des Kontrollpunkts sind sowohl für den Entwickler des technischen Systems als auch – besonders zu diesem frühen Zeitpunkt – für den strategischen Entscheider von großer Relevanz. Sie spiegeln wider, welche Themen, Inhalte und Stakeholder wichtig sind. Die Reihenfolge der Nennung in der Folge spielt dabei keine wertende oder priorisierende Rolle.

In der individuellen Anwendung muss vor dem Einsatz der erweiterten Kontrollpunktfragen, wie auch der regulären Kontrollpunktfragen des Kontrollpunkts Geschäftsmodell (siehe Abbildung 14 in Kapitel 2.2.1), das im ersten Schritt der Phase festgelegte Tailoring des Werkzeugs durchgeführt werden.

Die ergänzten Zusatzfragen resultieren aus der Synthese der Auswirkungsanalyse in Einflussgruppen unter Berücksichtigung der gegebenen grundlegenden Anforderungen. Elementare Grundlage ist die Einflussgruppe 1, welche in 4.4.1 gebildet wurde. Es werden die strategische Einbindung des Projekts beziehungsweise des Entwicklungsvorhabens in die Unternehmensstrategie und das Produktportfolio aufgezeigt, wie auch die Klärung der strategischen Zielmärkte und Zielgruppen des Produkts bzw. der Produktgruppe vor dem Kontext von SOPS abgefragt. Potenziale aus Logistik, Wirtschaftlichkeit und Individualisierung von Systemen oder Systemelementen geben dem Anwender bereits im frühen Entwicklungsstadium offensichtliche Assoziationen und Analyse- und Entscheidungsschwerpunkte. Die Berücksichtigung bestehender Simulationsumgebungen, Produktionsanlagen und deren Organisation sowie nachfolgende Integrations- und Montageaktivitäten und die finale Qualitäts- und Eigenschaftsabsicherung werden in den vorgegebenen Kontrollfragen explizit abgefragt. Die Kontrollfragen zur Orientierung für ein individuelles Tailoring sind in Abbildung 32 aufgeführt (Anforderung A7).

Kontrollpunkt 1: Erweiterung für SOPS

- Ist das Produkt mit der Strategie des Produktportfolios abgestimmt?
- Ist das beabsichtigte/ gewählte Geschäftsmodell allen relevanten Beteiligten bewusst, hängt das Geschäftsmodell von der Ersatz- oder Verschleißteilversorgung ab?
- Wo liegt der Zielmarkt für das Produkt? Woher kommen die Systemelemente? Wo soll das Produkt montiert werden? Wer führt die Montage durch?
- Werden logistikrelevante Elemente oder Teilsysteme existieren (z.B. auf Grund von Größe oder Gewicht), bei welchen die Wirtschaftlichkeit von logistischen Prozessen starken Einfluss hat?
- Können bestehende SOPS (z.B. auch für Prototypen) verwendet werden und existieren Erfahrungen im Betrieb? Besteht die Möglichkeit einer Simulationsumgebung für die Eigenschaften des SOPS?
- Ist ein vielversprechender RoI (Return on Invest) für die Investition in ein innovatives und neues Produktionssystem zu erwarten?
- Sind die Montage und Qualitätssicherung sowie die räumliche Nähe zum Kunden ausreichend berücksichtigt worden?
- Sind Kapazitäten und Fähigkeiten für die Erstellung des Digitalen Abbilds und des sonstigen Frontloadings verfügbar?
- Sind die benötigten Kompetenzen insbesondere außerhalb der Entwicklungsabteilung ausreichend vorhanden? (z.B. IT, Produktion, Automatisierung etc.)

Abbildung 32: Kontrollpunkt 1, der Business Check: Erweiterung für Methode CoSOPS

Im Anschluss an die Bearbeitung der Kontrollfragen folgt die Bewertung und der Abgleich für das vorliegende Geschäftsmodell sowie die Absicherung des Status. Das Geschäftsmodell und der wirtschaftliche Nutzen müssen in diesem Status der Methode Potenziale aufzeigen und realisierbar sein (vergleiche Handlungsfeld Produktentstehung in Abbildung 1). Um verschiedene Ausprägungen von Geschäftsmodellen berücksichtigen zu können, unterstützt die Arbeit von Gassmann (Gassmann et al. 2017) beispielsweise die Auswahl, Beschreibung und Entwicklung eines erfolgversprechenden Geschäftsmodells mit vordefinierten Geschäftsmodellmustern.

Konnte an dieser Stelle durch den Business Check und die daraus folgenden Analysen kein vielversprechendes Geschäftsmodell für SOPS identifiziert werden, so folgt in der Perspektive der Absicherung des Status die Vorbereitung auf die Entscheidung im Folgenden „Meilenstein 3“ mit einer Empfehlung. Im erläuterten Fall hieße dies, bereits an dieser Stelle die Methode CoSOPS abzubrechen. Die Auswertung der Beantwortung der

Kontrollfragen kann also bereits nach der Anwendung des ersten Werkzeugs zum Abschluss Selbstorganisierender Produktionssysteme (SOPS) für das Projekt des Anwenders führen. Somit ist ein Abbruch der Methode im „Meilenstein 3“ bereits zum frühen Zeitpunkt möglich und gegebenenfalls auch im Sinne von Kosten- und Kapazitätseinsparungen wünschenswert. Existieren keine ausreichenden Potenziale für das individuelle Projekt/Produkt, könnten die Folgeschritte und Werkzeuge übergangen werden, wodurch sich der Einsatz der Methode in Umfang und Aufwand reduziert. Es würde nur noch Phase 7 „Methodenabschluss“ durchgeführt, bevor das Projekt endgültig abgebrochen wird.

Bei Unsicherheit, nicht ausreichender Informationslage sowie bei eindeutigen Potenzialen durch die Bearbeitung der Fragen ist das festgelegte Vorgehen weiter zu verfolgen oder die Option einer Iteration der durchgeführten Phase, beispielsweise mit anderen Kompetenzen, Kapazitäten oder externer Unterstützung zu wählen. Erfüllen die Ergebnisse die Vorgaben zu Potenzialen im Geschäftsmodell durch das Lenkungsgremium, wird der in der Vorgehensbeschreibung nächste Schritt durchgeführt, welche im Phasen-Meilensteinmodell die Phase 4 ist.

5.6.4 Phase 4: HML Kategorie

In Phase 4 HML Kategorie werden das Vorgehen und die Durchführung des Werkzeugs HML Kategorie erläutert (Abbildung 33). Das Werkzeug dient dazu, Anforderungen, die durch den Einsatz von SOPS entstehen, beziehungsweise berücksichtigt werden müssen, in der Anforderungserhebung des Produktentwicklungs- oder der Durchführung eines Strategieprojekts zu integrieren.

Die HML (Hauptmerkmaliste für mechatronische und cyber-physische Systeme) wird in ihrer Funktion zur Assoziation von relevanten Anforderungen für die interdisziplinäre Produktentwicklung um eine zusätzliche Kategorie erweitert: Die gegebenen Kategorien wie beispielsweise Gestaltung/Struktur oder Realisierung, werden durch die Kategorie „DfX“ für SOPS ergänzt. Die Verwendung und Nennung der Kategorie „DfX“ soll die zielgerichtete Anwendung auch anderer möglicher Fokussierungen oder Ausrichtungen andeuten (vgl. 2.2.3.). Ein Eingriff in die sonstige HML wird bewusst nicht vorgenommen. Die HML soll weiterhin Gültigkeit behalten und der Schwerpunkt der Entwicklung eines Produkts/ einer Produktgruppe soll nicht einzig und allein auf die Produktionsorganisationsform gelegt werden. Eine Zusatzkategorie in vergleichbarer Gestaltung mit dem Ziel der Assoziation relevanter Anforderungen entspricht somit den Anforderungen an die Methode. Grundlage für Assoziationsbegriffe in der neuen Kategorie sind die Einflussgruppen, insbesondere mit dem Schwerpunkt der Einflussgruppe 2 (Kapitel 4.4.2). Durch die Repräsentanz des gesamten Lebenszyklus in einer vollständigen Anforderungsbeschreibung geht die Berücksichtigung der Einflüsse über diese Einflussgruppe 2 hinaus und integriert beispielsweise die Überprüfung von Gerechtheiten in Bezug auf Produktions-, Montage- oder Absicherungsfähigkeit.

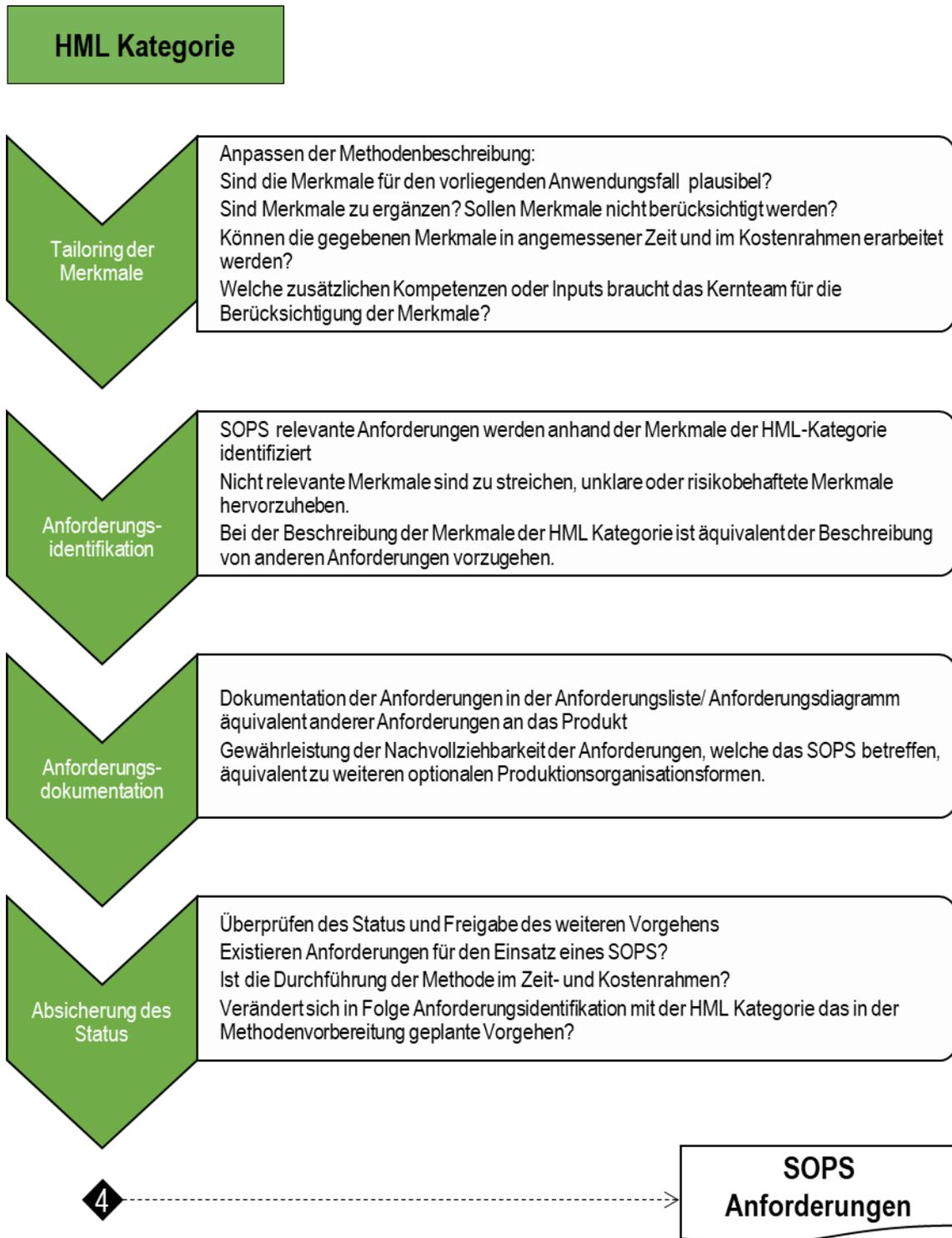


Abbildung 33: Phase 4: HML Kategorie – Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen zur Orientierung

Tabelle 16 zeigt die entwickelte Kategorie der HML für SOPS, welche vor der individuellen Anwendung durch den ersten Schritt der Phase „Tailoring der Merkmale“ angepasst

wird. Auf die vollständige HML der Richtlinie VDI 2206 wird im Anhang 10.2 verwiesen. Analog zur VDI Richtlinie 2206 wurde für jedes der hier hinzugefügten Merkmale eine Leitfrage zur Erläuterung formuliert.

Tabelle 16: Erweiterung der Hauptmerkmalliste (HML) zur Berücksichtigung von SOPS in der Anforderungserhebung interdisziplinärer Produktentwicklung

Design for „Selbstorganisierende Produktionssysteme“ (SOPS)	
Merkmal	Leitfrage
<ul style="list-style-type: none"> - Individualisierung <ul style="list-style-type: none"> ○ Systeme ○ Elemente 	Welche Bestandteile des Produkts werden individuelle Ausprägungen durch Produktionsprozesse erhalten?
<ul style="list-style-type: none"> - Variantenanzahl 	Wie viele Varianten des Produkts oder von Bestandteilen sind vorgesehen?
<ul style="list-style-type: none"> - Architekturgranularität 	Inwieweit ist die Anzahl der Systemelemente und Schnittstellen für die Umsetzung der Realisierung z. B. in der Montage begrenzt?
<ul style="list-style-type: none"> - Schnittstellen und Standardkomponenten für Prozess und Produkt <ul style="list-style-type: none"> ○ COTS, Normschnittstellen etc. ○ Standardverfahren und -Werkzeuge 	Kann eine erhöhte Anzahl an Schnittstellen in Kauf genommen werden, wenn Teile mehrfach oder als COTS verwendet werden? Bringt die Gestaltung der Systemelemente für die Produktion mit Standardverfahren einen Mehrwert?
<ul style="list-style-type: none"> - Verhältnis des Produktionspreises zu den Transportkosten 	Haben Transportkosten für besonders große oder schwere Teile einen großen technischen oder wirtschaftlichen Einfluss?
<ul style="list-style-type: none"> - Realisierbarkeit von Varianten der Fertigungsverfahren <ul style="list-style-type: none"> ○ Generative Fertigungsverfahren ○ Einzelanfertigungen ○ Werkzeugkosten 	Können klassische Fertigungsverfahren z. B. durch additive Fertigungsverfahren zeitweise ersetzt oder ergänzt werden, sodass eine erhöhte Flexibilität technisch und wirtschaftlich realisierbar ist?
<ul style="list-style-type: none"> - Verifizierbarkeit des Elements/ Systems <ul style="list-style-type: none"> ○ Montagegerecht ○ Risiko Qualitätsabweichungen 	Können die Eigenschaften verifiziert werden? Können Systemelemente gegebenenfalls ohne zentrale Qualitätsprüfung realisiert und von nicht oder weniger geschultem Personal montiert werden?
<ul style="list-style-type: none"> - Fähigkeit der Simulation und Virtualisierung 	Kann das System und der Produktionsprozess virtualisiert und simuliert werden?

<ul style="list-style-type: none"> ○ Szenarienbildung für Montage und Fertigungsprozesse ○ Prozessmodellbildung ○ Fabrik- und Warenstromsimulation 	
<ul style="list-style-type: none"> - Vollständiges Digitales Abbild <ul style="list-style-type: none"> ○ (Digitales) Produkt ○ (Digitaler) Prozess ○ Supply Chain Management 	Kann der benötigte Umfang des digitalen Abbilds für das Produkt, den Prozess und die umgebenden Beteiligten der Wertschöpfungskette (z. B. Zulieferer) ausreichend detailliert realisiert werden?
<ul style="list-style-type: none"> - Integration, Montage und Test <ul style="list-style-type: none"> ○ Lokal ○ Verteilt/global ○ Dienstleistungen 	Wo findet welche Aktivität statt? Wer kann welche Aktivitäten durchführen?
<ul style="list-style-type: none"> - Sicherheit <ul style="list-style-type: none"> ○ Daten und Schnittstellen ○ Unvorhersehbarer Produktionsprozess 	Ist die „Intellectual Property“ ausreichend geschützt? Kann die Qualität und damit die Sicherheit der Produkte trotz gegebenenfalls unvorhersehbarer Prozessabläufe gewährleistet werden?

Die Bearbeitung der Merkmale der HML dient dem folgenden Schritt der Phase, der Dokumentation der Anforderungen. Es gelten in der Dokumentation und Ausarbeitung die gleichen Regeln wie für jede andere Anforderung in einem Entwicklungsprojekt. (z. B. „4C“: Correct, Clear, Complete, Concise)²¹. Zum Abschluss der Phase wird die Absicherung des Status durchgeführt und die Entscheidungen im „Meilenstein 4“ vorbereitet. Wie in den bisherigen Phasen sind die Bewertungsmöglichkeiten und das weitere Vorgehen anhand der Meilensteinstruktur zu vorzubereiten und im Meilenstein zu beschließen.

5.6.5 Phase 5: Architekturoptionen

In drei Schritten ist in Abbildung 34 das Vorgehen und die Durchführung der Phase 5 Architekturoptionen erläutert. Architekturoptionen zeigen dem Anwender mögliche Optionen und Möglichkeiten auf, um die Gestaltung der Systemarchitektur hinsichtlich der Berücksichtigung von SOPS durchzuführen. Mit den genannten Architekturoptionen kann eine Architektur überprüft und bewertet oder eine zusätzliche Architekturoption (Alternative) gezielt für die Anwendung von SOPS entwickelt werden.

²¹ ergänzende Literatur zum Umgang mit Anforderungen in (Ebert 2019; Pohl und Rupp 2015)

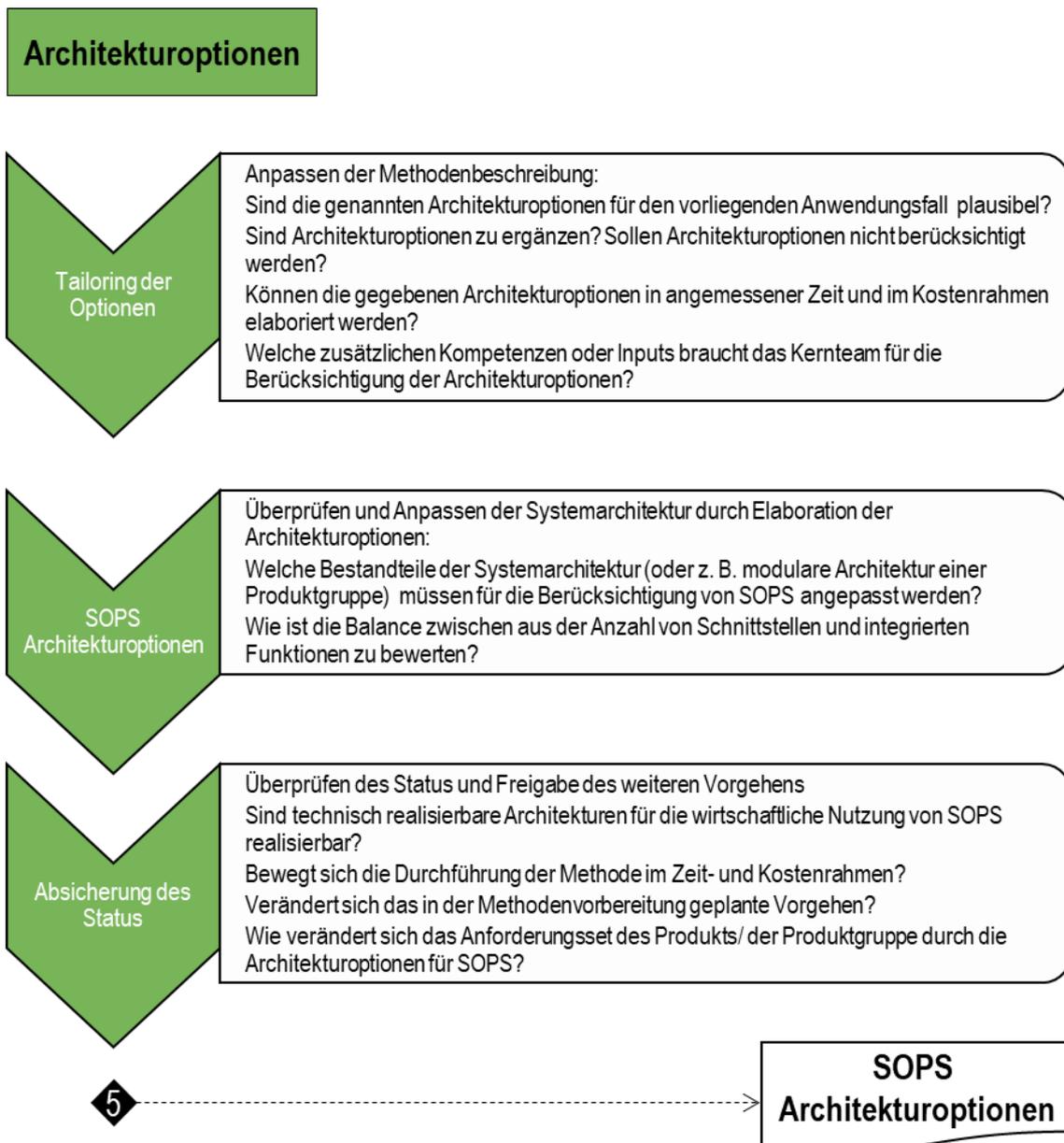


Abbildung 34: Phase 5: Architekturoptionen – Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen zur Orientierung

Die Vorgabe von Architekturregeln (vergleiche Konstruktions- und Gestaltungsregeln (Feldhusen und Grote 2013, 493ff.)) kann zu großen Einschränkungen bei der Gestaltung des Produktes/ der Produktgruppe führen. Deshalb wird in der Anwendung der Methode keine Regelbasis definiert, sondern es werden Architekturoptionen zur Berücksichtigung des SOPS in einer der Architekturalternativen zur Verfügung gestellt. Diese stellen Möglichkeiten vor, wie die Auslegung und Gestaltung der Architektur für SOPS aussehen kann und wie Potenziale dieser Produktionsorganisationsform in der Festlegung der Architektur berücksichtigt werden können.

Die Benennung Architekturoptionen beinhaltet dabei sowohl die Auslegung der Gestalt der Architektur als auch die Zuordnung relevanter Anforderungen zur Architektur (Allokation). Dazu gehört insbesondere die Granularität der Architektur sowie die Festlegung und Beschreibung von Schnittstellen.

Resultierend aus den Ergebnissen der Durchführung der Phasen 3 und 4 weisen SOPS Potenziale für die Produktion von Produkten oder Produktgruppen auf: Es ist zum Zeitpunkt der Beschreibung der Architektur des Systems von großer Bedeutung, diese Potenziale zu erkennen und in Betracht zu ziehen, um die Architektur gezielt an Anforderungen anzupassen, die aus der Nutzung von SOPS resultieren. Wichtige Anforderungen aus den vorhergehenden Phasen sind unter Berücksichtigung der Analyseergebnisse (Kapitel 4) mit dem Schwerpunkt auf Einflussgruppe 3 (Kapitel: 4.4.3) die Folgenden in Tabelle 17 erläuterten:

Tabelle 17: SOPS Schwerpunktsetzung in der Architektur von Systemen, Subsystemen oder Systemelementen

Schwerpunkt-Potenzial	Erläuterungen
- auf Grund von Logistikvorteilen	Die Produktion kann in Produktionsstätten außerhalb der OEM-Fertigung z. B. als Dienstleistung durchgeführt werden. Einzelne Systemelemente oder Subsysteme können in der Nähe des Absatzmarktes hergestellt werden.
- auf Grund von Individualisierungen und kundenindividueller Massenproduktion	SOPS organisieren vollautomatisiert jede Ausprägung eines Produkts. Die Arbeitsvorbereitung muss nicht jede Ausprägung des Produkts oder Systemelements individuell hinterlegen.
- auf Grund von Kostenreduktion	Keine Arbeitsvorbereitung zu benötigen, kann langfristig Kosten sparen. Die Tätigkeiten werden automatisiert durch das SOPS übernommen.
- auf Grund des Geschäftsmodells	Beim Fokus auf Mass Customization verspricht SOPS auf Grund der oben genannten Vorteile große wirtschaftliche Potenziale.
- auf Grund bereits existierender (Selbstorganisierender) Produktionssysteme (SOPS).	Bereits bestehende SOPS können genutzt werden um Prototypen, Muster oder Kleinserien zu fertigen. Zudem steigern Erfahrungswerte mit SOPS die Effizienz in der Erarbeitung des Digitalen Abbilds.

Die Architekturgestaltung des Produkts, welches vollständig oder teilweise von SOPS produziert werden soll, liegt der Betrachtung der zuvor genannten Schwerpunkt-Potenziale zu Grunde. SOPS sind häufig bei Systemen mit großen Potenzialen behaftet, die sich aus einer hohen Anzahl von Systemelementen zusammensetzen und deren Elemente dabei von niedriger Komplexität geprägt sind. Dieser theoretische „Optimale Anwendungsbereich“, welcher in Abbildung 35 für Gesamtsysteme – nicht für Einzelemente des Systems – hervorgehoben wurde, beinhaltet die Festlegung der Architekturoption 1.) (vergleiche Tabelle 18). Diese oder ähnliche Portfolios können den Anwender methodisch unterstützen. Die Erfahrungen mit anderen Produkten helfen dabei, das aktuelle Entwicklungsprojekt einzuordnen oder die Auswahlentscheidung von Architekturalternativen durchzuführen, auch wenn es sich um einen methodisch unterstützten subjektiven Eindruck handelt.

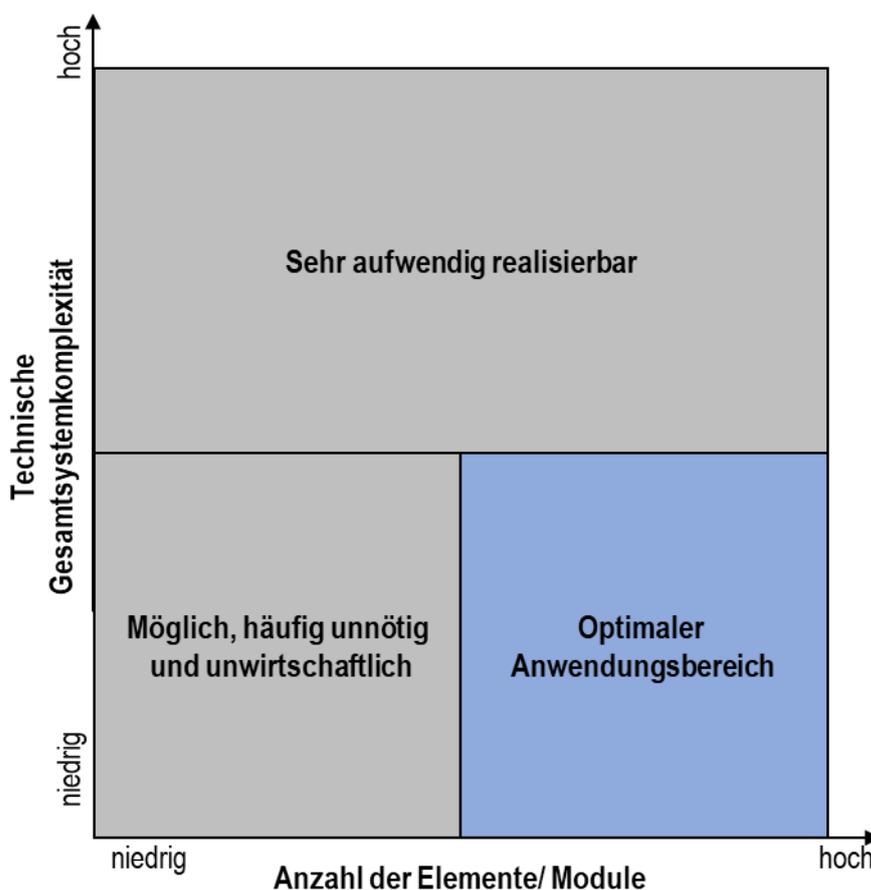


Abbildung 35: Portfolio aus der Abschätzung der Gesamtkomplexität (technisch, organisatorisch etc.) und der Anzahl der Elemente des Gesamtsystems

Einfach umzusetzende Systemelemente sind idealerweise Standardelemente, COTS und Systemelemente mit geringer Funktionsintegration, die ein SOPS bei geringer Fertigungstiefe realisieren kann. Direkt verknüpft damit ist Architekturoption 2.). Diese legt eine geringe Fertigungstiefe sowie eine weitgehende Dekomposition bis in feingranulare

Systemelemente nahe. Besonders bereits eingesetzte und mit großer Erfahrung behaftete Fertigungsverfahren im SOPS sind wichtige Indikatoren bei der Festlegung der Architektur und Gestaltung der Systemelemente. Architekturoption 3.) weist auf die Varianten von Fertigungsverfahren hin, die ein großes Potenzial bieten. Unterschiedliche Fertigungsverfahren haben unterschiedliche Gestaltungsmerkmale und Regeln, weshalb ein geeigneter Lösungsweg gefunden werden muss. Als Beispiele sind die besonderen Designfreiheiten der Additiven Fertigung zu nennen (Hofmann und Oettmeier 2016), welche im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren beispielsweise Hinterschnitte oder außergewöhnliche Geometrien erzeugen können.

