Thorsten Westermann

Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus

Approach for the Maturity Model-Based Planning of Cyber-Physical Systems in Machinery and Plant Engineering Industry

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen National-bibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar

Band 375 der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2017

ISSN (Print): 2195-5239
ISSN (Online): 2365-4422
ISBN: 978-3-942647-94-6

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Als elektronische Version frei verfügbar über die Digitalen Sammlungen der Universitätsbibliothek Paderborn.

Satz und Gestaltung: Thorsten Westermann

Hersteller: readbox unipress in der readbox publishing GmbH
Münster

Printed in Germany

Geleitwort

Systems Engineering für den Entwurf Intelligenter Technischer Systeme ist die verbindende Leitidee des Heinz Nixdorf Instituts und des damit verbundenen Fraunhofer-Instituts für Entwurfstechnik Mechatronik IEM.

Die technischen Systeme des Maschinenbaus und verwandter Branchen von morgen werden eine inhärente Intelligenz aufweisen und via Internet vernetzt sein. Die Begriffe Cyber-Physische Systeme/Cyber-Physical Systems (CPS), Internet der Dinge und Industrie 4.0 charakterisieren diese Entwicklung. Für viele Unternehmen, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen, ist es nicht einfach zu erkennen, wo es in dieser dynamischen Entwicklung steht, wo es im Sinne einer mittelfristigen Zielprojektion hin muss und was erste konkrete Schritte in Richtung der Zielprojektion sind.

Vor diesem Hintergrund hat Herr Westermann eine Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus entwickelt. Die Systematik versetzt Unternehmen in die Lage, die Weiterentwicklung ihrer Erzeugnisse ausgehend vom Status Quo systematisch zu planen. Grundlage sämtlicher Verbesserungsaktivitäten ist eine Referenzarchitektur für CPS, die als allgemeingültige Leitlinie für die Weiterentwicklung technischer Systeme dient. Darauf aufbauend ermöglicht ein Reifegradmodell die objektive Bestimmung der Ausgangssituation technischer Systeme, die Definition einer Zielposition sowie die Planung einer evolutionären Leistungssteigerung. Schließlich unterstützen adäquate Hilfsmittel bei der Erstellung konkreter Lösungskonzepte zur inkrementellen Umsetzung der Zielprojektion. Die Systematik wurde in einem anspruchsvollen Industrieprojekt validiert. Aufgabe in dem Projekt war die Weiterentwicklung einer Industriezentrifuge durch die Integration neuester Informations- und Kommunikationstechnologien.

Mit seiner Dissertation bewegt sich Herr Westermann auf einem hochaktuellen und sehr herausfordernden Gebiet. Seine wissenschaftliche Arbeit stellt einen sehr wertvollen Beitrag zur Erschließung der Digitalisierung im Maschinenbau dar, der insbesondere auch den Möglichkeiten von kleinen und mittleren Unternehmen entspricht. Das Ergebnis ist ein weiterer wichtiger Baustein für unsere Paderborner Schule des Entwurfs Intelligenter Technischer Systeme.

Paderborn, im September 2017

Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier Prof. Dr.-Ing. R. Dumitrescu

Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
M.Sc. Thorsten Westermann
aus *Oelde*

Tag des Kolloquiums: 19. Juli 2017
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM. Sie ist das Ergebnis meiner wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen von Forschungs- und Industrieprojekten.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier für die stets fordernde und fördernde Zusammenarbeit. Ich danke ihm besonders für das große Vertrauen in meine Arbeit und meine Person, das er mir auch in herausfordernden Zeiten stets entgegengebracht hat. Sie und das von Ihnen geschaffene Umfeld haben meine fachliche sowie persönliche Weiterentwicklung nachhaltig geprägt!

Für die Übernahme des Korefferats danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Roman Dumitrescu. Mit großer Dankbarkeit betrachte ich zudem die vertrauensvolle Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren und die konsequente Förderung meiner Person. Du hast maßgeblich zu meiner beruflichen Weichenstellung beigetragen.

Allen heutigen und ehemaligen Kollegen danke ich für die kollegiale Zusammenarbeit und das inspirierende Arbeitsklima. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. Harald Anacker: Du hast mich als Kollege und Freund unermüdlich zum Abschluss meiner Promotion motiviert. Ich danke dir von ganzem Herzen! Den vielen Studierenden, die ich namentlich nicht alle nennen kann, danke ich für ihre Unterstützung als studentische Hilfskräfte oder durch ihre studentischen Arbeiten. Hervorheben möchte ich Phillipp Sahrhage und Simon Becker, die mich über lange Zeit unterstützt haben. Ein großer Dank geht auch an Alexandra Dutschke und Sabine Illigen. Ihr seid stets der Fels in der Brandung!

Mein größter Dank gebührt meiner Familie. In erster Linie sind das meine Eltern Marianne und Hubert, die mir das Studium und die Promotion ermöglicht haben und mich in jeder Situation bedingungslos unterstützen; aber auch der Dank an meinen Bruder Markus für den unumstößlichen Rückhalt. Besonders hervorzuheben ist der Dank an meine Freundin Ricarda. Deine grenzenlose Lebensfreude und unendliche Liebe treiben mich jeden Tag an. Dich an meiner Seite zu haben, ist das größte Geschenk. Ich liebe dich!

Paderborn, im September 2017 Thorsten Westermann

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

[WAD15] WESTERMANN, T.; ANACKER, H.; DUMITRESCU, R.: Improving order fulfillment processes with MBSE. In: 20th International Conference on Engineering and Design (ICED15), July 27-30, Milan, Italy, 2015

[WAD+15] WESTERMANN, T.; ANACKER, H.; DUMITRESCU, R.; FRANK, U.; HESSENKÄMPER, A.: Interdisciplinary System Architecture for Intelligent Technical Systems. In: Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2015), November 13-19, Houston, Texas, 2015

[DWA15] DUMITRESCU, R.: WESTERMANN, T.; ANACKER, H.: Interdisziplinäre Anforderungen mit CONSENS managen. Technik in Bayern 06/2015, VDI Landesverband München, München

[DGK+15] DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; KÜHN, A.; LUCKEY, M.; PLASS, C.; SCHNEIDER, M.; WESTERMANN, T.: Auf dem Weg zu Industrie 4.0: Erfolgsfaktor Referenzarchitektur. 2015

[WID16] WESTERMANN, T.; IWANEK, P.; DUMITRESCU, R.: Maschinen- und Anlagenbau auf dem Weg zu Cyber-Physical Systems. In: SCHENK, M. (Hrsg.): Nutzung digitaler Methoden und Modelle in Engineering and Construction im Anlagenbau. 25. Industriearbeitskreis Kooperation im Anlagenbau, 21. Juni, Magdeburg, 2016

[WAD+16] WESTERMANN, T.; ANACKER, H.; DUMITRESCU, R.; CZAJA, A.: Reference Architecture and Maturity Levels for Cyber-Physical Systems. In: 2nd IEEE International Symposium on Systems Engineering 2016, October 4-5, Edinburgh, Scotland, 2016

[HWD+17] HOBSCHEIDT, D.; WESTERMANN, T.; DUMITRESCU, R.; DÜLME, C.; GAUSEMEIER, J.; HEPPNER, H.; MAIER, G.: Soziotechnische Leistungsbewertung von Unternehmen im Kontext von Industrie 4.0. In: BODDEN, E.; DRESSLER, F.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; MEYER AUF DER HEIDE, F.; SCHEYTT, C.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): Wissenschafts- und Industrieforum 2017: Intelligente technische Systeme. 11./12. Mai 2017, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 369, Paderborn, 2017

[WAD17] WESTERMANN, T; ANACKER, H.; DUMITRESCU, R.: Reifegradmodell für die Planung von Cyber-Physical Systems. In: BODDEN, E.; DRESSLER, F.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; MEYER AUF DER HEIDE, F.; SCHEYTT, C.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): Wissenschafts- und Industrieforum 2017: Intelligente technische Systeme. 11./12. Mai 2017, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 369, Paderborn, 2017

Zusammenfassung

Durch die Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik wandeln sich die Erzeugnisse des Maschinen- und Anlagenbaus sowie verwandter Branchen von mechatronischen Systemen hin zu Cyber-Physischen Systemen/Cyber-Physical Systems (CPS). CPS sind vernetzte, intelligente technische Systeme, die gleichermaßen mit der physikalischen und der digitalen Welt interagieren. Vor diesem Hintergrund sind die Unternehmen zunehmend mit der Herausforderung konfrontiert, die sich abzeichnenden Chancen dieser Entwicklung rasch und konsequent auszuschöpfen. Voraussetzung dafür ist ein klares Bild der heutigen Leistungsposition, sowohl bei Produkten und Dienstleistungen als auch im Produktentstehungsprozess, sowie der anzustrebenden Zielposition und der ersten konkreten Schritte in Richtung der Zielprojektion.

Ziel dieser Arbeit ist eine Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus. Das Fundament bildet eine Referenzarchitektur für CPS, die als allgemeingültige Leitlinie für die Weiterentwicklung technischer Systeme dient. Ein Reifegradmodell definiert die Eigenschaften eines CPS für verschiedene Leistungsstufen, beschreibt deren Zusammenhänge und stellt für Unternehmen eine systematische Vorgehensweise zur Leistungsbewertung und -steigerung ihrer Erzeugnisse bereit. Hilfsmittel zur Konzipierung von CPS unterstützen schließlich die Kreation alternativer Lösungskonzepte und die Umsetzungsplanung einer evolutionären Leistungssteigerung. Die Anwendung der Systematik erfolgt exemplarisch anhand einer Industriezentrifuge (Separator).

Summary

Due to the development of information and communication technology, products of the machinery and plant engineering industry and related sectors move from mechatronic systems towards Cyber-Physical Systems (CPS). CPS are networked, intelligent technical systems that interact with the physical and digital world alike. Companies now increasingly face the challenge of rapid and consistent exploiting the emerging opportunities of this development. A prerequisite for this is a clear picture of the current position of products and services as well as product development process, the target position and first concrete steps towards target projection.

The aim of this thesis is an approach for the maturity model-based planning of Cyber-Physical Systems in machinery and plant engineering industry. The fundament forms a reference architecture for CPS which serves as a general guideline for the further development of technical systems. A maturity model defines the characteristics of CPS for different performance levels, describes their correlations, and provides a systematic approach for the performance assessment and enhancement of their products. Aids to the design of CPS finally support the creation of alternative solution concepts and the planning of an evolutionary increase in performance. The application of the system is carried out on the example of an industrial centrifuge (separator).

Inhaltsverzeichnis

Seite

1 Einleitung 1
1.1 Problematik 1
1.2 Zielsetzung 3
1.3 Vorgehensweise 3

2 Problemanalyse 5
2.1 Begriffsdefinitionen und Einordnung der Arbeit 5
2.2 Von der Mechatronik zu Cyber-Physical Systems 6
2.2.1 Mechatronische Systeme 7
2.2.2 Intelligente Technische Systeme 9
2.2.3 Cyber-Physical Systems 11
2.3 Wandel der industriellen Produktion 15
2.3.1 Industrie 4.0 – Digitalisierung der industriellen Produktion 16
2.3.2 Maschinen- und Anlagenbau in Deutschland 19
2.3.3 Veränderung der Marktleistung im Maschinen- und Anlagenbau durch Cyber-Physical Systems 22
2.4 Interdisziplinäre Produktentstehung 25
2.4.1 Referenzmodell der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen nach GAUSEMEIER 25
2.4.2 Strategische Produktplanung 27
2.4.3 Entwicklung von Marktleistungen 29
2.4.3.1 Produktentwicklung 29
2.4.3.2 Dienstleistungsentwicklung 31
2.4.4 Systems Engineering 32
2.5 Reifegradmanagement 35
2.5.1 Leistungsbewertung und -steigerung 36
2.5.2 Leistungsstufen technischer Systeme 38
2.6 Problemabgrenzung 40
2.7 Anforderungen an die Arbeit 42

3 Stand der Technik 45
3.1 Referenzarchitekturen für Cyber-Physical Systems 45
3.1.1 CPS-Struktur nach LEE ET AL. 46
3.1.2 Zwiebelschalenarchitektur der CPS nach BROY 47
3.1.3 CPS-Architektur nach AHMED ET AL. 48

3.1.4 Technologiekonzept Intelligenter Technischer Systeme nach GAUSEMEIER ET AL. ... 49
3.1.5 Technologie-Infrastruktur für intelligente, vernetzte Produkte nach PORTER/HEPPELMANN ... 51
3.1.6 Generische Architektur von Systemen intelligenter Objekte nach DEINDL ... 53
3.2 Aktuelle Ansätze im Reifegradmanagement ... 56
3.2.1 Leistungsstufenmodelle für technische Systeme ... 56
3.2.1.1 CPS-Charakterisierung und erforderliche neue Fähigkeiten von CPS nach GEISBERGER/BROY ... 57
3.2.1.2 5C-Architektur für die Implementierung von CPS nach LEE ET AL. ... 58
3.2.1.3 Fähigkeitsstufen intelligenter Objekte nach PÉREZ HERNÁNDEZ/REIFF-MARGANIEC ... 60
3.2.1.4 Werkzeugkasten Industrie 4.0 (Produkt) nach ANDERL ET AL. ... 62
3.2.1.5 Beschreibende Merkmale und Merkmalsausprägungen intelligenter Objekte in Produktion und Logistik nach DEINDL ... 64
3.2.2 Reifegradbasierte Prozessmanagementmodelle ... 66
3.2.2.1 VPS-Benchmark ... 66
3.2.2.2 CMMI – Capability Maturity Model Integration ... 69
3.2.2.3 Methode zur Leistungsbewertung und -steigerung der Mechatronikentwicklung nach BALÁZOVÁ ... 71
3.2.2.4 PEMM – Process and Enterprise Maturity Model ... 74
3.3 Modellierung von Marktleistungen ... 76
3.3.1 CONSENS ... 77
3.3.2 SysML ... 79
3.3.3 Service Blueprinting ... 81
3.3.4 Integriertes Rahmenkonzept zur Modellierung von Dienstleistungen nach SCHEER ET AL. ... 83
3.3.5 HLB-Layer-Methode ... 85
3.4 Bewertung und Handlungsbedarf ... 87

4 Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems ... 91
4.1 Die Systematik im Überblick ... 91
4.2 Referenzarchitektur für Cyber-Physical Systems ... 93
4.3 Reifegradmodell für Cyber-Physical Systems ... 96
4.3.1 Leistungsbewertung ... 97
4.3.1.1 Systemanalyse ... 97

4.3.1.2 Systembewertung ... 98
4.3.2 Zieldefinition ... 114
4.3.2.1 Verbesserungszielauswahl ... 114
4.3.2.2 Zielbestimmung ... 117
4.3.3 Leistungssteigerung ... 120
4.3.3.1 Leistungsrelevanzanalyse ... 120
4.3.3.2 Umsetzungsplanung ... 123
4.3.4 Werkzeugunterstützung ... 124
4.4 Hilfsmittel zur Konzipierung von Cyber-Physical Systems ... 126
4.4.1 Modellkonstrukte zur Spezifikation von CPS ... 127
4.4.2 Morphologischer Kasten mit Technologie- und Dienstesteckbriefen ... 129
4.4.3 Umsetzungsroadmap ... 132
4.5 Vorgehensmodell zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems ... 133
4.5.1 Phase 1: Vorbereitung ... 135
4.5.2 Phase 2: Leistungsbewertung ... 135
4.5.3 Phase 3: Zieldefinition ... 136
4.5.4 Phase 4: Leistungssteigerung ... 138
4.5.5 Phase 5: Ermittlung alternativer Lösungskonzepte ... 139
4.5.6 Phase 6: Bewertung und Umsetzungsplanung ... 140

5 Anwendung und Bewertung ... 141
5.1 Anwendungsbeispiel Separator ... 141
5.1.1 Phase 1: Vorbereitung ... 142
5.1.2 Phase 2: Leistungsbewertung ... 144
5.1.3 Phase 3: Zieldefinition ... 146
5.1.4 Phase 4: Leistungssteigerung ... 149
5.1.5 Phase 5: Ermittlung alternativer Lösungskonzepte ... 152
5.1.6 Phase 6: Bewertung und Umsetzungsplanung ... 154
5.2 Bewertung der Systematik anhand der Anforderungen ... 155

6 Zusammenfassung und Ausblick ... 159

7 Abkürzungsverzeichnis ... 163

8 Literaturverzeichnis ... 165

Anhang

A1 Ergänzungen zur Problemanalyse A-1

A2 Ergänzungen zum Stand der Technik A-5

A2.1 Generische Wirkstruktur fortgeschrittener mechatronischer Systeme nach DUMITRESCU A-5

A2.2 Prototyp-Architektur für CPS nach TAN ET AL. A-7

A2.3 Übersicht der CPS-Fähigkeiten nach GEISBERGER/BROY A-9

A2.4 European Foundation for Quality Management (EFQM) Excellence Modell A-10

A2.5 Hypro Design A-12

A3 Ergänzungen zum Reifegradmodell für CPS A-15

A3.1 Steckbriefe der Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene A-15

A3.2 Katalog der Verbesserungsziele A-20

A4 Ergänzungen zur Validierung A-23

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der anwendungsorientierten Forschung am FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ENTWURFSTECHNIK MECHATRONIK IEM. Die Ergebnisse resultieren aus verschiedenen Forschungs- und Industrieprojekten. Stellvertretend sei an dieser Stelle das vom EUROPÄISCHEN FONDS FÜR REGIONALE ENTWICKLUNG NRW (EFRE.NRW) geförderte Verbundprojekt „INLUMIA – Instrumentarium zur Leistungssteigerung von Unternehmen durch Industrie 4.0“ genannt. Ziel des Projekts ist ein Instrumentarium, das Unternehmen bei der Einführung von Industrie 4.0 unterstützt. Die Arbeit ist Bestandteil des Instrumentariums und beschreibt eine *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus.* Die Anwendung der Systematik erfolgte im Rahmen des *Spitzenclusters it's OWL*[1].

1.1 Problematik

Die digitale Informationsverarbeitung hat unsere technische und gesellschaftliche Welt in den vergangenen 70 Jahren fundamental verändert [Bro10, S. 17]. Während 1950 noch rund 8.000 Computersysteme existierten, überschritt die Anzahl vernetzter Objekte in den 2.000er Jahren erstmals die Weltbevölkerung [Eva11, S. 3]. Ausgehend von weltweit ca. 15 Milliarden mit dem Internet verbundenen Produkten im Jahr 2015, sollen es bis 2030 rund 30 Milliarden Produkte sein. Die **Digitalisierung** durchzieht schon jetzt weite Teile unseres täglichen Lebens. Ob im Haushalt, im Straßenverkehr oder in der Kommunikation: viele technische Systeme wie Hausgeräte, Fahrzeuge oder Mobilfunkgeräte sind über das Internet vernetzt und in der Lage weltweit mit anderen Objekten via Internet zu kommunizieren [KRH+15, S. 14]. Der Begriff „Internet der Dinge“ beschreibt diese Vision, in der die reale Welt in das Internet verlagert wird und Alltagsgegenstände ein Teil des Internets werden [MF10, S. 107].

Ausgangspunkt vieler vernetzter technischer Systeme sind mechatronische Systeme, die auf dem synergetischen Zusammenwirken unterschiedlicher Fachdisziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beruhen. Durch die Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) wandeln sich mechatronische Systeme hin zu Intelligenten Technischen Systemen (ITS). ITS sind mechatronische Systeme mit inhärenter Teilintelligenz, die adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich sind. Sie sind also in der Lage, sich ihrer Umgebung autonom anzupassen, unerwartete Situationen in einem dynamischen Umfeld zu bewältigen, zukünftige Ereignisse auf Basis von Erfahrungswissen zu antizipieren und sich auf das Verhalten ihrer Benutzer einzustellen. Zudem kommunizieren und kooperieren sie mit anderen Systemen. Dadurch entstehen vernetzte Systeme, deren Funktionalität sich erst durch das Zusammenspiel der

[1] Der Spitzencluster „Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe (it´s OWL)“ wird vom BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF) gefördert.

Einzelsysteme ergibt [Dum10, S. 19], [GAC+13, S. 14]. Die Vernetzung technischer Systeme und die Verschmelzung der virtuellen mit der physikalischen Welt adressiert der Begriff **Cyber-Physical Systems** (CPS) [GB12, S. 9]. Im Wesentlichen beruht diese Entwicklung auf der integrierten Nutzung zweier Technologiefelder: zum einen Systeme mit eingebetteter Software; zum anderen globale Datennetze mit verteilten und interaktiven Anwendungssystemen (z.B. Internet) [GB12, S. 19f.].

Der Einsatz von **CPS in der industriellen Produktion** wird diese radikal verändern. Intelligente und vernetzte Maschinen, Lagersysteme oder Betriebsmittel tauschen eigenständig Informationen aus, lösen Aktionen aus und steuern sich selbstständig. Dadurch entstehen sog. Smart Factories, die ihre Struktur sowie ihre Parameter situationsspezifisch und autonom anpassen können [KWH13, S. 5]. Dieser radikale Wandel wird als vierte industrielle Revolution oder Industrie 4.0 bezeichnet, die für eine neue Stufe der Organisation und Steuerung komplexer Wertschöpfungsnetzwerke steht [aca11, S. 23]. Der Wandel der industriellen Produktion betrifft den Wirtschaftsstandort Deutschland, der geprägt ist von starken Industrien wie dem Maschinen- und Anlagenbau, dem Fahrzeugbau, der Elektroindustrie oder der Energiewirtschaft, in zweierlei Hinsicht: Einerseits sind produzierende Unternehmen[2] wie Automobilhersteller betroffen, deren Wertschöpfungskette sich durch den Einsatz neuer Produktionstechnik verändern wird. Andererseits ist es die Ausrüsterindustrie[3], insbesondere Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus oder der Automatisierungstechnik, deren Produkte sich durch den Einsatz neuer Technologien zu Cyber-Physical Systems weiterentwickeln [KWH13, S. 5].

Der **Maschinen- und Anlagenbau** ist einer der stärksten deutschen Wirtschaftszweige und mit über 1 Mio. Beschäftigten der beschäftigungsstärkste Arbeitgeber in Deutschland [VDM16, S. 7]. Deutsche Maschinen- und Anlagenbauer gelten als führende Fabrikausrüster und weltweite Technologieführer in der Produktionstechnik [KWH13, S. 5]. Damit die Unternehmen ihre Führungsposition erhalten und sogar ausbauen können, müssen sie die dynamische Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik nutzen und einen Großteil ihrer Produkte zu CPS weiterentwickeln. Klassische maschinenbauliche Erzeugnisse wie Werkzeug- oder Verpackungsmaschinen sind heute in der Regel mechatronische Systeme. Die Transformation zu CPS wird den Funktionsumfang bestehender Systeme erheblich erweitern und die Vernetzung von Einzelsystemen zu Systemverbünden verstärken [GB12, S. 61]. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf bestehende Erzeugnisse, sondern auf die gesamte **Marktleistung** der Unternehmen. Während das Angebot im Maschinen- und Anlagenbau klassischerweise aus einer Kombination von Sach- und

---

[2] Zur produzierenden Industrie gehören alle Unternehmen, die durch die Verarbeitung von Rohstoffen und Halbzeugen ein physisches Produkt in einem Produktionssystem produzieren bzw. produzieren lassen. Dies umfasst sowohl die fertigungs- als auch die verfahrenstechnische Verarbeitung [KWH13, S. 36].

[3] Zur Ausrüsterindustrie gehören der Maschinen- und Anlagenbau, die Zulieferer für Automatisierungsprodukte, -systeme und -lösungen sowie Software-Firmen, beispielsweise für Product-Lifecycle-Management- (PLM-)Systeme, Software-Anwendungen in der Produktion oder in der Logistik oder für Software-Systeme zur Unterstützung der Unternehmensplanung [KWH13, S. 36].

produktbegleitenden Dienstleistungen besteht, eröffnen CPS nun erfolgversprechende Möglichkeiten, um die historisch gewachsene Marktleistung mit innovativen Produkt-Service-Systemen[4] weiterzuentwickeln [EDB+15, S. 22]. Diese Potentiale beruhen u.a. auf der Speicherung und Analyse von Daten, zunehmender Intelligenz und Vernetzung und einem digitalen Kundenzugang [BLO+15, S. 19ff.]. Für Anbieter von CPS können Dienstleistungen auf Basis von Daten (sog. digitale Services) in Zukunft ein wichtiges Differenzierungsmerkmal werden, da die eigentliche Maschine immer weniger zur Generierung der Gesamtlösung beitragen wird [EDB+15, S. 25].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die zunehmende Durchdringung von IKT die Erzeugnisse des Maschinen- und Anlagenbaus verändern wird. Daraus ergeben sich erfolgversprechende Potentiale für neue und veränderte Marktleistungen. Den Unternehmen fällt diese Weiterentwicklung jedoch schwer, da oft Unklarheit über den aktuellen Leistungsstand und die anzustrebende Zielposition ihrer Erzeugnisse herrscht. Es besteht daher **Bedarf** für eine passgenaue methodische Unterstützung, die Unternehmen bei der evolutionären Leistungssteigerung ihrer Erzeugnisse unterstützt.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus*. Sie soll Unternehmen in die Lage versetzen, die Weiterentwicklung ihrer Erzeugnisse systematisch zu planen.

Die Systematik soll sich insgesamt aus vier Bestandteilen zusammensetzen. Erster Bestandteil ist eine **Referenzarchitektur für CPS**. Sie ist ein allgemeingültiges Muster, das alle Merkmale eines CPS umfasst und als Leitlinie für die Weiterentwicklung der Systeme dient. Weiterer Bestandteil ist ein **Reifegradmodell für CPS**. Es definiert die Eigenschaften eines CPS für verschiedene Leistungsstufen, beschreibt deren Zusammenhänge und die Entwicklung von geringer zu hoher Reife in Anlehnung an die Referenzarchitektur. Auf der Grundlage der Leistungsstufen unterstützen **Hilfsmittel zur Konzipierung von CPS** bei der Erstellung und Auswahl von Lösungen zur Leistungssteigerung. Ein **Vorgehensmodell** beschreibt die durchzuführenden Tätigkeiten, ausgehend von der Analyse und Bewertung der derzeitigen Leistungsfähigkeit, über die Definition der Zielposition bis hin zur Umsetzungsplanung. Es steuert den Einsatz der Methoden und dient als Leitfaden speziell für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus.

1.3 Vorgehensweise

In **Kapitel 2** erfolgt die Konkretisierung der einleitenden Problematik. Hierzu werden relevante Begriffe eingeführt und das Forschungsfeld der Arbeit abgesteckt. Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit sind Cyber-Physical Systems des Maschinen-

[4] Produkt-Service-Systeme sind Leistungsbündel aus Sach- und Dienstleistungen [SD06, S. 467].

und Anlagenbaus. Zunächst wird die Entwicklung von mechatronischen Systemen zu Intelligenten Technischen Systemen und Cyber-Physical Systems beleuchtet. Im Zuge dessen werden CPS charakterisiert und die wesentlichen Merkmale herausgestellt. Anschließend werden die Auswirkungen von CPS auf die industrielle Produktion betrachtet. Insbesondere werden dabei die Konsequenzen für die Marktleistung von Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus untersucht, die als Anbieter von CPS im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen. Darüber hinaus werden die Aufgaben entlang des Produktentstehungsprozesses betrachtet und die zentralen Aspekte des Reifegradmanagements herausgestellt. Im Rahmen einer Problemabgrenzung erfolgt die Zusammenfassung der grundlegenden Handlungsfelder. Die Problemanalyse schließt mit der Ableitung von Anforderungen an die angestrebte Systematik.

Kapitel 3 analysiert den Stand der Technik. Dazu werden Ansätze vorgestellt, die sich zur Erfüllung der formulierten Anforderungen grundsätzlich eignen. Zunächst erfolgt die Untersuchung von bestehenden Referenzarchitekturen im Kontext von CPS. Anschließend werden Ansätze des Reifegradmanagements analysiert. Hierzu werden sowohl Leistungsstufenmodelle für technische Systeme als auch reifegradbasierte Prozessmanagementmodelle beleuchtet. Vor dem Hintergrund der Konkretisierung von Lösungen zur Leistungssteigerung erfolgt die Betrachtung von bestehenden Ansätzen zur Modellierung von Marktleistungen. Abschließend werden die analysierten Ansätze hinsichtlich der ermittelten Anforderungen aus Kapitel 2 bewertet. Daraus resultiert Handlungsbedarf für die angestrebte Systematik.

Den Kern der vorliegenden Arbeit bildet **Kapitel 4**. Hier wird die *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus* vorgestellt. Ausgangspunkt ist ein Überblick über die Systematik und ihre Bestandteile. Anschließend werden die einzelnen Bestandteile im Detail erläutert. Das Fundament der Systematik bildet die *Referenzarchitektur für CPS*. Danach werden das *Reifegradmodell für CPS* und die dazugehörigen Hilfsmittel und Berechnungsvorschriften erläutert. Anschließend erfolgt die Vorstellung der *Hilfsmittel zur Konzipierung von CPS*. Den Abschluss des Kapitels bildet das *Vorgehensmodell*, das die Tätigkeiten zur Anwendung der Systematik und ihrer Bestandteile erläutert.

Die Validierung der Arbeit ist Gegenstand von **Kapitel 5**. Anhand des Beispiels eines Separators wird die durchgängige Anwendung der Systematik und ihrer Bestandteile gezeigt. Als maschinenbauliches Erzeugnis eignet sich der Separator hervorragend, um die Erfüllung der aufgestellten Anforderungen zu validieren und die Industrierelevanz der Resultate herauszustellen.

Kapitel 6 fasst die Inhalte der Arbeit zusammen. Zudem wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder gegeben. Der **Anhang** umfasst ergänzende Informationen zur Problemanalyse, zum Stand der Technik, zur Systematik und zur Validierung.

2 Problemanalyse

Ziel der Problemanalyse sind Anforderungen an eine *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus*. Hierfür werden in Abschnitt 2.1 wesentliche Begriffe definiert und die Einordnung der Arbeit beschrieben. Abschnitt 2.2 erläutert die Entwicklung von mechatronischen Systemen zu Intelligenten Technischen Systemen und Cyber-Physical Systems. In diesem Zusammenhang erfolgt eine Charakterisierung von CPS und eine Abgrenzung derer zu ITS. Der Wandel der industriellen Produktion ist Gegenstand von Abschnitt 2.3. Inhalt von Abschnitt 2.4 ist die interdisziplinäre Produktentstehung. Schwerpunkte dabei sind die Strategische Produktplanung, die integrative Entwicklung von Marktleistungen sowie Ansätze des Systems Engineering. Abschnitt 2.5 thematisiert Aspekte des Reifegradmanagements. In Abschnitt 2.6 werden die Herausforderungen und Handlungsfelder für die zu entwickelnde Systematik herausgearbeitet. Das Resultat sind Anforderungen und deren Beschreibung in Abschnitt 2.7.

2.1 Begriffsdefinitionen und Einordnung der Arbeit

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist eine *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus*. Unter dem Begriff **Systematik** wird in der vorliegenden Arbeit ein Rahmenwerk verstanden, das ein Vorgehensmodell sowie Hilfsmittel zur Planung von technischen Systemen des Maschinen- und Anlagenbaus bereitstellt. Das Vorgehensmodell strukturiert den Planungsprozess nach aufgabenspezifischen Gesichtspunkten. **Planung** wird hier als die gedankliche Vorwegnahme von notwendigen Schritten zur effektiven Erreichung eines Ziels verstanden [Bro88, S. 220]. Beispiele für Hilfsmittel sind Methoden, Richtlinien, Reifegradmodelle oder auch Spezifikationstechniken/Modellierungssprachen. Notwendige etablierte Hilfsmittel sind zu verwenden und in das Vorgehen zu integrieren. Sollte es keine geeigneten Hilfsmittel geben, so sind bestehende auf die konkrete Problemstellung anzupassen bzw. neue zu entwickeln [Dum10, S. 6].

Wesentliche Punkte einer Verbesserung von Produkten, Prozessen oder Organisationen sind eine objektive Bewertung der derzeitigen Leistungsfähigkeit und ein Konzept zur schrittweisen Verbesserung. Reifegradmodelle adressieren diese Punkte; sie erlauben eine nahezu objektive Leistungsbewertung und eine darauf basierende systematische Leistungssteigerung. Der Begriff **Reife** beschreibt den *Zustand der Vollständigkeit, Vollkommenheit und Verfügbarkeit* [SW89]. **Reifegrade** definieren für verschiedene Leistungsstufen die Eigenschaften eines Objekts (z.B. Prozess, Organisation, Produkt, Arbeitsperson). **Reifegradmodelle** sind Referenzmodelle, die Zusammenhänge zwischen Reifegraden und somit die Entwicklung eines Objekts von geringer zu hoher Reife beschreiben [GP14, S. 315f.].

Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit sind technische Systeme im Maschinen- und Anlagenbau. **Technische Systeme** sind nach EHRLENSPIEL *künstlich erzeugte geometrisch-stoffliche Gebilde, die einen bestimmten Zweck (Funktion) erfüllen, also Operationen (physikalische, chemische, biologische Prozesse) bewirken* [EM13]. In der Praxis werden solche technischen Gebilde oft als Anlagen, Maschinen oder Maschinenanlagen bezeichnet; einen einheitlichen Sprachgebrauch gibt es nicht [FG13, S. 237f.]. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Vorschlag des STATISTISCHEN BUNDESAMTS aufgegriffen, das den **Maschinen- und Anlagenbau** zur Klassifikation der Wirtschaftszweige wie folgt definiert:

> *„[...]umfasst den Bau von Maschinen, die mechanisch oder durch Wärme auf Materialien einwirken oder an Materialien Vorgänge durchführen (wie Bearbeitung, Besprühen, Wiegen oder Verpacken), einschließlich ihrer mechanischen Bestandteile, die Kraft erzeugen und anwenden, sowie spezieller Teile dafür. Hierunter fallen feste, bewegliche oder handgeführte Vorrichtungen, ungeachtet, ob sie für Industrie und Gewerbe, den Bau, die Landwirtschaft oder für den Einsatz im Haushalt bestimmt sind. Diese Abteilung umfasst ferner die Herstellung von Hebezeugen und Fördermitteln" [SB08, S. 291].*

Beispiele für technische Systeme im Maschinen- und Anlagenbau sind Werkzeugmaschinen, Textilmaschinen, Verpackungsmaschinen oder Nahrungsmittelmaschinen, aber auch Pumpen, Armaturen und Kompressoren [För13, S. 12], [SB08, S. 96]. Durch die zunehmende Digitalisierung entwickeln sich solche Systeme weiter zu sog. Cyber-Physical Systems. **Cyber-Physical Systems** sind vernetzte eingebettete Systeme, die physikalische Daten erfassen, diese verarbeiten und interpretieren, weltweit verfügbare Dienste nutzen, unmittelbar auf physikalische Vorgänge einwirken und über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen [Lee08, S. 1], [Bro10, S. 17].

Die vorliegende Arbeit orientiert sich an der Sichtweise von GAUSEMEIER ET AL. auf den Produktentstehungsprozess und ist dem Zyklus der **Strategischen Produktplanung** zuzuordnen (vgl. Abschnitt 2.4.2). Ziel der Strategischen Produktplanung ist die systematische Ermittlung von Anforderungen an die Produkte zur Eroberung der Märkte von morgen [GEK01, S. 49].

2.2 Von der Mechatronik zu Cyber-Physical Systems

Mehr denn je beruhen Produktinnovationen auf dem engen Zusammenwirken von Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik [VDI2206, S. 3]. Mechatronik eröffnet dem Maschinen- und Anlagenbau, aber auch verwandten Branchen wie der Automobilindustrie oder der Medizintechnik vielversprechende Perspektiven für zukünftige Produkte. Durch die zunehmende Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie ist bereits heute absehbar, dass technische Systeme von morgen den Funktionsumfang heutiger konventioneller mechatronischer Systeme weit übertreffen werden [HS09, S. 75]. Die zunehmende Leistungsfähigkeit der Informationstechnik aber auch

nicht-technischer Disziplinen, wie der Kognitionswissenschaft oder der Neurobiologie, ermöglichen den Wandel von mechatronischen zu Intelligenten Technischen Systemen. ITS haben Funktionen, die bislang nur biologischen Systemen vorbehalten waren. Sie sind in der Lage flexibel auf veränderte Umgebungsbedingungen zu reagieren und sich den Wünschen ihrer Anwender im Betrieb anzupassen [Dum10, S. 11]. Darüber hinaus können sie ortsunabhängig mit weiteren Systemen und ihrer Umgebung kommunizieren und kooperieren. Es entstehen Cyber-Physical Systems, deren Gesamtfunktionalität sich erst aus dem Zusammenspiel der Einzelsysteme ergibt [GAC+13, S. 16f.]. Der Innovationssprung von mechatronischen Systemen (vgl. Abschnitt 2.2.1), über Intelligente Technische Systeme (vgl. Abschnitt 2.2.2) bis hin zu Cyber-Physical Systems (vgl. Abschnitt 2.2.3) wird im Folgenden dargestellt.

2.2.1 Mechatronische Systeme

Der Begriff Mechatronik ist ein Kunstwort aus Mechanik und Elektronik [VDI2206, S. 3]. Erschaffen 1969 von MORI und KIKUSHI[5], drückte er zunächst die Erweiterung mechanischer Systeme um elektronische Funktionen aus [Mor69], [Com94, S. 46]. Heute existiert eine Vielzahl von Definitionen, die im Wesentlichen das synergetische Zusammenwirken von Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik adressieren [GF06, S. 3], [VDI2206, S. 14], [Ise08, S. 1]. Eine viel zitierte Definition mechatronischer Systeme stammt von HARASHIMA, TOMIZUKA und FUKUDA:

> *„[Mechatronics is]… the synergetic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and process" [HTF96, S. 1].*[6]

Aufgebaut sind mechatronische Systeme in der Regel aus einem Grundsystem, Sensorik, Aktorik und einer Informationsverarbeitung. Darüber hinaus verfügen sie über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI[7]) zur Einflussnahme des Menschen auf das System sowie über ein Kommunikationssystem für den Informationsaustausch mit weiteren Systemen. Einfluss auf das System hat zudem die Umgebung, in der es betrieben wird [VDI2206, S. 14ff.]. Bild 2-1 zeigt die Grundstruktur eines mechatronischen Systems, die den Aufbau und die prinzipielle Wirkungsweise mechatronischer Systeme allgemeingültig darstellt.

---

[5] KIKUSHI war Präsident der YASKAWA ELETRIC COOPERATION, die den Begriff Mechatronics (deutsch Mechatronik) als Handelsnamen eintragen ließen. Mechatronics als Zusammensetzung der Begriffe Mechanism und Electronics war im Zeitraum von 1971 bis 1982 als Handelsname geschützt [VDI2206, S. 9].

[6] Deutsche Übersetzung nach [VDI2206, S. 14]: *„Mechatronik bezeichnet das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie bei der Prozessgestaltung."*

[7] Human-Machine-Interface (HMI) engl. für Mensch-Maschine-Schnittstelle

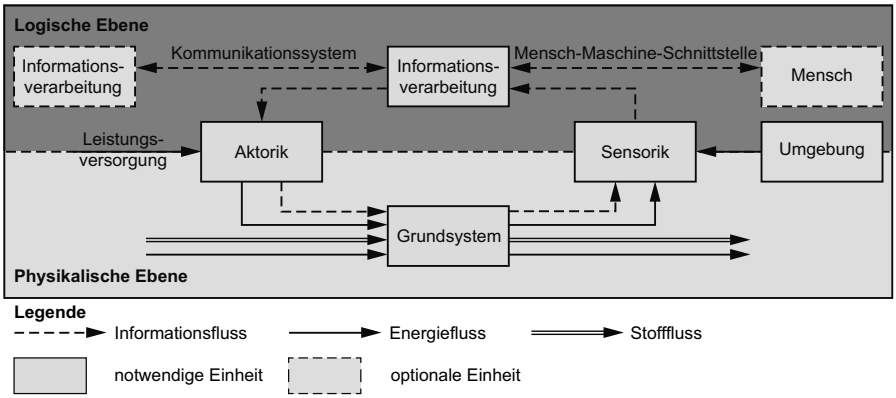


Bild 2-1: Grundstruktur eines mechatronischen Systems nach [VDI2206, S. 14]

Grundsystem: Eine mechanische, elektromechanische, pneumatische oder hydraulische Struktur bzw. eine Kombination daraus bildet das Grundsystem. Als physikalisches System ist es das wesentliche Element der physikalischen Ebene [VDI2206, S. 14].

Sensorik: Die Bestimmung von ausgewählten Zustandsgrößen[8] des Grundsystems ist Aufgabe der Sensorik. Sensoren können physisch vorhandene Messwertaufnehmer, aber auch reine Softwaresensoren (sog. Beobachter) sein. Die aufgenommenen Messwerte sind die Eingangsgröße für die Informationsverarbeitung [VDI2206, S. 14].

Informationsverarbeitung: Die Informationsverarbeitung bestimmt die notwendigen Einwirkungen zur gewünschten Beeinflussung der Zustandsgrößen des Grundsystems. Sie ist das zentrale Element der logischen Ebene und verarbeitet Informationen digital, analog oder gemischt analog/digital [VDI2206, S. 15].

Aktorik: Durch eine gewünschte Aktion wirkt der Aktor (bzw. Aktuator) unmittelbar auf das Grundsystem ein. Dadurch werden die Zustandsgrößen des Grundsystems in gewünschter Weise beeinflusst [VDI2206, S. 15].

Die Elemente der Grundstruktur mechatronischer Systeme sind über Flüsse miteinander verbunden. In Anlehnung an PAHL/BEITZ werden folgende Flüsse unterschieden [FG13, S. 241]:

- **Stoffflüsse** beschreiben den Transport von Flüssigkeiten, Gasen oder festen Körpern (z.B. Wasser).
- **Energieflüsse** bilden den Austausch von mechanischer, thermischer, elektrischer, chemischer oder optischer Energie ab (z.B. elektrischer Strom).

[8] Für technische Systeme sind Zustandsgrößen physikalische Größen, auf Basis derer zu einem Zeitpunkt t_0 der Ablauf des Systems für $t > t_0$ eindeutig bestimmt ist, wenn die Eingangsgrößen des Systems für $t > t_0$ gegeben sind [Föl13, S. 242].

- **Informationsflüsse** umfassen Informationen wie Messgrößen, Steuerimpulse oder Daten, die zwischen den Elementen mechatronischer Systeme ausgetauscht werden.

GAUSEMEIER ET AL. unterteilen mechatronische Systeme in drei Klassen. Klasse 1 adressiert die **räumliche Integration von Mechanik und Elektronik** in Systemen. Kennzeichnend dafür ist eine hohe Dichte von mechanischen und elektronischen Funktionsträgern auf kleinem Bauraum. Die Erfolgspotentiale dieser Klasse liegen in der Miniaturisierung und Funktionsintegration. Zentrale Aufgabe ist die Aufbau- und Verbindungstechnik [GTS14, S. 26].

Klasse 2 umfasst **Mehrkörpersysteme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten**. Durch Sensor-Aktor-Verknüpfungen und eine Informationsverarbeitung sind Systeme dieser Klasse in der Lage selbstständig auf Veränderungen ihrer Umgebung zu reagieren. Die Hauptaufgabe liegt hier im Entwurf und in der Optimierung der Regelungstechnik [GF06, S. 4].

Aus der sich abzeichnenden Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik ergibt sich nun die dritte Klasse mechatronischer Systeme, die bekannte Standards weit übertrifft: **Mechatronische Systeme mit inhärenter Teilintelligenz**. Im Fokus dieser Systeme steht die Art der Informationsverarbeitung. Während konventionelle mechatronische Systeme eine starre Kopplung zwischen Sensorik und Aktorik besitzen, ermöglichen Intelligente Technische Systeme eine Modifikation der Kopplung zwischen sensorischer Eingabe und aktorischer Ausgabe. Dadurch können ITS ihr Systemverhalten flexibel auf sich verändernde Umgebungsbedingungen anpassen [Dum10, S. 19], [GAC+13, S. 14]. Systeme dieser Klasse sind gekennzeichnet durch eine hohe Komplexität und Interdisziplinarität. Vorrangige Aufgabe ist daher ein umfassendes Systems Engineering als durchgängige, domänenübergreifende Disziplin zur Entwicklung technischer Systeme [GDS+13, S. 20]. Im folgenden Abschnitt werden Intelligente Technische Systeme detailliert betrachtet.

2.2.2 Intelligente Technische Systeme

Intelligente Technische Systeme werden durch vier zentrale Eigenschaften charakterisiert [GTD13, S. 49]:

- **Adaptiv**: Sie interagieren mit dem Umfeld und passen sich diesem autonom an. In einem vom Entwickler vorausgedachten Rahmen können sie sich so zur Laufzeit weiterentwickeln.
- **Robust**: In einem dynamischen Umfeld bewältigen sie unerwartete und vom Entwickler nicht berücksichtigte Situationen. So können Unsicherheiten oder fehlende Informationen bis zu einem gewissen Grad ausgeglichen werden.

- **Vorausschauend**: Auf Basis von Erfahrungswissen antizipieren sie die künftigen Wirkungen von Einflüssen; Gefahren werden frühzeitig erkannt und die passenden Strategien zu ihrer Bewältigung ausgewählt.
- **Benutzungsfreundlich**: Sie passen sich dem Benutzungsverhalten an und stehen in einer bewussten Interaktion mit dem Benutzer. Dabei bleibt ihr Verhalten für den Benutzer stets nachvollziehbar.

Wesentlich für die Entwicklung von mechatronischen Systemen zu Intelligenten Technischen Systemen ist die Art der Informationsverarbeitung. Mechatronische Systeme verfügen über eine starre Kopplung zwischen Sensorik und Aktorik. Es handelt sich dabei um ein reaktives System, das anhand fester Vorgaben auf äußere Einflüsse reagieren kann. Durch das Aufbrechen und Erweitern dieser starren Informationsverarbeitung um Kognition[9], entstehen Verhaltensweisen und Funktionen, die bislang nur von biologischen Systemen bekannt waren. Die Integration kognitiver Funktionen[10] ermöglicht eine flexible Anpassung der Systeme an ihre Umgebung und an die Wünsche ihrer Anwender (vgl. Bild 2-2) [Dum10, S. 19] [GAC+13, S. 15]. Ursprünglich stammen diese Überlegungen aus der Kognitionswissenschaft.

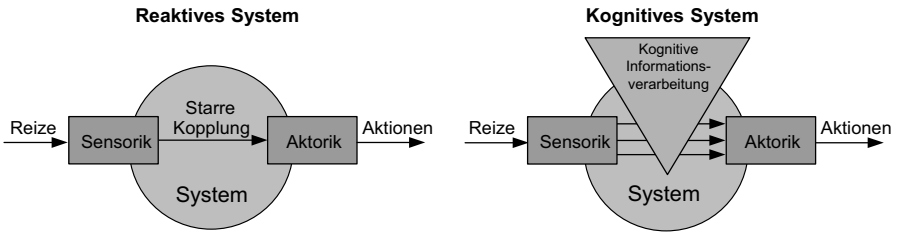


Bild 2-2: Gegenüberstellung eines reaktiven Systems (links) und eines kognitiven Systems (rechts) [Str96, S. 6]

Nach STRUBE sind folgende Merkmale charakteristisch für kognitive Systeme [GRS03, S. 19]:

- Aktive Einbindung in die Umgebung und die Fähigkeit, mit ihr Informationen auszutauschen.
- Flexible und umgebungsadaptive Handlungssteuerung durch die Repräsentation systemrelevanter Daten der Umwelt.

---

[9] Kognition ist Gegenstand der Kognitionswissenschaft, der Kognitionspsychologie sowie von Teilbereichen der Neurowissenschaften, der Linguistik, Philosophie oder Informatik. Die moderne Psychologie und Kognitionswissenschaft definiert Kognition als diejenige Fähigkeit des Menschen, sich intelligent und flexibel zu verhalten [Str96, S. 303], [Len02, S. 9].

[10] STRUBE versteht unter kognitiven Funktionen u.a. das Wahrnehmen und Erkennen, das Enkodieren, Speichern und Erinnern, das Denken und Problemlösen, die motorische Steuerung sowie den Gebrauch der Sprache [Str96, S. 303].

- Lern- und Antizipationsfähigkeit der integrierten Informationsverarbeitung.

Die Möglichkeit, auf Basis kognitiver Informationsverarbeitung das Systemverhalten zu verändern, ist eng mit dem Phänomen des Lernens verknüpft [Str96, S. 6]. Lernen meint den Erwerb neuen Wissens oder die Umstrukturierung bereits vorhandenen Wissens [ZG04, S. 243]. Da die meisten existenziellen Systemeigenschaften aus Sicherheitsgründen reaktiv und reflexartig ablaufen, verfügen Intelligente Technische Systeme neben der modifizierbaren Kopplung weiterhin über eine starre Kopplung [GAC+13, S. 15].

Über die Integration kognitiver Funktionen hinaus, sind Intelligente Technische Systeme in der Lage mit weiteren Systemen zu kommunizieren [GTD13, S. 50]. Die Vernetzung technischer Systeme sowie die Integration digitaler, virtueller und physikalischer Prozesse adressiert der Begriff Cyber-Physical Systems [Lee08, S. 1]. Bis heute sind eine Vielzahl von Definitionen für CPS entstanden. Der folgende Abschnitt untersucht verschiedene Definitionen und stellt die wesentlichen Charakteristika von CPS heraus.

2.2.3 Cyber-Physical Systems

Der Begriff Cyber-Physical Systems wurde erstmals von GILL im Jahr 2006 geprägt. GILL beschrieb damit die Integration von softwaretechnischen Komponenten („Cyber“) in physikalische, biologische oder technische Systeme („Physical“) [LS15, S. xii]. Der Idee von GILL folgend, definiert LEE den Begriff Cyber-Physical Systems wie folgt:

> *“Cyber-Physical Systems (CPS) are integrations of computation and physical processes. Embedded computers and networks monitor and control the physical processes, usually with feedback loops where physical processes affect computations and vice versa” [Lee08, S. 1].*

Eine deutschsprachige Definition stammt von BROY, der den Begriff CPS weiter konkretisiert und wie folgt beschreibt:

> *„Cyber-Physical Systems adressieren die enge Verbindung eingebetteter Systeme zur Überwachung und Steuerung physikalischer Vorgänge mittels Sensoren und Aktuatoren über Kommunikationseinrichtungen mit den globalen digitalen Netzen (dem „Cyberspace“)“ [Bro10, S. 17].*

Nach LEE und BROY sind Cyber-Physical Systems somit vernetzte eingebettete Systeme[11] die Daten der physikalischen Welt mit Hilfe von Sensoren erfassen, sie für netzbasierte Dienste verfügbar machen und durch Aktuatoren unmittelbar auf Prozesse der

---

[11] Definition eingebetteter Systeme nach BROY ET AL.: *„Ein eingebettetes System […] ist eine Software-/Hardware-Einheit, die über Sensoren und Aktuatoren mit einem Gesamtsystem verbunden ist und darin Überwachungs-, Steuerungs- beziehungsweise Regelungsaufgaben übernimmt. In der Regel handelt es sich bei eingebetteten Systemen um reaktive, häufig auch um hybride verteilte Systeme mit Echtzeitanforderungen. Typischerweise sind solche Systeme dem menschlichen Benutzer nicht direkt sichtbar, er interagiert unbewusst mit dem eingebetteten System“* [Bro98, S. 13].

physikalischen Welt einwirken. GEISBERGER/BROY sowie die FORSCHUNGSUNION WIRTSCHAFT – WISSENSCHAFT und ACATECH erweitern den Begriff CPS um den Aspekt der Mensch-Maschine-Interaktion. Sie beschreiben Cyber-Physical Systems als *offene soziotechnische Systeme […], die weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen und über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen* [KWH13, S. 84], [GB12, S. 22].

Die genannten Definitionen von Cyber-Physical Systems adressieren z.T. zwar dieselben Merkmale, eine einheitliche Definition existiert derzeit jedoch nicht. Zur Identifikation von CPS-Merkmalen ist es sinnvoll, Definitionen verschiedener Autoren zu untersuchen und hinsichtlich der genannten Merkmale miteinander zu vergleichen (siehe Tabelle 2-1). Eine Übersicht der analysierten Definitionen zeigt Tabelle A-1 im Anhang.

Tabelle 2-1: Vergleich von CPS-Merkmalen unterschiedlicher Autoren

Autoren \ CPS-Merkmale	Grundsystem	Sensorik	Aktorik	Informationsverarbeitung	HMI	Kommunikationssystem	Daten	Dienste
LEE	■	■	■	■	□	■	□	□
BROY	■	■	■	■	■	■	■	■
GEISBERGER/BROY	■	■	■	■	■	■	■	■
NITRD	■	■	■	■	■	■	□	□
BAHETI/GILL	■	■	■	■	■	■	□	□
NSF	■	■	■	■	■	■	□	□
RAJKUMAR ET AL.	■	■	■	■	■	■	□	□
KAGERMANN ET AL.	■	■	■	■	■	■	■	■
SIMON	■	■	■	■	□	■	□	□
SPATH ET AL.	■	■	■	■	□	■	■	■
BAUERNHANSL	■	■	■	■	■	■	■	■
LICHTBLAU ET AL.	■	■	■	■	■	■	■	□
BISCHOFF ET AL.	■	■	■	■	■	■	■	■

Legende
■ Merkmal von Autor genannt
□ Merkmal von Autor **nicht** genannt

Nahezu übereinstimmend nennen die Autoren die CPS-Merkmale *Grundsystem*, *Sensorik*, *Aktorik*, *Informationsverarbeitung*, *HMI* und *Kommunikationssystem*. Diese Merkmale ergänzen u.a. GEISBERGER/BROY um *Daten* und *Dienste*.

Im Rahmen dieser Arbeit werden CPS daher durch folgende Merkmale definiert [aca11, S. 13], [GB12, S. 22]:

Cyber-Physical Systems sind technische Systeme, die...

… aus einem physikalischen **Grundsystem** bestehen, das in der Regel eine mechanische, elektromechanische, pneumatische oder hydraulische Struktur bzw. eine Kombination daraus ist,

… durch **Sensoren** unmittelbar physikalische Daten erfassen und mit **Aktoren** auf physikalische Vorgänge einwirken,

… mittels **Informationsverarbeitung** Daten auswerten und speichern sowie auf dieser Grundlage aktiv oder reaktiv mit der physikalischen und der digitalen Welt interagieren,

… durch **Kommunikationssysteme** untereinander verbunden sind, und zwar sowohl drahtlos als auch drahtgebunden, sowohl lokal als auch global,

… weltweit verfügbare **Daten** und **Dienste**[12] nutzen,

… über eine Reihe multimodaler Mensch-Maschine-Schnittstellen (**HMI**) verfügen, also für Kommunikation und Steuerung differenzierte und dedizierte Möglichkeiten bereitstellen.

Erst bei Erfüllung aller Merkmale gelten technische Systeme im Rahmen dieser Arbeit als CPS. Ein **Vergleich von CPS und ITS** offenbart weitreichende Gemeinsamkeiten aber auch Unterschiede zwischen beiden Systemen. Sowohl CPS als auch ITS beschreiben Systeme, die über Sensoren und Aktoren verfügen. Ebenso haben sie die Möglichkeit zur Daten-/ Informationsverarbeitung und sind in der Lage aktiv und reaktiv bzw. adaptiv, vorausschauend und robust mit ihrer Umwelt zu interagieren. Darüber hinaus adressieren beide Begriffe Mensch-Maschine-Schnittstellen. Erster Abgrenzungspunkt zwischen ITS und CPS ist die *Kommunikation* mit anderen Systemen. Cyber-Physical Systems sind per Definition mit weiteren Systemen vernetzt. Anders ist es bei Intelligenten Technischen Systemen. Sie sehen die Möglichkeit der Vernetzung vor, gelten jedoch auch ohne Kommunikation mit weiteren Systemen als ITS, sofern sie über die entsprechende Informationsverarbeitung verfügen. Des Weiteren grenzt die Nutzung weltweit verfügbarer *Daten* und *Dienste* CPS und ITS voneinander ab. Beispiele für Daten und Dienste sind Wetterdaten in der Landwirtschaft, Gesundheitsdaten oder pharmazeutische Daten in der Medizin sowie Daten über Lagerbestände und Schichtpläne in der Produktion [GB12, S. 29ff.]. Die Nutzung von Daten und Diensten sehen CPS, nicht aber ITS, explizit vor.

Durch die Möglichkeit zur Kommunikation und Kooperation mit anderen Systemen entstehen vernetzte Systeme, deren Funktionalität und Leistungsfähigkeit die Summe der Einzelsysteme übersteigt. Dabei ist der Systemverbund in der Lage, die Rollen der Einzelsysteme und deren Vernetzung flexibel zu verändern und sich so veränderten Bedingungen anzupassen. Das vernetzte System, das zunehmend in globaler Dimension agiert, wird nicht mehr ausschließlich durch eine globale Steuerung beherrschbar sein, vielmehr muss auch durch lokale Strategien ein global gutes Verhalten erreicht werden

[12] Im Kontext von Cyber-Physical Systems nutzen GEISBERGER/BROY den Begriff Dienste als einen *„…abstrakte[n] Begriff für Dienstleistungen von Systemen und Menschen“* [GB12, S. 244]. KAGERMANN ET AL. bezeichnen Dienste als *„…das Bereitstellen von Leistungen zur Erfüllung eines definierten Bedarfs“* [KWH13, S. 85]. Der Begriff „Service“ ist synonym zu verwenden.

[Dum10, S. 19], [GAC+13, S. 14f.]. Bild 2-3 verdeutlicht den Zusammenschluss verschiedener Teilsysteme zu einem CPS im Kontext der industriellen Produktion[13].

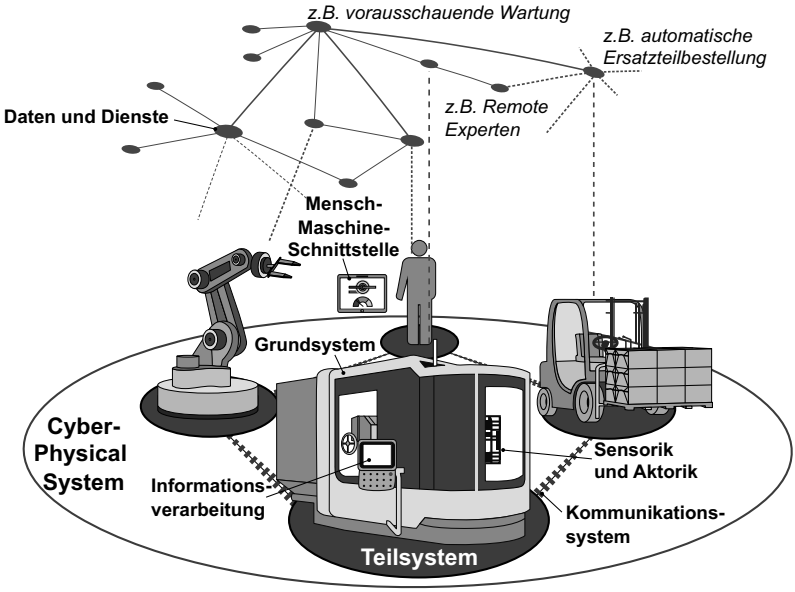


Bild 2-3: Cyber-Physical System in der industriellen Produktion

Einzelne Teilsysteme wie z.B. eine Werkzeugmaschine, ein Roboter oder ein Transportsystem, die jeweils über ein Grundsystem, Sensorik und Aktorik, eine Informationsverarbeitung sowie eine Mensch-Maschine-Schnittstelle verfügen, vernetzen sich zu einem Cyber-Physical System. Durch die Nutzung von Daten und Diensten (z.B. automatische Ersatzteilbestellung) agieren sie mit der physikalischen und mit der digitalen Welt.

Im Zusammenhang mit vernetzten Systemen existiert in der Literatur zusätzlich der Begriff **System of Systems** (SoS). Nach MAIER gilt ein System, das aus mehreren individuellen Systemen besteht, als System of Systems, wenn zwei charakteristische Merkmale erfüllt werden: 1) die individuellen Systeme erfüllen einen eigenen Zweck und können unabhängig vom übergeordneten System betrieben werden (*Operative Unabhängigkeit*); 2) die individuellen Systeme werden unabhängig voneinander entwickelt und können getrennt erworben werden (*Verwaltungsunabhängigkeit*). Darüber hinaus weist ein SoS in der Regel ein emergentes Verhalten auf. Es ist also in der Lage neue Funktionen oder Eigenschaften infolge des Zusammenspiels der Einzelsysteme herauszubilden. Folglich

[13] Cyber-Physical Systems in der produzierenden Industrie werden in der Literatur z.T. als Cyber-Physical Production Systems (CPPS) bezeichnet (vgl. [KWH13, S. 84]). Hierbei handelt es sich jedoch um keinen feststehenden Begriff. Daher werden technische Systeme in der Produktion im Rahmen dieser Arbeit als Cyber-Physical Systems bezeichnet, sofern die in Abschnitt 2.2.3 definierten Merkmale erfüllt sind.

unterliegt das SoS einer evolutionären Entwicklung, die entlang des gesamten Produktlebenszyklus zu ständigen Systemveränderungen führt [Mai98, S. 272ff.], [KK11, S. 237f.], [HWF+12, S. 37]. Trotz der großen Ähnlichkeit von CPS und SoS, gilt es die Begriffe zu unterscheiden. Ein Cyber-Physical System kann ein System of Systems oder ein Bestandteil davon sein, muss es aber nicht. Somit gilt ein CPS als SoS, wenn die Merkmale *operative Unabhängigkeit* und *Verwaltungsunabhängigkeit* durch ein einzelnes CPS oder die Vernetzung mehrerer CPS erfüllt werden. Demgegenüber ist ein SoS nicht zwangsläufig ein CPS, da es unter Umständen nicht alle Merkmale eines CPS aufweist (z.B. keine Daten und Dienste oder keine Mensch-Maschine-Schnittstelle). Im Rahmen dieser Arbeit werden Cyber-Physical Systems fokussiert und die Merkmale von Systems of Systems nicht explizit berücksichtigt.

Die **Anwendungsbereiche** von CPS sind vielfältig. Schon heute greifen Fahrzeuge mit vernetzter Navigationssoftware auf Stauinformationen aus aktuellen Bewegungsprofilen anderer Fahrzeuge zu und schlagen alternative Routen vor. Die Energieversorgung wird durch sog. Smart Grids revolutioniert. Smart Grids sind intelligente Stromnetze, in denen alle Komponenten, vom Stromerzeuger und -speicher über die Netzsteuerung bis zum Verbraucher, miteinander vernetzt sind. Über das entstehende Energieinformationsnetz kann dem Verbraucher die zunehmend dezentral erzeugte Energie mit hohem Wirkungsgrad zugeführt werden. Ob im Verkehr, bei der Energieversorgung, in der Medizin oder in der Produktion: Cyber-Physical Systems verändern technische Systeme, gleichzeitig aber auch Marktstrukturen, Geschäftsmodelle und Wettbewerbssituationen [aca11, S. 5].

Fazit: Mit der Transformation mechatronischer Systeme hin zu CPS geht eine steigende Komplexität und Interdisziplinarität der Systeme einher. Individuelle Einzelsysteme mit festen Systemgrenzen verändern sich zu hoch vernetzten Systemverbünden, die weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen und ihren Verbund bedarfsgerecht anpassen. Dabei interagieren sie z.T. mit Systemen, die während des Systementwurfs noch nicht identifiziert wurden [GB12, S. 61]. Anbieter vernetzter Systeme stellt dies vor erhebliche Herausforderungen, da sowohl die Rolle ihres Systems während der Nutzung als auch ihre Interaktion mit anderen Systemen zum Zeitpunkt der Entwicklung unklar sind. Ansätze im Sinne eines System-of-Systems-Engineering (SoSE) fehlen noch weitestgehend bzw. sind nur im Kontext militärischer Operationen bekannt [KK11, S. 234].

2.3 Wandel der industriellen Produktion

Die zunehmende Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft wird die industrielle Produktion radikal verändern. Ausdrücke wie die vierte industrielle Revolution oder Industrie 4.0 adressieren die Verschmelzung der Produktion mit modernster Informations- und Kommunikationstechnik, die weitreichende Auswirkungen auf industrielle Wertschöpfungsketten haben wird. Zum einen sind produzierende Unternehmen wie Automobilhersteller betroffen (Leitmarkt), deren Wertschöpfungskette sich durch den Einsatz von CPS massiv verändern wird. Andererseits betrifft die Veränderung die Hersteller von

Produktionstechnik (Leitanbieter), deren Technologien und Produkte sich zu CPS weiterentwickeln [KWH13, S. 5]. Die vorliegende Arbeit adressiert Unternehmen der Anbieterseite, insbesondere Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus, deren Produkte sich von mechatronischen Systemen hin zu CPS wandeln und dadurch erfolgversprechende Potentiale für neue und veränderte Marktleistungen im Sinne von Produkt-Service-Systemen bzw. hybriden Leistungsbündeln entstehen. Nachfolgend werden zunächst die Auswirkungen der Digitalisierung auf die gesamte industrielle Produktion beschrieben (Abschnitt 2.3.1). Anschließend erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Auswirkungen auf den Maschinen- und Anlagenbau (Abschnitte 2.3.2 und 2.3.3).

2.3.1 Industrie 4.0 – Digitalisierung der industriellen Produktion

Der Begriff industrielle Revolution wird oft im Kontext einer technologiegetriebenen sprunghaften Produktivitätszunahme verwendet. In der Vergangenheit sind diese dann aufgetreten, wenn die Potentiale der aktuellen Technologien ausgeschöpft waren und sich der Produktivitätszuwachs verlangsamte [EDB+15, S. 13]. Bild 2-4 zeigt eine Übersicht bisheriger industrieller Revolutionen, die nachfolgend näher erläutert werden.

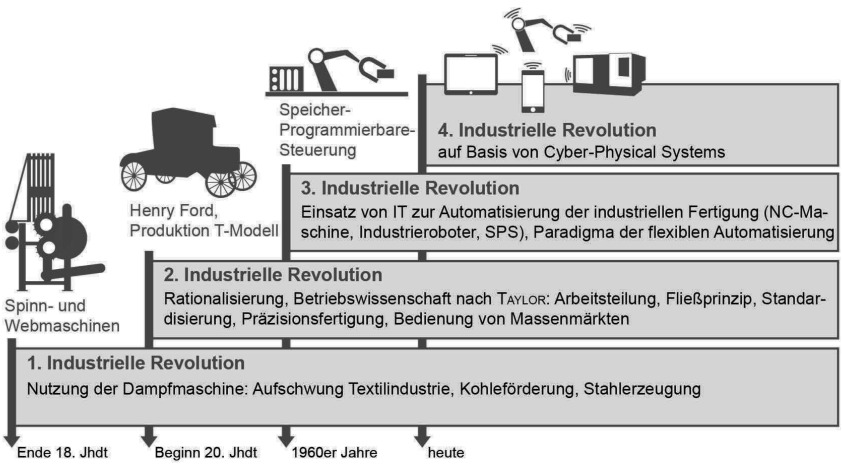


Bild 2-4: Die vier Stufen der industriellen Revolution nach DFKI [KWH13, S. 17]

Die **erste industrielle Revolution** bezeichnet den Übergang von der reinen Handarbeit zur maschinellen Produktion im 18. Jahrhundert. Treibende Technologie war die Dampfmaschine, mit der die Bereitstellung von Energie an beliebigen Orten möglich war. Menschliche Arbeitskraft konnte so durch mechanische Produktionsanlagen ersetzt werden. Erzeugnisse z.B. in der Textilindustrie wurden dadurch schneller und in größerer Stückzahl produziert [KWH13, S. 17f.], [BSM+14, S. 9], [GDJ+14, S. 4f.].

Die flächendeckende Elektrifizierung, Zunahme der Mechanisierung sowie der Einsatz motorisierter Transportmittel stehen für die **zweite industrielle Revolution** zu Beginn

des 20. Jahrhunderts. Neben neuen Technologien charakterisiert die zweite industrielle Revolution auch die Form der Arbeitsorganisation. Die von TAYLOR geprägte wissenschaftliche Betriebsführung (Taylorismus[14]) sowie die Standardisierung, Präzisionsfertigung und Fließfertigung ermöglichten erhebliches Wachstum und die Versorgung der Massenmärkte [KWH13, S. 17f.], [BSM+14, S. 9], [GDJ+14, S. 4f.].

Die Erfindung und Verbreitung des Computers in der Mitte des 20. Jahrhunderts markiert den Beginn der **dritten industriellen Revolution**. Computersysteme übernahmen nun weite Teile der Steuerung von Maschinen und Prozessen. Charakteristische Technologien sind NC-Maschinen[15], Industrieroboter oder Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)[16], die im Vergleich zu konventionell automatisierten mechanischen Systemen eine höhere Flexibilität ermöglichten [KWH13, S. 17f.], [BSM+14, S. 9], [GDJ+14, S. 4f.].

Derzeit steht die industrielle Produktion vor einem erneuten Wandel: einer **vierten industriellen Revolution (Industrie 4.0)**. Wesentliche technische Grundlage für die vierte industrielle Revolution sind Cyber-Physical Systems. In der Produktion sind CPS z.B. vernetzte Maschinen, Lagersysteme oder Betriebsmittel, die eigenständig Informationen austauschen, Aktionen auslösen und sich selbstständig steuern. Durch CPS entstehen sog. Smart Factories, in denen Menschen, Maschinen, Anlagen, Logistik und Produkte miteinander kommunizieren und kooperieren [Pla16-ol]. Die Smart Factory besitzt keine festen Strukturen, sondern ist flexibel und passt ihre Struktur sowie ihre Parameter situationsspezifisch und autonom an [KWH13, S. 5]. Über die Vernetzung sämtlicher Prozesse innerhalb eines Unternehmens hinaus, erfolgt auch eine unternehmensübergreifende Vernetzung. Alle an der Wertschöpfung beteiligten Unternehmen bilden ein Wertschöpfungsnetzwerk, das sich an Veränderungen im Markt oder in der Lieferkette flexibel anpasst [aca11, S. 23]. Die Veränderungen der industriellen Produktion durch Industrie 4.0 fassen die FORSCHUNGSUNION WIRTSCHAFT – WISSENSCHAFT und ACATECH in drei übergeordneten Aspekten zusammen (vgl. Bild 2-5) [KWH13, S. 35f.], [DGK+15, S. 12ff.].

---

[14] Taylorismus bezeichnet das von TAYLOR begründete Prozesssteuerungsprinzip, das durch Aufteilung der Arbeit in kleine, einfach auszuführende Tätigkeiten, die Produktivität menschlicher Arbeit steigern soll. Weiterführende Informationen zum Taylorismus sind [Tay06] zu entnehmen.

[15] NC-Maschinen sind numerisch gesteuerte Maschinen (numerical control), die Arbeitsschritte zur Werkstückbearbeitung auf Basis eines Computerprogramms (NC-Programm) durchführen. Die Steuerinformationen werden z.B. aufgrund bestehender CAD-Daten (Computer Aided Design) erzeugt [GP14, S. 360].

[16] Eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) ist ein Gerät zur Steuerung und Regelung von Maschinen und Anlagen. Sie verarbeitet Eingangssignale von Sensoren und steuert Aktoren. Bestehend aus Zentralprozessor, Arbeitsspeicher, Ein- und Ausgabelogik sowie Bus-System entspricht sie dem Aufbau eines Rechners. Eine SPS ist frei programmierbar und wird insbesondere dort eingesetzt, wo eine Signalverarbeitung in harter Echtzeit erforderlich ist [Lan04].

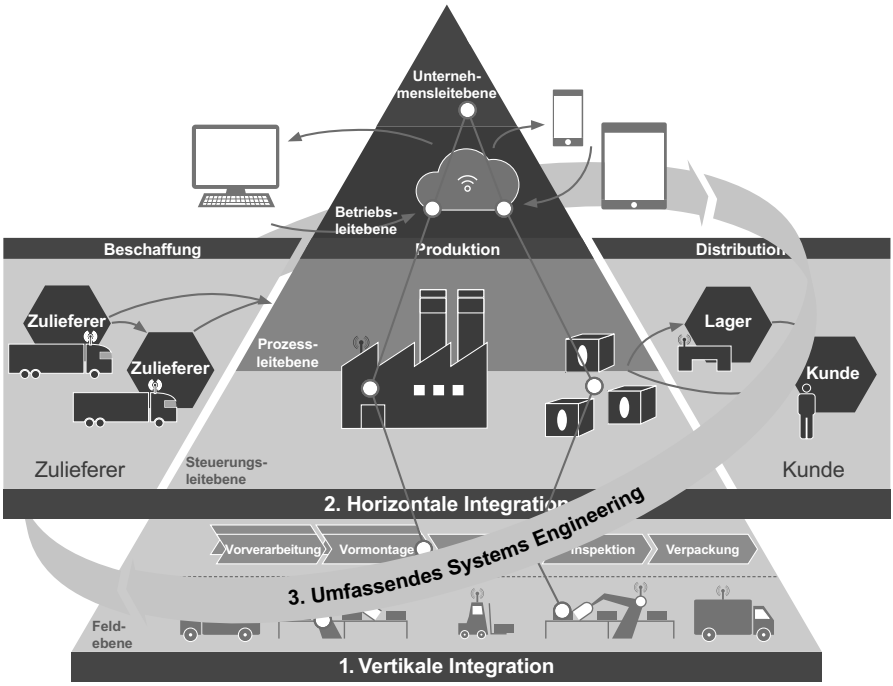


Bild 2-5: Drei übergeordnete Aspekte von Industrie 4.0 nach [DGK+15, S. 15]

Vertikale Integration: Vertikale Integration steht für die Verknüpfung der verschiedenen IT-Systeme auf den unterschiedlichen Hierarchieebenen eines Unternehmens – von der Feldebene über die Steuerungs- und Prozessleitebene bis hin zur Betriebs- und Unternehmensleitebene – zu einer durchgängigen Lösung. Physische Prozesse inklusive ihrer Ressourcen können so mit Geschäftsprozessen über verschiedene Unternehmensebenen hinweg synchronisiert werden [KWH13, S. 36f.].

Horizontale Integration: Die Ad-hoc-Vernetzung von intelligenten Maschinen, Betriebsmitteln, Produkten/Werkstücken sowie Lagersystemen zu einem leistungsfähigen Wertschöpfungsnetzwerk, wird durch die horizontale Integration beschrieben. Einzelne Prozessschritte entlang der Wertschöpfungskette wie Beschaffung, Produktion und Distribution werden durch die Verknüpfung der IT-Systeme zu einer durchgängigen Lösung, auch über Unternehmensgrenzen hinweg, integriert. Somit kann der gesamte Prozess von der Bestellung bis zur Lieferung zwischen den beteiligten Partnern in vielfältigen Dimensionen wie Qualität, Preis, Risiko etc. dynamisch verhandelt werden [KWH13, S. 35].

Umfassendes Systems Engineering: Systems Engineering (SE) ist ein durchgängiger domänenübergreifender Ansatz zur Entwicklung multidisziplinärer technischer Systeme. SE stellt das System in den Mittelpunkt und umfasst die Gesamtheit aller Entwicklungsaktivitäten. Im Vordergrund stehen die Interdisziplinarität und die zielgerichtete ganzheitliche Problembetrachtung [GDS+13, S. 20]. SE hat das Potential, der steigenden

Produkt- und Prozesskomplexität, der verstärkten Interdisziplinarität und zunehmend verteilten Wertschöpfung bei Industrie 4.0 gerecht zu werden. Die Digitalisierung unterstützt die Ansätze des Systems Engineering durch eine lebenszyklusüberspannende Verfügbarkeit und Verknüpfung aller Produkt- und Produktionsdaten [KWH13, S. 35f.]. Eine ausführlichere Behandlung der Thematik Systems Engineering erfolgt in Abschnitt 2.4.4.

Die erwarteten **Potentiale von Industrie 4.0** sind hoch. Durch die steigende Flexibilität der gesamten Wertschöpfungsprozesse sollen kundenindividuelle Produkte bis hin zur Losgröße 1 zu den Konditionen eines Massenherstellers produziert werden. Ressourcen sollen dabei effizienter genutzt und die Arbeit an die Bedürfnisse des Menschen besser angepasst werden. Zudem werden neue Wertschöpfungspotentiale durch neue Dienstleistungen erwartet, die z.B. auf der Erfassung und Auswertung von Daten beruhen. Für Deutschland als Hochlohnstandort bietet Industrie 4.0 die Möglichkeit, langfristig wettbewerbsfähig gegenüber Niedriglohnländern zu bleiben [KWH13, S. 20], [aca11, S. 23]. Die hohe Relevanz für den Wirtschaftsstandort Deutschland unterstreicht die BUNDESREGIERUNG, die Industrie 4.0 als eines von zehn Zukunftsprojekten[17] ernannt hat. Ziel des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 ist es, Deutschland zum Leitmarkt und gleichzeitig zum Leitanbieter von Cyber-Physical Systems zu machen [BMB14, S. 50].

Nachfolgend wird der Fokus auf Unternehmen der Anbieterseite gelegt. Konkret sind dies u.a. Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus, deren Marktleistungen sich durch Weiterentwicklung ihrer Erzeugnisse hin zu CPS verändern werden. In den folgenden Abschnitten werden die Branche des Maschinen- und Anlagenbaus charakterisiert (Abschnitt 2.3.2) und die konkreten Auswirkungen von CPS auf dessen Marktleistung beleuchtet (Abschnitt 2.3.3).

2.3.2 Maschinen- und Anlagenbau in Deutschland

Der Maschinen- und Anlagenbau umfasst die Entwicklung, Planung und Herstellung grundlegender Betriebsmittel für alle Branchen der Wirtschaft [BMB16-ol], [Ben13, S. 9], [BSM+14, S. 31]. Mit einem erwirtschaftetem Gesamtumsatz von 218 Milliarden Euro im Jahr 2015 und einem Bruttowertschöpfungsanteil von über 3% gilt der Maschinen- und Anlagenbau neben der Fahrzeugindustrie (297 Milliarden Euro Umsatz im Jahr 2015) und der Elektroindustrie[18] (179 Milliarden Euro Umsatz im Jahr 2015) als einer der **wichtigsten deutschen Industriezweige**. Zudem ist der Maschinen- und Anlagenbau mit ca. 1 Mio. Beschäftigten (Jahresdurchschnitt in 2015) und über 6.300 Unternehmen im Jahr 2014 einer der größten industriellen Arbeitgeber in Deutschland [VDM16, S. 7].

---

[17] Zukunftsprojekte der Bundesregierung sind gesellschaftliche und technologische Entwicklungen, die besondere Bedeutung für Deutschland haben. Neben *Industrie 4.0* sind weitere Zukunftsprojekte u.a. *Nachhaltige Mobilität*, *Intelligenter Umbau der Energieversorgung* oder *Nachwachsende Rohstoffe als Alternative zum Öl* [BMB14, S. 50].

[18] Elektroindustrie ohne Datentechnik

Die umsatzstärksten Fachzweige (gemessen am Maschinenaußenhandel) im Jahr 2015 waren die Antriebstechnik, die Fördertechnik, Werkzeugmaschinen sowie die allgemeine Lufttechnik [VDM16, S. 27].

Deutsche Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus sind stark **exportorientiert**. In 24 von 31 vergleichbaren Fachzweigen stehen deutsche Unternehmen auf den ersten drei Rängen, wobei 18 Fachzweige sogar auf erster Stelle stehen. Stärkste Konkurrenten für deutsche Unternehmen sind Hersteller aus China und den USA mit 23 und 18 Fachzweigen auf den Rängen eins bis drei [VDM16, S. 30]. Neben der führenden Position im Außenhandel sehen sich viele deutsche Maschinen- und Anlagenbauer als **Technologieführer**. In einer Umfrage von McKinsey & Company und dem VDMA aus dem Jahr 2014 bezeichneten sich 99% von 333 befragten Unternehmen als Premiumanbieter. Von den 99% sehen sich wiederum 64% als reine Premiumanbieter, 22% im mittleren Preissegment und 13% im Premium- und im mittleren Preissegment [VDM14, S. 28]. Trotz Wettbewerbs- und Technologieführerschaft in vielen Bereichen sind deutsche Unternehmen einem wachsenden Wettbewerbsdruck ausgesetzt. Grund dafür sind u.a. ausländische Unternehmen, die durch steigende Produktqualität und niedrige Preise zunehmend wettbewerbsfähiger werden. 45% der befragten Unternehmen rechnen mit rückläufigen Marktanteilen, 81% gehen von einem Absinken der Preise aus [VDM14, S. 44].

Bei den **Erzeugnissen des Maschinen- und Anlagenbaus** handelt es sich um Investitionsgüter zur Herstellung anderer Produkte [BSM+14, S. 31]. Das Produktspektrum des Maschinen- und Anlagenbaus ist weit gefächert und reicht von Armaturen und Kompressoren bis zu hochspezialisierten Werkzeugmaschinen. Einen Überblick über die Fachzweige des Maschinenbaus gemäß des Statistischen Bundesamts zeigt Bild 2-6.

Nicht wirtschaftszweigspezifische Maschinen

- Verbrennungsmotoren und Turbinen (ohne Motoren für Luft- und Straßenfahrzeuge)
- Hydraulische und pneumatische Komponenten und Systeme
- Pumpen und Kompressoren*
- Armaturen*
- Lager, Getriebe, Zahnräder und Antriebselemente

Sonstige nicht wirtschaftszweigspezifische Maschinen

- Öfen und Brenner
- Hebezeuge und Fördermittel
- Büromaschinen (ohne Datenverarbeitungsgeräte und periphere Geräte)
- Handgeführte Werkzeuge mit Motorantrieb
- Kälte- und lufttechnische Erzeugnisse, nicht für den Haushalt
- Sonstige nicht wirtschaftszweigspezifische Maschinen*

Maschinen für sonstige bestimmte Wirtschaftszweige

- Maschinen für die Metallerzeugung, Walzeinrichtungen und Gießmaschinen
- Bergwerks-, Bau- und Baustoffmaschinen
- Maschinen für die Nahrungs- und Genussmittelerzeugung und die Tabakverarbeitung
- Maschinen für die Textil- und Bekleidungsherstellung und die Lederverarbeitung
- Maschinen für die Papiererzeugung und -verarbeitung
- Maschinen für die Verarbeitung von Kunststoffen u. Kautschuk
- Maschinen für sonstige bestimmte Wirtschaftszweige*

Werkzeugmaschinen

- Werkzeugmaschinen für die Metallverarbeitung
- Sonstige Werkzeugmaschinen*

Land- und forstwirtschaftliche Maschinen

*anderweitig nicht genannt

Bild 2-6: Übersicht der Fachzweige im Maschinenbau nach Statistischem Bundesamt [SB08, S. 96]

Trotz unterschiedlicher Systeme mit vielfältigen Anwendungsbereichen haben die Erzeugnisse des Maschinen- und Anlagenbaus in der Regel folgende **Eigenschaften** [För13, S. 15], [BIT14, S. 8]:

- Investitionsgüter
- Mechatronische Systeme
- Komplexe Systeme (hohe Anzahl von Modulen und Einzelteilen)
- Kundenindividuelle Herstellung
- Lange Innovationszyklen (im Gegensatz zu anderen Branchen wie der IKT)
- Lange Nutzungszeit

Die hohe Anzahl der Fachzweige im Maschinen- und Anlagenbau deutet auf die starke Spezialisierung der Unternehmen hin. Diese spiegelt sich u.a. in den **mittelständischen Unternehmensstrukturen** wider. Laut STATISTISCHEM BUNDESAMT beschäftigten ca. 85,4% der Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau im Jahr 2013 weniger als 250 Mitarbeiter, ca. zwei Drittel sogar weniger als 100 Mitarbeiter. Lediglich 2% der Unternehmen haben mehr als 1.000 Mitarbeiter [SB14, S. 18]. In 2013 erzielten die Unternehmen mit weniger als 250 Beschäftigten einen Umsatzanteil von 29,8% im gesamten Maschinenbau. 37,1% des Umsatzes entfielen auf Unternehmen mit 250 bis unter 1.000 Beschäftigten und 33,1% auf Unternehmen mit über 1.000 Beschäftigten [SB14, S. 40]. Größere Unternehmen erreichen im Vergleich zu kleinen und mittleren Unternehmen im Durchschnitt eine höhere Profitabilität. Gründe dafür sind z.B. die Professionalisierung von Prozessen, verstärkte Innovationstätigkeit, Skaleneffekte und bessere Verhandlungspositionen gegenüber Lieferanten. Kleine und mittlere Unternehmen (KMU)[19] hingegen sind aufgrund eines hohen Zentralisierungsgrads und kurzer Kommunikationswege, hoher Kundenorientierung und -nähe flexibler als große Unternehmen und können so besser auf Marktveränderungen oder individuelle Kundenwünsche reagieren [VDM14, S. 19], [Ben13, S. 10], [EDB+15, S. 22].

Trotz Wettbewerbs- und Technologieführerschaft in vielen Bereichen sieht sich der deutsche Maschinen- und Anlagenbau mit einer **Veränderung der Wettbewerbsbedingungen** konfrontiert. So geben 74% der von MCKINSEY & COMPANY und dem VDMA befragten Unternehmen an, dass die *Nachfrage nach kundenspezifischen System- und Integrationslösungen* einer der Top-Trends im Maschinen- und Anlagenbau sei. Weitere wichtige Trends sind die *Verlagerung der Nachfrage in außereuropäische Länder* (70%), die *steigende Bedeutung von Aftersales und Service* (60%), *zunehmender Wettbewerb durch*

[19] Gemäß der Empfehlung der EUROPÄISCHEN UNION gelten Unternehmen, die weniger als 250 Mitarbeiter beschäftigen und einen Jahresumsatz von höchsten 50 Mio. Euro bzw. eine Jahresbilanzsumme von höchstens 43 Mio. Euro haben, als kleine und mittlere Unternehmen [EU03, S. 39].

neue Marktteilnehmer (47%), *wachsende Bedeutung des Wirtschaftsstandorts Deutschland* (45%) sowie die *Revolutionierung von Produkten und Prozessen durch technologische Innovationen* (41%) [VDM14, S. 40ff.]. Der letztgenannte Trend umfasst neben neuen Materialen insbesondere Innovationen durch Cyber-Physical Systems und Industrie 4.0. Die Auswirkungen von CPS auf die Marktleistung des Maschinen- und Anlagenbaus wird im folgenden Abschnitt untersucht.

2.3.3 Veränderung der Marktleistung im Maschinen- und Anlagenbau durch Cyber-Physical Systems

Eine **Marktleistung** ist ein Angebot am Markt und umfasst reine Sachleistungen, reine Dienstleistungen oder eine Kombination von Sach- und Dienstleistungen [Sto10, S. 12], [GP14, S. 160]. **Sachleistungen** sind materielle Produkte, die von Unternehmen entwickelt, produziert und verkauft werden [Fuc07, S. 8]. Im Maschinen- und Anlagenbau sind dies in der Regel technische Systeme wie Werkzeugmaschinen, Pumpen oder Armaturen.

Dienstleistungen sind von einer natürlichen oder juristischen Person erbrachte immaterielle Leistungen zur Befriedigung eines Bedürfnisses [HW00, S. 725]. Dienstleistungen sind selbstständig marktfähig [Hal15, S. 14] und lassen sich allgemein durch die Dimensionen Ergebnis, Prozess und Potential beschreiben [BS06b] S. 56]. Die *Ergebnisdimension* stellt die Wirkung einer Dienstleistung beim Kunden in den Mittelpunkt. Dabei ist die Dienstleistung stets ein Prozess zwischen dienstleistungsanbietender und dienstleistungsnachfragender Wirtschaftseinheit (*Prozessdimension*). Zur Erbringung der Dienstleistung muss der Anbieter die Fähigkeit und Ressourcen zur Leistungserbringung bereitstellen (*Potentialdimension*). Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff **Service** gemäß dem angloamerikanischen Begriffsverständnis[20] synonym mit dem Begriff Dienstleistung verwendet.

Die Kombination von Sach- und Dienstleistungen bezeichnen Begriffe wie **Produkt-Service-Systeme** [Sch10, S. 7], **hybride Leistungsbündel** [PAS1094, S. 6], oder **Performance Contracting-Leistungen** [SD06, S. 467]. Es handelt sich dabei um auf den Kunden ausgerichtete Problemlösungen mit Sach- und Dienstleistungsanteilen [MU12, S. 6]. Diese und weitere Begriffe fokussieren unterschiedliche Details von Sach- und Dienstleistungskombinationen, die im Zuge der Arbeit nicht relevant sind [Sto10, S. 12]. Im Folgenden wird der Begriff Produkt-Service-Systeme verwendet, um Leistungsbündel mit aufeinander abgestimmten Sach- und Dienstleistungen zu beschreiben.

Dienstleistungen produzierender Unternehmen sind sog. **industrielle Dienstleistungen**, die in direkter oder indirekter Verbindung mit der Sachleistung vermarktet werden

[20] Der Begriff Service wird in der Literatur unterschiedlich verwendet. Deutschsprachige Autoren nutzen den Service-Begriff häufig nur für Zusatzleistungen zum Produkt. Gemäß der angloamerikanischen Literatur werden die Begriffe Service und Dienstleistung im Rahmen dieser Arbeit synonym verwendet [Hal15, S. 14].

[SD06] S. 467], [HG96, S. 253ff.]. Dienen industrielle Dienstleistungen vordringlich zur Absatzförderung der Sachleistung, so ist von **produktbegleitenden Dienstleistungen** die Rede. Hierbei handelt es sich im Maschinen- und Anlagenbau zum Beispiel um Finanzierung, Umbau oder Modernisierung der Sachleistung (gestaltende Dienstleistungen), Wartung, Ersatzteildienst und Schulungen (betreuende Dienstleistungen) oder um beratende Dienstleistungen wie Ingenieurleistungen für die Produktentwicklung des Kunden. Demgegenüber stehen Performance Contracting-Leistungen bzw. **Produkt-Service-Systeme**, bei denen Unternehmen Leistungsbündel aus Sach- und Dienstleistungen verkaufen und den Kunden so neue Geschäftsmodelle anbieten können [BM01], [SD06, S. 467ff.]. Bild 2-7 stellt weitere Differenzierungsmöglichkeiten von Dienstleistungen dar, wie z.B. konsumtive Dienstleistungen, bei denen Konsumenten die Nachfrager sind. Aufgrund der Ausrichtung auf Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus werden im Rahmen dieser Arbeit nur industrielle Dienstleistungen betrachtet.

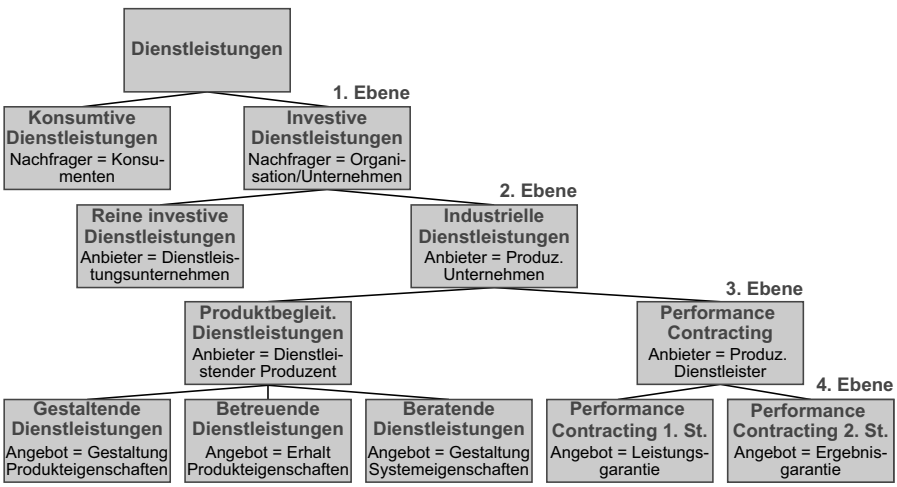


Bild 2-7: Differenzierung des Dienstleistungsbegriffs nach SPATH und DEMUß [SD06, S. 468]

Klassischerweise ist die Marktleistung im Maschinen- und Anlagenbau heutzutage eine Kombination aus Sach- und produktbegleitenden Dienstleistungen [EDB+15, S. 22]. Im Mittelpunkt der Marktleistung steht dabei das materielle Produkt. Für viele deutsche Unternehmen ist die Sachleistung das wesentliche Abgrenzungsmerkmal gegenüber Wettbewerbern, z.B. aufgrund hoher Qualität oder spezieller Technologien [SD06, S. 464]. Hinzu kommen ein tiefes Verständnis von Fertigungsprozessen sowie die Nähe zur Kundenschnittstelle, die den deutschen Maschinen- und Anlagenbau vor Mittbewerbern, insbesondere aus dem unteren Preissegment, differenzieren [BLO+15, S. 21].

Durch die Veränderung der Wettbewerbsbedingungen ist die Wettbewerbs- und Technologieführerschaft vieler deutscher Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau bedroht.

Wettbewerber, insbesondere aus dem Ausland, steigern ihre Produktivität und Innovationskraft, produzieren qualitativ zunehmend hochwertigere Produkte und verringern so das technische Differenzierungspotential deutscher Unternehmen. Hinzu kommen steigende Energiekosten, knappere Rohstoffe und die steigende Nachfrage nach kundenindividuellen Lösungen. Das stellt Unternehmen vor die Herausforderung, ganzheitliche und komplexere Lösungen anzubieten [SD06, S. 464], [BMB13, S. 6], [VM14, S. 40ff.].

CPS bieten dem deutschen Maschinen- und Anlagenbau nun weitreichende **Potentiale**, um ihre Marktleistung, ausgehend von Sach- und produktbegleitenden Dienstleistungen, zu individuellen Produkt-Service-Systemen zu verändern und sich so vom Wettbewerb zu differenzieren [BMB13, S. 7]. Diese Potentiale beruhen u.a. auf der Erfassung, Verarbeitung und Auswertung von **Daten**. Durch die Analyse von Maschinendaten können z.B. bessere Aussagen über den Verschleiß von Komponenten getroffen und Maschinenausfälle durch rechtzeitige Wartung verringert werden. Daten haben somit wesentliche Einflüsse auf die Dienstleistung, die sowohl verbessert (z.B. präventive Instandhaltung) als auch erweitert werden kann, z.B. durch eine Dienstleistung zur Optimierung von Kundenprozessen auf Basis von Datenauswertungen [VDI13, S. 5], [Kag14, S. 608f.], [BLO+15, S. 19]. Weitere Potentiale ergeben sich durch die **zunehmende Intelligenz** der technischen Systeme, die eine flexible Anpassung der Systeme an ihre Umgebung und an die Wünsche ihrer Anwender ermöglicht [Dum10, S. 19], [GAC+13, S. 15]. Im Kontext der Produktion bedeutet das z.B. einen ressourceneffizienteren Betrieb, eine bedarfsgerechte Anpassung an die menschliche Arbeitskraft und verbesserte Produktionsabläufe [aca11, S. 23]. **Vernetzung** ist eine weitere Fähigkeit von CPS, die es dem Maschinen- und Anlagenbau ermöglichen wird, verbesserte und neue Marktleistungen anzubieten. Beispielsweise können Unternehmen per Fernzugriff Diagnosen für ausgefallene Maschinen erstellen und dadurch eine zeitaufwendige Fehlersuche beim Kunden vor Ort verhindern. Zudem steigert die Vernetzung der Systeme die Effizienz in Prozessabläufen, da die Intransparenz entlang weiter Teile der Wertschöpfung reduziert und Prozesse besser aufeinander abgestimmt werden können. Darüber hinaus erhalten Unternehmen durch CPS einen **digitalen Kundenzugang**. Dieser ermöglicht es Unternehmen, Informationen über ihr System und das Kundenverhalten während der Nutzungsphase zu gewinnen und diese z.B. zur Verbesserung der Systeme zu verwenden [BLO+15, S. 19].

Fazit: CPS verändern die gesamte Marktleistung des Maschinen- und Anlagenbaus (siehe Bild 2-8). Diese Veränderung bietet vielfältige Potentiale, stellt die Unternehmen aber auch vor Herausforderungen. In Bezug auf die Sachleistung wird der Wandel heutiger Systeme hin zu CPS die Komplexität und Interdisziplinarität maschinenbaulicher Erzeugnisse erhöhen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Darüber hinaus stellen die technischen Möglichkeiten durch CPS Unternehmen vor nahezu unüberschaubare Möglichkeiten zur Veränderung ihrer Sach- und ihrer Dienstleistungen. Aus den vielfältigen Möglichkeiten gilt es für die Unternehmen, die passenden Lösungen zu identifizieren und ihre oft historisch gewachsenen Markleistungen mit innovativen Produkt-Service-Systemen weiterzuentwickeln.

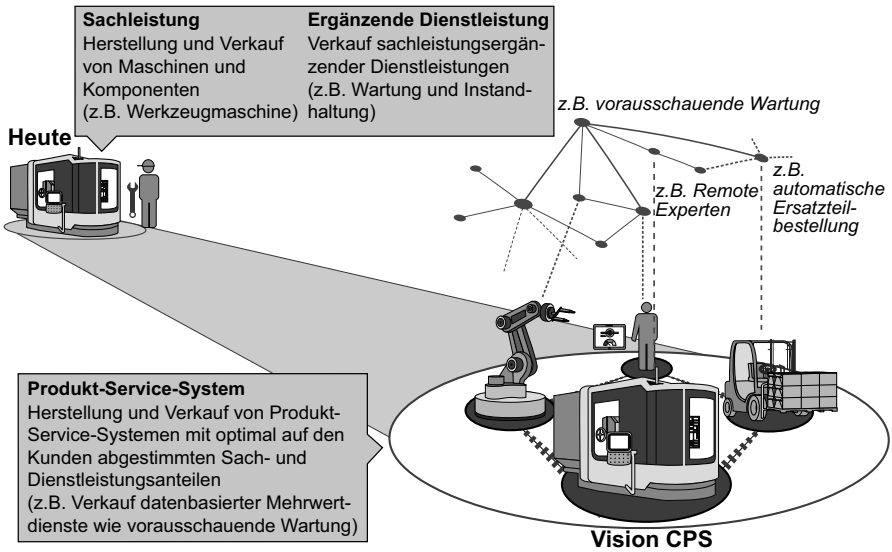


Bild 2-8: Veränderung der Marktleistung im Maschinen- und Anlagenbau durch CPS

2.4 Interdisziplinäre Produktentstehung

Die vorliegende Arbeit adressiert Unternehmen, die ihre Erzeugnisse hin zu CPS weiterentwickeln. Zum besseren Verständnis ist die Beschreibung der Aufgaben entlang des Produktentstehungsprozesses von hoher Bedeutung. Dazu wird in Abschnitt 2.4.1 zunächst das Referenzmodell der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen nach GAUSEMEIER erläutert. Anschließend erfolgen eine detaillierte Betrachtung der Strategischen Produktplanung (Abschnitt 2.4.2) sowie der Aufgaben zur Entwicklung von Marktleistungen (Abschnitt 2.4.3). Der Ansatz des Systems Engineering wird abschließend in Abschnitt 2.4.4 beschrieben.

2.4.1 Referenzmodell der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen nach GAUSEMEIER

Der Prozess der Marktleistungsentstehung erstreckt sich von der Produkt- bzw. Geschäftsidee bis zum Serienanlauf. Gemäß dem Referenzmodell der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen nach GAUSEMEIER umfasst dieser Prozess die Aufgabenbereiche Strategische Produktplanung, Produktentwicklung, Dienstleistungsentwicklung und Produktionssystementwicklung. Dabei ist der Entstehungsprozess von Marktleistungen keine stringente Folge von Phasen und Meilensteinen, sondern vielmehr ein Wechselspiel von Aufgaben, die sich in vier Zyklen gliedern lassen [GEA16, S. 13]. Bild 2-9 veranschaulicht die vier Zyklen des Referenzmodells, die im Folgenden näher erläutert werden.

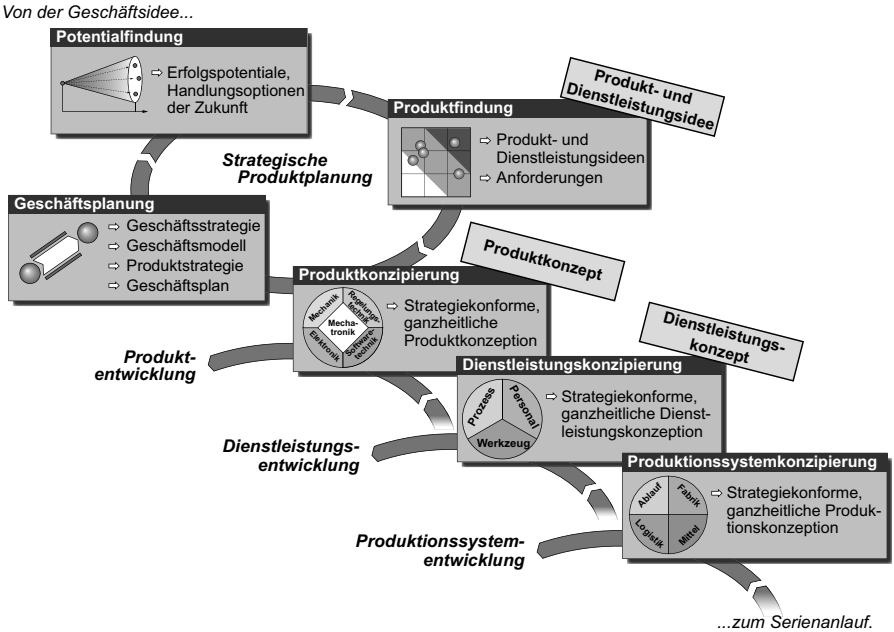


Bild 2-9: Einordnung der Systematik in das Referenzmodell der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen nach GAUSEMEIER [GEA16, S. 14]

Erster Zyklus – Strategische Produktplanung: Der Zyklus der Strategischen Produktplanung umfasst die Aufgabenbereiche Potentialfindung, Produktfindung, Geschäftsplanung und Produktkonzipierung. Ihr Ziel ist es, Erfolgspotentiale der Zukunft zu erkennen und erfolgversprechende Produktkonzeptionen zur Erschließung der identifizierten Potentiale zu erstellen [GP14, S. 25f.]. Eine ausführlichere Betrachtung der Strategischen Produktplanung erfolgt in Abschnitt 2.4.2.

Zweiter Zyklus – Produktentwicklung: Aufgabenbereiche der Produktentwicklung sind die Produktkonzipierung, Entwurf und Ausarbeitung sowie die Produktintegration. Die Schnittstelle zwischen der Strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung bildet die Produktkonzipierung. Ziel der Produktkonzipierung ist die Prinziplösung für das angestrebte Produkt. Diese bildet den Ausgangspunkt für den disziplinspezifischen Entwurf sowie die Ausarbeitung und Integration der Ergebnisse zu einer verifizierten Gesamtlösung. Die Produktentwicklung erfolgt durch die verschiedenen Fachdisziplinen wie Mechanik, Regelungstechnik, Elektronik und Softwaretechnik [GP14, S. 25f.]. Eine detailliertere Betrachtung der Produktentwicklung enthält Abschnitt 2.4.3.1.

Dritter Zyklus – Dienstleistungsentwicklung: Ziel der Dienstleistungsentwicklung ist die Umsetzung einer Dienstleistungsidee in eine Marktleistung [BS06a, S. 4]. Auch die-

ser Zyklus ist keine stringente Folge von Phasen und Meilensteinen, sondern ein Wechselspiel der Aufgaben Dienstleistungskonzipierung, Dienstleistungsplanung und Dienstleistungsintegration [GAD+14, S. 14], [GEA16, S. 14]. Die genaue Erläuterung dieser Aufgaben erfolgt in Abschnitt 2.4.3.2.

Vierter Zyklus – Produktionssystementwicklung: Ausgangspunkt des vierten Zyklus ist die Produktionssystemkonzipierung, die im Wechselspiel mit der Produktkonzipierung zu erarbeiten ist. Das Produktionskonzept bildet die Basis für die Arbeitsplanung, die durch die vier Fachbereiche Arbeitsablaufplanung, Arbeitsstättenplanung, Materialflussplanung und Arbeitsmittelplanung ausgeführt wird. Analog zur Produktentwicklung wird das Produktionskonzept zu einem verifizierten Produktionssystem integriert [GP14, S. 25f.].

Einordnung der Systematik in das Referenzmodell der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen

Produkt-, Dienstleistungs- und Produktionssystementwicklung sind parallel und eng aufeinander abgestimmt voranzutreiben. Nur so ist sicherzustellen, dass alle Möglichkeiten der Gestaltung einer leistungsfähigen und innovativen Marktleistung ausgeschöpft werden [GEA16, S. 15]. Die zu entwickelnde Systematik soll – eingebettet in den Zyklus der Strategischen Produktplanung – Unternehmen bei der Produktfindung und der Erstellung einer erfolgversprechenden Produkt- und Dienstleistungskonzeption auf Basis von CPS unterstützen. Vor diesem Hintergrund werden in den folgenden Abschnitten die Bereiche der Strategischen Produktplanung sowie der Produkt- und Dienstleistungsentwicklung näher untersucht. Die Weiterentwicklung des eigenen Produktionssystems mit CPS ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Somit werden die Tätigkeiten des vierten Zyklus im Folgenden nicht näher betrachtet.

2.4.2 Strategische Produktplanung

Ziel der Strategischen Produktplanung ist es, die Erfolgspotentiale der Zukunft frühzeitig zu erkennen und daraus erfolgversprechende Produkt- und Dienstleistungskonzeptionen abzuleiten. Ausgangspunkt dafür ist die **Potentialfindung**, die aus ermittelten Erfolgspotentialen spezifische Handlungsoptionen für die Zukunft ableitet. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen neigen dazu, sich dabei auf die Befragung von Kunden zu beschränken. Diese sind jedoch kaum in der Lage, schon heute die Herausforderungen von morgen zu benennen. Es ist daher von besonderer Bedeutung, sich der klassischen Vorausschau-Werkzeuge zu bedienen. Beispiele für solche Werkzeuge sind die Szenario-Technik, Delphi-Studien, Trendanalysen oder die Technologie-Frühaufklärung [GEK01, S. 49], [GP14, S. 25], [GOA+16, S. 38].

Kontinuierlicher Markterfolg erfordert ständig neue, innovative Produkte und Dienstleistungen, die den Kundenwünschen entsprechen und den Unternehmenserfolg sichern. Ent-

scheidend dafür sind neuartige, brauchbare Produkt- und Dienstleistungsideen, die bekannten Produkten überlegen sind [GEK01, S. 117]. Auch Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus stehen vor der Herausforderung, sich durch neue oder veränderte Marktleistungen vom Wettbewerb zu differenzieren und die zunehmend individuellen Kundenwünsche zu bedienen. Häufig resultieren Ideen aus bekannten Produkten, die durch Variation, Verbesserung oder Vereinfachung zu neuen Produkten weiterentwickelt werden. Durch Cyber-Physical Systems entstehen für den Maschinen- und Anlagenbau nun erfolgversprechende Möglichkeiten zur Verbesserung seiner bestehenden Produkte.

Die **Produktfindung** widmet sich der Suche und Auswahl neuer Produkt- und Dienstleistungsideen zur Erschließung der zuvor identifizierten Erfolgspotentiale. Der Prozess der Produktfindung (siehe Bild 2-10) beginnt mit der Situationsanalyse, in der die aus den Erfolgspotentialen resultierenden Suchfelder analysiert, Randbedingungen für die Lösungssuche abgesteckt und das Ziel des neuen Produkts beschrieben werden. Anschließend werden in einem kreativen Prozess Ideen für das neue Produkt gesucht. Hilfsmittel zur Ideenfindung sind das Laterale Denken nach DE BONO, TRIZ oder Technologie-Roadmaps [GP14, S. 25]. Die ermittelten Produktideen gilt es anschließend zu bewerten. Kriterien zur Bewertung sind z.B. Funktionalität, Wahrscheinlichkeit des technischen und/oder wirtschaftlichen Erfolgs, Kosten sowie Differenzierungsstärke [GEK01, S. 119]. Abschließend werden die ausgewählten Ideen in Form von Anforderungen, einer groben Spezifikation der Funktionalität sowie mit Termin- und Kostenplänen konkretisiert [FG13, S. 317f.], [VDI2220, S. 8].

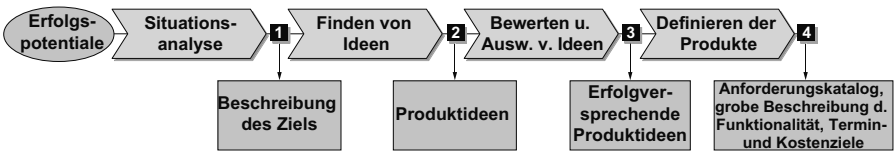


Bild 2-10: Vorgehen bei der Produktfindung [GEK01, S. 118] nach [PB97] und [VDI2220, S. 3]

Im Anschluss an die Produktfindung erfolgt die **Geschäftsplanung**, die den Nachweis zu erbringen hat, dass mit der neuen Marktleistung Gewinn erzielt werden kann [GEK01, S. 144]. Dazu wird eine Geschäftsstrategie formuliert, ein Geschäftsmodell entwickelt und die Produktstrategie sowie der Geschäftsplan erstellt. Die Geschäftsstrategie gibt an, mit welchen Marktleistungen welche Marktsegmente bearbeitet werden [GP14, S. 114]. Das Geschäftsmodell konkretisiert das Nutzenversprechen und die Marktleistung, macht grundlegende Angaben zu Wertschöpfungskonzepten, Marktbearbeitung und Gewinnformel. Dabei wird betrachtet, welcher Nutzen für welche Kunden durch welche Marktleistung erbracht wird und welche Kosten- und Erlösstruktur zu Profit aus Unternehmenssicht führt [OP10, S. 14]. Geschäftsstrategie und Geschäftsmodell sind Grundlagen für die Produktstrategie. Diese beschreibt, wie Produktvarianten im Produktlebenszyklus wirtschaftlich entwickelt und angeboten werden können. Dazu macht die Produktstrategie Aussagen zur Produktprogrammgestaltung und -pflege, zur Bewältigung der vom

Markt geforderten Variantenvielfalt sowie zur Gestaltung des Entwicklungs- und Markteinführungsprozesses. Die Produktstrategie fließt in den Geschäftsplan ein, der den Nachweis erbringt, ob mit dem Produkt ein attraktiver Return on Investment zu erzielen ist [GP14, S. 25], [GEK01, S. 164].

Aus den vielfältigen Möglichkeiten von Cyber-Physical Systems müssen Unternehmen erfolgversprechende Ideen für neue Produkte und Dienstleistungen generieren. Dazu soll die zu entwickelnde Systematik im Rahmen der Strategischen Produktplanung insbesondere den Prozess der Produktfindung unterstützen.

2.4.3 Entwicklung von Marktleistungen

An die Strategische Produktplanung knüpft die Produktentwicklung an. Da sich die Marktleistung von Unternehmen jedoch zunehmend zu integrierten Systemlösungen bestehend aus Sach- und Dienstleistungen entwickelt (vgl. Abschnitt 2.3.3), sind die Produkt- und die Dienstleistungsentwicklung in enger Abstimmung miteinander durchzuführen. Zur näheren Betrachtung der Produkt- und Dienstleistungsentwicklung werden beide Bereiche im Folgenenden näher beschrieben.

2.4.3.1 Produktentwicklung

Die Tätigkeiten der Produktentwicklung werden anhand der VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ beschrieben. Aufgrund der Fokussierung mechatronischer Systeme ist die VDI-Richtlinie 2206 in besonderem Maße für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus relevant. Neben der VDI-Richtlinie 2206 existieren zahlreiche weitere Leitfäden und Richtlinien wie z.B. die VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221], die Konstruktionslehre nach PAHL/BEITZ [FG13, S. 17], das Y-Modell der Schaltungstechnik [BGH+96] oder das V-Modell der Softwareentwicklung [BD93]. Diese werden aufgrund ihres fachdisziplinspezifischen Charakters hier nicht weiter betrachtet.

Die „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ beschreibt ein grundsätzliches Vorgehen zur fachdisziplinübergreifenden Entwicklung und besteht aus drei elementaren Bestandteilen: Problemlösungszyklus auf der Mikroebene, V-Modell auf der Makroebene sowie Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte [VDI2206, S. 26ff.].

Problemlösungszyklus auf der Mikroebene

Der Problemlösungszyklus auf Mikroebene beinhaltet die Schritte Situationsanalyse/Zielformulierung bzw. Zielübernahme/Situationsübernahme, Analyse/Synthese, Bewertung, Entscheidung sowie Planung des weiteren Vorgehens. Der Prozess kann der Entwicklungsaufgabe flexibel angepasst werden und soll den Entwickler primär dabei unterstützen, vorhersehbare, aber auch unerwartete Probleme zu lösen.

V-Modell auf der Makroebene

Das V-Modell beschreibt das grundsätzliche Vorgehen bei der Entwicklung mechatronischer Systeme (siehe Bild 2-11). Ursprünglich aus der Softwaretechnik stammend, wurde es an die Anforderungen der Mechatronikentwicklung angepasst. Die Bestandteile und Prozessschritte des V-Modells werden nachfolgend beschrieben.

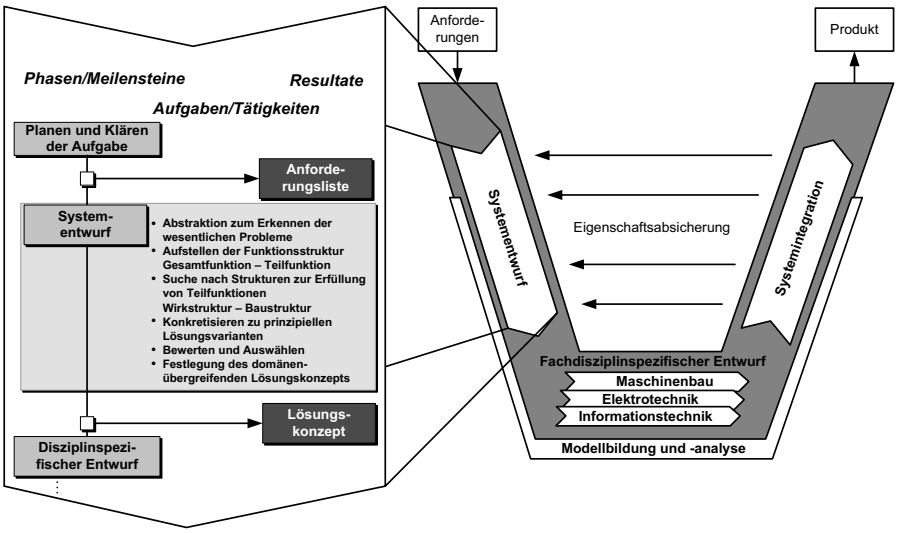


Bild 2-11: Das V-Modell als Makrozyklus (rechts) und die Tätigkeiten für den Prozessbaustein „Systementwurf“ nach [VDI2206, S. 32]

Anforderungen: Anforderungen werden in Form einer Anforderungsliste definiert und bilden den Maßstab für die Bewertung des späteren Produkts.

Systementwurf: Ziel des Systementwurfs ist ein fachdisziplinübergreifendes Lösungskonzept (Produktkonzept, Prinziplösung), das den prinzipiellen Aufbau und die Wirkungsweise des zu entwickelnden Systems beschreibt [FG13, S. 249]. Hierzu wird die die Gesamtfunktion des Systems in Teilfunktionen zerlegt. Diesen Teilfunktionen gilt es geeignete Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente zuzuordnen und die Funktionserfüllung im Systemzusammenhang zu prüfen.

Fachdisziplinspezifischer Entwurf: Nach Erstellung des fachdisziplinübergreifenden Produktkonzepts erfolgt die Konkretisierung der Lösungsansätze in den einzelnen Fachdisziplinen. Detaillierte Berechnungen und Auslegungen sichern die Funktionserfüllung ab.

Systemintegration: Die ausgearbeiteten Lösungen werden integriert. Das Ergebnis ist der Gesamtentwurf des mechatronischen Systems.

Eigenschaftsabsicherung: Die Eigenschaften werden während der Systemintegration anhand der Anforderungen und des spezifizierten Lösungskonzepts überprüft.

Modellbildung und -analyse: Die Systemeigenschaften werden fortlaufend rechnergestützt modelliert und analysiert.

Produkt: Ergebnis des V-Modells ist das Produkt bzw. vielmehr eine zunehmende Konkretisierung des zukünftigen Produkts. Das V-Modell wird in der Regel mehrfach durchlaufen.

Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte

Für wiederkehrende Tätigkeiten während der Teilschritte im V-Modell können Prozessbausteine formuliert werden. Dafür beschreibt die VDI-Richtlinie 2206 konkret die Prozessbausteine für den Systementwurf, Modellbildung und -analyse, fachdisziplinspezifischer Entwurf, Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung. Den Prozessbaustein Systementwurf zeigt Bild 2-11.

2.4.3.2 Dienstleistungsentwicklung

Ziel der Dienstleistungsentwicklung ist die Umsetzung einer Dienstleistungsidee in eine marktfähige Leistung. Um dieses Ziel systematisch und effizient zu erreichen, stellt das sog. Service Engineering, als eigene Entwicklungsdisziplin für den Dienstleistungsbereich, Methoden und Werkzeuge bereit [BS06a, S. 4]. Im Bereich der Dienstleistungsentwicklung bestehen, ähnlich wie bei der Produktentwicklung, eine Reihe von Leitfäden und Richtlinien. Eine ausführliche Diskussion unterschiedlicher Ansätze liefern SCHNEIDER ET AL. [SDB+06, S. 113ff.]. Grob umfasst die Dienstleistungsentwicklung jedoch die Aufgaben Dienstleistungskonzipierung, Dienstleistungsplanung und Dienstleistungsintegration, die nachfolgend näher erläutert werden [ELW06, S. 425], [GAD+14, S. 14].

Die **Dienstleistungskonzipierung** spezifiziert die konstituierenden Dienstleistungsmerkmale[21] Prozess, Personal und Werkzeug. Eine Dienstleistung ist stets ein Prozess zwischen dienstleistungsanbietender und dienstleistungsnachfragender Wirtschaftseinheit, den es im Rahmen der Dienstleistungskonzipierung zu spezifizieren gilt [BS06b, S. 56]. An der Durchführung des Dienstleistungsprozesses sind diverse Akteure beteiligt, deren Rollen ebenfalls spezifiziert werden müssen. Darüber hinaus muss der Aspekt Werkzeuge beschrieben werden, der notwendige materielle Ressourcen zur Erfüllung der Dienstleistung zusammenfasst. Das Ergebnis der Dienstleistungskonzipierung ist eine ganzheitliche

[21] Die konstituierenden Merkmale von Dienstleistungen sind in der Literatur nicht einheitlich definiert. Während GAUSEMEIER ET AL. die konstituierenden Merkmale Prozess, Personal und Werkzeug anführen [GAD+14, S. 13f.], nennen BULLINGER ET AL. z.B. die Merkmale Potential, Prozess und Ergebnis (vgl. Abschnitt 2.3.3) [BS06, S. 56].

Dienstleistungskonzeption, die als Basis für die weitere Entwicklung der Dienstleistung dient [ELW06] [BS06a, S. 425], [SD06] S. 485], [GAD+14, S. 14].

Eine Konkretisierung des Dienstleistungskonzepts erfolgt im Rahmen der **Dienstleistungsplanung**. Diese plant den Dienstleistungsprozess, das benötigte Personal und die entsprechenden Werkzeuge. Für die Planung des Prozesses der Dienstleistungserbringung ist dieser in der Aufbauorganisation des Unternehmens zu verankern. Die Personalplanung erfordert die Berücksichtigung der Personalverfügbarkeit und der entsprechenden Qualifikation. Zudem ist die Verfügbarkeit aller notwendigen materiellen Ressourcen im Rahmen der Werkzeugplanung zu prüfen. Da bei der Dienstleistungserbringung oft mehrere Funktionsbereiche wie Vertrieb, Service oder Entwicklung beteiligt sind, ist es wichtig, alle Beteiligten bei der Dienstleistungsplanung frühzeitig miteinzubeziehen [LLW+06, S. 458], [GAD+14, S. 14].

Nach der Dienstleistungsplanung werden die Ergebnisse der einzelnen Planungseinheiten im Zuge der **Dienstleistungsintegration** zusammengeführt und abgestimmt. Zudem wird geprüft, ob die im ersten Zyklus der Strategischen Produktplanung ermittelten Anforderungen von der konzipierten Dienstleistung erfüllt werden. Gemäß dem V-Modell erfolgt die Absicherung der Anforderungen konsequent prozessbegleitend [SM12, S. 52f.], [GAD+14, S. 14].

Cyber-Physical Systems steigern die Komplexität der gesamten Marktleistung, da Sach- und Dienstleistungen verstärkt zu integrierten Systemlösungen verschmelzen. Die zunehmende Komplexität wirkt sich auf die gesamte Produktentstehung aus. Neue Geschäftsmodelle müssen entwickelt, Produktstrategien durchdacht und Architekturen der Systeme angepasst werden. Dabei sind die Tätigkeiten der Produktentstehung längst nicht mehr nur von einzelnen Fachdisziplinen, sondern fachdisziplinübergreifend auszuführen. Etablierte Entwicklungsmethodiken wie die VDI-Richtlinie 2206 stoßen dabei an ihre Grenzen. Ein Ansatz, der dem Anspruch komplexer werdender Systeme gerecht wird, ist das sog. Systems Engineering [GDS+13, S. 6].

2.4.4 Systems Engineering

Systems Engineering ist eine durchgängige, fachdisziplinübergreifende Disziplin zur Entwicklung multidisziplinärer Systeme. Dabei stellt SE das zu entwickelnde System in den Mittelpunkt und zieht die Gesamtheit aller Entwicklungsaktivitäten ins Kalkül [GDS+13, S. 20]. Das INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE)[22] definiert Systems Engineering wie folgt:

> *„Systems Engineering ist ein interdisziplinärer Ansatz und soll die Entwicklung von Systemen methodisch ermöglichen. SE fokussiert ein*

[22] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE) ist eine internationale Organisation zur Förderung der Lehre von Wissenschaft und Bildung im Bereich des Systems Engineering [GFS12].

> *ganzheitliches und zusammenwirkendes Verständnis der Stakeholder Anforderungen, der Entdeckung von Lösungsmöglichkeiten und der Dokumentation von Anforderungen sowie das Synthetisieren, Verifizieren, Validieren und die Entwicklung von Lösungen. Das gesamte Problem wird während der Konzeptentwicklung bis zur Systementwicklung betrachtet. Das Systems Engineering stellt hierfür geeignete Methoden, Prozesse und Best Practices bereit" [GFS12, S. 7].*[23]

Nach HABERFELLNER ET AL. besteht Systems Engineering aus zwei übergeordneten Bereichen: SE-Denkweise und Problemlösungsprozess (vgl. Bild 2-12) [HWF+12, S. 28ff.].

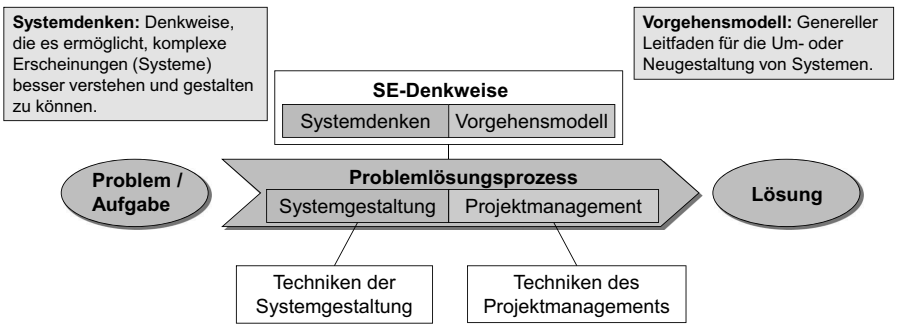


Bild 2-12: Konzept des Systems Engineering nach [HWF+12, S. 28]

Kern des Systems Engineering ist die **SE-Denkweise**, die das Systemdenken und das Vorgehensmodell umfasst. Das *Systemdenken* ist eine Denkweise, die es ermöglicht, komplexe Erscheinungen (Systeme) besser verstehen und gestalten zu können. Im Vordergrund steht dabei die ganzheitliche Systembetrachtung. Um das Systemverständnis zu verbessern, werden die betrachteten Dinge hinterfragt, Zusammenhänge modelliert und Wechselwirkungen aufgedeckt [GFS12, S. 7], [HWF+12, S. 33ff.]. Das *Vorgehensmodell* stellt eine Art Leitfaden dar, der die gesamte Entwicklung in Teilprozesse zergliedert. Dabei folgt das SE-Vorgehensmodell vier Grundgedanken: Top-Down-Vorgehen, Varianten, Phasenablauf und Problemlösungszyklus. Der Gedanke des *Top-Down-Vorgehens* verfolgt das Ziel, ausgehend vom Ganzen, das Betrachtungsfeld schrittweise zu verkleinern, Lösungen zu finden und diese abschließend zu einer Gesamtlösung zu integrieren. Durch den Denkansatz der *Varianten* sollen möglichst viele Lösungsmöglichkeiten berücksichtigt werden. Der Grundgedanke des *Phasenablaufs* gliedert die Systementwicklung in eine zeitliche Reihenfolge. Einen Vorgehensleitfaden, der die Lösung von Problemen unterstützt, liefert der *Problemlösungszyklus.* Das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 ist ein Beispiel für einen solchen Leitfaden [HWF+12, S. 57ff.].

[23] Deutsche Übersetzung des Originals [INC10]

Der **Problemlösungsprozess** ist der zweite Bestandteil des SE-Konzepts. Aspekte des Problemlösungsprozesses sind die *Systemgestaltung* und das *Projektmanagement*. Das *Projektmanagement* adressiert organisatorische Aspekte wie die Abstimmung aller Aktivitäten unter Berücksichtigung der gegebenen Ressourcen sowie Zeit-, Kosten- und Qualitätsrestriktionen [GDS+13, S. 21]. Die *Systemgestaltung* umfasst die Aktivitäten für den inhaltlichen Aufbau der Lösung. Wesentliche Aufgabe dabei ist die Gestaltung der Systemarchitektur. Nach ULRICH und HABERFELLNER ET AL. beschreibt die Systemarchitektur die statische Struktur eines Systems durch *Funktionen, Systemelemente und deren Beziehungen untereinander,* sowie die *Zusammenhänge zwischen Funktionen und Systemelementen* [HWF+12, S. 183], [Ulr95, S. 2]. Systemelemente sind physische Bauteile oder Softwarekomponenten. Der Begriff Wirkstruktur ist ein vielfach verwendetes Synonym für den Begriff Systemarchitektur [FG13, S. 249].

Cyber-Physical Systems bedeuten neue Herausforderungen für die Aufgabe der Architekturgestaltung, da größere technische Innovationen in der Regel einen Wechsel in der Systemarchitektur bedeuten [HWF+12, S. 190]. Dies trifft auch auf die Transformation von mechatronischen Systemen zu Cyber-Physical Systems zu. Die komplexe Funktionsweise global verteilter Systeme gilt es bereits bei der Architekturgestaltung zu berücksichtigen. Dazu bedarf es entsprechender Beschreibungsmittel, die den Aufbau und die prinzipielle Wirkungsweise von Cyber-Physical Systems für alle Fachdisziplinen transparent darstellen. Der Herausforderung einer durchgängigen und fachdisziplinübergreifenden Beschreibung des zu entwickelnden Systems nimmt sich das sog. **Model-Based Systems Engineering** (MBSE) an. MBSE stellt dazu ein disziplinübergreifendes Systemmodell in den Mittelpunkt der Entwicklung [GDS+13, S. 21]. Das Systemmodell ermöglicht eine abstrakte und ganzheitliche Systembeschreibung, indem es alle wesentlichen fachdisziplinübergreifenden Informationen über das System enthält und disziplinunabhängig beschreibt. Zur Erstellung des Systemmodells bedarf es einer Modellierungssprache, einer Methode und eines Softwarewerkzeugs, die idealerweise aufeinander abgestimmt sind. Entlang der gesamten Produktentwicklung, vom Systementwurf, über den fachdisziplinspezifischen Entwurf bis zur Verifikation und Validierung, bildet das Systemmodell die Basis für die Kommunikation und Kooperation [GDS+13, S. 36].

Fazit: Damit die Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus alle Möglichkeiten der Gestaltung leistungsfähiger und innovativer Marktleistungen ausschöpfen können, sind die Produkt- und Dienstleistungsentwicklung parallel und eng aufeinander abgestimmt voranzutreiben. Dabei müssen die Unternehmen dem interdisziplinären Charakter von Cyber-Physical Systems gerecht werden und die Tätigkeiten der Produktentstehung fachdisziplinübergreifend ausführen. Somit ist eine interdisziplinäre Herangehensweise der zu entwickelnden Systematik essentiell für eine wirksame Unterstützung bei der Produktfindung und der Erstellung einer erfolgversprechenden Produkt- und Dienstleistungskonzeption. Vielversprechende Ansätze, die dieser Herausforderung gerecht werden, sind Systems Engineering und Model-Based Systems Engineering. Speziell im Hinblick auf

die Systemgestaltung können SE und MBSE hilfreich sein, um adäquate Systemarchitekturen für CPS zu erstellen. Wichtig dabei ist vor allem, den Aufbau und die prinzipielle Wirkungsweise global verteilter Systeme transparent und fachdisziplinübergreifend darzustellen. Abhilfe könnte eine Referenzarchitektur schaffen, die den grundsätzlichen Aufbau sowie die prinzipielle Wirkungsweise von CPS beschreibt und als allgemeingültiges Muster die Leitlinie für die Strukturierung, Entwicklung und Integration sowie den Betrieb von CPS bildet [KWH13, S. 43].

2.5 Reifegradmanagement

Zum besseren Verständnis des Reifegradmanagements werden im Folgenden die grundlegenden Aspekte erläutert. Darüber hinaus erfolgt in Abschnitt 2.5.1 eine Beschreibung des prinzipiellen Aufbaus von Reifegradmodellen zur Leistungsbewertung und -steigerung. Anschließend wird in Abschnitt 2.5.2 das Prinzip von Leistungsstufenmodellen für technische Systeme betrachtet.

> *"You cannot manage what you cannot measure [...] and what gets measured gets done" [HP91, S. 93].*

Das Zitat von HEWLETT[24] beschreibt den Kerngedanken des Reifegradmanagements: es kann nur das gesteuert bzw. verbessert werden, was auch gemessen wird. Wesentliche Elemente zur Verbesserung eines Objekts (z.B. Prozess, Organisation, System) sind demnach eine objektive Bewertung der Leistungsfähigkeit und ein Konzept zur inkrementellen Verbesserung. Reifegradmodelle zielen darauf ab, die Leistung eines Objekts neutral zu bewerten und davon ausgehend eine systematische Leistungssteigerung durchzuführen. Der Ursprung des Reifegradmanagements liegt in den 1970er Jahren als GIBSON und NOLAN 1973 ein vierstufiges Modell für das Management der elektronischen Datenverarbeitung beschrieben [GP14, S. 315f.]. In den letzten Jahrzehnten entstand eine Vielzahl[25] verschiedener Reifegradmodelle mit unterschiedlichen Betrachtungsgegenständen wie Produkte, Prozesse, Personen oder Organisationen [Akk13, S. 25]. Prominente Beispiele für Reifegradmodelle sind QMMG[26] für das Qualitätsmanagement sowie CMMI (vgl. Abschnitt 3.2.2.2) oder SPICE[27] für Produkt- und Softwareentwicklungsprozesse.

---

[24] HEWLETT ist Mitbegründer des US-amerikanischen Technologiekonzerns HEWLETT-PACKARD.

[25] DE BRUIN identifiziert in seinen Arbeiten mehr als einhundert verschiedene Reifegradmodelle [BF05, S. 2].

[26] QMMG (Quality Management Maturity Grid) ist ein Reifegradmodell für das Qualitätsmanagement. Es gilt als eines der ersten Reifegradmodelle [Cro80].

[27] SPICE (Software Process Improvement and Capability Determination) ist ein internationaler Standard zur reifegradbasierten Leistungsbewertung und -steigerung von Prozessen mit Schwerpunkt Softwareentwicklung. Daraus entstanden branchenspezifische Varianten wie AutomotiveSPICE für die Automobilindustrie, SPICE4Space für die Raumfahrt oder MediSPICE für die Medizintechnik [GP14, S. 321].

Trotz unterschiedlicher Untersuchungsbereiche weisen die Modelle in der Regel die gleiche Grundstruktur auf [Chr09, S. 39f.]:

Handlungsfelder: Handlungsfelder dienen zur Beschreibung und Systematisierung des ausgewählten Themengebiets. Sie gliedern den Untersuchungsbereich in übergeordnete Aufgabenkomplexe, um sicherzustellen, dass alle relevanten Facetten berücksichtigt werden [GP14, S. 316], [Ben13, S. 22].

Handlungselemente: Sie sind Stellhebel des Handlungsfelds, die einen hohen Einfluss auf den Untersuchungsbereich haben. Handlungselemente dienen der Ermittlung der Reifegrade und sind relevant für die Planung und Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen [GP14, S. 316].

Reifegrade: Reifegrade definieren für verschiedene Leistungsstufen die Eigenschaften eines Objekts. Die einzelnen Handlungselemente können in der Regel verschiedene Reifegrade annehmen. Je höher der Reifegrad, desto höher entwickelt ist das Handlungselement [Chr09, S. 39f.].

Leistungsbewertung und Leistungssteigerung: Anhand definierter Reifegrade wird zunächst der Ausgangszustand des Objekts ermittelt. Auf Basis dessen wird der Soll-Zustand bzw. Ziel-Reifegrad definiert und konkrete Maßnahmen zur dessen Erreichung festgelegt [Chr09, S. 40].

Je nach Zielsetzung des Reifegradmodells ist der letztgenannte Aspekt der Leistungsbewertung und Leistungssteigerung unterschiedlich ausgeprägt. Einige Reifegradmodelle verzichten auf Maßnahmen zur Leistungssteigerung und belassen es bei der Bewertung des Leistungsstands. Andere Modelle wiederum zielen auf einen Leistungsvergleich (Benchmark) mit unternehmensinternen oder -externen Objekten ab [BF05, S. 2], [PR11, S. 2f.].

Die zu entwickelnde Systematik soll Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus dabei unterstützen, ihre Erzeugnisse systematisch zu Cyber-Physical Systems weiterzuentwickeln. Dazu müssen die Unternehmen zunächst den Status Quo ihrer Systeme ermitteln. Aufbauend darauf gilt es den unternehmensadäquaten Zielzustand zu definieren und konkrete Maßnahmen zur Verbesserung ihrer Systeme festzulegen. Für die vorliegende Arbeit sind also vor allem Modelle zur Leistungsbewertung und -steigerung relevant. Nachfolgend wird der grundsätzliche Aufbau solcher Modelle erläutert.

2.5.1 Leistungsbewertung und -steigerung

Reifegradmodelle zur Leistungsbewertung und -steigerung folgen einem ähnlichen Vorgehen. Nach CHRISTIANSEN kann dies als Regelkreis beschrieben werden. Bild 2-13 veranschaulicht den Regelkreis, der aus den Phasen Leistungsbewertung, Soll-/Ist-Vergleich und Leistungssteigerung besteht.

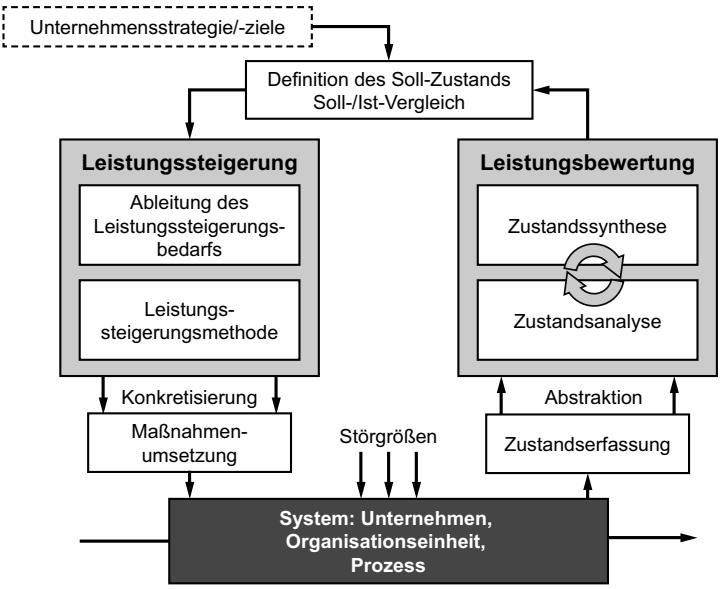


Bild 2-13: Schematische Darstellung des Ablaufs von Leistungsbewertungs- und Leitungssteigerungsmodellen nach CHRISTIANSEN [Chr09, S. 93]

Ausgangspunkt der Leistungsbewertung und -steigerung ist das zu betrachtende **System**. Das System ist ein realer Untersuchungsgegenstand wie ein Unternehmen, eine Organisationseinheit, ein Prozess oder ein technisches System. Im Rahmen der **Zustandserfassung** werden qualitative und quantitative Informationen über das System beschafft. Die Informationsbeschaffung erfolgt z.B. durch Interviews, Checklisten oder Fragebögen. Die Aufbereitung der ermittelten Informationen ist Teil der **Zustandsanalyse**. Hierbei sind die Betrachtungsweisen *umfeldorientiert* (Analyse der äußeren Beziehungen), *wirkungsorientiert* (Analyse des Ein- und Ausgangsverhaltens), *strukturorientiert* (Analyse des strukturellen Aufbaus und der Wirkzusammenhänge) und *dynamisch* (zeitliche Veränderung) zu unterscheiden. Die Zustandsanalyse ist die Basis zur Beurteilung des gegenwärtigen, vergangenen und zukünftigen Zustands. Ziel der **Zustandssynthese** ist es, aus den Ergebnissen der Zustandsanalyse ein plausibles Abbild des Ist-Zustands zu entwickeln. Hierfür werden Modellierungs-, Darstellungs- und Analysetechniken verwendet. Zustandsanalyse- und -synthese erfolgen stets im Wechselspiel miteinander [Chr09, S. 93f.]

Ziel der **Definition des Soll-Zustands** ist es, für das betrachtete System den Soll-Zustand zu ermitteln und anhand definierter Kriterien eindeutig festzulegen. Der Soll-Zustand sollte sich an der Unternehmensstrategie orientieren, Randbedingungen wie finanzielle und personelle Ressourcen berücksichtigen und ein ausgewogenes Verhältnis von Nutzen und Aufwand anstreben [Chr09, S. 96].

Eine Diskrepanz zwischen Soll- und Ist-Zustand ist Ausgangspunkt für die **Ableitung des Leistungssteigerungsbedarfs**. Durch den Vergleich beider Zustände können Rückschlüsse auf Art und Umfang der nötigen Systemanpassungen gezogen werden. Systemanpassungen erfolgen z.B. durch Veränderung der Systemparameter oder durch Anpassungen der Struktur. Nach Ableitung des Leistungssteigerungsbedarfs werden im Zuge der **Leistungssteigerungsmethode** Lösungskonzepte erarbeitet, die das System strukturiert vom Ist- zum Soll-Zustand transformieren. Das Lösungskonzept umfasst ein Vorgehen und Maßnahmen zur Leistungssteigerung. Die letzte Phase des Regelkreises bildet die **Maßnahmenumsetzung** [Chr09, S. 96f.].

2.5.2 Leistungsstufen technischer Systeme

Wesentliche Grundlage für die Leistungsbewertung und -steigerung technischer Systeme sind Reifegrade, die deren Leistungsstufen und Eigenschaften definieren. Im Kontext von Cyber-Physical Systems müssen Reifegrade also beschreiben, inwieweit ein technisches System die definierten Merkmale eines CPS (siehe Abschnitt 2.2.3) erfüllt. Konkret bedeutet dies z.B. die Art der Informationsverarbeitung und der Vernetzung oder die Ausprägung der Mensch-Maschine-Kommunikation. Etablierte Produktreifegradmodelle wie die „Reifegradabsicherung für Neuteile“[28] des VDA oder die „Technology Readiness Level (TRL)“[29] der NASA beziehen sich jedoch nicht auf die technische Leistungsfähigkeit eines Systems, sondern eher auf die zeitliche Nähe eines Produkts oder einer Technologie zur Serien- bzw. Marktreife.

Im Kontext von Smart Products, Internet of Things, Industrie 4.0 oder Cyber-Physical Systems entstehen derzeit vermehrt Stufenmodelle, die Leistungsstufen technischer Systeme definieren. Zur Beschreibung des prinzipiellen Aufbaus solcher Stufenmodelle wird exemplarisch das Modell für intelligente, vernetzte Produkte von PORTER/HEPPELMANN vorgestellt. PORTER/HEPPELMANN erarbeiten ein Stufenmodell zur Einordnung der Fähigkeiten und Funktionen von sog. intelligenten, vernetzten Produkten (Smart Products). Nach PORTER/HEPPELMANN lassen sich Smart Products durch drei Merkmale charakterisieren: sie verfügen über *physische Komponenten* wie mechanische und elektrische Bestandteile, haben *intelligente Komponenten* (z.B. Sensoren, Mikroprozessoren, Datenspeicher, Steuerungselemente und Software) und verfügen über *Vernetzungskomponenten* zur Verbindung mit weiteren Produkten. Diese Merkmale ermöglichen Smart

---

[28] Ziel der „Reifegradabsicherung für Neuteile“ des VDA (Verband deutscher Automobilindustrie e.V.) ist die durchgängige Darstellung, Beurteilung und Erhaltung des Reifegrads für neue, zu beschaffende Automobilkomponenten, um eine hohe Produktreife für den Abnehmer zu gewährleisten [VDA10].

[29] Die Technology Readiness Level (deutsch: Technologie-Reifegrade) der NASA (National Aeronautics and Space Administration) dienen zur Bewertung der technologischen Entwicklungsreife eines Objekts, das für Raumfahrtsysteme vorgesehen ist [ISO16290, S. 4].

Products einen gestiegenen Funktionsumfang gegenüber rein mechanischen oder elektronischen Produkten [PH14, S. 4f.]. Zur Einordnung der erweiterten Funktionalität und Fähigkeiten von Smart Products dient das in Bild 2-14 dargestellte Stufenmodell.

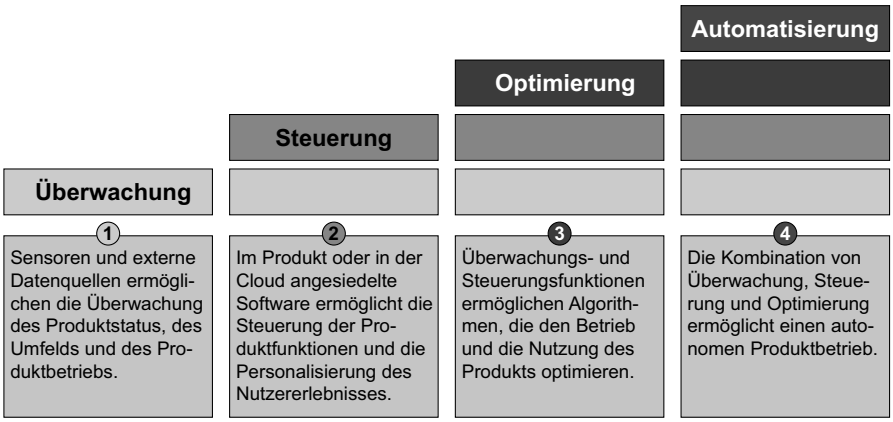


Bild 2-14: Fähigkeiten intelligenter, vernetzter Systeme nach PORTER/HEPPELMANN [PH14, S. 8]

Das Modell besteht aus vier aufeinander aufbauenden Stufen mit steigenden Fähigkeiten und Funktionsumfang des Produkts. Die erste Stufe **Überwachung** beschreibt ein System, das in der Lage ist, den Produktstatus, das Umfeld sowie den Betrieb zu überwachen und den Nutzer sowie weitere Produkte über seinen Status zu informieren. Die zweite Stufe **Steuerung** umfasst Systeme, die ihr Verhalten auf Basis aufgenommener Daten anpassen. Dadurch ist eine individuelle und exakte Leistungsabstimmung des Produkts möglich. Die dafür nötige Software kann dabei im Produkt integriert sein oder über eine Cloud betrieben werden. Auf der dritten Stufe **Optimierung** sind Produkte in der Lage, historische Daten und Echtzeitdaten so zu analysieren, dass eine Optimierung des Produktbetriebs (z.B. hinsichtlich Effizienz oder Auslastung) möglich ist. Zudem können Produkte Systemausfälle prognostizieren und vorausschauende Wartungstätigkeiten veranlassen. Die vierte Stufe **Automatisierung** beschreibt Systeme mit einem hohen Maß an Autonomie. Sie sind in der Lage, sich eigenständig mit anderen Systemen abzustimmen, das Wissen über ihr Umfeld zu erweitern und sich automatisch an die Bedürfnisse der Nutzer anzupassen [PH14, S. 8ff.].

Das Stufenmodell definiert Leistungsstufen von intelligenten, vernetzten Systemen. Jede Leistungsstufe beschreibt unterschiedliche Systemfunktionen und -fähigkeiten. PORTER/HEPPELMANN zeigen damit auf, welche technischen Möglichkeiten sich durch Smart Products potentiell ergeben. Ferner machen sie durch das Stufenmodell deutlich, dass solche Systeme ihren Nutzen nicht erst mit dem höchsten Reifegrad entfalten, sondern auf jeder Leistungsstufe einen entsprechenden Nutzen bieten. PORTER/HEPPELMANN belassen es jedoch bei einer rudimentären Beschreibung einzelner Leistungsstufen. Konkrete

Handlungsfelder und Handlungselemente werden nicht benannt. Somit wird aus dem Stufenmodell nicht ersichtlich, welche Stellhebel relevant sind, um von einer auf die nächste Stufe zu gelangen.

Fazit: Reifegradmodelle sind vielversprechende Ansätze zur strukturierten Leistungssteigerung. Das belegen zahlreiche in der Praxis etablierte Beispiele wie QMMG, CMMI oder SPICE. Auch im Rahmen der zu entwickelnden Systematik kann ein Reifegradmodell für Cyber-Physical Systems ein effektives Werkzeug sein, um Unternehmen mögliche Pfade zur Weiterentwicklung ihrer bestehenden Systeme aufzuzeigen. Damit solch ein Reifegradmodell praktikabel ist, muss es jedoch die Eigenschaften eines Systems je Leistungsstufe detailliert beschreiben, Handlungsfelder und Handlungselemente bestimmen und ein konkretes Vorgehen zur Leistungsbewertung und -steigerung vorgeben.

2.6 Problemabgrenzung

Die Problemanalyse hat gezeigt, dass sich Erzeugnisse des Maschinen- und Anlagenbaus aufgrund der zunehmenden Durchdringung mit Informations- und Kommunikationstechnologie von mechatronischen Systemen zu Cyber-Physical Systems weiterentwickeln. CPS sind in der Lage, Daten der physikalischen Welt mit Hilfe von Sensoren zu erfassen, sie für netzbasierte Dienste verfügbar zu machen und durch Aktoren unmittelbar auf Prozesse der physikalischen Welt einzuwirken. Individuelle Einzelsysteme verbinden sich zu hoch vernetzten Systemverbünden, die ihr Zusammenspiel flexibel an veränderte Bedingungen anpassen (vgl. Abschnitt 2.2.3). CPS verändern aber nicht nur die technischen Systeme, sondern haben Auswirkungen auf die gesamte Marktleistung von Unternehmen. Heute besteht die Marktleistung im Maschinen- und Anlagenbau klassischerweise aus Sach- und produktbegleitenden Dienstleistungen (vgl. Abschnitt 2.3.2). Die neuen technischen Möglichkeiten wie Datenspeicherung und -auswertung, Intelligenz und Vernetzung bieten nun erfolgversprechende Möglichkeiten, um die historisch gewachsene Marktleistung mit innovativen Produkt-Service-Systemen weiterzuentwickeln (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Die Weiterentwicklung ihrer Erzeugnisse hin zu CPS stellt die Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus vor Herausforderungen. Durch die zunehmende Durchdringung technischer Systeme mit IKT steigt der Funktionsumfang sowie die Vernetzung der Systeme. In hoch vernetzten Systemverbünden interagieren sie z.T. mit Systemen, die während des Systementwurfs noch nicht identifiziert wurden. Darüber hinaus verschmelzen Sach- und Dienstleistungen zu einem integrierten Produkt-Service-System mit vielfältigen Wechselwirkungen zwischen technischen Systemen, Daten und Diensten.

Die Folge ist ein Anstieg der **Komplexität und Interdisziplinarität** (vgl. Abschnitt 2.2). Der Wandel technischer Systeme erfolgt allerdings nicht ad-hoc und einheitlich für alle Systeme gleich. Vielmehr werden sich die Systeme im Zuge einer **schrittweisen Transformation** verändern, die sukzessive über verschiedene Leistungsstufen hinweg verläuft. Dabei erschließt sich der Nutzen, insb. für neue oder veränderte Marktleistungen, nicht

erst mit dem höchsten Reifegrad, sondern bereits entlang sämtlicher Leistungsstufen (vgl. Abschnitt 2.5). Doch selbst wenn Unternehmen den Bedarf erkannt haben ihre Systeme weiterzuentwickeln, sehen sie sich mit nahezu **unüberschaubaren Möglichkeiten** konfrontiert (vgl. Abschnitt 2.3). Aus der Vielzahl von Möglichkeiten gilt es für die Unternehmen nun, die für sie erfolgversprechenden Möglichkeiten zu erkennen, diese in konkrete Lösungen für ihre Marktleistung zu überführen und den Wandel der Systeme mit einer interdisziplinären Herangehensweise in der Marktleistungsentstehung **strategisch zu planen** (vgl. Abschnitt 2.4). Es besteht daher ein **Bedarf** für eine *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus*. Diese gliedert sich in die in Bild 2-15 abgebildeten Handlungsfelder.

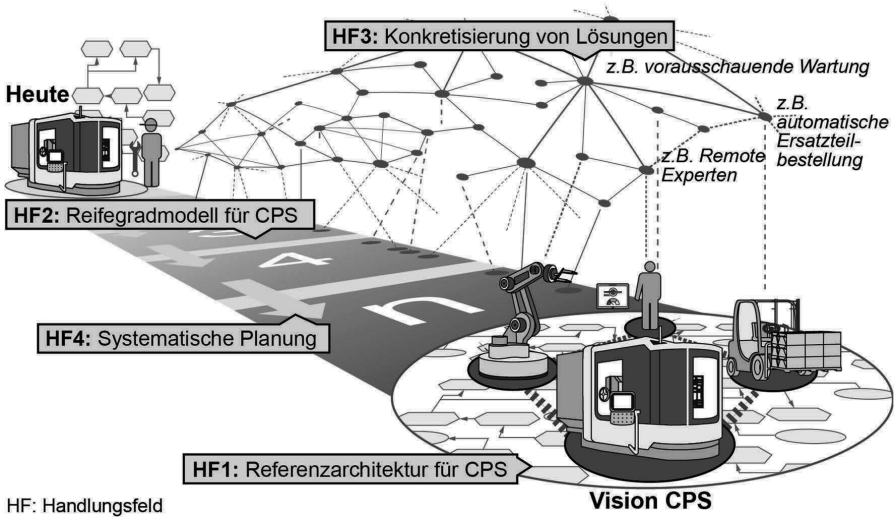


Bild 2-15: Übersicht der Handlungsfelder für die angestrebte Systematik

Handlungsfeld 1: Referenzarchitektur für CPS

Zur Abbildung der komplexen Zusammenhänge von Cyber-Physical Systems bedarf es einer Referenzarchitektur, die den grundsätzlichen Aufbau sowie die prinzipielle Wirkungsweise von CPS fachdisziplinübergreifend beschreibt (vgl. Abschnitt 2.4.4). Sie muss als allgemeingültiges Muster die Leitlinie für die Strukturierung, Entwicklung und Integration sowie den Betrieb von CPS, insbesondere des Maschinen- und Anlagenbaus, bilden [KWH13, S. 43]. Dies setzt voraus, dass alle CPS-Merkmale in ausreichendem Maße berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Handlungsfeld 2: Reifegradmodell für CPS

Wesentliche Elemente zur Weiterentwicklung eines Systems sind eine objektive Bewertung der Leistungsfähigkeit und ein Konzept zur inkrementellen Verbesserung. Die Nutzung eines Reifegradmodells ist ein vielversprechender Ansatz für eine strukturierte

Leistungssteigerung. In der Praxis etablierte Reifegradmodelle wie QMMG, CMMI oder SPICE zielen jedoch oft auf die Verbesserung von Prozessen und nicht auf die Leistungssteigerung technischer Systeme ab. Derzeitige Leistungsstufenmodelle für technische Systeme bleiben wiederum zu unkonkret und sind als praktikables Werkzeug ungeeignet (vgl. Abschnitt 2.5). Zur strukturierten Leistungssteigerung von technischen Systemen bedarf es eines Reifegradmodells für CPS des Maschinen- und Anlagenbaus, das die Eigenschaften eines Systems je Leistungsstufe detailliert beschreibt, Handlungsfelder und Handlungselemente bestimmt und ein konkretes Vorgehen zur Leistungsbewertung und -steigerung vorgibt.

Handlungsfeld 3: Konkretisierung von Lösungen

CPS eröffnen erfolgversprechende Möglichkeiten zur Veränderung der Marktleistung im Maschinen- und Anlagenbau (vgl. Abschnitt 2.3.3). Beispiele sind Dienste, die durch die Erfassung, Speicherung, Auswertung und Interpretation von Daten entstehen. Viele dieser Möglichkeiten hängen jedoch von der Leistungsstufe des technischen Systems ab (vgl. Abschnitt 2.5.2). Damit Unternehmen die Potentiale von CPS schnell und rationell nutzen können, müssen sie die technischen Möglichkeiten in konkrete Lösungen für ihre Marktleistung überführen. Hierzu bedarf es Hilfsmittel, die Lösungen im Kontext von CPS einheitlich beschreiben, sie mit den Leistungsstufen technischer Systeme verknüpfen und so die Identifikation und Auswahl erleichtern.

Handlungsfeld 4: Systematische Planung

Produkt-Service-Systeme müssen ebenso strategisch geplant werden wie materielle Produkte (vgl. Abschnitt 2.4) [SD06], S.464]. Neue Leistungsstufen von technischen Systemen erfordern neue Technologien, die wiederum neue Dienste ermöglichen. Die Entwicklung muss frühzeitig und fortlaufend geplant werden, damit bei jeder Entwicklungsstufe bereits die richtigen Maßnahmen für aufbauende Stufen getroffen werden. Dazu bedarf es einer systematischen Planung der technischen Systeme und damit verbundener Dienste.

2.7 Anforderungen an die Arbeit

Aus der Problemanalyse resultieren folgende Anforderungen an eine *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus*.

Anforderungen an eine Referenzarchitektur für CPS

A1) Anschauliche Repräsentation: Cyber-Physical Systems sind vernetzte technische Systeme, deren Gesamtfunktionalität sich erst durch das Zusammenspiel der Teilsysteme erschließt. Dabei passt sich der Systemverbund situationsspezifisch an. Durch die flexible Organisation variieren die Systemgrenze, die Systembestandteile und deren Interaktion

(vgl. Abschnitt 2.2.3). Zur transparenten Darstellung eines CPS bedarf es einer anschaulichen Referenzarchitektur, die alle Bestandteile eines CPS und deren Wechselwirkungen repräsentiert. Unter Zuhilfenahme der Architektur kann somit das Zusammenspiel aller Teilsysteme, die zur Erfüllung der Gesamtfunktionalität nötig sind, transparent dargestellt werden (vgl. Abschnitt 2.4.4).