Tabelle 18: SOPS Architekturoptionen

Architekturoption	Detaillierung
1.) Einfache Elemente verwenden	<ul style="list-style-type: none"> a. Standardelemente und COTS einsetzen b. Funktionsintegration zur Komplexitätsreduktion vermeiden
2.) Verfügbare und Standardfertigungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> a. Bestehende Fertigungsanlagen und Werkzeuge berücksichtigen b. In viele gängige Bearbeitungsschritte dekompositionieren c. Geringe Fertigungstiefe vorsehen
3.) Varianten der Fertigungsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> a. Diversifizieren von Verfahren für äquivalenten Output
4.) Wiederverwendung von vorhandenen SOPS Produktionssystemen	<ul style="list-style-type: none"> a. Anwendung von Best Practices und Erfahrungen in der Vorbereitung des Digitalen Abbilds b. Nutzung von Testmöglichkeiten
5.) Gewicht und Volumen zur Erschließung von Logistikvorteilen analysieren	<ul style="list-style-type: none"> a. Analyse des Gewichts und des Volumens, ob einzelne Systemelemente im Vergleich besonders relevant sind
6.) Einbindung des Produkts durch Vernetzung mit Produktionsanlagen	<ul style="list-style-type: none"> a. Kommunikationsprotokolle harmonisieren b. Schnittstellen zur Vernetzung integrieren c. Aktives Produkt für mehr Nachvollziehbarkeit
7.) Integration der Geschäftsmodellabsichten in die Architektur	<ul style="list-style-type: none"> a. Besonderer Fokus auf Verbrauchs- und Ersatzteile

	b. Auslegung der Schnittstellen (Open Source, individuell patentiert etc.)
8.) Digitale Abbildbarkeit der Architektur	a. Simulierbarkeit der Architekturalternativen b. Simulierbarkeit der internen und externen Schnittstellen

In der Anwendung der Architekturoptionen kann eine Differenzierung der Betrachtungsperspektive stattfinden: Nicht das gesamte System muss betrachtet werden. Es kann beispielsweise ein Subsystem oder ein Systemelement im Fokus stehen, welches für die Produktionsorganisationsform mit SOPS Potenziale verspricht. Die Architekturoptionen kommen nach der Prüfung sowohl für die Gestaltung der ausgewählten als auch für die Produktion mit SOPS vorgesehenen Systemelementen zum Einsatz.

Nach der Durchführung und Dokumentation der Analyse anhand von Architekturoptionen oder deren Einbringung in das laufende Entwicklungsprojekt, wird der Status erneut abgesichert. Sollte ein Abbruch der Methode für den „Meilenstein 5“ in Frage kommen, sind die Ergebnisse und Entscheidungen der vorherigen Meilensteine zwingend zu berücksichtigen. Ein Abbruch in Folge der Architekturoptionen sollte eher selten vorkommen, wenn die im Vorfeld durchgeführten Phasen der Methode Potenziale aufgezeigt haben. In der Regel ist das Ergebnis der Architekturoptionen eine Eingrenzung auf potenzielle Systemelemente oder Subsysteme. Es kann aber auch bereits eine Entscheidung für die Nutzung einer Architektur mit SOPS Bestandteilen sein.

Nach der Anwendung des Werkzeugs, gegebenenfalls bereits nach der Auswahl einer Systemarchitektur, wird die disziplinübergreifende Entwicklung mit Hilfe der Architektur in die spezifischen Disziplinen und deren Gestaltungs- und Implementierungsprozesse unterteilt. Die disziplinübergreifende Gestaltung ist damit abgeschlossen. Es muss sichergestellt werden, dass Änderungen oder Anpassungen, induziert durch die beteiligten Disziplinen oder andere Stakeholder, in den folgenden Aktivitäten des Entwicklungsprozesses kommuniziert und berücksichtigt werden. Diese Änderungen erfordern gegebenenfalls eine Iterative Durchführung einer Methodenphase, was stets zu bewerten ist. Daraus folgt, dass beispielsweise Änderungen an der Architektur des Systems vor dem Hintergrund der bisher erarbeiteten Werkzeuge überprüft werden müssen. Wird beispielsweise die Auslegung eines Systemelements und dessen Schnittstelle im Rahmen der disziplinspezifischen Entwicklung grundlegend verändert, so muss auch die Fertigungstechnologie angepasst werden. Dieses Änderungsmanagement betrifft konventionelle Produktionsorganisationen ebenso wie SOPS und ist im V-Modell der Richtlinie 2206 im Anforderungsmanagement integriert.

5.6.6 Phase 6: Digitales Abbild

Die Phase 6 Digitales Abbild verfolgt das Ziel, zu ermitteln, ob die Produktion eines Systemelements oder Subsystems mit Hilfe von SOPS umgesetzt werden kann. Das Digitale Abbild²² ist ein Zielsystem (oder Zielelement) in Form eines Nebenprodukts in der Entwicklung eines Produkts oder einer Produktgruppe. Das Werkzeug (Abbildung 36) stellt eine Überprüfung der Erreichbarkeit dieses notwendigen Zielsystems dar. Kernfragen des Werkzeugs beziehen sich dabei auf die notwendigen Informationen für das SOPS sowie die Realisierung und Verfügbarmachung dieser Informationen:

- Welche Informationen benötigt das Produktionssystem SOPS im Digitalen Abbild?
- Können diese Informationen geeignet digital abgebildet und zur Verfügung gestellt werden?

Das Digitale Abbild entspricht dabei in seinen Eigenschaften nicht dem in der Literatur beschriebenen Digitalen Zwilling²³ (Digital Twin). Es kann als Eingangsgröße für die Erstellung eines Digitalen Zwillings genutzt werden, da es sich um ein Modell der Produktentwicklung handelt. Das Digitale Abbild ist dabei auf die Zielsetzung das Produkt in der Produktion realisieren zu können beschränkt. Kaul, Hentze et al. (Hentze et al. 2017; Kaul et al. 2019) beschreiben eine Methode für ein solches Vorgehen am Beispiel der Integration von Verlässlichkeitsmodellen aus der Entwicklung in den Digitalen Zwilling. Die Übersicht über die Methode ist als Resultat einer Vorpublikation im Anhang (10.8.3) zu finden.

Das Werkzeug Digitales Abbilds in Phase 6 erläutert und definiert dessen Eigenschaften. Es gibt eine Orientierung und Analysegrundlage, welche Eigenschaften und Fähigkeiten zur Nutzung eines SOPS in einem Digitalen Abbild repräsentiert sein müssen. Entsprechend der Komplexität des realen Systems oder Systemelements, ist in der Regel auch die Komplexität des Digitalen Abbilds zu bewerten.

Als plakatives und unvollständiges Beispiel kann der Vergleich einer Aluminiumsitzschiene und eines Entertainmentsystems in einem KFZ zur Erläuterung genannt werden: Während ein Aluminiumbügel mit Materialvorgaben, Maßen, Toleranzen und Produktionsverfahrensangaben (z.B. Druckguss, Strangpressen, etc.) realisiert werden kann, sind für das Digitale Abbild eines Entertainmentsystems sowohl interdisziplinäre als auch eine deutlich erhöhte Anzahl an Systemelementen und Funktionalitäten zu berücksichtigen.

²² Vergleiche Definition in Kapitel 3.2

²³ Siehe dazu auch Definition des Digitalen Zwillings in (WIGEP 2020) (siehe Anhang 10.8.1) sowie Publikation (Kaul et al. 2019) mit Beteiligung des Autors im Anhang 10.8.2

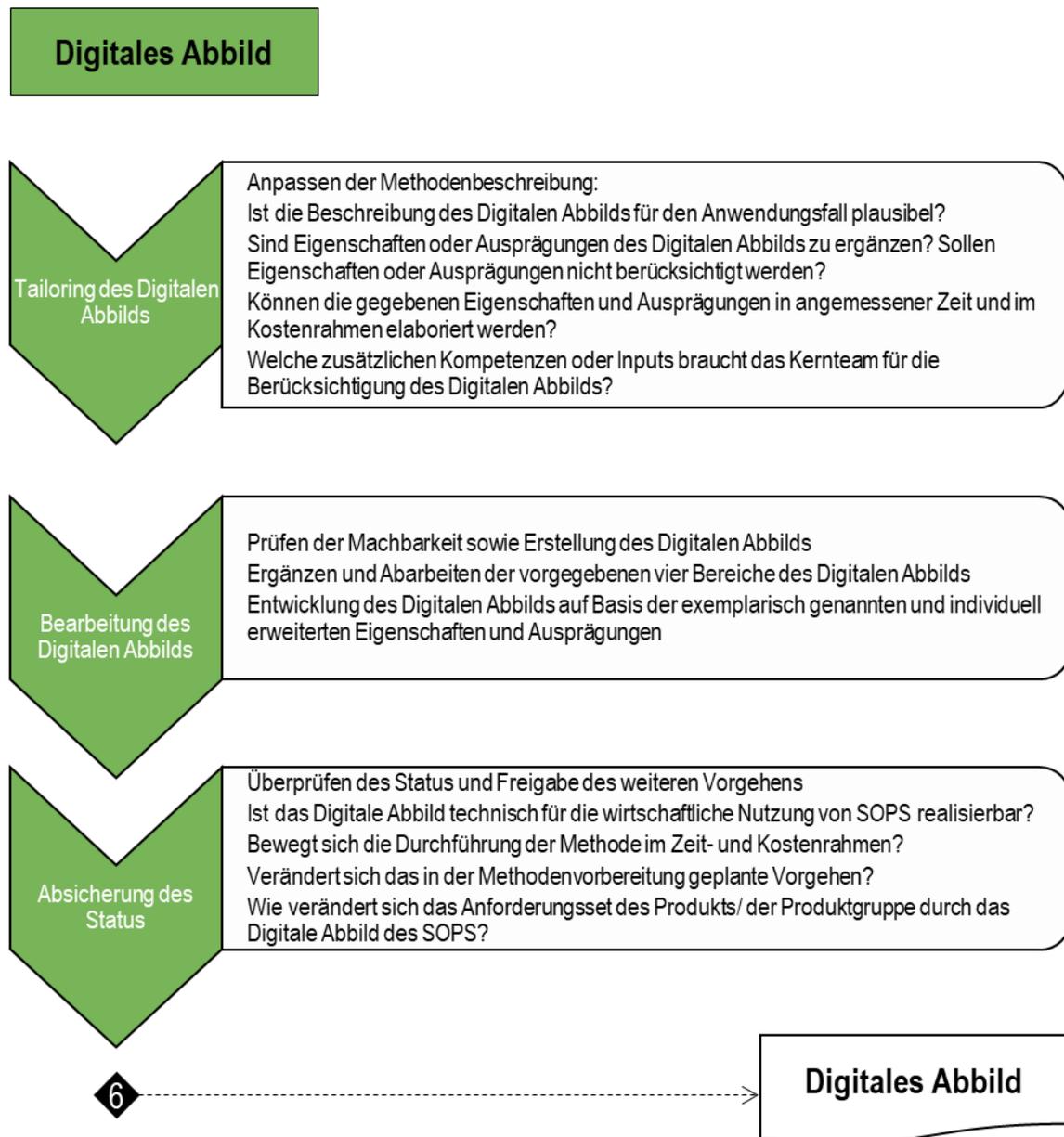


Abbildung 36: Phase 6: Digitales Abbild – Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen zur Orientierung

Das Digitale Abbild setzt sich dabei aus vier zwingend erforderlichen elementaren Bestandteilen zusammen (Abbildung 37), welche mit dem Werkzeug analysiert, erarbeitet und auf Umsetzbarkeit geprüft werden müssen. Hergeleitet werden diese Bestandteile aus der Notwendigkeit an Informationen und Daten, welche das Digitale Abbild beinhalten muss. Dazu sind das Produkt (Digitales Produkt), der (Fertigungs-, Logistik- und Montage-) Prozess (Digitaler Prozess), die Vernetzung mit der Wertschöpfungskette (Kommunikation und Dokumentation) sowie die Fähigkeit die geplanten Bestandteile im Vorfeld Simulieren zu können (Simulation), obligatorisch.

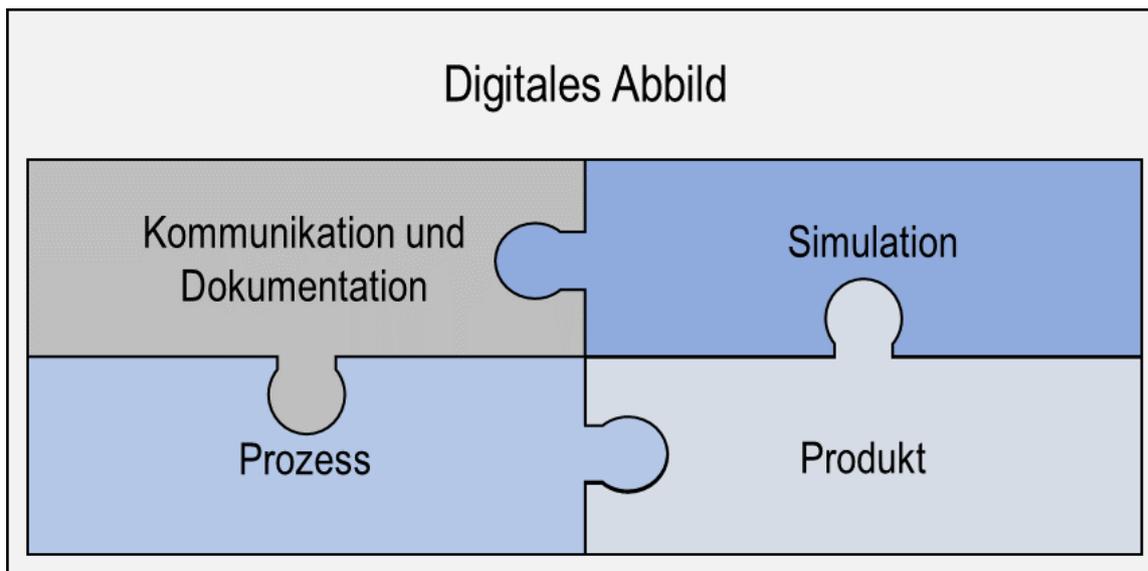


Abbildung 37: Die vier elementaren Bestandteile des Digitalen Abbilds

Die vier elementaren Bestandteile des Digitalen Abbilds werden in der Folge beschrieben und erläutert. Die zugehörigen Abbildungen geben Merkmale zur Assoziation im Umfeld der Bestandteile. Diese sollen den Anwender dabei unterstützen, die Eigenschaften für das individuell benötigte Digitale Abbild zu identifizieren, um ein möglichst gutes und vollständiges Digitales Abbild zu erhalten. Assoziationen geben dabei keine festgelegten Merkmale vor, sondern Beispiele und Erfahrungen.

Produkt

Das in ausschließlich digitaler Form beschriebene Produkt²⁴ umfasst sämtliche Produktdaten, Modelle und Informationen, die das zu produzierende Systemelement spezifizieren. Dies sind beispielsweise Maße, Materialien, Schnittstellendefinitionen, Farbcodes oder ein Softwareelement. Ziel ist eine eindeutige und fehler- sowie widerspruchsfreie Beschreibung des Produkts mit sämtlichen gewünschten und zur Produktion notwendigen Eigenschaften. Auch Verbrauchsmaterialien und Toleranzen in der Geometrie und des Materials sind definiert. Abbildung 38 unterstützt den Anwender durch vorgegebene Assoziationsgruppen für das Kernelement des Digitalen Produkts. Abzugrenzen sind beispielsweise kommerzielle Produktdaten des Vertriebs, der Buchhaltung oder der Zulassung und Zertifizierung.

²⁴ Zur eindeutigen Verwendung als Bestandteil der Methode des Digitalen Abbilds wird auch der Begriff „Digitales Produkt“ synonym verwendet, beispielsweise in der Evaluation

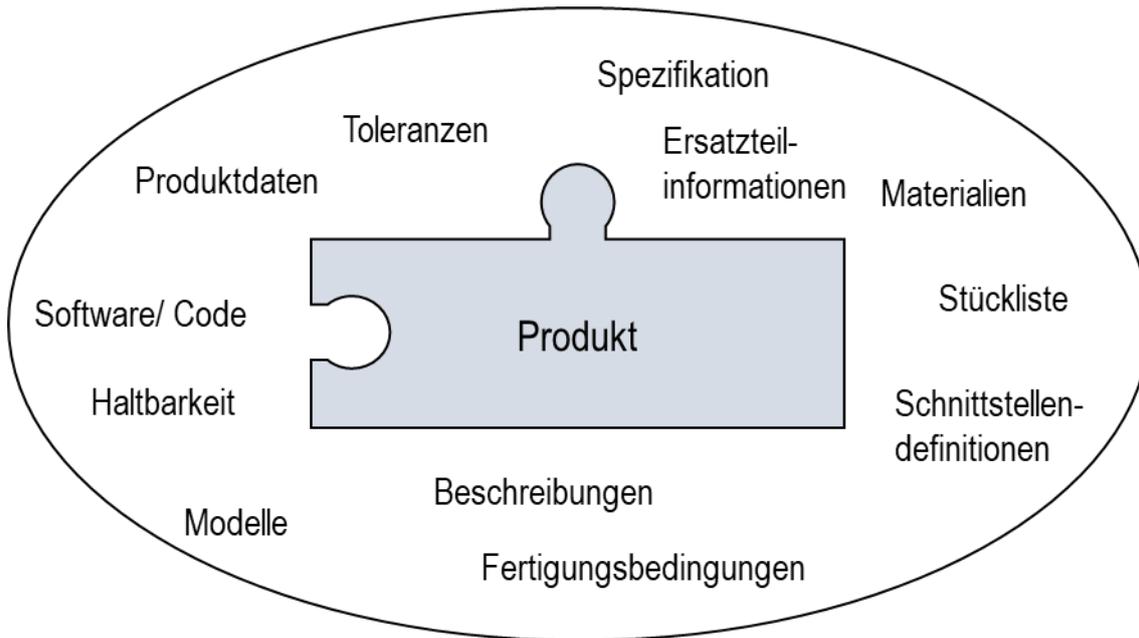


Abbildung 38: Merkmale zur Assoziation im Umfeld des Kernelements Produkt

Prozess

Der digital repräsentierte Prozess²⁵ beinhaltet sämtliche Daten des Produktionsprozesses. Verwendete Fertigungsverfahren und -schritte sind dokumentiert. Ergänzt wird dies um die Beschaffung und Bereitstellung von Materialien, Infrastruktur etc. als Input für den Produktionsprozess, wie auch die Vorgaben für die Qualitätssicherung des produzierten Systemelements. Festgelegt sind zudem Aspekte der Logistik beziehungsweise der vollständigen Supply Chain (Lieferkette) und welche alternativen Fertigungsprozesse im SOPS substituiert werden können. Abgegrenzt vom Kernelement Prozess werden die Informationen, die keinen Einfluss auf die tatsächliche Durchführung der Produktion und der Nach- und Vorgelagerten Prozesse haben. Zur Verdeutlichung können Entscheidungsprozesse, Personalbeschaffung oder die kommerzielle Verbuchung sämtlicher Vorgänge als Beispiele außerhalb des Kernelements Prozess angeführt werden

Der (Digitale) Prozess und das (Digitale) Produkt sind stets eng verknüpft und haben ohne die Existenz des anderen elementaren Bestandteils keine Wirksamkeit. Abbildung 39 beschreibt Assoziationen für die individuelle Beschreibung des Digitalen Prozesses.

²⁵ Zur eindeutigen Verwendung als Bestandteil der Methode des Digitalen Abbilds wird auch der Begriff „Digitaler Prozess“ synonym verwendet, beispielsweise in der Evaluation

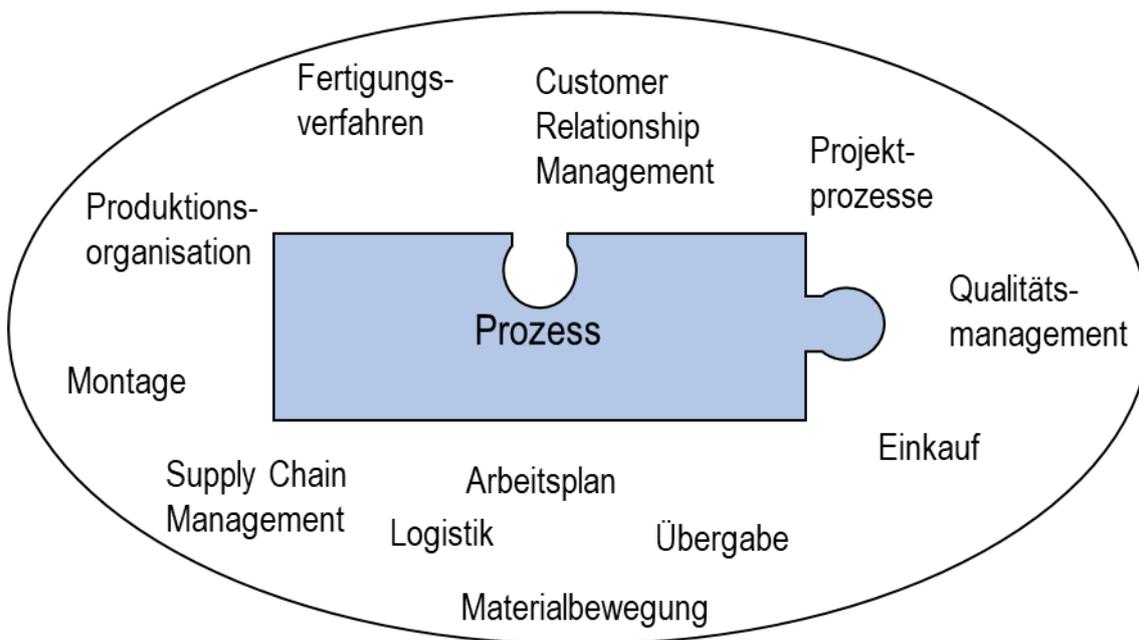


Abbildung 39: Merkmale zur Assoziation im Umfeld des Kernelements Prozess

Simulation (enge Verknüpfung zur SOPS Absicherung)

Die Simulation des Digitalen Abbilds betrifft sowohl das Produkt als auch die Produktionsprozesse. Dabei werden das Digitale Abbild oder Bestandteile dessen in virtuellen Umgebungen oder bestehenden SOPS Fertigungssystemen simuliert und getestet. Das Digitale Abbild oder dessen Bestandteile sind einerseits Grundlage für die Simulation, andererseits gibt die hier beschriebene Methode die zwingende Existenz von Simulationen und deren Ergebnissen zur Schaffung eines nutzbaren Digitalen Abbilds vor. Assoziationen der Kernbestandteile der Simulation sind in Abbildung 40 dargestellt. Abzugrenzen sind hier Simulationen über die Wirtschaftlichkeit, wie beispielsweise eine Absatzplanung oder die Simulation der Anwendung des Produkts durch den Konsumenten. Das Verständnis, dass das Digitale Abbild auf die Simulation des Produktionsprozesses beschränkt ist, ist elementar²⁶, da umfangreiche Produkt- oder Anwendungssimulationen in der Produktentwicklung über den hier beschriebenen Zweck hinausgehen. Relevant hingegen könnten Simulationen und Planungsprozesse der Supply Chain (Lieferkette) sein. Diese sind häufig mindestens als Schnittstelle zu betrachten, damit die Versorgung der Produktion mit Materialien und Hilfsmitteln gewährleistet wird.

²⁶ Auch in Abgrenzung des bedeutenden und umfangreicheren Digitalen Zwillings (siehe Anhang 10.8.1)

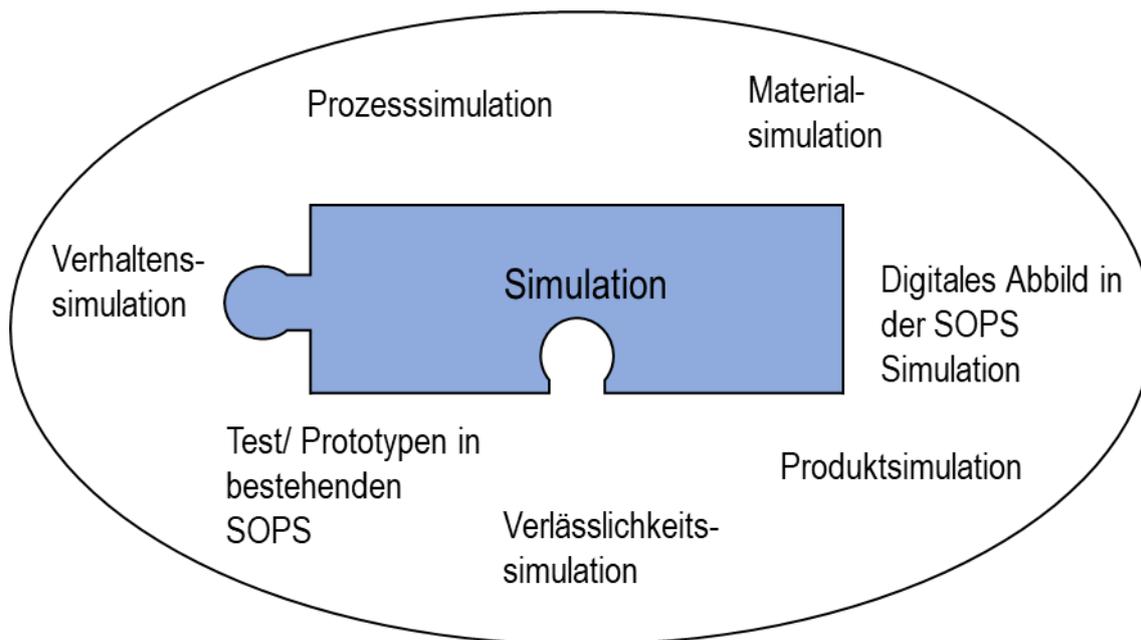


Abbildung 40: Merkmale zur Assoziation im Umfeld des Kernelements Simulation

Kommunikation und Dokumentation

Das Kernelement der Kommunikation und Dokumentation beinhalten die Formalien des Digitalen Abbilds. Die Art und Weise der Beschreibung sämtlicher Informationen und Daten wird definiert und muss mit dem SOPS harmonisiert sein. Die Verwendung der passenden Datentypen, der entsprechenden Syntax, Programmiersprache etc. sind dabei Rahmenbedingungen, die mit dem Beginn der Entwicklung des Digitalen Abbilds eindeutig festgelegt sein müssen. Vergleichbar ist dies mit der Gestaltung einer Steuerungssoftware für eine Maschine: Hardware und Software müssen kompatibel und die Nutzung der Software auf einer Maschine möglich sein. Dazu sind Anforderungen hinsichtlich der Spezifikation des Maschinenherstellers zu erfüllen (z.B. industrielle Kommunikationsstandards von SPS und MES System durch standardisierte OPC UA Schnittstellendefinitionen)

Die Festlegung von Vorgehensweisen und Prozessen bei der Kommunikation mit dem beteiligten Entwickler einer Disziplin und der Änderungsprozess sind wichtige Bestandteile. Je früher Standards für die Beschreibung von Arbeitsergebnissen oder Bestandteilen des Digitalen Abbilds zur Verfügung stehen, desto einfacher fällt die Einhaltung. Im Tailoring auf Unternehmensebene sind solche Standards neben dem Tailoring des Vorgehens elementar wichtige Bestandteile. Vergleichbar sind Unternehmensstandards wie Projektmanagementhandbücher oder individuell angepasste Vorgehen im Entwicklungsprozess. Merkmale zur Assoziation im Umfeld des Kernelements Simulation sind in Abbildung 41 zusammengetragen.

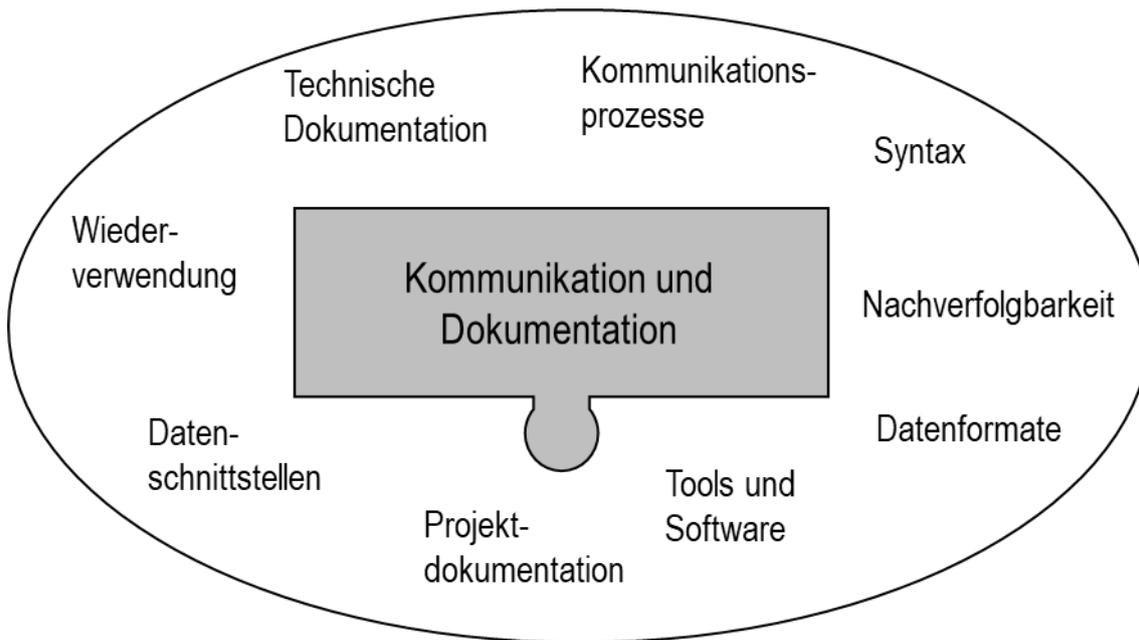


Abbildung 41: Merkmale zur Assoziation im Umfeld des Kernelements Kommunikation und Dokumentation

Die Phase Digitales Abbild endet wie bei den zuvor erläuterten Phasen mit der Überprüfung des Status. Sollte in Folge des Werkzeugs Digitales Abbild ein Abbruch der Methode ratsam erscheinen, ist erneut eine Rückschau auf sämtliche Ergebnisse und Einschätzungen der Methode in Betracht zu ziehen. Ein Abbruch der Methode im Rahmen des Digitalen Abbilds kann auf Potenziale hinweisen, die mit den derzeit verfügbaren Fähigkeiten der bestehenden Organisation nicht gehoben werden können. Unter der Annahme von Modernisierung und Weiterentwicklung der Organisation kann dieses Erkenntnis ein wichtiger Hinweis für das Management oder die Unternehmensführung sein. Typischer Fall ist die mangelnde IT-Kompetenz in Unternehmen mit beispielsweise einem klassischen mechanischen Schwerpunkt. Neben der Kompetenz kann auch die technische Ausstattung oder die mangelnde Verfügbarkeit von Investitionskapital dazu beitragen, die Nutzung von SOPS in der Realisierung abzulehnen.

Mit Hilfe des Digitalen Abbilds wird die Produktentwicklung bei der Entwicklung, Beschreibung und Definition des Digitalen Abbilds unterstützt. Modelle des Model-Based Systems Engineerings (MBSE) der Maschinen-, Prozess- und Produktsimulation sind beim Aufbau des Digitalen Abbilds wichtige Bestandteile und Grundlagen. Je tiefer die Digitalisierung in diesen Prozessen der Produktentwicklung bereits vorangeschritten ist, desto einfacher und weniger aufwendig wird die Erstellung des Digitalen Abbilds. Die Entscheidung über die wirtschaftliche Durchführung hängt somit in der Regel auch vom Grad der Digitalisierung insbesondere in der Produktentwicklung des anwendenden Unternehmens ab.

5.6.7 Phase 7: Methodenabschluss

Die abschließende Phase der Methode dient der Konsolidierung der Ergebnisse. Sie ist bei jedem Methodenabbruch – unabhängig vom Zeitpunkt – ebenso durchzuführen, wie nach einem vollständigen Durchlauf sämtlicher Phasen. Ziel ist die Festlegung des weiteren Vorgehens: Gemäß des Phasen-Meilenstein Modells in Abbildung 28 sind die Resultate ein Umsetzungsprojekt oder der Eingang der Ergebnisse in die Unternehmensstrategie. Beispiel für ein Umsetzungsprojekt ist der Aufbau oder die Verwendung eines SOPS für ein oder mehrere Systemelemente des untersuchten Produkts. Der Eingang in die Unternehmensstrategie kann beispielsweise das Produktportfolio beeinflussen und langfristig die Möglichkeit schaffen, individuelle Ausprägungen und Eigenschaften in einem oder mehreren Produkten zu berücksichtigen. Ein Abbruch der Methode sollte grundsätzlich, unabhängig vom Ziel der Methode, für die Gestaltung der Unternehmensstrategie berücksichtigt werden. Auch die Erkenntnis nicht von SOPS profitieren zu können, spielt eine wichtige Rolle für die Festlegung beispielsweise einer Produktionsstrategie. Der zeitlich begrenzte Ausschluss von einzelnen Technologien und Innovationen wie SOPS kann dabei helfen, die Konzentration auf Alternativen zu stärken.

Der Methodenabschluss soll die folgenden Aktivitäten sicherstellen:

- Zusammenstellen (ggf. Aufbereiten) sämtlicher Ergebnisse und Entscheidungen
- Übergabe der Methoden-/ Projektergebnisse an relevante Stakeholder
- Rückblick auf den Verlauf der Methode und Identifizieren von Verbesserungsmaßnahmen für eine erneute Anwendung („Retrospektive“ und „Best Practice“) im Kernteam
- Feedback zum Tailoring der Methode auf Unternehmensebene und Ableiten notwendiger Korrekturmaßnahmen

6 Evaluation der Methode CoSOPS

Die in Kapitel 5 entwickelte Methode zur „Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung“ (CoSOPS) wird in Kapitel 6 einer Evaluation unterzogen. Dabei ist die Abgrenzung zu einer Validierung entscheidend: Eine Validierung beschreibt die Anwendung der Methode durch den Kunden, beziehungsweise einen oder mehrere Anwender und prüft, ob die Methode dessen Bedürfnissen entspricht und diese ausreichend erfüllt. Auf Grund der Individualität des entwicklungsmethodischen Vorgehens unterschiedlicher Anwender für unterschiedliche Produkte und Branchen ist eine allgemeingültige und vollumfängliche Validierung der Methode ausgeschlossen. Es existiert auf Grund des großen Forschungsbedarfs der Inhalte und der daraus resultierenden Zukunftsgewandtheit der Thematik kein direkter Kunde als Auftraggeber oder Anwender. Eine Validierung durch einen einzelnen Anwender würde zudem das Kriterium der Offenheit der Methode, welche Assoziationen hervorrufen und bei der Strukturierung des individuellen entwicklungsmethodischen Vorgehens helfen soll, nicht erfüllen. Hinzu kommen praktische Gründe, wie der große Umfang und der geringe Nutzen bei der Begleitung einer hohen Anzahl von Entwicklungsprojekten im Rahmen der Forschungsaktivitäten mit der entwickelten Methode. Die Abgrenzung zum Vergleichswert, einer klassischen Methode, einer vollständig unstrukturierten Berücksichtigung von SOPS oder der Anwendung alternativer Vorgehensweisen ist weder messbar noch qualifiziert beschreibbar. Auf Grund des Neuheitsgrads existieren ohnehin keine Methoden mit einem vergleichbaren Ziel.

Aus diesen Gründen wird die entwickelte Methode einer Evaluation durch Experten unterzogen. Das bedeutet, dass sie von den Experten im Hinblick auf konkrete Anwendungen und Szenarien im Umfeld der befragten Experten diskutiert und punktuell untersucht wird.

Grundlage der Evaluation sind dabei sieben Experten-Interviews. Das Vorgehen der Interviews folgt dem in Abbildung 42 dargestellten Schema; weiß hinterlegt sind dabei vor- oder nachbereitende Arbeiten des Autors, grau gekennzeichnet sind mit dem Experten gemeinsam durchgeführte beziehungsweise abgestimmte Aktivitäten. Die Interviews sind als teilstrukturiert zu bezeichnen und beinhalten sämtliche Fragen des entwickelten Fragebogens, welcher vom Interviewer/Autor der Arbeit im Zweiergespräch mit dem jeweiligen Experten ausgefüllt wird. Die Dokumentation wurde dem Experten zur Prüfung erneut vorgelegt, um Fehlinterpretationen von Aussagen zu vermeiden.

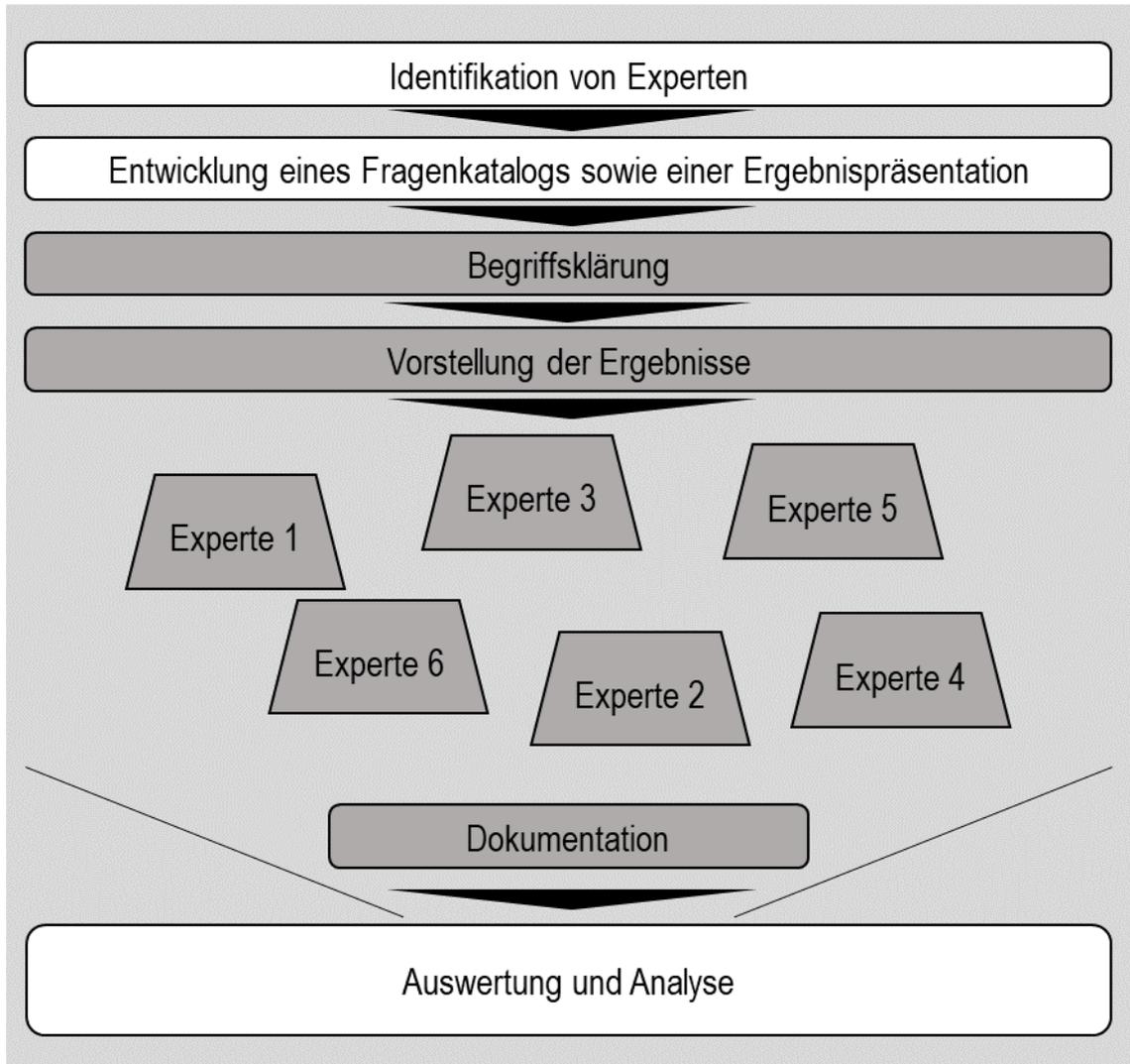


Abbildung 42: Vorgehen bei der Durchführung der Evaluationsinterviews

6.1 Vorbereitung der Evaluation

Erster Schritt in der Vorbereitung der Evaluation ist die Identifikation von geeigneten sowie verfügbaren und zugänglichen Experten. Um eine hohe Güte an Evaluationsergebnissen erhalten zu können, werden die folgenden Eigenschaften für Experten definiert, die zwingend repräsentiert sein müssen. Tabelle 19 nennt die Anforderungen die Experten.

Tabelle 19: Anforderungen an die Experten

Anforderung
Die Experten sollen über mindestens drei Jahre relevante Berufserfahrung verfügen.
Die Tätigkeit soll Bezug zur Produktion oder Produktionsplanung haben sowie Erfahrung und Wissen in der Entwicklung interdisziplinärer Systeme beinhalten, idealerweise mit strategischen Inhalten.

Maximal zwei Experten dürfen im selben Unternehmen beschäftigt sein, um starke Einflüsse zu verhindern.
Es sollen mindestens drei relevante Branchen durch die Experten repräsentiert werden.
Entscheider (mit Personalverantwortung) sowie Entwickler sollen repräsentiert sein.
Es sollen mehr als vier Experten gefunden und interviewt werden.
Ein Grundverständnis wissenschaftlicher Arbeit und der Aufbau sowie Inhalte und Umfang einer Dissertation sollen den Experten bekannt sein.

Zur Identifikation der Experten wurden insbesondere das Netzwerk des Forschungsinstituts und des Autors genutzt. Aus diesem Netzwerk wurden 13 mögliche Experten identifiziert und angesprochen. Drei Personen konnten aus zeitlichen Gründen nicht teilnehmen, drei weitere beurteilten ihr persönliches Wissen zur Thematik als nicht ausreichend oder nicht repräsentativ. Sieben Experten konnten für die Evaluation gewonnen werden.

Im zweiten Schritt der Vorbereitung der Evaluation werden die erarbeiteten Ergebnisse, die CoSOPS, in einer Ergebnispräsentation komprimiert aufbereitet. Um den Präsentationsanteil im Interview so klein wie möglich zu halten, ist diese auf etwa acht Minuten begrenzt. Die Präsentation beschränkt sich dabei auf die Methode sowie die einzelnen Phasen inklusive der Werkzeuge aus Kapitel 5. Diese wird graphisch illustriert und verbal durch den Interviewer erläutert. Dieses Vorgehen ist nur auf Grund des hohen Wissenslevels der Experten möglich und kann je nach aufkommenden Nachfragen variieren. Ein vorbereitetes Glossar, welches für Rückfragen von gegebenenfalls unklaren oder nicht bekannten Begriffen zur Verfügung steht, wird vom Interviewer auf Basis dieser Arbeit vorbereitet und bereitgehalten.

Der dritte Schritt in der Vorbereitung ist die Entwicklung des Fragebogens, welcher dem Interviewer dabei helfen soll, die Interviews strukturiert und harmonisiert durchführen zu können. Der Fragebogen ist der Leitfaden für das Gespräch und beinhaltet sowohl Fragen mit offenen Antwortmöglichkeiten, welche vom Interviewer in Stichpunkten oder als wörtliche Zitate protokolliert werden, als auch Fragen mit der Bitte um eine Einschätzung anhand der Likert Skala (Likert June 1932; Rost 2004, 42ff.). Als alternative Skalen wurden die Guttman Skala (Gordon 1977) sowie die Thurstone Skala (Thurstone 1928) in Betracht gezogen. Die Verwendung der Likert Skala soll dabei den Experten auffordern, sich stets für eine Tendenz in seiner Antwort zu entscheiden. Diese Eigenschaft der Likert Skala ist neben dem hohen Bekanntheitsgrad entscheidendes Auswahlkriterium, weil so vermieden werden kann, dass wertvolle Zeit im Interview mit dem Experten für die Erläuterung der Skala verwendet werden muss.

Der Fragebogen gliedert sich in die folgenden Abschnitte:

„**Struktur**“ Zur Übersicht über die Interviews wird jeder Durchführung eine Nummer zugeordnet (U1 bis U7). Diese identifizieren die jeweiligen Interviews. Formalien über die Aufnahme des Interviews werden berücksichtigt und dokumentiert. Es wird mit dem

Experten vereinbart, ob und in welcher Form dieser die Auswertungen schriftlich erhalten soll. Zudem wird eine Überprüfung der Rückmeldung der Experten nach Zusendung des Protokolls festgelegt. Aus rechtlichen und Datenschutzgründen werden die Experten und deren Unternehmen nicht namentlich genannt, um die Notwendigkeit einer Vereinbarung zwischen dem Unternehmen, dem Experten und dem Autor sowie der Forschungseinrichtung zu vermeiden. Die Verwendung der Interviewergebnisse ist ausschließlich für die vorliegende Arbeit von Herrn Julian Hentze gestattet. Dies wird schriftlich vereinbart. Eine Übersicht über die Merkmale der Struktur gibt Tabelle 20.

Tabelle 20: Struktur und Formalien für den Fragebogen zur Evaluation der entwickelten Methode

Struktur
Interviewnummer
Rückmeldung bezüglich Interviewprotokoll
Unternehmen (anonym)
Nennung des Unternehmens in der Arbeit/ Abstimmung des Interviewprotokolls
Wünschen Sie ein kostenfreies Exemplar der geplanten Arbeit nach Veröffentlichung?

„Unternehmen“ Die Experten nennen die Branche, die ungefähre Mitarbeiterzahl sowie das Hauptgeschäftsfeld des Unternehmens, in dem sie tätig sind. Bei großen Konzernen wird das Geschäftsfeld angegeben, in dem der Experte aktiv ist. Diese Informationen (siehe auch Tabelle 21) dienen der Absicherung ausreichender Vielseitigkeit und Variation der beteiligten Unternehmen und deren Experten (vergleiche Anforderungen).

Tabelle 21: Übersicht der abgefragten Merkmale zur Charakterisierung des Unternehmens

Unternehmen
Branche
Mitarbeiterzahl
Hauptgeschäftsfeld

„Experte“ Neben dem Unternehmen werden Informationen über den Experten dokumentiert. Das Alter (klassifiziert), die relevante Berufserfahrung und die Ausbildungsweise der Bildungsabschluss geben einen Eindruck zur Person. Auf Wunsch des Experten können jederzeit persönliche oder unpassende Fragen offengelassen werden,

beispielsweise die Nennung des Alters. Ergänzt werden Fragen zur Personalverantwortung des Experten, um einordnen zu können, ob es sich um einen Entwickler oder eine Person mit Führungs- und Entscheidungsverantwortung handelt. Die Nennung des konkreten Arbeitsbereichs des Experten gibt Aufschluss über die Perspektive. Diese Information wird zur Identifikation der differenzierten Sichtweisen, beispielsweise der Entwicklung, der Strategischen Planung und der Produktion verwendet. Die Übersicht der Charakterisierungsmerkmale des Experten ist in Tabelle 22 zusammengetragen.

Tabelle 22: Übersicht der abgefragten Merkmale zur Charakterisierung des interviewten Experten

Experte
Alter (klassifiziert)
Berufserfahrung
Ausbildung / Bildungsabschluss des Experten
Personalverantwortung (Anzahl Personen)
Wie würden Sie Ihren Arbeitsbereich kurz beschreiben?

„Berührungspunkte“ Die Abfrage dient der inhaltlichen Einordnung der Thematik für den Experten. Es wird identifiziert, ob im industriellen Alltag Schnittmengen mit SOPS, mit Entwicklungsmethodischem Vorgehen, konkret mit der VDI Richtlinie 2206 und dem V-Modell sowie Systems Engineering bestehen. Entsprechend der Berührungspunkte können Bewertungen und Aussagen des Experten analysiert und interpretiert werden. Bei geringen inhaltlichen Überschneidungen kann das Interview für den Experten in Richtung dessen relevanter Themenfelder moderiert werden. Eine Übersicht der Fragen ist in Tabelle 23 zu finden.

Tabelle 23: Berührungspunkte des Experten und seines Unternehmens mit der Thematik der Arbeit

Berührungspunkte
Kennen Sie Selbstorganisierende Produktionssysteme (SOPS) und haben oder hatten Sie damit zu tun?
Haben Sie Kenntnisse in der (interdisziplinären) Entwicklungsmethodik?
Sind Ihnen die VDI Richtlinie 2206 und das zugehörige V-Modell geläufig?
Haben oder hatten Sie Berührungspunkte mit Systems Engineering?

„**Relevanz**“ Vertieft werden diese Aussagen für SOPS sowie das V-Modell: Die beiden Grundbestandteile der Dissertation sollen von den Experten bewertet und die Relevanz der beiden Themen für die industrielle Praxis bewertet werden. Um auch Beispiele, Anwendungen und Eindrücke zu erhalten, sind die Antwortmöglichkeiten nicht durch eine Bewertungsskala eingeschränkt. Die Fragen sind Tabelle 24 zu entnehmen.

Tabelle 24: Fragen zur Relevanz der Kernbestandteile der Methode

Relevanz
Wie schätzen Sie aus Ihrer Perspektive die Relevanz von SOPS ein?
Wie schätzen Sie die Relevanz der VDI Richtlinie 2206 und des V-Modells ein?

„**Bewertung**“ Der Hauptteil des Fragebogens besteht aus der Bewertung verschiedener Thesen vor dem Hintergrund der Ergebnispräsentation zu Beginn des Interviews. Die Likert Skala in der Aufteilung „nein (--)\", „eher nein (-)\", „eher ja (+)\", „ja (++)“ soll den Experten zu einer Tendenz bewegen.

Die Reihenfolge der Fragen, wie sie im Fragenbogen und in Tabelle 25 gegeben ist, kann dabei im Verlauf der Interviews variiert werden. Dies ist dem Interviewer überlassen. Es soll der Dialog gefördert werden, anstelle einer stringenten sequenziellen Abarbeitung durch die Beantwortung von Einzelfragen.

Tabelle 25: Hauptteil des Evaluationsfragebogens zur Bewertung der Methode

Einordnung
Das V-Modell und die VDI 2206 sind eine geeignete Grundlage für die Erweiterung der Methode CoSOPS
Entwicklungsmethodische Erweiterungen der interdisziplinären Entwicklung mit dem V-Modell helfen beim Verständnis von SOPS und dessen Potenzialen
SOPS sind Forschungsarbeit, es braucht mehr Erkenntnisse für die industrielle Anwendung
Die Industrie muss selbst mehr Erfahrungen mit SOPS und vergleichbaren Technologien sammeln
Bewertung des Vorgehens und der Methodik
Optionale Assoziationen und Hilfestellungen in der Entwicklungsmethodik sind sinnvoll
Vorschriften, Meilensteine und Gates in der Entwicklungsmethodik sind hilfreich
Agile Entwicklung hat das V-Modell ersetzt, es ist veraltet

Der Entwickler wird im Allgemeinen durch theoretische Modelle und Anleitungen nicht hinreichend unterstützt
Inhalte der Methode
Die Verwendung der HML und deren Inhalte für SOPS bieten einen Mehrwert
Die Verwendung von SOPS ist eine Unternehmensentscheidung und hochrelevant für das Geschäftsmodell
Das "Digitale Abbild" und die virtuelle Absicherung sind von großer Bedeutung
Die praktische Umsetzung von wirtschaftlichen SOPS ist derzeit unrealistisch
Die zusätzlichen Kontrollfragen für SOPS im Kontrollpunkt Geschäftsmodell sind hilfreich und beabsichtigen einen gezielten Denkanstoß
Die Architekturoptionen und Potenziale helfen bei der Auslegung des Produkts zur Nutzung von SOPS
Architekturoptionen, Hauptmerkmalliste SOPS und Absicherung des Systems müssen bereits in der Planung des Geschäftsmodells/ Unternehmensstrategie berücksichtigt werden
Die Methode ist ganzheitlich und hilft bei der Entscheidungsfindung
Die Methode setzt neue Anreize und erweitert damit den Horizont
Die Methode ist für den Entwickler weniger relevant als für Entscheider/ Strategen
Die Methode berücksichtigt ausreichend granular die Einflüsse von SOPS
Die Methode dient mehr der Informationsgewinnung als der Anwendung
Die Methode ist gut in das unternehmensspezifische Entwicklungsvorgehen integrierbar
Die Entwicklung des Digitalen Abbilds und dessen Nutzung sind technisch realisierbar
Die Vorgehensbeschreibung ist schlüssig und verständlich beschrieben
Die Vorgehensbeschreibung ist anwendbar
Die Vorgehensbeschreibung liefert einen Mehrwert
Die Phase Business Check ist schlüssig und verständlich beschrieben
Die Phase Business Check ist anwendbar
Die Phase Business Check liefert einen Mehrwert
Die Phase HML Kategorie ist schlüssig und verständlich beschrieben
Die Phase HML Kategorie ist anwendbar

Die Phase HML Kategorie liefert einen Mehrwert
Die Phase Architekturoptionen ist schlüssig und verständlich beschrieben
Die Phase Architekturoptionen ist anwendbar
Die Phase Architekturoptionen liefert einen Mehrwert
Die Phase Digitales Abbild ist schlüssig und verständlich beschrieben
Die Phase Digitales Abbild ist anwendbar
Die Phase Digitales Abbild liefert einen Mehrwert
Die Absicherung ist schlüssig und verständlich beschrieben
Die Absicherung ist anwendbar
Die Absicherung liefert einen Mehrwert

„Individuelle Relevanz“ In Folge der Bewertungen wird abgefragt, wie das Unternehmen des Experten zur Einführung und Nutzung von SOPS sowie der angebotenen Unterstützung bei der Entwicklungsmethodik steht. Diese Beantwortung, wie auch eine grobe zeitliche Einschätzung zur Relevanz der Technologie im Unternehmen, wird im Freitext protokolliert. Die Experten sollen außerdem einen Eindruck vermitteln, ob und wie sie die angebotene Methode anwenden würden, beziehungsweise welche Rahmenbedingungen für eine Anwendung erfüllt sein müssen. Diese Fragen sind in Tabelle 26 zu finden.

Tabelle 26: Abfrage der individuellen Relevanz der Thematik für den Experten und dessen Unternehmen

Individuelle Relevanz
Wird Ihr Unternehmen in den nächsten 5 Jahren SOPS oder vergleichbare Produktionssysteme einsetzen?
Sind die Prozesse und Vorgehen in Ihrem Unternehmen aus Ihrer Perspektive bereits zu steif und detailliert, um die vorgegebene Methode CoSOPS zu nutzen?
Würden Sie die Methode anwenden, wenn ja, wie und in welcher Situation?

„Sonstiges, Schlusswort, Kurzfeedback“ Zum Abschluss oder wahlweise auch als Feedback auf die Zusendung des Interviewprotokolls, besteht abschließend die Möglichkeit eines Schlussworts für die Experten. Bei der Übertragung in das Ergebnisprotokoll sind

hier Namen und persönliche Ansprachen zu eliminieren und das Feedback auf die inhaltlichen und operationalen Aussagen der Experten zu reduzieren.

6.2 Durchführung der Evaluation

Die Evaluation ist im Dialog des Autors mit den Experten durchgeführt worden. Fünf Interviews wurden im persönlichen Gespräch durchgeführt, zwei in einem Video-Call („Skype“ Meeting).

Die Durchführung der Interviews folgte dabei in der Umsetzung dem geplanten Ablauf der Ergebnispräsentation mit teilweise kurzer Begriffsklärung und der Durchführung des Interviews anhand des Fragebogens.

Keiner der sieben Experten vermied die Beantwortung einer Frage, obwohl über diese Möglichkeit einleitend aufgeklärt wurde. Die dokumentierte Durchführung der Interviews ist dem Ergebnisprotokoll der Evaluation zu entnehmen. Die Befragungen fanden ohne größeren Zeitdruck statt und dauerten zwischen 46 und 85 Minuten. Die Termineinladungen hatten 60 min vorgesehen.

6.3 Auswertung der Evaluation

Die sieben Experten erwiesen sich als offene und nicht voreingenommene Diskussionspartner. Die Zusammensetzung der sieben Experten aus Branchen, Unternehmensgrößen und Tätigkeitsfeldern liefert einen guten Überblick für die Evaluation und die resultierenden Ergebnisse. Es wurden sieben verschiedene Experten aus sieben Unternehmen befragt. Der Abgleich mit den in 6.1 definierten Anforderungen an die Experten ist in Tabelle 27 dokumentiert. Die gestellten Anforderungen an die Experten werden erfüllt.