A2) Allgemeingültigkeit für CPS des Maschinen- und Anlagenbaus: Die Referenzarchitektur soll als allgemeingültiges Muster für CPS des Maschinen- und Anlagenbaus dienen. Dazu muss die Architektur alle Merkmale von CPS gleichermaßen abbilden (vgl. Abschnitt 2.2.3). Eine generische Gestaltung der Referenzarchitektur ermöglicht eine systemunabhängige Anwendbarkeit und bildet die Basis für eine systemspezifische Ausprägung.

Anforderungen an ein Reifegradmodell für CPS

A3) Plausibilität und Nachvollziehbarkeit: Die Anwendung des Reifegradmodells muss zu eindeutigen, vergleichbaren und reproduzierbaren Ergebnissen führen. Die Berechnungsvorschriften sind allgemeinverständlich zu erläutern. Unter identischen Randbedingungen müssen somit die gleichen Ergebnisse erzielt werden. Nur so ist ein objektiver Vergleich der Leistungsfähigkeit verschiedener Systeme möglich (vgl. Abschnitt 2.5.1).

A4) Umfassende Dokumentation: Das Reifegradmodell muss nachvollziehbar strukturiert sein und die Eigenschaften der Leistungsstufen von CPS sowie deren Zusammenhänge umfassend beschreiben (vgl. Abschnitt 2.5.2). Die Ergebnisse des Reifegradmodells sind einheitlich und nachvollziehbar zu dokumentieren.

Anforderungen an die Konkretisierung von Lösungen

A5) Spezifikation von CPS: Die Systematik muss Lösungen im Kontext von CPS einheitlich beschreiben und dabei alle CPS-Merkmale berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Aufgrund des interdisziplinären Charakters solcher Systeme ist die Spezifikation allgemein verständlich, d.h. fachdisziplinübergreifend, auszuführen. Sichergestellt werden dadurch eine einheitliche und vergleichbare Dokumentation sowie ein einheitliches Verständnis bei den beteiligten Fachdisziplinen.

A6) Unterstützung der Ideenfindung: Die Systematik muss die Identifikation und Auswahl konkreter Lösungen unterstützen. Dazu stellt diese Hilfsmittel bereit, die das Erkennen von Lösungsalternativen erleichtern und eine Verknüpfung mit den Leistungsstufen des Reifegradmodells ermöglichen.

Anforderungen an die systematische Planung

A7) Integraler Bestandteil der Strategischen Produktplanung: Die zu entwickelnde Systematik soll als integraler Bestandteil der Strategischen Produktplanung die Erstellung einer aus unternehmerischer und technischer Sicht erfolgversprechenden Produktkonzeption unterstützen. Dazu ist die Systematik an der Schnittstelle zwischen Produktfindung

und Geschäftsplanung anzusiedeln. Während der Produktfindung soll die Systematik zur Erschließung und Auswahl neuer Produkt- und Dienstleistungsideen beitragen. Im Rahmen der Produkt- und Dienstleistungsentwicklung ist die Erstellung einer erfolgversprechenden Produkt- und Dienstleistungskonzeption zu unterstützen (vgl. Abschnitte 2.4.1, 2.4.2 und 2.4.3).

A8) Systematische Vorgehensweise: Die Planung von CPS bedarf einer systematischen Vorgehensweise. Daher muss die Systematik eine strukturierte Ist-Analyse der technischen Systeme gewährleisten und die Definition des individuellen Zielzustands unterstützen (vgl. Abschnitt 2.5.1). Darüber hinaus muss die Systematik die Erarbeitung einer Strategie zur unternehmensspezifischen Leistungssteigerung ermöglichen.

A9) Anwendbarkeit: Die Systematik muss eine wirtschaftliche Anwendung und einfache Handhabung ermöglichen. Die Tätigkeiten müssen mit einem vertretbaren Aufwand durchgeführt werden können, sodass Aufwand und Nutzen stets in einem sinnvollen Verhältnis zueinander stehen. Eine praktikable Ausführung der Systematik ist essentiell für die Akzeptanz im Maschinen- und Anlagenbau (vgl. Abschnitt 2.3.2).

3 Stand der Technik

Die Problemanalyse hat gezeigt, dass es einer Referenzarchitektur für Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus bedarf, die Bestandteile und Wirkungsweise eines CPS anschaulich repräsentiert und dabei alle Merkmale von CPS gleichermaßen berücksichtigt. Vor diesem Hintergrund werden in Abschnitt 3.1 bestehende Referenzarchitekturen im Kontext CPS untersucht. Ferner geht aus der Problemanalyse hervor, dass der Bedarf für ein Reifegradmodell besteht, das Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus bei der Weiterentwicklung ihrer Systeme hin zu CPS systematisch unterstützt. Daher analysiert Abschnitt 3.2 bestehende Ansätze des Reifegradmanagements. Zunächst erfolgt dafür eine Betrachtung existierender Stufenmodelle von CPS und verwandter Systeme, die Leistungsstufen und deren Charakteristika beschreiben. Darüber hinaus werden Modelle aus dem Bereich des reifegradbasierten Prozessmanagements beleuchtet, die Methoden und Werkzeuge zur Verfügung stellen, um Objekte zu geeigneter Reife zu führen. Vor dem Hintergrund der Konkretisierung von Lösungen untersucht Abschnitt 3.3 bestehende Ansätze zur Modellierung von Marktleistungen. Betrachtet werden dafür Möglichkeiten zur Modellierung von technischen Systemen, von reinen Dienstleistungen und von hybriden Leistungsbündeln.

3.1 Referenzarchitekturen für Cyber-Physical Systems

Zur Abbildung aller Bestandteile und Zusammenhänge von Cyber-Physical Systems im Maschinen- und Anlagenbau bedarf es einer adäquaten Referenzarchitektur. Derzeit ist jedoch keine Referenzarchitektur bekannt, die alle in Abschnitt 2.2.3 genannten CPS-Merkmale gleichermaßen abbildet. Dennoch existiert eine Reihe von Referenzarchitekturen für CPS und verwandte Systeme. Diese setzen jedoch in der Regel bestimmte Schwerpunkte, z.B. hinsichtlich der Beschreibung der Informationsverarbeitung. Im Folgenden werden ausgewählte Architekturen für CPS wie die CPS-Struktur nach LEE ET AL. (vgl. Abschnitt 3.1.1), die Zwiebelschalenarchitektur der CPS nach BROY (vgl. Abschnitt 3.1.2) und die CPS-Architektur nach AHMED ET AL. (vgl. Abschnitt 3.1.3) untersucht. Des Weiteren werden Architekturen für verwandte Systeme betrachtet, wie das Technologiekonzept Intelligenter Technischer Systeme nach GAUSEMEIER ET AL. (vgl. Abschnitt 3.1.4), die Technologie-Infrastruktur für intelligente, vernetzte Produkte nach PORTER/HEPPELMANN (vgl. Abschnitt 3.1.5) und die generische Architektur von Systemen intelligenter Objekte nach DEINDL (vgl. Abschnitt 3.1.6). Ergänzend dazu werden im Anhang die generische Wirkstruktur fortgeschrittener mechatronischer Systeme nach DUMITRESCU (vgl. Abschnitt A2.1) sowie die Prototyp-Architektur für CPS nach TAN ET AL. (vgl. Abschnitt A2.2) untersucht. Neben den genannten Referenzarchitekturen bestehen weitere, wie die Architektur eines serviceorientierten CPS nach LA/KIM (vgl. [HS10, S. 896], die CPS-Architektur nach ZANNI (vgl. [ZAN15]) oder die Architektur eines cyber-physischen Sensornetzes nach ALI ET AL. (vgl. [AQS+15, S. 7190]). Diese werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet.

3.1.1 CPS-Struktur nach LEE ET AL.

LEE ET AL. präsentieren eine CPS-Struktur, die die grundsätzlichen Bestandteile von CPS abbilden soll. Dazu vergleichen LEE ET AL. zunächst drei verschiedene CPS-Beispiele: ein Werkzeug für die Herzchirurgie, Ampelanlagen im Straßenverkehr, die mit Fahrzeugen kommunizieren und ein fly-by-wire-System im Verkehrsflugzeug. Aus dem Vergleich dieser unterschiedlichen Beispiele wurden drei gemeinsame Hauptbestandteile von Cyber-Physical Systems identifiziert. Der erste Bestandteil ist ein **physikalisches Grundsystem** (physical plant). Das Grundsystem repräsentiert den Teil des CPS, der keine Informationsverarbeitung oder digitale Netzwerke enthält. Dies können sowohl mechanische Bauteile, biologische oder chemische Prozesse als auch Menschen sein. Den zweiten Hauptbestandteil der CPS-Struktur bilden **rechnergestützte Plattformen** (platform). Sie beinhalten **Sensoren** (sensors) und **Aktoren** (actuators) sowie die **Informationsverarbeitung** (computation). Ein CPS kann eine oder aber auch mehrere rechnergestützte Plattformen besitzen. Die **Netzwerkstruktur** (network fabric) ist der dritte Hauptbestandteil und realisiert die Kommunikation zwischen den Berechnungskomponenten der Plattformen. Netzwerkstruktur und Plattformen stellen den virtuellen Teil des CPS dar. Das Zusammenspiel aller Komponenten wird durch gerichtete Beziehungen verdeutlicht [LS15, S. 5]. Bild 3-1 zeigt die erläuterte CPS-Struktur von LEE ET AL., die exemplarisch aus zwei rechnergestützten Plattformen besteht.

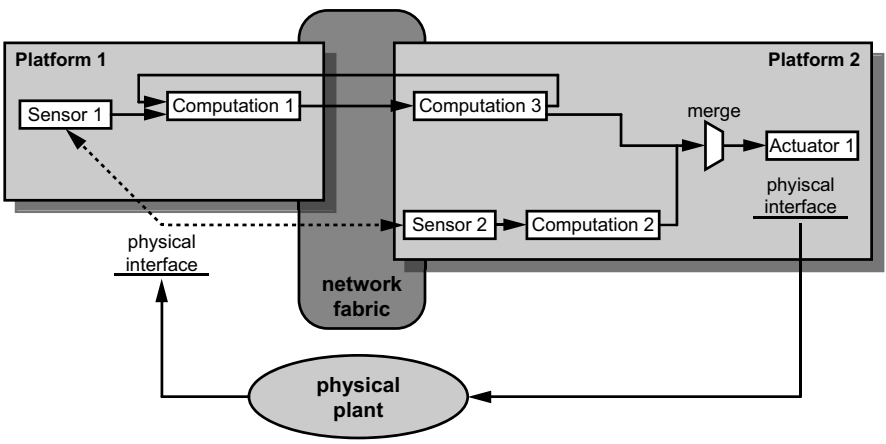


Bild 3-1: CPS-Struktur nach LEE ET AL. [LS15, S. 6]

Bewertung: Die CPS-Struktur nach LEE ET AL. ist eine übersichtliche, allgemeingültige Architektur für CPS. Aus konkreten Praxisbeispielen abgeleitet, besteht die CPS-Struktur aus den drei Hauptbestandteilen physikalisches Grundsystem, rechnergestützte Plattform und Netzwerkstruktur. Alle Bestandteile der Architektur werden in Beziehung zueinander gesetzt, sodass die generelle Funktionsweise des Systems erkennbar wird. Die Art der

Beziehungen (z.B. Energie-, Stoff- oder Informationsfluss) wird jedoch nicht konkret beschrieben. Ein weiterer Nachteil der Architektur ist die fehlende Berücksichtigung der CPS-Merkmale Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie Nutzung von Daten und Diensten.

3.1.2 Zwiebelschalenarchitektur der CPS nach BROY

Die von BROY vorgestellte Architektur gliedert Cyber-Physical Systems gemäß einer zwiebelschalenartigen Struktur (siehe Bild 3-2). Dadurch wird die Fähigkeit von CPS unterstrichen, sich immer wieder mit anderen Systemen zu übergeordneten Systemen zusammenzuschließen (System of Systems) [Bro10, S. 23]. Die äußere Schale der Architektur bildet ein **physikalisches bzw. mechanisches System** (physical/mechanical system). Darüber liegt die Schicht der **eingebetteten Systeme** (embedded system). Diese Schicht umfasst Software-/Hardware-Einheiten, die Überwachungs-, Steuerungs-, bzw. Regelungsaufgaben übernehmen [BBK98, S. 13]. **Sensoren und Aktoren** (sensors and actuators) bilden die nächste Schicht der Zwiebelschalenarchitektur. Sensoren dienen dazu, physikalische Daten zu erfassen. Durch Aktoren sind CPS in der Lage auf physikalische Vorgänge einzuwirken. Weitere Schichten sind die **elektronische Hardware** (electronic hardware) sowie die **Software**. Die Schnittstelle zu anderen Systemen bildet das **Kommunikationssystem** (connection to other systems). Die Interaktion zwischen Mensch und CPS erfolgt über eine **Mensch-Maschine-Schnittstelle** (human machine interface). Die Interaktion mit dem Menschen und mit anderen Systemen ist gekennzeichnet durch bidirektionale Beziehungen [Bro10, S. 27].

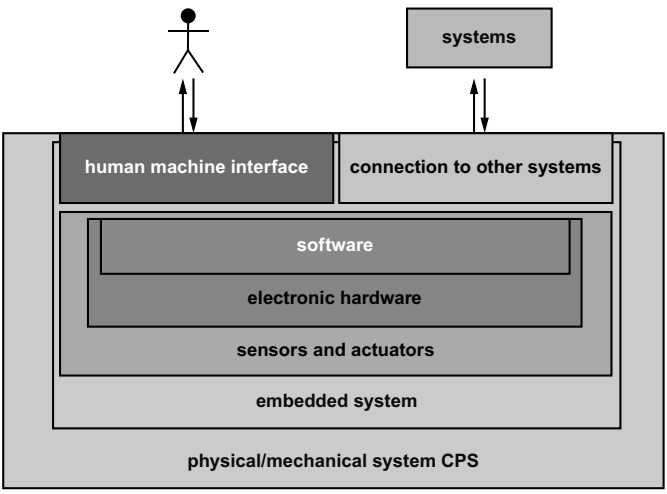


Bild 3-2: Zwiebelschalenarchitektur der CPS nach BROY [Bro10, S. 27]

Bewertung: BROY entwirft mit der Zwiebelschalenarchitektur eine generische CPS-Architektur, die keine Einschränkungen bezüglich spezifischer Anwendungsszenarien oder Branchen macht. Besonders hervorgehoben wird die Fähigkeit von CPS, sich mit anderen

Systemen zu verbinden. Die einzelnen Schichten bilden wesentliche Merkmale von CPS ab, fokussieren aber in besonderem Maße eingebettete Systeme. Im Hinblick auf die in Abschnitt 2.2.3 definierten CPS-Merkmale fehlt jedoch die Nutzung von Daten und Diensten. Zudem stellt die Zwiebelschalenarchitektur zwar den grundsätzlichen Aufbau, nicht aber die prinzipielle Wirkungsweise von Cyber-Physical Systems dar. Es fehlen dazu u.a. die Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen, die lediglich bei der Mensch-Maschine-Schnittstelle und beim Kommunikationssystem angedeutet werden. Wichtige Informationen zum Verständnis der Funktionsweise des Systems sind somit nicht gegeben.

3.1.3 CPS-Architektur nach AHMED ET AL.

Die von AHMED ET AL. vorgeschlagene Architektur für Cyber-Physical Systems besteht aus fünf Modulen: Aktoren, Sensormodule, Datenmanagementmodul, Applikationsmodul und Servicemodul. Diese Module werden entweder der physikalischen Welt oder der digitalen Welt zugeordnet [AKK13, S. 3].

Teil der physikalischen Welt sind die **Aktoren** (Actuators) und die **Sensormodule** (Sensing Modules). In Abhängigkeit vom Anwendungsfall können verschiedene Arten von Sensoren eingesetzt werden, um Daten der physikalischen Welt zu erfassen. Die Sensoren sind netzwerkfähig und übermitteln die erfassten Daten an das **Datenmanagementmodul** (Data Management Module), bestehend aus Rechnern und Datenspeichern. Das Datenmanagementmodul empfängt, verarbeitet und speichert Daten und fungiert somit als Informationsverarbeitung. Bei den Aktoren handelt es sich um physikalische Geräte, wie z.B. Lampen oder Pumpen. Sie dienen der Beeinflussung der physikalischen Welt und führen die vom **Applikationsmodul** (Application Module) erhaltenen Befehle aus. Sowohl das Datenmanagement- als auch das Applikationsmodul sind Teil der digitalen Welt (Cyber World) [AKK13, S. 3].

Ebenso Teil der digitalen Welt ist das **Servicemodul** (Service Aware Module). Im Servicemodul werden Softwaredienste wie Entscheidungsbildung, Aufgabenanalyse und -planung bereitgestellt. Über das sog. **Next Generation Internet** erfolgt der Datenaustausch zwischen den einzelnen Modulen. Besonderheit des Next Generation Internets ist die Möglichkeit, bei der Datenübertragung zwischen alternativen Pfaden auszuwählen. Im Vergleich zum herkömmlichen Internet erhöht dies die Flexibilität bei der Datenübertragung [AKK13, S. 3].

Weitere Bestandteile der Architektur sind ein **gesicherter Datenspeicher** (Secured Database) und die **Sicherheitsgarantie** (Security Assurance). Im Datenspeicher werden Daten gleichzeitig lokal und in der Cloud gespeichert, um die Datensicherheit zu erhöhen (Safety). Security Assurance ist ein inhärentes Merkmal des Gesamtsystems und umfasst Aspekte wie Zugriffs-, Daten- und Gerätesicherheit (Security). Die einzelnen Module werden mit bidirektionalen Beziehungen zueinander in Verbindung gesetzt [AKK13, S. 3]. Bild 3-3 visualisiert die beschriebene CPS-Architektur von AHMED ET AL.

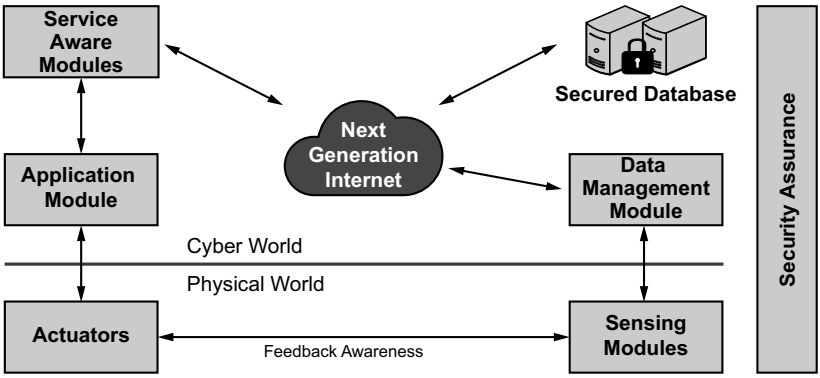


Bild 3-3: CPS-Architektur nach AHMED ET AL. [AKK13, S. 2]

Bewertung: AHMED ET AL. präsentieren eine übersichtliche und allgemeingültige CPS-Architektur. Die Unterscheidung zwischen der physikalischen und der digitalen Welt bildet den Grundgedanken von Cyber-Physical Systems ab. In der Architektur ist ein Großteil der CPS-Merkmale enthalten. Sogar das Merkmal Dienste wird durch ein entsprechendes Servicemodul abgebildet. Die prinzipielle Funktionsweise des Systems wird rudimentär durch einheitliche Beziehungen visualisiert. Zudem wird der Aspekt der Datensicherheit, der in der Praxis eine wichtige Rolle spielt, prominent platziert. Nachteile der Architektur sind die fehlende Berücksichtigung des Grundsystems, der Mensch-Maschine-Schnittstelle und die fehlende Vernetzung mit anderen Systemen.

3.1.4 Technologiekonzept Intelligenter Technischer Systeme nach GAUSEMEIER ET AL.

Das Technologiekonzept Intelligenter Technischer Systeme nach GAUSEMEIER ET AL. stellt den grundsätzlichen Aufbau von ITS dar (siehe Bild 3-4). Demnach bestehen ITS grundsätzlich aus vier Einheiten: Grundsystem, Sensorik, Aktorik und Informationsverarbeitung. Somit baut das Technologiekonzept auf der Grundstruktur mechatronischer Systeme auf (vgl. Abschnitt 2.2.1). Beim **Grundsystem** handelt es sich in der Regel um eine mechanische Struktur. Die **Sensorik** erfasst die Zustandsgrößen der physikalischen Umwelt und des Grundsystems, das mit Hilfe der **Aktorik** manipuliert werden kann. Die **Informationsverarbeitung** interveniert durch ein **Kommunikationssystem** zwischen der Sensorik und der Aktorik. Sie ist das zentrale Element des Technologiekonzepts, da sie eine wichtige Rolle bei der Realisierung Intelligenter Technischer Systeme spielt [GTD13, S. 50].

Während mechatronische Systeme über eine starre Kopplung zwischen Sensorik und Aktorik verfügen, sind ITS in der Lage, diese gezielt zu modifizieren. Dabei werden reaktive Wirkungsabläufe jedoch nicht vollständig ersetzt, da die meisten existentiellen Systemmechanismen aus Sicherheitsgründen reaktiv und reflexartig ablaufen müssen. Zur

Veranschaulichung der Informationsverarbeitung bei Intelligenten Technischen Systemen folgt das Technologiekonzept dem Aufbau des Operator-Controller-Moduls (OCM) nach NAUMANN, einem Architekturkonzept, welches das aus der Kognitionswissenschaft stammende Dreischichtenmodell für die Verhaltensteuerung auf technische Systeme überträgt [Nau00, S. 27ff.], [ADG+09, S. 9]. Die unterste Schicht bildet die **nicht-kognitive Regulierung**, die eine kontinuierliche Steuerung und Regelung (motorischer Regelkreis) enthält. Das könnte z.B. die Sicherstellung des kontrollierten Bewegungsverhaltens eines Mehrkörpersystems sein, beispielsweise das aktive Fahrwerk eines PKWs. Die Schicht der **assoziativen Regulierung** beinhaltet u.a. Reiz-Reaktions-Mechanismen und Konditionierung. In einem technischen System wird hier die Reglerumschaltung veranlasst – z.B. die Umschaltung von Geschwindigkeits- auf Abstandsregelung bei einem PKW. Die Schicht der **kognitiven Regulierung** enthält typische Funktionen der künstlichen Intelligenz wie Zielmanagement, Planung und Handlungssteuerung. Ein Beispiel dafür ist die Selbstoptimierung, wonach ein technisches System aufgrund geänderter Betriebsbedingungen seine Ziele automatisch modifiziert und sein Verhalten dementsprechend anpasst [GAC+13, S. 14].

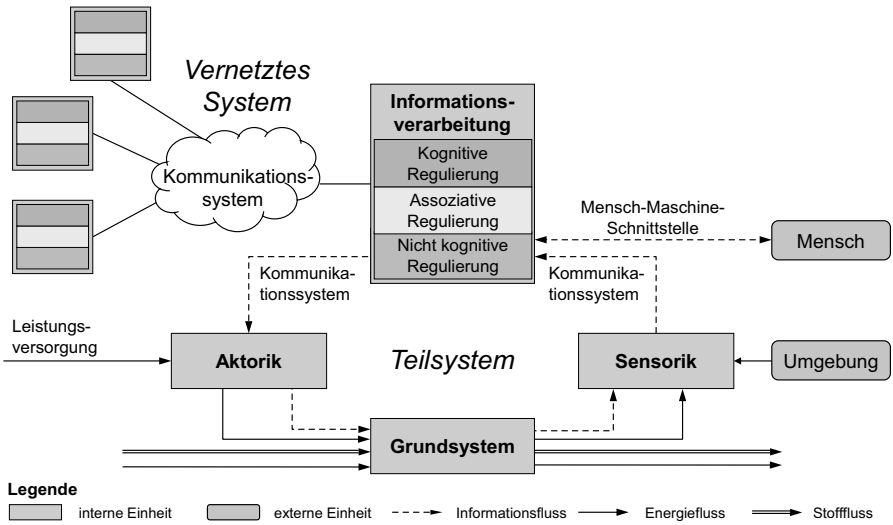


Bild 3-4: Technologiekonzept Intelligenter Technischer Systeme nach GAUSEMEIER ET AL. [GTD13, S. 51]

Die elementare Konfiguration von Grundsystem, Sensorik, Aktorik und Informationsverarbeitung wird als Teilsystem bezeichnet. Beispiele für Teilsysteme sind Antriebe, Automatisierungskomponenten und intelligente Energiespeicher. Systeme wie Werkzeugmaschinen oder Fahrzeuge bestehen aus mehreren solcher Teilsysteme, die in einem Verbund miteinander agieren. Den Aspekt geographisch verteilter und miteinander kommunizierender Intelligenter Technischer Systeme, verdeutlicht das Technologiekonzept durch vernetzte Systeme, die über ein **Kommunikationssystem** miteinander verbunden

sind. Zudem erfolgt eine Interaktion mit dem Menschen über eine **Mensch-Maschine-Schnittstelle**. Die prinzipielle Funktionsweise eines Intelligenten Technischen Systems wird durch gerichtete Beziehungen dargestellt, die zusätzlich in Informations-, Energie- und Stoffflüsse unterteilt werden [GTD13, S. 50].

Die prinzipielle Wirkungsweise kognitiver Informationsverarbeitung beschreibt DUMITRESCU mit einer *generischen Wirkstruktur fortgeschrittener mechatronischer Systeme*. Sie ist eine Entwurfsschablone für die Systemarchitektur zunehmend intelligenter werdender technischer Systeme, die neben dem statischen Aufbau und der Wirkungsweise auch eine Zuordnung von kognitiven Funktionen zu Systemelementen vornimmt [Dum10, S. 111ff.]. Eine detaillierte Beschreibung des Ansatzes von DUMITRESCU enthält Abschnitt A2.1 im Anhang.

Bewertung: Mit dem Technologiekonzept Intelligenter Technischer Systeme entwerfen GAUSEMEIER ET AL. eine generische Architektur für ITS, die ebenso wesentliche Merkmale von CPS abbildet. Da das Technologiekonzept auf der Grundstruktur mechatronischer Systeme beruht, ist es auch für technische Systeme gültig, die den Technologiesprung hin zu ITS oder CPS noch nicht vollzogen haben. Damit ist es insbesondere für den Maschinen- und Anlagenbau relevant, dessen Erzeugnisse heute in der Regel mechatronische Systeme sind (vgl. Abschnitt 2.3.2). Der übersichtliche Aufbau des Technologiekonzepts fördert das Verständnis des grundsätzlichen Aufbaus und der prinzipiellen Wirkungsweise von CPS. Die genaue Spezifikation der Beziehungen innerhalb des Systems sowie mit dem Menschen und der Umgebung erhöhen die Nachvollziehbarkeit der Funktionsweise. Die CPS-Merkmale Daten und Dienste werden im Technologiekonzept jedoch nicht berücksichtigt. Zudem fehlt eine Zuordnung von Elementen zur physikalischen und digitalen Welt. Eine Berücksichtigung aller CPS-Merkmale ist auch bei der generischen Wirkstruktur fortgeschrittener mechatronischer Systeme nach DUMITRESCU nicht gegeben. Hier fehlen die Merkmale Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie Dienste. Eine ausführlichere Bewertung der generischen Wirkstruktur ist Abschnitt A2.1 im Anhang zu entnehmen.

3.1.5 Technologie-Infrastruktur für intelligente, vernetzte Produkte nach PORTER/HEPPELMANN

PORTER/HEPPELMANN beschreiben eine Technologie-Infrastruktur[30] für vernetzte, intelligente Produkte, sog. Smart Products. Smart Products bestehen aus physikalischen, intelligenten und Vernetzungskomponenten, die ihnen einen erweiterten Funktionsumfang gegenüber rein mechanischen oder elektrischen Produkten ermöglichen[31] [PH14, S. 4f.]. Zur Beschreibung des Aufbaus solcher Systeme schlagen PORTER/HEPPELMANN die in

[30] Engl. Technology-Stack

[31] Die Beschreibung der Fähigkeiten von vernetzten, intelligenten Produkten nach PORTER/HEPPELMANN ist Gegenstand von Abschnitt 2.5.2.

Bild 3-5 abgebildete Architektur vor, die aus den drei Hauptblöcken Produkt, Netzanbindung und Produktwolke (Cloud) besteht.

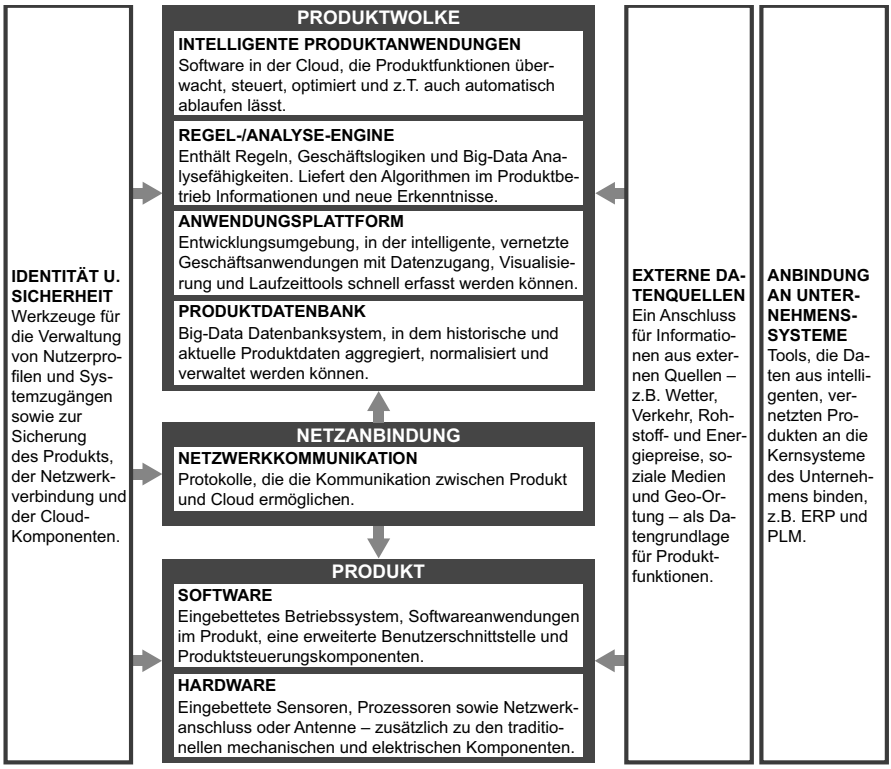


Bild 3-5: Technologie-Infrastruktur für intelligente, vernetzte Produkte nach PORTER/HEPPELMANN *[PH14, S. 7]*

Bestandteile des Hauptblocks **Produkt** sind die Hardware und Software. Die **Hardware** umfasst mechanische und elektrische Komponenten, eingebettete Sensoren, Prozessoren und Kommunikationsschnittstellen. Die **Software** subsummiert das eingebettete Betriebssystem, Softwareanwendungen im Produkt, eine erweiterte Benutzerschnittstelle sowie Produktsteuerungskomponenten [PH14, S. 6f.].

Über dem Block Produkt ist die **Netzanbindung** angeordnet. Dieser Block enthält die **Netzwerkkommunikation**, das heißt Protokolle, die eine Kommunikation zwischen Produkt und Cloud ermöglichen. Auf der Ebene der **Produktwolke** ist die **Produktdatenbank** angesiedelt. Diese enthält ein Big-Data-Datenbanksystem, das historische sowie aktuelle Produktdaten sammelt, normalisiert und verwaltet. Ein weiterer Bestandteil der Cloud ist die Anwendungsplattform. Hierbei handelt es sich um eine Entwicklungsumgebung, mit der intelligente, vernetzte Geschäftsanwendungen mit Datenzugang, Visuali-

sierung und Laufzeittools erzeugt werden können. Eine **Regel-/Analyse-Engine** stellt Regeln, Geschäftslogiken und Big-Data-Analysefähigkeiten bereit. Sie versorgt Algorithmen im Betrieb mit Informationen und neuen Erkenntnissen über die Produkte. Ein weiterer Teil der Cloud sind **intelligente Produktanwendungen**. Damit ist Software in der Cloud gemeint, die Produktfunktionen steuert, optimiert und teilweise automatisch ablaufen lässt [PH14, S. 6f.].

Die drei Hauptblöcke sind umgeben von einer Identitäts- und Sicherheitsstruktur, die Werkzeuge für die Verwaltung von Nutzerprofilen und Systemzugängen sowie für die Sicherung der Produkt-, Netzwerk- und Cloudkomponenten bereitstellt. Ein weiteres umgebendes Element ist ein **Gateway zum Anschluss externer Datenquellen**. Hierüber werden Informationen aus externen Quellen wie z.B. Wetter- oder Verkehrsdaten an das Produkt und die Cloud übertragen. Zudem existiert eine **Anbindung an Unternehmenssysteme**, die intelligente, vernetzte Systeme mit den Kernsystemen eines Unternehmens verbindet (z.B. mit PLM- oder ERP-Systemen) [PH14, S. 6f.]. Die Beziehungen zwischen den drei Hauptblöcken und den umgebenden Elementen werden rudimentär durch gerichtete Beziehungen visualisiert.

Bewertung: Die Technologie-Infrastruktur für intelligente, vernetzte Produkte nach PORTER/HEPPELMANN beschreibt generische Komponenten, die ein Unternehmen zur Realisierung von Smart Products benötigt. Dazu stellt die Technologie-Infrastruktur den grundsätzlichen Aufbau dar und visualisiert abstrahiert die Wirkungsweise des Systems. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Verarbeitung interner und externer Daten in der Cloud gelegt. Grundsätzlich lässt sich die vorgestellte Architektur für Smart Products auch auf Cyber-Physical Systems übertragen, da wesentliche CPS-Merkmale berücksichtigt werden. Lediglich die Mensch-Maschine-Schnittstelle ist in der Technologie-Infrastruktur nicht enthalten. Ein weiterer Nachteil ist die sehr abstrakte Darstellung der Wirkungsweise, da z.B. die Beziehungen zwischen den Elementen innerhalb der Hauptblöcke nicht beschrieben werden.

3.1.6 Generische Architektur von Systemen intelligenter Objekte nach DEINDL

Nach DEINDL sind intelligente Objekte *materielle betriebliche Objekte, die mit Informationstechnologien angereichert sind, um eine Zusatzfunktion im betrieblichen Kontext umzusetzen*. Sie sind in der Lage, den Zustand der Umwelt über Sensorik wahrzunehmen, mittels Aktorik mit ihr zu interagieren und Informationen zu verarbeiten [Dei13, S. 72]. Für Systeme intelligenter Objekte stellt DEINDL eine generische, anwendungsunabhängige Architektur vor, die bei der Festlegung einer prinzipiellen Lösung unterstützen soll [Dei13, S. 108].

Systeme intelligenter Objekte sind nach dem Prinzip der Modularisierung und Hierarchisierung aufgebaut. So können intelligente Objekte zu Systemen intelligenter Objekte verkoppelt werden, die sich wiederum zu übergeordneten Systemen zusammenschließen

können. Ein **System intelligenter Objekte** besteht aus mindestens einem intelligenten Objekt und realisiert eine oder mehrere **Anwendungen**, die **Geschäftsprozesse** unterstützen. Die **Umwelt** umfasst alle Elemente des Betrachtungsbereichs, die nicht Teil des Systems intelligenter Objekte sind, z.B. Nutzer oder ausgelagerte Informationsverarbeitung [Dei13, S. 108].

Der Architekturaufbau folgt den sechs Eigenschaften intelligenter Objekte. Nach **Eigenschaft 1 – Anreicherung eines Objekts um Informationstechnologien** besteht ein intelligentes Objekt aus einem physischen Grundsystem, das mit Informationstechnologien verknüpft ist. Zur Erfüllung dieser Eigenschaft wird ein **materielles Objekt** (z.B. Maschine, Produkt oder Bauteil) mit Informationstechnologien wie Aktorik, Sensorik, Kommunikationsschnittstelle, Speicher und eingebetteter Informationsverarbeitung angereichert. Dabei kann das intelligente Objekt über beliebig viele solcher Informationstechnologiekomponenten verfügen. Die erforderliche Energie wird über die **Energieversorgung** bereitgestellt [Dei13, S. 109].

Zur Erfüllung der **Eigenschaft 2 – Interaktion** und **Eigenschaft 3 – Identifikation** verfügt das intelligente Objekt über eine **Kommunikationsschnittstelle** (z.B. Funkverbindung, Ethernetverbindung etc.) oder einen **Identifikator** zur automatischen Identifikation (z.B. RFID). Über diese Elemente erfolgt eine Interaktion mit dem System intelligenter Objekte oder mit der Umwelt. Die Interaktion mit dem **Nutzer** erfolgt via **Nutzerschnittstelle**. Diese kann, muss aber nicht, Teil des intelligenten Objekts sein [Dei13, S. 109].

Die **Eigenschaft 4 – Informationsverarbeitung** setzt voraus, dass ein intelligentes Objekt über eine **eingebettete** oder **ausgelagerte Informationsverarbeitung** verfügt. Die ausgelagerte Informationsverarbeitung umfasst z.B. operative sowie Planungs- und Kontrollsysteme wie MES- oder ERP-Systeme. Eine eingebettete Informationsverarbeitung ist erforderlich, wenn die Fähigkeiten des intelligenten Objekts über die reine Identifikation hinausgehen. In Abhängigkeit von der Systemgestaltung können Daten und Informationen auf einem **Speicher** am Objekt gesammelt werden [Dei13, S. 109].

Die Fähigkeit eines intelligenten Objekts, die Umwelt wahrzunehmen und auf diese einzuwirken, beschreiben **Eigenschaft 5 – Sensorik** und **Eigenschaft 6 – Aktorik**. Dazu verfügen intelligente Objekte über **Sensorik** wie Temperaturfühler oder Sensoren zur Ortsbestimmung. Diese ermöglichen es dem Objekt, den eigenen **Zustand** und den Zustand der Umwelt zu messen. Über entsprechende **Aktorik** ist das intelligente Objekt in der Lage, die eigenen Zustände, Zustände des Systems oder der Umwelt zu verändern [Dei13, S. 110]. Die Elemente und Beziehungen der generischen Architektur von Systemen intelligenter Objekte werden in einem UML-Klassendiagramm dargestellt (siehe Bild 3-6).

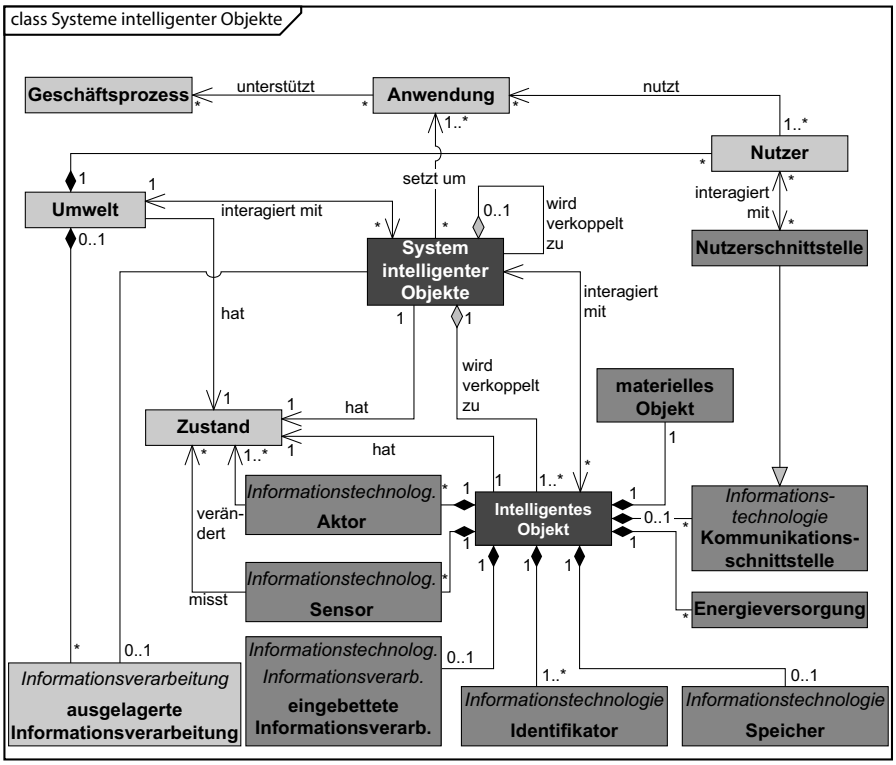


Bild 3-6: Generische Architektur von Systemen intelligenter Objekte nach DEINDL *[Dei13, S. 118]*

Die Unified Modeling Language (UML) wurde ursprünglich entwickelt, um Softwaresysteme zu erstellen [Wei06, S. 215]. Das Klassendiagramm ist eines mehrerer UML-Diagramme, das zur graphischen Darstellung von Klassen, Schnittstellen und deren Beziehungen dient. Eine Klasse (z.B. intelligentes Objekt) beschreibt *Struktur und Verhalten von Objekten, die dieselben Merkmale und Semantik besitzen* [Wei06, S. 222f.]. Die Klassen können mit Assoziationen in Beziehung zueinander gesetzt werden. Ein Beispiel für eine Assoziation ist die Komposition mit der in Bild 3-6 beschrieben wird, dass sich ein intelligentes Objekt aus mehreren Klassen wie materielles Objekt, Sensor, Aktor etc. zusammensetzt.

Einen ähnlichen Detaillierungsgrad bei der Architekturgestaltung wie DEINDL wählen TAN ET AL. Sie stellen mit der *Prototyp-Architektur für CPS* eine detaillierte und umfangreiche Architektur zur Veranschaulichung von Cyber-Physical Systems bereit. Dafür erweitern sie eine bestehende Architektur für eingebettete Systeme um CPS-Merkmale [TGP08, S. 2]. Eine ausführliche Beschreibung des Ansatzes von TAN ET AL. enthält Abschnitt A2.2 im Anhang.

Bewertung: Die generische Architektur von Systemen intelligenter Objekte nach DEINDL ist eine anwendungsunabhängige Systemarchitektur für materielle betriebliche Objekte, die mit Informationstechnik angereichert werden. Zweck der Architektur ist die Unterstützung der Festlegung einer prinzipiellen Lösung für die konkrete Anwendung intelligenter Objekte. Sie umfasst alle Elemente, die zur Erfüllung der sechs Eigenschaften solcher Objekte notwendig sind. Darüber hinaus wird das Prinzip der Modularisierung und Hierarchisierung von intelligenten Objekten berücksichtigt, die sich zu übergeordneten Systemen zusammenschließen können. Aufgrund der großen Überschneidung der Eigenschaften intelligenter Objekte mit CPS-Merkmalen ist eine Anwendung der Architektur auch für CPS möglich. Selbst das CPS-Merkmal Dienste wird durch die Berücksichtigung von Anwendungen und Geschäftsprozessen adressiert. Die Visualisierung der Architektur als UML-Klassendiagramm setzt Grundkenntnisse der UML voraus, um den Systemaufbau und die -wirkungsweise zu verstehen. Auf den praktischen Einsatz im ingenieurwissenschaftlich geprägten Maschinen- und Anlagenbau wirkt sich dieser softwaregetriebene Ansatz negativ aus. Ähnlich zu bewerten ist die Prototyp-Architektur für CPS nach TAN ET AL., deren detaillierte Darstellung sich ebenfalls negativ auf die Übersichtlichkeit der Architektur auswirkt (vgl. Abschnitt A2.2 im Anhang).

3.2 Aktuelle Ansätze im Reifegradmanagement

Reifegradmodelle sind ein vielversprechender Ansatz zur objektiven Bewertung der derzeitigen Leistungsfähigkeit von Objekten und zur schrittweisen Weiterentwicklung dieser zu höherer Reife. Bislang existiert kein Reifegradmodell für Cyber-Physical Systems, das Reifegrade für CPS beschreibt und gleichzeitig Methoden und Werkzeuge zur Leistungsbewertung und -steigerung bereitstellt. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Abschnitt zunächst bestehende Leistungsstufenmodelle für technische Systeme (vgl. Abschnitt 3.2.1) untersucht und anschließend etablierte reifegradbasierte Prozessmanagementmodelle (vgl. Abschnitt 3.2.2) analysiert.

3.2.1 Leistungsstufenmodelle für technische Systeme

Ein wichtiger Bestandteil von Reifegradmodellen sind Reifegrade, die für verschiedene Leistungsstufen die Eigenschaften eines Objekts beschreiben. Vor diesem Hintergrund werden in den folgenden Abschnitten bestehende Leistungsstufenmodelle für technische Systeme untersucht. Zu diesen gehören die CPS-Charakterisierung und erforderliche neue Fähigkeiten von CPS nach GEISBERGER/BROY (vgl. Abschnitt 3.2.1.1), die 5C-Architektur für die Implementierung von CPS nach LEE ET AL. (vgl. Abschnitt 3.2.1.2), die Fähigkeitsstufen intelligenter Objekte nach PÉREZ HERNÁNDEZ/REIFF-MARGANIEC (vgl. Abschnitt 3.2.1.3), der Werkzeugkasten Industrie 4.0 (Produkt) nach ANDERL ET AL. (vgl. Abschnitt 3.2.1.4) sowie beschreibende Merkmale und Merkmalsausprägungen intelligenter Objekte in Produktion und Logistik nach DEINDL (vgl. Abschnitt 3.2.1.5). Weitere

Leistungsstufenmodelle sind die Fähigkeiten intelligenter, vernetzter Systeme nach PORTER/HEPPELMANN (vgl. Abschnitt 2.5.2), das Industrie 4.0-Readiness-Modell nach LICHTBLAU ET AL. (vgl. [LSB+15]), der Klassifizierungsrahmen für Embedded Devices nach DIEKMANN/HAGENHOFF (vgl. [DH06, S. 6]) oder das Connected Product Maturity Model (vgl. [PTC15, S. 2]).

3.2.1.1 CPS-Charakterisierung und erforderliche neue Fähigkeiten von CPS nach GEISBERGER/BROY

Auf Basis einer Analyse verschiedener Anwendungsszenarien von CPS in den Bereichen Mobilität, Medizin, Energieversorgung und Produktion charakterisieren GEISBERGER/BROY die Fähigkeiten von CPS mit fünf aufeinander aufbauenden Stufen. Mit jeder Stufe steigt dabei die Offenheit, Komplexität und Intelligenz der Systeme [GB12, S. 60]. Die von GEISBERGER/BROY definierten Stufen werden im Folgenden näher erläutert. Bild A-3 im Anhang zeigt eine Übersicht der CPS-Fähigkeiten je Stufe.

Stufe 1 – Verschmelzung von physikalischer und virtueller Welt: Wesentliche Merkmale von CPS auf der ersten Stufe sind die unmittelbare Erfassung, Vernetzung, Interaktion und Steuerung bzw. Beeinflussung der physikalischen und digitalen Welt. CPS sind in der Lage, Daten der physikalischen Welt mittels Sensoren zu erfassen und in Echtzeit zu fusionieren und zu verarbeiten. Auf Basis der erfassten Informationen können CPS die aktuelle Lage im Hinblick auf die gesetzten Ziele interpretieren. Mögliche Störungen, Risiken oder Hindernisse werden abgeleitet und prognostiziert. Die Steuerung und Regelung des Systems erfolgt in Echtzeit und zum Teil global verteilt [GB12, S. 61].

Stufe 2 – Systems of Systems mit dynamisch wechselnden Systemgrenzen: Je nach Anwendungsszenario bilden CPS zeitlich begrenzte Systems of Systems, die einem gemeinsamen Zweck dienen und aufgrund des Zusammenspiels erweiterte Funktionalitäten anbieten. Dazu müssen sie in der Lage sein, Umgebungs- und Situationsdaten zu interpretieren und situationsabhängig weitere Systeme sowie Dienste auszuwählen und miteinzubinden. Die Systeme organisieren sich selbst und können die zur Verfügung stehenden Komponenten und Dienste hinsichtlich ihrer Qualität und ihres Beitrags zum Systemziel bewerten. Über eine entsprechende Zugangskontrolle kann der Zugang minderwertiger oder schädlicher Teilsysteme verhindert werden [GB12, S. 61f.].

Stufe 3 – Kontextadaptive und ganz oder teilweise autonom handelnde Systeme: Die Fähigkeit, teilautonom oder autonom zu handeln und sich an wechselnde, zum Teil unvorhergesehene Umgebungssituationen und Anwendungserfordernisse anzupassen, erlangen CPS auf dieser Stufe. Dabei greifen sie zunehmend selbstständig in Abläufe ein und entscheiden über ein nützliches und wertvolles Systemverhalten. Dies erfordert Fähigkeiten zum umfassenden Wahrnehmen, Auswählen, Interpretieren, Entscheiden und Handeln [GB12, S. 62f.].

Stufe 4 – Kooperative Systeme mit verteilter, wechselnder Kontrolle: Auf dieser Stufe werden Entscheidungen zunehmend dezentral getroffen. Dazu verhandeln die Einzelsysteme, unter Berücksichtigung der lokalen Ziele, über die durchzuführenden Schritte zu Erreichung der globalen Ziele des Gesamtsystems. Somit verfügen CPS über eine eigene und gemeinsame Kontroll- und Entscheidungsautonomie. Dabei sind CPS in der Lage, kooperativ zu lernen und sich gemeinsam an Situationen und Erfordernisse anzupassen [GB12, S. 64f.].

Stufe 5 – Umfassende Mensch-System-Kooperation: Auf der höchsten Stufe haben CPS die Fähigkeit, den physischen Zustand ihrer Nutzer (Aufmerksamkeit, Erregtheit etc.) zu erkennen, zu interpretieren, eine Diagnose zu erstellen, biologische Zustandsgrößen zu messen und die Mimik zu interpretieren. Sie sind in der Lage, die Gefühle und das Verhalten von Menschen und Menschengruppen direkt oder indirekt zu erfassen und zu beeinflussen. Dadurch erweitern CPS die Wahrnehmung und Handlungsfähigkeit des Menschen [GB12, S. 65ff.].

Bewertung: GEISBERGER/BROY definieren fünf aufeinander aufbauende Leistungsstufen für Cyber-Physical Systems und beschreiben die Gesamtsystemfähigkeiten je Stufe. Die Fähigkeiten werden detailliert und anwendungsunabhängig beschrieben. Dabei spannen GEISBERGER/BROY eine Vision von CPS auf, die von global verteilter Datenerfassung und -interpretation bis hin zur umfassenden Mensch-System-Kooperation reicht. Der Status Quo vieler Systeme im Maschinen- und Anlagenbau lässt sich dadurch schwer abbilden, da die Erzeugnisse zum Großteil noch nicht über die Fähigkeiten der ersten Stufe verfügen. Zudem fehlen konkrete Handlungsfelder und Handlungselemente, die CPS in verschiedene Themengebiete gliedern und konkrete Reifegrade pro Leistungsstufe vorgeben. Somit ist nicht erkennbar, welche Maßnahmen getroffen werden müssen, um CPS zu einer höheren Stufe weiterzuentwickeln.

3.2.1.2 5C-Architektur für die Implementierung von CPS nach LEE ET AL.

Die 5C-Architektur für die Implementierung von CPS nach LEE ET AL. soll als Anleitung zur Entwicklung und Einführung von Cyber-Physical Systems in der industriellen Produktion dienen. Um die abstrakten Eigenschaften von CPS zu konkretisieren, definieren die Autoren mit der 5C-Architektur fünf aufeinander aufbauende Stufen, die den Weg eines CPS von der anfänglichen Datenerfassung hin zu einem selbstkonfigurierenden und -optimierenden System aufzeigen [LBK15, S. 19]. Die Pyramidenform der Architektur (siehe Bild 3-7) verdeutlicht den zunehmenden Wert der Daten bei gleichzeitig sinkender Datenmenge auf dem Weg von geringer zu hoher Stufe [BL15-ol]. Die fünf Stufen der 5C-Architektur werden nachfolgend erläutert:

Stufe 1 – Smart Connection Level: Die Basis bildet das Smart Connection Level, wo der Grundstein für die Entwicklung von CPS gelegt wird. Es werden exakte und zuverlässige Daten von Maschinen und ihren Komponenten erfasst. Dies erfolgt mittels Sensoren oder übergeordneten Systemen wie MES oder ERP. Wichtige Aspekte auf der

ersten Stufe sind die medienbruchfreie Datenakquisition, Datenübertragung sowie die Auswahl geeigneter Sensoren [LBK15, S. 19].

Stufe 2 – Data-to-Information Conversion Level: Auf dieser Stufe werden Informationen aus Daten gewonnen. Durch Anwendung entsprechender Algorithmen können Aussagen über den Zustand von Maschinenkomponenten getroffen und potentielle Störungen vorhergesagt werden. Dadurch erhält das System ein Selbstbewusstsein [LBK15, S. 19].

Stufe 3 – Cyber Level: Auf der dritten Stufe entstehen virtuelle Zwillinge von Komponenten und Gesamtsystem. Umfassende Daten des Systemverbunds werden analysiert und Informationen über den Zustand der Einzelsysteme und des Gesamtsystems gewonnen. Echtzeitdaten werden mit historischen Daten verglichen, um das zukünftige Systemverhalten vorherzusagen [LBK15, S. 20].

Stufe 4 – Cognition Level: Das System ist in der Lage, sich veränderten Systemzielen anzupassen und unter Berücksichtigung des eigenen Systemzustands Aufgaben zu priorisieren. Darüber hinaus erfolgt auf Basis geeigneter Visualisierung eine verbesserte Kommunikation mit dem Nutzer [LBK15, S. 20].

Stufe 5 – Configuration Level: Auf dieser Ebene ist das CPS in der Lage, sich selbst zu konfigurieren, um bei Störungen oder Teilausfällen nicht vollständig zu versagen (Resilienz). Somit verfügt das System über Fähigkeiten der Selbstkonfiguration, -anpassung und -optimierung bei Abweichungen und Störungen [LBK15, S. 20].

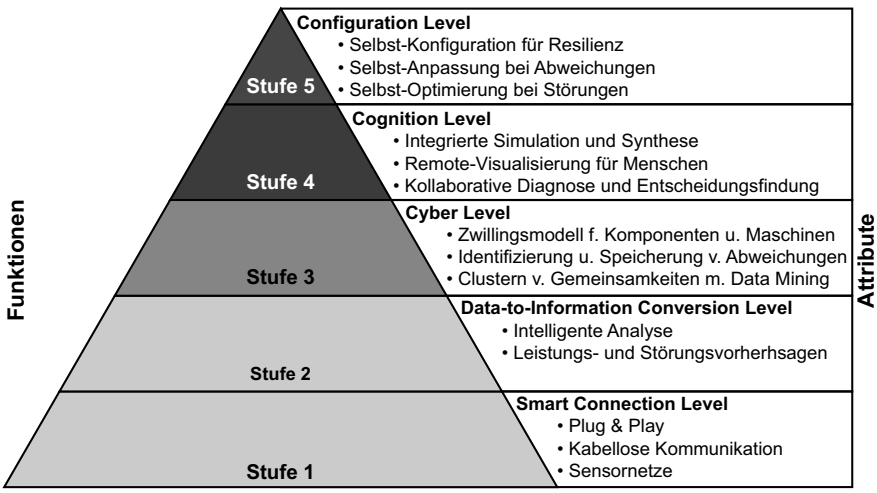


Bild 3-7: 5C-Architektur für die Implementierung von CPS nach LEE ET AL. [LBK15, S. 19]

Bewertung: Die 5C-Architektur für die Implementierung von CPS nach LEE ET AL. soll als Hilfsmittel zur Entwicklung von Cyber-Physical Systems in der industriellen Produktion dienen. Dazu schlagen LEE ET AL. fünf aufeinander aufbauende Leistungsstufen vor

und beschreiben die Eigenschaften des CPS auf jeder Stufe. Durch die Fokussierung technischer Systeme in der industriellen Produktion definieren sie Leistungsstufen, die sich dem derzeitigen Leistungsstand von Maschinen und Anlagen annähern. Konkrete Handlungsfelder und -elemente sowie ein Vorgehen zur Leistungsbewertung und -steigerung werden nicht beschrieben. Somit fehlen Aussagen über die Zusammenhänge zwischen den Leistungsstufen und über konkrete Maßnahmen zur Verbesserung des CPS.

3.2.1.3 Fähigkeitsstufen intelligenter Objekte nach PÉREZ HERNÁNDEZ/REIFF-MARGANIEC

Zur Klassifizierung von intelligenten Objekten (Smart Objects) entwickeln PÉREZ HERNÁNDEZ/REIFF-MARGANIEC ein fünfstufiges Modell. Bei der Modellerstellung orientieren sich die Autoren an der Reifegradmodellfamilie CMMI, die in Abschnitt 3.2.2.2 näher erläutert wird. Die fünf Stufen basieren auf den Fähigkeiten intelligenter Objekte, die PÉREZ HERNÁNDEZ/REIFF-MARGANIEC in *Kernfähigkeiten* und *erweiterte Fähigkeiten* unterscheiden. Die Kernfähigkeiten Identifikation (digital identification), Datenspeicherung (retention), Kommunikation (communication) und Energieversorgung (energy harvesting) muss ein intelligentes Objekt haben, um als solches zu gelten. Erweiterte Fähigkeiten wie Informationsverarbeitung (processing), Vernetzung (networking) oder Sensorik und Aktorik (sensing and actuating) sind optional. Insgesamt werden 17 Fähigkeiten intelligenter Objekte identifiziert und in fünf Stufen untergliedert (siehe Bild 3-8) [PR14, S. 311ff.].

Stufe 1 – Essentiell (essential): Die erste Stufe des Modells adressiert die Kernfähigkeiten des intelligenten Objekts. Es ist in der Lage, sich eindeutig zu identifizieren und mit anderen Systemen oder dem Benutzer Informationen auszutauschen. Das Objekt wird mit Energie versorgt und kann Daten speichern. Durch die Fähigkeiten der ersten Stufe ist es möglich, ein digitales Abbild des physikalischen Objekts zu erzeugen [PR14, S. 314].

Stufe 2 – Vernetzt (networked): Objekte auf dieser Stufe verfügen über eine rudimentäre Informationsverarbeitung und sind programmierbar. Darüber hinaus haben Objekte die Fähigkeit der Vernetzung, um sich z.B. mit anderen Objekten über das Internet zu verbinden. Die Fähigkeiten der zweiten Stufe ermöglichen einen flexiblen Einsatz von intelligenten Objekten [PR14, S. 314].

Stufe 3 – Verbessert (enhanced): Durch Sensoren und Aktoren können intelligente Objekte Daten der Umwelt aufnehmen und auf diese einwirken. Dabei wird das Systemverhalten aufgezeichnet und ggf. an andere Systeme weitergeleitet. Ein unautorisierter Zugriff auf die Daten wird durch entsprechende Schutzmaßnahmen verhindert. Durch die Fähigkeit der Regelanpassung kann das Objekt sein Verhalten auf Basis vordefinierter Strategien anpassen [PR14, S. 314f.].

Stufe 4 – Bewusstsein (aware): Das intelligente Objekt verfügt über Fähigkeiten zum bewussten Umgang mit sich selbst, dem Benutzer und der Umwelt. Durch das Selbstbewusstsein ist es dem Objekt möglich, den eigenen Zustand zu erkennen, diesen mit historischen Daten abzugleichen und das Systemverhalten anzupassen. Das Benutzerbewusstsein verbessert den Umgang mit dem Benutzer, indem das Benutzerverhalten über die Zeit registriert wird. Das Umfeldbewusstsein adressiert das adaptive Verhalten hinsichtlich Änderungen im Umfeld des Systems. Durch das Zielmanagement ist das intelligente Objekt in der Lage, bei veränderten Zielen den besten Weg zur Zielerreichung zu ermitteln [PR14, S. 315].

Stufe 5 – Internet der Dinge vollständig (IoT complete): Auf der höchsten Stufe haben intelligente Objekte die Fähigkeit, Entscheidungen auf Basis von Erfahrungen zu treffen und das Verhalten über den gesamten Lebenszyklus hinweg selbst zu organisieren. Dazu verwenden sie z.B. maschinelle Lernverfahren. Zudem kommunizieren sie eigenständig mit anderen Systemen und tauschen bedarfsgerecht Informationen aus [PR14, S. 315].

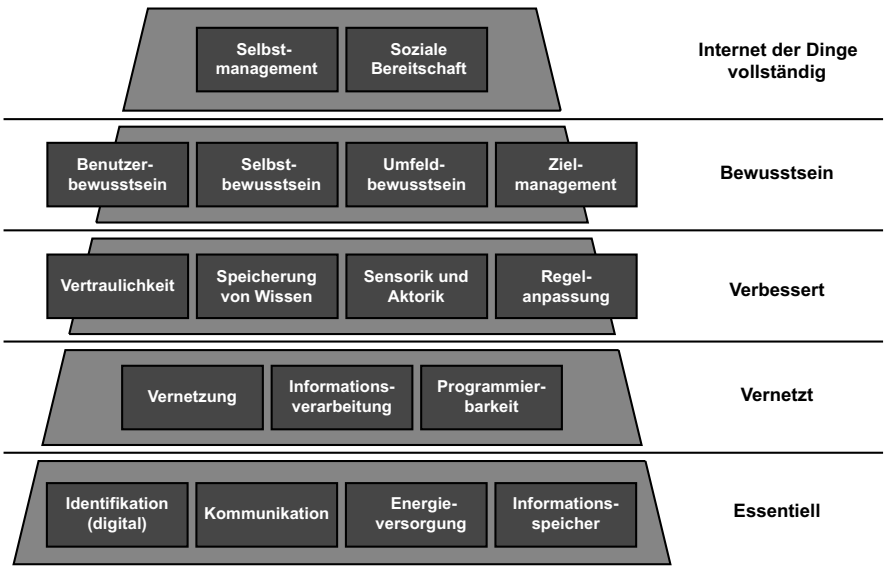


Bild 3-8: Fähigkeitsstufen intelligenter Objekte nach PÉREZ HERNÁNDEZ/REIFF-MARGANIEC [PR14, S. 314]

Bewertung: PÉREZ HERNÁNDEZ/REIFF-MARGANIEC stellen ein Modell zur Klassifizierung von intelligenten Objekten und ihren Fähigkeiten vor. Dafür definieren sie 17 Fähigkeiten, die sie in fünf Stufen einordnen. Die Autoren beschränken sich dabei auf die Beschreibung der Objekteigenschaften auf jeder Stufe, definieren aber keine konkreten Stellhebel zur Verbesserung des Systems. Somit fehlen die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Stufen. Ferner geben die Autoren kein Vorgehen zur Anwendung des Stufenmodells vor.

3.2.1.4 Werkzeugkasten Industrie 4.0 (Produkt) nach ANDERL ET AL.

Der Werkzeugkasten Industrie 4.0 ist Teil eines Leitfadens, der als Orientierungshilfe zur Einführung von Industrie 4.0 in den Mittelstand dient. Darüber hinaus enthält der Leitfaden eine Vorgehensweise, die die Anwendung des Werkzeugkastens im Unternehmen beschreibt [AF15, S. 8]. Nachfolgend werden zunächst Aufbau und Inhalt des Werkzeugkastens beschrieben und anschließend die Vorgehensweise erläutert.

Der **Werkzeugkasten** unterteilt das Themenfeld Industrie 4.0 in einzelne Handlungsfelder und zeigt mögliche Entwicklungsstufen je Handlungsfeld auf. Dadurch sollen Unternehmen mögliche Entwicklungsstufen von Industrie 4.0 aufgezeigt und Ansätze zur Erreichung dieser vermittelt werden. Grundsätzlich unterscheidet der Werkzeugkasten die Bereiche Produkt und Produktion. Der Bereich Produkt unterstützt die Ideengenerierung bei der Entwicklung von Sachleistungen, während der Bereich Produktion Ansatzpunkte zur Verbesserung der eigenen Fertigung liefert [AF15, S. 11ff.]. Da im Rahmen dieser Arbeit Erzeugnisse des Maschinen- und Anlagenbaus adressiert werden, fokussieren sich nachfolgende Ausführungen auf den Bereich Produkt (siehe Bild 3-9).

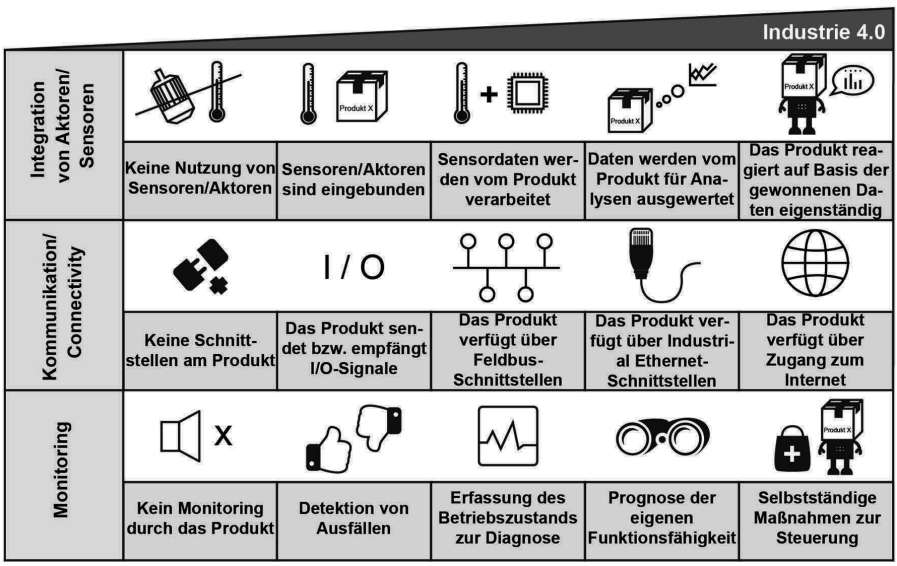


Bild 3-9: Auszug des Werkzeugkastens Industrie 4.0 (Produkt) nach ANDERL ET AL. [AF15, S. 9]

Der Bereich Produkt des Werkzeugkastens bezieht sich auf Produkte und Teilkomponenten gleichermaßen. Es werden sechs Handlungsfelder, sog. Anwendungsebenen, vorgegeben, die jeweils fünf Entwicklungsstufen annehmen können [AF15, S. 13]. Nachfolgend werden die einzelnen Handlungsfelder näher erläutert:

Integration von Sensoren und Aktoren: Dieses Handlungsfeld bezieht sich auf die Integration von Sensoren, Aktoren und Rechenkapazitäten in physische Objekte. Die fünf Entwicklungsstufen reichen von keiner Nutzung von Sensoren und Aktoren bis hin zum autonomen Verhalten des Produkts auf Basis der gewonnenen Daten [AF15, S. 13].

Kommunikation und Connectivity: Die Ausprägung von Kommunikationsschnittstellen am Produkt und dessen Vernetzung sind Gegenstand dieses Handlungsfelds. Ausgehend von fehlenden Schnittstellen, kann das Produkt mit steigenden Stufen I/O-Signale empfangen, über Feldbus- oder Industrial Ethernet-Schnittstellen verfügen oder einen Internetzugang haben [AF15, S. 13].

Funktionalitäten zur Datenspeicherung und Informationsaustausch: Produkte oder Teilkomponenten können verschiedene Fähigkeiten zur Datenspeicherung und zum Informationsaustausch haben. Während das Produkt auf der niedrigsten Stufe über keine solcher Funktionalitäten verfügt, ist der Informations- und Datenaustausch auf der höchsten Stufe integraler Bestandteil der Produktfunktion [AF15, S. 13].

Monitoring: Die Überwachung des eigenen Systemzustands ist ein wesentlicher Aspekt vieler Industrie 4.0-Anwendungen. Mögliche Entwicklungsstufen des Monitorings sind z.B. die Detektion von Ausfällen, die Erfassung des Betriebszustands zur Diagnose oder die Prognose der eigenen Funktionsfähigkeit [AF15, S. 13].

Produktbezogene IT-Services: Die Bereitstellung von IT-Services durch das Produkt ist Gegenstand dieses Handlungsfelds. Dabei reichen die Entwicklungsstufen von der fehlenden Service-Bereitstellung über die IT-Service-Ausführung direkt am Produkt bis hin zur vollständigen Eingliederung des Produkts in die IT-Service-Infrastruktur des Unternehmens [AF15, S. 13].

Geschäftsmodelle um das Produkt: Die Frage nach neuen Geschäftsmodellen auf Basis neuer Produkteigenschaften und -funktionen soll durch dieses Handlungsfeld beantwortet werden. Produktbezogene Geschäftsmodelle können verschiedene Entwicklungsstufen annehmen, vom reinen Verkauf der Standardprodukte bis hin zum Verkauf von Produktfunktionen [AF15, S. 13].

Die **Vorgehensweise** des Leitfadens besteht aus den fünf Phasen Vorbereitung, Analyse, Kreativität, Bewertung und Einführung. Diese Phasen werden im Unternehmen in Form von fachdisziplinübergreifenden Workshops durchlaufen. Gegenstand der **Vorbereitungsphase** ist die Erzeugung eines einheitlichen Verständnisses zum Thema Industrie 4.0. Dazu werden grundlegende Kenntnisse über den eigenen Markt und die eigene Produktion erfasst. Anschließend erfolgt im Rahmen der **Analysephase** die Aufnahme der bestehenden Kompetenzen im Unternehmen. Wesentliches Hilfsmittel dafür ist der vorgestellte Werkzeugkasten, in den die eigenen Produkte bzw. die eigene Produktion eingeordnet wird. In der **Kreativitätsphase** werden auf Basis des Status Quo Ideen zur Verbesserung des Produkts und der Produktion erarbeitet. Eine Bewertung und Auswahl der

Ideen erfolgt in der anschließenden **Bewertungsphase**. Im Zuge der abschließenden **Einführungsphase** werden die ausgewählten Ideen in einer Vorlage für die Unternehmensleitung weiter konkretisiert [AF15, S. 10]. Für jede dieser Phasen enthält der Leitfaden eine detaillierte Beschreibung der durchzuführenden Tätigkeiten. Eine Erprobung des Vorgehens erfolgte bereits bei verschiedenen Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus.

Bewertung: Der Leitfaden Industrie 4.0 soll insbesondere kleine und mittlere Unternehmen bei der Einführung von Industrie 4.0 unterstützen. Dazu enthält er einen Werkzeugkasten, der für die Bereiche Produkt und Produktion Handlungsfelder definiert und verschiedene Entwicklungsstufen je Handlungsfeld aufzeigt. In diesem Sinne wird Industrie 4.0 in greifbarere Themengebiete unterteilt, sodass Unternehmen konkrete Ideen für ihre Produkte oder ihre Produktion entwickeln können. Da der Leitfaden bereits bei Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus erprobt wurde, ist eine grundsätzliche Praxistauglichkeit gegeben. Im Hinblick auf Cyber-Physical Systems ist der Werkzeugkasten jedoch nur eingeschränkt nutzbar. Zum einen fehlt das Merkmal der Mensch-Maschine-Schnittstelle, zum anderen werden die Merkmale Sensoren, Aktoren und Informationsverarbeitung nicht getrennt voneinander betrachtet.

3.2.1.5 Beschreibende Merkmale und Merkmalsausprägungen intelligenter Objekte in Produktion und Logistik nach DEINDL

Für die Einsatzgestaltung intelligenter Objekte in der Produktion und Logistik (vgl. Abschnitt 3.1.6) bestimmt DEINDL Merkmale und Merkmalsausprägungen für solche Systeme. Die Merkmale und deren Ausprägungen dienen als Hilfsmittel bei der Suche nach prinzipiellen Lösungen für intelligente Objekte. So können mit Hilfe der Merkmale typische Anwendungen intelligenter Objekte identifiziert, wiederkehrende Funktionen erkannt und dafür geeignete Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente gesucht werden [Dei13, S. 93].

Intelligente Objekte werden zu einem System intelligenter Objekte aggregiert, das eine oder mehrere Anwendungen ausführt. Um dem Aspekt der Hierarchisierung gerecht zu werden, unterscheidet DEINDL zwischen anwendungsbezogenen, systembezogenen und objektbezogenen Merkmalen [Dei13, S. 75]. Die einzelnen Merkmale und deren Ausprägungen werden im Folgenden beschrieben. Eine Übersicht der Merkmale zeigt Bild 3-10.

Anwendungsbezogene Merkmale: Anwendungsbezogene Merkmale beziehen sich auf prozessuale und organisatorische Aspekte des Einsatzes intelligenter Objekte. Merkmale der Anwendungsebene sind die Grundfunktion, der Automatisierungsgrad und die horizontale Integration [Dei13, S. 76]. Das Merkmal **Grundfunktion** zielt auf die Anreicherung physikalischer Objekte um zusätzliche Funktionalitäten ab und kann die Ausprägungen *Lokalisierung*, *Überwachung*, *Objektinformation* und *Aktion* annehmen. Der **Automatisierungsgrad** adressiert die Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine. Hier

werden die Ausprägungen *teilautomatisiert* und *vollautomatisiert* unterschieden. Das anwendungsbezogene Merkmal **horizontale Integration** bewertet die Integration der Informationsflüsse. *Keine* horizontale Integration liegt vor, wenn die gesammelten Informationen von Systemen intelligenter Objekte für andere Informationssysteme nicht zugänglich sind. *Innerbetrieblich* bzw. *zwischenbetrieblich* sind die Ausprägungen für den unternehmensinternen und -übergreifenden Informationsaustausch [Dei13, S. 78ff.].

Anwendung	**Grundfunktion**	Lokalisierung	Überwachung	Objekt-information	Aktion
	Automatisierungsgrad	teilautomatisiert		vollautomatisiert	
	horizontale Integration	keine	innerbetrieblich	zwischenbetrieblich	
System	**Koordination**	vertikal	kombiniert	horizontal	
	Ort der IV	ausgelagert	kombiniert	eingebettet	
	Ort der Datenhaltung	ausgelagert	kombiniert	eingebettet	
Objekt	**Grad der IV**	Mitteilung des Identifikators	Datenhandhabung	Informationserkennung	Entscheidungsfindung
	Sensorik	keine	eine Messgröße	mehrere Messgrößen	
	Aktorik	keine	Nutzerrückmeldung	physische Aktion	Nutzerinteraktion
	Mobilität	stationär		mobil	

IV: Informationsverarbeitung

Bild 3-10: Beschreibende Merkmale und Merkmalsausprägungen intelligenter Objekte in Produktion und Logistik nach DEINDL [Dei13, S. 92]

Systembezogene Merkmale: Die Merkmale der Systemebene geben Aufschluss darüber, wie das intelligente Objekt in das System eingebettet ist [Dei13, S. 75]. Das systembezogene Merkmal **Koordination** beschreibt die Abstimmung von Aktivitäten einzelner Systeme zur Erreichung eines übergeordneten Ziels. Die Koordination kann *vertikal* erfolgen, d.h. durch Weisung von übergeordneten Elementen, *horizontal* durch gemeinsame Entscheidungsfindung der Elemente oder *kombiniert* als Mischform aus vertikaler und horizontaler Koordination. Das Merkmal **Ort der Informationsverarbeitung** (IV) kann die Ausprägungen *ausgelagert* (IV findet zentral und nicht am Objekt statt), *kombiniert* (IV erfolgt sowohl zentral im Netzwerk als auch dezentral am Objekt) und *eingebettet* (IV erfolgt dezentral am Objekt selbst) annehmen. Der **Ort der Datenhaltung** gibt an, wo Daten gespeichert werden. Dies kann entweder *ausgelagert* in einer zentralen Datenbank, *kombiniert* oder *eingebettet* am Objekt erfolgen [Dei13, S. 81ff.]

Objektbezogene Merkmale: Objektbezogene Merkmale beziehen sich auf die Gestaltung des einzelnen intelligenten Objekts [Dei13, S. 75]. Gemäß den in Abschnitt 3.1.6

beschriebenen Eigenschaften intelligenter Objekte werden die Merkmale Grad der Informationsverarbeitung, Sensorik, Aktorik und Mobilität unterschieden. Das Merkmal **Grad der Informationsverarbeitung** beschreibt die zunehmende Intelligenz von Objekten. Diese kann von der einfachen *Mitteilung eines Identifikators* über die Fähigkeiten zur *Datenhandhabung* oder *Informationserkennung* bis hin zur *Entscheidungsfindung* variieren. **Sensorik** ist ein Merkmal zur Beschreibung der Fähigkeit von Objekten, den eigenen Zustand und den der Umwelt wahrnehmen zu können. Die Sensorik kann die Ausprägungen *keine*, *eine Messgröße* und *mehrere Messgrößen* annehmen. Die Möglichkeit der Einflussnahme auf den eigenen Zustand und die Umwelt wird durch das Merkmal **Aktorik** adressiert. Die Ausprägungen der Aktorik sind *keine Aktorik*, *Nutzerrückmeldung*, *physische Aktion* und *Nutzerinteraktion*. Das Merkmal der **Mobilität** macht deutlich, ob es sich um ein *stationäres* oder *mobiles* Objekt handelt [Dei13, S. 85ff.].

Bewertung: DEINDL beschreibt Merkmale und Merkmalsausprägungen zur Einsatzgestaltung intelligenter Objekte. Damit wird ein Hilfsmittel zur Verfügung gestellt, das bei der Suche nach prinzipiellen Lösungen für intelligente Objekte unterstützt. Durch den Fokus auf Anwendungen in der Produktion und Logistik ist der Ansatz prinzipiell für den Maschinen- und Anlagenbau relevant. Jedoch fehlen im Hinblick auf Cyber-Physical Systems wesentliche Merkmale wie Dienste und Mensch-Maschine-Schnittstelle. Zudem fehlen Angaben über den Zusammenhang der einzelnen Merkmalsausprägungen.