Tabelle 27: Bewertung der Anforderungen an die Experten für die Evaluation

Anforderungen an die Experten:	Bewertung
Die Experten sollen über mindestens drei Jahre relevante Berufserfahrung verfügen.	Erfüllt, bei allen interviewten Experten
Die Tätigkeit soll Bezug zur Produktion oder Produktionsplanung haben sowie Erfahrung und Wissen in der Entwicklung interdisziplinärer Systeme beinhalten, idealerweise mit strategischen Inhalten.	Erfüllt, tendenziell eher Führungskräfte in der Führung oder strategischen Begleitung von Entwicklungen.
Maximal zwei Experten dürfen im selben Unternehmen beschäftigt sein, um starke Einflüsse zu verhindern.	Erfüllt, keine Dopplung
Es sollen mindestens drei relevante Branchen durch die Experten repräsentiert werden.	erfüllt
Entscheider (mit Personalverantwortung) sowie Entwickler sollen repräsentiert sein.	erfüllt, jedoch mehr Entscheider, die vormals Entwickler

	waren, aber Entwickler in der täglichen Arbeit führen
Es sollen mehr als vier Experten gefunden und interviewt werden.	Erfüllt, insgesamt konnten sieben Experten interviewt werden.
Ein Grundverständnis wissenschaftlicher Arbeit und der Aufbau sowie Inhalte und Umfang einer Dissertation sollen den Experten bekannt sein.	Erfüllt, drei Experten sind selbst promoviert.

Die Ergebnispräsentation und die dargestellte Methode wurden von allen Experten als positiv und die Relevanz der Thematik, insbesondere mit Blick auf die Zukunft, als wichtig eingeschätzt. Dabei wurde von allen Experten angemerkt, dass die Begriffsbezeichnung SOPS zwar hier passend ist, aber von verschiedenen Forschungseinrichtungen, Unternehmen oder Förderträgern auch alternativ bezeichnet wird. Dies wurde aus industriellem Kontext aber als nicht relevant eingestuft, da der Begriff SOPS ausreichend erklärt worden war. Der Kerngedanke von SOPS wurde als hochrelevant und zukunftssträftig gesehen, da Vernetzung, Digitalisierung, Automatisierung und globale Verteilung von Produktionssystemen an Bedeutung zunehmen werden. Die Auseinandersetzung von Seiten der Forschung bringe einen erheblichen Mehrwert, da insbesondere Absolventen in Themen der Produktion – besonders Industrie 4.0 und wofür der Begriff tatsächlich repräsentativ genutzt wird – häufig beim Eintritt in ein Industrieunternehmen nicht ausreichend geschult seien.

Die Methode, bestehend aus Perspektiven und Werkzeugen, erläutert anhand von Phasen, wurde als leicht verständlich und passend zum V-Modell beschrieben. Besonders die Nutzung der Begriffsbezeichnungen des V-Modells in der Methode wurde als sinnvoll und gut erachtet. Nicht alle Fragen und Assoziationen der Methode hielten die Experten für sinnvoll und passgenau für ihre Anwendungsfälle. Es wurde angegeben, dass diese eine sinnvolle Orientierung zum individuellen Tailoring darstellen, welches obligatorischer Bestandteil sein muss. Die Benennung beziehungsweise Formulierung vieler Einflüsse sei ohnehin zu unternehmensindividuell, sodass die genannte Menge an Möglichkeiten ein gutes erstes Bild darstellt, das in der Bezeichnung leicht adaptierbar ist.

Das verwendete V-Modell wurde als zu wissenschaftlich und theoretisch, jedoch in seinen Grundzügen und Vermittlungsansätzen als absolut sinnvoll und hochrelevant bewertet. Die Ergänzung der Methode zur „Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung“ empfanden die Experten als gelungenes Beispiel und Anleitung, wie die VDI Richtlinie für individuelle Problemstellungen interpretiert, erweitert und genutzt werden kann. Kritisiert wurde eine schwierige Balance aus einer starren Vorgehensbeschreibung und dem Zeitpunkt der Anwendung von Werkzeugen, die eine generische und allgemeingültige Methode kaum leisten kann. Es wurde ergänzt, dass das mehrstufige Tailoring für die Methode sowie die beinhalteten Phasen für fast jede Methode in der Anwendung in der industriellen Praxis

durchgeführt werden muss. Diese integrierte Eigenschaft der vorliegenden Methode wurde für die Anwendung als realistisch und praxisnah eingestuft sowie die häufige Nennung der großen Relevanz des Tailorings positiv hervorgehoben.

Eine Übersicht der grundlegenden Anforderungen an die Gestaltung der Methode (Kapitel 3.5) und dessen Bewertung gibt Tabelle 28. Die Bewertung resultiert dabei aus der Aggregation der Interviews mit den sieben Experten durch den Autor.

Tabelle 28: Bewertung der grundlegenden Anforderungen an die Methode CoSOPS (siehe Anforderungen aus 3.5)

#	Anforderungen an die Methode	Bewertung
A1	Anwendbar für die Zielgruppen des Entwicklers (Parallel zur Produktentwicklung) sowie des strategischen Portfolio-managers (Vorentwicklungsprojekt) (vergleiche Anwendungsszenarien)	Erfüllt, die Methode berücksichtigt explizit beide Zielgruppen und stellt die Unterschiede zwischen den Zielen sowie den durchzuführenden Schritten zur Erreichung dar.
A2	So einfach wie möglich , so komplex wie nötig in Umfang, Stil und Menge der zur Verfügung gestellten Informationen, um eine übersichtliche Struktur zu gewährleisten	Teilweise erfüllt, starke Reduktion der Komplexität vorhanden, Einfachheit ist sehr individuell, Stil und Beschreibung sind gut verständlich beschrieben und dokumentiert
A3	Rahmenwerk zur Orientierung für den Entwickler (Anwendungsbezogene Sichtweise/Perspektive)	Teilweise erfüllt, sehr starke Anpassungen und Individualisierungen notwendig, sodass der Entwickler erst in zweiter Stufe (nach der Anpassung durch die Entwicklungsplanung/Führung) in der Umsetzung beteiligt werden könnte
A4	Sprache des Entwicklers (sowie der Richtlinie VDI 2206) sprechen, somit die Benennung von Fachbegriffen aufgreifen und verwenden.	Erfüllt, sehr nahe an Text und Methoden der VDI 2206
A5	Verwendung etablierter und bekannter Ansätze als Grundlagen für die Neuentwicklung der Methode	Erfüllt, starker Fokus auf Erweiterung von Methoden
A6	Durchgängigkeit in der interdisziplinären Produktentwicklung (entsprechend auch den Grundlagen des Simultaneous Engineering)	Teilweise erfüllt, Methode greift mit definierten Werkzeugen ein
A7	Keine Einschränkung der Innovativität oder Kreativität durch zu enge Vorgaben,	Größtenteils erfüllt, Assoziationen als Basis, keine Regeln und Vorgaben, sondern eine Methode zur Orientierung und

	sondern assoziative Anreize zur Verfügung stellen	zur Anpassung einer individuellen Anwendung. Eine Fehlinterpretation der Vorgaben und Beispiele kann bei mangelndem Methodenwissen zu Einschränkungen führen.
A8	Eindeutig und passgenaue Struktur in Bezug auf die Richtlinie VDI 2206	Erfüllt, passend für den Stand des neuen V-Modells sowie der Richtlinieninhalte
A9	Anschauliches und verständliches (Denk-)Modell mit Wiedererkennungswert	Teilweise erfüllt, einfache Grafik als Wiedererkennung, ohne Textbausteine und Werkzeuge ist die Methode aber nicht verständlich
A10	Im Kern sequenzielle Methodendarstellung zur leichten Verständlichkeit mit frühzeitiger Erkennung und Möglichkeit der Durchführung von Abbruchkriterien	Erfüllt, Empfehlungen und Hinweise zum Abbruch oder zur Weiterberücksichtigung sind in der Vorgehensbeschreibung hinterlegt
A11	Interpretation wissenschaftlicher Erkenntnisse über den Stand der Technik hinaus in Bezug auf Vor- und Nachteile von SOPS sowie in der Anwendung von Methoden.	Erfüllt, die Analyse (insbesondere Kapitel 4) nimmt bestehende Veröffentlichungen sowie Erkenntnisse auf und überführt diese systematisch zunächst in Einflussgruppen sowie in der Folge in die Methode CoSOPS.
A12	Branchen- und produktübergreifendes Vorgehen (im Rahmen der interdisziplinären Entwicklung technischer Produkte)	Erfüllt, es liegt weder in den verwendeten Beispielen noch in der Beschreibung eine Fokussierung auf Produkte oder Branchen vor
A13	Fokussierung auf die Fähigkeit der Selbstorganisation und nicht auf existierende Systeme oder bestehende Lösungen zur Wahrung der allgemeinen Gültigkeit	Erfüllt, es werden keine existierenden Lösungen individueller Anbieter in Betracht gezogen
A14	Beeinflussung der Gestaltung durch Eingriff in die linke Seite des V-Modells	Erfüllt, die Methode hat zwar einen ganzheitlichen Blick auf verschiedene Abschnitte des Lebenszyklus, beeinflusst aber aktiv durch allokierte Werkzeuge auf der linken Seite des V-Modells
A15	Flexibilität in der individuellen Anwendung und Auslegung der Methode und ihrer Bestandteile	Erfüllt, die Betonung der Flexibilität im Vorgehen, in der Gestaltung der Werkzeuge

		zeuge sowie der Abfolge von Arbeitsschritten ist vielfach erwähnt und durch das Tailoring methodisch verankert.
--	--	---

Die Perspektiven und Werkzeuge in der Anwendung in Phasen der entwickelten Methode sind unterschiedlich bewertet worden: Die Anwendung des Business Check und der HML Kategorie wurden als sehr sinnvoll und gut durchführbar angesehen. Die Architekturoptionen stehen nach Meinung der Experten sehr eng mit der HML Kategorie in Verbindung und liefern daher im Verhältnis zur HML Kategorie einen geringeren Mehrwert. Außerdem seien die Erfahrungen mit SOPS in der Praxis für Gestaltungsregeln noch zu gering, sodass die Betonung als Optionen noch einmal bestärkt wurde. Das Tailoring und die Ergänzung weiterer Optionen halten einige Experten auf Grund des genannten mangelnden Wissensstandes nur mit Hilfe von externen Fachberatern für eine leistbare Aufgabe. Das Digitale Abbild wird als äußerst relevant und in enger Verbindung mit Forschungsthemen wie dem „Digitalen Zwilling“ und MBSE gesehen. Die Denkweise, ein Digitales Abbild zu schaffen und dies strukturiert zu tun, überzeugt die Experten dabei insbesondere vor dem Hintergrund integrierter Datenmodelle (wie beispielsweise MBSE oder Cloudlösungen). Gleichzeitig wird vor der Struktur, die dem Anwender in der Methode angeboten wird, gewarnt: Eine allgemeingültige Klassifizierung oder Strukturierung zu erreichen, wird kaum möglich sein. Als erläuterndes Beispiel wurden die Unterschiede von Maschinensteuerungen genannt, die von Seiten der Hersteller (z. B. Siemens oder Schneider Electric) starke Vorgaben für die Gestaltung einiger Ausprägungen eines Digitalen Abbilds vorgeben. Die Perspektive der Absicherung wird zwar als relevant und wichtig angesehen, jedoch häufig als „selbstverständlich“ oder „obligatorisch“ beschrieben, da die Inhalte für jegliche Auslegung eines technischen und besonders eines interdisziplinären Systems gelten. Die Integration der inhaltlichen Absicherung sowie der Absicherung vor einem wirtschaftlichen Hintergrund in einem Meilenstein Projekt wird sehr positiv bewertet. Diese Struktur ist im industriellen Umfeld bereits etabliert und nahezu alternativlos.

Neben der Evaluation anhand der durchgeführten Interviews wird in Tabelle 29 ein Abgleich mit den Inhalten und Ergebnissen der Einflussgruppen aus Kapitel 4.4 durchgeführt sowie der Schwerpunkt genannt, in welchem das Ergebnis der Einflussgruppen erfüllt wird. Dieser Abgleich geschieht analog zur Bewertung der grundlegenden Anforderungen an die Methode CoSOPS in Tabelle 28. Die Bewertung der Repräsentanz der analysierten Inhalte wird dabei subjektiv vom Autor dieser Arbeit durchgeführt. Der Abgleich wurde im Rahmen der Entwicklung der Methode vielfach iterativ durchgeführt (siehe Kapitel 5.1) und die Inhalte der Methode mit den Einflussgruppen abgeglichen. Die beschriebene Iteration garantiert, dass keine Ergebnisse der Analyse in der Methodenentwicklung vernachlässigt worden sind.

Tabelle 29: Bewertung der zusammengefassten Ergebnisse der Einflussgruppen

#	Ergebnisse der Einflussgruppen	Bewertung (Schwerpunkte)
E1.1	Geschäftsmodelle sollen hinsichtlich Seriengröße und Lebenszyklusphase analysiert werden.	Erfüllt (Phase 3)
E1.2	Der strategische Einsatz von Prototypen, Mustern und Kleinserien ist vor Entwicklungsbeginn zu prüfen.	Erfüllt (Phase 3 und Phase 5)
E1.3	Die Auslagerung von (Teilen) der Produktion muss als strategische Vorgabe in Betracht gezogen werden.	Erfüllt (Phase 3)
E1.4	Die Möglichkeit, ausschließlich die Entwicklung durchzuführen und die Produktion auszulagern, muss bewertet werden.	Erfüllt (Phase 3)
E1.5	Subsystems oder Elemente können bereits frühzeitig strategisch anders betrachtet werden als übrige (z. B. auf Grund der Logistik, des Transports oder Nähe zum Absatzmarkt).	Erfüllt (Phase 3 und Phase 5)
E1.6	Stakeholder der Wertschöpfungskette sollen einbeziehen und auf Schnittstellen vorbereitet werden.	Erfüllt, Phase 1
E1.7	Die lebenszyklusgerechte Planung (Berücksichtigung späterer Phasen in der Strategie sowie im Geschäftsmodell) ist Teil der Analyse	Erfüllt, Phase 1, Phase 3, Phase 4 und Phase 6
E1.8	Der gezielte Einsatz von neuer Technologie (Digitales Abbild, VR/AR, Simulation etc.) wird geprüft.	Erfüllt, Phase 4 und Phase 6
E2.1	Die strukturierte Orientierung anhand von Merkmalen für die Identifikation SOPS-spezifischer Anforderungen (HML für SOPS) ist Bestandteil der Methode, beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> • Granularität / Anzahl der Systemelemente • Variantenanzahl und individualisierte Systemelemente 	Erfüllt, Phase 4
E2.2	Anforderungen an die dezentrale Integration, Test und Inbetriebnahme des Systems sind zu bewerten.	Erfüllt, Phase 4 und Phase 6
E2.3	Die (virtuelle) Eigenschaftsabsicherung des SOPS sowie des Produkts (Verifikation und Validierung) durch das Digitale Abbild ist in erster Abschätzung realistisch.	Erfüllt, Phase 4 und Phase 6
E2.4	Es werden Anforderungen an den Zeitpunkt der Entscheidung für oder gegen die Nutzung eines SOPS vorgegeben (insbesondere aus wirtschaftlicher Perspektive)	Erfüllt, Abbruchkriterien, Phase 2

E2.5	Die veränderte Definition von Anforderungen und deren Absicherung bei rein digitalen Absicherungsmethoden wird in der Anforderungserhebung berücksichtigt.	Erfüllt, Phase 4 und Phase 6
E3.1	Die strukturierte Orientierung für alternative Systemarchitekturen für SOPS wird durch die Vorgaben von SOPS Architekturoptionen unterstützt.	Erfüllt, Phase 5
E3.2	Die Gestaltung einer Architekturalternative mit SOPS für die mögliche Berücksichtigung wird durchgeführt.	Erfüllt, Phase 5 und Phase 3
E3.3	Bei bestehenden SOPS ist die Gestaltung der Architektur an bestehende Bedingungen angepasst.	Erfüllt, Phase 5
E3.4	Die Schnittstellen für eine dezentrale ggf. externe Montage entsprechen Standards oder sind ausreichend spezifiziert.	Erfüllt, Phase 5
E3.5	Die Fokussierung auf die Entwicklung des Systems oder von Ersatzteilen/ Verschleißteilen, bestimmt durch das Geschäftsmodell, werden in der Auslegung berücksichtigt.	Erfüllt, Phase 5, Phase 3 und Phase 1
E3.6	Die Festlegungen für COTS, externe Zulieferung von Subsystemen und Elementen sowie deren Anbindung an mögliches SOPS Produktions- und Montagesystem sind spezifiziert und validiert.	Erfüllt, Phase 5
E4.1	Der Einfluss der Qualität des Digitalen Abbilds für die physische Realisierung ist beherrschbar.	Erfüllt, Phase 6
E4.2	Die Variation im Fertigungsprozess von gleichen Teilen (z. B. additiv oder subtraktiv) ist im Digitalen Abbild implementiert.	Erfüllt, Phase 6
E4.3	Die finale Integration und damit Qualitätssicherung bei dezentraler Montage liegen nicht in eigener Hand und Kompetenz. Das Risiko ist evaluiert und akzeptiert.	Erfüllt, Phase 6 und Phase 4
E4.4	Der Einkauf von Rohmaterialien, Werkzeugen etc. ist ausschließlich abhängig von einer ausreichenden Spezifikation im Digitalen Abbild.	Teilweise erfüllt, Phase 6 (Indirekter Hinweis über die Spezifikation der Materialien)
E4.5	Der Betrieb paralleler Verfahren und Anlagen für einen äquivalenten Fertigungsschritt ist qualitativ im Digitalen Abbild betrachtet.	Erfüllt, Phase 6, Phase 4, Phase 5
E4.6	Die Qualität des Systemelements ist unabhängig vom Ablauf der Fertigungsorganisation und dessen Verfahren gegeben.	Teilweise erfüllt, Phase 6 (Produktbezogen repräsentiert, Qualität kann

		weitergefasst werden (z. B. Prozessqualität)
E5.1	Das Digitale Abbild als Grundlage der Nutzung von SOPS ist realisierbar.	Erfüllt, Phase 2 und Phase 6
E5.2	Die Simulation von Rahmenbedingungen und Einflüssen kann das reale Testen des SOPS oder dessen Bestandteilen ersetzen.	Erfüllt, Phase 6, Phase 4, Phase 3
E5.3	Die Möglichkeit der Absicherung durch Prototypen/ Muster bei existierendem SOPS wird adressiert.	Erfüllt, Phase 3 und Phase 5 (vergleiche E1.2)
E5.4	Die Virtualisierung der Absicherung sowie die Virtualisierung der Vorgabe für die mögliche externe Integration und Inbetriebnahme erfüllt die qualitativen Rahmenbedingungen.	Teilweise erfüllt, Phase 4 und Phase 6, siehe auch E4.6)
E5.5	Der Verlust des Kundenkontakts durch die Übergabe bei dezentraler Montage hat keine nachhaltigen Auswirkungen auf das Unternehmen.	Teilweise erfüllt, Phase 1 und Phase 3 (insbesondere bei Projektbezogener Anwendung der Methode ist dies kaum abbildbar)

6.4 Diskussion der Evaluationsergebnisse

Die Qualität und die Passgenauigkeit der Experten entsprechen den getroffenen Vorgaben für die Interviews. Die von den Experten getroffenen Aussagen sind zwar stets subjektiv, durch die weitgehend homogene Bewertung und Vergleichbarkeit der Aussagen jedoch als repräsentativ anzusehen. Die angebotene Methode CoSOPS stößt bei den Experten auf insgesamt sehr hohen Zuspruch. Dieser zeigt, obwohl die Arbeit zwar auf im Kern rein wissenschaftlichen Erkenntnissen beruht, dass trotzdem in der Ausprägung der Methode CoSOPS eine anwendungsnahe und verständliche Form und Beschreibung erarbeitet wurde.

Die Offenheit gegenüber der vorgeschlagenen, in Teilen auf Assoziationen beruhenden Werkzeuge der Methode im Vergleich zu engen Regeln, Vorgaben und Überprüfungen, ist als überraschend zu bewerten. Die Einführung und Nutzung von SOPS in der Anwendung ist von den Experten als evolutionärer Prozess gekennzeichnet worden. Dies zeigt, dass die theoretische Betrachtung in der Arbeit dem Stand der Technik in der industriellen Anwendung voraus ist und zukünftige Produktionskonzepte und -anwendungen vorbereitet. Diese frühzeitige Auseinandersetzung mit der Thematik SOPS wurde durchweg als sehr positiv bewertet, obwohl die Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit nicht in eine industrielle Anwendung überführt werden konnten.

Der hohe Kenntnisstand der Experten über die Entwicklungsmethodik und insbesondere über das V-Modell zeigt, dass das Wissen in der industriellen Anwendung beziehungsweise in der Ausbildung von Fach- und Führungskräften von großer Bedeutung ist. Dies kann festgestellt werden, obwohl die Vorgehensweisen und Modelle von den Experten als Leitfaden oder als grobe Orientierung bezeichnet wurden. Die Anpassung der individuellen Anwendung sei häufig weit von den Inhalten einer Richtlinie oder eines Modells entfernt, weshalb beispielsweise auch die Überarbeitung der Richtlinie VDI 2206 als begrüßenswert erachtet wurde.

Alle Experten sehen autonome, vernetzte und global verteilte Produktionssysteme als zukünftige Produktionseigenschaften. Ebenso sahen sie sehr weitreichende Potenziale durch additive Fertigungsverfahren beispielsweise im Ersatzteilmanagement, Wartungsbetrieb oder bei der Anfertigung kundenindividueller Merkmalsausprägungen.

Resümierend erreicht die erarbeitete Methode CoSOPS hohe Zustimmung in der Evaluation. Der angewendete Realismus und Pragmatismus in der Offenheit der Gestaltung der Methode wird explizit begrüßt. Die Experten bestätigten den Neuheitsgrad der Methode durch die gelungene Integration aus SOPS und Entwicklungsmethodik mit dem V-Modell. Die Anwendung der Methode wird vor dem jetzigen Stand der Technik in der Industrie im Kern im strategischen Bereich eingeordnet, der konkrete Produktbezug sei jedoch in jedem Fall möglich. Insgesamt wird die Arbeit als wichtige Informationsquelle zum Umgang mit Produktionssystemen, insbesondere mit SOPS, in der interdisziplinären Produktentwicklung begrüßt und verstanden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Selbstorganisierende Produktionssysteme sind ein bedeutender Bestandteil der Megatrends Digitalisierung und Automation von Produktionsprozessen. Selbstorganisation ist dabei eine mehr und mehr genutzte Eigenschaft, da sowohl die Produkte als auch die Prozesse in der Produktion immer komplexer werden. Die Kombination von einer Vielzahl an komplexen Einflüssen und Parametern, kann nicht mehr durch die Koordination eines Menschen überblickt werden. Die Integration innovativer Produktionssysteme ist daher sowohl im wirtschaftlichen als auch im wissenschaftlichen Umfeld von großer Bedeutung.

Die vorliegende Arbeit stellt eine Methode zur Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung (Co-SOPS) zu Verfügung. Basierend auf der wissenschaftlichen Vorgehensweise der DRM wurde die Methode erarbeitet und evaluiert.

Erstmalig wird in der vorliegenden Arbeit eine angepasste Anwendung der neuen VDI Richtlinie 2206 für einen spezifizierten Anwendungsfall entwickelt. Der Fokus auf Selbstorganisierende Produktionssysteme und deren Berücksichtigung in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung wird, dem neuen V-Modell der Richtlinie folgend, in einer integrierten Methode erarbeitet. Unter der Anwendung von Eigen- und Weiterentwicklungen von Werkzeugen wird dem Anwender eine klar strukturierte aber dennoch für den individuellen Anwendungsfall anpassbare Methode zur Verfügung gestellt. Die Ausarbeitung liefert dem Anwender einerseits die anwendbare Methode Co-SOPS, andererseits eine strukturierte Informationsquelle. Die Methode CoSOPS ist für die Untersuchung eines konkreten Produkts oder dessen Systemelemente parallel der Produktentwicklung nutzbar. Auch in einem vorgelagerten Vorentwicklungsprojekt für die Gestaltung der strategischen Planung und damit der Unternehmensstrategie ist der Einsatz alternativ vorgesehen. Anhand der durchlaufenen Phasen wird die Entscheidung des Anwenders zur Nutzung eines SOPS systematisch erarbeitet.

Die Aufbereitung des Stands der Wissenschaft sowie die Herausarbeitung der Motivation und Zielsetzung mit dem Resultat einer Forschungsfrage bilden das Fundament der Arbeit. Durch Abgrenzung des vorliegenden Vorhabens von bestehenden wissenschaftlichen Arbeiten wurde die Forschungsfrage präzisiert und der Anwendungs- und Relevanzbereich präzise abgesteckt. Das Ziel der Arbeit wurde dabei als eine Methode definiert, die das entwicklungsmethodische Vorgehen mit Hilfe des neuen V-Modells der VDI Richtlinie 2206 im Hinblick auf die Berücksichtigung durch Selbstorganisierende Produktionssysteme (SOPS) abbildet. Dafür wurden notwendige Begriffe definiert. Das entwicklungsmethodische Vorgehen auf der linken Seite des V-Modells wurde als Kern der Arbeit identifiziert, da dieses die Gestaltung des Systems beschreibt. Dabei wurden aber

auch die Einflüsse der rechten, integrierenden und absichernden Seite des V-Modells und die Einflüsse des Holistischen Produktlebenszyklus nicht vernachlässigt.

Aus der Identifikation von Vor- und Nachteilen, welche SOPS in der Anwendung mit sich bringen, wurden Auswirkungen der SOPS für die interdisziplinäre Produktentwicklung abgeleitet. Diese wurden methodisch priorisiert und in Relevanzgruppen eingeteilt. Die Zuordnung und Relevanzbewertung wurden mit den Abschnitten des entwicklungsmethodischen Vorgehens und dem technischen Produktlebenszyklus abgeglichen. Identifiziert und ausgearbeitet wurden relevante Angriffspunkte, an denen die SOPS besonderen Einfluss und damit große Relevanz für das entwicklungsmethodische Vorgehen haben. Durch die Einteilung in Einflussgruppen wurden diese Ergebnisse als Grundlage für die folgende Methodenentwicklung strukturiert. Die Methodenentwicklung wurde anhand der Ergebnisse der Einflussgruppen sowie den grundlegenden Anforderungen an die Methode durchgeführt.

Das Ergebnis ist dabei eine Methode, bestehend aus den zwei Perspektiven, der Vorgehensbeschreibung und der Absicherung, welche bereits in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses den Fortschritt in der Gestaltung des Systems begleitet (linke Seite des V-Modells).

Unter der zwingenden Vorgabe des individuellen Tailorings in der Anwendung bietet die Methode zudem vier Werkzeuge an, die Schwerpunkte zu Beginn der Entwicklung (Business Check), in der Erhebung der Anforderungen des Systems (HML Kategorie) und in der Gestaltung der Systemarchitektur (Architekturoptionen) aufweisen. Außerdem wurde im Digitalen Abbild ein Rahmenmodell gegeben, welche Daten, Informationen und Prozesse bei der Realisierung eines Digitalen Abbilds des Produkts zur Produktion in einem SOPS notwendig sind. Dabei basieren die Inhalte der Werkzeuge und deren Anwendbarkeit auf den Prinzipien der Assoziation und Anleitung zu individuellen Ergebnissen. Die definierten Fragen und Inhalte bilden ein Rahmenwerk für die individuelle Anpassung und Durchführung der Methode CoSOPS.

Abschließend wurde die Methode einer Evaluation unterzogen. Dazu wurden sieben Experten interviewt, welche die Perspektiven, die Werkzeuge und dessen Umsetzung in der Erläuterung und Beschreibung bewertet und ihre individuelle Einschätzung aus der praktischen Anwendung gegeben haben. Die Analyse und Beschreibung von SOPS in der interdisziplinären Entwicklung sowie die Ausarbeitung der Methode wird dabei als sinnvoll und anwendbar bewertet, obwohl der Aufwand und die Anpassungen an die individuellen Rahmenbedingungen aus Sicht der Experten Hindernisse darstellen können. Die Evaluation zeigt, dass sich aus der Arbeit großer Forschungs- und Weiterentwicklungsbedarf ableitet. Die Arbeit kann als Grundlage für das Verständnis der interdisziplinären Produktentwicklung und der Arbeit mit SOPS verwendet werden und liefert neue Aspekte und Vorgehensweisen für die Berücksichtigung in der Anwendung.

7.2 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit legt durch wissenschaftliche Grundlagenarbeit eine wichtige Basis für den Einsatz Selbstorganisierender Produktionssysteme und damit für die Weiterentwicklung und Modernisierung der Produktion. Die systematische Aufbereitung von wissenschaftlichen Erkenntnissen über Selbstorganisierende Produktionssysteme in Kombination mit dem etablierten und kürzlich aktualisierten entwicklungsmethodischen Vorgehen mit dem V-Modell ist nicht nur für Anwender in der industriellen Praxis eine elementare Entscheidungsunterstützung und Informationsquelle, sondern auch grundlegend für die wissenschaftliche Weiterentwicklung effektiver und effizienter Produktionsumgebungen. Industrielle Anwender können anhand der Methode systematisch einzelne Produkte oder die Unternehmensstrategie hinsichtlich der Relevanz Selbstorganisierender Produktionssysteme bewerten. Für die Wissenschaft liefert die Arbeit eindeutige Definitionen und einen Werkzeugkasten in der Methode CoSOPS, der für verschiedene vergleichbare Anwendungen angereichert und erweitert werden kann.

Die Berücksichtigung der Selbstorganisierenden Produktionssysteme im interdisziplinären Produktentwicklungsprozess fördert die Anwendung innovativer Lösungen für Produktionssysteme und legt deren Potenziale offen: Das gewonnene Wissen wird die Gestaltung und Implementierung beschleunigen. Dazu trägt schon die Tatsache bei, dass Entwicklern und Strategen die Möglichkeit gegeben wird, Selbstorganisierende Produktionssysteme in frühen Phasen der Produktentwicklung systematisch in Betracht zu ziehen.

Auf Grund der Abstraktionen in der Methode, in der Ausführung und Anwendung der Werkzeuge, liefert das Verfahren einen Mehrwert auch abseits der Selbstorganisierenden Produktionssysteme: Das Vorgehen und die Werkzeuge können durch Ergänzung von Assoziationsmerkmalen für alternative Produktionsorganisationsformen oder Technologien adaptiert werden. Diese sind sowohl wissenschaftlich auszuprägen und zu beschreiben als auch im industriellen Kontext zu evaluieren.

Diese Allgemeingültigkeit kann aus Sicht industrieller Anwender kritisch interpretiert werden: Da es sich um eine wissenschaftliche Arbeit handelt, wäre die Anwendung für eine individuelle Ausprägung nicht zielführend und würde nicht den hier erreichten Neuheitsgrad darstellen. Der Neuheitsgrad, welcher in der Bereitstellung der entwickelten Methode CoSOPS sowohl für die strategische Einbeziehung von SOPS, als auch für die konkrete Untersuchung eines Produkts in der Produktentwicklung liegt, wurde in der Evaluation von den befragten Experten bestätigt.

Zur Anwendung der Methode ist ein großer kapazitiver Aufwand notwendig, um den einen Aspekt, die SOPS, in der Entwicklung zu berücksichtigen. Dabei ist die Methode eine Vorgehensunterstützung und ersetzt nicht die inhaltliche individuelle Arbeit bei der Auswahl oder der Gestaltung des Produktionssystems. Die Methode liefert jedoch eine systematische Unterstützung sowie Lösungsansätze und Assoziationen für die Berücksichtigung von SOPS in der Produktentwicklung.

Durch die mögliche Loslösung der Produktion von der Entwicklung repräsentiert die Methode Trends, welche die Aufwände verstärkt in die frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses, der Produktentwicklung und der strategischen Planung verschieben (Frontloading). Digitalisierte und virtualisierte Arbeitsschritte in der Produktentwicklung nehmen mehr und mehr an Bedeutung zu. Die Abschätzung der tatsächlichen Repräsentanz sowie der Ergebnisgenauigkeit in digitalisierte Form gebrachten Produkt- und Prozesseigenschaften ist dabei qualitativ kaum abschätzbar.

Um die Methode in die industrielle Anwendung zu überführen und für unterschiedliche Anwendungsfälle weiterzuentwickeln, ist die Bekanntmachung und Verbreitung von großer Bedeutung. Neben wissenschaftlichen und branchenspezifischen Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, sind Transfer- und Verbundprojekte geeignete Mittel zur Verbreitung. Eine große gegebenenfalls sogar vernetzte Anwendergruppe aus Wissenschaft und Industrie trägt neben der weiteren Verbreitung zudem dazu bei, die Methode CoSOPS auf aktuellem Stand zu halten und für spezifische Ausprägungen weiterzuentwickeln.

Die Technologie der Selbstorganisierenden Produktionssysteme und deren Einfluss auf das entwicklungsmethodische Vorgehen wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Die Veränderung der benötigten Kompetenzen von Produktionsmitarbeitern, die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung von Prozessen und Anlagen und die Möglichkeiten der technischen Realisierbarkeit hochkomplexer Systeme sind wichtige Anhaltspunkte für den Wandel in der Produktion. In der Umsetzung dieser Produktionssysteme kann diese Arbeit einen wissenschaftlich fundierten Baustein hinzufügen, welcher den Planungs- und Entwicklungsprozess mit dem Forschungsstand der Produktionssysteme integriert.

8 Abkürzungsverzeichnis

AM	Additive Manufacturing/ Additive Fertigung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Bspw.	beispielsweise
Bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aide Design
CapEx	Investitionsausgaben /-kosten
CoSOPS	„Methode zur Berücksichtigung Selbstorganisierender Produktionssysteme in frühen Phasen der interdisziplinären Produktentwicklung“ Consideration of Self-Organizing Production Systems (SOPS) in early phases of interdisciplinary product development
COTS	Components of the shelf
CPS	cyber-physisches System
CPPS	cyber-physisches Produktionssystem
CPD	cyber-physisches Device (Systemelement)
CTS	cybertronisches System
DfX	Design for X
DfSOPS	Kategorie der Hauptmerkmalliste HML: Design for Self-organizing Production Systems
Etc.	et cetera – und die übrigen [Dinge]
FA	Fachausschuss
GMA	Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (des VDI)
HML	Hauptmerkmalliste (für mechatronische und Cyber-Physische Systeme)
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IoT	Internet der Dinge und Dienste/ Internet of Things
iPeM	Integrierten Produktentstehungsmodell
ITS	Intelligente Technische Systeme
IV&V	Integration, Verifikation und Validierung
MES	Manufacturing Execution System
MBSE	Model-Based Systems Engineering

MVM	Münchener Vorgehensmodell der Produktentwicklung
OEM	Originalausrüstungshersteller von englisch Original Equipment Manufacturer
OpEx	Betriebskosten
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition System
SE	Systems Engineering
SysML	System Modeling Language
SoI	System of Interest
SOPS	Selbstorganisierendes Produktionssystem
RE	Requirements Engineering
RoI	Return on Invest
UML	Unified Modeling Language
V&V	Verifikation und Validierung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
WKZ	Werkzeug
z. B.	zum Beispiel

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Handlungsfeld Produktentstehung (Gräßler 2015a, 2015b).....	1
Abbildung 2: Einflüsse Selbstorganisierender Produktionssysteme (SOPS) (unter Verwendung von (Gräßler 2015a, 2015b; VDI 2206:2004))	4
Abbildung 3: Design for Self-Organizing Production Systems (SOPS) als spezifische Ausprägung des Konzepts des „Design for X“	5
Abbildung 4: Design Research Methodology (DRM) Framework (Blessing, Lucienne T. M. und Chakrabarti 2009).....	6
Abbildung 5: Vereinfachter Lösungsweg auf Basis der DRM, eigene Darstellung angelehnt an (Meyer-Schwickerath 2015).....	7
Abbildung 6: Simultaneous und Concurrent Engineering nach (Vajna 2014, S. 351)...	10
Abbildung 7: Zeitliche und inhaltliche Perspektive auf den generischen Lebenszyklus (basiert auf Walden et al. 2015).	12
Abbildung 8: Holistischer Produktlebenszyklus für die Richtlinie VDI 2000 (verwendet in (Gräßler et al. 2018a; VDI 2206:2020)).....	13
Abbildung 9: V-Modell der Richtlinie VDI 2206 in Erstauflage im Jahr 2004 (VDI 2206:2004).....	14
Abbildung 10: Vorgehen bei der Überarbeitung der VDI Richtlinie 2206 und des V-Modells: vgl. (Gräßler und Hentze 2020)	15
Abbildung 11: Das überarbeitete V-Modell für die Richtlinie VDI 2206 für die Neuauflage (Gräßler et al. 2018a; Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)	16
Abbildung 12: Kernaktivitäten des V-Modells (Gräßler 2018).....	17
Abbildung 13:Ausschnitt der Hauptmerkmaliste der neuen Richtlinie VDI 2006 (VDI 2206:2020)	19
Abbildung 14: Die sechs Kontrollpunkte des V-Modells (Gräßler et al. 2018a; Gräßler et al. 2018b; Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020).....	22
Abbildung 15: System of Interest, Subsysteme, (System-)Elemente und Beziehungen (Eigene Darstellung ähnlich zu (van Bertalanffy 2003; Walden et al. 2015, 7-8) .	26
Abbildung 16: Tailoring als zweistufiger Anpassungsprozess (in Anlehnung an (Walden et al. 2015, 162ff.))	27
Abbildung 17: Selbstorganisierende Produktionssysteme als vereinfachte Input-Prozess-Output (IPO)-Darstellung	29
Abbildung 18: Zukunftsperspektiven der Produktion: Innovationen für die digitale Produktion (Westkämper et al. 2013, S. 311)	30

Abbildung 19: Vom einfachen mechatronischen System zum cyber-physischen System (Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020).....	31
Abbildung 20: Eco-System eines cyber-physischen Systems (Gräßler und Hentze 2020; VDI 2206:2020)	32
Abbildung 21: Die Automatisierungspyramide und die Transformation zur „Smart Factory“ (in Anlehnung an (BMW/BMBF 2019; Reinhart 2017; Roth 2016)	33
Abbildung 22: Sequenzielle Verwendung des V-Modells (basiert auf (VDI 2206:2020))	40
Abbildung 23: Schwerpunkte in der Berücksichtigung des entwicklungsmethodischen Vorgehens im V-Modell (Gräßler et al. 2018a; Gräßler und Hentze 2020)	43
Abbildung 24: Übersicht der Einflussgruppen im Ursache-Wirkungs-Diagramm nach Ishikawa.....	61
Abbildung 25: Ablaufmodell der Methodenentwicklung.....	70
Abbildung 26: Zwei Perspektiven und vier Werkzeuge der Methode CoSOPS im V-Modell (basierend auf (Gräßler et al. 2018a; Gräßler und Hentze 2020))	73
Abbildung 27: Modell der Methode CoSOPS.....	75
Abbildung 28: Phasen-Meilensteinmodell der Methode CoSOPS.....	78
Abbildung 29: Phase 1: Ausgangssituation – Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen zur Orientierung	81
Abbildung 30: Phase 2: Methodentailoring – Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen zur Orientierung	84
Abbildung 31: Phase 3: Business Check – Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen zur Orientierung	85
Abbildung 32: Kontrollpunkt 1, der Business Check: Erweiterung für Methode CoSOPS.....	87
Abbildung 33: Phase 4: HML Kategorie – Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen zur Orientierung	89
Abbildung 34: Phase 5: Architekturoptionen – Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen zur Orientierung	92
Abbildung 35: Portfolio aus der Abschätzung der Gesamtkomplexität (technisch, organisatorisch etc.) und der Anzahl der Elemente des Gesamtsystems.....	94
Abbildung 36: Phase 6: Digitales Abbild – Arbeitsschritte, Anweisungen und Leitfragen zur Orientierung	98
Abbildung 37: Die vier elementaren Bestandteile des Digitalen Abbilds.....	99

Abbildung 38: Merkmale zur Assoziation im Umfeld des Kernelements Produkt.....	100
Abbildung 39: Merkmale zur Assoziation im Umfeld des Kernelements Prozess	101
Abbildung 40: Merkmale zur Assoziation im Umfeld des Kernelements Simulation .	102
Abbildung 41: Merkmale zur Assoziation im Umfeld des Kernelements Kommunikation und Dokumentation	103
Abbildung 42: Vorgehen bei der Durchführung der Evaluationsinterviews	106
Abbildung 43: Originalabbildung Vorgehen bei der Überarbeitung der VDI Richtlinie 2206 und des V-Modells aus (Gräßler und Hentze 2020)	137
Abbildung 44: Definition des Digitalen Zwillings in Abhängigkeit von Produkt (unten) und Produktinstanz (oben) sowie Digitalem Master bzw. Prototyp und Digitalem Schatten (WIGEP 2020)	148
Abbildung 45: Digitaler Zwilling zur Umsetzung einer vorausschauenden Instandhaltungsstrategie mit den adressierten Lebenszyklusphasen Produktion, Nutzung und Service ((Kaul et al. 2019) basierend auf (Boschert und Rosen 2016) und (Walden et al. 2015)).....	150

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wesentliche Leitlinien des Simultaneous Engineering (Gräßler 1999; Gräßler 2000, S. 20)	10
Tabelle 2: Abgrenzungsmatrix der vorliegenden Arbeit	36
Tabelle 3: Grundlegende Anforderungen an die Gestaltung und Ausarbeitung der Methode CoSOPS.....	44
Tabelle 4: Übersicht der literaturbasierten Vor- und Nachteile bei der Verwendung Selbstorganisierender Produktionssysteme	46
Tabelle 5: Paarweiser Vergleich der Auswirkungen (Ausschnitt 1 bis 19, 1-44 im Anhang)	54
Tabelle 6: Priorisierte und in Gruppen (A(dunkelblau), B(hellblau), C(grau)) unterteilte Auswirkungen (vollständige Liste im Anhang)	55
Tabelle 7: Zuordnung der priorisierten Auswirkungen auf detaillierte Betrachtungsbereiche (mit Faktor)	58
Tabelle 8: Ergebnisse EG1	63
Tabelle 9: Ergebnisse EG2	64
Tabelle 10: Ergebnisse EG3	65
Tabelle 11: Ergebnisse EG4	67
Tabelle 12: Ergebnisse EG5	68
Tabelle 13: Drei Blickwinkel der CoSOPS Absicherung.....	76
Tabelle 14: Mindestbestandteile der Meilensteine für die Anwendung der Methode....	79
Tabelle 15: Anforderungen an einen Methodensteckbrief	82
Tabelle 16: Erweiterung der Hauptmerkmaliste (HML) zur Berücksichtigung von SOPS in der Anforderungserhebung interdisziplinärer Produktentwicklung	90
Tabelle 17: SOPS Schwerpunktsetzung in der Architektur von Systemen, Subsystemen oder Systemelementen.....	93
Tabelle 18: SOPS Architekturoptionen	95
Tabelle 19: Anforderungen an die Experten.....	106
Tabelle 20: Struktur und Formalien für den Fragebogen zur Evaluation der entwickelten Methode	108
Tabelle 21: Übersicht der abgefragten Merkmale zur Charakterisierung des Unternehmens.....	108
Tabelle 22: Übersicht der abgefragten Merkmale zur Charakterisierung des interviewten Experten.....	109

Tabelle 23: Berührungspunkte des Experten und seines Unternehmens mit der Thematik der Arbeit	109
Tabelle 24: Fragen zur Relevanz der Kernbestandteile der Methode	110
Tabelle 25: Hauptteil des Evaluationsfragebogens zur Bewertung der Methode	110
Tabelle 26: Abfrage der individuellen Relevanz der Thematik für den Experten und dessen Unternehmen.....	112
Tabelle 27: Bewertung der Anforderungen an die Experten für die Evaluation	113
Tabelle 28: Bewertung der grundlegenden Anforderungen an die Methode CoSOPS (siehe Anforderungen aus 3.5)	115
Tabelle 29: Bewertung der zusammengefassten Ergebnisse der Einflussgruppen.....	118

Anhang

10.1 Liste der betreuten Abschlussarbeiten

#	Nummer Lehrstuhl	Nachname	Vorname	Titel der Arbeit
1	BA_001	Rohde	Daniel	Analyse und Bewertung der Integrationsmöglichkeit einer Connectivity-Lösung zur Auswertung von Fahrzeugsensordaten in eine bestehende Fahrzeuginfrastruktur
2	BA_004	Oleff	Christian	Vergleich und Analyse von Systems Engineering-Methodiken und Identifikation von Anwendungspotenzialen für ein Kleinunternehmen
3	BA_006	Meng	Yuan	Analyse, Vergleich und Bewertung von Innovations- und Entwicklungssystematiken
4	MA_014	Meyer-Wilmes	Vincent	"Potenzialermittlung zur Effizienzsteigerung in der Antriebstechnik- und Hydraulikentwicklung"
5	BA_016	Müller	Maximilian	Methodische Anforderungserhebung im Wandel des Produktentstehungsprozesses im Labor für flexible Industrieautomatisierung
6	SA_017	Arens	Fabian	Szenario-basierte Veränderungsmöglichkeiten von Anforderungen
7	BA_022	Razor	Rik	Bewertung agiler Methoden im Produktentwicklungsprozess
8	SA_024	Michael	Dingfelder	Darstellung eines optimalen WLTP-Konfigurators in Hinblick auf physikalische Abweichungen, Komplexität im Unternehmen und Einführungszeitpunkt unter Berücksichtigung gesetzlicher Rahmenbedingungen
9	MA_027	Büttemeyer	Jana	Fachdisziplinübergreifende Entwicklung eines automatisierten Werkzeugwechselsystems und Konstruktion der dazugehörigen Werkzeugaufnahme
10	BA_028	Voss	Rebecca Alina	Analyse, Bewertung und konstruktive Optimierung der Antriebseinheiten von Süßwaren-Produktions- und Verpackungsanlagen
11	MA_033	Stemmer	Clemens	Analyse des Anfrageprozesses im Rahmen der HDO Durchgoss und Oberflächentechnik GmbH mit Fokus auf die Marktbedürfnisse zur Ableitung eines Strategischen Produktionsmanagements
12	MA_034	Hegemann	Maximilian	Konzeptentwicklung für eine angepasste Meilensteincheckliste an die speziellen Anforderungen des Produktbereiches Hytronic der CLAAS Industrietechnik GmbH

13	MA_037	Gul	Alexander	Modellierung in der Produktentwicklung - Systemtypenabhängiger Einsatz von Modellierungsmethoden
14	SA_044	Oleff	Christian	Erarbeitung eines Referenzmodells für die Identifikation und Klassifizierung von Zusammenhängen zwischen Anforderungen
15	SA_046	Bertels	Bastian	Herleitung und Erstellung eines flexiblen Netzwerks zur Darstellung von Anforderungen sowie dessen Beziehungen und Eigenschaften
16	MA_048	Tusek	Daniel	Aufbau einer Referenzproduktstruktur am Beispiel eines mittelständischen Anlagenbauers im Zuge einer Standardisierungsstrategie
17	BA_054	Pankratz	Patrick	Optimierung der Auftragsabwicklungs- und Entwicklungsprozesse von mechatronischen Systemen in einem Unternehmen des Sondermaschinenbaus
18	SA_057	Walde	Andre	Vergleich von Methoden zur Einführung eines modularen Baukastensystems
19	MA_068	Oleff	Christian	Zielsystem zur Bestimmung geeigneter Innovationsgrade bei Produktentwicklungsprojekten
20	BA_069	Wiling	Fabian	Definition des Anforderungsprofils eines Systems Engineers für die universitäre Lehre
21	MA_082	Walde	Andre	Veränderungen des Entwicklungsprozesses durch selbstorganisierte Produktionssysteme
22	MA_085	Bertels	Bastian	Anforderungsmanagement im Electrical Engineering - Prozessorientiertes Konzept auf Basis automobiler Standards
23	MA_087	Preuß	Daniel	Entwicklung eines Werkzeugs zur automatisierten Detektion von Anforderungsabhängigkeiten
24	SA_091	Wiling	Fabian	Requirements Thinking - Erarbeitung der technischen Aspekte des System Thinkings und Ableitung von Potenzialen für das Anforderungsmanagement
25	MA_092	Brink-schröder	Marius	Analyse und Entwicklung eines Anwendungskonzepts des Digitalen Zwillings für die Produktentwicklung
26	MA_111	Engel	Maren	Konzipierung und Realisierung eines zentralen KVP-Office im Unternehmen CLAAS Industrietechnik
27	MA_158	Florian	Clemens	Geschäftsmodelle im Kontext dezentraler und selbstorganisierter Produktionsorganisation
28	SA_161	Dalecki	Markus	Analyse von Auswirkungen selbstorganisierender Produktionssysteme auf die Produktentwicklung sowie die folgenden HPLZ-Phasen

10.2 Originalabbildung Vorgehen bei der Überarbeitung der VDI Richtlinie 2206 und des V-Modells

Literaturangaben zur Abbildung 10 der Seite 15:

- [1] (Gräßler 2015b), (Gräßler und Hentze 2015), (Hentze et al. 2017), (Gräßler und Hentze 2017), (Gräßler 2017), (Gräßler 2018)
- [2] (Gräßler und Hentze 2015), (Gräßler et al. 2018b)
- [3] (Gräßler et al. 2018c), (Gräßler et al. 2019)
- [4] (Gräßler und Hentze 2015), (Gräßler et al. 2016c),
- [5] (Gräßler 2017), (Gräßler et al. 2018b), (Gräßler 2018)

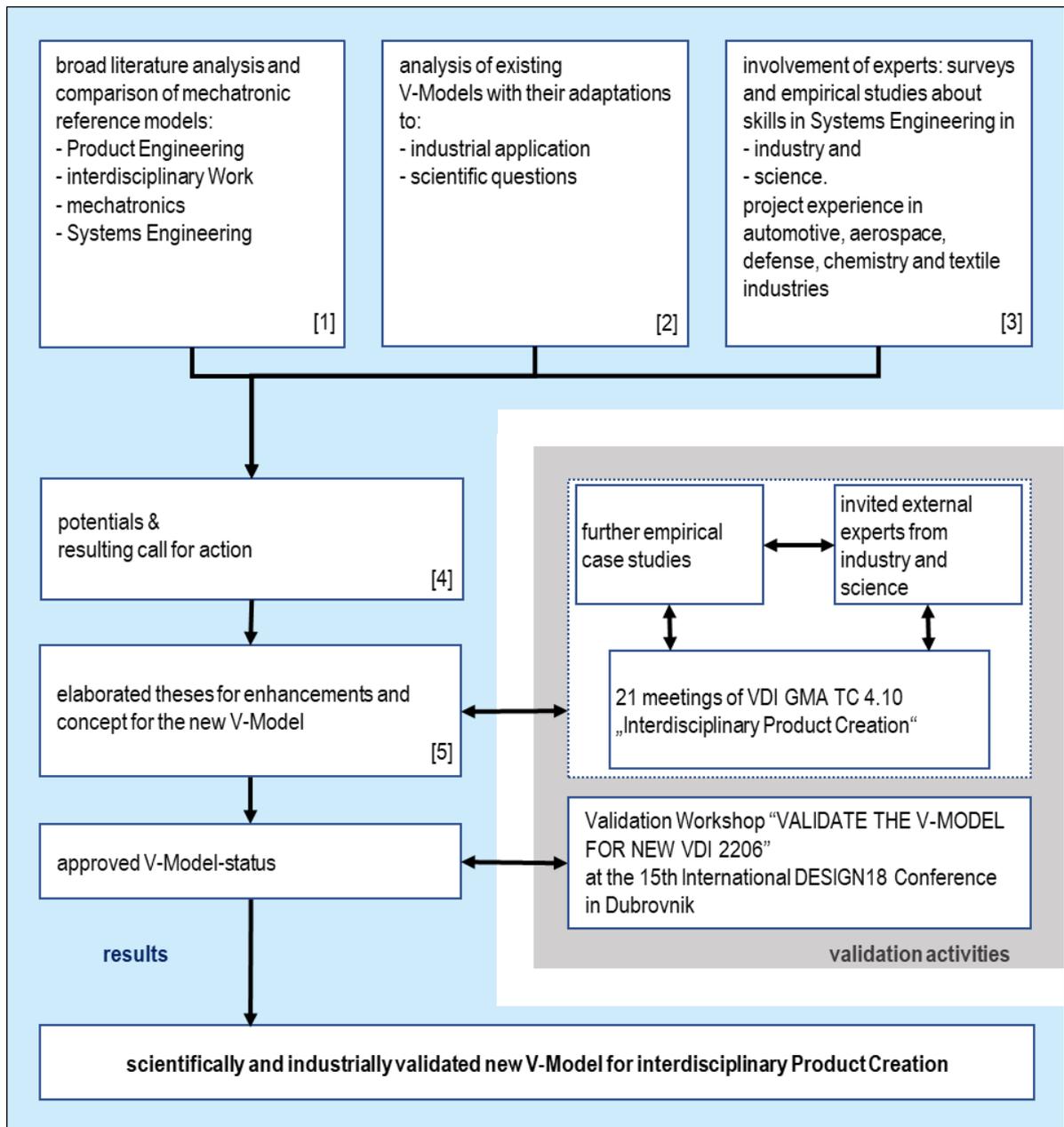


Abbildung 43: Originalabbildung Vorgehen bei der Überarbeitung der VDI Richtlinie 2206 und des V-Modells aus (Gräßler und Hentze 2020)

10.3 Hauptmerkmalliste nach der Richtlinie VDI 2206

Die „Hauptmerkmalliste für mechatronische und cyber-physische und Systeme“ ist Bestandteil der VDI Richtlinie VDI 2206 [Beschlussfassung für den Weissdruck: (VDI 2206:2021) beziehungsweise Gründruck: (VDI 2206:2020)]

10.4 Vollständige Liste der Auswirkungen in Folge des Paarweisen Vergleichs

#	Auswirkung	normiert auf 100
17	Schnittstellendefinitionen in der Systemarchitektur	92,05
42	Lebenszyklusgerechte Entwicklung	92,05
15	Numerische Aufweitung der Systemarchitektur	85,23
34	Einschätzung, Beschreibung und Spezifikation möglicher Produktionsszenarien und/oder Qualitätsstandards	85,23
6	Geringe Fehlertoleranz für die Vorgaben an die Produktion	82,95
26	Eine definierte Schnittstelle als Übergabe erforderlich	82,95
36	Inputdaten verschiedener möglicher Verfahren im Digitalen Abbild	81,82
10	Verlagerungen in simulative und virtuelle Umgebungen	80,68
12	Integraler Bestandteil der Geschäftsstrategie des Unternehmens	80,68
11	Iterationen des Digitalen Abbildes in der Übergabe	76,14
38	individuelles Digitales Abbild	76,14
5	Qualitätssicherung und Überprüfung der Passfähigkeit des Digitalen Abbildes für das SOPS in der Entwicklung	73,86
43	Vorausschau der Aktivitäten der Lebenszyklusphasen	73,86
16	Fokus auf vereinfachte Systemelemente	69,32
35	Flexible Möglichkeiten der Auswahl von Produktionsverfahren	69,32
18	Mehraufwand für die Systemintegration	67,05
7	Zunehmendes Frontloading	54,55
27	Loslösung der Entwicklung von der Produktion	54,55
8	Verstärkter Anteil der Wertschöpfung in der Entwicklung	53,41
9	Erschwertes „Prototyping“	50,00
13	Mehrwert bei großer Individualität der Produkte	50,00
37	Bemusterung oder Prototyping für Elemente möglich	50,00
4	Integration weiterer Disziplinen beispielsweise Software und Rechtswissenschaften	46,59
1	Kompetenzverlagerung in die Entwicklung	44,32
30	Entwicklungsstandorte an Orten mit hoher Verfügbarkeit von Kompetenzen	44,32
14	Fokussierung auf Standard Produktionsverfahren	43,18
29	System oder Systemelementproduktion in unmittelbarer Nähe des Absatzmarktes	43,18
28	Globale Aufspaltung von Entwicklung und Produktion	42,05
39	Produktion kundenindividuelle Elemente	36,36
24	SOPS als Dienstleistungsangebot	34,09
41	Abbildung des Mitarbeiters als Digitales Modell	29,55
2	Hochvernetzte und digitalisierte Prozesse im Umfeld des SOPS	26,14

22	<i>Grundaufgabe der Arbeitsvorbereitung entfällt</i>	22,73
31	<i>Integrationsfähigkeit des SOPS in die Wertschöpfungskette</i>	21,59
19	<i>Individuelle Analyse des SOPS Standorts notwendig</i>	20,45
25	<i>Weitergabe von Produktionskapazitäten an externe</i>	17,05
32	<i>Zusätzliche Akquisition von Produktionsleistungen durch SOPS</i>	17,05
44	<i>Zeit und Status von vorgegebenen Aufgaben kontrollierbar</i>	17,05
23	<i>Bereitstellung von Infrastruktur</i>	15,91
21	<i>Intelligente Adaptivität des Systems stellt ein Risiko dar</i>	14,77
3	<i>Notwendigkeit großer und individuelle Lagerflächen</i>	12,50
20	<i>Optimierung der SOPS Produktionsorganisation basiert auf dem Verhältnis von Input zu Output</i>	9,09
33	<i>Automatisierte Mehrzieloptimierung</i>	9,09
40	<i>Reaktionsfähigkeit auf individuelle Ergebnisse oder Eingaben des Mitarbeiters ist beschränkt</i>	1,14

10.7 Analyse der Auswirkungen von SOPS auf das entwicklungs-methodische Vorgehen (Fortsetzung Kapitel 4.1)

10.7.1 Analyse auf Basis von Nachteilen (Fortsetzung Kapitel 4.1.1)

N6: Fokussierung auf geringe Fertigungstiefe

SOPS sind am effektivsten und effizientesten, wenn mit (bestehenden) Maschinen und Anlagen eine große Anzahl an verschiedenen Produkten oder Produktvarianten gefertigt werden kann. Je individueller und integrierter die Fertigungsverfahren sind, desto weniger lohnt sich in der Regel die Integration in ein SOPS. Dies führt insbesondere im Zusammenhang mit der Einstellung komplexer Fertigungsverfahren und dessen Digitalem Abbild dazu, dass eine geringere Fertigungstiefe für die Nutzung eines SOPS empfohlen werden kann. Der Einsatz von gängigen Fertigungsverfahren liegt damit im Fokus der Umsetzung (Hirsch-Kreinsen 1998, S. 21).