3.2.2 Reifegradbasierte Prozessmanagementmodelle

Damit technische Systeme ausgehend vom Status Quo zu geeigneter Reife geführt werden können, bedarf es unterstützender Methoden und Werkzeuge. Da bislang keine adäquaten Reifegradmodelle für CPS existieren, werden im Folgenden ausgewählte Reifegradmodelle aus dem Prozessmanagement untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung für die zu entwickelnde Systematik überprüft. Die untersuchten Reifegradmodelle sind der VPS-Benchmark (vgl. Abschnitt 3.2.2.1), CMMI (vgl. Abschnitt 3.2.2.2), die Methode zur Leistungsbewertung und -steigerung der Mechatronikentwicklung nach BALÁZOVÁ (vgl. Abschnitt 3.2.2.3) sowie PEMM (vgl. Abschnitt 3.2.2.4). Die Beschreibung und Bewertung des EFQM Excellence Modell ist Abschnitt A2.4 im Anhang zu entnehmen.

3.2.2.1 VPS-Benchmark

Der VPS-Benchmark ist ein Reifegradmodell zur Analyse und Optimierung des Einsatzes von Virtual Prototyping und Simulation (VPS) im Produktentwicklungsprozess. Das Reifegradmodell richtet sich an kleine und mittlere Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus sowie verwandter Branchen und unterstützt diese dabei, den Status Quo in der Produktentwicklung zu erfassen und die Nutzenpotentiale von VPS zu erkennen und zu erschließen [Ben13, S. 76], [GP14, S. 327].

Der VPS-Benchmark gliedert sich in die drei Bereiche Leistungsbewertung, Zieldefinition und Leistungssteigerung. Der Bereich **Leistungsbewertung** enthält verschiedene Elemente, die sich am typischen Aufbau von Reifegradmodellen orientieren, wie er in Abschnitt 2.5.1 beschrieben wurde. Die *Themengebiete* wie z.B. Datenmanagement oder Produktanalysen zerteilen den Betrachtungsgegenstand in übergeordnete Aufgabenkomplexe. Somit entsprechen sie den Handlungsfeldern bei typischen Reifegradmodellen. Jedes Themengebiet hat verschiedene *Handlungselemente*, die als Fragen formuliert, der Leistungserfassung dienen. Ein beispielhaftes Handlungselement des Themengebiets Datenmanagement ist die Verwaltung von Produktdaten: „Wie verwalten Sie Ihre Produktdaten?“. Jedes Handlungselement hat verschiedene *Leistungsstufen*, deren Anzahl je nach Handlungselement variieren kann. Die Leistungsstufen sind vordefinierte Antworten, die den derzeitigen Leistungsstand eines Unternehmens ausdrücken sollen. Hinsichtlich des Handlungselements Verwaltung von Produktdaten im Themengebiet Datenmanagement ist eine exemplarische Leistungsstufe „in gut organisierten Datenstrukturen“. Alle Leistungsstufen sind mit einem *Reifegrad* verknüpft, damit die Leistung eines Unternehmens objektiv und messbar auf einem abstrakten Niveau beschrieben werden kann. Somit gibt der Reifegrad Aufschluss darüber, wie weit fortgeschritten ein Unternehmen in den jeweiligen Themengebieten ist [Ben13, S. 80f.].

Im Rahmen der **Zieldefinition** wird auf Basis der Leistungsbewertung eine individuelle Zielleistungsstufe empfohlen. Diese fußt auf Einflüssen mit denen das Unternehmen konfrontiert wird. Der *Einflussbereich* ist ein Element der Zieldefinition, das als Äquivalent zu den Themengebieten bei der Leistungsbewertung betrachtet werden kann. Beispiele für Einflussbereiche in Bezug auf VPS sind das Produkt, das Unternehmen und das Umfeld. *Einflüsse* haben Auswirkungen auf die Handlungselemente und die anzustrebende Zielleistungsstufe des Unternehmens. So beeinflusst beispielsweise die Anzahl der Ingenieure („Wie viele beschäftigen Sie?“) die Verwaltung der Produktdaten. Jeder Einfluss hat mehrere Ausprägungen mit vordefinierten Antworten zu den Einflüssen, z.B. „20 bis 40 Ingenieure“. Aus den Einflüssen und Ausprägungen ergibt sich eine konkrete Zielleistungsstufe, die in einen abstrakten *Zielreifegrad* überführt wird. Wichtig ist dabei, dass nicht der maximal mögliche Reifegrad angestrebt wird, sondern ein unternehmensspezifisch sinnvoller. Ein beispielhafter Zielreifegrad ist der Einsatz eines PDM[32]-Systems zur Optimierung des Produktdatenmanagements [Ben13, S. 81f.].

Gegenstand der **Leistungssteigerung** ist die Schließung der Lücke zwischen aktuellem Reifegrad und Zielreifegrad. Aus dem Vergleich der derzeitigen Leistungsstufe mit der Zielleistungsstufe werden konkrete *Maßnahmen* für das Unternehmen, wie die Einführung eines PDM-Systems, abgeleitet. In der Regel wird eine Vielzahl von Maßnahmen identifiziert. Daher werden die Maßnahmen in Form einer Aufwand-Nutzen-Betrachtung priorisiert und mit Hilfe einer *Roadmap* auf einer Zeitachse angeordnet. Die Daten und Ergebnisse des VPS-Benchmarks werden in einer **Benchmark-Datenbank** gespeichert.

[32] PDM: Produktdatenmanagement

So ist ein Vergleich mit anderen Unternehmen möglich [Ben13, S. 82]. Bild 3-11 veranschaulicht die vorgestellte Struktur des VPS-Benchmarks.

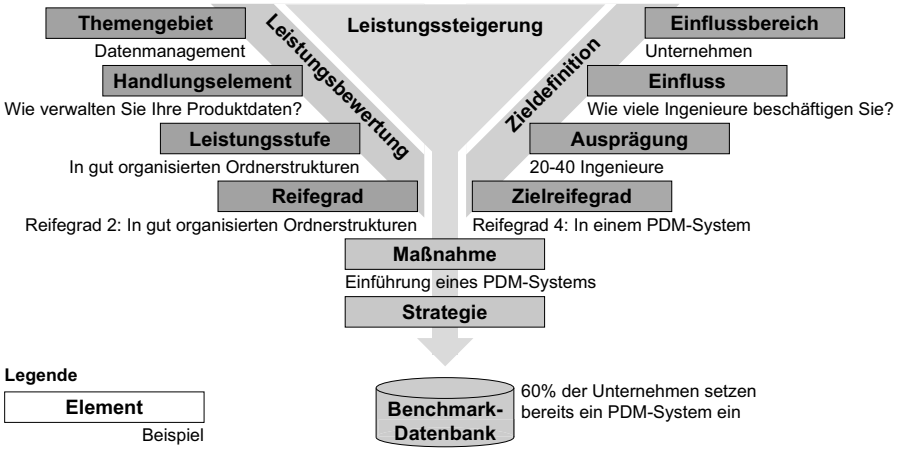


Bild 3-11: Struktur des Verfahrens VPS-Benchmark [Ben13, S. 80]

Die Inhalte des Reifegradmodells werden mittels **Matrizen und Berechnungsvorschriften** untereinander verknüpft. Mit Hilfe einer *Abhängigkeitsmatrix* wird beschrieben, welche Handlungselemente in welchem Themengebiet relevant sind. Sie dient zur Komplexitätsreduzierung der *Reifegradmatrix*, die den derzeitigen Reifegrad und den Zielreifegrad des Unternehmens berechnet. Äquivalent zur Abhängigkeitsmatrix beschreibt eine *Beeinflussungsmatrix*, welche Einflüsse für welche Themengebiete relevant sind. Dadurch kann die *Zieldefinitionsmatrix* vereinfacht werden, mit der für jedes Handlungselement die anzustrebende Zielleistungsstufe ermittelt wird. Die *Fragenverlaufsmatrix* dient zur Steuerung des Fragenverlaufs, indem entschieden wird, ob eine Frage gestellt oder aufgrund einer vorherigen Leistungsstufe entfernt wird. Mittels *Maßnahmenmatrix* erfolgt schließlich die Auswahl geeigneter Maßnahmen [Ben13, S. 83].

Die **Anwendung** des VPS-Benchmarks erfolgt im Rahmen von Workshops. Je nach ausgewählten Themengebieten werden in den Workshops bis zu 200 Fragen beantwortet. Unterstützt werden die Workshops durch ein Software-Werkzeug, das alle Antworten und Ergebnisse dokumentiert und eine schnelle Durchführung ermöglicht [GP14, S. 330f.].

Bewertung: Der VPS-Benchmark orientiert sich mit den drei Bereichen Leistungsbewertung, Zieldefinition und Leistungssteigerung am klassischen Aufbau von Leistungsbewertungs- und -steigerungsmodellen (vgl. Abschnitt 2.5.1). Im Zuge der Leistungsbewertung ermöglichen vorgegebene Fragen und Antwortmöglichkeiten eine objektive Erfassung des derzeitigen Leistungsstands von Unternehmen. Die Berücksichtigung von Einflüssen stellt sicher, dass bei der Zieldefinition nicht der maximal mögliche, sondern ein unternehmensadäquater Zielreifegrad vorgeschlagen wird. Umfangreiche Berechnungsvorschriften gewährleisten plausible und nachvollziehbare Ergebnisse und damit einen

objektiven Vergleich der Leistungsfähigkeit verschiedener Unternehmen. Die Anwendung des Reifegradmodells ist ohne aufwändige Einarbeitung möglich und somit ausdrücklich für KMUs geeignet. Somit bildet der VPS-Benchmark eine gute Ausgangsbasis für die zu entwickelnde Systematik. Es gilt nun zu prüfen, inwieweit der Aufbau des VPS-Benchmarks für ein Reifegradmodell für CPS adaptiert werden kann.

3.2.2.2 CMMI – Capability Maturity Model Integration

Capability Maturity Model Integration (CMMI) ist eine Familie von Referenzmodellen für unterschiedliche Anwendungsgebiete. Seinen Ursprung hat CMMI im Software Capability Maturity Model (Software CMM oder kurz CMM), einer in den 1980er Jahren vom SOFTWARE ENGINEERING INSTITUTE (SEI) entwickelten Methoden- und Werkzeugsammlung zur Bewertung und strukturierten Verbesserung von Softwareentwicklungsprozessen. In der aktuellen Version 1.3 aus dem Jahr 2010 existieren drei Derivate von CMMI: *CMMI for Development (CMMI-DEV)* zur Beurteilung der Effizienz von Produktentwicklungsprozessen [SEI10a], *CMMI for Services (CMMI-SVC)* mit Fokus auf die Entwicklung, Bereitstellung und das Management von Dienstleistungen [SEI10b] sowie *CMMI for Acquisition (CMMI-ACQ)* für die Optimierung von Beschaffungsprozessen [SEI10c]. Der Aufbau aller Derivate ist identisch, lediglich die inhaltliche Ausgestaltung variiert je Derivat [GP14, S. 317]. Folgende Ausführungen zum Aufbau und Inhalt orientieren sich am Beispiel von CMMI-DEV.

Die in Bild 3-12 veranschaulichte **Struktur** von CMMI unterscheidet Prozessgebiete, spezifische Ziele und Praktiken sowie generische Ziele und Praktiken. Die *Prozessgebiete* entsprechen den Handlungsfeldern bei typischen Reifegradmodellen. CMMI-DEV gibt 22 Prozessgebiete vor (Projektplanung, Anforderungsmanagement etc.), die in die vier Kategorien Prozessmanagement, Projektmanagement, Ingenieurdisziplinen und Unterstützung unterteilt werden [SEI10a, S. 11].

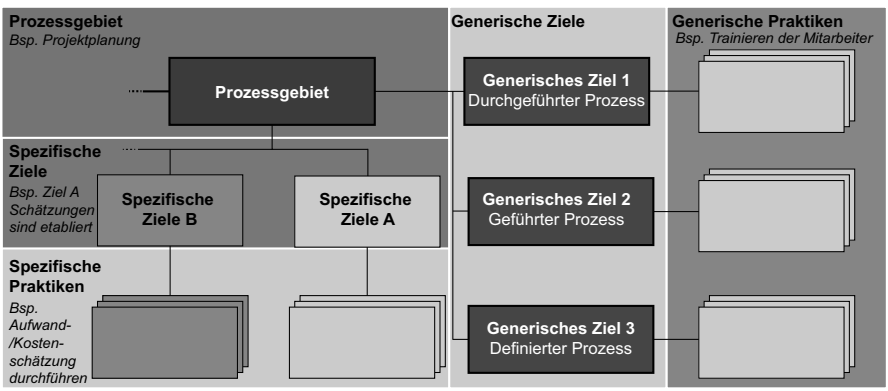


Bild 3-12: Struktur von CMMI [GP14, S. 318]

Damit die einzelnen Prozessgebiete verbessert werden können, werden Ziele vorgegeben, die mit zugeordneten Praktiken erreicht werden können. *Spezifische Ziele* gelten ausschließlich für ein bestimmtes Prozessgebiet und beschreiben deren eindeutige Merkmale. Somit bilden sie einen Anhaltspunkt für die Leistungsfähigkeit in einem Prozessgebiet. Ein exemplarisches spezifisches Ziel für das Prozessgebiet Konfigurationsmanagement ist „die Integrität der Baselines etablieren und beibehalten" [SEI10a, S. 12]. Jedem spezifischen Ziel sind zwischen zwei und sieben s*pezifische Praktiken* zugeordnet, die Aktivitäten zur Erreichung des zugehörigen Ziels beschreiben. Für das Prozessgebiet Projektverfolgung ist eine spezifische Praktik beispielsweise „die im Projektplan angegebenen Zusagen überwachen" [SEI10a, S. 13], [GP14, S. 317].

Das Erreichen spezifischer Ziele mittels spezifischer Praktiken führt bereits zu einer Verbesserung der Prozesse. Damit die Prozessverbesserung nachhaltig ist, müssen die neuen Arbeitsweisen und Prozesse in der Organisation institutionalisiert werden. Zur Messung der Institutionalisierung werden drei *generische Ziele* vorgegeben: 1) durchgeführter Prozess; 2) geführter Prozess; 3) definierter Prozess. Die generischen Ziele sind für alle Prozessgebiete gleich und bauen im Gegensatz zu den spezifischen Zielen aufeinander auf. Somit kann das Ziel definierter Prozess erst erreicht werden, wenn zuvor ein geführter Prozess vorliegt. *Generische Praktiken* gelten Prozessgebiet-übergreifend und dienen dem Erreichen der generischen Ziele. Eine generische Praktik zum Erreichen definierter Prozesse ist z.B. „Angemessene Ressourcen zur Durchführung der Arbeitsabläufe, Erstellung der Arbeitsergebnisse oder Erbringung der Dienstleistungen bereitstellen" [SEI10a, S. 12f.], [GP14, S. 318].

Zur **Leistungsbewertung** von Prozessen unterscheidet CMMI zwei verschiedene Herangehensweisen: eine kontinuierliche Bewertung anhand von Fähigkeitsgraden (Capability Level) und eine stufenweise Bewertung mit Hilfe von Reifegraden (Maturity Level). Bei der *kontinuierlichen Bewertung* werden einzelne Prozessgebiete mit Hilfe von vier Fähigkeitsgraden bewertet: 0) unvollständig; 1) durchgeführt; 2) geführt; 3) definiert. Ein Fähigkeitsgrad ist erreicht, sobald alle generischen Ziele bis zu diesem Grad erfüllt sind. Das Ergebnis der kontinuierlichen Bewertung ist ein Fähigkeitsgradprofil, das die aktuellen Fähigkeiten der Organisation veranschaulicht [SEI10a, S. 24ff.], [GP14, S. 319].

Im Zuge der *stufenweisen Bewertung* wird der Reifegrad für die gesamte Organisation bestimmt. Hierzu werden fünf Reifegrade unterschieden: 1) initial; 2) geführt; 3) definiert; 4) quantitativ geführt; 5) prozessoptimierend. Die Reifegrade sind mit den unterschiedlichen Fähigkeitsgraden der einzelnen Prozessgebiete verknüpft. Zur Erreichung eines bestimmten Reifegrads muss ein durch CMMI vorgegebenes Fähigkeitsprofil erfüllt sein. Somit ergänzen sich Fähigkeits- und Reifegrade. Während die Fähigkeitsgrade die Verbesserung einzelner Prozessgebiete charakterisieren, sind Reifegrade Indikatoren für den Grad der Institutionalisierung von Prozessen [SEI10a, S. 28ff.], [GP14, S. 319ff.].

Für die **Leistungssteigerung** geht CMMI grundsätzlich davon aus, dass höhere Reife- bzw. Fähigkeitsgrade zu einer Verbesserung führen. Somit gilt generell, dass die höchsten

Entwicklungsgrade erstrebenswert sind. Dabei gibt CMMI keine konkreten Maßnahmen zur Leistungssteigerung vor, sondern überlässt die Verbesserung der jeweiligen Organisation. Somit existiert nicht nur ein Pfad zur Leistungssteigerung, sondern diverse. Dadurch kann CMMI zwar flexibel in sehr unterschiedlichen Organisationen angewendet werden, gleichzeitig steigen aber auch die Anforderungen an die ausführenden Personen, die Verbesserungsmaßnahmen selbständig herleiten müssen [GP14, S. 319].

Durch die Ermittlung des Reifegrads ist ein Vergleich mit anderen Unternehmen möglich. Dazu werden die Reifegrade geprüfter Unternehmen auf dem Internetportal des CMMI INSTITUTES veröffentlicht. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit existieren Bewertungsrandbedingungen für CMMI, sog. Appraisal Requirements (ARC). Bei den Leistungsbewertungen werden die Klassen A, B und C unterschieden, wobei die methodische Formalisierung der Leistungsbewertung von A nach C abnimmt. Leistungsbewertungen dürfen nur von autorisierten Personen, sog. Lead Appraiser, durchgeführt werden [GP14, S. 321].

Bewertung: CMMI ist ein weltweit verbreiteter Ansatz zur strukturierten Leistungsbewertung und -steigerung von unterschiedlichen Anwendungsgebieten wie Produktentwicklungs-, Service- oder Beschaffungsprozessen. Dazu stellt CMMI ein Set von Zielen und Praktiken bereit, durch die professionelle Organisationen charakterisiert werden. Grundsätzlich geht CMMI davon aus, dass höhere Entwicklungsstufen anzustreben sind. Konkrete Hilfestellungen zur Bestimmung eines unternehmensspezifischen Zielreifegrads sind nicht gegeben. Zudem macht CMMI keine Angaben zu konkreten Verbesserungsmaßnahmen, sondern überlässt die Ausgestaltung der Prozesse den jeweiligen Organisationen. Aufgrund der hohen Komplexität des Reifegradmodells bedarf es umfassender Schulungen des Personals und des Mitwirkens aller Unternehmensbereiche. Erfahrungsgemäß ist eine vollständige Implementierung nur langfristig, d.h. in mehr als einem Jahr, erreichbar [GP14, S. 321]. Für viele Unternehmen, insbesondere für KMUs, macht der hohe Zeitbedarf die Anwendung von CMMI wirtschaftlich unattraktiv.

3.2.2.3 Methode zur Leistungsbewertung und -steigerung der Mechatronikentwicklung nach BALÁZOVÁ

Das Ziel der Methode zur Leistungsbewertung und -steigerung der Mechatronikentwicklung nach BALÁZOVÁ ist die Steigerung der Effizienz der Entwicklungsarbeit im Produktentstehungsprozess mechatronischer Systeme. Dazu erfasst die Methode die Leistungsfähigkeit der Entwicklungsarbeit im Rahmen der drei Handlungsfelder *Mensch*, *Organisation* und *Technik*, bewertet diese und zeigt einen Weg für eine schrittweise Leistungssteigerung bis zu einem unternehmensindividuellen Soll-Zustand auf [Bal04, S. 74].

Der **Aufbau** der Methode basiert auf den drei Etappen Vorbereitung, Leistungsbewertung und Leistungssteigerung, die sich insgesamt in fünf Phasen gliedern. Das entsprechende Vorgehensmodell mit Phasen, Aufgaben und Resultaten zeigt Bild 3-13. Neben dem Vorgehensmodell stellt BALÁZOVÁ Werkzeuge bereit, die bei der Durchführung der Methode

unterstützen. Der *Handlungselemente-Katalog* enthält Handlungselemente, die einen Einfluss auf die Effizienz in der Produktentwicklung haben und ordnet diese den drei Handlungsfeldern zu. Exemplarische Handlungselemente für das Handlungsfeld Mensch sind „Personalbeschaffung“ oder „Fähigkeitseinsatz der Entwickler“. Für jedes Handlungselement enthält ein *Entwicklungsstufen-Katalog* mögliche Entwicklungsstufen, wie z.B. „etabliertes Personalbeschaffungssystem“, „teilweise systematische Personalbeschaffung“ und „kein Personalbeschaffungssystem“ für das Handlungselement Personalbeschaffung. Zur objektiven Erhebung der Ist-Situation wird zudem ein *Datenerhebungsbogen* bereitgestellt, der als Befragungs- und Diskussionsleitfaden dient [Bal04, S. 75ff.].

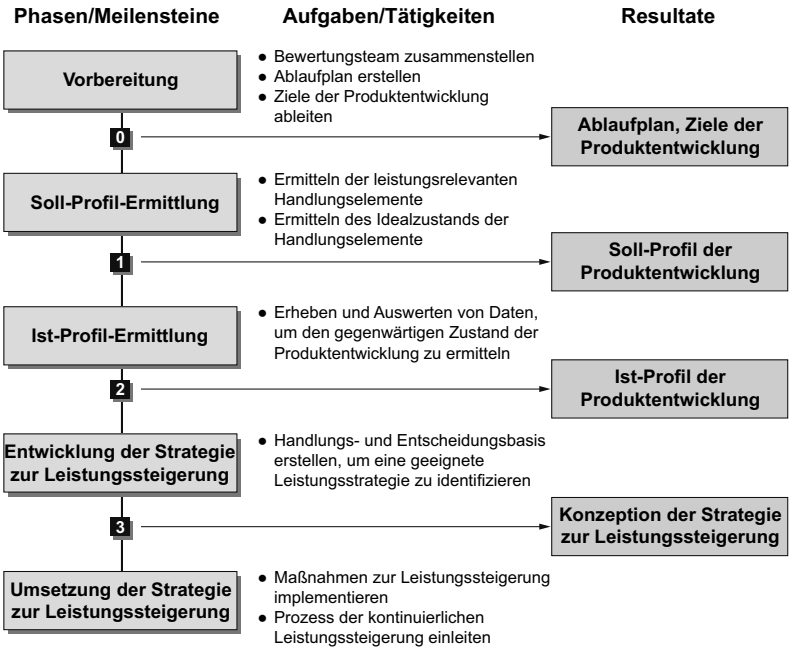


Bild 3-13: Vorgehensmodell zur Leistungsbewertung und -steigerung der Mechatronikentwicklung nach BALÁZOVÁ [BAL04, S. 77]

Die **Vorbereitungsetappe** (Phase 0) dient zur Schaffung der Rahmenbedingungen. Hier wird das Bewertungsteam zusammengestellt, der Ablaufplan festgelegt und der Betrachtungsgegenstand bestimmt. Zudem gilt es den Handlungselemente- sowie den Entwicklungsstufenkatalog zu überprüfen und ggf. an die Umstände des betrachteten Unternehmens anzupassen. Darüber hinaus werden Ziele (z.B. Entwicklungskosten senken) für die Entwicklungsabteilung bestimmt und in einem Katalog festgehalten [Bal04, S. 75f.].

Die **Leistungsbewertungsetappe** (Phasen 1 und 2) dient zur Festlegung des Soll-Zustands und zur Bestimmung der Ist-Situation. In der Phase *Soll-Profil-Ermittlung* werden

zunächst die Handlungselemente der Produktentwicklung analysiert und diejenigen identifiziert, die hoch relevant für die Effizienz der Produktentwicklung des betrachteten Unternehmens sind. Dafür werden die Handlungselemente hinsichtlich zweier Aspekte untersucht. Der erste Aspekt ist die Vernetzung der Handlungselemente. Hier wird geprüft, inwieweit die Veränderung eines Handlungselements andere Handlungselemente beeinflusst. Der zweite Aspekt ist der Zielbetrag der Handlungselemente. Mit Hilfe einer sog. Zielbetragsmatrix nach WLEKLINSKI [WLE01] wird untersucht, inwieweit Handlungselemente und Entwicklungsstufen einen Beitrag zur Erreichung der Entwicklungsziele leisten. Nach einigen weiteren Berechnungen bilden die Leistungsstufen mit dem höchsten Beitrag zu den Entwicklungszielen das Soll-Profil [Bal04, S. 79].

Im Rahmen der *Ist-Profil-Ermittlung* wird ein umfassendes Bild über den gegenwärtigen Zustand der Produktentwicklung des betrachteten Unternehmens erstellt. Diese Phase besteht aus den zwei Arbeitsschritten Datenerhebung und Datenauswertung. Ziel der Datenerhebung ist es, für jedes Handlungselement die derzeitige Entwicklungsstufe zu identifizieren. Dies erfolgt mit Hilfe des Datenerhebungsbogens, der entsprechende Fragen zu jedem Handlungselement enthält. Anschließend werden die Daten ausgewertet und in ein Ist-Profil überführt [Bal04, S. 103ff.].

Ziel der **Leistungssteigerungsetappe** (Phasen 3 und 4) ist es, eine Strategie zur Leistungssteigerung zu konzipieren und entsprechende Maßnahmen zu implementieren. In der Phase *Entwicklung der Strategie zur Leistungssteigerung* werden zunächst der Ist-Zustand dem gewünschten Soll-Zustand gegenübergestellt, Diskrepanzen abgeleitet und analysiert. Anschließend wird eine Handlungsbasis entwickelt, die den identifizierten Handlungsbedarf abdeckt. Da es kaum möglich sein wird, alle Handlungselemente gleichzeitig in den Soll-Zustand zu überführen, werden unter Berücksichtigung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses sinnvolle Entwicklungsstufen bestimmt. Eine Entwicklungsstufe stellt dabei eine sinnvolle Kombination einzelner Entwicklungsstufen der Handlungselemente dar [Bal04, S. 109ff.]. Eine detaillierte Beschreibung der Berechnungsvorschiften zur Bildung sinnvoller Entwicklungsstufen enthält [Bal04]. In der letzten Phase *Umsetzung der Strategie zur Leistungssteigerung* werden die erarbeiteten Maßnahmen zur Umsetzung der Strategie implementiert und ein Prozess zur kontinuierlichen Leistungssteigerung initiiert [Bal04, S. 77f.].

Bewertung: Die Methode zur Leistungsbewertung und -steigerung der Mechatronikentwicklung nach BALÁZOVÁ stellt ein Vorgehensmodell sowie unterstützende Werkzeuge zur Verbesserung von Entwicklungsprozessen bereit. Dazu werden die drei Handlungsfelder Mensch, Organisation und Technik betrachtet, für die einzelne Handlungselemente und dazugehörige Entwicklungsstufen vorgeschlagen und detailliert beschrieben werden. Sowohl Handlungselemente als auch Entwicklungsstufen können an die Voraussetzungen im Unternehmen angepasst werden. Die vorgestellte Methode zielt nicht auf den höchstmöglichen Reifegrad ab, sondern definiert einen unternehmensindividuellen Soll-Zustand. Zudem werden sinnvolle Entwicklungsstufen hergeleitet, die eine schrittweise Umsetzung des Soll-Zustands ermöglichen. Trotz komplexer Berechnungsvorschriften

kann die Methode ohne geschultes Personal durchgeführt werden. Die Eignung für kleine und mittlere Unternehmen ist somit gegeben. Durch die flexible Anpassbarkeit ist jedoch kein aussagekräftiger Leistungsvergleich mit anderen Unternehmen möglich.

3.2.2.4 PEMM – Process and Enterprise Maturity Model

Das Process and Enterprise Maturity Model (PEMM) ist ein Reifegradmodell zur Verbesserung der Geschäftsprozesse von Unternehmen. Das PEMM wurde von der Unternehmensberatung HAMMER AND COMPANY entwickelt und betrachtet ein Unternehmen als Ganzes, legt also keinen Fokus auf bestimmte Themen wie z.B. den Softwareentwicklungsprozess. Die Analyse fußt auf zwei Fragebögen, die im Rahmen von Workshops und Interviews ausgefüllt werden. Aus den Fragebögen können ein Abbild des Unternehmens in Reifegraden sowie der Handlungsbedarf zur Verbesserung abgeleitet werden. Verbesserungsmaßnahmen sind daraufhin individuell zu entwickeln und umzusetzen [Ham07], [GP14, S. 325].

Der **Aufbau** von PEMM unterscheidet neun verschiedene *Handlungsfelder*, die in Prozessdeterminanten und Unternehmenskompetenzen unterteilt werden. *Prozessdeterminanten* fassen alle Faktoren zusammen, die für Kontinuität und Nachhaltigkeit der Prozesse relevant sind. So trifft das „Prozessdesign“ Aussagen darüber, wie gut und vollständig ein Prozess dokumentiert ist. Die Prozessdeterminante „Mitarbeiter“ überprüft, ob die Mitarbeiter über das nötige Wissen und die entsprechende Qualifikation zur Prozessausführung verfügen. Der Faktor „Verantwortung“ sagt aus, inwieweit eine Führungskraft für den Prozess und dessen Ergebnis verantwortlich ist. Ob ein Prozess ausreichend durch Informations- und Managementsysteme unterstützt wird, beschreibt der Faktor „Infrastruktur“. „Kennzahlen“ sind die fünfte Prozessdeterminante zur Überprüfung einer quantitativen Prozessüberwachung. Zwischen den genannten Prozessdeterminanten bestehen enge Wechselwirkungen. Infolgedessen geht PEMM davon aus, dass nachhaltige und leistungsfähige Prozesse nur dann erreicht werden können, wenn keine Determinante besonders schwach ausgeprägt ist [Ham07], [GP14, S. 325].

Neben den Prozessdeterminanten führt PEMM *Unternehmenskompetenzen* an, die eine Voraussetzung für die Entstehung leistungsfähiger Prozesse sind. Die Kompetenz „Leadership“ hinterfragt die Unterstützung von Prozessveränderungen durch das Topmanagement. Mit der „Unternehmenskultur“ wird geprüft, ob die Veränderungsbereitschaft und die Fähigkeiten zum Teamwork im Unternehmen vorhanden sind. „Erfahrungen“ geben eine Indikation über Kenntnisse bzgl. der Neugestaltung von Prozessen. Die Kompetenz „Steuerung“ trifft Aussagen über Systeme und Strukturen für das Management von Prozessveränderungen. Die neun genannten Handlungsfelder in den Bereichen Prozessdeterminanten und Unternehmenskompetenzen werden in je zwei bis vier Handlungselemente, sog. *Merkmale*, unterteilt. Beispielweise wird der Kompetenzbereich Leadership durch die Merkmale „Bewusstsein“, „Abstimmung“, „Verhalten“ und „Führungsstil“ definiert. Jedes Merkmal weist vier *Reifegrade* auf. Die Reifegrade P1 bis P4 (Process Maturity)

beschreiben die Reifegrade der Prozessdeterminanten, die Reifegrade E1 bis E4 (Enterprise Maturity) die der Unternehmenskompetenzen. Die vier Reifegrade je Merkmal werden durch einen kurzen Text beschrieben. Eine Prozessdeterminante bzw. Unternehmenskompetenz weist immer den Reifegrad des am geringsten entwickelten Merkmals auf. Eine Besonderheit dabei ist, dass die Prozessdeterminanten von den Unternehmenskompetenzen dominiert werden. Daher kann eine Prozessdeterminante maximal den Reifegrad der am höchsten entwickelten Unternehmenskompetenz annehmen [Ham07], [GP14] S. 325f.]. Tabelle 3-1 zeigt einen Ausschnitt des Fragebogens zur Bestimmung des Leistungsstands von Unternehmenskompetenzen.

Tabelle 3-1: Ausschnitt der Tabelle zur Bestimmung des Leistungsstands der Unternehmenskompetenzen im Reifegradmodell PEMM [GP14, S. 326]

	Unternehmenskompetenzen							
	Merkmale	**Entwicklungsstufen**		**Bewertungen**				
		E-1	E-2	E-1	E-2	E-3	E-4	
Leadership	Bewusstsein	Das Top-Management erkennt die Notwendigkeit, die betriebliche Leistung zu verbessern, ist sich der Bedeutung und der Möglichkeiten von Geschäftsprozessen jedoch nur in eingeschränktem Maße bewusst.	Mindestens ein Manager der Unternehmensleitung verfügt über tiefergehendes Wissen darüber, wie Geschäftsprozesse funktionieren, wie sie zur Leistungssteigerung des Unternehmens beitragen können und wie sie umgesetzt werden.					
	Abstimmung	Die Führung des Prozessprogramms ist im mittleren Management angesiedelt.	Ein Manager der oberen Führungsebene hat die Führung und die Verantwortung für das Prozessprogramm übernommen.					
	Verhalten	Ein Manager der oberen Führungsebene unterstützt die Veränderung und ist bereit, das Projekt zu sponsern.	Ein Manager der oberen Führungsebene hat offizielle Leistungsziele gesteckt und ist bereit, Ressourcen bereitzustellen, tief greifende Änderungen vorzunehmen und Hindernisse aus dem Weg zu räumen, um die Ziele zu erreichen.					
	Führungsstil	Das Top-Management ist von einem stark hierarchischen Führungsstil zu einem offeneren, auf Zusammenarbeit basierenden Führungsstil übergegangen.	Der für die Prozessveränderung verantwortliche Top-Manager setzt sich leidenschaftlich für notwendige Veränderungen ein und sieht Prozesse als Schlüsselwerkzeug für Veränderungen.					
Unternehmenskultur	Teamwork	Teamwork findet nur gelegentlich bei einzelnen Projekten statt und ist nicht die Regel.	Das Unternehmen setzt regelmäßig abteilungsübergreifende Projektteams ein, um Verbesserungen zu erzielen.					

Aussage trifft zu mehr als 80 % zu — Wahrheitsgehalt der Aussage liegt zwischen 20 % und 80 % — Aussage trifft zu weniger als 20 % zu

Die **Leistungsbewertung** wird im Rahmen von Interviews, Workshops und Diskussionsrunden anhand von Fragebögen durchgeführt. Dazu wird je Merkmal der Wahrheitsgehalt der jeweiligen Entwicklungsstufen beurteilt. Eine Entwicklungsstufe gilt als erreicht, wenn die Aussage überwiegend zutrifft („Aussage trifft zu mehr als 80% zu“). Sobald alle Merkmale bewertet wurden, können die Prozess- und Unternehmensreifegrade abgeleitet werden. Durch eine mehrfache Beantwortung der Fragebögen auf unterschiedlichen Hierarchieebenen können Diskrepanzen bei den Ergebnissen entstehen, die auf unterschiedliche Wahrnehmungen von Mitarbeitern und Management zurückzuführen sind.

Diese Unterschiede können bereits als erstes Arbeitsergebnis aufgefasst werden. Für die Leistungsbewertung sind weder autorisierte Personen noch Experten erforderlich. Vielmehr soll die Leistungsbewertung durch die Beschäftigten eines Unternehmens selbst ausgeführt werden, um das Vertrauen in die Ergebnisse zu steigern [Ham07], [GP14, S. 326f.].

Bei der **Leistungssteigerung** geht PEMM grundsätzlich davon aus, dass der höchste der ideale Reifegrad ist. Sobald ein Merkmal deutlich niedriger entwickelt ist als andere, deutet dies auf eine Schwachstelle im Unternehmen hin. Der Annahme folgend, dass ein ausgewogenes Profil erstrebenswert ist, sollten die individuell zu erarbeitenden Maßnahmen zuerst zur Verbesserung der schwach entwickelten Merkmale dienen. Durch eine wiederholte Anwendung von PEMM können Veränderungen hinsichtlich der Prozessdeterminanten und Unternehmenskompetenzen identifiziert werden [Ham07], [GP14, S. 327].

Ähnlich wie PEMM strebt auch das *European Foundation for Quality Management (EFQM) Excellence Modell* den höchsten Reifegrad an [DGQ13, S. 2f.], [GP14, S. 322]. Dieser Ansatz schafft einen Rahmen zur Umsetzung des Total-Quality-Managements (TQM), einer ganzheitliche Qualitätsmanagementmethode, die Qualität in den Mittelpunkt rückt, um so die Kundenzufriedenheit sicherzustellen [Sch08, S. 310]. Eine detaillierte Beschreibung des EFQM Excellence Modells ist Gegenstand von Abschnitt A2.4 im Anhang.

Bewertung: PEMM ist ein pragmatisches Reifegradmodell zur Verbesserung der Geschäftsprozesse von Unternehmen. Die vorgegebenen Handlungsfelder in den Bereichen Prozessdeterminanten und Unternehmenskompetenzen sind so ausgestaltet, dass sie die gesamten Unternehmensprozesse betrachten. PEMM kann auf diverse Arten von Organisationen übertragen werden und kann mit recht geringem Aufwand und ohne intensiv geschultes Personal durchgeführt werden. Das Modell gibt keine Hilfestellungen zur Bestimmung eines unternehmensindividuellen Soll-Reifegrads, sondern geht davon aus, dass stets der höchste Reifegrad anzustreben ist. Konkrete Maßnahmen zur Leistungssteigerung werden durch das Reifegradmodell nicht vorgeschlagen, sondern müssen durch das Unternehmen individuell erarbeitet werden.

3.3 Modellierung von Marktleistungen

Eine Voraussetzung für die Konkretisierung von Lösungen im Kontext CPS ist die einheitliche und fachdisziplinübergreifende Beschreibung der Lösungen. Zum besseren Verständnis des Aufbaus und der Wirkungsweise der Lösungen bieten sich Modellierungssprachen an, die Elemente und Beziehungen von Objekten grafisch abbilden. Dabei sind sowohl materielle als auch immaterielle Bestandteile von CPS zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend Modellierungssprachen für Marktleistungen untersucht. Zunächst erfolgt die Analyse der Modellierungssprachen CONSENS (vgl. Abschnitt 3.3.1) und SysML (vgl. Abschnitt 3.3.2) für die Spezifikation technischer Systeme. Anschließend werden Ansätze zur Modellierung von Dienstleistungen betrachtet.

Im Rahmen dieser Arbeit sind das der Ansatz des Service Blueprinting (vgl. Abschnitt 3.3.3) sowie das integrierte Rahmenkonzept zur Modellierung von Dienstleistungen nach SCHEER ET AL. (vgl. Abschnitt 3.3.4). Abschließend wird die HLB-Layer-Methode (vgl. Abschnitt 3.3.5) untersucht, die zur Modellierung von hybriden Leistungsbündeln (HLB) mit Sach- und Dienstleistungsanteilen dient. Eine weitere Sprache zur Modellierung von HLB ist Hypro Design, die in Abschnitt A2.5 im Anhang beschrieben wird.

3.3.1 CONSENS

Die Spezifikationstechnik CONSENS (**CON**ceptual design **S**pecification technique for the **EN**gerineering of complex **S**ystems) dient zur Beschreibung der Prinziplösung fortgeschrittener mechatronischer Systeme [GFD+08a], [GFD+08b], [GLL12, S. 89]. Sie umfasst eine Modellierungssprache sowie eine Vorgehensweise zur Erstellung des Systemmodells im Systementwurf. Das Ziel ist die *ganzheitliche und disziplinübergreifende Beschreibung des Systemmodells für mechatronische Systeme* [GTS14, S. 37]. Die Modellierungssprache gliedert sich in die Aspekte Umfeld, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur, Verhalten und Gestalt (siehe Bild 3-14).

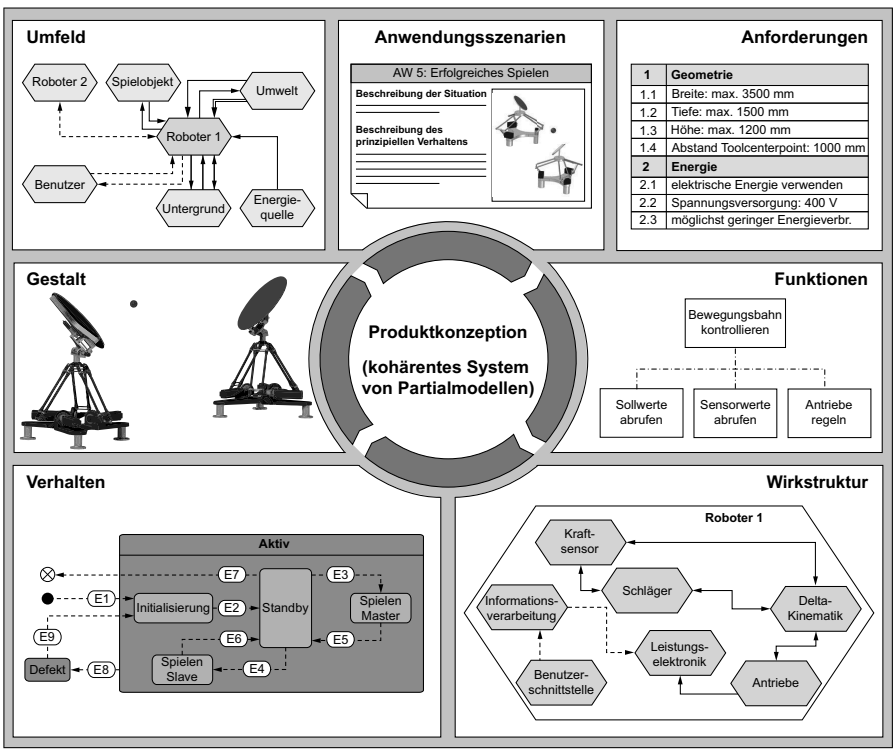


Bild 3-14: Partialmodelle der Spezifikationstechnik CONSENS [GTS14, S. 38]

Umfeld: Dieses Partialmodell betrachtet das System als „Black Box“ und beschreibt Elemente im Umfeld sowie deren Interaktion mit dem System. Dazu werden alle Systemelemente des Umfelds modelliert (z.B. Benutzer oder Energiequelle), die in Wechselwirkungen mit dem System stehen [GTS14, S. 38].

Anwendungsszenarien: Anwendungsszenarien beschreiben eine situationsspezifische Sicht auf das System und dessen Verhalten. In Form von Steckbriefen charakterisieren sie Betriebssituationen, für die das System auszulegen ist und spezifizieren, wie sich das System in der jeweiligen Situation verhalten soll [GLL12, S. 92].

Anforderungen: Sämtliche Anforderungen an das zu entwickelnde System werden strukturiert zusammengetragen und in einer Anforderungsliste dokumentiert. Die Anforderungen werden textuell beschrieben und ggf. durch Attribute und deren Ausprägungen konkretisiert [GTS14, S. 38]. Hilfestellung bei der Erstellung von Anforderungslisten bieten PAHL/BEITZ in Form von Checklisten [FG13].

Funktionen: Dieses Partialmodell nimmt eine hierarchische Aufgliederung der Funktionalität des Systems vor. Dabei ist eine Funktion der allgemeine und gewollte Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen mit dem Ziel, eine spezifische Aufgabe zu erfüllen [FG13, S. 242]. Im Zuge der hierarchischen Aufgliederung werden übergeordnete Funktionen solange in Subfunktionen unterteilt, bis sich für diese Funktionen sinnvolle Lösungen finden lassen.

Wirkstruktur: Die Wirkstruktur dient zur Abbildung des grundsätzlichen Aufbaus sowie der prinzipiellen Wirkungsweise des Systems. Dazu werden Systemelemente und deren Beziehungen zueinander modelliert. Systemelemente repräsentieren Systeme, Module, Bauteile oder Softwarekomponenten. Zur Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen dienen Stoff-, Energie-, Informations-, sowie logische Beziehungen [GTS14, S. 39].

Gestalt: Dieses Partialmodell enthält erste Angaben über Anzahl, Form, Lage sowie Anordnung und Art der Wirkflächen. Die rechnerunterstützte Modellierung erfolgt in der Regel mittels CAD-Systemen.

Verhalten: Das Partialmodell Verhalten gliedert sich in die zwei unterschiedlichen Arten Zustände und Aktivitäten. *Zustände* bilden sämtliche vorausgedachten und zu berücksichtigenden Systemzustände und Zustandsübergänge ab. Die zugehörigen Ablaufprozesse werden durch *Aktivitäten* modelliert. Die Verhaltensbeschreibung kann sowohl für das Gesamtsystem, als auch für einzelne Systemelemente durchgeführt werden [GTS14, S. 88].

Die erläuterten Partialmodelle stehen zueinander in Beziehung. Die partialmodellübergreifenden Beziehungen werden zwischen den Konstrukten der jeweils zu verknüpfenden Partialmodelle modelliert. So entsteht ein kohärentes System von Partialmodellen, das die Prinziplösung des zu entwickelnden Systems darstellt und als Ausgangsbasis für den anschließenden fachdisziplinspezifischen Entwurf dient [GTS14, S. 39]. Zusätzlich zu

den genannten Partialmodellen existieren weitere Aspekte zur Beschreibung des zugehörigen Produktionssystems. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet. Eine detaillierte Beschreibung der Partialmodelle für das Produktionssystem enthält [GLL12].

Bewertung: Die Spezifikationstechnik CONSENS dient zur Beschreibung der Prinziplösung fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Mit den erläuterten Partialmodellen und Konstrukten bildet CONSENS die Bestandteile und Zusammenhänge von technischen Systemen fachdisziplinunabhängig und transparent ab. Für die Anwendung der Spezifikationstechnik ist keine aufwändige Einarbeitung nötig. CONSENS fokussiert die Modellierung technischer Systeme und sieht daher keine Partialmodelle zur Modellierung von Dienstleistungen vor. Zur ganzheitlichen Abbildung von Cyber-Physical Systems inklusive Daten und Diensten bedarf es einer Anpassung der bestehenden Modellkonstrukte.

3.3.2 SysML

Die Systems Modeling Language (SysML) ist eine grafische, objektorientierte Modellierungssprache für technische Systeme aller Art. Sie basiert auf der UML und wurde von der OMG[33] und INCOSE mit dem Ziel entwickelt, eine standardisierte Sprache für die Modellierung, Analyse und Verifikation technischer Systeme bereitzustellen. Die erste Standardisierung mit der SysML 1.0 stammt aus dem Jahr 2006. Aktueller Stand seit 2015 ist die Version 1.4. Im Sinne des Systems Engineering lassen sich die Strukturen, das Verhalten sowie die Anforderungen eines Systems formal beschreiben und miteinander in Beziehung setzen. Dabei ist die Sprache methodenunabhängig und so aufgebaut, dass sie für unterschiedliche Modellierungszwecke angepasst werden kann [OMG15, S. 1], [Wei06, S. 157f.], [Alt12, S. 29f.].

Die SysML stellt neun Diagrammarten zur Verfügung, die sich auf oberster Ebene in Struktur, Anforderungs- und Verhaltensdiagramme gliedern lassen (siehe Bild 3-15). Die Paket-, Zustands-, Use-Case- und Sequenz-Diagramme wurden unverändert aus der UML übernommen. Das interne Blockdefinitionsdiagramm, das Blockdefinitions- und das Aktivitätsdiagramm wurden für die SysML angepasst. Exklusiv für die SysML hinzugefügt wurden das Zusicherungs- und das Anforderungsdiagramm [Wei06, S. 160]. Nachfolgend werden die einzelnen Diagramme näher erläutert.

[33] Die Object Management Group (OMG) ist ein internationales Konsortium zur Standardisierung objektorientierter und modellbasierter Systementwicklung [OMG15, S. xxi].

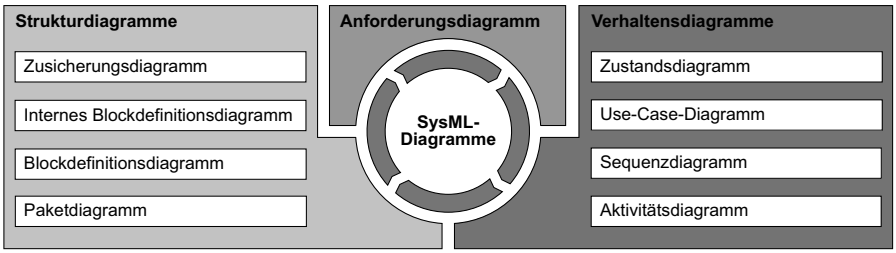


Bild 3-15: Diagramme der SysML [Wei06, S. 160]

Strukturdiagramme: Strukturdiagramme dienen zur Abbildung der statischen Aspekte des Systems. In der Regel werden sie zur Modellierung der Systemarchitektur verwendet [Alt12, S. 40]. Mittels Blöcken werden physikalische und informationsverarbeitende Elemente gleichermaßen abgebildet. Das *Blockdefinitionsdiagramm* kann genutzt werden, um die Beziehungen zwischen den Blöcken, ihre Assoziationen, Generalisierungen sowie Abhängigkeiten zu modellieren. Im *internen Blockdefinitionsdiagramm* erfolgt die Beschreibung der Beziehungen zwischen Bestandteilen innerhalb eines Blocks. Dazu werden Ports, Konnektoren und Flüsse verwendet. Das *Zusicherungsdiagramm* ermöglicht die Definition von parametrischen Beziehungen zwischen Eigenschaften der Systembausteine [Wei06, S. 195].

Anforderungsdiagramm: Im Anforderungsdiagramm lassen sich Anforderungen und deren Beziehungen zu anderen Modellelementen darstellen. Dabei erfolgt eine Unterscheidung von funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen sowie von verschiedenen Beziehungen wie z.B. Ableitungs-, Enthält-, Prüf- oder Verfeinerungsbeziehungen. Gängige Darstellungsarten sind Tabellen und Grafiken [Alt12, S. 51].

Verhaltensdiagramme: Zur Modellierung des Systemverhaltens stellt SysML vier Verhaltensdiagramme bereit. Im *Zustandsdiagramm* können Zustände und mögliche Zustandsübergänge des Systems modelliert werden [Wei06, S. 272]. Die Interaktionen des Benutzers und/oder externer Systeme mit dem zu entwickelnden System werden im *Use-Case-Diagramm* spezifiziert. Im *Sequenzdiagramm* lassen sich die Interaktionen zwischen Systemelementen im zeitlichen Verlauf abbilden. Das *Aktivitätsdiagramm* stellt die Systemabläufe inkl. Ein- und Ausgabedaten dar [Alt12, S. 53f.].

Bewertung: Die SysML ist eine standardisierte Modellierungssprache für sämtliche technische Systeme. Um den Anspruch der Allgemeingültigkeit zu wahren, ist SysML methodenunabhängig einsetzbar und nicht auf eine bestimmte Systemart zugeschnitten. Prinzipiell ist es also denkbar, dass sich SysML auch für die Modellierung von Cyber-Physical Systems inkl. aller Sach- und Dienstleistungsanteile eignet. Die Verwendung der SysML-Konstrukte wird nur grob definiert. Dadurch ist die Anwendung der Spezifikationstechnik nicht immer eindeutig und intuitiv. Zudem ist die Einarbeitung in die Vielzahl der Konstrukte sehr zeitintensiv. Vor dem Hintergrund eines industriellen Einsatzes ist dies nahezu ein Ausschlusskriterium für die zu entwickelnde Systematik.

3.3.3 Service Blueprinting

Das Service Blueprinting ist eine Methode zur *Visualisierung, Analyse, Gestaltung, Steuerung und Entwicklung von Dienstleistungsprozessen* [Fli09, S. 194]. Die ursprüngliche Idee geht auf SHOSTACK zurück, die mit dem Service Blueprint einen Ansatz zur strukturierten Darstellung von Dienstleistungsprozessen schuf (siehe Bild 3-16) und diesen gemeinsam mit KINGMAN-BRUNDAGE in ein iteratives Vorgehensmodell zur Dienstleistungsentwicklung überführte [Sho82, S. 85ff.].

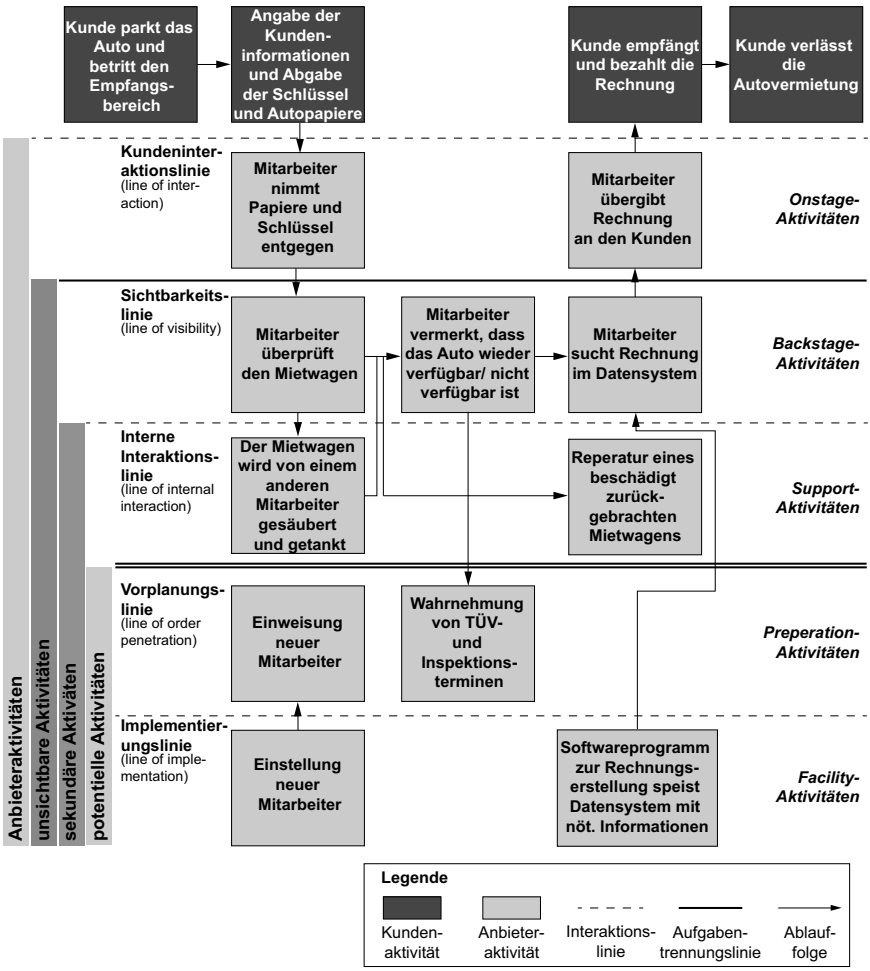


Bild 3-16: Service Blueprint am Beispiel einer Autovermietung in Anlehnung an [Fli09, S. 196]

Die folgenden Ausführungen legen den Fokus auf die Darstellungsform von Service Blueprints und nicht auf das Vorgehen zur Dienstleistungsentwicklung. Für detaillierte Informationen zum Vorgehensmodell sei an dieser Stelle auf [SK91] verwiesen. Die Ursprungsform der Service Blueprints wurde in den vergangenen Jahren durch diverse Autoren adaptiert. Grundlage für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit sind die Arbeiten von FLIEß [Fli09, S. 194ff.]. Ein Service Blueprint stellt ein vollständiges Ablaufdiagramm einer Dienstleistung dar, das alle Aktivitäten zur Erbringung der Dienstleistung in eine chronologische Reihenfolge bringt und die Kontaktsituationen zwischen Anbieter und Kunden durch Unterscheidung verschiedener Ebenen hervorhebt [Sho82, S. 85ff.] [Fli09, S. 194], [Hal15, S. 130]. Bild 3-16 verdeutlicht den Aufbau eines Service Blueprints. Die einzelnen Ebenen werden im Folgenden am Beispiel einer Autovermietung beschrieben.

Kundeninteraktionslinie (line of interaction): Die Kundeninteraktionslinie trennt die *Anbieteraktivitäten* von den *Kundenaktivitäten*. Im Beispiel der Autovermietung ist eine Kundenaktivität u.a. „Kunde parkt das Auto und betritt den Empfangsbereich“ [Fli09, S. 195].

Sichtbarkeitslinie (line of visibility): Durch die Sichtbarkeitslinie erfolgt eine Trennung von für den Kunden sichtbaren und unsichtbaren Anbieteraktivitäten. Unterhalb der Sichtbarkeitslinie finden die nicht sichtbaren, sog. *Backstage-Aktivitäten* statt, oberhalb die sichtbaren, sog. *Onstage-Aktivitäten*. Eine nicht sichtbare Aktivität ist beispielsweise die Prüfung des Mietwagens durch den Mitarbeiter, sofern diese nicht gemeinsam mit dem Kunden erfolgt. Sichtbar für den Kunden ist wiederum die Entgegennahme von Papieren und Schlüssel [Fli09, S. 195].

Interne Interaktionslinie (line of internal interaction): Mittels interner Interaktionslinie werden unterstützende bzw. *Support-Aktivitäten* von den nicht sichtbaren Aktivitäten getrennt. Support-Aktivitäten unterstützen die Dienstleistungserbringung und werden nicht durch das Kundenkontakt-Personal durchgeführt. Eine exemplarische Support-Aktivität ist die Säuberung des Mietwagens [Fli09, S. 195].

Vorplanungslinie (line of order penetration): Die Vorplanungslinie entkoppelt *Aktivitäten des Leistungserstellungsprozesses* von den *Aktivitäten des Leistungspotentials*. Somit sind alle Aktivitäten oberhalb der Vorplanungslinie unmittelbar kundeninduziert und die Aktivitäten unterhalb der Linie kundenunabhängig. Während z.B. die Reparatur eines beschädigten Fahrzeugs kundeninduziert ist, geschieht die Einweisung neuer Mitarbeiter kundenunabhängig [Fli09, S. 195].

Implementierungslinie (line of implementation): Die Aktivitäten des Leistungspotentials werden durch die Implementierungslinie zusätzlich in *Preparation-Aktivitäten* und *Facility-Aktivitäten* unterteilt. Preparation-Aktivitäten (z.B. „Wahrnehmung von TÜV- und Inspektionsterminen“) bereiten den Leistungserstellungsprozess vor. Diesen

Aktivitäten vorgelagert sind die Facility-Aktivitäten, die eine Infrastruktur zur Dienstleistungserbringung schaffen. Facility-Aktivitäten erzeugen die notwendigen Potential- und Verbrauchsfaktoren wie z.B. die „Einstellung neuer Mitarbeiter“ [Fli09, S. 196].

Bewertung: Zentrales Element des Service Blueprinting sind Service Blueprints, die alle Aktivitäten zur Erbringung einer Dienstleistung chronologisch darstellen und diese auf verschiedenen Ebenen anordnen. Durch den Ansatz ist es möglich, alle Anteile der Dienstleistungserstellung strukturiert und transparent abzubilden und zu analysieren. Die Abgrenzung verschiedener Ebenen hilft bei der Unterscheidung von kundenabhängigen und kundenunabhängigen sowie von sichtbaren und nicht sichtbaren Aktivitäten. Die überschaubare Anzahl unterschiedlicher Konstrukte macht eine Anwendung ohne aufwändige Einarbeitung möglich. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz in der industriellen Praxis. Ein Nachteil des Ansatzes ist die mangelnde Berücksichtigung von Leistungserstellungsaktivitäten, die auf technischen Funktionen beruhen. Durch die Erweiterung bestehender oder die Einführung neuer Ebenen ist der Einbezug technischer Systeme jedoch denkbar.

3.3.4 Integriertes Rahmenkonzept zur Modellierung von Dienstleistungen nach SCHEER ET AL.

Zur ganzheitlichen Darstellung von Dienstleistungen und ihren Eigenschaften schlagen SCHEER ET AL. ein integriertes Rahmenkonzept zur Modellierung von Dienstleistungen vor. Dabei legen die Autoren die Überlegung zugrunde, dass eine Dienstleistung durch die Dimensionen *Ergebnis*, *Prozess* und *Potential* beschrieben werden kann (vgl. Abschnitt 2.3.3). Zur Abbildung der drei Dienstleistungsdimensionen unterscheidet das Rahmenkonzept zwischen *Produkt*-, *Prozess*- und *Ressourcenmodellen* (siehe Bild 3-17). Die einzelnen Modelltypen sind untereinander verbunden, sodass Änderungsauswirkungen entlang aller Modelle unmittelbar nachvollzogen werden können. Zur Gewährleistung einer ganzheitlichen und integrativen Betrachtung kann das Rahmenkonzept in das sog. ARIS[34]-Haus integriert werden [GKS02, S. 16f.], [SGK06, S. 31ff.]. Nachfolgend werden die einzelnen Modelltypen näher erläutert.

[34] Die Architektur Integrierter Informationssysteme (ARIS) ist eine Methode zur Modellierung von Unternehmen [SJ13, S. 3f.].

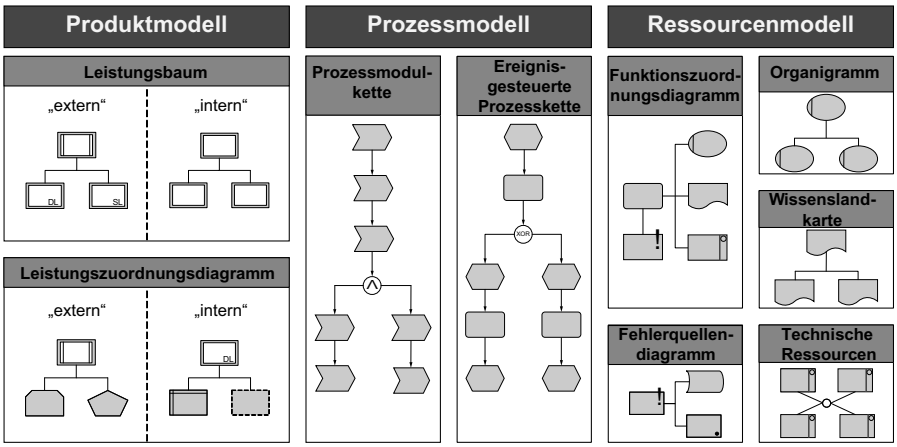


Bild 3-17: Integriertes Rahmenkonzept zur Modellierung von Dienstleistungen [SGK06, S. 32]

Produktmodell: Das Produktmodell bildet die Ergebnisdimension ab, indem es die Struktur der Dienstleistungsprodukte darstellt und die Leistungsinhalte definiert. Dazu sieht das Rahmenkonzept die Modelltypen Leistungsbaum und Leistungszuordnungsdiagramm vor. Der *Leistungsbaum* stellt den strukturellen Zusammenhang zwischen Leistungen her. Dies geschieht z.B. durch die Aggregation verschiedener „Dienst- und Sachleistungen“ zu einer übergeordneten „Verkaufsleistung“. Das *Leistungszuordnungsdiagramm* fokussiert eine spezifische Leistung und dokumentiert dessen relevante Aspekte, wie z.B. den Vertriebsweg oder die Zielgruppe. Beide Modelltypen differenzieren zwischen der unternehmensexternen und der unternehmensinternen Sichtweise. Die unternehmensexterne Sichtweise betrachtet die Leistung aus dem Blickwinkel des Vertriebs und des Marketings, während die unternehmensinterne Sichtweise vor allem organisatorische Aspekte adressiert [SGK06, S. 34ff.].

Prozessmodell: Mit Hilfe des Prozessmodells wird die zeitlich-logische Abfolge der Aktivitäten einer Dienstleistung abgebildet. Es dient also zur Modellierung der Prozessdimension. Dies geschieht mittels Prozessmodulketten und Ereignisgesteuerten Prozessketten (EPK). Die grobe Skizzierung des Dienstleitungsprozesses auf hohem Abstraktionsniveau erfolgt durch die *Prozessmodulkette* [SGK06, S. 37]. Der Dienstleistungsprozess wird anhand abstrakter Prozessmodule vergleichsweise einfach und übersichtlich dargestellt. Die Prozessmodule sind dabei allgemein gehaltene Standardprozessbausteine, die in verschiedenen Dienstleistungen eingesetzt werden können [GKS02, S. 22]. Zur detaillierten Beschreibung der Dienstleistung dienen *Ereignisgesteuerte Prozessketten*. Wesentliches Merkmal einer EPK ist die Darstellung der prozesszugehörigen Funktionen in zeitlich-logischer Abfolge. Dadurch können komplexe Dienstleistungsprozesse transparent dargestellt werden [SGK06, S. 40f.].

Ressourcenmodell: Das Ressourcenmodell (Potentialdimension) bildet die Produktionsfaktoren ab, die zur Erbringung einer Dienstleistung nötig sind (z.B. menschliche Arbeitskraft oder Betriebsmittel). Dazu dienen verschiedene Modelltypen wie z.B. das Funktionszuordnungsdiagramm oder das Fehlerquellendiagramm. Das *Funktionszuordnungsdiagramm* verbindet das Prozess- mit dem Ressourcenmodell, indem es z.B. jeder Tätigkeit die benötigten Inputfaktoren zuweist. Im *Fehlerquellendiagramm* werden Schwierigkeiten festgehalten, die bei der Erbringung einer Dienstleistung auftreten können. Somit ist es eine wichtige Basis für ein effektives Qualitätsmanagement [SGK06, S. 42ff.].

Bewertung: Das integrierte Rahmenkonzept zur Modellierung von Dienstleistungen nach SCHEER ET AL. ist ein Ansatz zur ganzheitlichen Beschreibung immaterieller Leistungen in den Dimensionen Ergebnis, Prozess und Potential. Dazu fasst der Ansatz verschiedene Modellierungsmethoden zu Produkt-, Prozess- und Ressourcenmodellen zusammen. Damit ein vollständiges Bild einer Dienstleistung entsteht, müssen alle Modelltypen erstellt und miteinander kombiniert werden. Die vergleichsweise hohe Anzahl von Modelltypen erzeugt somit einen erheblichen Aufwand zur ganzheitlichen Modellierung von Dienstleistungen.

3.3.5 HLB-Layer-Methode

Die HLB-Layer-Methode[35] ist ein Ansatz zur Entwicklung neuer Ideen für hybride Leistungsbündel und zur Klärung der Entwicklungsaufgabe. In Verbindung mit der HLB-Anforderungscheckliste können zudem Anforderungen generiert werden [SM12, S. 49]. Die Methode basiert auf neun Gestaltungsdimensionen von hybriden Leistungsbündeln, die in Kundensicht und Entwicklersicht unterteilt werden. Die Dimensionen der Kundensicht sind *Kundenbedürfnis* und *Kundennutzen bzw. Kundenwerte*. Gestaltungsdimensionen aus Entwicklersicht sind *Leistungsergebnis*, *Lebenszyklusaktivitäten*, *Akteure*, *(Kern-)Produkte bzw. (Kern-)Sachleistungen*, *Peripherie*, *vertragliche Rahmenbedingungen* sowie *Finanzierung bzw. Fakturierung* [PAS1094, S. 28f.], [MKS+09, S. 18ff.].

Die Gestaltungsdimensionen (Klassen) werden in Form horizontaler Ebenen (Layer) abgebildet. Alle Elemente eines hybriden Leistungsbündels können nun den jeweiligen Ebenen zugeordnet werden. Ein beispielhaftes HLB-Element der Dimension Kundennutzen ist die „Zeitersparnis durch schnelle Wartung“. Die Elemente werden ohne vorgegebene Form mittels Texten oder Zeichnungen dargestellt. So entsteht ein Architekturbild für HLB-Ideen, deren Elemente direkt mit Anforderungen verknüpft werden können. Die HLB-Layer-Methode unterscheidet absichtlich nicht zwischen Sach- und Dienstleistungen, um sicherzustellen, dass die Planung hybrider Leistungsbündel integrativ abläuft. Anwender der Methode sind Kleingruppen oder einzelne Entwickler, die in der frühen Phase der Entwicklung HLB-Ideen und -Konzepte erstellen und miteinander vergleichen. Dabei erfolgt das Vorgehen iterativ, sodass die erstellten Modelle schrittweise verfeinert

[35] Engl. PSS Layer Method

werden. Unterstützende Werkzeuge sind Moderations- und Anwendungsvorlagen in Papierform sowie ein prototypisch umgesetztes Softwarewerkzeug [MKS+09, S. 9f.], [SM12, S. 49f.]. Bild 3-18 zeigt eine konzeptionelle Darstellung der HLB-Layer-Methode.

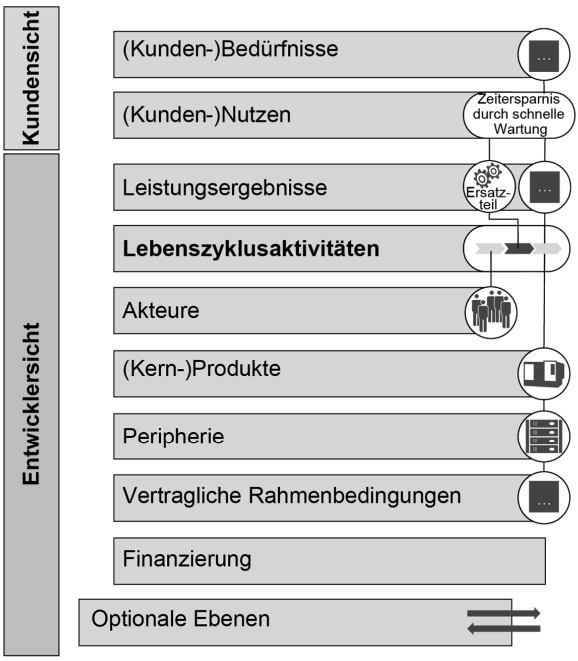


Bild 3-18: Konzeptionelle Darstellung der HLB-Layer-Methode [SM12, S. 50]

Ein weiterer Ansatz zur Modellierung von hybriden Leistungsbündeln ist die Sprache *Hypro Design*. Die Sprache entstand im Rahmen des gleichnamigen Forschungsprojekts zur Erstellung einer Entwicklungsarchitektur für hybride Produkte [BBK+09, S. 57], [FIR16-ol]. Weiterführende Erläuterungen zu Hypro Design sind Gegenstand von Abschnitt A2.5 im Anhang.

Bewertung: Mit Hilfe der HLB-Layer-Methode können Ideen und Konzepte für hybride Leistungsbündel erstellt und miteinander verglichen werden. Unter Berücksichtigung der neun Gestaltungsdimensionen entsteht ein erstes Architekturbild eines HLB, das z.B. zur Klärung der Entwicklungsaufgabe oder zur Ableitung von Anforderungen genutzt werden kann. Die Anwendung der HLB-Layer-Methode setzt keine aufwändige Einarbeitung voraus, da lediglich die Gestaltungsdimensionen als Ebenen vorgegeben werden. Somit können sich die Anwender auf die kreative Arbeit fokussieren. Die rudimentären Vorgaben erlauben einen flexiblen Methodeneinsatz für jegliche Art von hybriden Leistungsbündeln. Für eine einheitliche Dokumentation ist dies jedoch hinderlich, da das Ergebnis

der Modellierung stark von der individuellen Ausgestaltung der Anwender abhängt. Somit ist eine Verwendung der HLB-Layer-Methode im Rahmen der zu entwickelnden Systematik nur möglich, wenn die Freiheitsgrade bei der Modellierung eingeschränkt werden, um Dienste einheitlich dokumentieren zu können. Ferner muss die Methode an die Merkmale von Cyber-Physical Systems angepasst werden.

3.4 Bewertung und Handlungsbedarf

Ein Vergleich des Stands der Technik mit den in Abschnitt 2.7 gestellten Anforderungen an eine *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus* führt zu folgender Bewertung, die Bild 3-19 zusammenfasst:

A1) Anschauliche Repräsentation: Der Großteil der vorgestellten Referenzarchitekturen bildet die Bestandteile von CPS und deren Zusammenhänge nur unzureichend ab. Entweder wird das Zusammenspiel aller Teilsysteme wie bei LEE ET AL., BROY, AHMED ET AL. und PORTER/HEPPELMANN nur abstrakt beschrieben oder aber sehr detailliert und unübersichtlich wie bei DEINDL. Ein passendes Abstraktionsniveau wählen GAUSEMEIER ET AL., die mit dem Technologiekonzept Intelligenter Technischer Systeme Bestandteile und Zusammenhänge von ITS anschaulich darstellen.

A2) Allgemeingültigkeit für CPS des Maschinen- und Anlagenbaus: Keine der untersuchten Referenzarchitekturen bildet alle in Abschnitt 2.2.3 aufgeführten Merkmale von Cyber-Physical Systems gleichermaßen ab. Insbesondere die Merkmale Daten und Dienste werden von den meisten Referenzarchitekturen nicht berücksichtigt.

A3) Plausibilität und Nachvollziehbarkeit: Keines der untersuchten Leistungsstufenmodelle für technische Systeme erfüllt die Anforderung hinsichtlich eindeutiger, vergleichbarer und reproduzierbarer Ergebnisse. Anders ist dies bei den reifegradbasierten Prozessmanagementmodellen, von denen einige Ansätze der Anforderung gerecht werden. Hier sind insbesondere der VPS-Benchmark und die Methode von BÁLAZOVÁ hervorzuheben. Jedoch dienen diese Ansätze dem Vergleich der Leistungsfähigkeit von Prozessen und nicht von technischen Systemen.

A4) Umfassende Dokumentation: Die betrachteten Leistungsstufenmodelle für technische Systeme beschreiben zwar die Eigenschaften der Leistungsstufen, gehen jedoch nicht auf die Zusammenhänge zwischen den Leistungsstufen ein. Berechnungsvorschriften zur Dokumentation von Zusammenhängen beinhalten reifegradbasierte Prozessmanagementmodelle wie der VPS-Benchmark oder die Methode von BÁLAZOVÁ. Allerdings definieren diese Ansätze keine Leistungsstufen für Cyber-Physical Systems.

A5) Spezifikation von CPS: Der Anforderung nach einer einheitlichen und fachdisziplinübergreifenden Beschreibung von Lösungen im Kontext von CPS wird keiner der untersuchten Ansätze vollständig gerecht. Modellierungssprachen wie CONSENS oder

das Service Blueprinting sind jedoch vielversprechende Ansätze, die durch eine geschickte Kombination eine einheitliche Dokumentation von Lösungen ermöglichen können.

A6) Unterstützung der Ideenfindung: Der Anforderung nach einer systematischen Identifikation und Auswahl konkreter Lösungen wird keiner der untersuchten Ansätze in vollem Umfang gerecht. Eine teilweise Erfüllung der Anforderung ist bei ANDERL ET AL. gegeben, die mit dem Werkzeugkasten Industrie 4.0 (Produkt) verschiedene Lösungsmöglichkeiten je Leistungsstufe aufzeigen.

A7) Integraler Bestandteil der Strategischen Produktplanung: Isoliert betrachtet sind einige Ansätze geeignet, um im Rahmen der Strategischen Produktplanung bei der Erstellung einer Produktkonzeption zu unterstützen. Geeignete Aspekte für die angestrebte Systematik sind daher auf Eignung zu prüfen.

A8) Systematische Vorgehensweise: Die Anforderung der systematischen Vorgehensweise erfüllen der VPS-Benchmark sowie die Methode von BÁLAZOVÁ. Ausgehend von einer strukturierten Ist-Analyse definieren sie einen unternehmensadäquaten Zielzustand und zeigen Wege zur dessen Erreichung auf. Die beiden Ansätze gilt es nun für die zu entwickelnde Systematik zu adaptieren.

A9) Anwendbarkeit: Mehrere Ansätze werden der wirtschaftlichen Anwendung und einfachen Handhabung gerecht. In der Regel ist dies auf einen geringen Einarbeitungsaufwand zurückzuführen. Im Hinblick auf die zu entwickelnde Systematik scheiden alle anderen Ansätze aus, da eine praktikable Anwendung essentiell für die Akzeptanz im Maschinen- und Anlagenbau ist.