Die *Fokussierung auf Standard Produktionsverfahren* im SOPS verspricht den wirtschaftlich größten Mehrwert. Standardverfahren sind je nach Branche unterschiedlich. Resultierend aus dieser Annahme kann davon ausgegangen werden, dass es einfacher ist, eine große Anzahl an Systemelementen mit geringer Fertigungstiefe zu produzieren, als ein funktional oder räumlich hochintegriertes Systemelement, für welches eine Vielzahl an Bearbeitungsschritten und Produktionsverfahren notwendig sind. Infolgedessen kommt es zu einer *numerischen Aufweitung der Systemarchitektur* (mehr Elemente, mehr Schnittstellen) und dem *Fokus auf vereinfachte Systemelemente*, welche nicht durch komplexe Geometrien und Fertigungsverfahren oder, Funktionsintegrationen gekennzeichnet sind. Der Bedarf an *Schnittstellendefinitionen in der Systemarchitektur* und der *Aufwand der Systemintegration* durch die erhöhte Anzahl der Systemelemente für die Erreichung des Gesamtsystems steigt. Die Integration von Softwareelementen ist an dieser Stelle zu vernachlässigen, da diese zwar entwicklungsmethodisch hochrelevant, aber in der Einbringung in das Produkt nur physisch und prozessual vorgesehen werden muss. Gemeint ist damit beispielsweise das Aufspielen einer komplexen Software aus einer Vielzahl an Elementen auf ein System, wie es u.a. beim Automobil am Ende der Produktion physischer Elemente geschieht.

N7: Akzeptanzprobleme

Die Akzeptanz der Mitarbeiter, Entscheidungen von einem Algorithmus anstatt von einem Vorgesetzten zu erhalten, ist eine psychologische sowie gesellschaftliche Herausforderung (Hirsch-Kreinsen 2014, S. 427; Spath et al. 2013, S. 99). Besonders der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) oder hoher Komplexität, wenn die Entscheidungen des SOPS nicht nachvollzogen werden können, senken die Bereitschaft, die erhaltenen Anweisungen umzusetzen und führen zur Unzufriedenheit, Frustration und sogar zu Blockaden der Mitarbeiter (BMI 2019). Hier ist ein rechtzeitiges Einbinden der Mitarbeiter und das Leisten von Überzeugungsarbeit vonnöten.

Die globalen Unterschiede in der Akzeptanz von maschinell getroffenen Entscheidungen und im Umgang mit Persönlichkeitsdaten fordern eine *individuelle Betrachtung des SOPS Standorts* mit den lokalen Gegebenheiten. Unter diesem Gesichtspunkt kann auch die zuvor analysierte Situation der Geheimhaltung und des Datenschutzes impliziert werden (siehe N2).

N8: Fehlinterpretation von Situationen

Auf Grund ihrer Programmierung und Auslegung können SOPS Situationen, Informationen und Daten fehlinterpretieren (Bendel 2015; Hirsch-Kreinsen 2014, S. 423). Das SOPS muss beispielsweise eine Grenze ziehen, wann das Digitale Abbild als unvollständig angesehen wird und wann die Produktion trotzdem durchgeführt werden kann. Da der Übergang fließend oder nicht eindeutig quantifizierbar sein kann, ist die Fehlinterpretation ein realistisches Szenario.

Das Risikomanagement und die in N7 beschriebene Akzeptanz der Entscheidungen werden entsprechend dem IPO Diagramm nicht von Personen kontrolliert und überwacht. Die *Optimierung der SOPS Produktionsorganisation basiert im Kern auf dem Verhältnis von Input zu Output*. Als ausführende Instanz kann das SOPS Daten, Korrekturen und Informationen fehlinterpretieren und die Entscheidung, die beispielsweise mit einer Korrektur an einer Anlage getroffen werden sollte, überstimmen. Die *intelligente Adaptivität des Systems ist gleichzeitig ein Risiko*, da nicht bekannt sein muss, welche Daten das SOPS zusätzlich als Input zur Verfügung hat. Beispiele sind die nicht nachvollziehbaren Entscheidungen (vergleiche N7) oder logische Zusammenhänge, die temporär durch besondere Ereignisse oder Situationen außer Kraft gesetzt werden und für ein SOPS schwierig erfassbar sind. Dies sind politische, gesundheitliche, naturgegebene Situationen oder gesellschaftliche Einflüsse, welche die Wertschöpfungskette kurz- oder langfristig beeinflussen oder sogar zum Erliegen bringen können.

N9: Wegfall/ Verschiebung von Arbeitsplätzen

Mit der selbstorganisierenden Produktionsorganisation fällt der Funktionsbereich der Arbeitsvorbereitung bei ideeller Umsetzung vollständig weg. Die Disposition von Produktionsaufträgen wird an das SOPS verlagert. Durch den hohen Automatisierungsgrad der Produktionsorganisation sinkt zudem der Anteil von Mitarbeitern in der Produktion und der zugehörigen Logistik (Hülsmann und Windt 2007). Dies führt zu einer Verschiebung der Arbeitsplätze, für welche ein höheres kognitives Niveau erforderlich sind, da für die Programmierung und Optimierung sowie für die Spezifikation des Digitalen Abbildes im Vergleich ein höheres Ausbildungsniveau und zusätzliche Kompetenzen erforderlich sind (Hirsch-Kreinsen 2014, S. 423). Äquivalent gilt dies für die Kompetenzen beim Hersteller eines SOPS oder nur einer einzelnen Maschine. Diese müssen den automatisierten Prozessen, digitalen Umgebungen und vernetzten Integrationen auf dem Shopfloor entsprechen. Dies wird beispielsweise durch Anforderungen an Maschinen, Anlagen und Produktionssysteme vom OEM an den Hersteller herangetragen.

Auf Basis der notwendigen Kompetenzanpassungen und Verschiebungen der Tätigkeit in die Entwicklung *entfällt die Grundaufgabe der Arbeitsvorbereitung*, die Produktionsorganisation (Gräßler et al. 2017). Die technische Wartung, Einrichtung von Maschinen und Anlagen sowie die *Bereitstellung von Infrastruktur* von Werkzeugen, Vorrichtungen etc. sind für ein SOPS weiterhin von großer Bedeutung. Dieser Wandel ist bei höherem Digitalisierungs- und Automatisierungsgrad – wie bei einem SOPS – noch stärker ausgeprägt als bereits in den aktuellen Megatrends wie unter anderem beim „Synthetic media“ beschrieben (EY 2020).

N10: Komplexität des Systems

Das SOPS aus Hardware und Software stellt ein komplexes technisches System dar. Der gesamte Lebenszyklus (vergleiche Kapitel 2.2) für ein SOPS ist von großer Komplexität geprägt: Dies beginnt bei der Strategischen Planung, ob und wie ein solches System mit den Prognosen und Szenarien des Geschäfts der kommenden Produkte einen wirtschaftlichen Nutzen verspricht. Nicht minder komplex ist die interdisziplinäre Entwicklung und Realisierung des SOPS unter Berücksichtigung der multiplen und volatilen Informationen und Randbedingungen aus dem Produktionssystem, dem Produktlebenszyklus und dem Anwendungsumfeld. Hinzu kommen der Betrieb und die Wartung, die sich bei der hohen Komplexität ebenfalls von konventionellen Produktionssystemen differenzieren. Allein der End-of-Life Abschnitt des Lebenszyklusmodells kann derzeit als vergleichbar mit konventionellen Produktionssystemen angesehen werden, da die Differenzierung der Hardware weniger ausgeprägt ist als die der Software.

Ein gutes Aufwand-zu-Nutzen Verhältnis in der Erstellung eines SOPS ist für ein einziges Produkt in der Regel nicht erreichbar (vergleiche N5). Um das wirtschaftlich und technisch anspruchsvolle System dauerhaft zu betreiben, ist eine hohe Auslastung notwendig. Um diese erreichen zu können, rücken veränderte Geschäftsmodelle in den Vordergrund, welche abseits des Eigentums von Produktionsanlagen des OEMs auf Dienstleister zurückgreifen. Dies führt zu der Überlegung, auch *SOPS als Dienstleistung* anzubieten und im Auftrag verschiedener Unternehmen Systemelemente für verschiedene Systeme zu produzieren. Außerdem ist eine *Weitergabe von Produktionskapazitäten an Externe* denkbar, die mit Unterstützung von Produktionsmarktplätzen global angeboten werden können (Winkelhake 2017, 122ff.). Kritisch ist dabei der Verlust von Kernkompetenzen und Alleinstellungsmerkmalen des OEM in der Produktion, der mit einbezogen werden muss.

10.7.2 Analyse auf Basis von Vorteilen (Fortsetzung Kapitel 4.1.2)

V6: Flexibilität und Auslastung

SOPS können unabhängig von der Variantenanzahl der beauftragten Produkte fertigen: Das bedeutet, dass für die Produktionsorganisation die Anzahl der Varianten grundsätzlich irrelevant ist und dass es daher optimal für die Fertigung individualisierter Produkte

eingesetzt werden kann. Die ohnehin zu spezifizierenden individuellen Merkmale sind im Digitalen Abbild repräsentiert. Verschiedene Varianten können aus dem Abbild in Form von Instanzen abgeleitet werden. Somit sind die Produkte für den Kunden konfigurierbar, wie es auch aus der Automobilindustrie bekannt ist. Durch Unabhängigkeit des Systems von der Anzahl der zu fertigenden Produkte können im SOPS differenzierte Produkte zur gleichen Zeit gefertigt werden, es findet kein Umbau einer gesamten Fertigungslinie statt. Dies hilft dabei, eine optimale Auslastung des Systems zu erreichen und Standzeiten von Maschinen und Anlagen zu reduzieren (Bussmann und Schild 2000). Die Lieferfähigkeit und Versorgung mit Materialien müssen neben der Spezifikation der individuellen Merkmale gegeben sein.

Jedes individualisierte Produkt benötigt ein *individuelles Digitales Abbild* bzw. eine individuelle Instanz dessen. Das SOPS verarbeitet das Digitale Abbild oder dessen Instanzen als Aufträge und kombiniert aus den Aufträgen die optimale Produktionsorganisation. SOPS sind zur *Produktion kundenindividueller Elemente* oder Systeme – wie sie von Gräßler (Gräßler 2004) beschrieben wurden – geeignet und bieten insbesondere für Systeme mit hohem Individualisierungsgrad große Potenziale in der Anwendung.

V7: Entlastung der Fertigungsplanung bei hoher Komplexität

Die vollständige Berücksichtigung multipler Einflüsse der Produktion ist vom Menschen in der Produktion komplexer technischer Systeme nicht handhabbar, da es beim Einströmen großer Informationsmengen zu kognitiver Überforderung kommt (Kersten et al. 2014, S. 293). SOPS versprechen durch die Repräsentanz einer beliebigen Anzahl an Einflüssen durch echtzeitfähige Verarbeitungsleistungen eine verbesserte Berücksichtigung sämtlicher interner und externer Einflussfaktoren (Decker 1999).

Die Algorithmik des SOPS kann eine große Anzahl an Informationen zusammentragen und verarbeiten. Die Reaktionsfähigkeit und die Anzahl der berücksichtigten Einflüsse kann im Vergleich zum Menschen um ein Vielfaches erhöht werden. Anweisungen, die das SOPS an involvierte Mitarbeiter gibt, können je nach Anwender vorab definiert und in ihrer Usability (vergleiche Gebrauchstauglichkeit (DIN ISO 9241)) angepasst werden. Die Individualisierung der Information durch einen Menschen entfällt. Die *Reaktionsfähigkeit auf individuelle Ergebnisse oder Antworten des Mitarbeiters ist jedoch beschränkt*, da das System nur bekannte oder gelernte Antworten geben kann. *Nichtdokumentiertes Erfahrungswissen von Mitarbeitern kann hier leicht verloren gehen*. Kommunikation wird durch ein automatisiertes Vorgehen durch auf die Anwendung angepasste Schnittstellen nur unidirektional ermöglicht. Potenzial bieten hier Lösungen mit künstlicher Intelligenz, welche vom Stand der Technik aber nicht mit Erfahrungswissen langjähriger Mitarbeiter vergleichbar sind.

V8: Arbeitsergonomie an der Schnittstelle von Menschen und Maschine

Arbeitszeiten, Pausen und die Variabilität der Tätigkeiten können in der Planung durch ein SOPS berücksichtigt werden. Die Flexibilität für den Mitarbeiter und folgend die Ergonomie können damit gesteigert werden. Die Kommunikation des Systems mit dem Mitarbeiter kann dabei zu einer sowohl individuelleren als auch effektiveren Planung und letztendlich Produktion führen. Beispiele dafür sind App-basierte Abmeldungen bei Krankheit, Abmeldung zur Pausenzeit oder individuelle Arbeitszeitmodelle nach Wunsch des Mitarbeiters oder zur Bewältigung von Kapazitätsspitzen (Decker 1999, 82f.; Hirsch-Kreinsen 2014, S. 424; Spath et al. 2013).

Durch ein Datenmodell des Mitarbeiters (Digitalen Zwilling des Mitarbeiters im Produktionssystem (Gräßler und Pöhler 2017b, 2019)) können *individuellere Planungen zugunsten des Mitarbeiters* durchgeführt werden. Grundlage ist eine Beschreibung eines *Digitalen Modells des Mitarbeiters* sowie die Verfügbarkeit einer Schnittstelle (z. B. per App). Bei der Durchführung spielen, wie in den Nachteilen bereits beschrieben, die regionale Rechtslage und die Offenheit der Mitarbeiter zur Datentransparenz eine entscheidende Rolle. Die Kopplung solcher flexiblen Arbeitsmodelle mit gezielter Entlohnung der Mitarbeiter kann ein Anreiz für Arbeitgeber und die Arbeitnehmerseite sein (siehe auch V10).

V9: Ganzheitliche Planung über die gesamte Wertschöpfungskette

Zulieferer, Logistik und Kunden können dem SOPS Informationen zur Verfügung stellen, welche als Entscheidungsunterstützung bei der Organisation der Produktionsprozesse berücksichtigt werden. Je größer die Verfügbarkeit von Daten aus dem Umfeld und den Fertigungsprozessen auf dem Shopfloor, desto präziser kann die Produktion organisiert werden; vorausgesetzt ist die hinreichende Fähigkeit der Datenverarbeitung und korrekten Abbildung sowie die Spezifikation der realistischen Prozesse durch die SOPS-Algorithmik (Westkämper et al. 2013, S. 12; Spath et al. 2013).

Die im Systems Engineering als Grundvoraussetzung beschriebene *Lebenszyklusgerechte Entwicklung* sowie das Life-Cycle-Management sind wichtige und entscheidende Grundlagen bei der Entwicklung (Hentze und Gräßler 2015; Walden et al. 2015) des Produkts sowie des Digitalen Abbilds für die Produktion im SOPS. Die *Vorausschau der Lebenszyklusphasen* und deren Aktivitäten und Randbedingungen gewinnen an Bedeutung (Gräßler et al. 2016a), um das Frontloading mit ausreichend Input aus zukünftigen Produktlebenszyklusphasen anzureichern.

V10: Kontrolle und Verhaltenssteuerung von Anlagen und Mitarbeitern

Durch die Vernetzung des SOPS mit Maschinen, Anlagen und Arbeitsplätzen wird eine exakte Erfassung der Arbeitsleistung gewährleistet. Damit kann individuell geplant und die Disponierung von Aufträgen an die Leistungsfähigkeit angepasst werden (Botthof und Hartmann 2015, S. 48). Rückschlüsse auf eine leistungsgerechte Vergütung von Mitar-

beitern oder auch auf Maschinen und Anlagen, welche vergleichbar des Pay-per-use Geschäftsmodells eingesetzt werden, sind möglich (Dr. Wieselhuber & Partner GmbH und Fraunhofer IPA März 2015, 35f.).

Das SOPS kann im Vergleich zur erarbeiteten Qualität und exakten Ausführung der Arbeitsanweisungen **die Zeit und die Abarbeitung von vorgegebenen Schritten nachvollziehen**, welche von einem Mitarbeiter oder einer Maschine über Kommunikationsschnittstellen an das System zurückgemeldet werden. Das SOPS integriert damit die Fähigkeiten und Systeme der Automatisierungspyramide (siehe Kapitel 2.4): So sind beispielsweise SCADA und MES Systeme im SOPS obligatorischer Kernbestandteil und verfügen über die Fähigkeiten der Datenerfassung (BDE/MDE), Auswertung und Visualisierung. Wie in Kapitel 2.3ff. beschrieben, kann das SOPS die klassische Automatisierungspyramide auflösen und die Funktionalitäten der beschriebenen Beispielsysteme SCADA und MES in alternativen Ausprägungen berücksichtigen.

10.8 Integration von Verlässlichkeitsmodellen der Entwicklung in einen Digitalen Zwilling zur Umsetzung einer vorausschauenden Instandhaltung (Kaul et al. 2019)

10.8.1 WiGeP Definition des Digitalen Zwillings

Das Positionspapier der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) gilt als Referenz in der Definition und Beschreibung des Digitalen Zwillings. Die 2020 erschienene Veröffentlichung liefert neben der textuellen die in Abbildung 45 dargestellte Grafik als Definition. Das Literaturverzeichnis dieser Arbeit führt das Positionspapier unter (WIGEP 2020) und stellt die Onlineresource zur Verfügung.

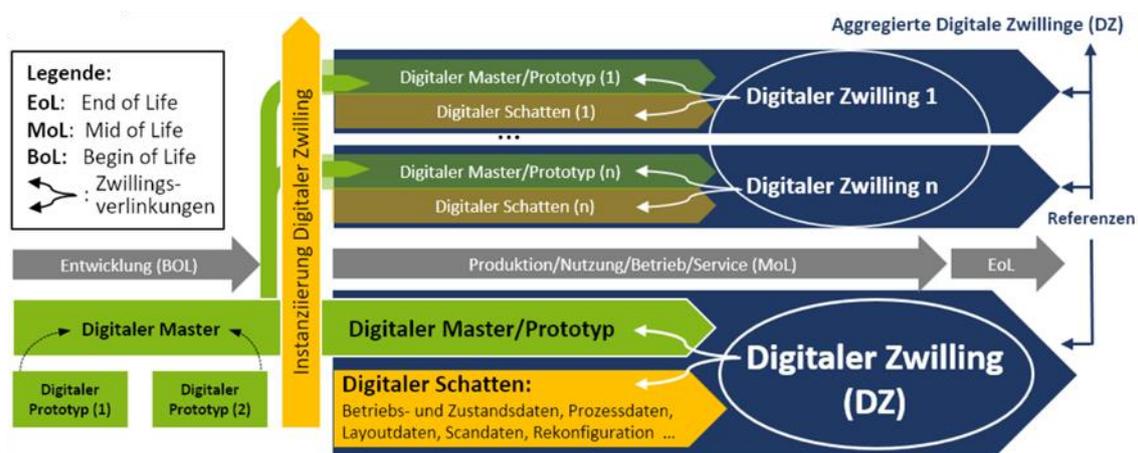


Abbildung 44: Definition des Digitalen Zwillings in Abhängigkeit von Produkt (unten) und Produktinstanz (oben) sowie Digitalem Master bzw. Prototyp und Digitalem Schatten (WIGEP 2020)

10.8.2 Begriff und Definition des Digitalen Zwillings (aus (Kaul et al. 2019))

Bei einem Digitalen Zwilling handelt es sich um eine vollständige, digitale Repräsentanz eines Systems, Produkts, Objekts oder Prozesses aus der realen Welt in Form von Software. Diese kann sowohl physikalische Objekte als auch datenbasierte Dienste beschreiben und beinhaltet sämtliche für den Anwendungsfall relevanten Informationen und Funktionen. Über definierte Schnittstellen ist das Produkt mit dem Digitalen Zwilling verbunden (Boschert und Rosen 2016; Kuhn 2017; Stuecka 2017)

Der Digitale Zwilling wird für einen definierten Zweck erstellt. Ein solcher Zweck kann beispielsweise die Umsetzung einer Analyse zur vorausschauenden Instandhaltung, zur Zustandsüberwachung, zur Integration von Systemupdates im After-Sales-Management oder zum Transfer von Daten aus der Anwendung in den Entwicklungsprozess zukünftiger Produktgenerationen sein (Grieves und Vickers 2017; Stuecka 2017). Die Deloitte-Studie (Sallaba et al. 2017) nennt die folgenden Nutzen für die Anwendung des Digitalen Zwillings:

- Gesteigerte Effizienz durch Anpassung der beobachteten Betriebsparameter auf den optimalen Betriebszustand,
- Gesteigerte Qualität durch das zusätzliche Erfassen von Daten über den kompletten Entwicklungsprozess hinweg,
- Erhöhtes Wachstum durch die Identifikation neuer Potenziale mittels hoher Datenverfügbarkeit und Analysefunktionen,
- Risikominimierung durch vorausschauende Maßnahmen in Kombination mit permanenter Überwachung von Systemen,
- Gesteigerte Flexibilität durch die Möglichkeit von vernetzten Steuerungen,
- Gesteigerte Transparenz durch das kontinuierlichere Erfassen von Systemdaten.

Die Anwendung des Digitalen Zwillings wird als der nächste logische Schritt bezeichnet, um die digitale und reale Welt noch stärker miteinander zu verschmelzen (Stuecka 2017).

Der für diese Arbeit relevante Digitale Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung entsteht aus den Modellen der Produktentwicklung, speziell dem Model Based Systems Engineering (MBSE). Seine Existenz beginnt mit der Produktion eines realen Seriensystems und der zugehörigen Realisierung der Kommunikation durch Schnittstellen. Mit dem Fokus auf vorausschauende Instandhaltung sind reale Systeme der Entwicklung wie Muster und Prototypen ausgeschlossen bzw. dienen als Informationsgrundlage für die Realisierung im Seriensystem.

10.8.3 Methode zur Integration von Modellen der Produktentwicklung in einen Digitalen Zwilling

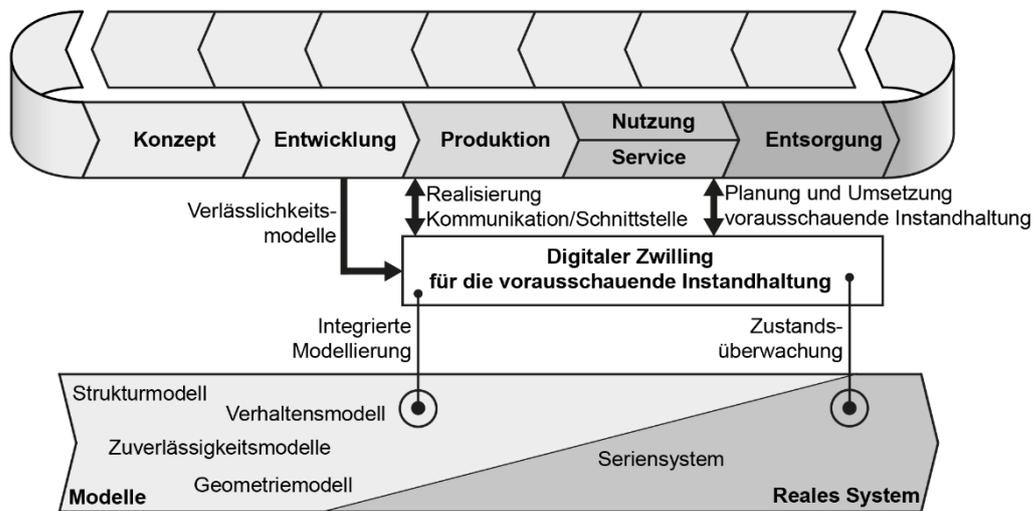


Abbildung 45: Digitaler Zwilling zur Umsetzung einer vorausschauenden Instandhaltungsstrategie mit den adressierten Lebenszyklusphasen Produktion, Nutzung und Service ((Kaul et al. 2019) basierend auf (Boschert und Rosen 2016) und (Walden et al. 2015)).

10.9 Anhang zur Evaluation

Übersicht der Interviewprotokolle U1 bis U7 auf den Seiten 166 bis 180

Es kann zu Differenzen in den Formulierungen der Interviews zum Fließtext geben, da der Feinschliff der Arbeit im Anschluss an die Experteninterviews durchgeführt wurde. Dabei wurde explizit beachtet, dass die inhaltlichen Aussagen nicht verfälscht wurden:

	B	C	D	E
A1	2	Struktur		
	3	Interviewnummer	U2	U3
	4	Rückmeldung bezüglich Interviewprotokoll	ja 10/2019	ja 08/2019
	5	Unternehmen (anonym)	U2	U3
	6	Nennung des Unternehmens in der Arbeit/ Abstimmung des Interviewprotokolls?	Nein/Nein	Nein/Ja
	7	Wünschen Sie ein kostenfreies Exemplar der geplanten Arbeit nach Veröffentlichung?	Digital	Print & Digital
	8	Unternehmen		
	9	Branche	Simulation (Automotive, Luftfahrt, Engineering, etc.)	Elektronik, Defense, Automotive
	10	Mitarbeiterzahl	7800	1600
	11	Hauptgeschäftsfeld		24000
	12	Experte	Druckmaterialien	Fahrzeuge, Fahrzeugteile (Hardware, mechatronische Systeme)
	13	Alter (klassifiziert)	50-60	40-50
	14	Berufserfahrung	33	14
	15	Ausbildung / Bildungsabschluss des Experten	Verfahrenstechniker, Dr. Chemie	Dipl. Ing. MB
	16	Personalverantwortung (Anzahl Personen)	ja, ca. 90	ja, ca. 400
	17	Wie würden Sie Ihren Arbeitsbereich kurz beschreiben?	Engineering, Verfahrenstechnische Produktion, Produktion Kunststoffteile	Engineering, Produktion, F&E, Strategie

18	Berührungspunkte				
19	Kennen Sie Selbstorganisierende Produktionssysteme (SOPS) und haben oder hatten Sie damit zu tun?	Ja, mit Bezug auf die Vernetzung Verfahrenstechnischer Prozesse und Anlagen	ja, große Bedeutung für unsere Kunden (ggf. anderes Wording, gleiche Ideen)	gute Kenntnisse, Projektleitung, Verknüpfung mit Additiver Fertigung	
20	Haben sie Kenntnisse in der (interdisziplinären) Entwicklungsmethodik?	Ja, Anlagenentwicklung, Bauteile für Anlage, keine Produkte	gut bekannt, aber Anwender, nicht Gestalter der Entwicklungsmethodik	beiläufiges Interesse, Anwender, wünscht mehr Orientierung, weniger Theorie von den Prozessplanern im Unternehmen	
21	Sind Ihnen die VDI Richtlinie 2206 und das zugehörige V-Modell geläufig?	bekannt, genutzt	bekannt, Angepasst an Bedürfnisse im Unternehmen	bekannt, angewendet, Grundlage für Zertifizierungen	
22	Haben oder hatten Sie Berührungspunkte mit Systems Engineering?	erste Ansätze, nicht formell	eher nicht etabliert im Unternehmen	Elementar für Zertifizierung, tägliche Zusammenarbeit	
23	Relevanz				
24	Wie schätzen Sie aus Ihrer Perspektive die Relevanz von SOPS ein?	hoch relevant in der Verfahrenstechnik, SOPS bedeutet hier auch die Vernetzung der Anlagenteile. Stückfertigung als Katalysator für Ergebnisse in der Anlagentechnik und umgekehrt	wichtig, derzeit sehr wenig Anwendung, Bedarf wird gesehen, Vertrauen in SOPS bei Unternehmen gering, Deutschland hier rückschrittlich, Japan/Korea sehr weit	Hochrelevant, großes Forschungsfeld(häufig CPPS, autonomes Production oder ähnliches)	

	relevant, sehr theoretisch, unsere Entwickler kennen es, sehen die Ideen als selbstverständlich und theoretisiert an. -- nein	wissenschaftliches Modell, für die Prozessplaner relevant, für die Entwickler nicht(angepasster Ansatz) - eher nein	Wichtiges Vorgehensmodell, Zertifizierungsrelevant, wenig Kleinschrittig, kaum Kontrollmöglichkeiten (technical Controlling im Gegensatz zum financial Controlling) + eher ja
25	Wie schätzen Sie die Relevanz der VDI Richtlinie 2206 und des V-Modells ein?		
26	Bewerten Sie:		
27	Einordnung		
28	Das V-Modell und die VDI 2206 sind eine geeignete Grundlage für die Erweiterung um die Berücksichtigung von SOPS	+	++
29	Entwicklungsmethodische Erweiterungen der Interdisziplinären Entwicklung mit dem V-Modell helfen beim Verständnis von SOPS und dessen Potenzialen	++	++
30	SOPS sind Forschungsarbeit, es braucht mehr Erkenntnisse für die industrielle Anwendung	-	+
31	Die Industrie muss selbst mehr Erfahrungen mit SOPS und vergleichbaren Technologien sammeln	++	++
32	Bewertung des Vorgehens und der Methodik		
33	Optionale Assoziationen und Hilfestellungen in der Entwicklungsmethodik sind sinnvoll	++	++
34	Vorschriften, Meilensteine und Gates in der Entwicklungsmethodik sind hilfreich	-	+