Keiner der untersuchten Ansätze, als auch keine triviale Kombination bestehender Aspekte, erfüllt alle Anforderungen in vollem Umfang. Eine wesentliche Schwachstelle ist die gleichwertige Berücksichtigung aller Merkmale von Cyber-Physical Systems, die weder bei bestehenden Referenzarchitekturen noch bei Ansätzen des Reifegradmanagements gegeben ist. Des Weiteren mangelt es an Methoden und Vorgehensweisen, die ausgehend von der derzeitigen Leistungsfähigkeit technischer Systeme, einen unternehmensadäquaten Zielzustand definieren und die Umsetzung systematisch planen. Viele Ansätze fokussieren nur Teilaspekte des Gesamtproblems. Es besteht demnach dringender Handlungsbedarf für eine *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus.*

Bewertung der untersuchten Ansätze hinsichtlich der gestellten Anforderungen

Bewertungsskala:

○ = nicht erfüllt

◐ = teilweise erfüllt

● = voll erfüllt

MuA: Maschinen- und Anlagenbau

		Anforderungen (A)								
		Architektur		Reifegrade		Lösungen		System. Planung		
		Anschauliche Repräsentation	Allgemeingültigkeit für CPS des MuA	Plausibilität und Nachvollziehbarkeit	Umfassende Dokumentation	Spezifikation von CPS	Unterstützung der Ideenfindung	Integraler Bestandteil der Strateg. Produktplanung	Systemat. Vorgehensweise	Anwendbarkeit
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
Referenzarchitekturen	CPS-Struktur nach Lee et al.	◐	◐	○	○	○	○	○	○	○
	Zwiebelschalenarchitektur der CPS nach Broy	○	◐	○	○	○	○	○	○	○
	CPS-Architektur nach Ahmed et al.	◐	◐	○	○	○	○	○	○	○
	Technologiekonzept Intelligenter Technischer Systeme nach Gausemeier et al.	●	◐	○	○	○	○	○	○	○
	Technologie-Infrastruktur für intelligente, vernetzte Produkte nach Porter/Heppelmann	◐	◐	○	○	○	○	○	○	○
	Generische Architektur von Systemen intelligenter Objekte nach Deindl	○	◐	○	○	○	○	○	○	○
Reifegradmanagement – Leistungsstufenmod.	CPS-Charakterisierung und erforderliche neue Fähigkeiten nach Geisberger/Broy	○	○	○	◐	○	○	○	○	○
	5C-Architektur für die Implementierung von CPS nach Lee et al.	○	○	○	◐	○	○	○	○	◐
	Fähigkeitsstufen intelligenter Objekte nach Pérez Hernández/Reiff-Marganiec	○	○	○	◐	○	○	○	○	○
	Werkzeugkasten Industrie 4.0 (Produkt) nach Anderl et al.	○	○	○	◐	○	◐	◐	◐	●
	Merkmale intelligenter Objekte in Produktion und Logistik nach Deindl	○	○	○	◐	○	○	◐	◐	●
Reifegradmanagement – Reifegradmod.	VPS-Benchmark	○	○	●	◐	○	○	○	●	●
	CMMI – Capability Maturity Model Integration	○	○	●	◐	○	○	○	◐	◐
	Methode z. Leistungsbewertung und -steigerung d. Mechatronikentwicklung n. Bálazová	○	○	●	◐	○	○	○	●	●
	PEMM – Process and Enterprise Maturity Model	○	○	◐	◐	○	○	○	◐	●
Modellierung von Marktleistungen	CONSENS	●	○	○	○	◐	◐	◐	◐	●
	SysML	◐	○	○	○	◐	○	◐	○	◐
	Service Blueprinting	●	○	○	○	◐	○	◐	◐	●
	Integriertes Rahmenkonzept zur Modellierung von Dienstleistungen nach Scheer et al.	◐	○	○	○	◐	○	◐	○	◐
	HLB-Layer-Methode	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	●

Bild 3-19: Bewertung des untersuchten Stands der Technik anhand der Anforderungen

4 Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems

Dieses Kapitel bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Es stellt eine *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus* vor. Diese hat den Anspruch dem dargestellten Handlungsbedarf aus der Problemanalyse und dem Stand der Technik gerecht zu werden und die in Kapitel 2 gestellten Anforderungen zu erfüllen. Abschnitt 4.1 gibt zunächst einen Überblick über die Systematik und ihre wesentlichen Bestandteile. Die Basis der Systematik bildet eine Referenzarchitektur für CPS. Diese wird in Abschnitt 4.2 vorgestellt. Ein Reifegradmodell für CPS, das Eigenschaften von CPS für verschiedene Leistungsstufen definiert und Zusammenhänge bei der Entwicklung von geringer zu hoher Reife beschreibt, ist Gegenstand von Abschnitt 4.3. In Abschnitt 4.4 werden Hilfsmittel vorgestellt, die bei der Konzipierung von CPS unterstützen und so die Konkretisierung von Lösungen vereinfachen. Abschließend präsentiert Abschnitt 4.5 ein Vorgehensmodell, das ausgehend vom Reifegradmodell eine Planung von CPS ermöglicht. Die durchgängige Anwendung der Systematik, insbesondere des Vorgehensmodells, erfolgt im Anschluss in Kapitel 5.

4.1 Die Systematik im Überblick

Die *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus* besteht aus vier wesentlichen Bestandteilen, die im Folgenden vorgestellt werden (siehe Bild 4-1):

- Die Basis der Systematik bildet eine **Referenzarchitektur für Cyber-Physical Systems**. Sie ist ein allgemeingültiges Muster, das alle Merkmale eines CPS umfasst und als Leitlinie für die Weiterentwicklung der Systeme dient.
- Das **Reifegradmodell für Cyber-Physical Systems** definiert die Eigenschaften eines CPS für verschiedene Leistungsstufen, beschreibt deren Zusammenhänge und die Entwicklung von geringer zu hoher Reife. Durch das Reifegradmodell kann der Leistungsstand technischer Systeme objektiv und messbar ermittelt, eine individuelle Zielposition festgelegt und eine inkrementelle evolutionäre Leistungssteigerung systematisch geplant werden.
- Die **Hilfsmittel zur Konzipierung von Cyber-Physical Systems** dienen dazu, konkrete Lösungen im Kontext von CPS einheitlich zu beschreiben, sie mit den Leistungsstufen technischer Systeme zu verknüpfen, um so die Identifikation und Auswahl zu erleichtern.
- Ein **Vorgehensmodell zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems** beschreibt detailliert die durchzuführenden Tätigkeiten, ausgehend von der Analyse und Bewertung des Ist-Zustandes, über die Definition der

individuellen Zielposition und die Ermittlung alternativer Lösungskonzepte bis hin zur Umsetzungsplanung. Es steuert den Einsatz der Hilfsmittel und dient als Leitfaden, speziell für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus.

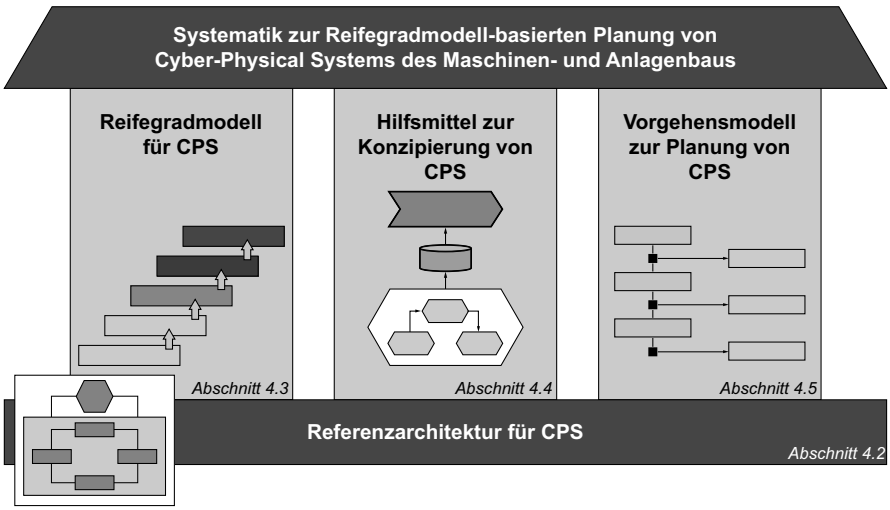


Bild 4-1: Aufbau der Systematik

Das Fundament der Systematik bildet die Referenzarchitektur für Cyber-Physical Systems. Sie dient als Leitlinie für die Strukturierung technischer Systeme und ermöglicht – insbesondere vor dem Hintergrund vernetzter Systeme und der Einbindung von Diensten – eine transparente Abbildung der Funktionsweise eines CPS und dessen Teilsystemen. Aufbauend auf der Referenzarchitektur definiert das Reifegradmodell konkrete Leistungsstufen für CPS und deren Komponenten. Ferner stellt es Berechnungsvorschriften und Hilfsmittel bereit, die eine objektive Bewertung der aktuellen Leistungsfähigkeit bestehender technischer Systeme ermöglichen, um davon ausgehend eine individuelle Zielposition zu bestimmen und die Leistungssteigerung systematisch zu planen. Zur Leistungssteigerung bestehender technischer Systeme bedarf es konkreter Lösungen, die eine schrittweise Realisierung der definierten Zielposition ermöglichen. Zur Unterstützung der Ideenfindung, -bewertung und -auswahl stellt die Systematik Hilfsmittel zur Verfügung, die eine einheitliche und vergleichbare Dokumentation von Lösungen erlauben und diese mit den Leistungsstufen des Reifegradmodells verknüpfen. Angesichts der Analyse des Stands der Technik wird zu diesem Zweck auf die Spezifikationstechnik CONSENS zurückgegriffen, die um spezifische Aspekte ergänzt wird. Das Vorgehensmodell definiert durchzuführende Tätigkeiten, deren Ergebnisse sowie notwendige Hilfsmittel zur Reifegradmodell-basierten Planung von CPS. Zentrales Resultat ist eine Umsetzungsroadmap, die einen zeitlichen Plan für die Umsetzung der ausgewählten Lösungskonzepte repräsentiert. Die Systematik ist integraler Bestandteil der Strategischen Produktplanung und bildet die Schnittstelle zwischen Produktfindung, Geschäftsplanung sowie Produkt- und Dienstleistungsentwicklung.

4.2 Referenzarchitektur für Cyber-Physical Systems

Aus der der Problemanalyse geht hervor, dass Cyber-Physical Systems vernetzte Systeme sind, die sowohl mit der physikalischen als auch mit der digitalen Welt interagieren. Ihre Fähigkeit zur Kommunikation und Kooperation mit anderen Systemen lässt Systemverbünde entstehen, deren Funktionalität und Leistungsfähigkeit die der Einzelsysteme übersteigt. Die vernetzten Systeme agieren zunehmend in globaler Dimension und passen die Rolle der Einzelsysteme und deren Vernetzung veränderten Bedingungen flexibel an. Anbieter von CPS, wie z.B. Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus, stellt dies vor erhebliche Herausforderungen, da die Systemgrenze, die Systembestandteile und ihre Interaktion mit anderen Systemen während der Nutzung variieren (vgl. Abschnitt 2.2.3). Damit alle Bestandteile eines CPS und deren Wechselwirkungen transparent dargestellt werden können, wird im Folgenden eine Referenzarchitektur für CPS vorgestellt.

Das **Ziel** der Referenzarchitektur für Cyber-Physical Systems ist die Bereitstellung eines allgemeingültigen Musters, das alle Merkmale und Zusammenhänge eines CPS idealtypisch abbildet. Ausgangspunkt bildet die Grundstruktur mechatronischer Systeme nach der VDI2206, die in die Architektur integriert wurde (vgl. Abschnitt 2.2.1). Hierdurch werden insbesondere Erzeugnisse des Maschinen- und Anlagenbaus berücksichtigt, da diese heute in der Regel mechatronische Systeme sind. Aus der Analyse des Stands der Technik geht zudem hervor, dass das Technologiekonzept Intelligenter Technischer Systeme nach GAUSEMEIER ET AL. eine Vielzahl der CPS-Merkmale mit einem übersichtlichen Aufbau beschreibt (vgl. Abschnitt 3.1.4). Somit ist das ITS-Technologiekonzept gut geeignet, um es für eine CPS-Referenzarchitektur zu adaptieren.

Der **Aufbau** der Referenzarchitektur unterscheidet zwischen *Teilsystemen* und dem *Gesamtsystem*, dem Cyber-Physical System. Ein Teilsystem dient einem eigenen Zweck und wird in der Regel unabhängig von anderen Teilsystemen entwickelt. Es kann sowohl eigenständig als auch gemeinsam mit anderen Teilsystemen betrieben werden. Im Kontext der industriellen Produktion ist dies z.B. eine Werkzeugmaschine oder ein Transportsystem. Ein Teilsystem verfügt über ein Grundsystem, Sensorik, Informationsverarbeitung, Aktorik und eine Mensch-Maschine-Schnittstelle. Die Systemgrenze des Teilsystems steht in der Regel fest. Kommuniziert das Teilsystem nun mit weiteren Systemen und nutzt Daten und Dienste, so entsteht ein Cyber-Physical System. Dieses hat wiederum eine flexible Systemgrenze, da sich die Vernetzung mit anderen Systemen und die Nutzung von Daten und Diensten entlang des Lebenszyklus verändern können. Die einzelnen *Komponenten* eines CPS werden in physikalische Einheiten (z.B. Aktorik) und digitale Einheiten (z.B. Dienste) unterteilt. Dadurch werden Komponenten unterschieden, die primär auf physikalischer Ebene operieren und die, die vordergründig digitale Vorgänge beeinflussen. Zudem erfolgt eine Unterscheidung von Schnittstellen (z.B. HMI) und externen Einheiten (z.B. Umgebung). Alle Komponenten werden durch *Beziehungen* miteinander verknüpft (z.B. Informationsfluss). So kann das Zusammenspiel aller Komponenten eines CPS idealtypisch dargestellt werden. Bild 4-2 veranschaulicht die Referenzarchitektur für CPS, dessen **Bestandteile** im Folgenden näher erläutert werden.

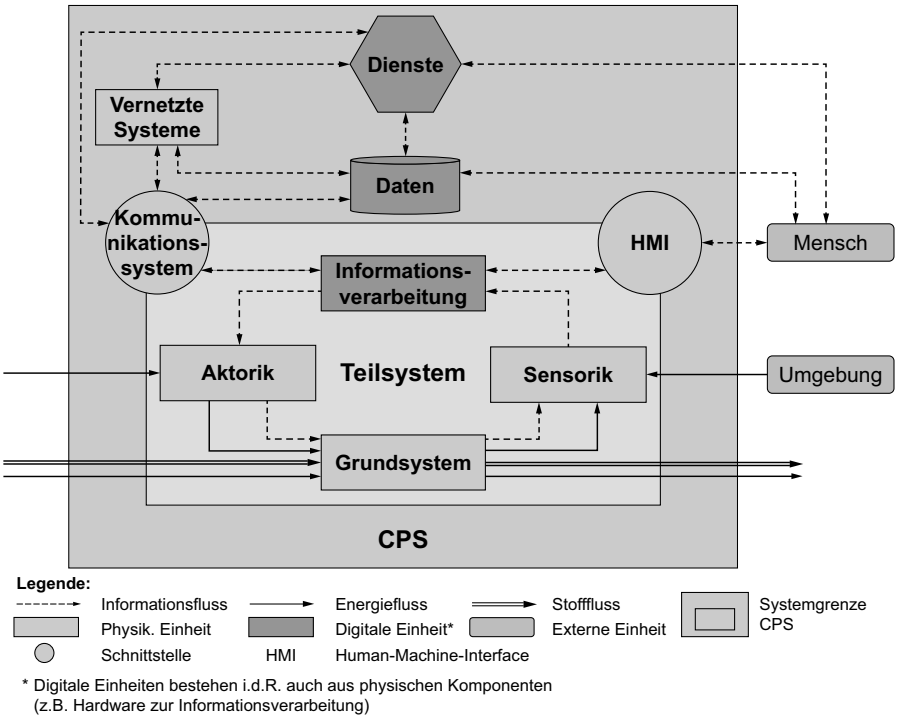


Bild 4-2: Referenzarchitektur für Cyber-Physical Systems

Grundsystem: Nach der VDI2206 ist ein Grundsystem zumeist eine mechanische, elektromechanische, pneumatische oder hydraulische Struktur bzw. eine Kombination daraus [VDI2206, S. 14]. Das Grundsystem ist eine physikalische Einheit, wie z.B. das Gestell oder das Werkzeug einer Werkzeugmaschine.

Sensorik: Die Sensorik dient zur Erfassung ausgewählter Zustandsgrößen der physikalischen Welt. Die aufgenommenen Messwerte sind die Eingangsgröße für die Informationsverarbeitung. In der Regel sind Sensoren physisch vorhandene Messwertaufnehmer. Daher wird die Sensorik in der Referenzarchitektur als physikalische Einheit deklariert. Ausnahmen bilden sog. Softsensoren, die Messgrößen durch die Korrelation weiterer Messgrößen bestimmen [VDI2206, S. 14], [GB12, S. 22]. Beispiele für Sensorik sind Schwingungssensoren oder Temperaturfühler.

Aktorik: Die Einwirkung auf physikalische Vorgänge erfolgt mittels Aktoren [GB12, S. 22]. Aktoren sind physikalische Einheiten wie z.B. Antriebe oder Ventile.

Informationsverarbeitung: Durch die Informationsverarbeitung werden die notwendigen Einwirkungen zur gewünschten Beeinflussung der Zustandsgrößen des Grundsystems bestimmt [VDI2206, S. 15]. Wie Intelligente Technische Systeme sind auch CPS in der Lage, die starre Informationsverarbeitung gezielt zu modifizieren. Sie verfügen zum

Teil über eine kognitive Informationsverarbeitung, die es ihnen erlaubt, das Systemverhalten an die Umgebung und die Wünsche der Anwender anzupassen [Dum10, S. 19], [GAC+13, S. 15]. Die Informationsverarbeitung ist eine digitale Einheit, da ihre Funktionalität in der Regel auf Software basiert. Ein Beispiel für die Informationsverarbeitung ist ein Industrie-PC mit entsprechender Software zur Steuerung einer Werkzeugmaschine.

Kommunikationssystem: Das Kommunikationssystem dient zur Kommunikation des Systems mit weiteren technischen Systemen. Dabei kann die Kommunikation sowohl drahtlos als auch drahtgebunden und sowohl in lokaler als auch in globaler Dimension erfolgen [GB12, S. 22]. Die Referenzarchitektur stellt das Kommunikationssystem als Schnittstelle dar. Ein Beispiel für ein Kommunikationssystem ist Industrial Ethernet zur Anbindung des Systems an ein unternehmensinternes Maschinennetzwerk.

Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI): Über Mensch-Maschine-Schnittstellen kommuniziert das System mit dem Menschen bzw. mit dem Systemanwender [VDI2206, S. 16], [GB12, S. 22]. Dabei kann die Kommunikation multimodal erfolgen, d.h. durch den Einsatz verschiedener Modalitäten (z.B. Sprache, Gestik) in komplementärer oder paralleler Verarbeitungsweise [SR10, S. 3]. Das HMI, wie z.B. ein Touchscreen, wird in der Architektur als Schnittstelle visualisiert.

Daten: Daten sind (maschinen-)les- und -bearbeitbare, zumeist digitale Informationen [HN09, S. 6], die durch das System selbst oder durch vernetzte Systeme erfasst und zur Weiterverarbeitung bereitgestellt werden. Die Speicherung und Verarbeitung der Daten kann sowohl zentral als auch dezentral erfolgen. Beispiele für Daten sind Maschinen- oder Planungsdaten, die vom System zur Weiterverwendung genutzt werden. Daten sind digitale Einheiten.

Dienste[36]: Ein Dienst ist eine in sich geschlossene Einheit, die eine Leistung zur Erfüllung eines definierten Bedarfs bereitstellt. Es handelt sich dabei um technische Funktionen, die auf der Verarbeitung von Daten beruhen und über definierte Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden [GB12, S. 244], [KWH13, S. 85], [BKM07, S. 3]. Ein Beispiel für den Dienst einer Werkzeugmaschine ist die eigenständige Bestellung von Ersatzteilen auf Basis prognostizierter Maschinenausfälle. Dienste sind digitale Einheiten.

Vernetzte Systeme: Vernetzte Systeme sind Systeme, mit denen das Teilsystem kommuniziert. Dabei kann es sich um technische Systeme wie z.B. Transport- oder Lagersysteme handeln, aber auch um reine Softwaresysteme, wie z.B. MES- oder ERP-Systeme.

Beziehungen: Die Komponenten eines CPS werden durch Beziehungen miteinander verbunden. In Anlehnung an PAHL/BEITZ werden Stoffflüsse (z.B. Wasser), Energieflüsse (z.B. elektrischer Strom) und Informationsflüsse (z.B. Steuerimpulse) unterschieden [FG13, S. 241].

---

[36] Der Begriff (digitaler) Service wird im Rahmen dieser Arbeit synonym zum Begriff Dienste verwendet.

Durch den beschriebenen Aufbau und die Bestandteile der Referenzarchitektur werden die dieser Arbeit zugrunde liegenden Merkmale von CPS berücksichtigt und die prinzipielle Wirkungsweise solcher Systeme transparent dargestellt (vgl. Abschnitt 2.2.3). Durch die Unterscheidung physikalischer und digitaler Einheiten wird darüber hinaus verdeutlicht, dass CPS sowohl physikalische als auch digitale Vorgänge beeinflussen. Die Kennzeichnung variabler Systemgrenzen adressiert ferner den Aspekt flexibler Systemverbünde, die sich situationsabhängig anpassen können.

4.3 Reifegradmodell für Cyber-Physical Systems

Das Reifegradmodell für Cyber-Physical Systems dient zur objektiven Erfassung und Beurteilung der aktuellen Leistungsfähigkeit bestehender technischer Systeme, zur Definition einer individuellen Zielposition und zur systematischen Planung einer inkrementellen evolutionären Leistungssteigerung. Im Fokus des Reifegradmodells stehen dabei technische Systeme des Maschinen- und Anlagenbaus (vgl. Abschnitt 2.1). **Leistung bzw. Leistungsfähigkeit** adressiert im Kontext dieser Arbeit den Erfüllungsgrad der Merkmale von CPS durch ein technisches System. Das Reifegradmodell orientiert sich an den intrinsischen Merkmalen von Reifegradmodellen zur Leistungsbewertung und -steigerung nach CHRISTIANSEN (vgl. Abschnitt 2.5.1).

Grundsätzlich werden drei **Bereiche** unterschieden: Leistungsbewertung, Zieldefinition und Leistungssteigerung. Jeder der drei Bereiche enthält zwei **Phasen**, die konkrete Tätigkeiten bei der Durchführung des Reifegradmodells beschreiben. Zur Durchführung der einzelnen Phasen werden **Hilfsmittel und Berechnungsvorschriften** bereitgestellt. Diese stellen sicher, dass die Anwendung des Reifegradmodells zu eindeutigen, vergleichbaren und reproduzierbaren Ergebnissen führt. Bild 4-3 verdeutlicht den Aufbau des Reifegradmodells für Cyber-Physical Systems.

Im Folgenden werden die einzelnen Bereiche vorgestellt. Abschnitt 4.3.1 beschreibt den Bereich der **Leistungsbewertung**. Dieser enthält die Phasen *Systemanalyse* und *Systembewertung*. Die Beschreibung des Bereichs **Zieldefinition** mit den Phasen *Verbesserungszielauswahl* und *Zielbestimmung* ist Gegenstand von Abschnitt 4.3.2. Den Bereich **Leistungssteigerung** inklusive der Phasen *Leistungsrelevanzanalyse* und *Umsetzungsplanung* beschreibt Abschnitt 4.3.3. Die Erläuterung der einzelnen Hilfsmittel und Berechnungsvorschriften erfolgt während der Beschreibung der Phasen. Nach der theoretischen Vorstellung des Reifegradmodells beschreibt Abschnitt 4.3.4 abschließend dessen prototypische Umsetzung in einem Softwarewerkzeug.

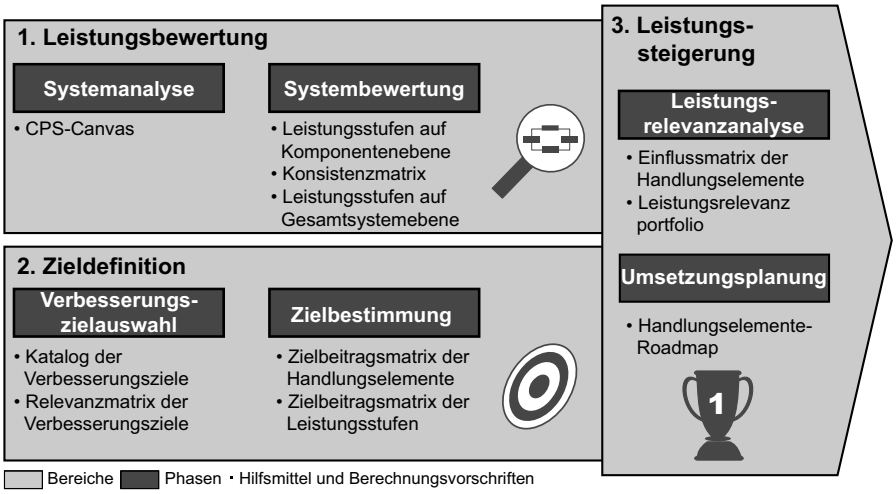


Bild 4-3: Aufbau des Reifegradmodells für Cyber-Physical Systems

4.3.1 Leistungsbewertung

Ziel der Leistungsbewertung ist die objektive Bewertung des Ausgangszustands des zu betrachtenden Systems. Dazu muss der aktuelle Zustand zunächst erfasst und anschließend bewertet werden. Dies erfolgt im Zuge der Phasen *Systemanalyse* und *Systembewertung*, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

4.3.1.1 Systemanalyse

Im Rahmen der Systemanalyse wird das zu betrachtende System festgelegt und untersucht. Gemäß der CPS-Referenzarchitektur ist der Betrachtungsgegenstand ein Teilsystem, das einem eigenen Zweck dient und unabhängig von anderen Teilsystemen entwickelt wird. Zur Untersuchung des Systems müssen zunächst relevante Informationen beschafft werden. Dazu stellt das Reifegradmodell die sog. **CPS-Canvas** bereit. Die CPS-Canvas ist ein Strukturierungsrahmen zur einheitlichen und übersichtlichen Dokumentation der CPS-relevanten Informationen. Die einzelnen Felder orientieren sich dabei an den Komponenten der Referenzarchitektur. Jedes Feld enthält eine Leitfrage, wie z.B. „Über welche Sensoren zur Erfassung physikalischer Zustandsgrößen verfügt das Teilsystem?“. Durch die Beantwortung der Leitfragen werden die wesentlichen Informationen erfasst und übersichtlich dargestellt. Beispielhafte Antworten für eine Werkzeugmaschine sind u.a. Schwingungssensoren im Bereich *Sensorik*, Elektromotoren im Bereich *Aktorik*, Industrie-PC für die *Informationsverarbeitung* oder Touchscreen als *Mensch-Maschine-Schnittstelle*. In der praktischen Anwendung ist die CPS-Canvas idealerweise in einem interdisziplinären Team auszufüllen, damit fundierte Aussagen für alle Komponenten getroffen werden können. Hilfreiche Informationsquellen sind z.B. ein

Systemmodell, Stücklisten, Zeichnungen, Schaltpläne etc. Bild 4-4 zeigt die CPS-Canvas mit den Leitfragen. Zentrales Ergebnis der Systemanalyse sind die CPS-relevanten Informationen des zu betrachtenden Systems.

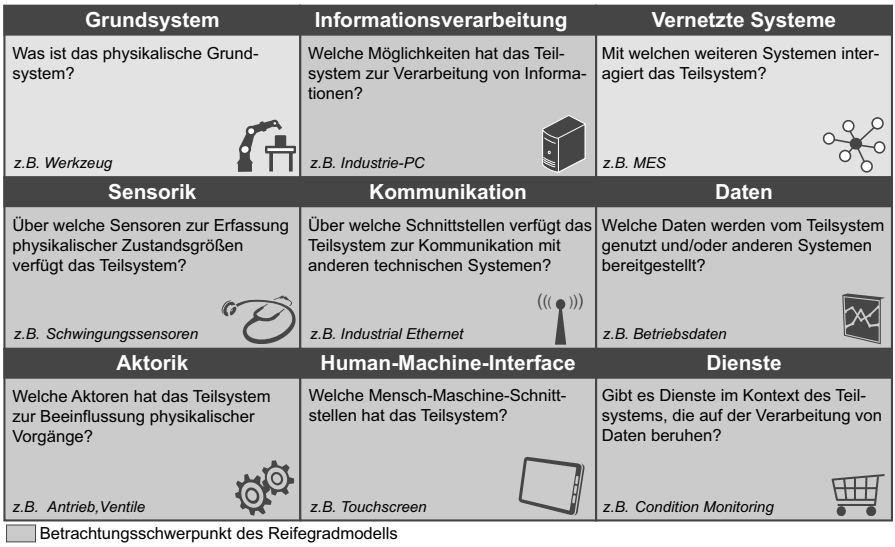


Bild 4-4: CPS-Canvas zur Systemanalyse

4.3.1.2 Systembewertung

Im Anschluss an die Systemanalyse erfolgt die Systembewertung. Ziel dieser Phase ist es, eine objektive und vergleichbare Aussage über die aktuelle Leistungsfähigkeit des zu betrachtenden Systems zu treffen. Dazu sieht das Reifegradmodell drei Hilfsmittel vor. **Leistungsstufen auf Komponentenebene** definieren für die Komponenten der CPS-Referenzarchitektur Eigenschaften für verschiedene Leistungsstufen. Die Einordnung des Systems in diese Leistungsstufen erlaubt eine Aussage über dessen aktuellen Leistungsstand auf Komponentenebene. Zur Plausibilitätsprüfung der Einordnung dient eine **Konsistenzmatrix**, die eine Auswahl zueinander inkonsistenter Leistungsstufen ausschließt. Bei der Bewertung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems unterstützen **Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene**. Diese beschreiben unterschiedliche Eigenschaften je Leistungsstufe für ein CPS. Die genannten Hilfsmittel werden nachfolgend erläutert.

Leistungsstufen auf Komponentenebene

Nach CHRISTIANSEN weisen viele Reifegradmodelle trotz verschiedener Untersuchungsbereiche die gleiche Grundstruktur auf. *Handlungsfelder* gliedern den Untersuchungsbereich in übergeordnete Aufgabenkomplexe. Jedes Handlungsfeld kann wiederum in verschiedene *Handlungselemente* unterteilt werden, die einen hohen Einfluss auf den Untersuchungsbereich haben. Dabei nimmt jedes Handlungselement in der Regel verschiedene

Reifegrade bzw. Leistungsstufen an (vgl. Abschnitt 2.5). Dieser Logik folgt das vorliegende Reifegradmodell. Der Untersuchungsbereich wird durch die Referenzarchitektur abgegrenzt. Folglich bilden die Komponenten der Architektur (Sensorik, Aktorik etc.) die Handlungsfelder für das zu betrachtende System. Ausnahmen bilden das Grundsystem sowie vernetzte Systeme. Das Grundsystem hat in der Regel wenig Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines CPS. Vernetzte Systeme werden durch das Kommunikationssystem berücksichtigt. Alle anderen Komponenten werden in mehrere Handlungselemente unterteilt. Die Handlungselemente sind dabei so gewählt, dass konkrete Aussagen über die Leistungsfähigkeit der Komponenten getroffen werden können. Für jedes Handlungselement existieren fünf Leistungsstufen. Diese geben an, welche Eigenschaften jedes Handlungselement prinzipiell aufweisen kann. Dabei gilt: je höher die Leistungsstufe, desto höher entwickelt ist das Handlungselement. Hierbei handelt es sich um eine idealtypische Annahme, die es im Einzelfall zu überprüfen gilt. Nachfolgend werden die Handlungselemente und Leistungsstufen je CPS-Komponente detailliert beschrieben.

Handlungselemente und Leistungsstufen – Aktorik: Die Aktorik wird in die Handlungselemente *Prozesseingriff* und *Positioniergenauigkeit* unterteilt. Tabelle 4-1 enthält alle Handlungselemente und Leistungsstufen der CPS-Komponente Aktorik.

Tabelle 4-1: Handlungselemente und Leistungsstufen der CPS-Komponente „Aktorik“

	Handlungs-element	Leistungsstufen 1	2	3	4	5
Aktorik	**Prozesseingriff**	**Keine Aktorik**	**Unstetiger Prozesseingriff**	**Konstanter Prozesseingriff**	**Variabler Prozesseingriff**	**Stetiger Prozesseingriff**
	Fähigkeiten zur Beeinflussung physikalischer Vorgänge.	Das System verfügt nicht über Aktorik.	Die Aktorik beeinflusst physikalische Prozesse punktuell, z.B. durch Ein- und Ausschalten der Aktorik.	Die Aktorik beeinflusst physikalische Prozesse konstant mit festen Stellgrößen.	Der Prozesseingriff kann durch fest vorgegebene Stellgrößen variiert werden.	Die Stellgrößen der Aktoren können innerhalb vorgegebener Grenzen flexibel verändert werden.
	Positionier-genauigkeit	**Geringe Positionier-genauigkeit**	**Positionier-genauigkeit mit großer Toleranz**	**Positionier-genauigkeit mit geringer Toleranz**	**Hohe Positionier-genauigkeit**	**Robuste Positionier-genauigkeit**
	Fähigkeiten des Systems, eine gewünschte Position anzufahren.	Die Positionier-genauigkeit der Aktorik ist gering, d.h. in hohem Maße unsicher.	Die Positionier-genauigkeit der Aktoren liegt in einem großen Toleranzbereich, auch ohne Störeinflüsse.	Die Positionier-genauigkeit der Aktoren liegt in einem geringen Toleranzbereich, auch bei geringen Störeinflüssen.	Die Aktorik ermöglicht eine hohe Positioniergenauigkeit, ist jedoch empfindlich gegenüber Störeinflüssen.	Die Aktorik ermöglicht eine hohe Positioniergenauigkeit und ist unempfindlich gegenüber Störeinflüssen.

Das Handlungselement *Prozesseingriff* beschreibt die Fähigkeit des Systems, physikalische Vorgänge zu beeinflussen. Dabei wird sowohl die Flexibilität als auch die Kontinuität des Prozesseingriffs betrachtet. Auf Leistungsstufe 1 „Keine Aktorik“ ist das System nicht in der Lage, auf physikalische Vorgänge einzuwirken, da es nicht über Aktoren verfügt. Auf der höchsten Leistungsstufe 5 „Stetiger Prozesseingriff“ können die Stellgrößen flexibel innerhalb vorgegebener Grenzen verändert werden [Sch09, S. 58ff.], [Iwa17, S. 99f.]. Beispielsweise kann die Drehzahl eines Antriebs jederzeit stufenlos verstellt werden. Das Handlungselement *Positioniergenauigkeit* adressiert die Fähigkeit der

Aktorik, eine gewünschte Position anzufahren [Bey04, S. 6]. Für einen Industrieroboter wird damit z.B. die Fähigkeit beschrieben, sich mit einem Greifer bis auf eine vorgeschriebene Distanz einem Werkstück zu nähern. Bei Leistungsstufe 1 „Geringe Positioniergenauigkeit“ ist mit einer relativ hohen Abweichung zwischen Soll- und Ist-Position zu rechnen. Die Positioniergenauigkeit ist somit unsicher. Bei der höchsten Leistungsstufe 5 „Robuste Positioniergenauigkeit“ ist das System hingegen in der Lage, die Soll-Position nahezu exakt zu erreichen und dabei sogar eventuelle Störgrößen auszugleichen. Beispielsweise kann ein Industrieroboter bei Leistungsstufe 5 ein Werkstück trotz dessen abweichender Lage exakt greifen.

Handlungselemente und Leistungsstufen – Sensorik: Die Handlungselemente der Sensorik sind *Messsignale* und *Informationsquelle*. Alle Leistungsstufen je Handlungselement der Sensorik werden in Tabelle 4-2 dargestellt.

Tabelle 4-2: Handlungselemente und Leistungsstufen der CPS-Komponente „Sensorik“

	Handlungs-element	Leistungsstufen				
		1	2	3	4	5
Sensorik	**Messsignale**	**Keine Signale**	**Binäre Signale**	**Grenzwerte**	**Diskrete Signale**	**Kontinuierliche Signale**
	Wertevorrat und zeitliches Auftreten der Informationsparameter.	Es stehen keine Messsignale zur Verfügung.	Informationsparameter kann nur zwei Werte annehmen (z.B. Ein und Aus).	Werte werden erfasst, sobald ein vorgegebener Grenzwert erreicht wurde.	Informationsparameter kann nur endlich viele Werte innerhalb seines Wertebereichs annehmen.	Informationsparameter kann theoretisch beliebig viele Werte innerhalb seines Wertebereichs annehmen.
	Informations-quelle	**Keine Informationsquellen**	**Punktuelle Informations-quellen**	**Vielfältige Informations-quellen**	**Umfassende Informations-quellen**	**Virtuelle Informations-quellen**
	Menge der physikalischen Größen, die durch Sensorik erfasst werden.	Es werden keine Informationen phyikalischer Größen erfasst.	Informationen einiger weniger phyikalischer Größen werden erfasst.	Informationen der Mehrzahl aller physikalischen Größen werden erfasst.	Informationen sämtlicher physikalischer Größen werden erfasst.	Informationen über nicht direkt messbare physikalische Größen werden erfasst.

Das Handlungselement *Messsignale* zielt auf den Wertevorrat und das zeitliche Auftreten der Informationsparameter ab. Dadurch wird adressiert, wie viele Werte ein Informationsparameter annehmen und zu welchen Zeitpunkten dieser auftreten kann. Die Leistungsstufen dieses Handlungselements variieren dabei von Leistungsstufe 1 „Keine Signale“ bis hin zu Leistungsstufe 5 „Kontinuierliche Signale“. Die Zwischenstufen sind „Binäre Signale“ (Leistungsstufe 2), „Grenzwerte“ (Leistungsstufe 3) und „Diskrete Signale“ (Leistungsstufe 4) [Par08, S. 6f.]. Wenn ein Schwingungssensor z.B. nur dann Informationen übermittelt, wenn eine kritische Frequenz erreicht wird, ist dieser der Leistungsstufe 3 „Grenzwerte“ zuzuordnen. Sobald die Schwingungsinformationen beliebig viele Werte innerhalb eines Wertebereichs annehmen können, trifft Leistungsstufe 5 „Kontinuierliche Signale“ zu. Das Handlungselement *Informationsquelle* lässt Aussagen über die Menge der physikalischen Größen zu, die durch Sensorik erfasst werden. Physikalische Größen können prinzipiell vom System (z.B. Schwingungen des Antriebs), vom

ausführenden Prozess (z.B. Volumenstrom einer Pumpe) sowie von der Umgebung (z.B. Luftfeuchtigkeit) erfasst werden. Mit Hilfe dieses Handlungselements wird nun die Frage beantwortet, wie viele der messbaren Größen tatsächlich erfasst werden. Ausgehend von der niedrigsten Leistungsstufe 1 „Keine Informationsquellen" ist es auf Leistungsstufe 5 „Virtuelle Informationsquellen" möglich, physikalisch nicht direkt messbare Größen zu erfassen, z.B. durch Korrelation anderer Messgrößen.

Handlungselemente und Leistungsstufen – Informationsverarbeitung: Die CPS-Komponente Informationsverarbeitung lässt sich in drei Handlungselemente unterteilen: *Steuerung/Regelung*, *Identifikation und Adaption* sowie *Optimierung* (vgl. Tabelle 4-3). Diese Unterteilung fußt auf den gemeinsamen Arbeiten mit IWANEK[37]. Die genannten Handlungselemente können in das Operator-Controller-Modul (OCM) nach NAUMANN eingeordnet werden, das die Informationsverarbeitung Intelligenter Technischer Systeme beschreibt (vgl. Abschnitt 3.1.4). Das Handlungselement *Steuerung/Regelung* adressiert die unterste OCM-Schicht „Controller". Es gibt an, wie die Kopplung zwischen Sensorik und Aktorik ausgeprägt ist. Bei Leistungsstufe 1 verfügt das System weder über eine Regelung[38] noch über eine Steuerung[39]. Auf Leistungsstufe 2 „Binäre Steuerung/Unstetige Regelung" werden bei einer Steuerung binäre Ausgangsgrößen und bei einer Regelung wenige diskrete Ausgangsgrößen erzeugt. Die höchste Leistungsstufe 5 „Robuste Steuerung/Regelung" beschreibt ein System, das trotz Störungen einen optimalen Wert erreicht [Iwa17, S. 101ff.]. Das Handlungselement *Steuerung/Regelung* eines Industrieroboters ist mit Leistungsstufe 2 „Binäre Steuerung/Unstetige Regelung" zu bewerten, wenn er lediglich zwei vorgegebene Endpunkte anfahren kann. Sofern der Roboter trotz Störungen (z.B. Hindernisse im Arbeitsraum) die vorgegebenen Prozesse optimal ausführt, trifft in der Regel Leistungsstufe 5 „Robuste Steuerung/Regelung" zu.

---

[37] Veröffentlichte Teilergebnisse zu den gemeinsamen Arbeiten mit IWANEK enthält [WID16]. Eine detaillierte Beschreibung von Leistungsstufen für die Intelligenz mechatronischer Systeme enthält [Iwa17, S. 101ff.].

[38] Regelung bzw. Regeln ist der *„Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße, erfasst (gemessen), mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird […]. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst" [DIN60050, S. 136].*

[39] Steuerung bzw. Steuern beschreibt den *„Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere variable Größen als Eingangsgrößen andere variable Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigenen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen […]. Kennzeichen für das Steuern ist der offene oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken." [DIN60050, S. 137].*

Tabelle 4-3: Handlungselemente und Leistungsstufen der CPS-Komponente „Informationsverarbeitung“

	Handlungs-element	Leistungsstufen 1	2	3	4	5
Informationsverarbeitung	**Steuerung/ Regelung**	**Keine Steuerung/ Regelung**	**Binäre Steuerung/un-stetige Regelung**	**Stetige Steuerung/ Regelung**	**Optimale Steuerung/ Regelung**	**Robuste Steuerung/ Regelung**
	Die Art der Informationsverarbeitung beschreibt die Kopplung zwischen Sensorik und Aktorik.	Das System verfügt nicht über eine Steuerung/ Regelung.	Es werden binäre (Steuerung) bzw. wenige diskrete (Regelung) Ausgangsgrößen erzeugt.	Auf Basis von kontinuierlichen Eingangsgrößen sowie eines Modells der Strecke werden die Stellgrößen stetig generiert.	Der Prozess kann so beeinflusst werden, dass ein optimaler Wert erreicht werden kann. Diese Aufgabe kann durch die Berücksichtigung eines best. Gütekriteriums erfolgen.	Der Prozess kann so beeinflusst werden, dass trotz Störungen ein optimaler Wert erreicht werden kann.
	Identifkation und Adaption	**Keine Identifikation**	**Identifikation und Warnung**	**Ablaufsteuerung**	**Parameter-anpassung**	**Strukturan-passung**
	Möglichkeiten zur Identifikation von Abweichungen und zur Adaption des Systems im Betrieb.	Das System ist nicht in der Lage Abweichungen im Betrieb zu identifizieren.	Das System erkennt Abweichungen im Betrieb und warnt den Benutzer.	Das System wird auf Basis der identifizierten Abweichungen im Betrieb in einen anderen ggf. sicheren Zustand überführt (Fail Safe).	Die Parameter am Regler werden angepasst oder Sollwerte werden neu definiert (Trajektorien).	Das System passt seine Struktur an, z.B. durch Hinzunahme oder Abschalten von Komponenten.
	Optimierung	**Keine Optimierung**	**Entwurfspunkt-selektion auf Basis von Zielen**	**Online-Mehrziel-optimierung**	**Vorausschauen-de Online-Mehr-zieloptimierung**	**Mehrstufiges Verlässlichkeits-konzept**
	Möglichkeiten zur Optimierung des Systemverhaltens hinsichtlich definierter Zielfunktion bzw. Gütekriterien im laufenden Betrieb.	Das System ist nicht in der Lage das Systemverhalten zu optimieren.	Die Auswahl optimaler Kompromisse erfolgt online vom Benutzer oder dem System.	Optimierungen werden auf Basis eines internen Modells im Betrieb durchgeführt. Dabei werden mehrere Ziele berücksichtigt.	Durch das interne Modell und zukünftige Prognosen werden z.B. optimale Regler-Konfigurationen bestimmt.	Durch eine Mehrzieloptimierung wird ein erweitertes Verlässlichkeitskonzept für den Betrieb des Systems entwickelt.

Das Handlungselement *Identifikation und Adaption* ist der mittleren OCM-Schicht „Reflektorischer Operator“ zuzuordnen. Es beschreibt, inwieweit ein System in der Lage ist, Abweichungen im Betrieb zu identifizieren und auf Basis dieser Erkenntnisse eine Adaption des Systems zu veranlassen. Wenn ein System nicht in der Lage ist, Abweichungen im Betrieb zu identifizieren, erfolgt eine Einstufung in die Leistungsstufe 1 „Keine Identifikation“. Mit steigenden Leistungsstufen nehmen die Fähigkeiten des Systems zu, Abweichungen zu erkennen (Leistungsstufe 2 „Identifikation und Warnung“, z.B. Fehlermeldung bei Störungen), das System auf Basis identifizierter Abweichungen in einen sicheren Zustand zu überführen (Leistungsstufe 3 „Ablaufsteuerung“, z.B. Fail Safe), Parameter anzupassen (Leistungsstufe 4 „Parameteranpassung“, z.B. Drehzahlanpassung) oder sogar die Struktur des Systems zu verändern (Leistungsstufe 5 „Strukturanpassung“, z.B. Abschalten von Komponenten) [Iwa17, S. 106ff.], [Föl13, S. 15], [KSR+09, S. 105ff.]. Die oberste OCM-Schicht „Kognitiver Operator“ wird durch das Handlungselement *Optimierung* abgebildet. Dieses beschreibt die Möglichkeiten des Systems, sein

Verhalten hinsichtlich definierter Zielfunktionen bzw. Gütekriterien[40] im laufenden Betrieb zu optimieren. Eine beispielhafte Leistungsstufe dieses Handlungselements ist Leistungsstufe 2 „Online-Mehrzieloptimierung“, bei der Optimierungen auf Basis eines internen Modells im Betrieb durchgeführt werden. Bei der höchsten Leistungsstufe 5 „Mehrstufiges Verlässlichkeitskonzept“ wird auf Basis einer Mehrzieloptimierung ein erweitertes Verlässlichkeitskonzept für den Betrieb entwickelt [Iwa17, S. 110ff.], [Son14].

Handlungselemente und Leistungsstufen – Kommunikationssystem: Zur Bestimmung der Eigenschaften des Kommunikationssystems werden die fünf Handlungselemente *Vertikale Integration*, *Horizontale Integration*, *Konnektivität*; *Netzwerkverbindung* und *Security* unterschieden. Eine Übersicht der gesamten Leistungsstufen je Handlungselement des Kommunikationssystems enthält Tabelle 4-4. Das Handlungselement *Vertikale Integration* adressiert die Vernetzung des Systems mit den IT-Systemen auf den unterschiedlichen Hierarchieebenen des Unternehmens (z.B. Vernetzung mit der Steuerungs- oder der Unternehmensplanungsebene) [KWH13, S. 24], [HN09, S. 140]. Systeme, die nicht mit den IT-Systemen anderer Hierarchieebenen des Unternehmens verknüpft sind, werden der Leistungsstufe 1 „Keine vertikale Integration“ zugeordnet. Mit steigenden Leistungsstufen nimmt die vertikale Integration zu. Auf Leistungsstufe 2 „Rudimentäre vertikale Integration“ existiert z.B. eine Vernetzung mit IT-Systemen der über- oder untergeordneten Hierarchieebene des Unternehmens. Ein Beispiel dafür ist der Anschluss an ein MES-System. Bei der höchsten Leistungsstufe 5 „Durchgängige vertikale Integration“ ist das System direkt oder indirekt mit allen Hierarchieebenen des Unternehmens gekoppelt.

Das Handlungselement *Horizontale Integration* beschreibt die Vernetzung des Systems mit den IT-Systemen entlang der inner- wie überbetrieblichen Wertschöpfungskette [KWH13, S. 24], [HN09, S. 140]. Ein Beispiel dafür ist die Vernetzung einer Maschine mit der Servicezentrale des Herstellers. Die maximal mögliche Ausprägung des Handlungselements beschreibt Leistungsstufe 5 „Durchgängige horizontale Integration“, bei der alle relevanten Systeme entlang der Wertschöpfungskette sowohl im Unternehmen (z.B. Transportsysteme der Intralogistik) als auch unternehmensübergreifend (z.B. Speditionen) miteinander vernetzt sind. Mögliche Abstufungen sind u.a. die Vernetzung mit vor- und nachgelagerten Systemen innerhalb des Unternehmens (Leistungsstufe 2 „Rudimentäre horizontale Integration“) oder die Verknüpfung mit mehreren, aber nicht allen relevanten innerbetrieblichen Systemen (Leistungsstufe 3 „Partielle horizontale Integration“).

---

[40] Gütekriterium bzw. Gütemaß oder Güte-Index ist eine *„…Maßzahl für die Qualität des Systemverhaltens“ [Föl13, S. 13].*

Tabelle 4-4: Handlungselemente und Leistungsstufen der CPS-Komponente „Kommunikationssystem“

	Handlungs-element	Leistungsstufen 1	2	3	4	5
Kommunikationssystem	**Vertikale Integration**	**Keine vertikale Integration**	**Rudimentäre vertikale Integration**	**Partielle vertikale Integration**	**Umfangreiche vertikale Integration**	**Durchgängige vertikale Integration**
	Vernetzung des Systems mit den IT-Systemen der unterschiedlichen Hierarchieebenen eines Unternehmens.	Keine Vernetzung mit den Hierarchieebenen des Unternehmens.	Vernetzung mit über- oder untergeordneten Hierarchieebenen eines Unternehmens.	Vernetzung mit eng verknüpften Hierarchieebenen eines Unternehmens.	Vernetzung mit den meisten Hierarchieebenen eines Unternehmens.	Durchgängige Vernetzung über alle Hierarchieebenen eines Unternehmens hinweg.
	Horizontale Integration	**Keine horizontale Integration**	**Rudimentäre horizontale Integration**	**Partielle horizontale Integration**	**Umfangreiche horizontale Integration**	**Durchgängige horizontale Integration**
	Vernetzung des Systems mit den IT-Systemen entlang der inner- wie überbetrieblichen Wertschöpfungskette.	Keine Vernetzung mit Systemen entlang der Wertschöpfungskette.	Vernetzung mit unmittelbar vor- und nachgelagerten Systemen innerhalb der innerbetrieblichen Wertschöpfungskette.	Vernetzung mit mehreren Systemen entlang der innerbetrieblichen Wertschöpfungskette.	Umfangreiche Vernetzung mit relevanten Systemen der innerbetrieblichen und partielle Vernetzung mit Systemen der überbetrieblichen Wertschöpfungskette.	Vollständige Vernetzung mit relevanten Systemen entlang der inner- und überbetrieblichen Wertschöpfungskette.
	Konnektivität	**Keine Schnittstellen**	**Senden und Empfangen von I/O-Signalen**	**Konnektivität über Feldbus-Schnittstellen**	**Konnektivität über Industrial Ethernet-Schnittstellen**	**Drahtlose Kommunikation**
	Fähigkeit des Systems mit anderen Systemen eine Verbindung herzustellen.	Das System verfügt über keine Schnittstellen zum Informationsaustausch.	Das System verfügt über Schnittstellen für einfache Ein- und Ausgabeinformationen.	Das System verfügt über Feldbus-Schnittstellen.	Das System verfügt über Industrial Ethernet-Schnittstellen.	Das System ist in der Lage drahtlos Informationen auszutauschen.
	Netzwerkverbindung	**Keine Netzwerkverbindung**	**Punkt-zu-Punkt-Verbindung**	**Einbindung in lokale Netzwerke**	**Einbindung in globale Netzwerke**	**Zugang zum Internet**
	Einbindung des Systems in lokale und globale Netzwerke.	Das System ist in keine Netzwerke eingebunden.	Das System ist direkt mit einem Netzwerkknoten verbunden.	Das System ist in ein lokales, abgeschlossenes Netzwerk eingebunden.	Das System ist in ein abgeschlossenes Netzwerk mit global verteilten Teilnehmern eingebunden.	Das System verfügt über einen Zugang zum Internet.
	Security	**Unverschlüsselte Kommunikation**	**Authentifizierte/ Autorisierte Verbindungen**	**Sichere Interfaces**	**Verschlüsselte Kommunikation**	**Modernste Kommunikationsstandards**
	Technische Absicherung der Kommunikation gegen absichtlich herbeigeführte oder ungewollte Fehler.	Kommunikation ist unautorisiert und wird im Klartext innerhalb des Netzwerks übertragen.	Kommunikation wird ausschließlich über vertrauensvolle und berechtigte Verbindungen hergestellt.	Stark gesicherte Interfaces verhindern den Systemzugang durch Dritte.	Verschlüsselte Kommunikation und Datensicherung verhindern Informationseinsicht für Unbefugte.	Nutzung neuester Kommunikationsstandards verhindert den Zugriff über bekannte und behobene Schwachstellen.

Das dritte Handlungselement *Konnektivität* beschreibt die Fähigkeit des Systems, mit anderen Systemen eine Verbindung herzustellen [Dud16-ol]. Die hierfür definierten Leistungsstufen decken einen Fähigkeitsbereich ab, der von keiner Informationsaustauschmöglichkeit (Leistungsstufe 1 „Keine Schnittstellen“), über Schnittstellen für einfache

Ein- und Ausgabeinformationen (Leistungsstufe 2 „Senden und Empfangen von I/O-Signalen“), Feldbus[41]-Schnittstellen (Leistungsstufe 3 „Konnektivität über Feldbus-Schnittstellen“), Industrial Ethernet-Schnittstellen (Leistungsstufe 4 „Konnektivität über Industrial Ethernet-Schnittstellen“), bis hin zum drahtlosen Informationsaustausch reicht (Leistungsstufe 5 „Drahtlose Kommunikation“, z.B. Wireless Local Area Network). Mit dem Handlungselement *Netzwerkverbindung* wird die Einbindung des Systems in lokale und globale Netzwerke untersucht. Ist das System beispielsweise direkt mit nur einem Netzwerkknoten verbunden, so erfolgt eine Einordnung in die Leistungsstufe 2 „Punkt-zu-Punkt-Verbindung“. Bei Leistungsstufe 3 „Einbindung in lokale Netzwerke“ besteht bereits eine Verknüpfung mit einem lokalen, abgeschlossenen Netzwerk (z.B. Intranet). Die höchste Leistungsstufe wird erreicht, wenn das System mit dem Internet verbunden ist (Leistungsstufe 5 „Zugang zum Internet“). Die technische Absicherung der Kommunikation gegenüber absichtlich herbeigeführten oder ungewollten Fehlern adressiert das Handlungselement *Security* [BSI13, S. 12]. Kommuniziert das System z.B. unverschlüsselt und im Klartext innerhalb des Netzwerks (Leistungsstufe 1 „Unverschlüsselte Kommunikation“) besteht u.a. die Gefahr, dass Dritte die ausgetauschten Informationen mitlesen und manipulieren können [BSI13, S. 34]. Mit steigenden Leistungsstufen dieses Handlungselements nimmt die Fähigkeit des Systems zu, sich gegenüber unautorisiertem Zugang Dritter zu schützen. Bei der höchsten Leistungsstufe 5 „Modernste Kommunikationsstandards“ werden die neuesten Schutzmaßnahmen ergriffen, um den ungewollten Zugang über bekannte Schwachstellen in der Kommunikation zu verhindern.

Handlungselemente und Leistungsstufen – HMI: Zur Einordnung der Leistungsfähigkeit des HMI dienen die Handlungselemente *Funktionalität des HMI*, *Ort des HMI* und *Multimodalität*. Die *Funktionalität des HMI* beschreibt den Funktionsumfang der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Sofern das HMI zur einfachen Ein- und Ausgabe von Parametern dient, ist das System der Leistungsstufe 2 „Ein- und Ausgabe von Parametern“ zuzuordnen. Die maximale Funktionalität beschreibt Leistungsstufe 5 „Automatische Anpassung an den Bediener“, bei der sich das HMI automatisch an die Bedürfnisse des Bedieners anpasst, z.B. hinsichtlich der angezeigten Informationen auf der Bedienoberfläche. Das Handlungselement *Ort des HMI* gibt an, wo sich das HMI befindet und wie es mit dem System verbunden ist. Leistungsstufe 1 „Integriertes HMI“ charakterisiert Systeme, deren HMI fest an der Maschine verbaut ist (z.B. Touchscreen). Sobald die Bedienung des Systems drahtlos – aber lokal begrenzt – möglich ist, wird dies durch Leistungsstufe 3 „Drahtloses HMI“ beschrieben (z.B. Infrarot-Fernbedienung). Bei Leistungsstufe 5 „Geräteunabhängiges HMI“ kann das System ortsungebunden und über verschiedene Endgeräte bedient werden. Ein Beispiel dafür ist die Bedienung per Tablet-PC über das Internet. Betrachtungsgegenstand des Handlungselements *Multimodalität* ist der

[41] Feldbus ist ein *„…auf serieller Datenübertragung beruhendes Kommunikationssystem, wie es üblicherweise in industriellen Automatisierungssystemen und Prozessleitanwendungen verwendet wird“* [DIN61158, S. 9].

Einsatz verschiedener Modalitäten bei der Bedienung. Wenn Ein- und Ausgaben am System lediglich mit einer festgelegten Sinnesmodalität (z.B. Berührung) ausgeführt werden können, wird dies durch Leistungsstufe 1 „Spezialisierter Gebrauch einzelner Modalitäten“ beschrieben. Bei Leistungsstufe 3 „Paralleler Gebrauch einzelner Modalitäten“ erfolgt der Informationsaustausch zwischen Mensch und Maschine parallel mit je einer Wahrnehmungs- und Aktionsmodalität (z.B. Sprachein- und -ausgabe). Die höchste Leistungsstufe 5 „Flexible multimodale Bedienung“ beschreibt ein System, das über mehrere frei wählbare Modalitäten bedient werden kann (z.B. Sprach- und Gestensteuerung) [SR10, S. 3]. Tabelle 4-5 zeigt die Handlungselemente und Leistungsstufen der CPS-Komponente HMI.

Tabelle 4-5: Handlungselemente und Leistungsstufen der CPS-Komponente „HMI“

	Handlungs-element	Leistungsstufen 1	2	3	4	5
Human-Machine-Interface	**Funktionalität des HMI**	**Kein HMI**	**Ein- und Ausgabe von Parametern**	**Vorgegebene Nutzerprofile**	**Individuelle Nutzerprofile**	**Automatische Anpassung an den Bediener**
	Funktionsumfang der Mensch-Maschine-Schnittstelle.	Das System verfügt über kein HMI.	Das HMI dient zur einfachen Ein- und Ausgabe von Parametern.	Das HMI kann mittels vorgegebener Nutzerprofile an den Benutzer eingeschränkt angepasst werden.	Nutzerprofile des HMI können individuell konfiguriert werden.	Das HMI passt sich automatisch an den Benutzer und seine Bedürfnisse an.
	Ort des HMI	**Integriertes HMI**	**Draht-gebundenes HMI**	**Drahtloses HMI**	**Orts-ungebundenes HMI**	**Geräteunab-hängiges HMI**
	Ort der Mensch-Maschine-Schnittstelle.	Das HMI ist fest in das System integriert.	Das HMI ist drahtgebunden mit dem System verbunden und kann eingeschränkt bewegt werden.	Das HMI ist drahtlos mit dem System verbunden und kann lokal uneingeschränkt bewegt werden.	Das System kann über das HMI ortsungebunden bedient werden.	Das System kann ortsungebunden über verschiedene Endgeräte bedient werden.
	Mulitmodalität	**Spezialisierter Gebrauch einzelner Modalitäten**	**Sequentieller Gebrauch einzelner Modalitäten**	**Paralleler Gebrauch einzelner Modalitäten**	**Feste multimodale Bedienung**	**Flexible multimodale Bedienung**
	Einsatz verschiedener Modalitäten in komplementärer oder paralleler Verarbeitungsweise.	Eine bestimmte Ein- und Ausgabe kann immer nur mit einer spezifischen Modalität erledigt werden.	Ein- und Ausgabe von Informationen erfolgen sequentiell und mit je einer wählbaren Wahrnehmungs- und Aktionsmodalität.	Ein- und Ausgabe von Informationen erfolgen parallel, mit je einer wählbaren Wahrnehmungs- und Aktionsmodalität.	Das System kann über mehrere, fest vorgegebene Modalitäten bedient werden.	Das System kann über mehrere, frei wählbare Modalitäten bedient werden. Simultane Eingaben mit verschiedenen Modalitäten bestätigen sich gegenseitig.

Handlungselemente und Leistungsstufen – Daten: Die Handlungselemente der CPS-Komponente Daten sind *Datenspeicherung*, *Datenanalyse* sowie *Nutzung externer Daten*. Die gesamten Leistungsstufen der CPS-Komponente Daten enthält Tabelle 4-6.

Tabelle 4-6: Handlungselemente und Leistungsstufen der CPS-Komponente „Daten“

	Handlungs-element	Leistungsstufen 1	2	3	4	5
Daten	**Daten-speicherung**	**Keine Daten-speicherung**	**Partielle Daten-speicherung**	**Umfangreiche Daten-speicherung**	**Durchgehende Daten-speicherung**	**Flexible Daten-speicherung**
	Möglichkeiten zur Speicherung von Daten.	Das System ist nicht in der Lage Daten zu speichern.	Das System speichert ausgewählte Daten.	Das System speichert die Mehrheit anfallender Daten.	Das System speichert alle Daten.	Das System speichert die Daten flexibel in Abhängigkeit von der Situation.
	Datenanalyse	**Keine Datenanalyse**	**Einfache Visualisierung**	**Zustandserkennung**	**Fehlerdiagnose und -vorhersage**	**Kontrolle und Lernfähigkeit**
	Analyse der generierten und verarbeiteten Daten.	Generierte Daten werden zu keinerlei Optimierungs- oder Geschäftszwecken analysiert.	Generierte Daten werden rudimentär visualisiert.	Automatische Zustandserkennung auf Basis von Regeln (Expertenwissen).	Ableitung der wahrscheinlichsten Fehlerursachen und Fehlervorhersage auf Basis von Trends in Daten.	Autonomes Nachführen von Modellen und Grenzwerten.
	Nutzung externer Daten	**Keine Nutzung externer Daten**	**Partielle Nutzung externer Daten**	**Umfassende Nutzung externer Daten**	**Veränderung externer Daten**	**Situationsspezifische Nutzung externer Daten**
	Nutzung externer Daten, die nicht unmittelbar durch das System erzeugt werden.	Das System nutzt keine externen Daten anderer Systeme.	Das System nutzt vorgegebene Daten einzelner Systeme (lesen).	Das System nutzt vorgegebene Daten mehrerer Systeme (lesen).	Das System ist in der Lage externe Daten zu verändern (lesen und schreiben).	Das System greift situationsspezifisch auf externe Daten zu (lesen und schreiben).

Durch das Handlungselement *Datenspeicherung* wird das System hinsichtlich seiner Möglichkeiten zur Speicherung von Daten charakterisiert. Der Ort der Datenspeicherung (lokal oder global) wird dabei vernachlässigt. Systeme, die nicht in der Lage sind, Daten zu speichern, sind der Leistungsstufe 1 „Keine Datenspeicherung“ zuzuordnen. Die Speicherung einiger ausgewählter Daten wird durch Leistungsstufe 2 „Partielle Datenspeicherung“ beschrieben. Wenn alle erzeugten Daten gespeichert werden, befindet sich das System auf der Leistungsstufe 4 „Durchgehende Datenspeicherung“. Die Steigerung davon ist die „Flexible Datenspeicherung“ (Leistungsstufe 5), bei der die Daten situationsabhängig gespeichert werden. Das Handlungselement *Datenanalyse* dient zur Beschreibung der Fähigkeit, die gespeicherten Daten zu analysieren. „Keine Datenanalyse“ (Leistungsstufe 1) bedeutet, dass die generierten Daten zu keinerlei Optimierungs- oder Geschäftszwecken genutzt werden. Bei Leistungsstufe 2 „Einfache Visualisierung“ werden die aufgezeichneten Daten rudimentär visualisiert. Ist das System in der Lage, den eigenen Zustand auf Basis von Regeln zu erkennen, so ist es in die Leistungsstufe 3 „Zustandserkennung“ einzuordnen. Bei Leistungsstufe 4 „Fehlerdiagnose und -vorhersage" können auf Basis von Trends in Daten Fehler vorhergesagt und deren wahrscheinlichste Ursachen abgeleitet werden. Bei der höchsten Leistungsstufe 5 „Kontrolle und Lernfähigkeit“ werden Modelle und Grenzwerte durch das System eigenständig nachgeführt. Das Handlungselement *Nutzung externer Daten* adressiert die Verwendung von Daten, die nicht unmittelbar durch das System erzeugt werden. Beispiele für externe Daten sind Maschinendaten vernetzter Systeme oder Planungsdaten aus dem MES-System. Sofern externe Daten einzelner Systeme gelesen werden, ist das System in die Leistungsstufe 2 „Partielle Nutzung externer Daten“ einzuordnen. Leistungsstufe 4 „Veränderung externer Daten“

wird erreicht, wenn das System externe Daten nicht nur lesen, sondern auch verändern kann. Die höchste Leistungsstufe 5 „Situationsspezifische Nutzung externer Daten“ liegt vor, wenn das System in Abhängigkeit von der Situation auf externe Daten zugreift.

Handlungselemente und Leistungsstufen – Dienste: Die Handlungselemente *Diensteapplikation* sowie *Digitaler Kundenzugang* charakterisieren die CPS-Komponente Dienste. Tabelle 4-7 beinhaltet alle Leistungsstufen je Handlungselement dieser CPS-Komponente.

Tabelle 4-7: Handlungselemente und Leistungsstufen der CPS-Komponente „Dienste“

	Handlungs-element	Leistungsstufen 1	2	3	4	5
Dienste	**Dienste-applikation**	**Keine Dienste**	**Nutzung von Diensten**	**Nutzung und Bereitstellung von Diensten**	**Selbstständige Ausführung von Diensten**	**Situationsspezi-fische Dienste-komposition**
	Grad der Nutzung und Bereitstellung von Diensten durch das System.	Das System nutzt keine Dienste und stellt keine Dienste bereit.	Das System nutzt vorgegebene Dienste.	Das System nutzt vorgegebene Dienste und stellt eigene Dienste bereit.	Das System führt vorgegebene Dienste selbst-ständig aus.	Das System stellt Dienste situa-tionsspezifisch zusammen und führt diese selbst-ständig aus.
	Digitaler Kundenzugang	**Kein digitaler Kundenzugang**	**Erfassung von historischen Nutzungsdaten**	**Analyse von Nutzungsdaten**	**Erfassung und Analyse von Nutzungs-daten in Echtzeit**	**Interaktion mit dem Kunden über das System**
	Automatische Adressierung und Interaktion mit dem Kunden über digitale Wege.	Es besteht kein digitaler Kunden-zugang nachdem das System an den Kunden über-geben wurde.	Nutzungsdaten des Kunden werden erfasst und zeitversetzt übermittelt. Eine Interaktion mit dem Kunden findet nicht statt.	Historische Nutz-ungsdaten des Kunden werden analysiert und ausgewertet. Eine Interaktion mit dem Kunden findet nicht statt.	Nutzungsdaten des Kunden werden in Echt-zeit erfasst, über-mittelt und ana-lysiert. Eine Inter-aktion mit dem Kunden findet nicht statt.	Es erfolgt eine digitale Interaktion mit dem Kunden über das System. Kundendaten werden erfasst, übermittelt und analysiert. Eine Reaktion auf das Nutzungsverhal-ten des Kunden ist möglich.

Durch das Handlungselement *Diensteapplikation* wird beschrieben, in welchem Maße Dienste genutzt oder vom System angeboten werden. Die Nutzung vorgegebener Dienste (z.B. Ausfallprognosen vernetzter Systeme) durch das System beschreibt Leistungsstufe 2 „Nutzung von Diensten“. Wenn das System neben der Nutzung auch eigene Dienste bereitstellt (z.B. eigenständige Bestellung von Ersatzteilen), ist das System der Leistungsstufe 3 „Nutzung und Bereitstellung von Diensten“ zuzuordnen. Bei Leistungsstufe 5 „Situationsspezifische Dienstekomposition“ stellt das System die notwendigen Dienste situationsabhängig und eigenständig zusammen [GB12, S. 62]. Die Möglichkeit unmittelbar mit dem Kunden bzw. Nutzer über das System zu kommunizieren (z.B. über das HMI), adressiert das Handlungselement *Digitaler Kundenzugang* [BLO+15, S. 19]. Leistungsstufe 1 „Kein digitaler Kundenzugang“ charakterisiert ein System, bei dem kein digitaler Kundenzugang besteht, nachdem das System an den Kunden übergeben wurde. Bei Leistungsstufe 2 „Erfassung von historischen Nutzungsdaten“ werden Nutzungsdaten gesammelt und zeitversetzt an den Hersteller übermittelt. Eine direkte Kommunikation mit dem

Kunden erfolgt dabei jedoch nicht. Der Leistungsstufe 4 ist das System zuzuordnen, sofern die „Erfassung und Analyse von Nutzungsdaten in Echtzeit“ erfolgt. Eine unmittelbare „Interaktion mit dem Kunden über das System“ beschreibt Leistungsstufe 5. Ein Beispiel dafür ist der Bestellvorschlag von Ersatzteilen aufgrund prognostiziertem Komponentenausfall, der dem Kunden unmittelbar am System angezeigt wird.

Die Bewertung des Systems durch Einordnung der einzelnen CPS-Komponenten in die Leistungsstufen je Handlungselement ist in einem interdisziplinären Team durchzuführen. Wesentliche Informationsgrundlage ist die ausgefüllte CPS-Canvas aus der Systemanalyse. Ergänzende Informationen können z.B. Datenblätter der Komponenten sein, die eine Einstufung einer Komponente aufgrund konkreter Leistungsmerkmale erleichtern. Bei der Bewertung unterstützt zusätzlich eine Konsistenzmatrix, die ein plausibles Ergebnis der Einstufung überprüft. Die Konsistenzmatrix wird nachfolgend beschrieben.

Konsistenzmatrix

Zur Plausibilitätssicherung der Bewertung wird die Konsistenz von Leistungsstufen verschiedener Handlungselemente mit Hilfe einer Konsistenzmatrix paarweise bewertet [GP14, S. 62]. Dabei steht die Frage im Vordergrund: „Kann die Leistungsstufe i (Zeile) gemeinsam mit der Leistungsstufe j (Spalte) auftreten?“. Diese Frage wird binär entweder mit „0 = Leistungsstufen können **nicht** gemeinsam auftreten“ oder „1 = Leistungsstufen können gemeinsam auftreten“ beantwortet. Beispielsweise kann das Handlungsfeld *Informationsquelle* nicht der Leistungsstufe 3 „Vielfältige Informationsquellen“ zugeordnet werden, wenn im Handlungsfeld *Messsignale* die Leistungsstufe 1 „Keine Signale“ vorliegt. Da es sich um einen paarweisen Vergleich handelt, wird nur eine Richtung bewertet. Die zweite Richtung ergibt sich automatisch aus der Invertierung der ersten Bewertung [GP14, S. 53]. Mit der Konsistenzmatrix werden zueinander inkonsistente Leistungsstufen ausgeschlossen. Einen Ausschnitt der Konsistenzmatrix zeigt Bild 4-5.

Ergeben sich durch den Abgleich der initialen Bewertung der CPS-Komponenten mit der Konsistenzmatrix zueinander inkonsistente Leistungsstufen, ist die Bewertung zu überprüfen. Nach der Behebung der eventuellen Inkonsistenz steht nun ein plausibles Ergebnis über die aktuelle Leistungsfähigkeit der einzelnen Komponenten des zu betrachtenden Systems fest. Dieses Ergebnis lässt jedoch noch keine Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu. Damit auch Aussagen über das Gesamtsystem getroffen werden können, werden im Folgenden Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene definiert.

Konsistenzmatrix **Fragestellung:** **„Kann die Leistungsstufe i (Zeile) gemeinsam mit der Leistungsstufe j (Spalte) auftreten?“** Bewertungsskala: 0 = Leistungsstufen können nicht gemeinsam auftreten 1 = Leistungsstufen können gemeinsam auftreten			**Leistungsstufen**	Keine Signale	Binäre Signale	Grenzwerte	Diskrete Signale	Kontinuierliche Signale	
CPS-Komponenten	**Handlungs-elemente**	**Leistungsstufen**	**Nr.**	**SE 11**	**SE 12**	**SE 13**	**SE 14**	**SE 15**	
Sensorik	**Messsignale**	Keine Signale	SE11						
		Binäre Signale	SE12						
		Grenzwerte	SE13						
		Diskrete Signale	SE14						
		Kontinuierliche Signale	SE15						
	Informations-quelle	Keine Informationsquellen	SE21	1	0	0	0	0	
		Punktuelle Informationsquellen	SE22	0	1	1	1	1	
		Vielfältige Informationsquellen	SE23	0	1	1	1	1	
		Umfassende Informationsquellen	SE24	0	1	1	1	1	
		Virtuelle Informationsquellen	SE25	0	1	1	1	1	
Informations-verarbeitung	**Steuerung/ Regelung**	Keine Steuerung/Regelung	IV11	1	1	1	1	1	
		Binäre Steuerung/Unstet. Regelung	IV12	1	1	1	1	1	
		Stetige Steuerung/Regelung	IV13	1	1	1	1	1	
		Optimale Steuerung/Regelung	IV14	1	1	1	1	1	
		Robuste Steuerung/Regelung	IV15	1	1	1	1	1	

Bild 4-5: Konsistenzmatrix, paarweise Bewertung der Konsistenz von Leistungsstufen auf Komponentenebene (Auszug)

Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene

Die Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene beschreiben fünf aufeinander aufbauende Leistungsstufen für die Leistungsfähigkeit eines gesamten Cyber-Physical Systems. Auch hier gilt: je höher die Leistungsstufe, desto höher entwickelt ist das Gesamtsystem. Die Stufen werden dazu so gewählt, dass sie den Leistungsstand vieler heutiger Systeme abdecken und davon ausgehend mögliche Stufen zur vollen Leistungsfähigkeit von CPS aufzeigen. So wird deutlich, welche potentielle Leistungsfähigkeit CPS haben und welchen Nutzen solche Systeme bereits auf den jeweiligen Leistungsstufen entfalten können.

Für jede der Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene existiert eine mögliche Minimalausprägung der Leistungsstufen auf Komponentenebene. Die Dokumentation der Minimalausprägungen für die Gesamtsystemleistungsstufen enthalten Steckbriefe in den Bildern A-6 bis A-10 im Anhang. Das zu betrachtende System wird automatisch einer Gesamtsystemleistungsstufe zugeordnet, wenn es je Komponente und Handlungselement mindestens die dort vorgegebene Minimalleistungsstufe erreicht. Die fünf Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene (siehe Bild 4-6) werden nachfolgend erläutert.

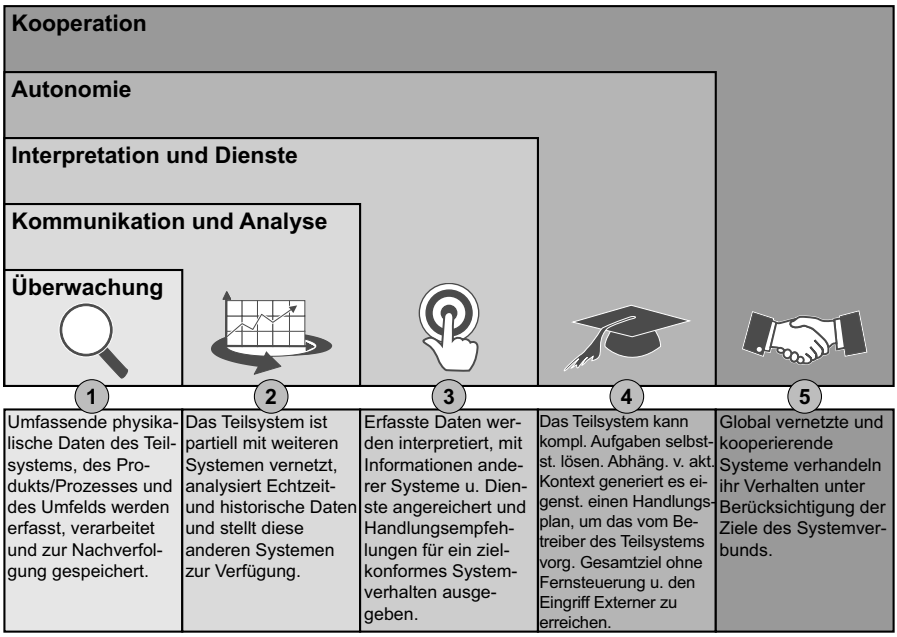


Bild 4-6: Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene

Überwachung: Die Leistungsstufe „Überwachung“ beschreibt Systeme, die in der Lage sind, umfassende physikalische Größen des Teilsystems, des Produkts bzw. des Prozesses und des Umfelds zu erfassen, zu verarbeiten und zur Nachverfolgung zu speichern. Physikalische Prozesse werden konstant und mit geringer Toleranz beeinflusst. Die erfassten Informationsparameter sämtlicher messbarer physikalischer Größen (Teilsystem, Produkt/Prozess, Umfeld) nehmen endlich viele Werte innerhalb des Wertebereichs an. Die Steuerung/Regelung erzeugt mindestens binäre bzw. wenige diskrete Ausgangsgrößen. Möglichkeiten zur Identifikation von Abweichungen und zur Optimierung des Systemverhaltens im Betrieb bestehen nicht. Das Teilsystem verfügt nicht über Schnittstellen zum Informationsaustausch und ist somit weder mit den IT-Systemen der unterschiedlichen Hierarchieebenen des Unternehmens, noch mit Systemen entlang der Wertschöpfungskette vernetzt. Die Interaktion mit dem Benutzer beschränkt sich auf die Ein- und Ausgabe von Parametern über ein integriertes HMI und eine einzelne Modalität. Die Mehrheit erfasster Daten wird gespeichert, jedoch nicht analysiert. Externe Daten sowie Dienste werden nicht genutzt. Ferner besteht kein digitaler Kundenzugang. Bild A-6 im Anhang zeigt den Steckbrief für die Stufe „Überwachung“.

Kommunikation und Analyse: Bei dieser Leistungsstufe ist das Teilsystem partiell mit weiteren Systemen vernetzt, analysiert Echtzeit- und historische Daten und stellt diese anderen Systemen zur Verfügung. Die Beeinflussung physikalischer Prozesse erfolgt mit hoher Positioniergenauigkeit und kann durch fest vorgegebene Stellgrößen variiert werden. Die erfassten Informationsparameter sämtlicher messbarer physikalischer Größen

(Teilsystem, Produkt/Prozess, Umfeld) können theoretisch beliebig viele Werte innerhalb des Wertebereichs annehmen. Die Steuerung/Regelung erzeugt stetig Stellgrößen. Abweichungen im Betrieb werden erkannt und der Benutzer darüber informiert. Eine Optimierung des Systemverhaltens im Betrieb ist jedoch nicht möglich. Über Feldbus-Verbindungen und Einbindung in lokale Netzwerke ist das Teilsystem mit eng verknüpften Hierarchieebenen des Unternehmens sowie mit mehreren Systemen entlang der innerbetrieblichen Wertschöpfungskette vernetzt. Dabei sind die Verbindungen authentifiziert. Die Ein- und Ausgabe von Informationen in vorgegebenen Nutzerprofilen erfolgt mittels drahtgebundenem HMI und wählbaren Modalitäten. Daten werden umfassend gespeichert, jedoch nicht analysiert. Externe Daten einzelner Systeme werden lesend genutzt. Dienste werden nicht eingebunden. Ferner besteht kein digitaler Kundenzugang. Den Steckbrief für diese Leistungsstufe enthält Bild A-7 im Anhang.

Interpretation und Dienste: Systeme dieser Leistungsstufe interpretieren erfasste Daten, reichern diese mit Informationen und Diensten vernetzter Systeme an und geben Handlungsempfehlungen für ein zielkonformes Systemverhalten aus. Die Beeinflussung physikalischer Prozesse erfolgt mit hoher Positioniergenauigkeit und kann durch fest vorgegebene Stellgrößen variiert werden. Die erfassten Informationsparameter sämtlicher messbarer sowie nicht direkt messbarer physikalischer Größen (Teilsystem, Produkt/Prozess, Umfeld) können theoretisch beliebig viele Werte innerhalb des Wertebereichs annehmen. Die Steuerung/Regelung beeinflusst den Prozess so, dass ein optimaler Wert erreicht werden kann. Auf Basis identifizierter Abweichungen im Betrieb kann das Teilsystem in einen anderen Zustand überführt werden. Zur Optimierung des Systemverhaltens werden optimale Kompromisse online vom Benutzer oder vom System gewählt. Über Feldbus-Verbindungen und Einbindung in lokale Netzwerke ist das Teilsystem mit eng verknüpften Hierarchieebenen des Unternehmens sowie mit mehreren Systemen entlang der innerbetrieblichen Wertschöpfungskette vernetzt. Dabei werden sichere Interfaces eingesetzt. Die Ein- und Ausgabe von Informationen in vorgegebenen Nutzerprofilen erfolgt mittels drahtgebundenem HMI und mehreren wählbaren Modalitäten. Daten werden umfassend gespeichert und der Zustand auf Basis von Regeln automatisch erkannt. Externe Daten mehrerer Systeme sowie deren Dienste werden lesend genutzt. Über einen digitalen Kundenzugang können historische Nutzungsdaten analysiert und ausgewertet werden. Eine mögliche Minimalausprägung der Leistungsstufen auf Komponentenebene für diese Stufe enthält der Steckbrief in Bild A-8 im Anhang.

Autonomie: Das Teilsystem kann komplexe Aufgaben selbstständig lösen. Abhängig vom aktuellen Kontext generiert es eigenständig einen Handlungsplan, um das vom Betreiber des Teilsystems vorgegebene Gesamtziel ohne Fernsteuerung und den Eingriff Externer zu erreichen [WK15, S. 2ff.]. Die Beeinflussung physikalischer Prozesse erfolgt robust mit hoher Positioniergenauigkeit und kann durch variable Stellgrößen verändert werden. Die erfassten Informationsparameter sämtlicher messbarer sowie nicht direkt messbarer physikalischer Größen (Teilsystem, Produkt/Prozess, Umfeld) können theore-

tisch beliebig viele Werte innerhalb des Wertebereichs annehmen. Die Steuerung/Regelung beeinflusst den Prozess so, dass trotz Störungen ein optimaler Wert erreicht werden kann. Bei Abweichungen im Betrieb passt das Teilsystem seine Struktur an. Optimierungen werden unter Berücksichtigung mehrerer Ziele im Betrieb durchgeführt. Das Teilsystem verfügt über Industrial Ethernet-Verbindungen und hat einen Zugang zum Internet. Es ist mit den meisten Hierarchieebenen des Unternehmens sowie mit den relevanten Systemen entlang der innerbetrieblichen und mit einigen Systemen der überbetrieblichen Wertschöpfungskette vernetzt. Dabei erfolgt die Kommunikation verschlüsselt. Die Ein- und Ausgabe von Informationen in individuellen Nutzerprofilen erfolgt mittels ortsungebundenem HMI und mehreren parallel einsetzbaren Modalitäten. Daten werden durchgehend gespeichert und mögliche Fehler auf Basis von Trends vorhergesagt. Externe Daten mehrerer Systeme werden genutzt (lesen und schreiben). Zudem nutzt das Teilsystem vorgegebene Dienste und stellt eigene bereit. Über einen digitalen Kundenzugang können historische und Echtzeit-Nutzungsdaten analysiert und ausgewertet werden. Bild A-9 im Anhang zeigt den Steckbrief der Stufe „Autonomie“.

Kooperation: Diese Leistungsstufe charakterisiert global vernetzte und kooperierende Systeme, die ihr Verhalten unter Berücksichtigung der Ziele des Systemverbunds verhandeln. Die Beeinflussung physikalischer Prozesse erfolgt robust mit hoher Positioniergenauigkeit und kann durch variable Stellgrößen verändert werden. Die erfassten Informationsparameter sämtlicher messbarer sowie nicht direkt messbarer physikalischer Größen (Teilsystem, Produkt/Prozess, Umfeld) können theoretisch beliebig viele Werte innerhalb des Wertebereichs annehmen. Die Steuerung/Regelung beeinflusst den Prozess so, dass trotz Störungen ein optimaler Wert erreicht werden kann. Bei Abweichungen im Betrieb passt das Teilsystem seine Struktur an. Optimale Regler-Konfigurationen werden auf Basis interner Modelle und Prognosen bestimmt. Das Teilsystem verfügt über Möglichkeiten zur drahtlosen Kommunikation und hat einen Zugang zum Internet. Es ist mit den meisten Hierarchieebenen des Unternehmens sowie mit den relevanten Systemen entlang der innerbetrieblichen und mit einigen Systemen der überbetrieblichen Wertschöpfungskette vernetzt. Zur Verschlüsselung werden modernste Kommunikationsstandards eingesetzt. Die Ein- und Ausgabe von Informationen in individuellen Nutzerprofilen erfolgt mittels geräteunabhängigem HMI und mehreren vorgegebenen Modalitäten. Daten werden flexibel und situationsabhängig gespeichert. Modelle und Grenzwerte können auf Basis der analysierten Daten autonom nachgeführt werden. Externe Daten mehrerer Systeme werden in Abhängigkeit von der Situation genutzt (lesen und schreiben) und vorgegebene Dienste selbstständig ausgeführt. Der digitale Kundenzugang wird sowohl zur Analyse und Auswertung von historischen und Echtzeit-Nutzungsdaten sowie zur Kommunikation mit dem Kunden genutzt. Bild A-10 zeigt den Steckbrief dieser Stufe.

Mit der Einordnung des zu betrachtenden Systems in die Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene ist der Bereich Leistungsbewertung abgeschlossen. Zentrales Ergebnis ist eine plausible Aussage über die derzeitige Leistungsfähigkeit des Betrachtungsgegenstands auf Komponenten- und Gesamtsystemebene.

4.3.2 Zieldefinition

Die Bestimmung einer individuellen Zielposition des zu betrachtenden Systems ist Gegenstand der Zieldefinition. Die Zielposition ist an der Geschäftsstrategie des Unternehmens auszurichten (vgl. Abschnitt 2.4.2) und muss nicht zwangsläufig der maximal möglichen Leistungsstufe entsprechen. Zur Ermittlung der anzustrebenden Leistungsstufen auf Komponenten- und Gesamtsystemebene werden die beiden Phasen *Verbesserungszielauswahl* und *Zielbestimmung* durchlaufen. Beide Phasen sowie die zugehörigen Berechnungsvorschriften und Hilfsmittel werden im Folgenden beschrieben.

4.3.2.1 Verbesserungszielauswahl

Das Ziel dieser Phase ist es, Verbesserungsziele zu bestimmen, die mit einer Leistungssteigerung der Erzeugnisse erreicht werden sollen. Verbesserungsziele beschreiben konkrete Absichten, zu welchem Zweck die Leistungssteigerung des betrachteten Systems dienen soll. Diese Ziele lassen sich aus der Geschäftsstrategie ableiten, die angibt, mit welchen Marktleistungen welche Marktsegmente bearbeitet werden [GP14, S. 114]. Hier liegt die Überlegung zu Grunde, dass die Weiterentwicklung des technschen Systems, also der Sachleistung, gleichzeitig neue oder verbesserte Dienstleistungen ermöglicht und somit die gesamte Marktleistung im Sinne von Produkt-Service-Systemen verändern kann. Sollen z.B. neue Dienstleistungen in Form von Beratung des Kunden hinsichtlich der optimalen Einstellung von Maschinenparametern angeboten werden, ist u.a. das Verbesserungsziel „Prozesstransparenz erhöhen“ erstrebenswert, um den Produktionsprozess besser analysieren zu können. Das Ziel „Wartungskosten reduzieren“ trägt wiederum zur Absicht des Unternehmens bei, Instandhaltungsdienstleistungen konkurrenzfähig gegenüber Drittanbietern auch im unteren Preissegment anbieten zu können. Im Rahmen dieser Arbeit fungiert die Geschäftsstrategie als Orientierungshilfe bei der Bestimmung von Verbesserungszielen. Eine detaillierte Überprüfung der Passfähigkeit ausgewählter Verbesserungsziele zur strategischen Ausrichtung des Unternehmens steht nicht im Fokus dieser Arbeit. Um die Benennung und Auswahl der Verbesserungsziele zu erleichtern, stellt das Reifegradmodell zwei Hilfsmittel bereit. Der **Katalog der Verbesserungsziele** schlägt Verbesserungsziele vor, die in der Literatur häufig im Kontext von CPS genannt werden. Mit Hilfe der **Relevanzmatrix der Verbesserungsziele** können diese priorisiert und gewichtet werden.

Katalog der Verbesserungsziele

Der Katalog der Verbesserungsziele benennt Ziele, die durch eine Weiterentwicklung bestehender Systeme hin zu Cyber-Physical Systems potentiell erreicht werden können. Die Ziele adressieren die gesamte Marktleistung, also sowohl Sach- als auch Dienstleistungen. Konkret sind das verschiedene Aspekte wie direkte System- und Prozesseigenschaften (z.B. „Verschleiß verringern“, „Ausschuss reduzieren“), die Durchführung von

Dienstleistungen (z.B. „Dienstleistungseffizienz verbessern“, „Wartungskosten verringern“) oder das Angebot von Diensten (z.B. „Dienstebereitstellung verbessern“). Bild 4-7 zeigt einen Auszug des Katalogs, den Tabelle A-2 im Anhang vollständig abbildet.

Nr.	Verbesserungsziel	Beschreibung
1	Adaptivität steigern	Die Systeme können sich innerhalb vorgegebener Rahmenbedingungen autonom an veränderte Umfeldbedingungen anpassen [AAM+15], [GTD13].
2	Vernetzung steigern	Steigerung der Vernetzung des Teilsystems mit weiteren Systemen, sowohl horizontal als auch vertikal.
3	Kundenzugang verbessern	Lebenszyklusweite Generierung und Auswertung von Produktdaten auch während der Nutzungsphase stärkt die Kundenbindung und zeigt Optimierungspotentiale auf. Grundlage ist ein digitaler Kundenzugang [BHV14], [GB12].

Bild 4-7: Katalog der Verbesserungsziele (Auszug)

Durch konkrete Vorschläge unterstützt der Katalog die Unternehmen bei der Formulierung ihrer Verbesserungsziele. Die Anwendung des Reifegradmodells ist jedoch nicht auf die im Katalog aufgeführten Ziele beschränkt. Unternehmen können eigene Ziele benennen, die sie aus der Geschäftsstrategie ableiten. Unter Zuhilfenahme des Katalogs oder weiterer Quellen gilt es für die Unternehmen eine Reihe von Zielen zu benennen. Die konkrete Anzahl wird hierbei nicht vorgegeben, jedoch erschwert eine hohe Anzahl (größer als zehn Verbesserungsziele) eine Fokussierung der Systemverbesserung. Nach der Formulierung der Ziele werden diese gewichtet. Dazu dient die Relevanzmatrix der Verbesserungsziele, die nachfolgend vorgestellt wird.

Relevanzmatrix der Verbesserungsziele

Die Priorisierung der Verbesserungsziele erfolgt mit Hilfe eines paarweisen Vergleichs in einer Relevanzmatrix (siehe Bild 4-8) . Hierbei steht die Beantwortung der Frage im Vordergrund: „Ist das Verbesserungsziel i in der Zeile wichtiger als das Verbesserungsziel j in der Spalte?“ Zur Beantwortung der Frage wird eine binäre Bewertung vorgenommen („0 = i ist **un**wichtiger als j“ oder „1 = i ist wichtiger als j“). Wie bei der Konsistenzmatrix in der Phase der Systembewertung (vgl. Abschnitt 4.3.1.2) handelt es sich hierbei um einen paarweisen Vergleich, bei dem nur eine Richtung bewertet wird. Die zweite Richtung ergibt sich automatisch aus der Invertierung der ersten Bewertung [GP14, S. 53]. In dem in Bild 4-8 gezeigten Beispiel ist das Verbesserungsziel „Adaptivität steigern“ wichtiger als das Ziel „Vernetzung steigern“. Die zunehmende Vernetzung ist wiederum wichtiger als das Ziel „Dienstleistungseffizienz verbessern“. Aus den Bewertungen der Relevanzmatrix wird pro Verbesserungsziel die Zeilensumme, die sog. Relevanzsumme, berechnet [GP14, S. 53f.]. Aus dem Vergleich der Relevanzsummen und der daraus resultierenden Rangfolge werden wichtige und weniger wichtige Ziele deutlich. Dabei gilt: je höher die Relevanzsumme, desto wichtiger ist das Verbesserungsziel.

Relevanzmatrix der Verbesserungsziele **Fragestellung:** **„Ist das Verbesserungsziel i (Zeile) wichtiger als das Verbesserungsziel j (Spalte)?“** Bewertungsskala: 0 = i ist **un**wichtiger als j 1 = i ist wichtiger als j	**Verbesserungsziele**	Adaptivität steigern	Vernetzung steigern	Dienstleistungseffizienz verbessern	Kundenzugang verbessern	Inbetriebnahme beschleunigen		**Relevanzsumme**	**Rang des Verbesserungsziels R_i**	**Rangindex F_R**
Verbesserungsziele	**Nr.**	**VZ1**	**VZ2**	**VZ3**	**VZ4**	**VZ5**				
Adaptivität steigern	**VZ1**		1	1	1	1		**4**	**2**	**1,9**
Vernetzung steigern	**VZ2**	0		1	1	1		**3**	**6**	**1,4**
Diensteistungseffizienz verbessern	**VZ3**	0	0		1	1		**2**	**8**	**1,2**
Kundenzugang verbessern	**VZ4**	0	0	0		1		**1**	**9**	**1,1**
Inbetriebnahme beschleunigen	**VZ5**	0	0	0	0			**0**	**10**	**1**

Bild 4-8: Beispiel einer Relevanzmatrix der Verbesserungsziele (Auszug)

Um die unterschiedliche Bedeutung der Verbesserungsziele im weiteren Vorgehen zu berücksichtigen, wird zusätzlich zu den Relevanzsummen und deren Rangfolge ein **Rangindex** berechnet. In Anlehnung an die Methode nach BALÁZOVÁ (vgl. Abschnitt 3.2.2.3) liegt der Wertebereich des Rangindex zwischen 1 und 2. Verbesserungsziele mit hoher Relevanzsumme werden dadurch stärker, aber nicht überbewertet, und die Ziele mit geringer Relevanzsumme werden nicht abgewertet. Folgende Formel dient zur Berechnung des Rangindex [Bal04, S. 98]:

$$F_R = 1 + \frac{n_{VZ} - R_i}{n_{VZ} - 1}$$

Gleichung 4-1: Berechnung der Rangindizes der Verbesserungsziele

F_R: Rangindex des Verbesserungsziels

n_{VZ}: Anzahl der Verbesserungsziele

R_i: Rang des Verbesserungsziels

Aus der Berechnung der Rangindizes für das in Bild 4-8 gezeigte Beispiel, bei dem insgesamt zehn Verbesserungsziele miteinander verglichen wurden, geht hervor, dass das Ziel „Adaptivität steigern“ mit einem Rangindex von 1,9 eine hohe Priorität hat, während das Ziel „Kundenzugang verbessern“ (Rangindex 1,1) weniger wichtig ist. Nach der Berechnung der Rangindizes endet die Phase der Verbesserungszielauswahl. Zentrales Ergebnis sind gewichtete Verbesserungsziele für das zu betrachtende System.

4.3.2.2 Zielbestimmung

Im Rahmen der Zielbestimmung wird eine unternehmensspezifische Zielleistungsstufe je Handlungselement festgelegt. Dazu gilt es zunächst die Handlungselemente zu identifizieren, die zur Erfüllung der ausgewählten Verbesserungsziele besonders relevant sind. Zur Identifikation dieser dient das Hilfsmittel **Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente**. Anschließend muss je CPS-Komponente und Handlungselement die entsprechende Zielposition bestimmt werden. Hierbei unterstützt die **Zielbeitragsmatrix der Leistungsstufen**. Beide Hilfsmittel sind angelehnt an die Arbeit von BALÁZOVÁ (vgl. Abschnitt 3.2.2.3) und werden im Folgenden beschrieben.

Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente

Mit der Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente werden die Wirkbeziehungen der Handlungselemente zu den Verbesserungszielen untersucht [Bal04, S. 90], [Wle01, S. 101ff.]. Die zentrale Frage dabei ist: „Wie stark trägt das Handlungselement i (Zeile) zum Verbesserungsziel j (Spalte) bei?“ Diese Frage wird mit den Zahlen 0 bis 3 beantwortet, wobei „0 = kein Beitrag“ und „3 = starker Beitrag“ bedeuten. Bild 4-9 zeigt das Beispiel einer Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente.

Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente

Fragestellung:
„Wie stark trägt das Handlungselement i (Zeile) zum Verbesserungsziel j (Spalte) bei?“

Bewertungsskala:
0 = kein Beitrag
1 = schwacher Beitrag
2 = mittlerer Beitrag
3 = starker Beitrag

CPS-Komponenten	Handlungselemente	Nr.	VZ1 Adaptivität steigern	VZ2 Vernetzung steigern	VZ3 Dienstleistungseffizienz verbessern	VZ4 Kundenzugang verbessern	VZ5 Inbetriebnahme beschleunigen	Breitenwirkung [%]	Tiefenwirkung	Zielbeitragsindex
Kommunikationssystem	Vertikale Integration	KO1	1	3	2	2	1	100	1,7	1,7
	Horizontale Integration	KO2	1	3	2	2	1	100	1,7	1,7
	Konnektivität	KO3	1	3	2	2	1	100	1,7	1,7
	Netzwerkverbindung	KO4	1	3	2	2	1	100	1,7	1,7
	Security	KO5	0	1	1	2	0	60	1,2	0,7
HMI	Funktionalität des HMI									
	Ort des HMI									
	Multimodalität									
Daten	Datenspeicherung									
	Datenanalyse									

Breitenwirkung:
Auswirkungen eines Handlungselements auf die Gesamtheit der Verbesserungsziele.

Tiefenwirkung:
Durchschnittlicher Einfluss eines Handlungselements auf die von ihm beeinflussten Verbesserungsziele.

Zielbeitragsindex
Gesamter Beitrag eines Handlungselements zu den Verbesserungszielen.

Bild 4-9: Beispiel einer Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente (Auszug)

Hier haben z.B. die Handlungselemente *Vertikale Integration* und *Horizontale Integration* jeweils einen starken Beitrag zum Verbesserungsziel „Vernetzung steigern“, hingegen aber einen schwachen Beitrag zum Ziel „Adaptivität steigern“. Aus der Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente resultieren drei wesentliche Kennwerte. Die **Breitenwirkung** eines Handlungselements zeigt an, wieviel Prozent der Gesamtheit aller Verbesserungsziele ein Handlungselement beeinflusst. Dazu wird je Handlungselement die Anzahl der Verbesserungsziele mit einer höheren Bewertung als 0 durch die Gesamtanzahl der Verbesserungsziele dividiert und mit 100% multipliziert. Die **Tiefenwirkung** macht deutlich, wie stark ein Handlungselement durchschnittlich auf die jeweiligen Verbesserungsziele wirkt. Zur Berechnung der Tiefenwirkung wird die Summe aller Bewertungen eines Handlungselements durch die Anzahl der Verbesserungsziele mit einer Bewertung größer als 0 dividiert. Die Breitenwirkung multipliziert mit der Tiefenwirkung und dividiert durch 100% ergibt schließlich den **Zielbeitragsindex**. Dieser sagt aus, wie groß der Beitrag eines Handlungselements zu den Verbesserungszielen ist. Handlungselemente mit einer hohen Breiten- und Tiefenwirkung haben einen großen Beitrag zu den Verbesserungszielen, während Handlungselemente mit niedriger Breiten- und Tiefenwirkung lediglich einen geringen Zielbeitrag haben. Somit ist der Zielbeitragsindex ein Indikator für die relevanten Handlungselemente [Bal04, S. 91f.]. Der Zielbeitragsindex wird erneut in der Phase Leistungsrelevanzanalyse im Bereich Leistungssteigerung aufgegriffen (vgl. Abschnitt 4.3.3.1).

Zielbeitragsmatrix der Leistungsstufen

Nach der Identifikation relevanter Handlungselemente erfolgt nun die Definition der Zielleistungsstufen für die einzelnen Handlungselemente. Angelehnt an die Zielbeitragsanalyse im Ansatz von BALÁZOVÁ dient hierzu die Zielbeitragsmatrix der Leistungsstufen (siehe Bild 4-10). Diese untersucht den Beitrag einer Leistungsstufe eines Handlungselements zu den Verbesserungszielen. Auch hier kann die Frage je Leistungsstufe mit den Zahlen „0 = kein Beitrag“ bis „3 = starker Beitrag“ beantwortet werden.

Es gilt damit die Leistungsstufe eines Handlungselements zu identifizieren, die den höchsten Zielbeitrag hat. In dem Beispiel aus Bild 4-10 hat die Leistungsstufe 4 „Umfangreiche horizontale Integration“ des Handlungselements *Horizontale Integration* einen starken Beitrag zum Verbesserungsziel „Vernetzung steigern“. Der Zielbeitrag der Leistungsstufe 4 ist höher als bei Leistungsstufe 3, jedoch steigt dieser nicht bei Leistungsstufe 5. Für eine isolierte Betrachtung des Ziels „Vernetzung steigern“ wäre folglich die Leistungsstufe 4 im Handlungselement *Horizontale Integration* die anzustrebende Leistungsstufe. Es liegt hierbei die Überlegung zugrunde, dass eine höhere Leistungsstufe nur dann anzustreben ist, wenn dies mit einer Steigerung des Zielbeitrags verbunden ist.

Zielbeitragsmatrix der Leistungsstufen

Fragestellung:
„Wie stark trägt die Leistungsstufe i eines Handlungselements (Zeile) zum Verbesserungsziel j (Spalte) bei?“

Bewertungsskala:
0 = kein Beitrag
1 = schwacher Beitrag
2 = mittlerer Beitrag
3 = starker Beitrag

CPS-Komponenten	Handlungs-elemente	Leistungsstufen	Verbesserungsziele	Adaptivität steigern	Vernetzung steigern	Dienstleistungseffizienz verbessern	Kundenzugang verbessern	Inbetriebnahme beschleunigen	Gewichtete Zielwirkung	Rangfolge innerh. d. Handlungselements
			F_R	1,9	1,4	1,2	1,1	1,0		
			Nr.	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5		
Kommunika-tionssystem	Vertikale Integration	Keine vertikale Integration	SE11	0	0	0	0	0	**0**	**4**
		Rudimentäre vertikale Integration	SE12	1	1	1	1	1	**9,1**	**2**
		Partielle vertikale Integration	SE13	1	2	1	1	1	**9,6**	**1**
		Umfangreiche vertikale Integration	SE14	1	3	1	1	1	**4,3**	**3**
		Durchgängige vertikale Integration	SE15	1	3	1	1	1	**0**	**4**
	Horizontale Integration	Keine horizontale Integration	SE21	0	0	0	0	0	**0**	**5**
		Rudimentäre horizontale Integration	SE22	1	1	1	1	1	**7,7**	**2**
		Partielle horizontale Integration	SE23	1	2	2	2	1	**6,7**	**3**
		Umfgangreiche horiz. Integration	SE24	1	**3**	2	3	2	**9,7**	**1**
		Durchgängige horizontale Integration	SE25	[illegible]	3	3	3	2	**3,7**	**4**

Wenn mehrere Leistungsstufen je Handlungselement den gleichen Zielbeitrag je Verbesserungsziel haben, geht jeweils der **Zielbeitrag der geringeren Leistungsstufe** in die Berechnung der **gewichteten Zielwirkung** mit ein.

Bild 4-10: Beispiel einer Zielbeitragsmatrix der Leistungsstufen (Auszug)

Nach der initialen Befüllung der Matrix wird je Verbesserungsziel geprüft, ab wann eine höhere Leistungsstufe eines Handlungselements keinen stärkeren Beitrag mehr zu einem Verbesserungsziel hat. Somit wird pro Handlungselement nur die niedrigste Leistungsstufe mit dem höchsten Zielbeitrag berücksichtigt. Aus der Zielbeitragsmatrix kann nun die Zielwirkung ermittelt werden. Diese zeigt an, wie stark eine Leistungsstufe auf ein Verbesserungsziel wirkt [Bal04, S. 100]. Zur Berücksichtigung der Relevanz der Verbesserungsziele wird anschließend die **gewichtete Zielwirkung** gebildet, die durch folgende Formel berechnet wird:

$$Z_i = \sum LS_i \times F_{Rj}$$

Gleichung 4-2: Berechnung der gewichteten Zielwirkung

Z_i: Gewichtete Zielwirkung der Leistungsstufe i eines Handlungselements

LS_i: Niedrigste Leistungsstufe i mit dem höchsten Zielbeitrag je Handlungselement

F_{Rj}: Rangindex des Verbesserungsziels j

Aus den gewichteten Zielwirkungen kann nun eine Rangfolge gebildet werden. Die Leistungsstufe mit der höchsten gewichteten Zielwirkung stellt die Zielleistungsstufe für das

Handlungselement dar. Im Beispiel aus Bild 4-10 sind die Leistungsstufe 3 „Partielle vertikale Integration“ für das Handlungselement *Vertikale Integration* und die Leistungsstufe 4 „Umfangreiche horizontale Integration“ für das Handlungselement *Horizontale Integration* die anzustrebenden Zielleistungsstufen. Sie haben jeweils die höchste gewichtete Zielwirkung je Handlungselement.

Nach der Durchführung der Zielbestimmung ist der Bereich der Zieldefinition abgeschlossen. Wesentliche Resultate sind die gewichteten Verbesserungsziele sowie die Zielleistungsstufen für das zu betrachtenden System. Aus den Zielleistungsstufen auf Komponentenebene ergibt sich zudem die Zielleistungsstufe für das Gesamtsystem. Diese kann mit Hilfe der Steckbriefe für die Gesamtsystemleistungsstufen bestimmt werden (vgl. Bilder A6 bis A10 im Anhang).

4.3.3 Leistungssteigerung

Ziel der Leistungssteigerung ist es, die Lücke zwischen der derzeitigen Leistungsfähigkeit und dem ermittelten Zielreifegrad zu schließen. Dazu ist festzulegen, welche Handlungselemente in welcher Reihenfolge angegangen werden sollen. Hierfür werden die Phasen *Leistungsrelevanzanalyse* und *Umsetzungsplanung* durchlaufen. Die beiden Phasen sowie die dazugehörigen Hilfsmittel werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

4.3.3.1 Leistungsrelevanzanalyse

Im Rahmen der Leistungsrelevanzanalyse gilt es die Handlungselemente zu identifizieren, die einen hohen Beitrag zu den Verbesserungszielen haben und gleichzeitig stark mit anderen Handlungselementen vernetzt sind. Diese Handlungselemente haben eine hohe Wichtigkeit für die Leistungsfähigkeit des zu betrachtenden Systems. Um die genannten Teilinformationen zu einer Aussage zusammenzufassen, stellt das Reifegradmodell zwei Hilfsmittel bereit: die **Einflussmatrix der Handlungselemente** und das **Leistungsrelevanzportfolio**. Nachfolgend werden beide Hilfsmittel erläutert.

Einflussmatrix der Handlungselemente

Der bereits ermittelte Zielbeitragsindex aus der Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente (vgl. Abschnitt 4.3.2.2) sagt aus, wie stark ein Handlungselement zu den Verbesserungszielen beiträgt. Die fehlende Aussage über die Vernetzung der Handlungselemente untereinander wird nun durch die Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung der Handlungselemente herbeigeführt. Dazu dient die von DUPPERIN und GODET entwickelte Einflussmatrix [DG73, S. 32ff.], [GP14, S. 51f.]. Mit der sog. Einflussmatrix der Handlungselemente wird die Frage beantwortet: „Wie stark beeinflusst das Handlungselement i (Zeile) das Handlungselement j (Spalte)?“ Je Handlungselemente-Paar kann die Frage mit den Zahlen „0 = kein Einfluss“ bis „3 = starker Einfluss“ bewertet werden. Dabei sind je Paar zwei Felder auszufüllen. Die Diagonale der Matrix bleibt frei, da der

Einfluss eines Handlungselements auf sich selbst irrelevant ist [Bal04, S. 85]. Ein Beispiel einer Einflussmatrix der Handlungselemente zeigt Bild 4-11. Hier geht aus der Bewertung u.a. hervor, dass das Handlungselement *Konnektivität* einen starken Einfluss auf das Handlungselement *Vertikale Integration* hat.

Der **Vernetzungsindex** gibt Aufschluss darüber, wie stark ein Handlungselement mit anderen Handlungselementen vernetzt ist. Die Veränderung stark vernetzter Handlungselemente hat mit großer Wahrscheinlichkeit einen starken Einfluss auf weitere Handlungselemente.

Einflussmatrix der Handlungselemente

Fragestellung:
„Wie stark beeinflusst das Handlungselement i (Zeile) das Handlungselement j (Spalte)?“

Bewertungsskala:
0 = kein Einfluss
1 = schwacher Einfluss
2 = mittlerer Einfluss
3 = starker Einfluss

CPS-Komponenten	Handlungselemente	Nr.	KO1 Vertikale Integration	KO2 Horizontale Integration	KO3 Konnektivität	KO4 Netzwerkverbindung	KO5 Security	Aktivsumme	Vernetzungsindex VI_i
Kommunikationssystem	Vertikale Integration	KO1		0	1	1	1	27	621
	Horizontale Integration	KO2	0		1	1	1	29	754
	Konnektivität	KO3	3	3		3	3	40	1000
	Netzwerkverbindung	KO4	3	3	3		3	40	1000
	Security	KO5	1	1	3	3		15	315
HMI	Funktionalität des HMI	HM1	0	0	0	0	0	4	96
	Ort des HMI	HM2	1	1	1	1	0	14	364
	Multimodalität	HM3	0	0	0	0	0	6	114
Daten	Datenspeicherung	DA1	2	2	2	2	2	28	868
	Datenanalyse	DA2	1	1	1	1	0	21	588
		Passivsumme	23	26	25	25	21		

Bild 4-11: Beispiel einer Einflussmatrix der Handlungselemente (Auszug)

Nach Abschluss der Bewertung ergeben sich aus der ausgefüllten Einflussmatrix zunächst zwei Kennwerte. Die Zeilensumme, sog. Aktivsumme, zeigt die Stärke an, mit der ein Handlungselement alle anderen Handlungselemente beeinflusst. Aus der Spaltensumme, sog. Passivsumme, wird ersichtlich, wie stark ein Handlungselement durch die übrigen Handlungselemente beeinflusst wird. Das Produkt von Aktiv- und Passivsumme ist der **Vernetzungsindex** (Dynamik-Index) [GP14, S. 52]. Dieser gibt Aufschluss darüber, wie stark ein Handlungselement mit anderen Handlungselementen vernetzt ist. Je höher der Wert ist, desto stärker ist die Vernetzung eines Handlungselements. Die Veränderung stark vernetzter Handlungselemente hat mit großer Wahrscheinlichkeit einen starken Einfluss auf weitere Handlungselemente [Bal04, S. 89].

Bislang wurden bei der Bewertung der Vernetzung nur direkte Einflüsse berücksichtigt. Da sich die Handlungselemente aber auch indirekt beeinflussen können, kann zusätzlich zur direkten Einflussanalyse noch eine indirekte Einflussanalyse durchgeführt werden.

Hierbei sind komplexe Wechselwirkungen zu berücksichtigen, daher wird der Einsatz eines Softwarewerkzeugs[42] empfohlen. Ergebnis der indirekten Einflussanalyse sind modifizierte Kennwerte für die Aktiv- und Passivsumme sowie den Vernetzungsindex, die nun neben den Ergebnissen der direkten Einflussanalyse zu berücksichtigen sind. Handlungselemente mit einer hohen Anzahl indirekter Beziehungen sollten gesondert geprüft werden [GP14, S. 53]. Nach Abschluss der Einflussanalyse liegen für jedes Handlungselement der Zielbeitragsindex und der Vernetzungsindex vor. Beide Werte können nun in das Leistungsrelevanzportfolio eingetragen werden, das nachfolgend beschrieben wird.

Leistungsrelevanzportfolio

Die bisherigen Untersuchungen geben Aufschluss darüber, wie stark ein Handlungselement auf die festgelegten Verbesserungsziele wirkt (Zielbeitragsindex) und wie stark ein Handlungselement mit anderen Handlungselementen vernetzt ist (Vernetzungsindex). Es gilt nun die Handlungselemente zu ermitteln, die stark vernetzt sind und gleichzeitig einen hohen Zielbeitrag haben [Bal04, S. 94]. Hierbei unterstützt das Leistungsrelevanzportfolio. Auf der Abszisse wird der Zielbeitragsindex (normiert) und auf der Ordinate der Vernetzungsindex (normiert) aufgetragen. So können erste Aussagen über die Priorisierung der Handlungselemente getroffen werden. Bild 4-12 zeigt ein Leistungsrelevanzportfolio mit beispielhaften Einträgen.

Handlungselemente mit einem hohen Zielbeitrag und einem geringen Vernetzungsindex sind sofort anzugehen, da sie einen hohen Beitrag zur Zielerreichung haben, gleichzeitig aber wenig Wechselwirkungen mit anderen Handlungselementen zu berücksichtigen sind. Handlungselemente mit einem hohen Zielbeitrag und Vernetzungsindex sind langfristig zu bearbeiten, da sie für die Leistungsfähigkeit des Systems von hoher Relevanz sind. Die Umsetzung von Handlungselementen ist zu prüfen, wenn diese einen hohen Vernetzungsindex, jedoch einen geringen Zielbeitragsindex haben. Keine unnötigen Ressourcen sind bei den Handlungselementen mit geringem Vernetzungs- und Zielbeitragsindex zu binden, da diese für die Systemverbesserung weniger wichtig sind. Zusätzlich zur Position eines Handlungselements im Portfolio ist der Kreisdurchmesser ein weiteres Entscheidungskriterium. Dieser gibt an, wie groß der Abstand zwischen Ist- und Zielleistungsstufe ist. Geringe Abstände können in der Regel schneller geschlossen werden als große Abstände. Im Beispiel von Bild 4-12 sind die Handlungselemente *Konnektivität* und *Datenanalyse* langfristig anzugehen. Beide sind hier eine wichtige Grundlage für die Verbesserung weiterer Handlungselemente.

[42] Die indirekte Einflussanalyse kann u.a. mit der Scenario-Software durchgeführt werden. Nähe Informationen dazu enthält [GP14, S. 74].

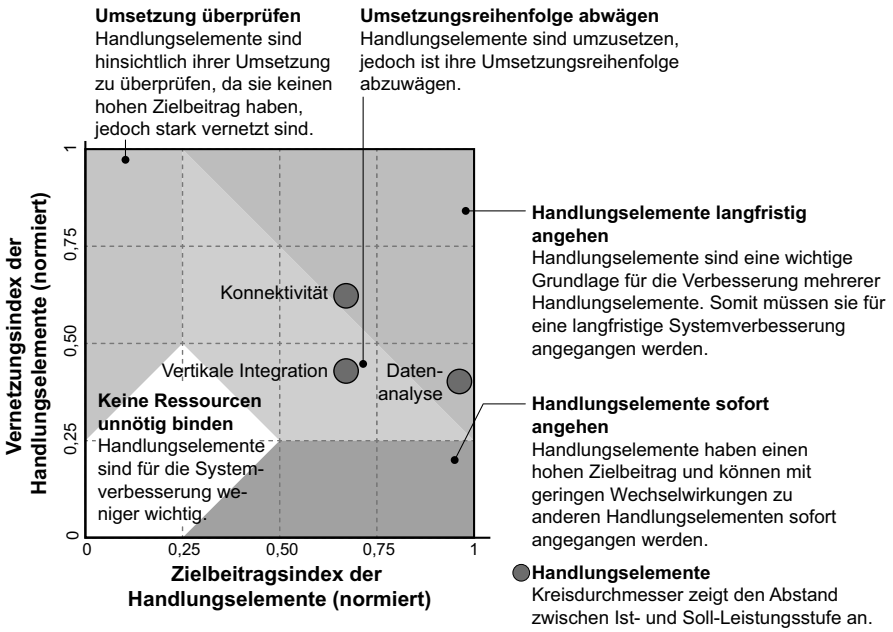


Bild 4-12: Leistungsrelevanzportfolio zur Priorisierung der Handlungselemente

Das Leistungsrelevanzportfolio bildet den Abschluss der Leistungsrelevanzanalyse, im Rahmen derer die leistungsrelevantesten Handlungselemente identifiziert wurden. Nachfolgend wird nun ein grober Zeitraum für die Umsetzung dieser Handlungselemente festgelegt.

4.3.3.2 Umsetzungsplanung

Ziel der Umsetzungsplanung ist es, eine zeitliche Reihenfolge für die Umsetzung der priorisierten Handlungselemente festzulegen. Hierbei unterstützt eine **Handlungselemente-Roadmap**, die im Folgenden erläutert wird.

Handlungselemente-Roadmap

Die Handlungselemente-Roadmap ist ein Plan, aus dem hervorgeht, wann welches Handlungselement umgesetzt werden soll. Angelehnt an das Instrument der Technologie-Roadmap[43] stellt die Handlungselemente-Roadmap in der Waagerechten die CPS-Komponenten mit den einzelnen Handlungselementen dar. In Balkenform wird für jedes Handlungselement der ungefähre zeitliche Rahmen für dessen geplante Umsetzung abgebildet [Eve13, S. 222ff.], [GP14, S. 166]. Bild 4-13 zeigt das Beispiel einer Handlungs-

[43] Eine Beschreibung von Technologie-Roadmaps enthält Abschnitt 4.4.3.

elemente-Roadmap für die CPS-Komponente Kommunikationssystem. Dort werden zunächst die Handlungselemente *Konnektivität* und *Netzwerkverbindung* angegangen. Beide Handlungselemente sind eine wesentliche Grundlage zur Verbesserung der *Vertikalen Integration* und *Horizontalen Integration*, die folglich mit einem zeitlichen Versatz umgesetzt werden sollen.

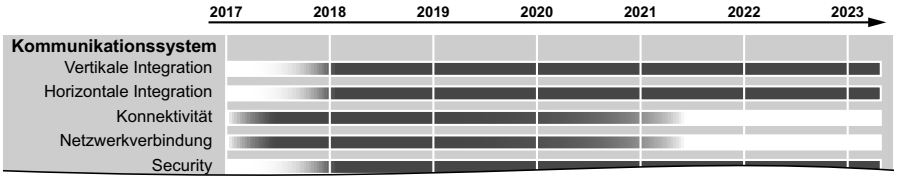


Bild 4-13: Beispiel einer Handlungselemente-Roadmap (Auszug)

Nach der Erstellung der Handlungselemente-Roadmap ist der Bereich der Leistungssteigerung und das gesamte Reifegradmodell für Cyber-Physical Systems abgeschlossen. Es liegt nun ein Plan vor, der aussagt, welche Handlungselemente in welcher Reihenfolge umgesetzt werden sollen, um die Lücke zwischen der derzeitigen Leistungsfähigkeit und dem ermittelten Zielreifegrad zu schließen. Die Ergebnisse des Reifegradmodells bilden die Basis für die Produktkonzipierung, die alternative Lösungskonzepte zur Konkretisierung der Handlungselemente ermittelt. Hilfsmittel zur Konzipierung von Cyber-Physical Systems werden in Abschnitt 4.4 vorgestellt.

Das Reifegradmodell für Cyber-Physical Systems enthält diverse Berechnungsvorschriften, die sicherstellen, dass eindeutige, vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden. Damit die Berücksichtigung aller Berechnungsvorschriften nicht zur Beeinträchtigung der praktischen Anwendbarkeit führt, wurde im Rahmen dieser Arbeit prototypisch ein Softwarewerkzeug entwickelt, das in Abschnitt 4.3.4 vorgestellt wird.

4.3.4 Werkzeugunterstützung

Die Webapplikation *CPS Maturity Assessment* ist die softwaretechnische Umsetzung des Reifegradmodells für CPS. Es enthält die Hilfsmittel sowie Berechnungsvorschriften und führt den Anwender durch die einzelnen Bereiche und Phasen des Reifegradmodells. Sämtliche Berechnungen werden automatisch durchgeführt und Eingaben sowie Analyseergebnisse gespeichert. Durch die Realisierung als Webapplikation in der Cloud kann die Software orts- und geräteunabhängig ausgeführt werden. Das responsive Webdesign erleichtert die Anwendung mit mobilen Endgeräten wie Tablet-PCs oder Smartphones. Bei der Gestaltung der Benutzeroberfläche wurden modernste Frameworks und Bibliotheken genutzt, um Benutzern eine intuitive Bedienung zu ermöglichen. Bild 4-14 stellt die grafische Benutzeroberfläche der Webapplikation beispielhaft dar.

Die Benutzerführung der Software beginnt mit der Erstellung eines Accounts durch die Eingabe des Benutzernamens und des Passworts. Anschließend kann der Benutzer ein neues Assessment anlegen, woraufhin Informationen über das zu betrachtende System

abgefragt werden (z.B. Produktbenennung, Produkttyp). Wenn der Benutzer ein bereits bearbeitetes Assessment fortführen möchte, sind keine Angaben zum Untersuchungsgegenstand mehr nötig. Die nutzerbasierte Authentifizierung stellt hier sicher, dass dem Anwender nur die von ihm durchgeführten Assessments angezeigt werden. Nach dem Anlegen des zu betrachtenden Systems beginnt der Bereich der **Leistungsbewertung** mit der Phase der Systembewertung. Dort bewertet der Benutzer mit Hilfe der Leistungsstufen auf Komponentenebene die derzeitige Leistungsfähigkeit des Systems.

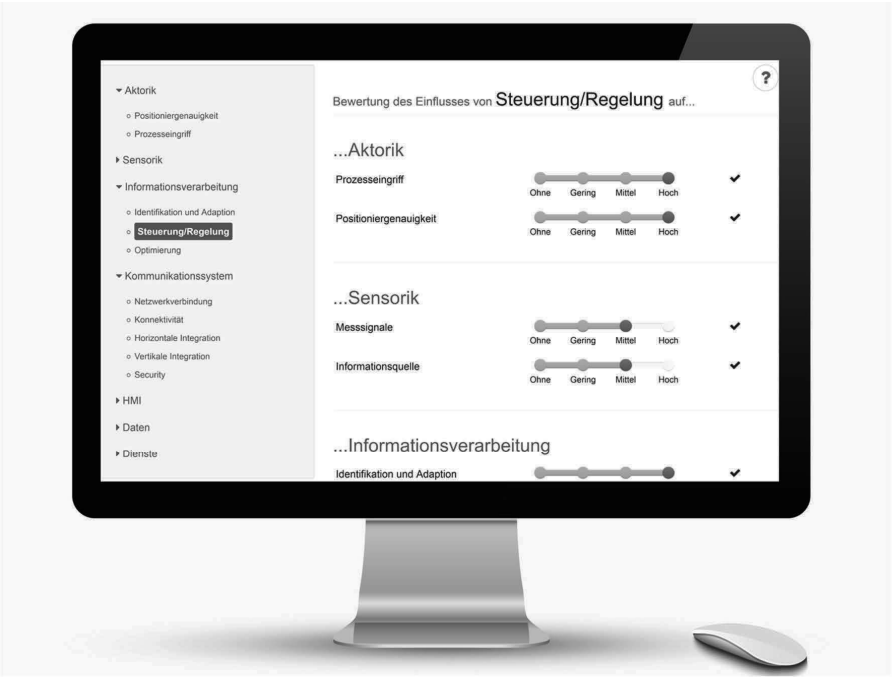


Bild 4-14: Grafische Benutzeroberfläche der Webapplikation

Alle CPS-Komponenten, Handlungselemente und Leistungsstufen werden in der Software kontextabhängig beschrieben. Weitere erklärende Dokumente werden somit nicht benötigt. Bei der Bewertung überprüft die Software automatisch die Plausibilität der Eingaben und warnt den Benutzer bei inkonsistenten Eingaben. Hierzu greift die Software auf die Informationen in der Konsistenzmatrix zurück. Nach Abschluss der Bewertung auf Komponentenebene erscheint eine Auswertungs- und Vergleichsansicht, die alle Bewertungsergebnisse grafisch aufbereitet. In dieser Ansicht können auch die möglichen Minimalausprägungen der Gesamtsystemleistungsstufen eingeblendet werden, die eine Aussage über die Leistungsstufe auf Gesamtsystemebene zulassen. Zudem können die Ergebnisse anderer Assessments hinzugefügt werden, um unterschiedliche Systeme miteinander zu vergleichen.

Nach Abschluss der Leistungsbewertung wird der Benutzer automatisch in die Phase Verbesserungszielauswahl des Bereichs **Zieldefinition** weitergeleitet. Hier kann der Benutzer Verbesserungsziele aus einer Liste auswählen oder eigene Ziele eingegeben. Auf die Formulierung und Auswahl der Ziele erfolgt deren Priorisierung mit Hilfe der Relevanzmatrix. Die daraus resultierenden Rangindizes der Verbesserungsziele werden automatisch berechnet. Dies gilt ebenso für die weiteren Kennwerte, die sich in der Phase der Zielbestimmung aus der Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente und der Zielbeitragsmatrix der Leistungsstufen ergeben. Nach Abschluss der Zieldefinition wird dem Nutzer erneut die Auswertungs- und Vergleichsansicht mit einem Vergleich von Ist- und Zielleistungsstufen angezeigt.

Ausgehend von der durchgeführten Leistungsbewertung und Zieldefinition unterstützt die Software nun bei der Leistungsrelevanzanalyse im Bereich der **Leistungssteigerung**. Hier füllt der Benutzer zunächst die Einflussmatrix der Handlungselemente aus. Nach automatischer Berechnung der daraus resultierenden Vernetzungsindizes stellt die Software das Leistungsrelevanzportfolio mit den relevanten Handlungselementen dar. Die Anzahl der dort eingeblendeten Handlungselemente kann individuell festgelegt werden. Das Leistungsrelevanzportfolio bildet den Abschluss der Softwareunterstützung. Die anschließende Umsetzungsplanung erfolgt manuell durch den Benutzer.

Die Webapplikation *CPS Maturity Assessment* ermöglicht eine einfache und wirtschaftliche Anwendung des Reifegradmodells für CPS. Analyseergebnisse werden automatisch dokumentiert und archiviert. Dies erleichtert u.a. den Vergleich mehrerer Systeme oder die Fortschrittskontrolle der Systemverbesserung durch regelmäßige Durchführung des Reifegradmodells.

4.4 Hilfsmittel zur Konzipierung von Cyber-Physical Systems

Zur Leistungssteigerung des zu betrachtenden Systems müssen die im Reifegradmodell identifizierten relevantesten Handlungselemente in konkrete Lösungen überführt werden. Dazu werden in den folgenden Abschnitten Hilfsmittel vorgestellt, die Unternehmen bei der Erstellung und Auswahl von Lösungen im Kontext von CPS unterstützen. Wesentliche Grundlage ist eine interdisziplinäre Beschreibung der Ideen. Zu diesem Zweck wird die im Stand der Technik untersuchte Spezifikationstechnik CONSENS um spezifische Konstrukte ergänzt (Abschnitt 4.4.1). Die Ermittlung und Auswahl alternativer Lösungen wird durch einen morphologischen Kasten sowie Technologie- und Dienstesteckbriefe (Abschnitt 4.4.2) unterstützt. Mit Hilfe einer Umsetzungsroadmap wird schließlich die Umsetzungsplanung der ausgewählten Lösungen durchgeführt (Abschnitt 4.4.3). Die genannten Hilfsmittel werden nachfolgend erläutert.

4.4.1 Modellkonstrukte zur Spezifikation von CPS

Die ganzheitliche Spezifikation von Lösungen im Kontext von CPS erfordert die Abbildung aller Bestandteile der Systeme (vgl. Abschnitt 4.2). Zudem muss die Spezifikation disziplinübergreifend verständlich sein, um dem interdisziplinären Charakter der Systeme gerecht zu werden. Die Referenzarchitektur für CPS ist zur Beschreibung spezifischer Lösungen zu unkonkret, da sie primär ein allgemeingültiges Muster darstellt und die Merkmale und Zusammenhänge eines CPS idealtypisch abbildet. Aus der Analyse des Stands der Technik geht hervor, dass die Spezifikationstechnik CONSENS ein vielversprechender Ansatz zur ganzheitlichen und interdisziplinären Beschreibung von Lösungen ist (vgl. Abschnitt 3.3.1). Zur umfassenden Abbildung aller CPS-Bestandteile bedarf es jedoch einer Anpassung der bestehenden Modellkonstrukte.

Für die Spezifikation von Lösungen eignen sich insbesondere die Partialmodelle **Wirkstruktur** und **Umfeld**. Sie bilden den Aufbau und die prinzipielle Wirkungsweise von technischen Systemen sowie deren Interaktion mit dem Umfeld ab. Zur Modellierung stellt CONSENS verschiedene Modellkonstrukte inkl. graphischer Notation und Semantik bereit. *Systemelemente* (blaue Sechsecke) bilden Systeme, Module, Bauteile oder Softwarekomponenten des zu betrachtenden Systems ab. *Umfeldelemente* (gelbe Sechsecke) stellen Elemente des Umfelds dar. Dazu gehören alle Elemente, die außerhalb der Systemgrenze liegen (z.B. Benutzer oder andere Systeme). Für die Darstellung der Wechselwirkungen zwischen System- und Umfeldelementen werden Flussbeziehungen verwendet. Hierbei unterscheidet CONSENS grundsätzlich drei Flussarten: *Informationsfluss*, *Stoffffluss* und *Energiefluss*. Weitere Beziehungen sind die *mechanische Verbindung*, *Messinformation* und die *logische Beziehung*. Handelt es sich hierbei um ungewollte Beziehungen, wie z.B. Feuchtigkeit oder Staub, so werden diese als *Störflüsse* deklariert. Zur visuellen Abgrenzung von Systemelementgruppen dient das Modellkonstrukt *logische Einheit*. Damit können z.B. bestimmte Baugruppen oder die Systemgrenze gekennzeichnet werden [GTS14, S. 83ff.], [Kai13, S. 47].

Im Hinblick auf die Beschreibung von CPS werden die genannten Modellkonstrukte angepasst. CPS-relevante Systemelemente wie Aktorik, Sensorik, Informationsverarbeitung, HMI oder Daten werden farblich unterschieden und zusätzlich mit Piktogrammen markiert. Im Umfeld werden zusätzlich die Elemente markiert, mit denen das System kommuniziert (vernetzte Systeme). Informationsflüsse, die zur Kommunikation mit vernetzten Systemen dienen und somit das Kommunikationssystem verkörpern, werden ebenfalls mit einem Piktogramm hervorgehoben. Damit Cyber-Physical Systems ganzheitlich beschrieben werden können, wird zusätzlich zu den bestehenden Elementen der Partialmodelle Umfeld und Wirkstruktur das Konstrukt *Dienst* hinzugefügt. Damit werden technische Funktionen visualisiert, die auf der Verarbeitung von Daten beruhen und über definierte Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden. Ein Dienst kann wiederum aus einzelnen Teildiensten bestehen. Das Konstrukt *Dienst* ist angelehnt an die *Aktivitäten* des Partialmodells **Verhalten**, die zur Beschreibung der Ablaufprozesse in einem Systemzustand dienen. Bild 4-15 zeigt eine Übersicht der beschriebenen Modellkonstrukte.

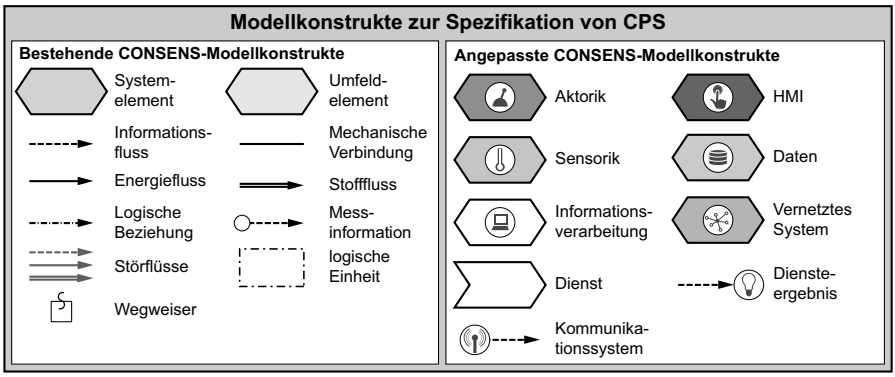


Bild 4-15: Modellkonstrukte zur Spezifikation von CPS

Für die Spezifikation von CPS sind neben der Beschreibung aller Systemelemente und Wechselwirkungen auch die flexiblen Systemgrenzen sowie die Interaktion zwischen physikalischer und digitaler Welt abzubilden. Dazu wird der Ansatz des Service Blueprinting adaptiert, bei dem Dienstleistungen mit mehreren Ebenen (Kunde und Anbieter) beschrieben werden (vgl. Abschnitt 3.3.3). Für die Spezifikation von CPS werden grundsätzlich vier logische Einheiten unterschieden (vgl. Bild 4-16). Die logische Einheit *Teilsystem* grenzt das zu betrachtende System ab. Das Teilsystem hat zumeist eine feste Systemgrenze und verfügt über ein Grundsystem, Sensorik, Informationsverarbeitung, Aktorik, Kommunikationssystem und eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (vgl. Abschnitt 4.2).

Der logischen Einheit *Daten* werden Systemelemente zugeordnet, mit denen digitale Informationen zur Weiterverarbeitung bereitgestellt werden. Beispiele dafür sind Server oder eine Cloud. Die logische Einheit *Dienste* umfasst alle Dienste, die durch das Teilsystem bereitgestellt oder genutzt werden. Die logische Einheit *Cyber-Physical System* umschließt alle Bestandteile des CPS inklusive der vernetzten Systeme. Die Systemgrenze dieser Einheit ist in der Regel flexibel, weil sich die Vernetzung mit anderen Systemen entlang des Lebenszyklus verändern kann. Bild 4-16 zeigt die beispielhafte Anwendung der Modellkonstrukte zur Spezifikation von CPS. Durch die Anpassung bestehender CONSENS-Modellkonstrukte ist es nun möglich, alle Bestandteile von Cyber-Physical Systems und deren Zusammenhänge allgemeinverständlich in einer Sicht darzustellen und Lösungen im Kontext von CPS ganzheitlich und interdisziplinär zu beschreiben.

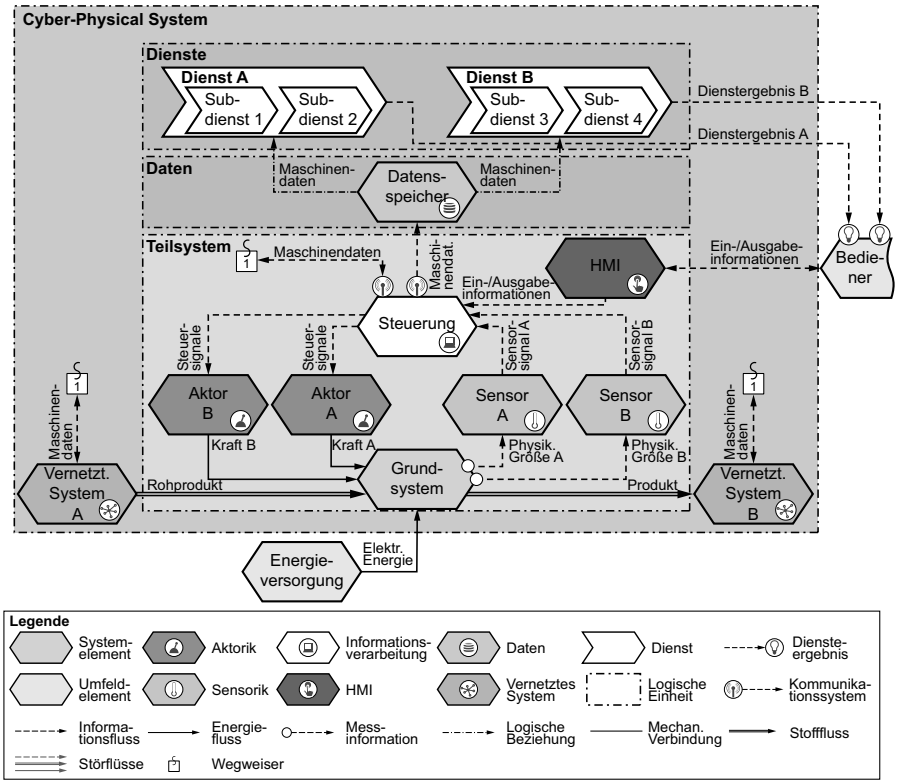


Bild 4-16: Modellierung von Lösungen im Kontext von CPS

4.4.2 Morphologischer Kasten mit Technologie- und Dienstesteckbriefen

Zur Leistungssteigerung technischer Systeme gilt es die Lösungselemente und Technologien zur ermitteln, die das System zur definierten Zielleistungsstufe führen. Ein in der Praxis weit verbreitetes Hilfsmittel zur Ermittlung und Auswahl alternativer Lösungen ist der **morphologische Kasten**. Der morphologische Kasten nach ZWICKY ist ein tabellenförmiges Ordnungsschema zur Erarbeitung von Gesamtlösungen aus Teillösungen. In den Zeilen werden die Teilfunktionen eines Systems aufgelistet und in den Spalten mögliche Wirkprinzipien oder Lösungselemente zu deren Erfüllung zugeordnet. Durch die Kombination der Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente zu einer Gesamtlösung werden nachvollziehbar Lösungsalternativen generiert. Anschließend können die Alternativen bewertet werden [Zwi66], [FG13, S. 373f.], [GEK01, S. 227f.].

Für die Ermittlung und Auswahl von Lösungsalternativen zur Erreichung der gewünschten Zielposition wird der morphologische Kasten nach ZWICKY adaptiert. Die Teilfunktionen in den Zeilen werden durch die CPS-Komponenten und deren Handlungselemente ersetzt. In den Spalten werden fünf Bereiche gekennzeichnet, die die Leistungsstufen der

CPS-Komponenten repräsentieren. Bei der Zuordnung von Lösungselementen zu den CPS-Komponenten gilt es zwei Fragen zu beantworten: Welche Handlungselemente einer CPS-Komponente adressiert ein Lösungselement? Welcher Leistungsstufe kann das Lösungselement zugeordnet werden? Der Lösungsraum wird dabei durch die Ist- und Zielleistungsstufen eingegrenzt. Hier liegt die Überlegung zugrunde, dass nur Lösungselemente in Frage kommen, die in dem Bereich zwischen Ist- und Zielleistungsstufe liegen. Bild 4-17 verdeutlicht dies an einem beispielhaft ausgefüllten morphologischen Kasten. In dem Beispiel hat das zu betrachtende System bei allen Handlungselementen der CPS-Komponente Informationsverarbeitung die Ist-Leistungsstufe 2 und die Zielleistungsstufe 4. Somit kommen zur Leistungssteigerung nur Lösungselemente in Frage, die den Leistungsstufen 3 und 4 zuzuordnen sind. Die für die Informationsverarbeitung aufgeführten Lösungselemente machen deutlich, dass Lösungselemente zum Teil unterschiedliche Handlungselemente adressieren. In dem Beispiel kann ein Industrie-PC (IPC) für alle Handlungselemente der Informationsverarbeitung verwendet werden, während eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) besonders für das Handlungselement *Steuerung/Regelung* geeignet ist.

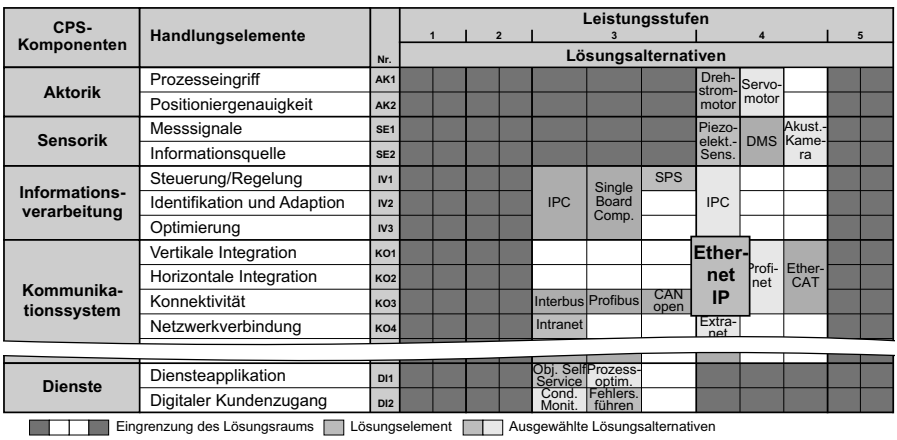


Bild 4-17: Morphologischer Kasten zur Auswahl geeigneter Lösungsalternativen (Auszug)

Zur Unterstützung der Zuordnung von Lösungselementen zu den Handlungselementen und deren Leistungsstufen dienen Technologie- und Dienstesteckbriefe. Mit Hilfe der Steckbriefe kann das zugrundeliegende Wissen für die Lösungselemente einheitlich dokumentiert und im Unternehmen verfügbar gemacht werden [Bri10, S. 129]. Die Unterscheidung von Technologie- und Dienstesteckbriefen beruht auf den unterschiedlichen Informationen beider Steckbriefe. Der **Technologiesteckbrief**, wie er in Bild 4-18 abgebildet ist, charakterisiert die Technologie mit einer Kurzbeschreibung und einer Skizze und ordnet sie einer CPS-Komponente zu. Ferner enthält der Steckbrief Informationen zu typischen Anwendungsgebieten, Know-how-Trägern sowie zu Vor- und Nachteilen.

Aussagen zum Technologiereifegrad werden mit Hilfe der aus dem S-Kurven-Konzept[44] nach FOSTER bekannten Technologietypen *Schrittmachertechnologie*, *Schlüsseltechnologie* und *Basistechnologie* getroffen. Darüber hinaus werden die relevanten Handlungselemente benannt und die jeweilige Leistungsstufe je Handlungselement für die Technologie bestimmt.

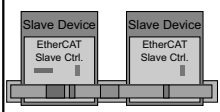
Technologiesteckbrief

Technologie: EtherCAT | **CPS-Komponente: Kommunikationssystem**

Kurzbeschreibung
EtherCAT ist ein ethernet-basiertes Feldbussystem. Es wurde entwickelt von der Firma Beckhoff und der EtherCAT Technology Group und ist eine offene Technologie, die in den Standards IEC 61158 und IEC 61784 sowie in ISO 15745-4 genormt ist.

Anwendungsgebiete
- Verpackungsmaschinen
- Spritzgussmaschinen
- schnelle Pressen
- CNC-Bearbeitungszentren
- Robotik
- Hydraulikregelungen

Skizze



Vorteile
- hohe Netzwerk-Performance
- Eignung für harte und weiche Echtzeitanforderungen

Nachteile
- eingeschränkte Kompatibilität

Handlungselemente
Konnektivität

Leistungsstufen
1 2 3 4 5

Technologiereifegrad
☐ Schrittmacher-technologie ☐ Schlüssel-technologie ☒ Basis-technologie

Know-how-Träger
- Beckhoff Automation
- EtherCAT Technology Group

Quellen
www.ethercat.org, Stand: 18.12.2016
www.feldbusse.de/EtherCAT/ethercat.shtml, Stand: 17.01.2017

Bild 4-18: Technologiesteckbrief für die Technologie „EtherCAT“

Der **Dienstesteckbrief** enthält ebenfalls eine Kurzbeschreibung und eine Skizze für die Charakterisierung eines Dienstes. Zudem benennt der Steckbrief die einzelnen Teilprozesse und beschreibt das zentrale Dienstergebnis. Weitere Informationen betreffen die Datenbasis sowie relevante CPS-Komponenten zur Ausführung des Dienstes. Ferner können im Bereich Best Practices erfolgreiche Anwendungsbeispiele beschrieben werden. Durch die Angabe der adressierten Handlungselemente und deren Leistungsstufen wird der Bezug zum morphologischen Kasten hergestellt. Bild 4-19 veranschaulicht den Aufbau der Dienstesteckbriefe am Beispiel „Object Self Service“.

Durch die einheitliche Dokumentation verschiedener Technologien und Dienste können diese miteinander verglichen und geeignete Kombinationen von Lösungselementen bestimmt werden. Auswahlkriterien sind z.B. Realisierbarkeit, Verträglichkeit und Aufwand [GEK01, S. 228].

[44] Das S-Kurven-Konzept ist ein Instrument aus dem Technologiemanagement, das das Leistungspotential einer Technologie und den kumulierten F&E-Aufwand grafisch darstellt [SLS11].

Dienstesteckbrief

Dienst: Object Self Service

Kurzbeschreibung
Das System löst eigenständig Bestellungen aus, z.B. von Ersatzteilen. Dazu werden Daten analysiert (z.B. Sensorwerte) und bei Erreichen eines festgelegten Wertes (z.B. bei drohendem Komponentenausfall) Bestellunganforderungen an das ERP-System gemeldet.

Zentrale Ergebnisse
- Bestellanforderung

Teilprozesse
- Daten erfassen
- Daten analysieren
- Bestellanforderung melden

Skizze

Datenbasis
- Sensordaten

Rel. CPS-Komponenten

[X] Sensorik	[ ] Aktorik
[X] IV	[X] KS
[ ] HMI	[X] Vernetzte Systeme

Handlungselemente
Diensteapplikation

Leistungsstufen
1 2 3 4 5

Best Practices
- Automatische Arbeitsplatzversorgung mit C-Teilen

Quellen
http://www.wuerth-industrie.com/web/de/wuerthindustrie/cteile_management/systemloesungen/arbeitsplatz/ibinwp_vernetzterarbeitsplatz/ibinworkplace.php, Stand: 17.02.2017

Bild 4-19: Dienstesteckbrief für den Dienst „Object Self Service“

4.4.3 Umsetzungsroadmap

Die Umsetzung der ausgewählten Lösungen wird mit Hilfe einer Umsetzungsroadmap geplant. Diese ist ebenfalls angelehnt an das Instrument der Technologie-Roadmap, einem in der Praxis weit verbreiteten Werkzeug zur Durchführung der Technologieplanung. Aus einer Technologie-Roadmap geht hervor, wann welche Technologie für eine Marktleistung einzusetzen ist. Sie unterstützen den Technologieplanungsprozess, indem sie den Weg zum Ziel mitsamt seinen Zwischenschritten, Abhängigkeiten und alternativen Routen übersichtlich darstellen [SK11, S. 207], [GP14, S. 166]. In der Praxis existieren vielfältige Formen von Technologie-Roadmaps. Ursache dafür sind unterschiedliche Bezugsobjekte, Ziele und Interessengruppen. Eine standardisierte Darstellungsform für alle Einsatzgebiete existiert nicht [MI08, S. 7], [SK11, S. 207]. Die EUROPEAN INDUSTRIAL RESEARCH MANAGEMENT ASSOCIATION (EIRMA) schlägt jedoch eine generische Darstellungsform für Technologie-Roadmaps mit vier konstituierenden Merkmalen vor. Diese sind die *Zeitachse*, die *Planungsebenen* Markt, Produkt und Technologie, die *Planungsobjekte* in Balkenform sowie die *Verknüpfung zwischen den Planungsobjekten* [EIR97], [SK11, S. 207].

Der Aufbau der in dieser Arbeit verwendeten Umsetzungsroadmap orientiert sich an der generischen Darstellungsform von Technologie-Roadmaps der EIRMA. Die Planungsebenen sind die verschiedenen CPS-Komponenten. Planungsobjekte, die in Balkenform dargestellt werden, sind die Handlungselemente der CPS-Komponenten. Auf der Zeitachse wird angegeben, wann welches Lösungselement für den Einsatz im Serienprodukt

zur Verfügung steht. Zudem werden Abhängigkeiten zwischen Lösungselementen gekennzeichnet, sofern diese bestehen. Bild 4-20 veranschaulicht den Aufbau der Umsetzungsroadmap anhand eines Beispiels. In dem Beispiel werden zunächst die Verbesserungen der CPS-Komponenten Aktorik und Sensorik umgesetzt. Die Umsetzung endet mit der Integration eines „Drehstrommotors“ zur Verbesserung der Aktorik und mit der Integration „Piezoelektrischer Sensoren“ zur Verbesserung der Sensorik. Anschließend beginnt die Umsetzung der CPS-Komponente Informationsverarbeitung, bei der zunächst das Handlungselement *Steuerung/Regelung* verbessert wird. Mit der Integration eines Industrie-PCs beginnt die Verbesserung der Handlungselemente *Identifikation und Adaption* sowie *Optimierung*. Der IPC ist eine technische Grundlage für die Bereitstellung und Nutzung von Diensten, die nun schrittweise integriert werden. Diese Abhängigkeit wird in der Umsetzungsroadmap markiert. Durch das Hilfsmittel der Umsetzungsroadmap wird die aus dem Reifegradmodell für CPS resultierende Handlungselemente-Roadmap präzisiert (vgl. Abschnitt 4.3.3.2). Somit entsteht ein konkreter Plan für die Leistungssteigerung technischer Systeme.

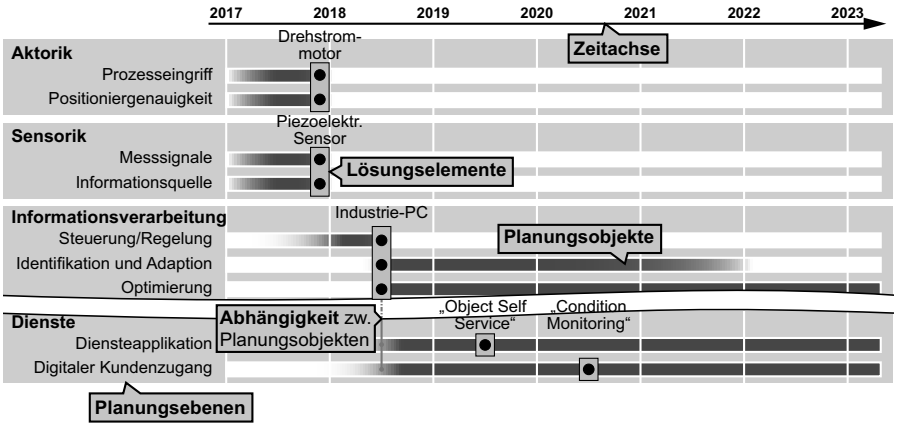


Bild 4-20: Beispiel einer Umsetzungsroadmap (Auszug)

4.5 Vorgehensmodell zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems

Gegenstand dieses Abschnitts ist ein *Vorgehensmodell zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems*. Ziel ist ein konkreter Plan für die Leistungssteigerung technischer Systeme, ausgehend von der derzeitigen Leistungsfähigkeit hin zu einer definierten Zielposition. Das Vorgehensmodell beschreibt detailliert die durchzuführenden Tätigkeiten und steuert den Einsatz der Hilfsmittel. Nach dem Referenzmodell der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen nach GAUSEMEIER ist das Vorgehensmodell in die Strategische Produktplanung einzuordnen (vgl. Abschnitte 2.4.1 und 2.4.2). Ausgangspunkt sind Erkenntnisse der Potentialfindung, in der

Erfolgspotentiale für die Weiterentwicklung der technischen Systeme identifiziert wurden. Initiiert durch die Potentialfindung unterstützt das Vorgehensmodell in der Produktfindung die Erschließung neuer Produkt- und Dienstleistungsideen. Darüber hinaus stellt es mit der Ermittlung und Auswahl alternativer Lösungskonzepte die Schnittstelle zur Geschäftsplanung sowie zur Produkt- und Dienstleistungsentwicklung her.

Das Vorgehensmodell gliedert sich in sechs aufeinanderfolgende Phasen, in denen das Reifegradmodell und die Hilfsmittel zur Konzipierung von CPS unterstützend eingesetzt werden. Die Anwendung des Reifegradmodells kann durch die Webapplikation *CPS Maturity Assessment* unterstützt werden (vgl. Abschnitt 4.3.4). Bild 4-21 verdeutlicht den Ablauf der Phasen, Aufgaben und Resultate, die nachfolgend beschrieben werden.

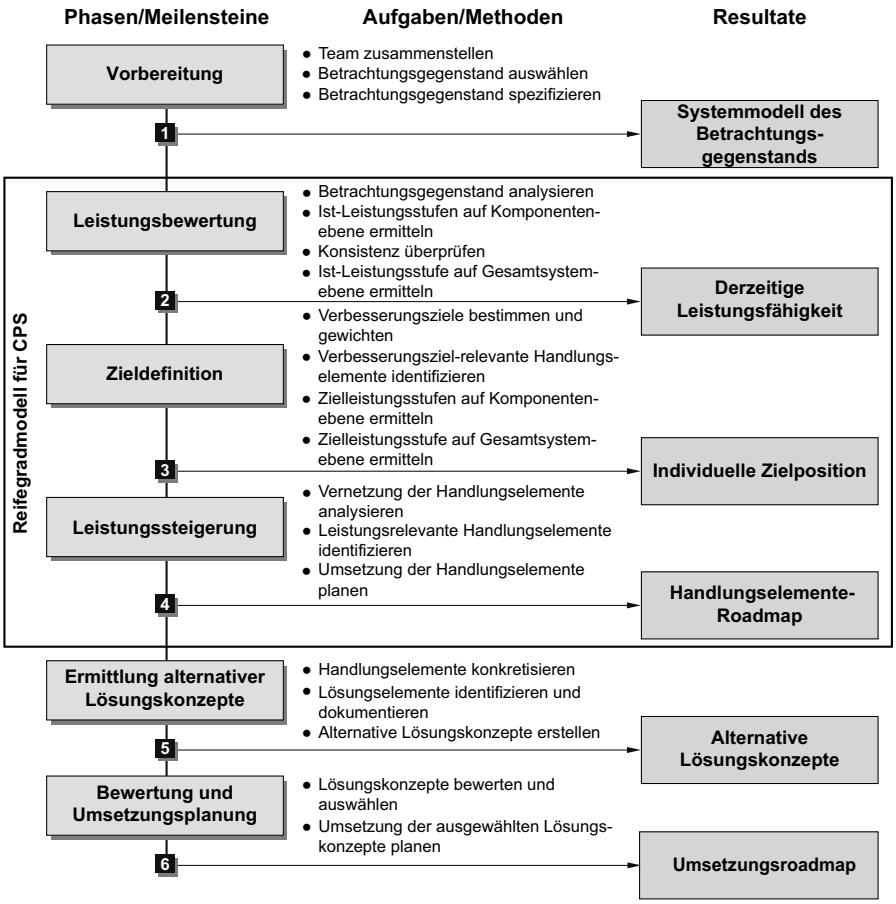


Bild 4-21: Vorgehensmodell zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems

4.5.1 Phase 1: Vorbereitung

Die in der Potentialfindung ermittelten Erfolgspotentiale für die Weiterentwicklung der technischen Systeme hin zu Cyber-Physical Systems bilden den Ausgangspunkt für die erste Phase des Vorgehensmodells: die *Vorbereitung*. Hier gilt es zunächst ein interdisziplinäres Team zusammenzustellen, das die Phasen des Vorgehensmodelles gemeinsam durchläuft. Das Team kann z.B. aus Produktplanern, Technologiemanagern, Entwicklern unterschiedlicher Fachdisziplinen und Vertriebsmitarbeitern bestehen. Auch der Einbezug innovativer Kunden bzw. Anwender, sog. Lead User [Lüt07, S. 48ff.], ist zu prüfen.

Neben der Teamzusammenstellung ist die Auswahl des zu betrachtenden Systems Gegenstand der ersten Phase. Sofern ein Unternehmen mehrere Produktgruppen anbietet, muss zunächst die geeignete Produktgruppe ausgewählt und daraus das zu betrachtende Produkt bestimmt werden. Im Sinne der CPS-Referenzarchitektur handelt es sich hierbei in der Regel um ein Teilsystem, das einem eigenen Zweck dient und unabhängig von anderen Teilsystemen entwickelt wird. Auswahlkriterien sind z.B. die ermittelten Erfolgspotentiale für ein Produkt, dessen Referenzcharakter für andere Produktgruppen oder innovative Konkurrenzprodukte von Marktbegleitern. Nach der Auswahl des Betrachtungsgegenstands wird dieser fachdisziplinübergreifend spezifiziert. Mit Hilfe der in Abschnitt 4.4.1 vorgestellten **Modellkonstrukte zur Spezifikation von CPS** wird das Umfeldmodell sowie die Wirkstruktur des zu betrachtenden Systems erstellt. Das daraus entstehende Systemmodell erzeugt ein einheitliches Systemverständnis im interdisziplinären Team und bildet das zentrale Kommunikationsmittel für die weiteren Phasen.

Zusammenfassend wird in dieser Phase folgendes **Hilfsmittel** eingesetzt:

- Modellkonstrukte zur Spezifikation von CPS (vgl. Abschnitt 4.4.1)

Resultat dieser Phase ist ein *Systemmodell des Betrachtungsgegenstands*. Dieses enthält alle wesentlichen fachdisziplinübergreifenden Informationen über das System (vgl. Abschnitt 2.4.4).