35	Agile Entwicklung hat das V-Modell ersetzt, es ist veraltet	-	-	-	--
36	Der Entwickler wird im Allgemeinen durch theoretische Modelle und Anleitungen nicht hinreichend unterstützt	--	-	-	-
37	Inhalte der Methode DfSOPS				
38	Die Verwendung der HML und dessen Inhalte für SOPS bieten einen Mehrwert	++	++	++	++
39	Die Verwendung von SOPS ist eine Unternehmensentscheidung und hochrelevant für das Geschäftsmodell	++	++	++	++
40	Das "Digitale Abbild" und die Absicherung im virtuellen sind von großer Bedeutung	++	++	++	++
41	Die praktische Umsetzung von wirtschaftlichen SOPS ist derzeit unrealistisch	--	-	-	-
42	Die zusätzlichen Kontrollfragen für SOPS im Kontrollfunkt Geschäftsmodell sind hilfreich und intendieren einen gezielten Denkanstoß	++	+	+	++
43	Die Architekturoptionen und Potenziale helfen bei der Auslegung des Produkts zur Nutzung von SOPS	+	++	++	++
44	Architekturoptionen, Hauptmerkmaliste SOPS und Absicherung des Systems müssen bereits in der Planung des Geschäftsmodells/ Unternehmensstrategie berücksichtigt werden	++	++	++	++

45	Die Methode ist ganzheitlich und hilft bei der Entscheidungsfindung	++	+	++	++
46	Die Methode setzte neue Anreize und erweitert damit den Horizont	++	++	++	++
47	Die Methode ist für den Entwickler weniger relevant als für Entscheider/ Strategen	++	++	++	++
48	Die Methode berücksichtigt ausreichend granular die Einflüsse von SOPS	+	+	+	+
49	Die Methode dient mehr der Informationsgewinnung als der Anwendung	++	++	++	++
50	Die Methode ist gut in das unternehmensspezifische Entwicklungsvorgehen integrierbar	++	++	++	++
51	Die Entwicklung des Digitalen Abbilds und dessen Nutzung technisch realisierbar	++	++	++	++
52	Die Vorgehensbeschreibung ist schlüssig und verständlich beschrieben	++	++	++	++
53	Die Vorgehensbeschreibung ist anwendbar	-	+	+	+
54	Die Vorgehensbeschreibung liefert einen Mehrwert	+	+	+	+
55	Die Phase Business Check ist schlüssig und verständlich beschrieben	++	+	+	++
56	Die Phase Business Check ist anwendbar	++	+	+	+
57	Die Phase Business Check liefert einen Mehrwert	++	++	++	++
58	Die Phase HML Kategorie ist schlüssig und verständlich beschrieben	++	++	++	++

59	Die Phase HML Kategorie ist anwendbar	++	++	++	++
60	Die Phase HML Kategorie liefert einen Mehrwert	+	++	++	+
61	Die Phase Architekturoptionen ist schlüssig und verständlich beschrieben	+	-	-	-
62	Die Phase Architekturoptionen ist anwendbar	+	-	-	-
63	Die Phase Architekturoptionen liefert einen Mehrwert	-	-	-	+
64	Die Phase Digitales Abbild ist schlüssig und verständlich beschrieben	+	+	+	+
65	Die Phase Digitales Abbild ist anwendbar	-	-	-	-
66	Die Phase Digitales Abbild liefert einen Mehrwert	++	++	++	++
67	Die Absicherung ist schlüssig und verständlich beschrieben	+	+	+	+
68	Die Absicherung ist anwendbar	+	+	+	+
69	Die Absicherung liefert einen Mehrwert	-	-	-	+
70	Individuelle Relevanz				
71	Wird Ihr Unternehmen in den nächsten 5 Jahren SOPS oder vergleichbare Produktionssysteme einsetzen?	++	-	-	++
72	Sind die Prozesse und Vorgehen in Ihrem Unternehmen aus Ihrer Perspektive bereits zu steif und detailliert, um die vorgegebene Methode SOPS zu nutzen?	-	-	-	+

73	Würden Sie die Methode anwenden, wenn ja, wie und in welcher Situation?	ja, als Information und Wissensbereitstellung	unklar, ggf. für strategische Themen	nach Anpassung könnten einige Passagen und Ideen besonders für Innovationsassoziationen verwendet werden
74	Sonstiges, Schlusswort (Kurzfeedback)	Spannendes Thema und interessante Perspektive aus Sicht der Produktentwicklung. Die Stückgutfertigung kann hier viel von der Verfahrenstechnik lernen..	Besonders in der frühzeitigen Absicherung und Simulation sehen wir große Potenziale für unser Unternehmen. Die beschriebenen Trends und Eigenschaften können wir am Markt bereits erkennen, auch wenn das Gesamtkonzept der selbstorganisation noch in ferner Zukunft liegt.	Ich würde mir mehr Forschung wünschen, die, wie hier, neue Themen und Strategien zu betrachten versucht. Schade, dass moderne Produktionsforschung in Deutschland nur relativ geringen Stellenwert hat, im Gegensatz zu IT, Dienstleistungen und Digitalisierung.
75	Kommentare zum Gesprächsprotokoll in Form des Fragebogens (Reduziert um persönliche Anteile):			

62min

71min

85min

A1	B						
2	Struktur						
3	Interviewnummer	U4	U5	U6	U7		
4	Rückmeldung bezüglich Interviewprotokoll	ja 10/2019	ja 10/2019	ja 10/2019	ja 09/2019		
5	Unternehmen (anonym)	U4	U5	U6	U7		
6	Nennung des Unternehmens in der Arbeit/ Abstimmung des Interviewprotokolls?	Nein/Ja	Nein/Nein	Nein/Ja	Nein/Ja		
7	Wünschen Sie ein kostenfreies Exemplar der geplanten Arbeit nach Veröffentlichung?	Digital	Digital	Print & Digital	DOI; ISBN		
8	Unternehmen						
9	Branche	Automotive	Automotive OEM	Technologie/ Entwicklungsberatung	Luft-/ Raumfahrt		
10	Mitarbeiterzahl	30000	> 600000	125	130000		
11	Hauptgeschäftsfeld	Automobilkomponenten (Hardware)	Fahrzeuge	Beratung, Ingenieurdienstleistungen	Flugzeuge, Helikopter, Satellitentechnik		
12	Experte						
13	Alter (Klassifiziert)	30-40	30-40	50-60	40-50		
14	Berufserfahrung	10	6	20	20		
15	Ausbildung / Bildungsabschluss des Experten	Dr. Ing. MB	M.Eng.	Dipl. Ing.	Dr. Ing. WING		
16	Personalverantwortung (Anzahl Personen)	ja, 2	Nein	ja, derzeit 6	ja, ca. 15		
17	Wie würden Sie Ihren Arbeitsbereich kurz beschreiben?	F&E, Innovation	Produktion, Individualisierung	Engineering & Strategieberatung	Ersatzteilmanagement, Ersatzteilproduktion		
18	Berührungspunkte						
19	Kennen Sie Selbstorganisierende Produktionssysteme (SOPS) und haben oder hatten Sie damit zu tun?	besonders in der F&E relevant, weniger im Engineering und Bauteil Geschäfts	Forschungsthema, mehrere internationale Projekte, globale Fertigung von großer Relevanz, Logistikreduktion und "just in time production" sind große Potenziale	Potenziale in Beratungsprojekten, wenig Umsetzung, nur Insellösungen	Forschungsthema mit offenem Ausgang, Teillösungen in der Werkzeugfertigung(Nachb erstellung von Werkzeugen der spannenden Fertigung)		

20	Haben sie Kenntnisse in der (interdisziplinären) Entwicklungsmethodik?	Standardvorgehen im Konzern, relativ linear mit Stage-Gate	Bekannt, entspricht Automotive Standards und eigenen Anpassungen in den Abteilungen	Hauptgeschäft sind Entwicklungsprozesse	Sehr engmaschig geplant, mit dem Ziel der Zertifizierung und Zulassung(eher Mittel zum Zweck als wirkliche Unterstützung angesehen, in Wahrheit in jedem Fall hilfreich)
21	Sind Ihnen die VDI Richtlinie 2206 und das zugehörige V-Modell geläufig?	wenig Kontakt, bekannt, wenig interdisziplinäre Arbeit	bekannt, genutzt, sehr theoretisch, als Orientierungshilfe	Standard	siehe Entwicklungsmethodik und veraltet, VDI Richtlinien haben teilweise keinen guten Ruf, zu theoretisch und zu wenig tatsächliche Orientierung
22	Haben oder hatten Sie Berührungspunkte mit Systems Engineering?	nein, kein Kontakt	Standard	Standard, elementares Verkaufsargument	Zertifiziert nach GfSE, INCOSE, NASA zur Projektaquisition, wichtige Bestandteile der täglichen Arbeit, könnte besser verbreitet sein im Konzern
23	Relevanz				

<p>Wie schätzen Sie aus Ihrer Perspektive die Relevanz von SOPS ein?</p>	<p>Besonders in der Ersatzteil- und Werkzeugfertigung sowie im AM</p>	<p>hohe Relevanz, Initiative "(No) People in Production", KI für die Berücksichtigung mehrerer Faktoren, Mehrzieloptimierung, geringe Nachvollziehbarkeit, große Akzeptanzprobleme, Entscheidungen nachvollziehen unmöglich</p>	<p>Viele Partner sehen diese (oder ähnliche Bezeichnungen) als unumgänglich für Zukünftige Produktion, globale Netzwerke, Produktion am Markt/Kunden, Einflüsse können durch AI besser verarbeitet werden, ggf. aber noch Entscheidungen beim Menschen, Kontrollverlust der Anwender großes Problem, deshalb nur kleine Lösungen derzeit, Asien und USA sind offener und vertrauen der Technologie mehr als Europäer</p>	<p>sehr relevant, diverse Forschungsprojekte, häufig im Bereich AM /Global Supply Chain Spareparts, für Kernprodukt irrelevant, für Peripherie von großer Bedeutung, bisher nur Ansätze erkennbar, Logistik unschlagbar günstig und verfügbar</p>
<p>Wie schätzen Sie die Relevanz der VDI Richtlinie 2206 und des V-Modells ein?</p>	<p>weniger relevant, da wenig Interdisziplinarität bei den Produkten, eher in der Anlagentechnik</p>	<p>Erweiterungen und Anpassungen dringend erforderlich, völlig veraltet, teilweise zu feingranular, teilweise zu global, Vervwissenschaftlichung, Angepasste Modelle und Vorgehen von großer Bedeutung.</p>	<p>V-Modell weltweit etabliert, wenn Software beteiligt ist, unumgängliches Modell/Verständnis, nur mit Erklärung und Bearbeitung wird der tatsächliche Nutzen der Richtlinie und des V-Modells klar und sinnvoll anwendbar.</p>	<p>Zertifizierungsrelevant, geordnetes Vorgehen, Berücksichtigung individueller Probleme und Herausforderungen sehr schwierig</p>
<p>Bewerten Sie:</p>	<p>++ ja</p>			
<p>Einordnung Das V-Modell und die VDI 2206 sind eine geeignete Grundlage für die Erweiterung um die Berücksichtigung von SOPS</p>	<p>-</p>	<p>+</p>	<p>++</p>	<p>+</p>

24

25

26

27

28

29	Entwicklungsmethodische Erweiterungen der Interdisziplinären Entwicklung mit dem V-Modell helfen beim Verständnis von SOPS und dessen Potenzialen	+	++	++	-
30	SOPS sind Forschungsarbeit, es braucht mehr Erkenntnisse für die industrielle Anwendung	+	+	++	++
31	Die Industrie muss selbst mehr Erfahrungen mit SOPS und vergleichbaren Technologien sammeln	++	++	++	+
32	Bewertung des Vorgehens und der Methodik				
33	Optionale Assoziationen und Hilfestellungen in der Entwicklungsmethodik sind sinnvoll	++	++	++	+
34	Vorschriften, Meilensteine und Gates in der Entwicklungsmethodik sind hilfreich	-	-	--	+
35	Agile Entwicklung hat das V-Modell ersetzt, es ist veraltet	-	--	-	--
36	Der Entwickler wird im Allgemeinen durch theoretische Modelle und Anleitungen nicht hinreichend unterstützt	-	-	--	--
37	Inhalte der Methode DfSOPS				
38	Die Verwendung der HML und dessen Inhalte für SOPS bieten einen Mehrwert	++	++	++	++
39	Die Verwendung von SOPS ist eine Unternehmensentscheidung und hochrelevant für das Geschäftsmodell	+	+	++	+
40	Das "Digitale Abbild" und die Absicherung im virtuellen sind von großer Bedeutung	++	++	++	++
41	Die praktische Umsetzung von wirtschaftlichen SOPS ist derzeit unrealistisch	+	--	+	-
42	Die zusätzlichen Kontrollfragen für SOPS im Kontrollfunkt Geschäftsmodell sind hilfreich und intendieren einen gezielten Denkanstoß	+	++	++	+

43	Die Architekturoptionen und Potenziale helfen bei der Auslegung des Produkts zur Nutzung von SOPS	++	++	++	++
44	Architekturoptionen, Hauptmerkmale SOPS und Absicherung des Systems müssen bereits in der Planung des Geschäftsmodells/ Unternehmensstrategie berücksichtigt werden	+	-	++	-
45	Die Methode ist ganzheitlich und hilft bei der Entscheidungsfindung	+	++	++	+
46	Die Methode setzte neue Anreize und erweitert damit den Horizont	++	++	++	++
47	Die Methode ist für den Entwickler weniger relevant als für Entscheider/ Strategen	++	++	+	++
48	Die Methode berücksichtigt ausreichend granular die Einflüsse von SOPS	+	+	+	+
49	Die Methode dient mehr der Informationsgewinnung als der Anwendung	++	++	++	++
50	Die Methode ist gut in das unternehmensspezifische Entwicklungsvorgehen integrierbar	+	+	++	+
51	Die Entwicklung des Digitalen Abbilds und dessen Nutzung technisch realisierbar	++	++	++	++
52	Die Vorgehensbeschreibung ist schlüssig und verständlich beschrieben	++	++	++	++
53	Die Vorgehensbeschreibung ist anwendbar	+	+	+	++
54	Die Vorgehensbeschreibung liefert einen Mehrwert	+	+	+	+
55	Die Phase Business Check ist schlüssig und verständlich beschrieben	++	++	++	+
56	Die Phase Business Check ist anwendbar	+	-	++	+
57	Die Phase Business Check liefert einen Mehrwert	++	+	++	+

58	Die Phase HfML Kategorie ist schlüssig und verständlich beschrieben	++	++	++	++	++
59	Die Phase HfML Kategorie ist anwendbar	++	++	++	++	++
60	Die Phase HfML Kategorie liefert einen Mehrwert	+	++	++	+	+
61	Die Phase Architekturoptionen ist schlüssig und verständlich beschrieben	-	+	+	+	+
62	Die Phase Architekturoptionen ist anwendbar	+	++	++	+	+
63	Die Phase Architekturoptionen liefert einen Mehrwert	+	++	++	+	+
64	Die Phase Digitales Abbild ist schlüssig und verständlich beschrieben	++	++	++	++	++
65	Die Phase Digitales Abbild ist anwendbar	+	+	+	+	+
66	Die Phase Digitales Abbild liefert einen Mehrwert	++	++	++	++	++
67	Die Absicherung ist schlüssig und verständlich beschrieben	+	+	+	+	+
68	Die Absicherung ist anwendbar	+	+	+	+	+
69	Die Absicherung liefert einen Mehrwert	-	-	-	-	-
70	Individuelle Relevanz					
71	Wird Ihr Unternehmen in den nächsten 5 Jahren SOPS oder vergleichbare Produktionssysteme einsetzen?	++	++	++	--	++
72	Sind die Prozesse und Vorgehen in Ihrem Unternehmen aus Ihrer Perspektive bereits zu steif und detailliert, um die vorgegebene Methode SOPS zu nutzen?	++	++	++	-	+

<p>73</p> <p>Würden Sie die Methode anwenden, wenn ja, wie und in welcher Situation?</p>	<p>Die Ideen/Informationen ja, die Methode nein, da Interdisziplinarität nicht so relevant ist</p>	<p>Inhalte sind für unsere Vorgehensmodelle gut übertragbar und für unsere Portfolliomanager relevant</p>	<p>ja, wichtige Inputs für die Beratung von innovationsgetriebenen Kunden, die vorausdenken und -handeln möchten</p>	<p>ja, um die Kollegen über die Möglichkeiten und Ideen von SOPS(o.Ä.) zu informieren. Die Umsetzung läuft, vielleicht bekommt der ein oder andere noch neue Anreize für seine Arbeit.</p>
<p>74</p> <p>Sonstiges, Schlusswort (Kurzfeedback)</p>				
<p>75</p> <p>Kommentare zum Gesprächsprotokoll in Form des Fragebogens (Reduziert um persönliche Anteile):</p>		<p>Ob die Systeme SOPS heißen oder anders: Die inhaltlichen Veränderungen und Technologien sind von großer Relevanz in der Zukunft. Die Perspektive der Wissenschaft kann hier wichtige Beiträge liefern und die Anwenderperspektive aufweiten.</p>	<p>Vielen Dank für die spannende Diskussion, den Input und Anreize. Themen wie dieses beschäftigen viele Unternehmen: Als innovatives Unternehmen erweitern Themen wie dieses unser Angebotsportfolio fast jährlich.</p>	<p>Wir sehen große Potenziale in diesen Produktionssystemen: Die globale Einführung und dessen Vernetzung wird aber nach und nach kommen, nicht als einmalige Initiative. Die Kosten sind auch für Weltkonzerne auf einen Schlag nicht tragbar.</p>

46min

49min

80min

57min

Kommentare im Interviewprotokoll:

Feld	Kommentare
U1 Z70	Wir tun es bereits, nennen es anders, was aber keine Rolle spielt. Der Trend nimmt mehr und mehr zu. Arbeitsplanung und Scheduling sind veraltet!
U5 Z71	Bei der Menge an Vorschriften und Vorgaben, würde es keinen Unterschied machen. Wichtig ist das die richtigen Ansätze extrahiert werden.
U7 Z70	Dickes ja, im Spare Parts Bereich arbeiten wir intensiv an Lösungen mit autonomen/selbstorganisierenden Produktions- und Logistiksystemen.
U2 Z65	Die Idee ist erstklassig, die allgemeine Definition sehr schwierig.
U6 Z51	Die Gesamte Methode als Management Summary max. 4 Pages wäre hochinteressant.
U1 Z50	In der Verfahrenstechnik auf jeden Fall. Es gibt diese Ansätze beispielsweise bei der Skalierung vom Technikum in die Produktion.
U1 Z49	Das hängt am Vorgehensmodell bzw. dem individuellen Prozess. Die Grundstruktur ist jedoch vorstellbar.
U7 Z48	In der Entwicklung sind alle Artefakte, Vorgehen etc. Informationen und Wissen für die Entwicklung. Daher, vollkommen richtig und keine Abwertung der Inhalte.
U3 Z47	Eine feinere Berücksichtigung ist unrealistisch und nicht allgemeingültig. Die Grenze ist kaum identifizierbar.
U5 Z46	Aus unserer Perspektive hat der Entwickler selten den Spielraum, sondern nur der Entscheider, das Produktionssystem zu wählen
U2 Z45	Sehr richtig, eine passende (Keine Vorschläge) und Fakten/Studien dazu wären ein zusätzlicher extremer Mehrwert.
U7 Z43	Das Geschäftsmodell ändert sich extrem selten bis nie, bzw. es ist offensichtlich. Strategie und Harmonisierung/ Standardisierung ist hier das Schlagwort
U6 Z34	Die Symbiose ist wichtig

11 Literaturverzeichnis

- Abele, Eberhard; Reinhart, Gunther (2011): Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/action/show-Book?doi=10.3139/9783446428058>.
- Abramovici, Michael; Herzog, Otthein (Hg.) (2016): Engineering im Umfeld von Industrie 4.0. Einschätzungen und Handlungsbedarf. München, München: acatech; Herbert Utz Verlag GmbH (Acatech Studie).
- Acatech (2012): Cyber-Physical Systems. Innovationsmotoren für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion. Dordrecht: Springer (Acatech BEZIEHT POSITION).
- Acatech (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Berlin.
- Albers, A.; Braun, A. (2011): A generalized framework to comapps and to support complex product engineering processes. In: *International Journal of Product Management* 15 (1/2/3), S. 6–25.
- Ashby, W. R. (1947): Principles of the self-organizing dynamic system. In: *The Journal of general psychology* 37 (2), S. 125–128. DOI: 10.1080/00221309.1947.9918144.
- Barbosa, José; Leitão, Paulo; Adam, Emmanuel; Trentesaux, Damien (2015): Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution. In: *Computers in Industry* 66, S. 99–111. DOI: 10.1016/j.com-pind.2014.10.011.
- Barrow, Bryan (2017): 50 quick and easy ways to become brilliant at stakeholder management. How you can master stakeholder management in just 30 days. Swindon: Thembi Publishing.
- Barton, S. (1994): Chaos, self-organization, and psychology. In: *The American psychologist* 49 (1), S. 5–14.
- Bauer, Stefan (2003): DESIGN FOR X – ANSÄTZE ZUR DEFINITION UND STRUKTURIERUNG. In: 14. Symposium „Design for X“. Neukirchen.
- Bauernhansl, Thomas (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bauernhansl, Thomas; Emmrich, Volkhard; Döbele, Mathias; Paulus-Rohmer, Dominik; Schatz, Anja; Weskamp, Markus (2015): Geschäftsmodell-Innovation durch Industrie 4.0. Chancen und Risiken für den Maschinen- und Anlagenbau. Fraunhofer IPA.
- Bellmann, Klaus; Himpel, Frank (2008): Fallstudien zum Produktionsmanagement. 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Gabler (Lehrbuch).

- Bendel, Oliver (2015): Chancen und Risiken 4.0. In: *Unternehmerzeitung* (3), S. 32–33. Online verfügbar unter https://oliverbendel.net/publikationen/Chancen_Risiken_4_0_UZ_Published_Version.pdf.
- Bender, Beate; Steven, Marion (2015): Erfolgsindikatoren in der technischen Produktentwicklung. In: *Die Unternehmung* 69 (4), S. 354–370. DOI: 10.5771/0042-059X-2015-4-354.
- Benz, Stefan (2004): Eine Entwicklungsmethodik für sicherheitsrelevante Elektroniksysteme im Automobil. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV).
- Blessing, Lucienne T. M.; Chakrabarti, Amaresh (2009): DRM, a Design Research Methodology. 1. Auflage. Guildford, Surrey: Springer London.
- BMBF (2012): Bericht der Bundesregierung. Zukunftsprojekte der Hightech-Strategie (HTS-Aktionsplan). Berlin/ Bonn.
- BMI (2019): Automatisierte Entscheidungen - Welche Aufgaben wollen wir Maschinen überlassen? Hg. v. Kompetenzzentrum Öffentliche IT. Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat. Berlin. Online verfügbar unter <https://oefit.de/umfragen?entry=automatisierte-entscheidungen>, zuletzt geprüft am 04.07.2020.
- BMWi/BMBF (2019): Plattform Industrie 4.0. Zukunft der Industrie made in Germany. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; Bundesministerium für Bildung und Forschung. Hg. v. BMWi. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.plattform-i40.de/>.
- Bochtler, Wolfgang; Laufenberg, Ludger; Eversheim, Walter (1995): Simultaneous Engineering. Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Boehm, Barry (1976): Software Engineering. In: *IEEE Transact. on Computers*, C-25, C25, S. 1216–1241.
- Boschert, Stefan; Rosen, Roland (2016): Digital Twin - The Simulation Aspect. In: Peter Hehenberger und David Bradly (Hg.): *Mechatronic Futures. Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*: Springer, Cham, S. 59–74.
- Botthof, Alfons; Hartmann, Ernst Andreas (Hg.) (2015): *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10419/182357>.
- Brandis, Rinje (2014): Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme. Dissertation. Universität Paderborn. Heinz Nixdorf Institut.
- Brettel, Malte; Fischer, Felix Gabriel; Bendig, David; Weber, Anja Ruth; Wolff, Bartholomäus (2016): Enablers for Self-optimizing Production Systems in the Context

- of Industrie 4.0. In: *Procedia CIRP* 41, S. 93–98. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.065.
- Bröhl, Adolf-Peter (Hg.) (1995): *Das V-Modell. Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden*. 2. Aufl. München: Oldenbourg (Software - Anwendungsentwicklung - Informationssysteme).
- Bullinger, Hans-Jörg; Warschat, Joachim (1997): *Forschungs- und Entwicklungsmanagement. Simultaneous Engineering, Projektmanagement, Produktplanung, Rapid Product Development*. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag (Technologiemanagement - Wettbewerbsfähige Technologieentwicklung und Arbeitsgestaltung). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-05946-2>.
- Bussmann, S.; Schild, K. (2000): Self-organizing manufacturing control. An industrial application of agent technology. In: *Fourth International Conference on MultiAgent Systems. Proceedings: Boston, Massachusetts, USA, July 10-12, 2000*. Fourth International Conference on MultiAgent Systems. Boston, MA, USA, 10-12 July 2000. International Conference on Multi-Agent Systems; American Association for Artificial Intelligence; IFMAS. Los Alamitos, Calif: IEEE Computer Society, S. 87–94.
- Camazine, Scott (2003): *Self-organization in biological systems*. Princeton, N.J, Woodstock: Princeton University Press (Princeton studies in complexity).
- Checkland, Peter (1995): *Systems thinking, systems practice*. Repr. Chichester: Wiley & Sons.
- Cooper, Robert G. (2002): *Top oder Flop in der Produktentwicklung. Erfolgsstrategien; von der Idee zum Launch*. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH Verl.
- Cooper, Robert G. (2008): Perspective. The Stage-Gate ® Idea-to-Launch Process—Update, What’s New, and NexGen Systems. In: *J Product Innovation Man* 25 (3), S. 213–232. DOI: 10.1111/j.1540-5885.2008.00296.x.
- Decker, Michael (1999): Robotik. Einführung in eine interdisziplinäre Diskussion. In: *Graue Reihe* (16).
- DIN ISO 9241, 2020: *Die Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme*.
- DIN 8580, 2003: *DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*.
- Dr. Wieselhuber & Partner GmbH; Fraunhofer IPA (März 2015): *Geschäftsmodell-Innovation durch Industrie 4.0. Chancen und Risiken für den Maschinen- und Anlagenbau. Studie*. München. https://www.wieselhuber.de/migrate/attachments/Geschaeftsmodell_Industrie40-Studie_Wieselhuber.pdf.
- Dworatschek, Sebastian (1973): *Einführung in die Datenverarbeitung. Mit 266 Bildern, 189 Übungsaufgaben und einem Abbildungsanhang*. 5. Aufl. Berlin: de Gruyter (de-Gruyter-Lehrbuch).