4.5.2 Phase 2: Leistungsbewertung

Das Ziel der Phase *Leistungsbewertung* ist die objektive Bewertung des Ausgangszustands des zu betrachtenden Systems. Dazu wird das **Reifegradmodell für CPS** inkl. der bereitgestellten Hilfsmittel und Berechnungsvorschriften angewendet (vgl. Abschnitt 4.3). Für die Leistungsbewertung sieht das Reifegradmodell zunächst die Systemanalyse mittels **CPS-Canvas** vor (vgl. Abschnitt 4.3.1.1). Die Leitfragen werden durch das interdisziplinäre Team mit Hilfe des zuvor erstellten Systemmodells beantwortet. Ergänzende Informationsquellen sind Stücklisten, Zeichnungen, Schaltpläne etc. Die ausgefüllte CPS-Canvas enthält schließlich alle CPS-relevanten Informationen des Betrachtungsgegenstands.

Auf Basis der akquirierten Informationen erfolgt die Bewertung des zu betrachtenden Systems, die eine objektive und vergleichbare Aussage über dessen aktuelle Leistungsfähigkeit zulässt. Hierfür wird das System zunächst mit Hilfe der **Leistungsstufen auf Komponentenebene** bewertet (vgl. Abschnitt 4.3.1.2). Im Team werden die einzelnen Handlungselemente jeder CPS-Komponente gemeinsam einer Leistungsstufe zugeordnet. Es besteht dabei die Möglichkeit, dass eine eindeutige Bestimmung der Leistungsstufe einiger Handlungselemente nicht sofort möglich ist. Hierbei ist es sinnvoll, weitere Dokumente über die CPS-Komponente zu sichten (z.B. Datenblätter) oder Personen aus den relevanten Fachabteilungen hinzuzuziehen.

Nach der Bewertung aller Leistungsstufen auf Komponentenebene ist die Plausibilität mit Hilfe der **Konsistenzmatrix** zu prüfen (vgl. Abschnitt 4.3.1.2). Dazu wird die Konsistenzmatrix ausgefüllt, indem eine paarweise Bewertung der Konsistenz von Leistungsstufen auf Komponentenebene durchgeführt wird. Hierbei fallen inkonsistente Bewertungen von CPS-Komponenten auf, die es erneut zu überprüfen gilt. Die Konsistenzmatrix muss in der Regel nur bei der erstmaligen Verwendung des Reifgradmodells im Unternehmen ausgefüllt werden. Nach der Bewertung der Leistungsstufen auf Komponentenebene und der Konsistenzprüfung wird die Leistungsstufe auf Gesamtsystemebene bestimmt. Dabei unterstützen die **Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene** inkl. der Steckbriefe, in denen mögliche Minimalausprägungen für die Leistungsstufen auf Komponentenebene beschrieben werden (vgl. Abschnitt A3.1 im Anhang). Das zu betrachtende System wird der Gesamtsystemleistungsstufe zugeordnet, bei der mindestens die Minimalausprägung auf Komponentenebene vorliegen. Mit Hilfe der Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene soll eine Aussage über die derzeitige Leistungsfähigkeit des zu betrachtenden Systems getroffen werden.

Folgende **Hilfsmittel** unterstützen die Phase *Leistungsbewertung*:

- Reifegradmodell für CPS (vgl. Abschnitt 4.3), insbesondere:
    - CPS-Canvas (vgl. Abschnitt 4.3.1.1)
    - Leistungsstufen auf Komponentenebene (vgl. Abschnitt 4.3.1.2)
    - Konsistenzmatrix (vgl. Abschnitt 4.3.1.2)
    - Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene (vgl. Abschnitt 4.3.1.2 und Abschnitt A3.1 im Anhang)

Resultat dieser Phase ist eine plausible Aussage über die *derzeitige Leistungsfähigkeit* des Betrachtungsgegenstands auf Komponenten- und Gesamtsystemebene.

4.5.3 Phase 3: Zieldefinition

Aufbauend auf der Bestimmung der derzeitigen Leistungsfähigkeit wird in Phase 3 die individuelle Zielposition für das zu betrachtende System definiert. Dazu werden unter

Berücksichtigung der Geschäftsstrategie Verbesserungsziele bestimmt, die konkrete Absichten enthalten, zu welchem Zweck eine Leistungssteigerung des Systems dienen soll. Das Reifegradmodell für CPS stellt dafür einen **Katalog mit Verbesserungszielen** im Kontext von CPS bereit (vgl. Abschnitt 4.3.2.1). Anhand des Katalogs und der Geschäftsstrategie werden im Team Verbesserungsziele ausgewählt und ggf. eigene Verbesserungsziele formuliert. Eine genaue Anzahl von Verbesserungszielen wird nicht vorgegeben, wobei eine hohe Anzahl (größer als zehn Verbesserungsziele) eine Fokussierung der Systemverbesserung erschwert. Nach der Benennung der angestrebten Verbesserungsziele werden diese mittels einer **Relevanzmatrix** priorisiert (vgl. Abschnitt 4.3.2.1). Durch einen paarweisen Vergleich der Ziele ergibt sich eine Rangfolge, anhand derer wichtige und weniger wichtige Ziele unterschieden werden.

Im Anschluss an die Bestimmung und Gewichtung der Verbesserungsziele wird im Rahmen der Zielbestimmung für jedes Handlungselement eine Zielleistungsstufe bestimmt. Zunächst werden dazu die Handlungselemente identifiziert, die zur Erfüllung der Verbesserungsziele besonders relevant sind. Dabei unterstützt die **Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente** (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Mit Hilfe dieser Matrix erfolgt die Bewertung des Zielbeitrags jedes Handlungselements zu den einzelnen Verbesserungszielen. Wesentliches Ergebnis dieser Bewertung sind die Zielbeitragsindizes als Indikatoren für die relevantesten Handlungselemente. Zur Definition der Zielleistungsstufen je Handlungselement dient nun die **Zielbeitragsmatrix der Leistungsstufen** (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Damit wird der Beitrag jeder Leistungsstufe eines Handlungselements zu den Verbesserungszielen bewertet. Mittels der Matrix und den dort hinterlegten Berechnungsvorschriften werden Leistungsstufen der Handlungselemente identifiziert, die den höchsten Zielbeitrag haben. Diese stellen die Zielleistungsstufen auf Komponentenebene für das zu betrachtende System dar. Daraus ergibt sich automatisch die Zielleistungsstufe auf Gesamtsystemebene, die analog zur Phase der Leistungsbewertung aus den **Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene** abgeleitet werden kann (vgl. Abschnitt A3.1 im Anhang). Auch hier gilt: das zu betrachtende System wird der Gesamtsystemleistungsstufe zugeordnet, bei der mindestens die Minimalausprägung auf Komponentenebene vorliegt.

In der Phase *Zieldefinition* unterstützen folgende **Hilfsmittel**:

- Reifegradmodell für CPS (vgl. Abschnitt 4.3), insbesondere:
    - Katalog der Verbesserungsziele (vgl. Abschnitt 4.3.2.1)
    - Relevanzmatrix der Verbesserungsziele (vgl. Abschnitt 4.3.2.1)
    - Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente (vgl. Abschnitt 4.3.2.2)
    - Zielbeitragsmatrix der Leistungsstufen (vgl. Abschnitt 4.3.2.2)
    - Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene (vgl. Abschnitt 4.3.1.2 und Abschnitt A3.1 im Anhang)

Resultat der dritten Phase ist eine *individuelle Zielposition* für das zu betrachtende System. Diese beschreibt für jedes Handlungselement die anzustrebende Leistungsstufe sowie die Zielleistungsstufe auf Gesamtsystemebene.

4.5.4 Phase 4: Leistungssteigerung

Die systematische Planung einer inkrementellen evolutionären Leistungssteigerung ist Gegenstand der vierten Phase. Dazu wird festgelegt, welche Handlungselemente in welcher Reihenfolge angegangen werden, um die Lücke zwischen der derzeitigen Leistungsfähigkeit und der definierten Zielposition zu schließen. Im Rahmen der Leistungsrelevanzanalyse werden die Handlungselemente identifiziert, die einen hohen Beitrag zu den Verbesserungszielen haben und gleichzeitig stark mit anderen Handlungselementen vernetzt sind. Da der Zielbeitrag bereits in Phase 3 ermittelt wurde, wird in Phase 4 nun die direkte Vernetzung der Handlungselemente untersucht. Dies erfolgt mit Hilfe der **Einflussmatrix der Handlungselemente**, in der bewertet wird, wie stark ein Handlungselement ein anderes beeinflusst (vgl. Abschnitt 4.3.3.1). Die daraus resultierenden Vernetzungsindizes geben Aufschluss über den Vernetzungsgrad. Je höher der Wert ist, desto stärker ist die Vernetzung eines Handlungselements und die Auswirkung einer Veränderung auf das Gesamtsystem. Stark vernetzte Handlungselemente sind also wichtig für eine nachhaltige Veränderung des Systems, verursachen aber durch ihre Vernetzung einen hohen Änderungsaufwand. Zur Absicherung der Ergebnisse kann neben der direkten auch eine indirekte Einflussanalyse durchgeführt werden. Handlungselemente mit einer hohen Anzahl indirekter Beziehungen sind gesondert zu prüfen.

Für jedes Handlungselement liegen nun Informationen über den Zielbeitrag (Zielbeitragsindex) und den Vernetzungsgrad (Vernetzungsindex) vor. Durch die Übertragung der Zielbeitrags- und Vernetzungsindizes in das **Leistungsrelevanzportfolio** können die Handlungselemente identifiziert werden, die stark vernetzt sind und gleichzeitig einen hohen Zielbeitrag haben (vgl. Abschnitt 4.3.3.1). Anhand der Positionierung im Portfolio sind somit erste Aussagen über eine Priorisierung der Handlungselemente möglich. Die im Portfolio abgegrenzten Bereiche geben idealtypische Strategien zur Umsetzung der Handlungselemente vor, die im Team zu diskutieren und ggf. anzupassen sind.

Im Anschluss an die Leistungsrelevanzanalyse erfolgt die grobe Umsetzungsplanung. Zentrales Hilfsmittel dafür ist die **Handlungselemente-Roadmap** (vgl. Abschnitt 4.3.3.2). Unter Berücksichtigung der Positionierungen im Leistungsrelevanzportfolio wird der ungefähre zeitliche Rahmen für die Umsetzung der Handlungselemente in der Handlungselemente-Roadmap eingetragen. Dadurch entsteht ein grober Plan für die Leistungssteigerung des zu betrachtenden Systems.

Die für diese Phase erforderlichen **Hilfsmittel** sind:

- Reifegradmodell für CPS (vgl. Abschnitt 4.3), insbesondere:
    - Einflussmatrix der Handlungselemente (vgl. Abschnitt 4.3.3.1)

- Leistungsrelevanzportfolio (vgl. Abschnitt 4.3.3.1)
- Handlungselemente-Roadmap (vgl. Abschnitt 4.3.3.2)

Resultat der Phase *Leistungssteigerung* ist die *Handlungselemente-Roadmap.* Diese sagt aus, welche Handlungselemente wann umgesetzt werden sollen, um die Lücke zwischen der derzeitigen Leistungsfähigkeit und dem ermittelten Zielreifegrad zu schließen.

4.5.5 Phase 5: Ermittlung alternativer Lösungskonzepte

Die Ermittlung alternativer Lösungskonzepte ist Gegenstand von Phase 5. Zunächst werden dazu im Systemmodell (vgl. Phase 1) die CPS-Komponenten mit den leistungsrelevantesten Handlungselementen (vgl. Phase 4) gekennzeichnet. So wird im Hinblick auf das Gesamtsystem deutlich, welche Komponenten zur Leistungssteigerung verbessert werden müssen und welche dafür irrelevant sind. Für jede der gekennzeichneten Komponenten gilt es nun Lösungselemente zu identifizieren, die potentiell zu einer Verbesserung der Leistungsstufen auf Komponentenebene führen können. Zur Ermittlung alternativer Lösungen wird ein **morphologischer Kasten** eingesetzt, in dem für jede CPS-Komponente und deren Handlungselemente alternative Lösungen eingetragen werden können (vgl. Abschnitt 4.4.2). Die zuvor ermittelten Ist- und Zielleistungsstufen schränken dabei den Lösungsraum bewusst ein, sodass nur Lösungselemente zu identifizieren sind, die sich in dem Bereich zwischen Ist- und Zielleistungsstufe bewegen. Bei der Suche nach möglichen Lösungselementen kommen sowohl Weiterentwicklungen bestehender Komponenten (z.B. verbesserte Technologie) als auch grundsätzlich neue Lösungselemente (z.B. anderes Wirkprinzip) in Frage. Zur Vereinfachung der Lösungssuche bieten sich u.a. Kataloge (z.B. Konstruktionskatalog von ROTH [ROT00]), Internetrecherche oder der Besuch von Fachmessen an. Idealerweise besteht im Unternehmen eine Abteilung für das Technologiemanagement, die ggf. bei der Identifikation geeigneter Lösungen unterstützen kann. Die identifizierten Lösungselemente werden mit Hilfe der **Technologie- und Dienstesteckbriefe** einheitlich und vergleichbar dokumentiert (vgl. Abschnitt 4.4.2). Durch die in den Steckbriefen enthaltenen Informationen können die Lösungselemente im morphologischen Kasten den richtigen Leistungsstufen zugeordnet werden. Dabei ist es möglich, dass ein Lösungselement gleichzeitig für mehrere Leistungsstufen gültig ist.

Nach der Befüllung des morphologischen Kastens können alternative Kombinationen von Lösungselementen zur Gesamtlösung erstellt werden. Die vielversprechendsten Kombinationen werden mit Hilfe der **Modellkonstrukte zur Spezifikation von CPS** modelliert (vgl. Abschnitt 4.4.1). So entstehen verschiedene Varianten des Systemmodells, die die alternativen Lösungskonzepte abbilden.

Erforderliche **Hilfsmittel** für die fünfte Phase sind:

- Morphologischer Kasten (vgl. Abschnitt 4.4.2)
- Technologie- und Dienstesteckbriefe (vgl. Abschnitt 4.4.2)

- Modellkonstrukte zur Spezifikation von CPS (vgl. Abschnitt 4.4.1)

Resultat dieser Phase sind *alternative Lösungskonzepte*. Der Aufbau und die prinzipielle Wirkungsweise der Konzepte werden durch Varianten des Systemmodells abgebildet.

4.5.6 Phase 6: Bewertung und Umsetzungsplanung

Die abschließende Phase des Vorgehensmodells ist die *Bewertung und Umsetzungsplanung*. Dort werden die alternativen Lösungskonzepte miteinander verglichen und anhand technischer und wirtschaftlicher Kriterien bewertet [GEK01, S. 229]. Die Bewertungskriterien, wie z.B. Umsetzungsaufwand, Know-how-Bedarf oder Dienstepotentiale werden gemeinsam im Team festgelegt und die alternativen Konzepte mit Hilfe auszuwählender **Bewertungsmethoden** (z.B. Nutzwertanalyse[45]) bewertet. Bei der Bewertung können erneut die **Technologie- und Dienstesteckbriefe** herangezogen werden, in denen u.a. Vor- und Nachteile von Technologien oder Best Practices von Diensten beschrieben werden (vgl. Abschnitt 4.4.2). Auf Basis der Bewertungsergebnisse werden ein oder mehrere Lösungskonzepte zur Umsetzung vorgeschlagen.

Die Umsetzungsplanung der ausgewählten Konzepte erfolgt anhand einer **Umsetzungsroadmap** (vgl. Abschnitt 4.4.3). Diese konkretisiert die in Phase 4 erstellte Handlungselemente-Roadmap um konkrete Lösungselemente und gibt auf der Zeitachse an, wann welches Lösungselement für den Serieneinsatz zur Verfügung stehen soll. Dabei ist es wichtig, auf mögliche Abhängigkeiten zwischen den Lösungselementen zu achten und diese in der Roadmap zu kennzeichnen. Abhängigkeiten bestehen insbesondere bei der Umsetzung von Diensten, da für diese in der Regel eine bestimmte technologische Grundlage geschaffen werden muss.

Einzusetzende **Hilfsmittel** in der Phase *Bewertung und Umsetzungsplanung* sind:

- Bewertungsmethoden (z.B. Nutzwertanalyse)
- Technologie- und Dienstesteckbriefe (vgl. Abschnitt 4.4.2)
- Umsetzungsroadmap (vgl. Abschnitt 4.4.3)

Resultat der sechsten Phase ist eine *Umsetzungsroadmap*. Damit liegt als abschließendes Ergebnis des Vorgehensmodells ein konkreter Plan für die Leistungssteigerung des zu betrachtenden Systems vor.

---

[45] Die von ZANGENMEISTER entwickelte Nutzwertanalyse ist eine Bewertungsmethode, die eine Vergleichbarkeit zwischen Alternativen herstellen soll [Zan76], [Lin16, S. 791].

5 Anwendung und Bewertung

In diesem Kapitel wird die *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus* validiert. Die Validierung in Abschnitt 5.1 erfolgt am Beispiel eines Separators und orientiert sich am Vorgehensmodell (vgl. Abschnitt 4.5), im Rahmen dessen das Reifegradmodell für CPS (vgl. Abschnitt 4.3) sowie die Hilfsmittel zur Konzipierung von CPS (vgl. Abschnitt 4.4) eingesetzt werden. Abschnitt 5.2 bildet den Abschluss des Kapitels. Es werden die erarbeiteten und validierten Inhalte der Systematik anhand der Anforderungen aus der Problemanalyse (vgl. Abschnitt 2.7) bewertet.

5.1 Anwendungsbeispiel Separator

Die Validierung des in Abschnitt 4.5 vorgestellten *Vorgehensmodells für die Reifegradmodell-basierte Planung von Cyber-Physical Systems* erfolgt beispielhaft an einer Industriezentrifuge, einem sog. Separator. Separatoren dienen zur mechanischen Trennung von mehreren Phasen mit unterschiedlichen Dichten im zugeführten Rohprodukt. Das Funktionsprinzip von Separatoren basiert auf der Zentrifugalkraft und den unterschiedlichen Massenträgheiten disperser Phasen. Aufgrund der höheren Trägheit werden Substanzen mit höherer Dichte vom Drehzentrum wegbefördert und verdrängen dabei die Substanzen mit niedrigerer Dichte. Nach diesem Prinzip trennen Separatoren zwei- oder mehrphasige Gemische [Sta04, S. 726]. Anwendungsbereiche sind u.a. die Milchverarbeitung, die Getränke- und Lebensmittelproduktion sowie die Chemie- und Pharmaindustrie. Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten existieren vielfältige Ausführungen von Separatoren wie z.B. Düsenseparatoren, Kammerseparatoren oder Tellerseparatoren [Ana15, S. 139].

Separatoren agieren in heterogenen Produktionsprozessen und müssen dort, trotz Schwankungen übergeordneter Prozesse, eine hohe Zuverlässigkeit und Effizienz des Trennprozesses gewährleisten. Heute sind Separatoren in der Regel mechatronische Systeme für deren optimale Prozessauslegung umfangreiches maschinen- und prozessseitiges Wissen erforderlich ist [its14-ol]. Durch die zunehmende Durchdringung mit IKT entwickeln sich Separatoren weiter zu CPS. Dies eröffnet vielfältige Potentiale für zuverlässigere und effizientere Trennprozesse, aber auch für neue Marktleistungen. Bild 5-1 veranschaulicht die Vision eines Separators als Cyber-Physical System anhand der Referenzarchitektur für CPS. Dort kommuniziert der Separator drahtlos mit weiteren Systemen im übergeordneten Prozess (z.B. Dekanter und Hefetanks). Daten (z.B. Maschinendaten) sämtlicher am Gesamtprozess beteiligten Systeme werden zentral gespeichert und ausgewertet. Auf Basis der Daten werden Dienste angeboten, wie z.B. die eigenständige Bestellung von Ersatzteilen („Digital Self Service“). Benutzer wie Maschinenbediener oder Servicetechniker interagieren mit dem Separator multimodal mittels digitaler Endgeräte (z.B. Tablet-PC und Datenbrille).

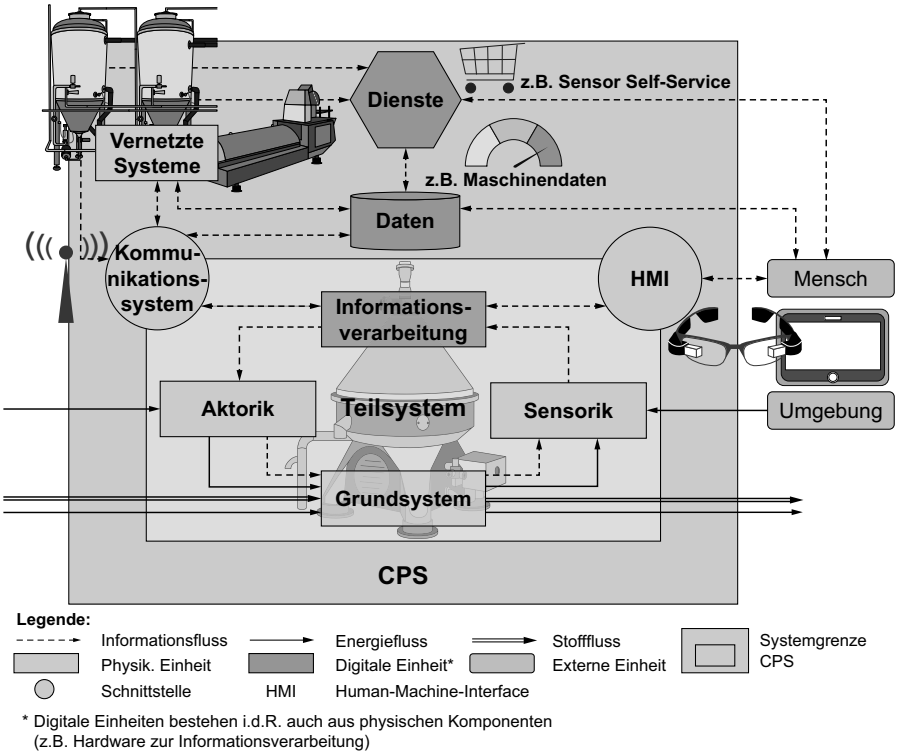


Bild 5-1: Vision eines Separators als Cyber-Physical System

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein selbstentleerender Tellerseparator für die Bierklärung betrachtet. Dieser klärt grobe Feststoffe aus ungefiltertem Bier, trägt diese diskontinuierlich aus und führt das geklärte Bier kontinuierlich ab. An diesem Beispiel wird nachfolgend gezeigt, wie eine inkrementelle evolutionäre Leistungssteigerung mit Hilfe der Systematik geplant werden kann.

5.1.1 Phase 1: Vorbereitung

Im Rahmen der ersten Phase wird zunächst das Team für die Planung der Leistungssteigerung des Separators zusammengestellt. Dieses besteht aus Experten der Fachbereiche Konstruktion, Automatisierung, Verfahrenstechnik und Service. Die Zusammenstellung bündelt maschinenseitiges Wissen über Mechanik, Elektrotechnik und Softwaretechnik, prozessseitiges Wissen über die Verfahrensabläufe im Separator sowie Wissen über den Betrieb beim Kunden. Als Betrachtungsgegenstand wird ein selbstentleerender Tellerseparator für die Bierklärung ausgewählt. Wesentliches Entscheidungskriterium dafür ist der Referenzcharakter des Systems. Erkenntnisse aus der Leistungssteigerung können anschließend für die Verbesserung weiterer Separatoren z.B. in der Milch- und Getränkeproduktion genutzt werden.

Unter Zuhilfenahme der **Modellkonstrukte zur Spezifikation von CPS** wird das Systemmodell des Separators erstellt (vgl. Abschnitt 4.4.1). Dieses besteht aus dem Umfeldmodell und der Wirkstruktur, sodass der grundsätzliche Aufbau und die prinzipielle Wirkungsweise des Separators sowie dessen Interaktion mit dem Umfeld disziplinunabhängig abgebildet werden. Wichtige Informationsgrundlage bei der Systemmodellierung sind existierende Entwicklungsdokumente wie Konstruktionsunterlagen oder Funktionspläne. Bild 5-2 zeigt einen Ausschnitt des Systemmodells, das aus Geheimhaltungsgründen stark vereinfacht dargestellt wird.

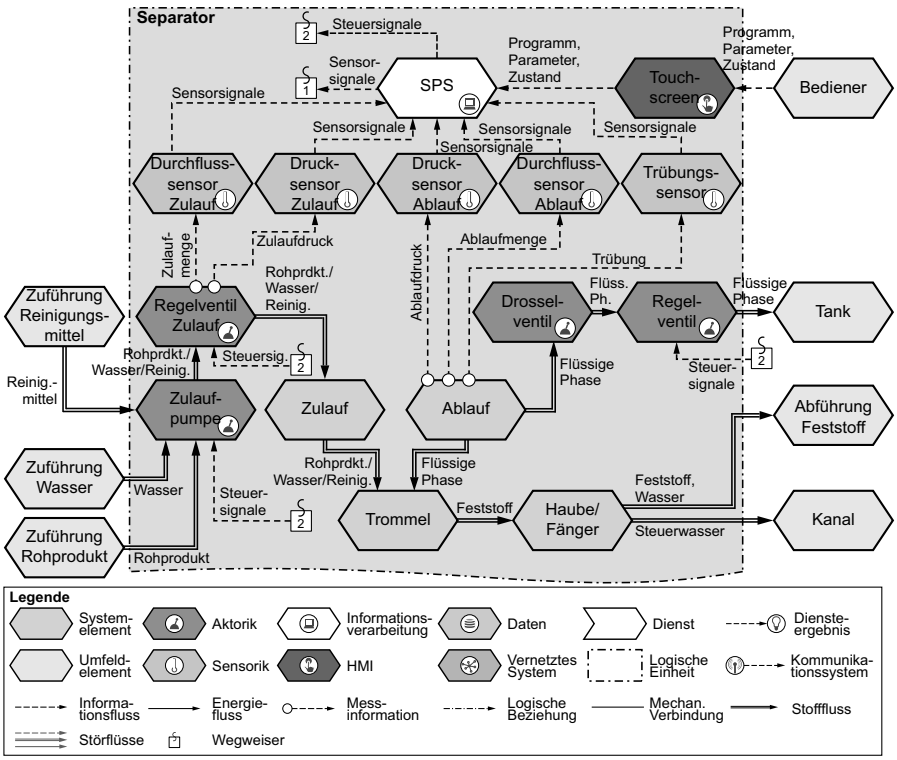


Bild 5-2: Systemmodell des Separators – stark vereinfacht (Auszug)

Es wird deutlich, dass der Separator bereits über diverse CPS-relevante Komponenten verfügt. Mit *Sensoren* wie z.B. „Durchflusssensor Zulauf“, „Drucksensor Ablauf“ oder „Trübungssensor“ werden verschiedene Zustandsgrößen erfasst. Diese sind sowohl Zustandsgrößen des Prozesses (z.B. „Zulaufdruck“ oder „Trübung“) als auch des Systems (z.B. „Vibration“ oder „Drehzahl“), jedoch keine Zustandsgrößen des Umfelds. Zur Einwirkung auf physikalische Vorgänge dienen unterschiedliche *Aktoren* wie z.B. die „Zulaufpumpe“ oder das „Drosselventil“. Die Informationsverarbeitung erfolgt derzeit mittels SPS. Als *Mensch-Maschine-Schnittstelle* fungiert ein Touchscreen, über den Programme, Parameter und Systemzustände ein- und ausgegeben werden können. Der Separator kommuniziert derzeit nicht mit weiteren Systemen im übergeordneten Prozess.

Zudem werden keine Daten zur Weiterverarbeitung gespeichert und keine Dienste genutzt oder bereitgestellt. Wesentliches **Resultat** der ersten Phase ist das *Systemmodell des Separators*, das alle wesentlichen Informationen für die weiteren Phasen fachdisziplinübergreifend beschreibt.

5.1.2 Phase 2: Leistungsbewertung

Mit der zweiten Phase beginnt die Anwendung des Reifegradmodells für CPS (vgl. Abschnitt 4.3), dessen Durchführung durch die Webapplikation *CPS Maturity Assessment* unterstützt wird (vgl. Abschnitt 4.3.4). Zur Systemanalyse werden zunächst die Leitfragen der **CPS-Canvas** beantwortet (vgl. Abschnitt 4.3.1.1). Dies erfolgt im Rahmen eines Workshops mit dem interdisziplinären Team. Neben dem Systemmodell werden hierzu die Konstruktionsunterlagen, Stücklisten und Funktionspläne des Separators hinzugezogen. Bild 5-3 bildet die ausgefüllte CPS-Canvas für den Separator ab. Es wird erneut deutlich, dass der Separator über diverse Sensoren und Aktoren sowie über eine Informationsverarbeitung und ein HMI verfügt. Folglich ist der Separator derzeit ein mechatronisches System. Eine Vernetzung mit weiteren Systemen sowie Möglichkeiten zur Speicherung und Weiterverarbeitung von Daten bestehen bislang nicht. Zudem werden Dienste durch den Separator weder genutzt noch bereitgestellt.

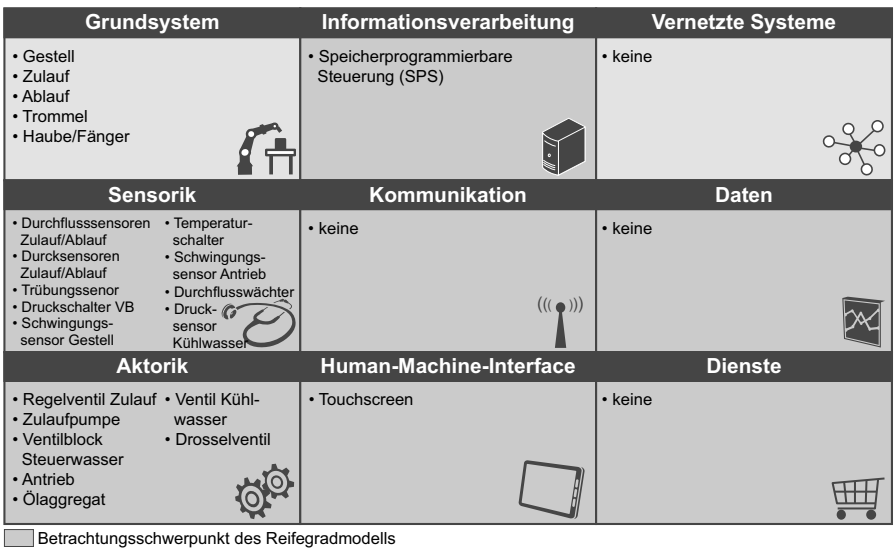


Bild 5-3: CPS-Canvas des Separators

Im Anschluss an die Befüllung der CPS-Canvas erfolgt die Bewertung der derzeitigen Leistungsfähigkeit des Separators. Diese beginnt mit der Ermittlung der **Leistungsstufen auf Komponentenebene** (vgl. Abschnitt 4.3.1.2). Gemeinsam im Team werden die einzelnen Handlungselemente der verschiedenen CPS-Komponenten einer Leistungsstufe zugeordnet. Anschließend wird die Plausibilität der Bewertungen durch die Befüllung der

Konsistenzmatrix überprüft (vgl. Abschnitt 4.3.1.2). Die paarweise Bewertung der Konsistenz der Leistungsstufen ist nötig, da das Reifegradmodell für den Separator erstmalig angewendet wird. Bei erneuter Anwendung für weitere Systeme kann das Team auf die Ergebnisse der Konsistenzbewertung zurückgreifen. Nach Abschluss der Konsistenzbewertung zeigt die Webapplikation automatisch an, welche Bewertungen der Leistungsstufen auf Komponentenebene nicht plausibel sind. Die fehlerhaften Bewertungen werden anschließend korrigiert. Bild 5-4 zeigt die Bewertungsergebnisse für den Separator.

CPS-Komponenten	Handlungselemente	Nr.	Leistungsstufen 1	2	3	4	5
Aktorik	Prozesseingriff	AK1				■	
	Positioniergenauigkeit	AK2				■	
Sensorik	Messsignale	SE1				■	
	Informationsquelle	SE2			■		
Informationsverarbeitung	Steuerung/Regelung	IV1		■			
	Identifikation und Adaption	IV2		■			
	Optimierung	IV3	■				
Kommunikationssystem	Vertikale Integration	KO1	■				
	Horizontale Integration	KO2	■				
	Konnektivität	KO3				■	
	Netzwerkverbindung	KO4	■				
	Security	KO5	■				
HMI	Funktionalität des HMI	HM1			■		
	Ort des HMI	HM2	■				
	Multimodalität	HM3	■				
Daten	Datenspeicherung	DA1	■				
	Datenanalyse	DA2	■				
	Nutzung externer Daten	DA3	■				
Dienste	Diensteapplikation	DI1	■				
	Digitaler Kundenzugang	DI2	■				

■ Ist-Leistungsstufen

Bild 5-4: Übersicht der Ist-Leistungsstufen auf Komponentenebene des Separators

Es wird deutlich, dass die Handlungselemente von Sensorik und Aktorik bereits gut ausgeprägt sind, da sie zum Teil die Leistungsstufe 4 erreichen. Weniger gut ausgeprägt sind die Handlungselemente der übrigen Komponenten, die zum Großteil mit der Leistungsstufe 1 bewertet werden. Durch den Abgleich der Bewertungen der Leistungsstufen auf Komponentenebene mit den **Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene** (vgl. Abschnitt 4.3.1.2) resultiert für das Gesamtsystem Separator die Leistungsstufe 1 „Überwachung“. Der Separator ist somit in der Lage, umfassende Daten des Systems und des Prozesses zu erfassen. Die Speicherung und Verarbeitung der Daten ist bislang jedoch nicht möglich. Als **Resultat** der Phase *Leistungsbewertung* liegt eine plausible Aussage über die *derzeitige Leistungsfähigkeit* des Separators vor, sowohl auf Komponenten- als auch auf Gesamtsystemebene.

5.1.3 Phase 3: Zieldefinition

Im Rahmen der Phase *Zieldefinition* wird die angestrebte Zielposition für den Separator bestimmt. Diese hängt von den Verbesserungszielen ab, die mit der Leistungssteigerung erreicht werden sollen. Die Formulierung der Verbesserungsziele erfolgt mit Hilfe des **Katalogs der Verbesserungsziele** (vgl. Abschnitt 4.3.2.1). Für den Separator werden folgende zehn Verbesserungsziele festgelegt, die in Tabelle A-2 im Anhang näher beschrieben werden: 1) Systemverfügbarkeit erhöhen; 2) Ausschuss reduzieren; 3) Prozesstransparenz erhöhen; 4) Automatisierungsgrad steigern; 5) Benutzungsfreundlichkeit verbessern; 6) Adaptivität steigern; 7) Vernetzung steigern; 8) Dienstleistungseffizienz verbessern; 9) Kundenzugang verbessern; 10) Inbetriebnahme beschleunigen.

Die ausgewählten Ziele adressieren die Verbesserung des Separators (z.B. „Systemverfügbarkeit erhöhen“), des Klärprozesses (z.B. „Ausschuss reduzieren“) und die Verbesserung von Dienstleistungen (z.B. „Dienstleistungseffizienz verbessern“). Zur Priorisierung der Verbesserungsziele erfolgt ein paarweiser Vergleich mittels **Relevanzmatrix der Verbesserungsziele** (siehe Bild 5-5) (vgl. Abschnitt 4.3.2.1).

Relevanzmatrix der Verbesserungsziele
Fragestellung:
„Ist das Verbesserungsziel i (Zeile) wichtiger als das Verbesserungsziel j (Spalte)?“
Bewertungsskala:
0 = i ist **un**wichtiger als j
1 = i ist wichtiger als j

Verbesserungsziele	Nr.	VZ1 Systemverfügbarkeit erhöhen	VZ2 Ausschuss reduzieren	VZ3 Prozesstransparenz erhöhen	VZ4 Automatisierungsgrad steigern	VZ5 Benutzungsfreundlichkeit verbessern		Relevanzsumme	Rang des Verbesserungsziels R_i	Rangindex F_R
Systemverfügbarkeit erhöhen	VZ1		1	1	0	1		4	2	1,9
Ausschuss reduzieren	VZ2	0		1	0	1		4	2	1,9
Prozesstransparenz erhöhen	VZ3	0	0		0	1		4	2	1,9
Automatisierungsgrad steigern	VZ4	1	1	1		1		5	1	2
Benutzungsfreundlichkeit verbessern	VZ5	0	0	0	0			3	6	1,4
Adaptivität steigern	VZ6	1	1	1	0	1		4	2	1,9
Vernetzung steigern	VZ7	0	0	0	0	1		3	6	1,4
Diensteistungseffizienz verbessern	VZ8	0	0	0	0	0		2	8	1,2
Kundenzugang verbessern	VZ9	0	0	0	0	0		1	9	1,1
Inbetriebnahme beschleunigen	VZ10	0	0	0	0	0		0	10	1

Bild 5-5: Relevanzmatrix der Verbesserungsziele für den Separator (Auszug)

Aus der Relevanzanalyse, die gemeinsam im Team durchgeführt wird, resultiert eine Rangfolge der Verbesserungsziele hinsichtlich ihrer Bedeutung. Für den Separator ist das wichtigste Verbesserungsziel mit dem höchsten Rangindex „Automatisierungsgrad steigern“. Im Gegensatz dazu hat das Ziel „Inbetriebnahme beschleunigen“ die geringste

Priorität für den Separator. Die Rangindizes der weiteren Verbesserungsziele zeigt die Relevanzmatrix in Bild 5-5.

Nach der Benennung und Priorisierung der Verbesserungsziele erfolgt die Identifikation der relevantesten Handlungselemente für die Zielerreichung. Dazu dient die **Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente** (vgl. Abschnitt 4.3.2.2), mit der die Wirkbeziehungen der Handlungselemente zu den Verbesserungszielen analysiert werden. Aus der ausgefüllten Matrix ergibt sich für jedes Handlungselement ein Zielbeitragsindex, der ein Indikator für den Beitrag eines Handlungselements zu den Verbesserungszielen ist. Aus der Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente für den Separator geht hervor, dass die Handlungselemente der CPS-Komponente *Informationsverarbeitung* einen höheren Zielbeitragsindex haben als die des *Kommunikationssystems* (siehe Bild 5-6). Zur Erfüllung der festgelegten Verbesserungsziele sind diese also von höherer Relevanz. Die Zielbeitragsindizes werden in der Phase 4 *Leistungssteigerung* erneut aufgegriffen, um die Leistungsrelevanz der Handlungselemente zu bestimmen (vgl. Abschnitt 5.1.4).

Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente

Fragestellung:
„Wie stark trägt das Handlungselement i (Zeile) zum Verbesserungsziel j (Spalte) bei?“

Bewertungsskala:
0 = kein Beitrag
1 = schwacher Beitrag
2 = mittlerer Beitrag
3 = starker Beitrag

CPS-Komponenten	Handlungselemente	Nr.	VZ1 Systemverfügbarkeit erhöhen	VZ2 Ausschuss reduzieren	VZ3 Prozesstransparenz erhöhen	VZ4 Automatisierungsgrad steigern	VZ5 Benutzungsfreundlichkeit verbessern	Breitenwirkung [%]	Tiefenwirkung	Zielbeitragsindex
Aktorik	Prozesseingriff	AK1	2	3	0	3	2	50	2,6	1,3
	Positioniergenauigkeit	AK2	1	3	0	3	2	50	2,4	1,2
Sensorik	Messsignale	SE1	2	2	3	3	2	100	2,1	2,1
	Informationsquelle	SE2	2	2	3	3	2	100	2,1	2,1
Informationsverarbeitung	Steuerung/Regelung	IV1	3	3	2	3	2	100	2,3	2,3
	Identifikation und Adaption	IV2	3	3	2	3	2	100	2,4	2,4
	Optimierung	IV3	3	3	2	3	2	100	2,4	2,4
Kommunikationssystem	Vertikale Integration	KO1	1	1	3	1	2	100	1,7	1,7
	Horizontale Integration	KO2	1	1	3	1	2	100	1,7	1,7
	Konnektivität	KO3	1	1	3	1	2	100	1,7	1,7

Bild 5-6: Zielbeitragsmatrix der Handlungselemente für den Separator (Auszug)

Im Anschluss an die Identifikation der zielrelevanten Handlungselemente erfolgt die Bestimmung der Zielleistungsstufen je Handlungselement. Zentrales Hilfsmittel dafür ist die **Zielbeitragsmatrix der Leistungsstufen** (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). In dieser Matrix wird der Beitrag der einzelnen Leistungsstufen je Handlungselement zu den Verbesserungszielen bewertet. Die Leistungsstufe eines Handlungselements mit dem höchsten Zielbeitrag ist die anzustrebende Zielleistungsstufe. Dabei ist eine höhere Leistungsstufe nur

dann anzustreben, wenn dies mit einer Steigerung des Zielbeitrags einhergeht. Bild 5-7 stellt einen Auszug der Zielbeitragsmatrix der Leistungsstufen für den Separator dar.

Zielbeitragsmatrix der Leistungsstufen

Fragestellung:
„Wie stark trägt die Leistungsstufe i eines Handlungselements (Zeile) zum Verbesserungsziel j (Spalte) bei?“

Bewertungsskala:
0 = kein Beitrag
1 = schwacher Beitrag
2 = mittlerer Beitrag
3 = starker Beitrag

CPS-Komponenten	Handlungs-elemente	Leistungsstufen	Verbesserungsziele	Systemverfügbarkeit erhöhen	Ausschuss reduzieren	Prozesstransparenz erhöhen	Automatisierungsgrad steigern	Benutzungsfreundlichkeit verbessern	Gewichtete Zielwirkung	Rangfolge innerh. d. Handlungselements
			F_R	1,9	1,9	1,9	2	1,4		
			Nr.	VZ1	VZ2	VZ3	VZ4	VZ5		
Sensorik	Messsignale	Keine Signale	SE11	0	0	0	0	0	**0**	**4**
		Binäre Signale	SE12	1	1	1	1	1	**2,4**	**3**
		Grenzwerte	SE13	1	1	1	1	1	**0**	**4**
		Diskrete Signale	SE14	2	2	2	2	1	**12,2**	**2**
		Kontinuierliche Signale	SE15	2	2	3	3	1	**17,3**	**1**
	Informations-quelle	Keine Informationsquellen	SE21	0	0	0	0	0	**0**	**5**
		Punktuelle Informationsquellen	SE22	1	1	1	1	1	**1**	**4**
		Vielfältige Informationsquellen	SE23	2	2	2	1	2	**14,2**	**1**
		Umfassende Informationsquellen	SE24	2	2	2	2	2	**11**	**2**
		Virtuelle Informationsquellen	SE25	2	2	3	2	2	**5,7**	**3**

Bild 5-7: Zielbeitragsmatrix der Leistungsstufen für den Separator (Auszug)

Die Zielleistungsstufen für den Separator geben an, dass die CPS-Komponenten *Aktorik* und *Sensorik* geringfügig verbessert werden sollen. So soll z.B. eine robuste Positioniergenauigkeit der Aktoren möglich sein und kontinuierliche Signale von der Sensorik erzeugt werden. Für die Handlungselemente der *Informationsverarbeitung* wird eine signifikante Verbesserung auf die höchste Leistungsstufe angestrebt. Somit soll der Separator zukünftig in der Lage sein, seine Prozesse robust zu steuern bzw. zu regeln, seine Struktur im Betrieb anzupassen und ein mehrstufiges Verlässlichkeitskonzept durch Mehrzieloptimierung zu realisieren. In Bezug auf das *Kommunikationssystem* soll eine partielle vertikale Integration und eine rudimentäre horizontale Integration realisiert werden. Dabei soll die Konnektivität über Industrial Ethernet-Schnittstellen realisiert werden und die Kommunikation verschlüsselt erfolgen. Ferner wird ein Zugang zum Internet angestrebt. Die Bedienung über das *HMI* soll geräteunabhängig und multimodal unter Verwendung individueller Nutzerprofile erfolgen. In Bezug auf die CPS-Komponente *Daten* soll eine durchgehende Datenspeicherung möglich sein. Zusätzlich sollen externe Daten genutzt und Trends auf Basis von Daten eigenständig erkannt werden. *Dienste* sind situationsspezifisch zusammenzustellen. Zudem wird die Interaktion mit dem Kunden über das Produkt angestrebt. Bild 5-8 zeigt einen Vergleich der Ist- und Zielleistungsstufen für den Separator. Aus den ermittelten Zielleistungsstufen auf Komponentenebene ergibt sich die Leistungsstufe „Kommunikation und Analyse“ für das Gesamtsystem. Die Gesamtsystemstufe „Interpretation und Dienste“ könnte durch eine Verbesserung der

Handlungselemente „Informationsquelle“ und „horizontale Integration“ erreicht werden. Das **Resultat** der dritten Phase ist die individuelle Zielposition für den Separator.

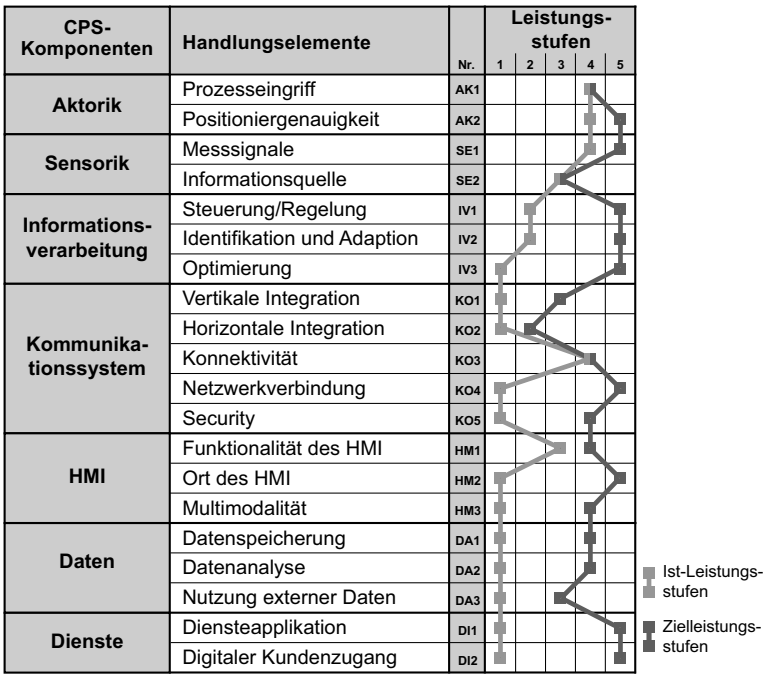


Bild 5-8: Übersicht der Ist- und Zielleistungsstufen auf Komponentenebene des Separators

5.1.4 Phase 4: Leistungssteigerung

Die vierte Phase, in der die *Leistungssteigerung* des Separators geplant wird, beginnt mit der Untersuchung der Vernetzung der Handlungselemente. Mittels **Einflussmatrix der Handlungselemente** (vgl. Abschnitt 4.3.3.1) wird bewertet, wie stark sich die Handlungselemente gegenseitig beeinflussen. Aus der Bewertung resultiert für jedes Handlungselement ein Vernetzungsindex, der Aufschluss über dessen Vernetzung gibt. Bild 5-9 zeigt einen Ausschnitt der Einflussmatrix für den Separator. Daraus geht hervor, dass z.B. die Handlungselemente der *Informationsverarbeitung* wesentlich stärker vernetzt sind, als die der *Aktorik* oder *Sensorik*. Da sich bei dem Vergleich von direkter und indirekter Einflussanalyse für den Separator keine signifikant unterschiedlichen Aussagen über den Vernetzungsgrad der Handlungselemente ergeben, werden im Folgenden nur die Ergebnisse der direkten Einflussanalyse berücksichtigt.

Einflussmatrix der Handlungselemente

Fragestellung:
„Wie stark beeinflusst das Handlungselement i (Zeile) das Handlungselement j (Spalte)?“

Bewertungsskala:
0 = kein Einfluss
1 = schwacher Einfluss
2 = mittlerer Einfluss
3 = starker Einfluss

CPS-Komponenten	Handlungselemente	Nr.	AK1 Prozesseingriff	AK2 Positioniergenauigkeit	SE1 Messsignale	SE2 Informationsquelle	IV1 Steuerung/Regelung	Aktivsumme	Vernetzungsindex VI_i
Aktorik	Prozesseingriff	AK1		3	0	0	0	9	162
	Positioniergenauigkeit	AK2	3		0	0	0	9	162
Sensorik	Messsignale	SE1	3	3		2	3	29	261
	Informationsquelle	SE2	3	3	3		3	29	232
Informations-verarbeitung	Steuerung/Regelung	IV1	3	3	2	2		34	850
	Identifikation und Adaption	IV2	3	3	2	2	3	42	1470
	Optimierung	IV3	3	3	2	2	3	42	1470
Kommunika-tionssystem	Vertikale Integration	KO1	0	0	0	0	2	27	621
	Horizontale Integration	KO2	0	0	0	0	2	29	754
	Konnektivität	KO3	0	0	0	0	2	40	1000
		Passivsumme	18	18	9	8	25		

Bild 5-9: Einflussmatrix der Handlungselemente für den Separator (Auszug)

Die Ergebnisse aus der Einflussanalyse und der Analyse des Zielbeitrags der Handlungselemente in Phase 3 werden nun mittels **Leistungsrelevanzportfolio** (vgl. Abschnitt 4.3.3.1) zu einer Aussage zusammengeführt (siehe Bild 5-10). In dem dargestellten Leistungsrelevanzportfolio mit ausgewählten Handlungselementen wird deutlich, dass u.a. die Handlungselemente „Optimierung“ sowie „Identifikation und Adaption“ der *Informationsverarbeitung* eine hohe Leistungsrelevanz für den Separator haben. Zum einen sind sie in einem hohen Maße relevant für die Erreichung der Verbesserungsziele und zum anderen sind sie mit anderen Handlungselementen stark vernetzt. Aus der Positionierung der Handlungselemente im Leistungsrelevanzportfolio resultiert die Empfehlung, diese langfristig anzugehen, da sie eine wichtige Grundlage für die Verbesserung weiterer Handlungselemente sind. Eine andere Umsetzungsstrategie wird für die Handlungselemente „Messsignale“ der *Sensorik* und „Positioniergenauigkeit“ der *Aktorik* vorgegeben. Diese sollten sofort umgesetzt werden, da sie einen hohen Zielbeitrag haben, jedoch nur gering mit anderen Handlungselementen vernetzt sind. Zudem ist der Abstand zwischen Ist- und Zielleistungsstufe gering (siehe Kreisdurchmesser). Das Handlungselement „Security“ des *Kommunikationssystems* sollte zunächst nicht angegangen werden, da es nur einen geringen Beitrag zur Erfüllung der Verbesserungsziele hat. Auf Basis der Positionierung der Handlungselemente im Leistungsrelevanzportfolio wird für den Separator eine grobe Umsetzungsplanung erstellt.

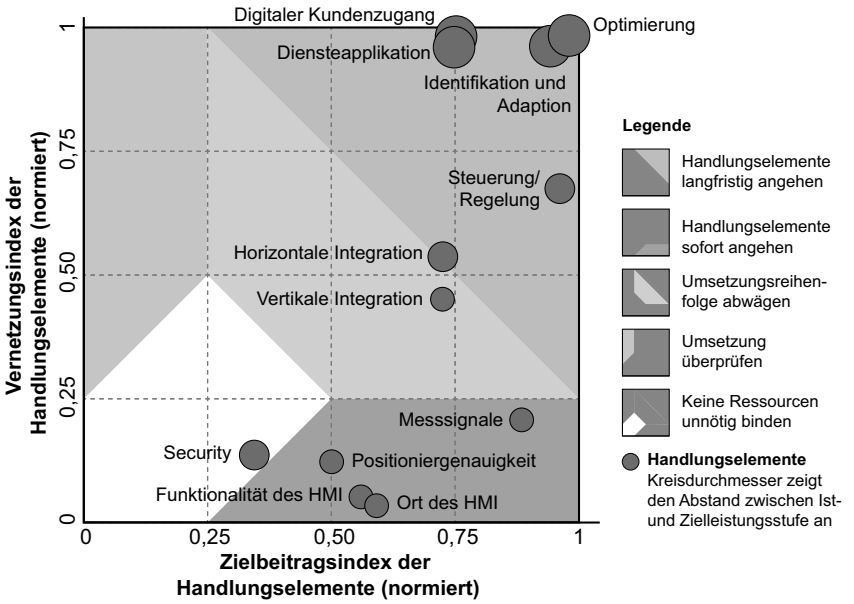


Bild 5-10: Leistungsrelevanzportfolio für den Separator (Auszug)

Dabei unterstützt die **Handlungselemente-Roadmap** (vgl. Abschnitt 4.3.3.2), in die ein ungefährer zeitlicher Rahmen für die Umsetzung der Handlungselemente eingetragen wird (siehe Bild 5-11). Daraus geht hervor, dass die Handlungselemente der *Aktorik* und *Sensorik* sofort und mit einem zeitlichen Horizont von ca. einem Jahr umgesetzt werden sollen. Die Verbesserung der *Informationsverarbeitung* soll sofort beginnen, sich aber über einen längeren Zeitraum erstrecken. Hierzu soll zunächst das Handlungselement „Steuerung/Regelung“ umgesetzt werden, damit danach die Handlungselemente „Identifikation und Adaption“ sowie „Optimierung“ verbessert werden können. Gleichzeitig soll mit der Verbesserung der *Dienste* begonnen werden.

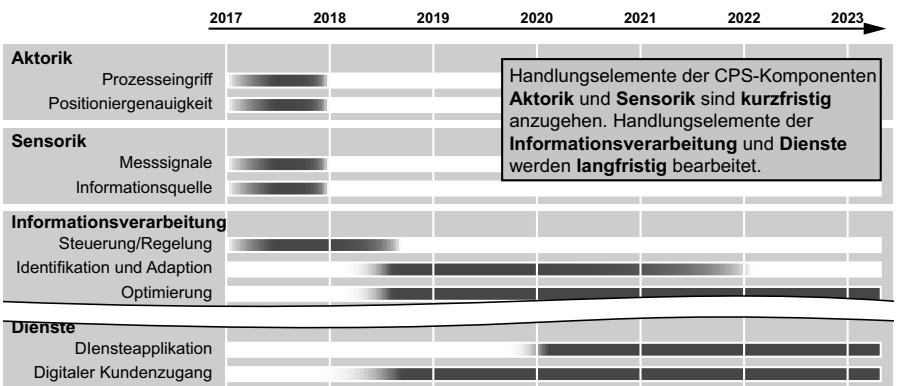


Bild 5-11: Handlungselemente-Roadmap für den Separator (Auszug)

Zentrales **Resultat** der vierten Phase ist die *Handlungselemente-Roadmap.* Sie ist ein grober Plan für die Leistungssteigerung des Separators.

5.1.5 Phase 5: Ermittlung alternativer Lösungskonzepte

Gegenstand von Phase 5 ist die *Ermittlung alternativer Lösungskonzepte* zur Leistungssteigerung des Separators. Auf Basis der zuvor erzielten Ergebnisse werden im Systemmodell zunächst die Elemente markiert, die zur Leistungssteigerung besonders relevant sind. Dies sind z.B. die *Informationsverarbeitung*, die *Sensorik* oder das *HMI*. Weniger relevante Elemente wie z.B. Security-Lösungen werden im Hinblick auf die formulierten Verbesserungsziele zunächst nicht betrachtet. Für die relevanten Elemente gilt es nun adäquate Lösungen zu identifizieren, die den Separator auf die Zielleistungsstufen führen. Wesentliche Hilfsmittel sind dabei der **morphologische Kasten** zur übersichtlichen Darstellung von Lösungsalternativen sowie die **Technologie- und Dienstesteckbriefe** zur einheitlichen Dokumentation von Technologien und Diensten (vgl. Abschnitt 4.4.2). Im Zuge der Identifikation geeigneter Technologien wird auf die Unterstützung des Technologiemanagements und der dort verfügbaren Technologiedatenbanken zurückgegriffen. Bei der Recherche werden nur Technologien berücksichtigt, die in den Bereich zwischen Ist- und Zielleistungsstufe einzuordnen sind. So werden für das HMI z.B. keine Lösungen betrachtet, die eine automatische Anpassung des HMI an den Bediener ermöglichen, da diese Leistungsstufe des Handlungselements „Funktionalität des HMI“ vorerst nicht angestrebt wird. Als Ergebnis der Technologierecherche liegt ein morphologischer Kasten für den Separator vor, der auszugsweise in Bild 5-12 abgebildet wird.

CPS-Komponenten	Handlungselemente	Nr.	Leistungsstufen 1	2		3			4			5	
			Lösungsvarianten										
Aktorik	Prozesseingriff	AK1							Drehstrommotor	Stromventil			
	Positioniergenauigkeit	AK2											
Sensorik	Messsignale	SE1							Piezoelekt.-Sens.	DMS	Akust.-Kamera	Softs-Sens.	Smart Sensors
	Informationsquelle	SE2											
Informationsverarbeitung	Steuerung/Regelung	IV1				IPC	SBC	Embed. PC	IPC			IPC	
	Identifikation und Adaption	IV2				Data Mining		STRIPS		Data Mining		Neuronale Netze	
	Optimierung	IV3					Cluster-						Multikr.
HMI	Funktionalität des HMI	HM1											
	Ort des HMI	HM2		Touchscreen	Tastatur & Monitor	Tablet-PC	Smartphone		Tablet-PC	Smartphone	Datenbrille	Tablet-PC	Smartphone
	Multimodalität	HM3											
Dienste	Diensteapplikation	DI1						Obj. Self S.	Prozess verb.			Ausfalle progn.	
	Digitaler Kundenzugang	DI2				Fehlers. führen	Cond. Monit.						

Eingrenzung des Lösungsraums | Lösungselement | Ausgewählte Lösungsalternativen

Bild 5-12: Morphologischer Kasten zur Auswahl geeigneter Lösungsalternativen für den Separator (Auszug)

Im morphologischen Kasten werden nun alternative Kombinationen von Lösungselementen zur Gesamtlösung gekennzeichnet. Für den Separator resultieren daraus zwei vielversprechende Kombinationen, die mittels der **Modellkonstrukte zur Spezifikation von CPS** (vgl. Abschnitt 4.4.1) modelliert werden. Bild 5-13 zeigt einen Ausschnitt des Systemmodells für ein Lösungskonzept zur Leistungssteigerung des Separators. In diesem

Konzept ist der Separator mit weiteren Systemen des übergeordneten Prozesses vernetzt. Er empfängt u.a. Informationen über den Füllstand eines Tanks und tauscht mit einem weiteren Separator sowie einem Dekanter Informationen über den Maschinenstatus und den Volumenstrom des Rohprodukts aus. Sämtliche Maschinendaten des Separators und der vernetzten Systeme werden zentral in einer Cloud gespeichert. In der Cloud werden zudem Expertenregeln aus einem Kompetenzcenter hinterlegt. Die Expertenregeln bilden menschliches Systemverständnis in Form von Regeln rechnerintern ab. Auf Basis der Daten und der Expertenregeln können Dienste angeboten werden.

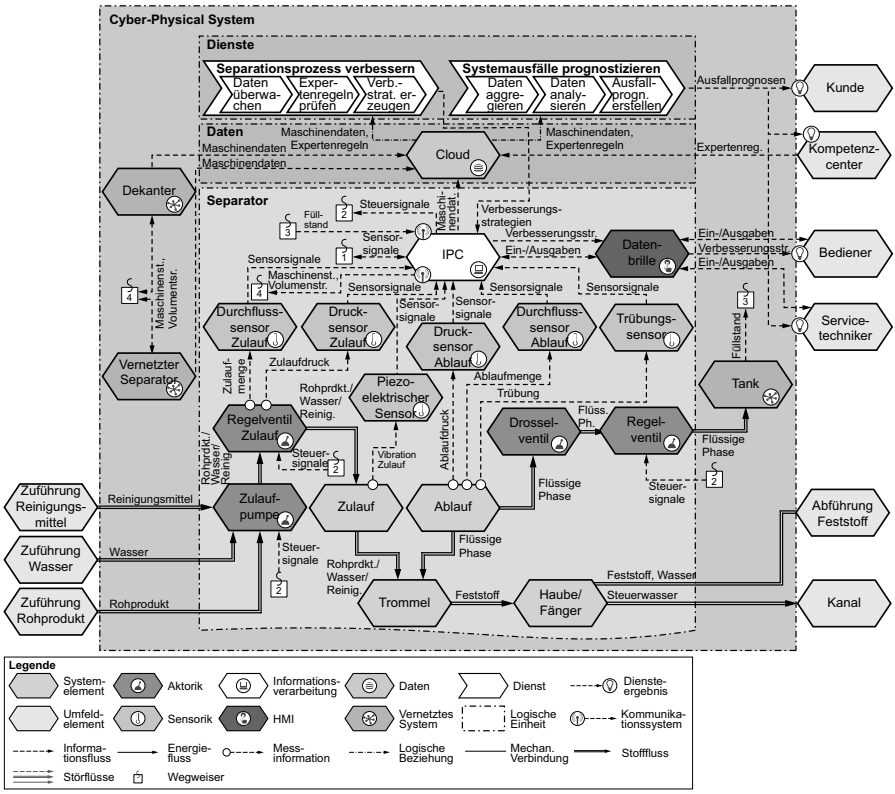


Bild 5-13: Lösungskonzept zur Leistungssteigerung des Separators – stark vereinfacht (Auszug)

Der Dienst „Separationsprozess verbessern“ erzeugt Verbesserungsstrategien, die Vorschläge zur Verbesserung der Verfahrensabläufe enthalten. Dazu werden die Maschinendaten überwacht, mit den Expertenregeln verglichen und daraus Empfehlungen zur Verbesserung der Verfahrensabläufe generiert. Diese werden dem Bediener über eine Datenbrille angezeigt, mit der über Gestensteuerung die Parameter entsprechend den Strategien eingestellt werden können, um ein besseres Prozessergebnis zu erzielen. Eine eigenständige Anpassung der Systemparameter durch den Separator ist in diesem Konzept nicht vorgesehen. Ein zweiter Dienst „Systemausfälle prognostizieren“ erstellt Prognosen über

den Ausfall von Komponenten. Die Ausfallprognosen adressieren den Kunden, das Servicepersonal sowie das Kompetenzcenter. Durch die Ausfallprognosen können Ersatzteile rechtzeitig beschafft, Wartungen bedarfsgerecht durchgeführt und so Systemausfälle reduziert werden. Zudem können im Kompetenzcenter neue Regeln auf Basis der analysierten Daten erstellt und in der Cloud gespeichert werden. Die Beschreibung des alternativen Lösungskonzepts und das dazugehörige Systemmodell enthält Abschnitt A4 im Anhang. Als **Resultat** der fünften Phase liegen somit *alternative Lösungskonzepte* zur Leistungssteigerung des Separators vor.

5.1.6 Phase 6: Bewertung und Umsetzungsplanung

Nach der Erstellung alternativer Lösungskonzepte erfolgt in der abschließenden Phase die *Bewertung und Umsetzungsplanung*. Die beiden Konzepte für den Separator werden anhand einer Nutzwertanalyse bewertet. Beispielhafte Bewertungskriterien sind „Umsetzungsaufwand“, „Kundennutzen“ und „Übertragbarkeit auf andere Produktgruppen“. Trotz unterschiedlicher Bewertungsergebnisse wird die Umsetzung beider Lösungskonzepte beschlossen. Ausschlaggebendes Kriterium dafür ist die Verwendung z.T. identischer Lösungselemente, die Synergieeffekte zwischen beiden Konzepten erzeugen. In die nachfolgende Umsetzungsplanung fließen somit beide Lösungsalternativen ein.

Die Planung der Leistungssteigerung des Separators erfolgt mit Hilfe einer **Umsetzungsroadmap** (vgl. Abschnitt 4.4.3). In dieser werden die Informationen aus der Handlungselemente-Roadmap durch konkrete Lösungselemente ergänzt. Somit wird deutlich, wann welches Lösungselement für den Serieneinsatz im Separator zur Verfügung stehen soll. Bild 5-14 stellt die Umsetzungsroadmap zur Leistungssteigerung des Separators dar.

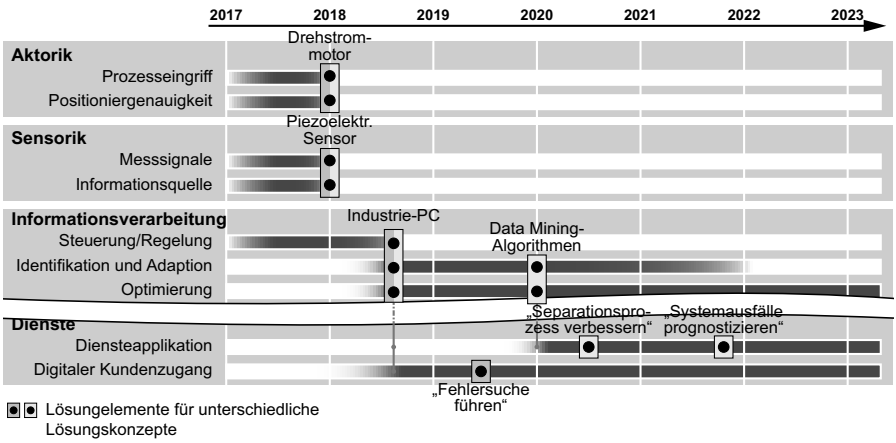


Bild 5-14: Umsetzungsroadmap zur Leistungssteigerung des Separators (Auszug)

Die Leistungssteigerung beginnt mit der Integration eines neuen Motors, der insbesondere das Handlungselement „Positioniergenauigkeit“ verbessern soll. Gleichzeitig wird

die Integration eines piezoelektrischen Sensors angestoßen, der Schwingungen am Zulauf detektiert und die Sensorsignale kontinuierlich an die Steuerung weitergibt. Die genannten Verbesserungen von *Sensorik* und *Aktorik* sollen planmäßig innerhalb eines Jahres abgeschlossen sein. Zur Verbesserung der *Informationsverarbeitung* ist die Integration eines IPCs geplant. Dieser soll zunächst das Handlungselement „Steuerung/Regelung“ verbessern und die technische Grundlage für die Leistungssteigerung der Handlungselemente „Identifikation und Adaption“ sowie „Optimierung“ bilden. Der Industrie-PC soll ebenso wie der neue Sensor und der neue Motor für beide Lösungskonzepte verwendet werden. Nach Abschluss der IPC-Integration beginnt die Verbesserung der *Dienste*. Hier soll zunächst der Dienst „Fehlersuche führen“ implementiert werden, der zu einer Leistungssteigerung des Handlungselements „Digitaler Kundenzugang“ führt. Sobald die geplanten Data Mining Algorithmen zur Verfügung stehen, erfolgt die schrittweise Implementierung der Dienste „Separationsprozess verbessern“ und „Systemausfälle prognostizieren“. Beide Dienste verbessern das Handlungselement „Diensteapplikation“. Abschließendes **Resultat** des *Vorgehensmodells für die Reifegradmodell-basierte Planung von CPS* ist eine *Umsetzungsroadmap*. Sie ist ein konkreter Plan für die Leistungssteigerung, aus der hervorgeht, wann welches Lösungselement für den Serieneinsatz im Separator zur Verfügung steht.

5.2 Bewertung der Systematik anhand der Anforderungen

Gegenstand dieses Abschnitts ist die Bewertung der erarbeiteten Systematik anhand der Anforderungen aus Abschnitt 2.7. Hierzu wird je Anforderung detailliert erläutert, inwiefern diese durch die Bestandteile der Systematik oder ihr Zusammenwirken erfüllt wird. Einen Überblick über die Anforderungen und ihren Bezug zur Systematik zeigt Bild 5-15.

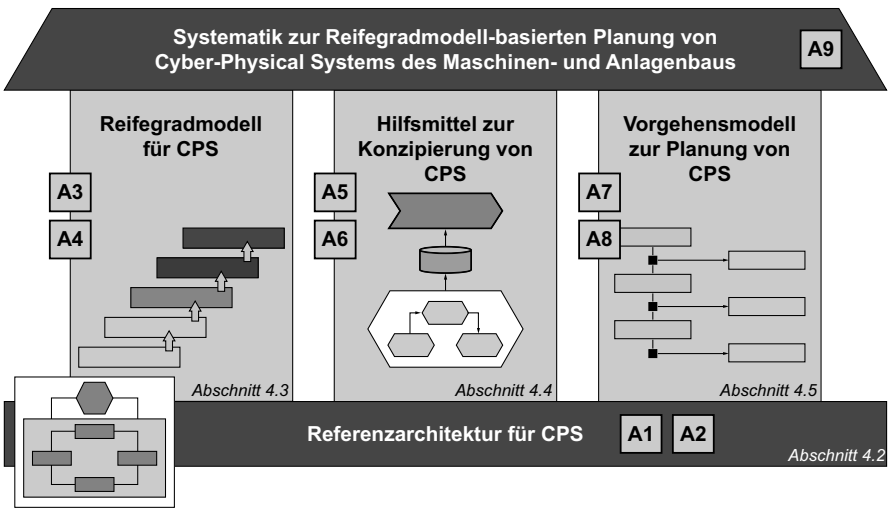


Bild 5-15: Erfüllung der Anforderungen durch die Systematik

A1) Anschauliche Repräsentation: Die entwickelte *Referenzarchitektur für Cyber-Physical Systems* (vgl. Abschnitt 4.2) ist ein allgemeingültiges Muster, das alle Merkmale eines CPS (vgl. Abschnitt 2.2.3) umfasst und als Leitlinie für die Weiterentwicklung der Systeme dient. Die Komponenten der Referenzarchitektur und deren Beziehungen untereinander bilden den Aufbau und die prinzipielle Wirkungsweise von CPS und deren Teilsystemen idealtypisch und transparent ab. Die Unterscheidung physikalischer und digitaler Einheiten verdeutlicht die Interaktion zwischen physikalischer und digitaler Welt. Die Kennzeichnung variabler Systemgrenzen adressiert ferner den Aspekt flexibler, situationsabhängiger Systemverbünde. Somit steht mit der Referenzarchitektur eine Schablone zur Verfügung, die Anbietern von CPS hilft, alle Komponenten und Wechselwirkungen ihrer Systeme allgemeingültig und transparent darzustellen.

A2) Allgemeingültigkeit für CPS des Maschinen- und Anlagenbaus: Heutzutage sind die Erzeugnisse des Maschinen- und Anlagenbaus in der Regel mechatronische Systeme. Um den Charakteristika maschinenbaulicher Systeme (vgl. Abschnitt 2.3.2) gerecht zu werden, baut die *Referenzarchitektur für Cyber-Physical Systems* auf der Grundstruktur mechatronischer Systeme auf (vgl. Abschnitt 2.2.1). Dies ermöglicht es Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus ihre bestehenden technischen Systeme in die Referenzarchitektur einzuordnen und ausgehend davon eine Weiterentwicklung hin zu Cyber-Physical Systems zu gestalten.

A3) Plausibilität und Nachvollziehbarkeit: Die Tätigkeiten zur Durchführung des *Reifegradmodells für Cyber-Physical Systems* (vgl. Abschnitt 4.3) werden durch Hilfsmittel und Berechnungsvorschriften unterstützt. Diese stellen sicher, dass bei gleichen Eingaben stets die gleichen Ergebnisse erzielt werden. Somit ist es möglich, die Leistungsfähigkeit technischer Systeme objektiv und messbar zu bewerten und mehrere Systeme miteinander zu vergleichen.

A4) Umfassende Dokumentation: Der Aufbau des *Reifegradmodells für Cyber-Physical Systems* orientiert sich an den intrinsischen Merkmalen von Reifegradmodellen zur Leistungsbewertung und -steigerung nach CHRISTIANSEN (vgl. Abschnitt 2.5.1). Die drei Bereiche Leistungsbewertung, Zieldefinition und Leistungssteigerung werden in einzelne Phasen unterteilt, deren Tätigkeiten detailliert beschrieben werden. Im Rahmen des Reifegradmodells werden Leistungsstufen für CPS sowohl auf Komponenten- als auch auf Gesamtsystemebene definiert und die Eigenschaften je Leistungsstufe konkret beschrieben. Durch die bereitgestellten Hilfsmittel und Berechnungsvorschriften werden die Ergebnisse des Reifegradmodells einheitlich und nachvollziehbar dokumentiert.

A5) Spezifikation von CPS: Die entwickelte Systematik enthält *Modellkonstrukte zur Spezifikation von CPS* (vgl. Abschnitt 4.4.1). Diese basieren auf der Spezifikationstechnik CONSENS (vgl. Abschnitt 3.3.1) und ermöglichen eine ganzheitliche und fachdisziplinunabhängige Beschreibung von Lösungen im Kontext von CPS. Durch die Anpassung der bestehenden Modellkonstrukte von CONSENS können nun alle Bestandteile

und Wechselwirkungen eines CPS berücksichtigt und allgemeinverständlich dokumentiert werden.

A6) Unterstützung der Ideenfindung: Die Identifikation und Auswahl konkreter Lösungselemente wird durch die Systematik in Form eines *morphologischen Kastens* sowie mittels *Technologie- und Dienstesteckbriefen* unterstützt (vgl. Abschnitt 4.4.2). Unter Berücksichtigung der ermittelten Ist- und Zielleistungsstufen des *Reifegradmodells für CPS* erfolgt eine bewusste Eingrenzung des Lösungsraums und somit eine Fokussierung auf relevante Lösungselemente. Der morphologische Kasten stellt eine Verknüpfung der Lösungselemente mit den Leistungsstufen des Reifegradmodells her und erleichtert eine nachvollziehbare Ermittlung von Lösungsalternativen. Die Umsetzungsplanung der ausgewählten Lösungen erfolgt abschließend mit Hilfe einer *Umsetzungsroadmap* (vgl. Abschnitt 4.4.3).

A7) Integraler Bestandteil der Strategischen Produktplanung: Die Bestandteile der entwickelten Systematik, deren Einsatz durch das *Vorgehensmodell* (vgl. Abschnitt 4.5) gesteuert wird, sind der Strategischen Produktplanung, insbesondere der Produktfindung zuzuordnen (vgl. Abschnitt 2.4.2). Auf Basis der Erkenntnisse der Potentialfindung unterstützt das *Vorgehensmodell* bei der Erschließung neuer Produkt- und Dienstleistungsideen und stellt mit der Ermittlung alternativer Lösungskonzepte die Schnittstelle zur Geschäftsplanung sowie zur Produkt- und Dienstleistungsentwicklung her.

A8) Systematische Vorgehensweise: Das entwickelte *Vorgehensmodell* ermöglicht eine systematische Vorgehensweise. Es schlägt einzusetzende Hilfsmittel vor und beschreibt die Aufgaben und Resultate der sechs aufeinanderfolgenden Phasen. Durch den Einsatz des *Reifegradmodells für CPS* wird eine objektive Bestimmung der derzeitigen Leistungsfähigkeit und die Ermittlung eines individuellen Zielreifegrads ermöglicht. Die *Hilfsmittel zur Konzipierung von* CPS (vgl. Abschnitt 4.4) unterstützen die Planung der Leistungssteigerung.

A9) Anwendbarkeit: Die Anwendbarkeit der Systematik wurde am Beispiel eines Separators belegt (vgl. Abschnitt 5.1). Zur praktikablen Ausführung trägt u.a. die entwickelte *Werkzeugunterstützung* für das *Reifegradmodell für CPS* bei (vgl. Abschnitt 4.3.4). Sie unterstützt Anwender bei der Durchführung des Reifegradmodells, indem sämtliche Berechnungen automatisch durchgeführt und Eingaben sowie Analyseergebnisse gespeichert werden. Ferner sind die *Hilfsmittel zur Konzipierung von CPS* ohne Schulungen und lange Einarbeitungszeit einsetzbar.

Die vorgestellte *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus* erfüllt somit alle Anforderungen in vollem Umfang. Die Systematik ermöglicht es, die *derzeitige Leistungsfähigkeit* technischer Systeme objektiv zu bewerten, eine *individuelle Zielposition* festzulegen und die *inkrementelle evolutionäre Leistungssteigerung* systematisch zu planen. Sie wurde mit Erfolg am Anwendungsbeispiel „Separator“ validiert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mechatronische Systeme beruhen auf dem synergetischen Zusammenwirken unterschiedlicher Fachdisziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik. Durch die zunehmende Durchdringung mit Informations- und Kommunikationstechnik wandeln sich mechatronische Systeme hin zu **Cyber-Physical Systems**. CPS sind in der Lage, Daten der physikalischen Welt mit Hilfe von Sensoren zu erfassen, sie für netzbasierte Dienste verfügbar zu machen und durch Aktoren unmittelbar auf Prozesse der physikalischen Welt einzuwirken. Dabei vernetzen sich individuelle Einzelsysteme zu hoch vernetzten Systemverbünden, die ihr Zusammenspiel flexibel an veränderte Bedingungen anpassen.