- Dyckhoff, Harald (2006): Produktionstheorie. Grundzüge industrieller Produktionswirtschaft: mit 20 Tabellen. 5., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-32601-4>.
- Ebert, Christof (2019): Systematisches Requirements Engineering. Anforderungen ermitteln, dokumentieren, analysieren und verwalten. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: dpunkt.verlag.
- Eckert, Claudia Margot; Stacey, M. K.; Clarkson, P. J. (2003): The spiral of applied research: A methodological view on integrated design research. In: A. Folkesson (Hg.): Research for practice - innovation in products, processes and organisations. ICED 03, 14th International Conference on Engineering Design; 19 - 21 August 2003, The Royal Institute of Technology, Stockholm. Glasgow: Design Society (DS / Design Society, 31).
- Eichhorn, Peter (2000): Das Prinzip Wirtschaftlichkeit. Basis der Betriebswirtschaftslehre. 2., durchgesehene Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-93146-7>.
- Eigner, Martin; Koch, Walter; Muggeo, Christian (Hg.) (2017): Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme. Der PLM-unterstützte Referenzentwicklungsprozess für Produkte und Produktionssysteme. Berlin: Springer.
- Eversheim, Walter; Schuh, Günther (2005): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- EY (Hg.) (2020): Megatrends 2020 and beyond. Are you reframing your future or is the future reframing you? Ernst & Young (EYQ 3rd edition). Online verfügbar unter ey.com/megatrends.
- Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.) (2013): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl.: Springer.
- Gassmann, Oliver; Frankenberger, Karolin; Csik, Michaela (2017): Geschäftsmodelle entwickeln. 55 innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Navigator. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.3139/9783446452848>.
- Gausemeier, Jürgen; Plass, Christoph (2014): Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung. Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. 2. Aufl. München: Hanser.
- Geissbauer, Reinhardt; Schrauf, Stefan; Koch, Volkmar; Kuge, Simon (2014): Industrie 4.0. Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution. Hg. v. PriceWaterhousecoopers.
- Gericke, Kilian; Meißner, Moritz; Paetzold, Kristin (2013): Understanding the context of product development. In: Udo Lindemann (Hg.): Design for harmonies. ICED 13, the 19th International Conference on Engineering Design, 19th - 22nd August

- 2013, Sungkyunkwan University (SKKU), Seoul, Korea. Castle Cary, Somerset: Design Society (DS / The Design Society, 75), S. 191–200.
- Gesellschaft Produktionstechnik (1989): Simultaneous Engineering. Neue Wege des Projektmanagements; Tagung Frankfurt, 18. und 19. April 1989. [Als Ms. gedr.]. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 758).
- Geupel, Helmut (2001): Fertigungsgerechtes Konstruieren. In: Helmut Geupel (Hg.): Konstruktionslehre. Methodisches Konstruieren für das praxisnahe Studium. 2nd printing. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch), S. 32–57.
- Gordon, Raymond (1977): Unidimensional Scaling of Social Variables: Concepts and Procedures. The Free Press. New York.
- Grande, Marcus (2011): 100 Minuten für Anforderungsmanagement. Kompaktes Wissen nicht nur für Projektleiter und Entwickler. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8135-9>.
- Gräßler, Iris (2000): Informations- und zeitbasiertes Controlling einer integrierten Konstruktion und Arbeitsplanung. Als Ms. gedr. Aachen: Shaker (Berichte aus der Produktionstechnik, 9).
- Gräßler, Iris (2004): Kundenindividuelle Massenproduktion. Entwicklung, Vorbereitung der Herstellung, Veränderungsmanagement: Springer Berlin, Heidelberg, New York u.a.
- Gräßler, Iris (2015a): Generic Product Creation Systems. In: Eurosis (Hg.): 13th Industrial Simulation Conference 2015. 13th Industrial Simulation Conference 2015. Valencia, 01.06.-03.06. Valencia, Spain, S. 173–177.
- Gräßler, Iris (2015b): Umsetzungsorientierte Synthese mechatronischer Referenzmodelle Implementation-oriented synthesis of mechatronic reference models. In: Torsten Bertram (Hg.): Fachtagung Mechatronik 2015. VDI Mechatronik. Dortmund, Deutschland, 12.03.-13.03. Aachen: Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik, S. 167–172.
- Gräßler, Iris (2017): A new V-Model for interdisciplinary product engineering. In: *Engineering for a changing world: 59th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, September 11-15, 2017: proceedings*. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017iwk-063:6>.
- Gräßler, Iris (2018): Competitive Engineering in the Age of Industry 4.0 and Beyond. In: Proceedings of TMCE. Las Palmas de Gran Canaria.
- Gräßler, Iris; Dattner, Michael; Bothen, Martin (2018a): Main Feature List as core success criteria of organizing Requirements Elicitation. In: R&D Management Conference. R&D Management Conference. Mailand, Italien, 30.06.-04.07.2018, S. 1–16. Online verfügbar unter [urn:nbn:de:hbz:466:2-34360](http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:466:2-34360).

- Gräßler, Iris; Hentze, Julian (2015): A V-model based comparison of Systems Engineering approaches. In: ECEC 2015. 22nd European Concurrent Engineering Conference. Lisbon, Portugal, 27.04.-29.04.2015. Lisbon, Portugal: EUROSIS-ETI, S. 80–88.
- Gräßler, Iris; Hentze, Julian (2017): Enriching Mechatronic V-Model by Aspects of Systems Engineering. In: Aurelio Araujo und Carlos A. Mota Soares (Hg.): Smart Structures and Materials. 7th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials. Basel: Springer International Publishing (Computational Methods in Applied Sciences, 43), S. 80–86.
- Gräßler, Iris; Hentze, Julian (2019): Transformations in product development to enable globally distributed self-organizing production systems. In: Procedia CIRP - Proceedings of the 29th CIRP Design Conference.
- Gräßler, Iris; Hentze, Julian (2020): The new V-Model of VDI 2206 and its validation. In: *at - Automatisierungstechnik* 68, 30.04.2020 (5), S. 312–324. Online verfügbar unter <https://www.degruyter.com/view/journals/auto/68/5/article-p312.xml?rskey=bXq7RM&result=10>.
- Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Bruckmann, Tobias; Graessler, Iris (2018b): V-Models for Interdisciplinary Systems Engineering. In: Dorian Marjanović, Mario Storga, Neven Pavkovic, Neven Bojčević und Stanko Škec (Hg.): Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference. DESIGN Conference. Dubrovnik, 21.-24.05.2018. Design Society, S. 747–756.
- Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Hesse, Philipp (2020): Anchoring Points as a Method for Interdisciplinary Systems Engineering with the New V-Model. In: Proceedings of TMCE Conference 2020. Online verfügbar unter tmce.io.tudelft.nl/proceedings, zuletzt geprüft am 05.12.2020.
- Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Oleff, Christian (2018c): Systems Engineering Competencies in Academic Education. An industrial survey about skills in Systems Engineering. In: IEEE (Hg.): 13th System of Systems Engineering Conference. 13th System of Systems Engineering Conference. Paris, 19.-22.06.2018. IEEE, S. 542–547. Online verfügbar unter <https://ieeexplore.ieee.org/document/8428741/>, zuletzt geprüft am 13.08.2018.
- Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Pöhler, Alexander (2018d): Self-organizing production systems: Implications for product design. In: 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. Procedia CIRP. Naples, Italy, 18.-20.07.2018.
- Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Scholle, Philipp (2016a): Enhancing systems engineering by scenario-based anticipation of future developments. In: IEEE (Hg.): SoSe2016. 11th International Conference on System of Systems Engineering. Kongsberg, Norway, 12.06.-14.06., S. 1–5.

- Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Scholle, Philipp (2016b): Enhancing systems engineering by scenario-based anticipation of future developments. In: IEEE (Hg.): SoSe2016. 11th International Conference on System of Systems Engineering. Kongsberg, Norway, 12.06.-14.06., S. 1–5.
- Gräßler, Iris; Hentze, Julian; Yang, Xiaojun (2016c): Eleven Potentials for Mechatronic V-Model. In: Franz-Josef Villmer und Elio Padoanao (Hg.): Production Engineering and Management. 6th International Conference. 6th International Conference Production Engineering and Management. Lemgo, Germany, 29.09.-30.09.2016. Hochschule Ostwestfalen-Lippe. 1 Band, S. 257–268.
- Gräßler, Iris; Oleff, Christian; Hentze, Julian (2019): Role Model for Systems Engineering Application. In: *Proc. Int. Conf. Eng. Des.* 1 (1), S. 1265–1274. DOI: 10.1017/dsi.2019.132.
- Gräßler, Iris; Oleff, Christian; Scholle, Philipp (2018e): Methode zur Bewertung von Anforderungsänderungen additiv gefertigter Produkte. In: Dieter Krause, Kristin Paetzold und Sandro Wartzack (Hg.): Design for X. Beiträge zum 29. DfX-Symposium. DfX Symposium. Tutzing, 25./26. September 2018. 1. Aufl. Hamburg: TuTech Innovation, S. 333–344.
- Gräßler, Iris; Pöhler, Alexander (2017a): Implementation of an adapted holonic production architecture. In: Proceedings of the 50th CIRP conference on manufacturing systems (CIRP-CMS). The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Taichung, Taiwan, 03.-05.05.2017.
- Gräßler, Iris; Pöhler, Alexander (2017b): Integration of a digital twin as human representation in a scheduling procedure of a cyber-physical production system. In: Proceedings of 2017 IEEE International. Singapore, 10.-13.12.2017.
- Gräßler, Iris; Pöhler, Alexander (2017c): Intelligent devices in a decentralized production system concept. In: Proceedings of 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME). 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME). Ischia, 19.-21.07.2017. Centre for International Research in Production (CIRP), S. 1–6.
- Gräßler, Iris; Pöhler, Alexander (2019): Human-centric design of cyber-physical production. In: *Procedia CIRP - Proceedings of the 29th CIRP Design Conference.*
- Gräßler, Iris; Pöhler, Alexander; Hentze, Julian (2017): Decoupling of product and production development in flexible production environments. In: 27th CIRP Design Conference 2017. Cranfield Campus, Cranfield, United Kingdom, 10.-12.05.2017. CIRP conference on manufacturing systems, S. 548–553.
- Gräßler, Iris; Pöhler, Alexander; Pottebaum, Jens (2016d): Creation of a Learning Factory for Cyber Physical Production Systems. In: *Procedia CIRP* 54, S. 107–112. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.063.

- Gräßler, Iris; Pöhler, Alexander; Scholle, Philipp (2015): CPPS - Based Market Access Opportunities for Production Capacity Providers. In: Elio Padoano und Franz-Josef Villmer (Hg.): Production Engineering and Management. 5th International Conference. October 1 and 2, 2015, Trieste, Italy. 5th International Conference on Production Engineering and Management. Trieste, Italy, 01.10.-02.10., S. 67–77.
- Gräßler, Iris; Scholle, Philipp; Hentze, Julian; Oleff, Christian (2018f): Semi-Automatized Assessment of Requirement Interrelations. In: Dorian Marjanović, Mario Storga, Neven Pavkovic, Neven Bojetic und Stanko Škec (Hg.): Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference. DESIGN Conference. Dubrovnik, 21.-24.05.2018. Design Society, S. 325–334. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0298>.
- Gräßler, Richard (1999): Planungs- und Workflow-Methodik für eine integrierte Konstruktion und Arbeitsplanung. Aachen, Technische Hochschule, zugelassene Dissertation, 1999. Aachen: Shaker (Berichte aus der Produktionstechnik, 99,19).
- Grieves, Michael; Vickers, John (2017): Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: Transdisciplinary perspectives on complex systems: Springer, S. 85–113.
- Griffin, Richard (2014): Complete Training Evaluation. The Comprehensive Guide to Measuring Return on Investment. London: Kogan Page. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=816417>.
- Günther, Swen (2010): Design for Six Sigma. Konzeption und Operationalisierung von alternativen Problemlösungszyklen auf Basis evolutionärer Algorithmen. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden (Forum Marketing). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-6032-0>.
- Gutenberg, Erich (1951): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Erster Band Die Produktion. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft, Abteilung Staatswissenschaft). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-21965-2>.
- Gutenberg, Erich (1983): Die Produktion. 24., unveränderte Auflage. Berlin: Springer (Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft Abteilung Staatswissenschaft, Bd. 1).
- Haberfellner, Reinhard (2012): Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung. 12., völlig neu bearb. und erweiterte Aufl. Zürich: Orell Füssli.
- Hallermayer, Michael; Seebach, Hella; Reif, Wolfgang (2016): Wissenschaft und Praxis diskutieren über IT-Systeme der Zukunft. Universität Augsburg. In: *idw - Informationsdienst* 2016, 08.09.2016. Online verfügbar unter <https://idw-online.de/en/news?print=1&id=657422>, zuletzt geprüft am 12.12.2020.

- Händle, F.; Jensen, S. Hrsg. (Hg.) (1974): Systemtheorie und Systemtechnik. Sechzehn Aufsätze. München: Nymphenburger Verl.-Handlung.
- Hees, Andreas Fabian (2017): System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. Dissertation. Herbert Utz Verlag GmbH.
- Hentze, Julian; Gräßler, Iris (2015): Lebenszyklusgerechte Umfeldmodellierung. In: Dieter Krause, Kristin Paetzold und Sandro Wartzack (Hg.): Design for X. Beiträge zum 26. DfX Symposium, Bd. 26. DfX Symposium. Herrsching, Deutschland, 04.10.-05.10. neue Ausg. Hamburg: TuTech Innovation, S. 245–254.
- Hentze, Julian; Kaul, Thorben; Gräßler, Iris; Sextro, Walter (2017): Integrated modeling of behavior and reliability in system development. In: Design Society (Hg.): ICED17. 21st International Conference on Engineering Design Vancouver, 21.-25.08.2017: Design Society, S. 385–394.
- Hirsch-Kreinsen, Hartmut (1998): Internationalisierung der Produktion. In: M. v. Behr, & H. Hirsch-Kreinsen (Hrsg.) (Hg.): Globale Produktion und Industriearbeit: Arbeitsorganisation und Kooperation in Produktionsnetzwerken. Frankfurt am Main: Campus Verl, S. 17–36. Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-23761>, zuletzt geprüft am 26.07.2019.
- Hirsch-Kreinsen, Hartmut (2014): Wandel von Produktionsarbeit – „Industrie 4.0“. In: *WSI* 67 (6), S. 421–429. DOI: 10.5771/0342-300X-2014-6-421.
- Hofmann, Erik; Oettmeier, Katrin (2016): 3D-Druck: Wie additive Fertigungsverfahren die Wirtschaft und deren Supply Chains revolutionieren. In: *Zeitschrift Führung + Organisation*, Bd. 85. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 84–90. Online verfügbar unter ISSN 0722-7485.
- Huang, G. Q. (1996): Design for X. Concurrent engineering imperatives. 1st ed. London: Chapman & Hall.
- Hubka, Vladimir (1984): Theorie Technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Zweite, völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Hochschultext). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-10446-0>.
- Hülsmann, Michael; Windt, Katja (2007): Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Inkermann, David; Hanna, Michael; Richter, Timo; Wortmann, Nadine; Vietor, Thomas; Krause, Dieter (2019): Die Produktarchitektur als zentrales Konzept in der Produktentwicklung. In: DFX 2019: Proceedings of the 30th Symposium Design for X, 18-19 September 2019, Jesteburg, Germany. 30th Symposium Design for X, 18th-19th September 2019: The Design Society.
- ISO 15288, 2015: ISO/IEC/IEEE International Standard - Systems and software engineering—System life cycle processes.

- Jantzer, Michael; Nentwig, Godehard; Deininger, Christine; Michl, Thomas (2019): Die Kunst, eine Produktentwicklung zu führen. Erfolgreiche Konzepte aus der Unternehmenspraxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kagermann, Henning; Lukas, Wolf-Dieter; Wahlster, Wolfgang (2011): Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. In: VDI-Nachrichten (13).
- Kaluzny, Michael (2014): Dezentrale Koordination von Produktions/Instandhaltungs-Systemen. Entwurf und Analyse eines kartenbasierten Ansatzes. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2013. Wiesbaden: Springer-Gabler (Springer-Gabler Research).
- Kaul, Thorben; Hentze, Julian; Sextro, Walter; Gräßler, Iris (2019): Integration von Verlässlichkeitsmodellen der Entwicklung in einen Digitalen Zwilling zur Umsetzung einer vorausschauenden Instandhaltung. In: T. Bertram, B. Corves, Iris Gräßler und K. Janschek (Hg.): Fachtagung Mechatronik 2019. Paderborn, 27.-28.03.2019, S. 19–24.
- Kern, Werner (1992): Industrielle Produktionswirtschaft. 5., durchges. und aktualisierte Aufl. Stuttgart: Poeschel (Sammlung Poeschel, 5).
- Kersten, Wolfgang; Koller, Hans; Lödding, Hermann (Hg.) (2014): Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern. Tagung der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB). Berlin: GITO mbH Verlag (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB)). Online verfügbar unter http://www.industrie-management.de/sites/industrie-management.de/files/sonderdrucke/loedding_Industrie-4-0.pdf.
- Kiener, Stefan (2006): Produktions-Management. Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. 8., vollst. überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg. Online verfügbar unter http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2795963&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.
- Kipp, Thomas (2012): Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung. 1. Aufl. Hamburg: TuTech-Verl (Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Bd. 4).
- Klein, Thorsten (2016): Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau. Dissertation.
- Klemke, T.; Mersmann, T.; Nyhuis, P. (2010): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Methodik zur Bewertung und Gestaltung der Wandlungsfähigkeit. In: PTKA, Projektträger Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/80610472-Wandlungsfahige-produktionssysteme.html>, zuletzt geprüft am 02.10.2019.

- Kohlhuber, Martina; Kage, Martin; Karg, Michael (Hg.) (2016): Additive Fertigung. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften. 1. Auflage. München, Halle (Saale), Mainz: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. - Nationale Akademie der Wissenschaften; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften e.V (Stellungnahme). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:3:2-106024>.
- Kößler, Johannes; Paetzold, Kristin (2018): Integration of MBSE into existing development processes - Expectations and challenges. In: Anja Maier, Harrison Kim, Josef Oehmen, Filippo Salustri, Stanko Škec und Michael Kokkolaras (Hg.): Product, services and systems design. Red Hook, NY: Curran Associates Inc (DS, 87, 3).
- Krips, David (2017): Inhalt einer Stakeholderanalyse. In: David Krips (Hg.): Stakeholdermanagement. Kurzanleitung Heft 5. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (DVP Projektmanagement), S. 11–34.
- Kuhn, Thomas (2017): Digitaler Zwilling. In: *Informatik Spektrum* 40 (5), S. 440–444. DOI: 10.1007/s00287-017-1061-2.
- Lachmayer, Roland; Lippert, Rene Bastian; Kaierle, Stefan (2018): Additive Serienfertigung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lee, Edward A. (2008): Cyber Physical Systems. Design Challenges. In: 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing. Orlando, FL, USA, S. 363–369.
- Lee, Edward Ashford; Seshia, Sanjit Arunkumar (2017): Introduction to embedded systems. A cyber-physical systems approach. Second edition. Cambridge, Massachusetts, London, England: MIT Press.
- Lewis, Marc D. (1995): Cognition-Emotion Feedback and the Self-Organization of Developmental Paths. In: *Human Development* 38 (2), S. 71–102. DOI: 10.1159/000278302.
- Likert, Rensis (June 1932): A technique for the measurement of attitudes. Archives of Psychology. New York.
- Lindemann, Udo (Hg.) (2016): Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag.
- Lödding, Hermann (2008): Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 2., erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-76860-9>.
- Meyer-Schwickerath, Ben (2015): Vorausschau im Produktentstehungsprozess. Das integrierte Produktentstehungs-Modell (iPeM) als Bezugsrahmen für Vorausschau am Beispiel von Szenariotechnik und strategischer Frühaufklärung. Dissertation.

- Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung.
- Montero, Joaquin; Weber, Sebastian; Bleckmann, Matthias; Paetzold, Kristin (2020): A methodology for the decentralised design and production of additive manufactured spare parts 8, 2020 (1), S. 313–334.
- NASA (2008): NASA Systems Engineering Handbook. Washington: United States Government Printing Office.
- Neumann, Marc (2016): Ein modellbasierter Ansatz zur risikoorientierten Entwicklung innovativer Produkte. Dissertation. Ruhr-Universität Paderborn, Bochum.
- Paetzold, Kristin (2007): On the Integration of Aspects of Motivation In Cognitive Technical Systems. In: J.-C. Bocquet (Hg.): Proceedings of ICED 2007. the 16th International Conference on Engineering Design. Paris, S. 369–370.
- Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang (1997): Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung. Vierte, neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Petry, Thorsten; Jäger, Wolfgang (Hg.) (2018): Digital HR. Smarte und agile Systeme, Prozesse und Strukturen im Personalmanagement. Haufe-Lexware GmbH & Co. KG. 1. Auflage. Freiburg, München, Stuttgart: Haufe Group (Haufe Fachbuch, v.14054). Online verfügbar unter <http://ebookcentral.proquest.com/lib/suub/detail.action?docID=5332667>.
- Pohl, Klaus; Rupp, Chris (2015): Basiswissen Requirements Engineering. Aus- und Weiterbildung nach IREB-Standard zum Certified Professional for Requirements Engineering: foundation level nach IREB-Standard. 4., überarbeitete Auflage. Heidelberg: dpunkt. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/subhh/detail.action?docID=2029882>.
- REFA (1990): Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. 2. Aufl., 6. - 10. Tsd. München: Hanser (Methodenlehre der Betriebsorganisation, / REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation).
- REFA (2015): Industrial Engineering. Standardmethoden zur Produktivitätssteigerung und Prozessoptimierung. 2. Auflage. München: Hanser (REFA-Fachbuchreihe Unternehmensentwicklung). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.3139/9783446447875>.
- Reinhart, Gunther (2017): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.3139/9783446449893>.
- Rost, Jürgen (2004): Lehrbuch Testtheorie - Testkonstruktion. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Bern: Huber (Psychologie Lehrbuch).

- Roth, Armin (Hg.) (2016): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
- Sallaba, Milan; Gentner, Andreas; Esser, Ralf (2017): Grenzenlos vernetzt. Smarte Digitalisierung durch IoT, Digital Twins und die Supra-Plattform. Deloitte Monitor. Online verfügbar unter https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/technology-media-telecommunications/TMT_Digital_Twins_Studie_Deloitte.pdf, zuletzt geprüft am 11.12.2018.
- Schmidt, Götz (2014): Organisation und Business Analysis. Methoden und Techniken. 15., unveränderte Auflage. Gießen: Verlag Dr. Götz Schmidt (ibo-Schriftenreihe, 1).
- Schmitt, Robert; Pfeifer, Tilo (2010): Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken. 4., vollst. überarb. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/action/show-Book?doi=10.3139/9783446426474>.
- Scholz-Reiter, Bernd (2013): Productivity Management 1/2013. Industrie 4.0. In: *Productivity Management* 2013, 2013 (1).
- Scholz-Reiter, Bernd; Windt, Katja; Freitag, Michael (Hg.) (2004): Autonomous logistic processes. New demands and first approaches: Budapest.
- Schuh, Günther; Schmidt, Carsten (2014): Produktionsmanagement. Handbuch Produktion und Management 5. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-54288-6>.
- Schutz, Michael (2012): Systems Engineering im Bauwesen. [Place of publication not identified]: AV AKADEMIKERVERLAG.
- Schwindt, Christoph; Zimmermann, Jürgen (Hg.) (2015): Handbook on Project Management and Scheduling Vol. 2. Cham: Springer International Publishing.
- Seebach, Hella (2011): Konstruktion selbst-organisierender Softwaresysteme. Zugl.: Augsburg, Univ., Diss., 2011. Berlin: Logos-Verl.
- Sousa, Paulo; Ramos, Carlos; Neves, José (2007): Scheduling in Holonic Manufacturing Systems. In: Lihui Wang und Weiming Shen (Hg.): Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing, Bd. 24. London, Berlin, Heidelberg: Springer (Springer Series in Advanced Manufacturing), S. 167–190.
- Spath, Dieter; Ganschar, Oliver; Gerlach, Stefan (2013): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0.
- Stark, Rainer; Krause, F.-L.; Kind, C.; Rothenburg, U.; Müller, P.; Hayka, H.; Stöckert, H. (2010): Competing in engineering design—The role of Virtual Product Creation. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 3 (3), S. 175–184. DOI: 10.1016/j.cirpj.2010.08.003.

- Stuecka, Renate (2017): Digitaler Zwilling in der Produktion: Von der digitalen Planung bis zum physischen Produkt und zurück. *Zukunft Industrien*. IBM. Online. Online verfügbar unter <https://www.ibm.com/de-de/blogs/think/2017/04/21/digital-twin/>), zuletzt geprüft am 11.12.2018.
- Thomas, André; Borangiu, Theodor; Trentesaux, Damien (2015): Holonic and multi-agent technologies for service and computing oriented manufacturing. In: *J Intell Manuf*. DOI: 10.1007/s10845-015-1188-4.
- Thommen, Jean-Paul; Achleitner, Ann-Kristin; Gilbert, Dirk Ulrich; Hachmeister, Dirk; Kaiser, Gernot (2017): *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Thurstone, L. L. (1928): Attitudes can be measured. In: *American Journal of Sociology*, Bd. 33, S. 529–554.
- Tichem, Marcel (1997): A design coordination approach to design for X. doctoral thesis. Delft (Institutional Repository).
- Tschirner, Christian (2016): Rahmenwerk zur Integration des modellbasierten Systems Engineering in die Produktentstehung mechatronischer Systeme. *Dissertationschrift*. Universität Paderborn, Paderborn. Online verfügbar unter <http://digital.ub.uni-paderborn.de/ubpb/urn/urn:nbn:de:hbz:466:2-27332>.
- U.S. Department of Transportation (2009): *Systems Engineering Guidebook for Intelligent Transportation Systems*. Version 3.0.
- Ulrich, Peter; Hill, Wilhelm (1976): Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* 5 (7+8), S. 304–309. Online verfügbar unter <https://www.alexandria.unisg.ch/17331/>.
- United States Department of Defense (2001): *Systems Engineering Fundamentals*. Hg. v. Department of Defence - Systems Management College. Fort Belvoir, Virginia.
- Vajna, Sándor (2014): *Integrated Design Engineering. Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung*. Dordrecht: Springer Vieweg.
- Vajna, Sándor (2020): *Integrated Design Engineering. Interdisciplinary and Holistic Product Development*. 1st ed. 2020. Cham: Springer International Publishing.
- van Bertalanffy, Ludwig (2003): *General system theory. Foundations, development, applications*. Rev. ed., 14. paperback print. New York: Braziller.
- VDI (2020): *Ganzheitliche Darstellung des vollständigen Produktlebenszyklus*. Mögliches Erscheinungsdatum: 2021-05. Hg. v. VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (2000). Online verfügbar unter <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2000-ganzheitliche-darstellung-des-vollstaendigen-produktlebenszyklus>, zuletzt geprüft am 15.12.2020.

- VDI 2206:2004, 2004: Design methodology for mechatronic systems - VDI 2206. Online verfügbar unter www.vdi.de.
- VDI 2206:2020, 09 2020: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme, zuletzt geprüft am 18.12.20, Stand der Einspruchssitzung des zitierten Gründruckes (Titeländerung).
- VDI 2206:2021, 12 2020: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme, 3. Beschlussfassung für den Weißdruck aus der Einspruchssitzung vom 18.12.2020 (Publikation 2021),
- VDI 2221, März 2018: VDI 2221 Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung.
- VDI/VDE-GMA (2013): Thesen und Handlungsfelder. Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. Hg. v. Verein Deutscher Ingenieure.
- Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (2017): Handbuch Industrie 4.0, Bd.1: Produktion. 2., erweiterte und bearbeitete Auflage. Berlin, Germany: Springer Vieweg (Springer Reference Technik).
- Walden, David D.; Roedler, Garry J.; Forsberg, Kevin; Hamelin, R. Douglas; Shortell, Thomas M. (2015): Systems engineering handbook. A guide for system life cycle processes and activities. 4. Aufl.: Wiley.
- Walter, Johanna; Paetzold, Kristin; Nitsch, Verena (2015): Description of a competence oriented approach for designing technical assistance systems. In: Christian Weber, Stephan Husung, Gaetano Cascini, Marco Cantamessa, Dorian Marjanovic und Monica Bordegoni (Hg.): User-centred design, design of socio-technical systems. Glasgow: Design Society (DS / Design Society, 80,9).
- Wartzack, Sandro; Meerkamm, Harald (2000): Fertigungsgerechtes Konstruieren - Potenzial und aktuelle Tendenzen. In: *Werkstatt und Betrieb*, S. 24–29.
- Weilkiens, Tim; Soley, Richard Mark (2014): Systems Engineering mit SysML/UML. Anforderungen, Analyse, Architektur. 3., überarb. und aktualisierte Aufl. Heidelberg: dpunkt.verl.
- Westkämper, Engelbert; Spath, Dieter; Constantinescu, Carmen; Lentes, Joachim (2013): Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Weyrich, M.; Diedrich, C.; Fay, A.; Wollschlaeger, M.; Kowalewski, S.; Göhner, P.; Vogel-heuser, C. (2014): Industrie 4.0 am Beispiel einer Verbundanlage. Aspekte der Modellierung und dezentralen Architektur. In: *atp edition* 56, 2014 (vol. 56, no. 07-08), S. 52–61.
- WIGEP (2020): WiGeP - Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. Unter Mitarbeit von Prof Rainer Stark sowie diversen weiteren u.a. WiGeP Mitgliederung siehe Veröffent-

lichungsimpresum. Hg. v. WIGEP. Online verfügbar unter http://www.wigep.de/fileadmin/Positions-_und_Impulspapiere/Positionspapier_Gesamt_20200401_V11_final.pdf, zuletzt geprüft am 03.12.2020.

Winkelhake, Uwe (2017): Die digitale Transformation der Automobilindustrie. Treiber - Roadmap - Praxis. Berlin: Springer (Handbuch). Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>.