In der **industriellen Produktion** führen CPS zu einem radikalen Wandel, der heute oft als vierte industrielle Revolution oder Industrie 4.0 bezeichnet wird. Für Unternehmen der Ausrüsterindustrie, insbesondere des **Maschinen- und Anlagenbaus**, entsteht daraus die Notwendigkeit, ihre bestehenden Erzeugnisse von mechatronischen Systemen zu CPS weiterzuentwickeln, um ihre Marktposition zu behaupten. CPS verändern jedoch nicht nur die technischen Systeme. Sie verändern die gesamte Marktleistung von Unternehmen, da durch die neuen technischen Möglichkeiten enorme Potentiale für innovative Produkt-Service-Systeme entstehen. Die Weiterentwicklung maschinenbaulicher Erzeugnisse stellt Unternehmen vor **Herausforderungen**. Der wachsende Funktionsumfang, die zunehmende Vernetzung sowie die Verschmelzung von Sach- und Dienstleistungen steigern die *Komplexität und Interdisziplinarität* technischer Systeme. Der Wandel ihrer Systeme vollzieht sich nicht ad-hoc und einheitlich über alle Systeme gleich, sondern evolutionär im Zuge einer *schrittweisen Transformation*. Dabei werden Unternehmen mit nahezu *unüberschaubaren Möglichkeiten* konfrontiert, aus denen sie die für sich erfolgversprechenden Lösungen erkennen und den Wandel der Systeme *strategisch planen* müssen.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, müssen vier **Handlungsfelder** erschlossen werden. Es bedarf einer *Referenzarchitektur für Cyber-Physical Systems*, die den grundsätzlichen Aufbau sowie die prinzipielle Wirkungsweise von CPS idealtypisch und fachdisziplinübergreifend beschreibt. Zudem wird ein *Reifegradmodell* benötigt, das Leistungsstufen für CPS definiert und ein konkretes Vorgehen zur Leistungsbewertung und -steigerung vorgibt. Zur *Konkretisierung von Lösungen* bedarf es Hilfsmittel, die alle Merkmale von CPS berücksichtigen. Im Zuge einer *systematischen Planung* gilt es die Umsetzung der Leistungssteigerung zu strukturieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden existierende Referenzarchitekturen im Kontext von CPS, Ansätze des Reifegradmanagements sowie Ansätze zur Modellierung von Marktleistungen untersucht. Die betrachteten Ansätze liefern nur eine partielle Unterstützung bei der Leistungssteigerung von Cyber-Physical Systems. Eine ganzheitliche Systematik,

die alle Handlungsfelder abdeckt, existiert nicht. Aus der Untersuchung der *Referenzarchitekturen im Kontext von CPS* resultiert das *Technologiekonzept Intelligenter Technischer Systeme* nach GAUSEMEIER ET AL. als ein vielversprechender Ansatz, um diesen für eine Referenzarchitektur für CPS zu adaptieren. Die untersuchten *Leistungsstufenmodelle für technische Systeme* beschreiben Leistungsstufen für technische Systeme lediglich sehr generisch und geben kein konkretes Vorgehen zur Leistungsbewertung und -steigerung vor. *Reifegradbasierte Prozessmanagementmodelle* stellen zwar konkrete Vorgehensweisen bereit, adressieren aber keine technischen Systeme. Angesichts der Analyse bestehender *Ansätze zur Modellierung von Marktleistungen* eignet sich die *Spezifikationstechnik CONSENS* zur Modellierung von Lösungen im Kontext von CPS. Zur ganzheitlichen Betrachtung aller CPS-Merkmale bedarf es jedoch einiger Anpassungen der bestehenden Modellkonstrukte. Aus diesen Gründen besteht ein **Handlungsbedarf** für eine ganzheitliche *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus.*

Die erarbeitete Systematik greift einige Überlegungen der untersuchten Ansätze auf, überträgt diese auf Cyber-Physical Systems und ergänzt sie um neu entwickelte Hilfsmittel. Das **Ergebnis** setzt sich aus vier übergeordneten Bestandteilen zusammen:

- eine **Referenzarchitektur für Cyber-Physical Systems**, die alle Merkmale eines CPS umfasst und als allgemeingültiges Muster die Leitlinie für die Weiterentwicklung der Systeme bildet,
- ein **Reifegradmodell für Cyber-Physical Systems**, das die Eigenschaften eines CPS für verschiedene Leistungsstufen definiert und ein konkretes Vorgehen zur Leistungsbewertung und -steigerung bereitstellt,
- **Hilfsmittel zur Konzipierung von Cyber-Physical Systems**, die bei der Erstellung und Auswahl von Lösungen im Kontext von CPS unterstützen,
- ein **Vorgehensmodell zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems**, das detailliert die durchzuführenden Tätigkeiten, von der Analyse und Bewertung der derzeitigen Leistungsfähigkeit, über die Definition der Zielposition und die Ermittlung alternativer Lösungskonzepte bis hin zur Umsetzungsplanung, beschreibt.

Die **Validierung** der Systematik erfolgte anhand des Beispiels eines Separators. Im Rahmen der Validierung wurde das Vorgehensmodell der Systematik vollständig durchlaufen und das Reifegradmodell für CPS sowie die Hilfsmittel zur Spezifikation von CPS angewendet. Die Validierung zeigt, dass die entwickelte *Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus* die gestellten Anforderungen in vollem Umfang erfüllt.

Im Hinblick auf die Leistungssteigerung von Cyber-Physical Systems besteht **weiterer Forschungsbedarf**. Zukünftige Arbeiten müssen die Verzahnung von Leistungsstufen mit Lösungselementen verstärkt vorantreiben. Dazu müssen etablierte Lösungselemente

für CPS identifiziert und mit den Leistungsstufen des Reifegradmodells verknüpft werden. Für den Breitentransfer sind die Lösungselemente einer breiten Masse von Unternehmen zugänglich zu machen, da insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen der Rückgriff auf Erfahrungswissen von CPS-Vorreitern essentiell ist, um eine schnelle und rationelle Weiterentwicklung ihrer Erzeugnisse zu erreichen. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Werkzeugunterstützung bildet eine potentielle Basis für den Wissenstransfer, die im Sinne einer Plattform für CPS-Lösungselemente erweitert werden kann. Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Leistungsstufen und Umsetzungspfaden. Die transparente Darlegung der Wirtschaftlichkeit ist essentiell für Unternehmen, um die nötigen Investitionsentscheidungen herbeizuführen. Dazu bedarf es einer Kennzahlensystematik, die eine Bewertung verschiedener Leistungsstufen und alternativer Umsetzungspfade unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ermöglicht. Hierzu stellt die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Systematik, insbesondere das Reifegradmodell für Cyber-Physical Systems, den Startpunkt dar.

7 Abkürzungsverzeichnis

ARC	Appraisal Requirements for CMMI
ARIS	Architektur integrierter Informationssysteme
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bzgl.	bezüglich
CAD	Computer Aided Design
CONSENS	Conceptual Design Specification Technique for the Engineering of complex Systems
CMMI	Capability Maturity Model Integration
CPS	Cyber-Physical System
DFKI	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz
EFQM	European Foundation for Quality Management
EIRMA	European Industrial Research Management Association
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette
ERP	Enterprise Resource Planning
et al.	et alii
HLB	Hybrides Leistungsbündel
HMI	Human-Machine-Interface
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
INCOSE	International Council on Systems Engineering
I/O	Input/Output-Interface
IPC	Industrie-PC
ITS	Intelligentes Technisches System
IV	Informationsverarbeitung
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KS	Kommunikationssystem
MBSE	Model-Based Systems Engineering
MES	Manufacturing Execution System

MuA	Maschinen- und Anlagenbau
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NC	Numerical Control
NITRD	Networking and Information Technology Research and Development Program
NSF	National Science Foundation
OCM	Operator-Controller-Modul
OMG	Object Management Group
PDM	Produktdatenmanagement
PEMM	Process and Enterprise Maturity Model
PKW	Personenkraftwagen
PLM	Product Lifecycle Management
QMMG	Quality Management Maturity Grid
RADAR	Results, Approach, Deployment, Assessment, Refinement
RFID	Radio Frequency Identification
SE	Systems Engineering
SEI	Software Engineering Institute
SoS	System of Systems
SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SysML	Systems Modeling Language
TQM	Total-Quality-Management
TRL	Technology Readiness Level
u.a.	unter anderem
UML	Unified Modeling Language
VDA	Verband deutscher Automobilindustrie
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VPS	Virtual Prototyping und Simulation
z.B.	zum Beispiel

8 Literaturverzeichnis

[AAM+15] ABELE, E.; ANDERL, R.; METTERNICH, J.; ARNDT, A.; WANK, A.: Effiziente Fabrik 4.0 – Studie Industrie 4.0 – Potentiale, Nutzen und Good-Practice-Beispiele für die hessische Industrie. Zwischenbericht zum Projekt Effiziente Fabrik 4.0, Meisenbach, Bamberg, 2015

[aca11] ACATECH – AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN (Hrsg.): Cyber-Physical Systems – Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011

[ADG+09] ADELT, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSHCHYKOV, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009

[AF15] ANDERL, R.; FLEISCHER, J.: Leitfaden Industrie 4.0 – Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. VDMA Forum Industrie, Frankfurt a. M., 2015

[AKK13] AHMED, S. H.; KIM, G.; KIM, D.: Cyber Physical System: Architecture, Applications and Research Challenges. IFIP Wireless Days 2013, 13.-15. November, Valencia, Spanien, 2013

[Akk13] AKKASOGLU, G.: Methodik zur Konzeption und Applikation anwendungsspezifischer Reifegradmodelle unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit. Dissertation, Technische Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Nürnberg-Erlangen, Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, Nr. 31, Shaker, Herzogenrath, 2013

[Alt12] ALT, O.: Modell-basierte Systementwicklung mit SysML. Carl Hanser Verlag, München, 2012

[Ana15] ANACKER, H.: Instrumentarium für einen lösungsmusterbasierten Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 343, Paderborn, 2015

[AQS+15] ALI, S.; QAISAR, S. B.; SAEED, H.; KHAN, M. F.; NAEEM, M.; ANPALAGAN, A.: Network challenges for Cyber Physical Systems with Tiny Wireless Devices: A Case Study on Reliable Pipeline Condition Monitoring. Sensors, 4/2015, MDPI, Basel, Schweiz, S. 7172–7205

[Bal04] BALÁZOVÁ, M.: Systematik zur reifegradbasierten Leistungsbewertung und -steigerung von Geschäftsprozessen im Mittelstand. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 174, Paderborn, 2004

[Bau14] BAUERNHANSL, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: BAUERNHANSL, T.; TEN HOMPEL, M.; VOGEL-HEUSER, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik – Anwendung, Technologien, Migration. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, S. 5-36

[BBK98] BROY, M.; VON DER BEECK, M.; KRÜGER, I.: SOFTBED: Problemanalyse für ein Großverbundprojekt "Systemtechnik Automobil – Software für eingebettete Systeme". Abschlussbericht SOFTBED. Institut für Informatik, Technische Universität München, 1998

[BBK+09] BECKER, J.; BEVERUNGEN, D.; KNACKSTEDT, R.; MÜLLER, O.: Konzeption einer Modellierungssprache zur softwaregestützten Modellierung, Konfiguration und Bewertung hybrider Leistungsbündel. In: THOMAS, O.; NÜTTGENS, M. (Hrsg.): Dienstleistungsmodellierung. Physica-Verlag, Berlin, 2009, S. 53-70

[BD93] BRÖHL, A.-P.; DRÖSCHEL, W.: Das V-Modell – Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden. Oldenbourg, München, Wien, 2. Auflage, 1993

[Ben13] BENSIEK, T.: Systematik zur reifegradbasierten Leistungsbewertung und -steigerung von Geschäftsprozessen im Mittelstand. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 312, Paderborn, 2013

[Bey04] BEYER, L.: Genauigkeitssteuerung von Industrierobotern – Insbesondere mit Parallelkinematik. Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität, Forschungsberichte aus dem Laboratorium Fertigungstechnik, Band 1, Shaker, 2004

[BF05] DE BRUIN, T.; FREEZE, R.: Understanding the Main Phases of Developing a Maturity Assessment Model. 16th Australasian Conference on Information Systems, 29. November - 2 Dezember, Sydney, Australia, 2005

[BG11] BAHETI, R.; GILL, H.: Cyber-Physical Systems. In: SAMAD, T.; ANNASWAMY, A. (Hrsg.): The Impact of Control Technology – Overview, Success Stories, and Research Challenges. IEEE Control Systems Society, 2011, pp. 161-166

[BGH+96] BLECK, A.; GOEDECKE, W.; HUSS, S. A.; WALDSCHMIDT, K. (HRSG.): Praktikum des modernen VLSI-Entwurfs – Eine Einführung in die Entwurfsprinzipien und -beschreibungen unter besonderer Berücksichtigung von VHDL. Teubner, Stuttgart, 1996

[BHV14] BAUERNHANSL, T.; TEN HOMPEL M.; VOGEL-HEUSER, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik – Anwendung, Technologien, Migration. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

[Bis15] BISCHOFF, J.: Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand – Kurzfassung der Studie. agiplan GmbH, Fraunhofer IML, ZENIT GmbH, 2015

[BIT14] BITKOM BUNDESVERBAND INFORMATIONSWIRTSCHAFT, TELEKOMMUNIKATION UND NEUE MEDIEN E. V. (Hrsg.): IT-Strategie – Digitale Agenda für Deutschland – Deutschland zum Digitalen Wachstumsland entwickeln, 2014

[BKM07] BIANCO, P.; KOTERMANSKI, R.; MERSON, P.: Evaluating a Service-Oriented Architecture. Technical Report CMU/SEI-2007-TR-015 CMU/SEI-2007-TR-015, Software Engineering Institute, 2007

[BL15-ol] BAGHERI, B.; LEE, J.: Big future for cyber-physical manufacturing systems. Unter: http://www.designworldonline.com/big-future-for-cyber-physical-manufacturing-systems/, 10.09.2016

[BLO+15] BLOCHING, B.; LEUTIGER, P.; OLTMANNS, T.; ROSSBACH, C.; SCHLICK, T.; REMANE, G.; QUICK, P.; SHAFRANYUK, O.: Die digitale Transformation der Industrie – Was sie bedeutet. Wer gewinnt. Was jetzt zu tun ist. Roland Berger Strategy Consultans GmbH, BDI Bundesverband der deutschen Industrie e.V., 2015

[BM01] BRUHN, M.; MEFFERT, H.: Handbuch Dienstleistungsmanagement – Von der strategischen Konzeption zur praktischen Umsetzung. Gabler, Wiesbaden, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2001

[BMB13] BMBF BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG REFERAT IT-SYSTEME (Hrsg.): Zukunftsbild „Industrie 4.0“, 2013

[BMB14] BMBF BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG REFERAT GRUNDSATZFRAGEN DER INNOVATIONSPOLITIK: Die neue Hightech-Strategie Innovationen für Deutschland, 2014

[BMB16-ol] BMBF BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: Maschinen- und Anlagenbau – Branchenskizze. Unter: http://www.bmwi.de/DE/Themen/Wirtschaft/branchenfokus,did=196364.html, 04.12.2016

[Bri10] BRINK, V.: Verfahren zur Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 280, Paderborn, 2010

[Bro88] BROCKHAUS (Hrsg.): Brockhaus-Enzyklopädie. Brockhaus, Mannheim, 19., völlig neu bearbeitete Auflage, 1988

[Bro10] BROY, M. (Hrsg.): Cyber-Physical Systems – Innovation durch Software-intensive eingebettete Systeme. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010

[BS06a] BULLINGER, H.-J.; SCHEER, A.-W. (Hrsg.): Service Engineering – Entwicklung und Gestaltung innovativer Dienstleistungen. Springer, Berlin, 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2006

[BS06b] BULLINGER, H.-J.; SCHREINER, P.: Service-Engineering: Ein Rahmenwerk für die systematische Entwicklung von Dienstleistungen. In: BULLINGER, H.-J.; SCHEER, A.-W. (Hrsg.): Service Engineering – Entwicklung und Gestaltung innovativer Dienstleistungen. Springer, Berlin, 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2006, S. 53-57

[BSI13] BUNDESAMT FÜR SICHERHEIT IN DER INFORMATIONSTECHNIK (HRSG.): ICS-Security-Kompendium, 2013

[BSM+14] BAUER, W.; SCHLUND, S.; MARRENBACH, D.; GANSCHAR, O.: Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. BITKOM Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V., Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 2014

[Chr09] CHRISTIANSEN, S.-K.: Methode zur Klassifikation und Entwicklung reifegradbasierter Leistungsbewertungs- und Leistungssteigerungsmodelle. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 264, Paderborn, 2009

[Com94] COMERFORD, R.: Mecha…what?. IEEE Spectrum, 31(8), 46-49, IEEE Press, Piscataway, USA, 1994

[Cro80] CROSBY, P. B.: Quality Is Free: The Art of Making Quality Certain. Scarborough (Ontario) New American Library, New York, 1980

[DAG13] DUMITRESCU, R.; ANACKER, H.; GAUSEMEIER, J.: Design Framework for the Integration of Cognitive Functions into Intelligent Technical Systems. Journal of Production Engineering Research and Development (PERE), Volume 7/2013, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 111-121

[Dei13] DEINDL, M.: Gestaltung des Einsatzes von intelligenten Objekten in Produktion und Logistik. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Schriftenreihe Rationalisierung, Band 118, Apprimus, Aachen, 2013

[DG73] DUPPERIN, J.-C.; GODET, M.: Méthode de hiérarchisation des élémentes d'un système – Rapport Economique du CEA. R-4541, Paris, 1973

[DGK+15] DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; KÜHN, A.; LUCKEY, M.; PLASS, C.; SCHNEIDER, M.; WESTERMANN, T.: Auf dem Weg zu Industrie 4.0: Erfolgsfaktor Referenzarchitektur, 2015

[DGQ13] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR QUALITÄT E.V. (Hrsg.): Das EFQM Excellence Modell 2013 – Expertenwissen für DGQ-Mitglieder, 2013

[DH06] DIEKMANN, T.; HAGENHOFF, S.: Einsatzgebiete von Ubiquitious Computing-Technologien entlang der betrieblichen Wertschöpfungskette. Institut für Wirtschaftsinformatik, Georg-August-Universität Göttingen, Arbeitsbericht Nr. 2/2006, Göttingen, 2006

[DIN60050] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch: Leittechnik. DIN IEC 60050 Teil 351, Beuth, Berlin, 2014

[DIN61158] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Industrielle Kommunikationsnetze – Feldbusse – Überblick und Leitfaden zu den Normen der Reihe IEC 61158 und IEC 61784. DIN EN 61158 Teil 1, Beuth, Berlin, 2015

[Dud16-ol] DUDEN: Konnektivität. Unter: http://www.duden.de/rechtschreibung/Konnektivitaet, 27. 11.2016

[Dum10] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2010

[EDB+15] EMMRICH, V.; DÖBELE, M.; BAUERNHANSL, T.; PAULUS-ROHMER, D.; SCHATZ, A.; WESKAMP, M.: Geschäftsmodell-Innovationen durch Industrie 4.0 – Chancen und Risiken für den Maschinen- und Anlagenbau, 2015

[EIR97] EUROPEAN INDUSTRIAL RESEARCH MANAGEMENT ASSOCATION (EIRMA) (Hrsg.): Technology Roadmapping – delivering business vision. Working Group 52 Report, Paris, 1997

[ELW06] EVERSHEIM, W.; LIESTMANN, V.; WINKELMANN, K.: Anwendungspotenziale ingenieurwissenschaftlicher Methoden für das Service Engineering. In: BULLINGER, H.-J.; SCHEER, A.-W. (Hrsg.): Service Engineering – Entwicklung und Gestaltung innovativer Dienstleistungen. Springer, Berlin, 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2006, S. 432-442

[EM13] EHRLENSPIEL, K.; MEERKAMM, H.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Hanser, München, 5., überarbeit. und erw. Auflage, 2013

[EU03] EUROPÄISCHE UNION (HRSG.): Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. EU-Empfehlung 2003/361/EG, 2003

[Eva11] EVANS, D.: Das Internet der Dinge – So verändert die nächste Dimension des Internets die Welt. Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 2011

[Eve13] EVERSHEIM, W.: Innovationsmanagement für technische Produkte. Springer, Berlin, 2013

[FG13] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer, Berlin, Heidelberg, 8. Auflage, 2013

[FIR16-ol] FIR E.V. AN DER RWTH AACHEN (Hrsg.): HyProDesign – Integrierte Entwicklung hybrider Produkte. Unter: www.hyprodesign.de, 17.10.2016

[Fli09] FLIEß, S.: Dienstleistungsmanagement – Kundenintegration gestalten und steuern. Gabler, Wiesbaden, 1. Auflage, 2009

[Föl13] FÖLLINGER, O.: Regelungstechnik – Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. VDE Verlag, Berlin, 11., völlig neu bearbeitete Auflage, 2013

[För13] FÖRSTER, M.: Variantenmanagement nach Fusionen in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbau. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München, 2013

[Fuc07] FUCHS, C. H.: Life Cycle Management investiver Produkt-Service Systeme – Konzept zur lebenszyklusorientierten Gestaltung und Realisierung. Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, Technische Universität Kaiserslautern, Produktionstechnische Berichte aus dem FBK, Band 04/2007, Verlag Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2007

[GAC+13] GAUSEMEIER, J.; ANACKER, H.; CZAJA, A.; WAßMANN, H.; DUMITRESCU, R.: Auf dem Weg zu intelligenten technischen Systemen. In: GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. 18./19. April, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013

[GAD+14] GAUSEMEIER, J.; AMSHOFF, B.; DÜLME, C.; KAGE, M.: Strategische Planung von Marktleistungen im Kontext Industrie 4.0. In: GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): 10. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung. 20./21. November, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 334, Paderborn, 2014

[GB12] GEISBERGER, E.; BROY, M. (Hrsg.): agendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012

[GDJ+14] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; JASPERNEITE, J.; KÜHN, A.; TRESK, H.: Auf dem Weg zu Industrie 4.0: Lösungen aus dem Spitzencluster it's OWL, 2014

[GDS+13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; STEFFEN, D.; CZAJA, A.; WIEDERKEHR, O.; TSCHIRNER, C.: Systems Engineering in der industriellen Praxis, 2013

[GEA16] GAUSEMEIER, J.; ECHTERFELD, J.; AMSHOFF, B.: Strategische Produkt- und Prozessplanung. In: LINDEMANN, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung, Carl Hanser, München, 2016, S. 9-36

[GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Hanser, München, 2001

[GF06] GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K.: Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen. Hanser, München, 2006

[GFD+08a] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus (Teil 1). Konstruktion, 7/8/2008, Springer-VDI-Verlag, Berlin, 2008, S. 59-66

[GFD+08b] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus (Teil 2). Konstruktion, 9/2008, Springer-VDI-Verlag, Berlin, 2008, S. 91-99

[GFS12] GESELLSCHAFT FÜR SYSTEMS ENGINEERING E.V. (GFSE) (Hrsg.): INCOSE Systems Engineering Handbuch – Deutsche Übersetzung. Version 3.2.2, 2012

[GKS02] GRIEBLE, O.; KLEIN, R.; SCHEER, A.-W.: Modellbasiertes Dienstleistungsmanagement. Institut für Wirtschaftsinformatik (IWi) im Institut für empirische Wirtschaftsforschung an der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Heft 171, 2002

[GLL12] GAUSEMEIER, J.; LANZA, G.; LINDEMANN, U.: Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Hanser Verlag, München, 2012

[GOA+16] GAUSEMEIER, J.; OVTCHAROVA, J.; AMSHOFF, B.; ECKELT, D.; ELSTERMANN, M.; PLACZECK, M.; WIEDERKEHR, O.: Strategische Produktplanung – Adaptierbare Methoden, Prozesse und IT-Werkzeuge für die Planung der Marktleistungen von morgen. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2016

[GP14] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. Hanser, München, 2., überarbeitete Auflage, 2014

[GRS03] GÖRZ, G.; ROLLINGER, C.-R.; SCHNEEBERGER, J.: Handbuch der künstlichen Intelligenz. Oldenbourg, München, Wien, 4., korrigierte Auflage, 2003

[GTD13] GAUSEMEIER, J.; TSCHIRNER, C.; DUMITRESCU, R.: Der Weg zu Intelligenten Technischen Systemen. Industriemanagement, 29/2013, Gito, Berlin, 2013, S. 49-52

[GTS14] GAUSEMEIER, J.; TRÄCHTLER, A.; SCHÄFER, W.: Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme – Effektiver Austausch von Lösungswissen in Branchenwertschöpfungsketten. Hanser, München, 2014

[Hal15] HALLER, S.: Dienstleistungsmanagement – Grundlagen – Konzepte – Instrumente. Gabler, Wiesbaden, 6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2015

[Ham07] HAMMER, M.: Der große Prozess-Check. Harvard Business Manager, 05/2007, 2007

[HG96] HOMBURG, C.; GARBE, B.: Industrielle Dienstleistungen – Bestandsaufnahme und Entwicklungsrichtungen. Journal of Business Economics, 3/1996, Springer, Berlin, 1996, S. 253

[HN09] HANSEN, H. R.; NEUMANN, G.: Wirtschaftsinformatik 1 – Grundlagen und Anwendungen. Lucius & Lucius, Stuttgart, 10., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2009

[HP91] HOUSE, C. H.; PRICE, R. L.: The Return Map: Tracking Product Teams. Harvard Business Review, 01/1991, S. 92–101

[HS09] HERZOG, O.; SCHILDHAUER, T.: Intelligente Objekte – Technische Gestaltung, wirtschaftliche Verwertung, gesellschaftliche Wirkung. Springer, Berlin, 2009

[HS10] HYUN J. L.; SOO DONG, K.: A Service-based Approach to Designing Cyber Physical Systems. In: 2010 IEEE/ACIS 9th International Conference on Computer and Information Science (ICIS), 10.-20. August, Yamagata, Japan, 2010

[HW00] HADELER, T.; WINTER, E. (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon – Die ganze Welt der Wirtschaft: Betriebswirtschaft, Volkswirtschaft, Recht und Steuern. Gabler Verlag, Wiesbaden, 15. Auflage, 2000

[HWF+12] HABERFELLNER, R.; DE WECK, O. L.; FRICKE, E.; VÖSSNER, S.: Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung. Orell Füssli, Zürich, 2012

[INC10] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE) (Ed.): Systems Engineering Handbook – A Guide for System life cycle processes and activities. Version 3.2, 2010

[Ise08] ISERMANN, R.: Mechatronische Systeme – Grundlagen. Springer, Berlin, 2., vollständig neu bearbeitete Auflage, 2008

[ISO16290] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN): Raumfahrtsysteme – Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien. DIN ISO 16290, Beuth, Berlin, 2014

[its14-ol] IT'S OWL CLUSTERMANAGEMENT (Hrsg.): Optimale Veredelung von Lebensmitteln – Innovationsprojekt: Intelligenter Separator. Unter: http://www.its-owl.de/projekte/innovationsprojekte/details/intelligenter-separator/, 12.04.2015

[Iwa17] IWANEK, P. L.: Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 366, Paderborn, 2017

[Kae15] KAESER, J.: From Data to Business: Neue Geschäftsmodelle deutscher Industrieunternehmen. In: BECKER, T.; KNOP, C. (Hrsg.): Digitales Neuland – Warum Deutschlands Manager jetzt Revolutionäre werden. Springer Gabler, Wiesbaden, 2015, S. 23-35

[Kag14] KAGERMANN, H.: Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In: BAUERNHANSL, T.; TEN HOMPEL M.; VOGEL-HEUSER, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik – Anwendung – Technologien – Migration. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, S. 603-614

[Kai13] KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 327, Paderborn, 2013

[KK11] KEATING, C. B.; KATINA, P. F.: Systems of systems engineering: Prospects and challenges for the emerging field. International Journal of System of Systems Engineering, 2/3/2011, pp. 234–256

[KRH+15] KAGERMANN, H.; RIEMENSPERGER, F.; HOKE, D.; SCHUH, G.; SCHEER, A.-W.; SPATH, D.; LEUKERT, B.; WAHLSTER, W.; ROHLEDER, B.; SCHWEER, D. (Hrsg.): Smart Service Welt – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft. Abschlussbericht Langversion, Berlin, 2015

[KSR+09] KLOPPER, B.; SONDERMANN-WOLKE, C.; ROMAUS, C.; VOCKING, H.: Probabilistic planning integrated in a multi-level dependability concept for mechatronic systems. In: 2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation (CICA 2009). Nashville, TN, USA, 2009, pp. 104–111

[KWH13] KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. (Hrsg.): Deutschland als Produktionsstandort sichern – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, 2013

[Lan04] LANGMANN, R.: Taschenbuch der Automatisierung. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2004

[LBK15] LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A.: A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters, (3)2015, 2015, pp. 18–23

[Lee08] LEE, E. A.: Cyber Physical Systems: Design Challenges. Technical Report No. UCB/EECS-2008-8, Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkley, Berkley, USA, 2008

[Len02] LENZEN, M.: Natürliche und künstliche Intelligenz – Einführung in die Kognitionswissenschaft. Campus, Frankfurt, 2002

[LLW+06] LUCZACK, H.; LIESTMANN, V.; WINKELMANN, K.; GILL, C.: Service Engineering industrieller Dienstleistungen. In: BULLINGER, H.-J.; SCHEER, A.-W. (Hrsg.): Service Engineering – Entwicklung und Gestaltung innovativer Dienstleistungen. Springer, Berlin, 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2006, S. 443-462

[LS15] LEE, E. A.; SESHIA, S. A.: Introduction to embedded systems – A cyber-physical systems approach. LeeSeshia.org; Second edition, 2015

[LSB+15] LICHTBLAU, K.; STICH, V.; BERTENRATH, R.; BLUM, M.; BLEIDER, M.; MILLACK, A.; SCHMITT, K., SCHMITZ, E.; SCHRÖTER, M.: Industrie 4.0-Readiness. Institut der deutschen Wirtschaft Köln Consult GmbH; FIR e.V. an der RWTH Aachen, Aachen, Köln, 2015

[Lüt07] LÜTHJE, C.: Methoden zur Sicherstellung von Kundenorientierung in den frühen Phasen des Innovationsprozesses. In: HERSTATT, C.; VERWORN, B. (Hrsg.): Management der frühen Innovationsphasen – Grundlagen, Methoden, Neue Ansätze. Gabler, Wiesbaden, 2007, S. 39-60

[Mai98] MAIER, M. W.: Architecting Principles for Systems-of-Systems. Systems Engineering, 1/4/1998, John Wiley & Sons, 1998, pp. 267–284

[MF10] MATTERN, F.; FLÖRKEMEIER, C.: Vom Internet der Computer zum Internet der Dinge. Informatik-Spektrum, 33/2/2010, Springer, Berlin, 2010, S. 107-121

[MI08] MÖHRLE, M. G.; ISENMANN, R.: Grundlagen des Technologie-Roadmapping. In: MÖHRLE, M.G.; ISENMANN, R. (Hrsg.): Technologie-Roadmapping – Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. Springer, Berlin, 3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2008, S. 1-15

[MI14] MINISTERIUM FÜR FINANZEN UND WIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG; FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK UND AUTOMATISIERUNG IPA (Hrsg.): Strukturstudie "Industrie 4.0 für Baden-Württemberg" – Baden-Württemberg auf dem Weg zu Industrie 4.0, 2014

[MKS+09] MÜLLER, O.; KEBIR, N.; STARK, R.; BLESSING, L.: PSS Layer Method – Application Microenergy Systems. In: SAKAO, T.; LINDAHL, M. (Hrsg.): Introduction to Product/Service-System Design. Springer, London, 2009

[Mor69] MORI, T.: Yaskawa Internal Trademark Application Memo. 21.131.01, 1969

[MU12] MEIER, H.; UHLMANN, E.: Hybride Leistungsbündel – ein neues Produktverständnis. In: MEIER, H.; UHLMANN, E. (Hrsg.): Integrierte Industrielle Sach- und Dienstleistungen – Vermarktung, Entwicklung und Erbringung hybrider Leistungsbündel. Springer, Berlin, 2012

[Nau00] NAUMANN, R.: Modellierung und Verarbeitung vernetzter intelligenter mechatronischer Systeme. Fortschrittsbericht VDI-Reihe 20, Nr. 318, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000

[NSF11] NATIONAL SCIENCE FOUNDATION (NSF) (Ed.): Cyber-Physical Systems (CPS). Program Solicitation NSF11-516, 2011

[OMG15] OBJECT MANAGEMENT GROUP (Ed.): OMG Systems Modeling Language. Version 1.4, 2015

[OP10] OSTERWALDER, A.; PIGNEUR, Y.; CLARK, T.; SMITH, A.: Business Model Generation – A handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers. Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2010

[Par08] PARTHIER, R.: Messtechnik – Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure. Friedr. Vieweg & Sohn, Wiesbaden, 4., verbesserte Auflage, 2008

[PAS1094] PUBLIC AVAILABLE SPECIFICATION (PAS): Hybride Wertschöpfung – Integration von Sach- und Dienstleistung. PAS1094, Beuth, Düsseldorf, 2009

[PB97] PAHL, G.; BEITZ, W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung. Springer, Berlin, Heidelberg, 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 1997

[PH14] PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E.: Wie smarte Produkte den Wettbewerb verändern. Harvard Business Manager, 12/2014, 2014

[PH15] PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E.: Wie smarte Produkte Unternehmen verändern. Harvard Business Manager, 12/2015, 2015

[Pla16-ol] PLATTORM INDUSTRIE 4.0 (HRSG.): Was ist Industrie 4.0?. Unter: http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html;jsessionid=EC02B12B25AB3B2501183DFEC114FF9D, 17.09.2016

[PR11] PÖPPELBUß, J.; RÖGLINGER, M.: What makes a useful Maturity Model? A Framework of General Design Principles for Maturity Models and its Demonstration in Business Process Management. In: 2011 European Conference on Information Systems (ECIS) Proceedings, 9.-11. Juni, Tel Aviv, Israel, 2011

[PR14] PÉREZ HERNÁNDEZ, M. E.; REIFF-MARGANIEC, S.: Classifying Smart Objects using capabilities. In: 2014 International Conference on Smart Computing, 3.-5. November, Hong Kong, China, 2014

[PTC15] PTC (Ed.): Connected Product Maturity Model – Achieve Innovation with Connected Capabilities. White Paper, 2015

[RLS+10] RAJKUMAR, R.; LEE, I.; SHA, L.; STANKOVIC, J.: Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution. In: 2010 Design Automation Conference, 13.-18. Juni, Anaheim, California, USA, 2010, pp.731-736

[Rot00] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band 1: Konstruktionslehre. Springer, Berlin, 3. Auflage, 2000

[SB08] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): Klassifikation der Wirtschaftszweige – Mit Erläuterungen. Wiesbaden, 2008

[SB14] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): Produzierendes Gewerbe – Betriebe, Tätige Personen und Umsatz des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden nach Beschäftigtengrößenklassen. Fachserie 4, Reihe 4.1.2, Wiesbaden, 2014

[Sch08] SCHWAB, A. J.: Managementwissen für Ingenieure – Führung, Organisation, Existenzgründung. Springer, Berlin, Heidelberg, 4., neu bearbeitete Auflage, 2008

[Sch09] SCHRÖDER, D.: Elektrische Antriebe – Grundlagen – Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben. Springer, Dordrecht, 4., erweiterte Auflage, 2009

[Sch10] SCHWEITZER, E.: Lebenszyklusmanagement investiver Produkt-Service-Systeme. In: AURICH, J.C.; CLEMENT, M.H. (Hrsg.): Produkt-Service Systeme – Gestaltung und Realisierung. Springer, Heidelberg, New York, 2010

[Sch16] SCHEER, A.-W.: Nutzentreiber der Digitalisierung. Informatik-Spektrum, 4/2016, Springer, Berlin, 2016, S. 275–289

[SD06] SPATH, D.; DEMUß, L.: Entwicklung hybrider Produkte – Gestaltung materieller und immaterieller Leistungsbündel. In: BULLINGER, H.-J.; SCHEER, A.-W. (Hrsg.): Service Engineering

– Entwicklung und Gestaltung innovativer Dienstleistungen. Springer, Berlin, 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2006, S. 463-502

[SDB+06] SCHNEIDER, K.; DAUN, C.; BEHRENS, H.; WAGNER, D.: Vorgehensmodelle und Standards zur systematischen Entwicklung von Dienstleistungen. In: BULLINGER, H.-J.; SCHEER, A.-W. (Hrsg.): Service Engineering – Entwicklung und Gestaltung innovativer Dienstleistungen. Springer, Berlin, 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2006, S. 113-140

[SEI10a] SOFTWARE ENGINEERING INSTITUTE (Ed.): CMMI for Development – Improving processes for developing better products and services. Version 1.3, Carnegie Mellon University, 2010

[SEI10b] SOFTWARE ENGINEERING INSTITUTE (Ed.): CMMI for Services – Improving processes for providing better services. Version 1.3, Carnegie Mellon University, 2010

[SEI10c] SOFTWARE ENGINEERING INSTITUTE (Ed.): CMMI for Acquisition – Improving processes for acquiring better products and services. Version 1.3, Carnegie Mellon University, 2010

[SGG+13] SPATH, D.; GANSCHAR, O.; GERLACH, S.; HÄMMERLE, M.; KRAUSE, T.; SCHLUND, S.: Produktionsarbeit der Zukunft-Industrie 4.0. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2013

[SGK06] SCHEER, A.-W.; GRIEBLE, O.; KLEIN, R.: Modellbasiertes Dienstleistungsmanagement. In: BULLINGER, H.-J.; SCHEER, A.-W. (Hrsg.): Service Engineering – Entwicklung und Gestaltung innovativer Dienstleistungen. Springer, Berlin, 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2006, S. 19-52

[Sho82] SHOSTACK, G. L.: How to Design a Service. European Journal of Marketing, 16/1/1982, 1982, pp. 49–63

[Sim13] SIMON, W.: Blick in die Zukunft: Industrie 4.0 – Die Fusion von Produktionstechnik, Informationstechnologie und Internet. Industrial Engineering, REFA Bundesverband e.V., Darmstadt, 2013

[SJ13] SCHEER, A.-W.; JOST, W. (Hrsg.): ARIS in der Praxis – Gestaltung, Implementierung und Optimierung von Geschäftsprozessen. Springer, Berlin, Softcover reprint of the original 1st edition 2002, 2013

[SK91] SHOSTACK, G. L.; KINGMANN-BRUNDAGE, J.: How to design a service. In: CONGRAM, C.A.; FRIEDMAN, M.L. (Hrsg.): The AMA handbook of marketing for the service industries. American Management Association, New York, USA, 1991

[SK11] SCHUH, G.; KLAPPERT, S.: Technologiemanagement – Handbuch Produktion und Management 2. Springer, Berlin, 2., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2011

[SLS11] SPATH, D.; LINDER, C.; SEIDENSTRICKER, S.: Technologiemanagement – Grundlagen, Konzepte, Methoden. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart, 2011

[SM12] STARK, R.; MÜLLER, P.: HLB-Entwicklungsmethodik - generischer Entwicklungsprozess, Generierung von Anforderungen und Absicherung hybrider Leistungsbündel. In: MEIER, H.; UHLMANN, E. (Hrsg.): Integrierte Industrielle Sach- und Dienstleistungen – Vermarktung, Entwicklung und Erbringung hybrider Leistungsbündel. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, S. 37-60

[Son14] SONDERMANN-WÖLKE, C.: Entwurf und Anwendung einer erweiterten Zustandsüberwachung zur Verlässlichkeitssteigerung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Shaker, Schriften des Lehrstuhls für Mechatronik und Dynamik, Band 3, Paderborn, 2014

[SR10] SCHENK, J.; RIGOLL, G.: Mensch-Maschine-Kommunikation – Grundlagen von sprach- und bildbasierten Benutzerschnittstellen. Springer, Heidelberg, 2010

[SRA+17] SCHALLMO, D.; RUSNJAK, A.; ANZENGRUBER, J.; WERANI, T.; JÜNGER, M. (Hrsg.): Digitale Transformation von Geschäftsmodellen – Grundlagen, Instrumente und Best Practices. Springer Gabler, Wiesbaden, 2017

[Sta04] STAHL, W. H.: Industrie-Zentrifugen – Maschinen- und Verfahrenstechnik. DrM Press, Männedorf, 2004

[Sto10] STOLL, K.: Planung und Konzipierung von Marktleistungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 270, Paderborn, 2010

[Str96] STRUBE, G. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta, Stuttgart, 1996

[SW89] SIMPSON, J.A.; WEINER, E.S. C. (Hrsg.): The Oxford English dictionary. Clarendon Press, Oxford, 2nd edition, 1989

[Tay06] TAYLOR, F. W.: The principles of scientific management. Cosimo, New York, 2006

[TGP08] TAN, Y.; GODDARD, S.; PÉREZ, L. C.: A prototype architecture for cyber-physical systems. ACM SIGBED Review, 5/1/2008, 2008, pp. 1–2

[Ulr95] ULRICH, K.: The role of product architecture in the manufacturing firm. Research Policy, 24, 1995, pp. 419-440

[VDA10] VERBAND DEUTSCHER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V. (VDA) (Hrsg.): Joint Quality Management in the Supply Chain – Product Creation – Maturity Level Assurance for new Parts. Heinrich Druck und Medien, Frankfurt a. M., 2. Auflage, 2010

[VDI13] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation 2013

[VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI 2206, Beuth, Berlin, 2004

[VDI2220] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Produktplanung – Ablauf, Begriffe und Organisation. VDI 2220, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1980

[VDI2221] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI 2221, Beuth, Berlin, 1993

[VDM16] VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU E.V. (VDMA) (Hrsg.): Maschinenbau in Zahl und Bild 2016. VDMA Verlag, Mühlheim am Main, 2016

[VDM14] VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU E.V. (VDMA); MCKINSEY & COMPANY (Hrsg.): Zukunftsperspektive deutscher Maschinenbau – Erfolgreich in einem dynamischen Umfeld agieren, 2014

[Wei06] WEILKIENS, T.: Systems Engineering mit SysML/UML – Modellierung, Analyse, Design. Dpunkt, Heidelberg, 1. Auflage, 2006

[WK15] WAHLSTER, W.; KIRCHNER, F.: Autonome Systeme – Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen und Anwendungspotentiale. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI, 2015

[Wle01] WLEKLINSKI, C.: Methode zur Effektivitäts- und Effizienzbewertung der Entwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 100, Paderborn, 2001

[Zan76] ZANGEMEISTER, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität Berlin, Berlin, 1976

[Zan15] ZANNI, A.: Cyber-physical systems and smart cities – Learn how smart devices, sensors, and actuators are advancing Internet of Things implementations. IBM Corporation, 2015

[ZG04] ZIMBARDO, P. G.; GERRIG, R. J.: Psychologie. Pearson Studium, München, Boston,16., aktualisierte Auflage, 2004

[Zwi66] ZWICKY, F.: Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild. Droemer-Knaur, München, 1966-1971

Anhang

Inhaltsverzeichnis Seite

A1 Ergänzungen zur Problemanalyse A-1

A2 Ergänzungen zum Stand der Technik A-5

A2.1 Generische Wirkstruktur fortgeschrittener mechatronischer Systeme nach DUMITRESCU A-5

A2.2 Prototyp-Architektur für CPS nach TAN ET AL. A-7

A2.3 Übersicht der CPS-Fähigkeiten nach GEISBERGER/BROY A-9

A2.4 European Foundation for Quality Management (EFQM) Excellence Modell A-10

A2.5 Hypro Design A-12

A3 Ergänzungen zum Reifegradmodell für CPS A-15

A3.1 Steckbriefe der Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene A-15

A3.2 Katalog der Verbesserungsziele A-20

A4 Ergänzungen zur Validierung A-23

A1 Ergänzungen zur Problemanalyse

Tabelle A-1: Ausgewählte Definitionen von Cyber-Physical Systems[46]

Autor	Definitionen Cyber-Physical Systems
LEE [Lee08, S. 1]	*„Cyber-Physical Systems (CPS) are integrations of computation with physical processes. Embedded computers and networks monitor and control the physical processes, usually with feedback loops where physical processes affect computations and vice versa.“*
BROY [Bro10, S. 17]	*„Cyber-Physical Systems adressieren die enge Verbindung eingebetteter Systeme zur Überwachung und Steuerung physikalischer Vorgänge mittels Sensoren und Aktuatoren über Kommunikationseinrichtungen mit den globalen digitalen Netzen (dem „Cyberspace“).“*
THE NETWORKING AND INFORMATION TECHNOLGY RESEARCH AND DEVELOPMENT PROGRAM (NITRD) [NIT15-ol, S. 2]	*“Cyber Physical Systems (CPS) are smart networked systems with embedded sensors, processors and actuators that are designed to sense and interact with the physical world (including the human users), and support real-time, guaranteed performance in safety-critical applications. In CPS systems, the joint behavior of the “cyber” and “physical” elements of the system is critical - computing, control, sensing and networking can be deeply integrated into every component, and the actions of components and systems must be safe and interoperable.”*
BAHETI/GILL [BG11, S. 161]	*“The term cyber-physical systems (CPS) refers to a new generation of systems with integrated computational and physical capabilities that can interact with humans through many new modalities. The ability to interact with, and expand the capabilities of, the physical world through computation, communication, and control is a key enabler for future technology developments.”*

[46] Die Zusammenstellung der Definitionen beruht auf der von mir betreuten Studienarbeit „Methode zur Analyse von Wechselwirkungen zwischen CPS-Reifegraden und Geschäftsmodellen“ von Simon Alexander Becker.

Tabelle A-1: Ausgewählte Definitionen von Cyber-Physical Systems

Autor	Definitionen Cyber-Physical Systems
NATIONAL SCIENCE FOUNDATION (NSF) [NSF11, S. 4]	*"The term "cyber-physical systems" refers to the tight conjoining of and coordination between computational and physical resources. We envision that the cyber-physical systems of tomorrow will far exceed those of today in terms of adaptability, autonomy, efficiency, functionality, reliability, safety, and usability. Research advances in cyber-physical systems promise to transform our world with systems that respond more quickly (e.g., autonomous collision avoidance), are more precise (e.g., robotic surgery and nano-tolerance manufacturing), work in dangerous or inaccessible environments (e.g., autonomous systems for search and rescue, firefighting, and exploration), provide large-scale, distributed coordination (e.g., automated traffic control), are highly efficient (e.g., zero-net energy buildings), augment human capabilities, and enhance societal wellbeing (e.g., assistive technologies and ubiquitous healthcare monitoring and delivery)."*
RAJKUMAR ET AL. [RLS+10, S. 731]	*"Computing and communication capabilities will soon be embedded in all types of objects and structures in the physical environment. […].Such systems that bridge the cyber-world of computing and communications with the physical world are referred to as cyber-physical systems. […]. Cyber-physical systems (CPS) are physical and engineered systems whose operations are monitored, coordinated, controlled and integrated by a computing and communication core. This intimate coupling between the cyber and physical will be manifested from the nano-world to large-scale wide-area systems of systems. […]. CPS will transform how humans interact with and control the physical world around us. […]. CPS interact with the physical world, and must operate dependably, safely, securely, and efficiently and in real-time."*
KAGERMANN ET AL. [KWH13, S. 84]	*„CPS umfassen eingebettete Systeme, Produktions-, Logistik-, Engineering-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internetdienste, die mittels Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken, mittels digitaler Netze untereinander verbunden sind, weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen und über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen."*
Simon [Sim13, S. 39]	*„Ein Cyber-physical System ist ein Verbund von mechanischen und elektronischen Komponenten, die über ein Netz miteinander kommunizieren und sich koordinieren. Bei diesen Komponenten handelt es sich in der Regel um eingebettete Systeme, die jetzt im Verbund wirken."*

Tabelle A-1: Ausgewählte Definitionen von Cyber-Physical Systems

Autor	Definitionen Cyber-Physical Systems
SPATH ET AL. [SGG+13, S. 23]	*„Cyber-Physische Systeme (CPS, engl. Cyber-Physical Systems) sind mit einer eigenen dezentralen Steuerung (engl. embedded systems) versehene intelligente Objekte, welche in einem Internet der Daten und Dienste miteinander vernetzt sind und sich selbstständig steuern.“*
BAUERNHANSL, [Bau14, S. 16]	*[…] [CPS] sind Objekte, Geräte, Gebäude, Verkehrsmittel, aber auch Produktionsanlagen, Logistikkomponenten etc., die eingebettete Systeme enthalten, die kommunikationsfähig gemacht werden. Diese Systeme können über das Internet kommunizieren und Internetdienste nutzen. Cyber-physische Systeme können ihre Umwelt unmittelbar mit ihrer entsprechenden Sensorik erfassen, sie mit Hilfe weltweit verfügbarer Daten und Dienste auswerten, speichern und sie können mit Hilfe von Aktoren auf die physikalische Welt einwirken.“*
LICHTBLAU ET AL. [LSB+15, S.66]	*„CPS bilden die Verbindung zwischen der physischen und virtuellen Welt, indem sie über eine Dateninfrastruktur, das „Internet der Dinge“, kommunizieren. Sie sind das Grundgerüst, welches es ermöglicht, die reale Produktion virtuell abzubilden und alle Datenströme, die durch Sensoren und andere IT-Systeme entstehen, auszuwerten und im Zusammenhang darzustellen.“*
BISCHOFF [Bis15, S. 9]	*„CPS sind physische Objekte, die mit einem eingebetteten System sowie Sensoren und Aktoren ausgestattet sind. Dies verleiht ihnen Intelligenz und die Fähigkeiten zur Selbststeuerung, zur Vernetzung mit anderen CPS und zur Interaktion mit ihrer Umgebung […]. Als eingebettete Systeme erfassen sie mittels Sensoren unmittelbar physikalische Daten und interagieren auf dieser Grundlage aktiv oder reaktiv mit der physikalischen und der virtuellen Welt. […]. Über die digitalen Netze nutzen sie weltweit verfügbare Daten und Dienste und verfügen über eine Reihe multi-modaler Mensch-Maschine-Schnittstellen.“*

A2 Ergänzungen zum Stand der Technik

A2.1 Generische Wirkstruktur fortgeschrittener mechatronischer Systeme nach DUMITRESCU

Die generische Wirkstruktur fortgeschrittener mechatronischer Systeme nach DUMITRESCU ist eine Entwurfsschablone für die Systemarchitektur zunehmend intelligenter werdender technischer Systeme. Sie bildet die grundlegende Wirkungsweise informationsverarbeitender und kognitiver Funktionen ab. Die Wirkstruktur unterscheidet vier Ebenen (siehe Bild A-1). Auf der untersten Ebene befinden sich die physikalischen Systemelemente Energieversorgung, Hardware für die Informationsverarbeitung und die passive Grundstruktur. Sie stellen gemeinsam das **Grundsystem** dar. Über dem Grundsystem liegen die drei Ebenen der **Informationsverarbeitung**. Die Schnittstelle zwischen Grundsystem und Informationsverarbeitung bilden **Sensorik** und **Aktorik**. Analog zum Technologiekonzept Intelligenter Technischer Systeme nach GAUSEMEIER ET AL. orientiert sich die generische Wirkstruktur fortgeschrittener mechatronischer Systeme am Architekturkonzept des Operator-Controller-Moduls [DAG13, S. 116], [Dum10, S. 113ff.].

Der **Controller** ist die unterste Ebene der Informationsverarbeitung, auf der die nichtkognitive Regulierung realisiert wird. Bestandteile der Controller-Ebene sind **Regler** zur Verbesserung des Systemverhaltens durch Ausregelung von Störgrößen sowie optionale **Ein- und Ausgangsschalter** zur Umsetzung unterschiedlicher Regelkonfigurationen. Der **reflektorische Operator** bildet die Mittelschicht der Informationsverarbeitung, auf der die assoziative Regulierung umgesetzt wird. Bestandteile des reflektorischen Operators sind die **Datenverarbeitung**, der **Datenspeicher** und das **Kommunikationsmodul**. Datenverarbeitung und -speicher dienen zum Abrufen, Verarbeiten, Weiterleiten sowie Speichern von Daten. Über das Kommunikationsmodul erfolgt der Informationsaustausch mit externen Systemen [DAG13, S. 116f.], [Dum10, S. 115f.].

Auf der obersten Ebene des **kognitiven Operators** erfolgt die kognitive Regulierung. Diese Ebene bildet den Kern der kognitiven Informationsverarbeitung. Bei fortgeschrittenen mechatronischen Systemen liegt der Fokus hier auf der Realisierung des Selbstoptimierungsprozesses. Elemente des kognitiven Operators sind die Situationsanalyse, Zielbestimmung, Verhaltensanpassung sowie eine Wissensbasis. Die **Situationsanalyse** nimmt die zur Optimierung relevanten Informationen auf, prüft und klassifiziert diese (z.B. aktuelle Strategie des Gesamtsystems oder aufbereitete Daten von externen Systemen). Da die kurzfristige Informationsakquisition nicht ausreicht, um autonomes und intelligentes Systemverhalten zu realisieren, werden die wichtigsten Informationen in der **Wissensbasis** gespeichert. Die Ergebnisse der Situationsanalyse gehen in die **Zielbestimmung** ein, in der sich das systeminterne Zielsystem befindet. Mögliche Änderungen des Systemverhaltens werden an die **Verhaltensanpassung** weitergegeben. Die Verhaltensanpassung greift jedoch nicht direkt auf die Regelung bzw. das Grundsystem

zu, sondern übergibt die Informationen an den reflektorischen Operator weiter [DAG13, S. 118], [Dum10, S. 116f.].

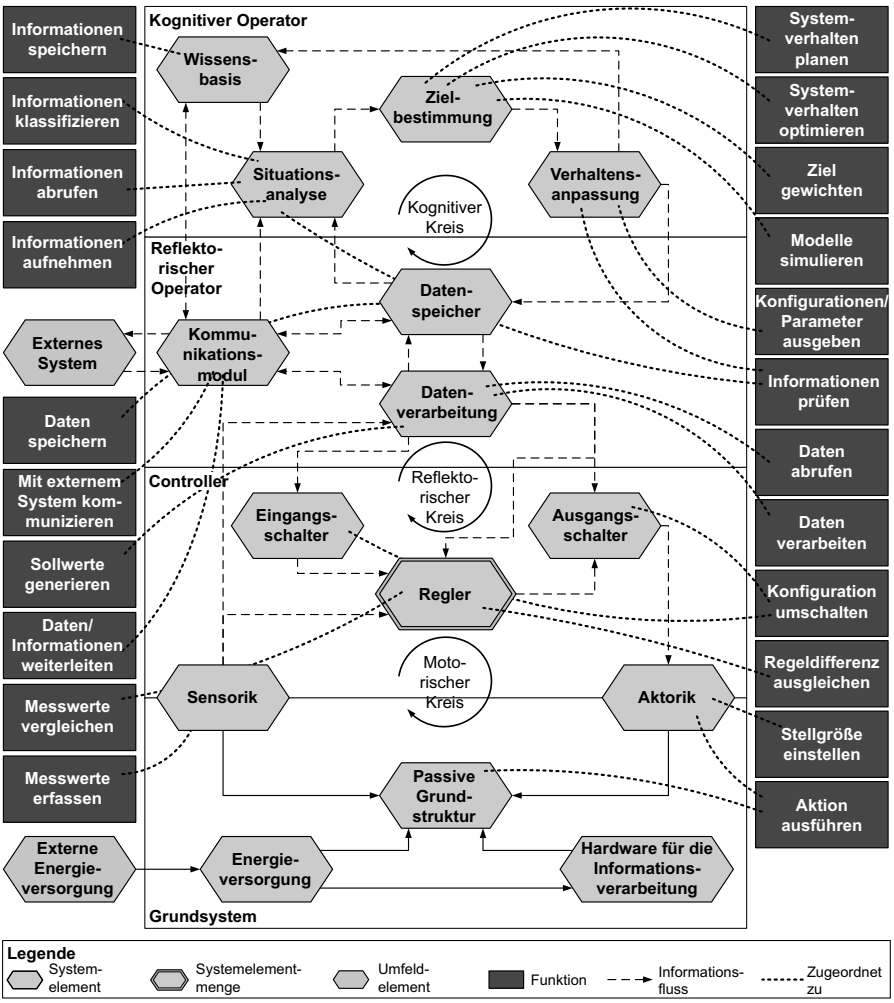


Bild A-1: Generische Wirkstruktur fortgeschrittener mechatronischer Systeme nach DUMITRESCU *[Dum10, S. 114]*

Das Zusammenspiel der einzelnen Systemelemente auf den erläuterten vier Ebenen wird durch gerichtete Beziehungen beschrieben. Dabei erfolgt eine Unterscheidung zwischen Energieflüssen auf der Ebene des Grundsystems und Informationsflüssen auf den Ebenen der Informationsverarbeitung. Über die Darstellung der Wirkbeziehungen hinaus, werden zu den Systemelementen Funktionen zugeordnet. So erfüllt das Systemelement Aktorik z.B. die Funktionen *Aktion ausführen* und *Stellgröße einstellen*. Mit der Zuordnung von

Systemelementen zu Funktionen zeigt DUMITRESCU, dass die in Bild A-1 dargestellte generische Wirkstruktur fortgeschrittener mechatronischer Systeme alle in der Kognitionswissenschaft definierten kognitiven Funktionen erfüllt. Durch Konkretisierung der generischen Wirkstruktur entstehen somit Prinziplösungen für fortgeschrittene mechatronische Systeme [DAG13, S. 118]. [Dum10, S. 116f.].

Bewertung: DUMITRESCU erstellt eine generische Wirkstruktur fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Dabei stellt die Wirkstruktur vordergründig die prinzipielle Wirkungsweise kognitiver Informationsverarbeitung dar, berücksichtig aber ebenso das Zusammenspiel mit den Systemelementen der physikalischen Ebene. Die generische Wirkstruktur beschreibt neben dem statischen Aufbau und der prinzipiellen Wirkungsweise auch den Zusammenhang zwischen Systemelementen und Funktionen. Somit entstehen durch eine Konkretisierung der generischen Systemelemente mit konkreten Lösungen erste Prinziplösungen für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Im Hinblick auf CPS-Merkmale deckt die generische Wirkstruktur zwar einen Großteil, jedoch nicht alle Merkmale ab. Die Merkmale Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie Dienste werden nicht explizit adressiert.

A2.2 Prototyp-Architektur für CPS nach TAN ET AL.

Die Prototyp-Architektur von TAN ET AL. ist eine detaillierte und umfangreiche Architektur zur Veranschaulichung von Cyber-Physical Systems (siehe Bild A-2). Dafür greifen sie eine bestehende Architektur für eingebettete Systeme auf und erweitern diese um CPS-Merkmale. Die Prototyp-Architektur gliedert CPS in drei Ebenen: die physikalische Welt (changing physical world), die Ereignis-/Informationswelt (Event/Information World) und eine Ebene zur Echtzeitsteuerung und Kontrolle des Systems (Real-Time Context Aware Logics) [TGP08, S. 2].

Elemente der physikalischen Welt sind **Aktoren** und der **Mensch**, die auf Objekte in der physikalischen Welt einwirken, sowie **Sensoren**, die Zustände und Veränderungen dort aufnehmen. Die Informationen der physikalischen Welt werden via **Kommunikationssystem** (next-generation network) übertragen und auf **sicheren Datenservern** gespeichert (Secured Knowledge Database Server). Kommunikationssystem und Datenserver befinden sich auf der Ebene der Ereignis-/Informationswelt. Nach TAN ET AL. ist die Unterscheidung zwischen Ereignissen und Informationen ein wichtiger Aspekt für die Kommunikation von CPS. Ereignisse sind z.B. von Sensoren erfasste Daten der physikalischen Welt. Informationen entstehen aus der Verarbeitung der Daten und stellen eine Abstraktion der physikalischen Welt dar [TGP08, S. 2].

Auf der Steuerungs- und Kontrollebene befinden sich eine oder mehrere **CPS-Einheiten** (CPS Unit), die für die Informationsverarbeitung verantwortlich sind und das Verhalten des Systems steuern. Dafür greifen sie auf semantische Gesetze, sog. Event-Condition-Action-Regeln, zurück. Der Mensch kann auf die CPS-Einheiten zugreifen und die

semantischen Gesetze manipulieren (**Mensch-Maschine-Schnittstelle**). Die CPS-Einheiten arbeiten nach dem Publish/Subscribe Schema. Das bedeutet, dass sie nur auf Ereignisse und Informationen zurückgreifen und diese bereitstellen, wenn sie für ein bestimmtes Systemziel relevant sind. Alle Komponenten der Prototyp-Architektur werden durch gerichtete Beziehungen miteinander verbunden. Textuell wird beschrieben, um welche Art von Beziehung es sich handelt. Beispiele für Beziehungen sind Sensor- und Aktor-Ereignisse oder Out-of-Date Events and Information [TGP08, S. 2].

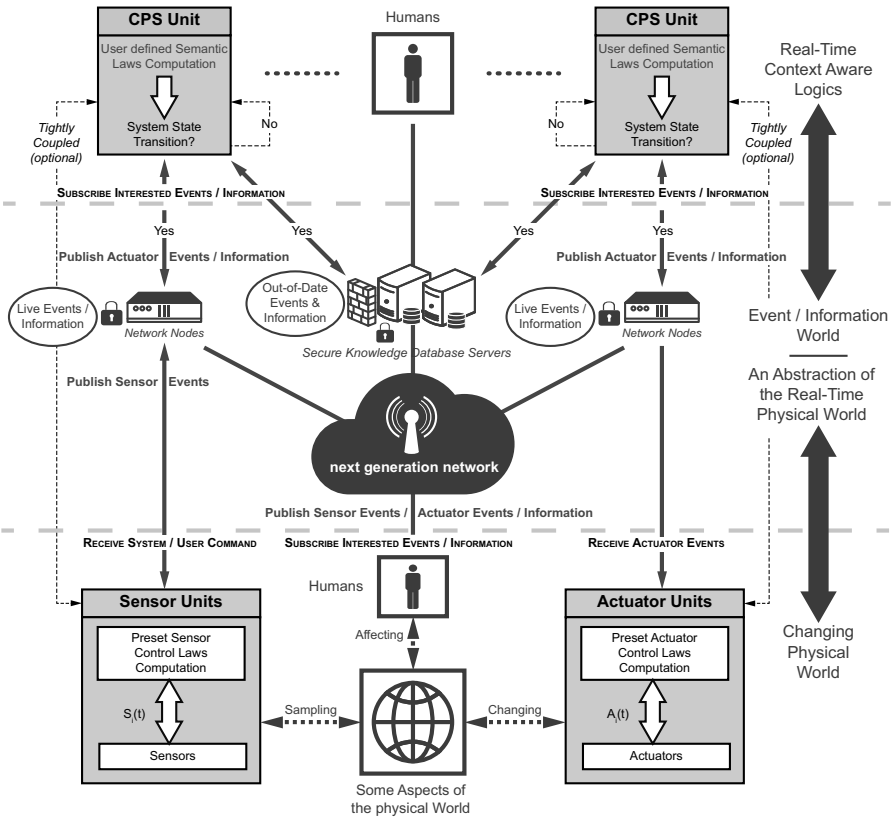


Bild A-2: Prototyp-Architektur für CPS nach TAN ET AL. [TGP08, S. 2]

Bewertung: Die Protoyp-Architektur für CPS ist sehr detailliert, aber dennoch generisch. Die Architektur enthält wesentliche CPS-Merkmale und bildet die Beziehungen der Elemente untereinander ab. TAN ET AL. deuten an, dass ein CPS aus mehreren CPS-Einheiten bestehen kann. Damit werden sie dem Umstand der Vernetzung von Teilsystemen zu einem Gesamtsystem gerecht. Nachteil der Prototyp-Architektur ist die fehlende Berücksichtigung der CPS-Merkmale Daten und Dienste, die zumindest nicht explizit abgebildet werden. Des Weiteren wirkt sich die detaillierte Darstellung der Beziehungen negativ auf die Übersichtlichkeit der Architektur aus.

A2.3 Übersicht der CPS-Fähigkeiten nach GEISBERGER/BROY

(1) CYBER-PHYSICAL, (SENSOREN), AKTOREN, VERNETZT (LOKAL-GLOBAL), VIRTUELL, ECHTZEITSTEUERUNG	(2) SYSTEMS OF SYSTEMS (SOS), KONTROLLIERTER VERBUND MIT DYNAMISCHEN GRENZEN	(3) KONTEXT-ADAPTIVE UND (TEIL-) AUTONOM HANDELNDE SYSTEME	(4) KOOPERATIVE SYSTEME MIT VERTEILTER, WECHSELNDER KONTROLLE	(5) UMFASSENDE MENSCH-SYSTEM-KOOPERATION
- parallele Erfassung (Sensoren), Fusionierung, Verarbeitung physikalischer Daten der Umgebung, lokal, global und in Echtzeit (Physical Awareness) - Lageinterpretation im Hinblick auf Erreichung der Ziele und Aufgaben des Systems - Erfassung, Interpretation, Ableitung, Prognose von Störungen, Hindernissen, Risiken - Interagieren, Einbinden, Regeln und Steuerung von Systemkomponenten und -funktionen - global verteilte, vernetzte Echtzeitsteuerung und -regelung	- Interpretation der Umgebungs- und Situationsdaten über mehrere Stufen, abhängig von unterschiedlichen Anwendungssituationen - gezielte Auswahl, Einbindung, Abstimmung und Nutzung von Diensten – abhängig von Situation, lokalem und globalem Ziel und Verhalten - Dienstkomposition und -integration dezentrale Kontrolle: Erkennen fehlender Dienste, Daten, Funktionen und aktive Suche sowie dynamische Einbindung - Selbstorganisation - Bewerten des für die Anwendung erforderlichen Nutzens und Qualität (QoS, Gesamtqualität) von einzubindenen Komponenten, Diensten – auch hinsichtlich möglicher Risiken - Verlässlichkeit im Sinne garantierter QoS (Compliance) - Zugangskontrolle systemeigener Daten und Dienste	- umfassende, durchgängige Kontextwahrnehmung - kontinuierliches Erheben, Beobachten, Auswählen, Verarbeiten, Bewerten, Entscheiden, Kommunizieren der Umgebungs-, Situations- und Anwendungsdaten (vieles in Echtzeit) - gezielte Anpassung der Interaktion, Koordination, Steuerug mit/von anderen Systemen und Diensten - Erkennung, Analyse und Interpretation der Pläne und Absichten der Objekte, Systeme und beteiligter Nutzer - Modellerstellung von Anwendungsgebiet und -domäne, Beteiligten samt ihrer Rollen, Ziele und Anforderungen, verfügbaren Dienste und Aufgaben - Festlegung von Zielen und Handlungsschritten unter Berücksichtigung und Abwägung von Alternativen in Bezug auf Kosten und Risiken - Selbstwahrnehmung im Sinne Wissens über eigene Situation, Zustand und Handlungsmöglichkeiten - Lernen, etwa geänderter Arbeits-, Logistikprozesse, Gewohnheiten, Interaktionsverhalten etc. und entsprechende Verhaltensanpassung	- verteilte, kooperative und interaktive Wahrnehmung und Bewertung der Lage - verteilte kooperative und interaktive Bestimmung der durchzuführenden Schritte – in Abhängigkeit von der Lagebewertung, von den Zielen einzelner Akteure und von den Zielen der diese Akteure einschließenden Gemeinschaft (lokale vs. globale Ziele) - koordinierte Verarbeitung von Massendaten - koordinierte Abschätzung von Verhandlung der letztendlich getroffenen Entscheidung, d.h. eigene und gemeinsame Kontroll- und Entscheidungsautonomie - Entscheidung unter unsicherem Wissen - kooperatives Lernen und Anpassen an Situationen und Erfordernisse - Einschätzung der Qualität der eigenen und fremden Dienste und Fähigkeiten - Fähigkeiten der Selbstorganisation im Verbund	- intuitive, multimodale, aktive und passive MMI-Unterstützung (vereinfachte Steuerung) - Unterstützung einer weiteren (Raum, Zeit) und vergrößerten Wahrnehmung. Unterstützung einer erweiterten Handlungsfähigkeit einzelner und mehrerer Menschen (Gruppen) - Erkennung und Interpretation menschlichen Verhaltens inklusive Gefühlen, Bedürfnisse und Absichten - Erfassung und Bewertung von Zustand und Umgebung von Mensch und System (Ausdehnung der Wahrnehmungs- und Bewertungsfähigkeiten) - Integrierte und interaktive Entscheidung und Handlung von Systemen und Mensch, Menschenmengen - Lernfähigkeit
→ → zunehmende Öffnung, Komplexität, Autonomie, „Smartness“ und Evolution der Systeme (mit disruptiven Effekten in den Anwendungswelten) → →				

Bild A-3: Übersicht der erforderlichen neuen Fähigkeiten von CPS nach GEISBERGER/BROY [GB12, S. 96 f.]

A2.4 European Foundation for Quality Management (EFQM) Excellence Modell

Das EUROPEAN FOUNDATION FOR QUALITY MANAGEMENT (EFQM) Excellence Modell schafft Unternehmen einen Rahmen zur Umsetzung des Total-Quality-Managements (TQM). TQM ist eine ganzheitliche Qualitätsmanagementmethode, die Qualität in den Mittelpunkt rückt, um so die Kundenzufriedenheit sicherzustellen [Sch08, S. 310]. Mit Hilfe des EFQM Excellence Modells können Unternehmen die eigenen Stärken und Schwächen im TQM erkennen und so ihren Geschäftserfolg verbessern. Zudem werden sie beim Aufbau und der kontinuierlichen Weiterentwicklung umfassender Managementsysteme unterstützt [DGQ13, S. 2f.], [GP14, S. 322]. Das Modell wird regelmäßig durch die EFQM aktualisiert. Die folgenden Ausführungen basieren auf der aktuellsten Version von 2013 [DGQ13].

Der **Aufbau** des EFQM Excellence Modells besteht aus den drei Komponenten Grundkonzepte der Exzellenz, Kriterienmodell sowie RADAR[47]-Logik. Die *Grundkonzepte der Exzellenz* beschreiben acht Grundprinzipien, auf denen die nachhaltige Exzellenz jeder Organisation beruht. Beispiele für die Grundprinzipien sind „Nutzen für Kunden schaffen“, „die Zukunft nachhaltig gestalten“ oder „Kreativität und Innovation fördern“. Das *Kriterienmodell* bildet die Grundstruktur des Modells, die in Bild A-4 abgebildet ist.

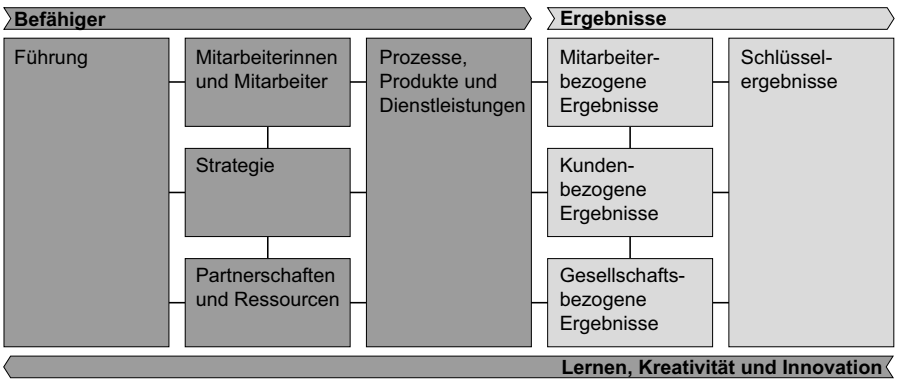


Bild A-4: Kriterienmodell des EFQM Excellence Modells [Ben13, S. 46]

Die Grundstruktur besteht aus insgesamt neun gewichteten Kriterien (Handlungsfelder), die in Befähiger- sowie Ergebniskriterien unterteilt werden. Befähiger sind die Kriterien, die eine Grundlage für exzellente Unternehmensergebnisse bilden. Zu diesen Kriterien zählen „Führung“, „Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter“, „Strategie“, „Partnerschaften und Ressourcen“ sowie „Prozesse, Produkte und Dienstleistungen“. Zur Messung des Erfolgs

[47] RADAR steht für die Anfangsbuchstaben der Begriffe Results (Ergebnisse), Approach (Vorgehensweise), Deployment (Umsetzung), Assessment (Bewertung) und Refinement (Verbesserung) [DGQ, S. 4].

dienen Ergebnis-Kriterien. Sie beschreiben, was eine Organisation mit Hilfe der Befähiger erreicht hat. Das EFQM Excellence Modell definiert vier Ergebniskriterien: „Mitarbeiterbezogene Ergebnisse“, „Kundenbezogene Ergebnisse“, „Gesellschaftsbezogene Ergebnisse“ und „Schlüsselergebnisse“. Jedes der neun Kriterien wird in weitere Teilkriterien (Handlungselemente) unterteilt, sodass sich insgesamt 32 Teilkriterien ergeben [DGQ13, S. 3], [GP14, S. 323].

Das EFQM Excellence Modell beschreibt das Idealbild einer Organisation. Im Zuge der **Leistungsbewertung** gilt es herauszufinden, inwieweit eine Organisation von dem Idealbild abweicht. Grundlage der Leistungsbewertung ist ein Punktesystem, mit dem eine Organisation maximal 1.000 Punkte erreichen kann. Zur Ermittlung der Gesamtpunktzahl wird für jedes Teilkriterium die Punktzahl bestimmt. Die Leistungsbewertung erfolgt mittels *RADAR-Logik*, die sicherstellt, dass alle 32 Teilkriterien nach dem gleichen Schema bewertet werden. Dazu wird eine Bewertungsmatrix bereitgestellt, die sich in verschiedene Bewertungsaspekte gliedert. Die Bewertung der Befähiger-Kriterien erfolgt anhand der Bewertungsaspekte „Vorgehen“, „Umsetzung“ sowie „Bewertung und Verbesserung“. Die Ergebnis-Kriterien werden hinsichtlich „Relevanz und Nutzen“ sowie „Leistung“ untersucht. Jeder Bewertungsaspekt hat unterschiedliche Attribute, die individuell bewertet werden. Beispielsweise hat der Aspekt „Vorgehen“ die Attribute „fundiert“ und „integriert“. Aus der Bewertung der Attribute ergibt sich die Bewertung der einzelnen Teilkriterien, aus denen unter Berücksichtigung vorgegebener Gewichtungen die Gesamtpunktzahl der Organisation ermittelt werden kann. Für die **Leistungssteigerung** sieht das EFQM Excellence Modell vor, dass eine möglichst hohe Punktzahl erstrebenswert ist. Die Gesamtpunktzahl kann zum Vergleich mit anderen Organisationen herangezogen oder zur Bewerbung für den EFQM Excellence Award genutzt werden [DGQ13, S. 4f.], [GP14, S. 323].

Für die **Durchführung** des EFQM Excellence Modells bieten sich Unternehmen drei Möglichkeiten. Mit Hilfe von *Fragebögen* kann eine Selbstbewertung vorgenommen werden, die erste Verbesserungspotentiale aufdeckt. Im Rahmen von *Workshops* erfolgt eine gezielte Datenerhebung mittels RADAR-Logik. Voraussetzung für die Workshops ist eine Schulung der Teilnehmer. Die aussagekräftigste, zugleich aber auch aufwändigste Bewertungsmöglichkeit ist die *Bewerbungssimulation*. Hier wird eine Bewerbung für einen Qualitätspreis simuliert und durch externe Assessoren bewertet. Diese Möglichkeit kann zur Bewerbung für den EFQM Excellence Award genutzt werden [GP14, S. 323f.].

Bewertung: Das EFQM Excellence Modell ist ein Reifegradmodell zur Umsetzung des Total-Quality-Managements. Dazu stellt es Grundkonzepte der Exzellenz, ein Kriterienmodell mit Befähiger- und Ergebnis-Kriterien sowie die RADAR-Logik zur Durchführung bereit. Die Leistungsbewertung erfolgt anhand eines einheitlichen Punktesystems, das einen Vergleich mit anderen Unternehmen ermöglicht. Dabei geht das Reifegradmodell davon aus, dass die höchste Punktzahl erstrebenswert ist. Unternehmensindividuelle Faktoren werden bei der Zielbestimmung nicht berücksichtigt. Das EFQM Excellence

Modell ist ein sehr umfangreiches Reifegradmodell, dessen Anwendung erheblichen Aufwand für die Unternehmen verursacht. Es erlaubt zwar eine erste Selbsteinschätzung mittels Fragebögen, eine offizielle Zertifizierung setzt jedoch externe Assessoren und eine intensive Vorbereitung im Unternehmen voraus.

A2.5 Hypro Design

Hypro Design ist eine Sprache zur Modellierung von hybriden Leistungsbündeln [BBK+09, S. 57]. Die Sprache entstand im Rahmen des gleichnamigen Forschungsprojekts zur Erstellung einer Entwicklungsarchitektur für hybride Produkte [FIR16-ol]. Hypro Design besteht aus einem konzeptionellen und einem repräsentationellen Teil. Der konzeptionelle Teil definiert die Sprachelemente und deren Beziehungen. Durch den repräsentationellen Teil erfolgt die Festlegung geeigneter grafischer Repräsentationsformen, die die Anwendung der Sprache für Modellentwickler und -nutzer vereinfacht. Der konzeptionelle Teil wird nachfolgend erläutert [BBK+09, S. 58]. Bild A-5 zeigt die Konstrukte der Hypro-Design-Modellierungssprache in einem sprachbasierten Metamodell.

Das Konstrukt *Hybrides Leistungsbündel (Typebene)* markiert den Einstiegspunkt in die Modellierung. Es definiert alle verfügbaren Leistungen eines generischen Leistungsbündels inklusive Leistungseigenschaften und Strukturbeziehungen. Dem hybriden Leistungsbündel auf Typebene sind *Module* zugeordnet, die in sich geschlossene Einheiten bilden und in unterschiedlichen Leistungsbündeln wiederverwendet werden können. Module bestehen aus *Leistungen*, die das Ergebnis einer betrieblichen Faktorkombination sind. Hierbei handelt es sich sowohl um Sach- als auch um Dienstleistungen, die nicht explizit unterschieden werden. Durch das Konstrukt *Leistungsstruktur* können Leistungen in Teilleistungen untergliedert werden. Auf diese Weise können Sachleistungen hierarchisch strukturiert und Dienstleistungen als Prozessfolge abgebildet werden. *Leistungseigenschaften* charakterisieren Leistungen, z.B. durch die Spezifizierung physikalischer Eigenschaften. Die Selektions- und Kombinationsmöglichkeiten von Modulen werden durch *Regeln* eingeschränkt. Hierdurch wird sichergestellt, dass unverträgliche Modulkombinationen nicht in einem hybriden Leistungsbündel auftreten [BBK+09, S. 58ff.].

Die Modellierung verschiedener Phasen und Zeiträume in einem Lebenszyklus erfolgt mit Hilfe der Konstrukte *Lebenszyklusphase* und *Intervall*. Jede Leistung hat diverse Lebenszyklusphasen (z.B. Verkauf und Nutzung), die unterschiedliche Intervalle haben (z.B. 1 Jahr). Jedem Intervall können verschiedene *Aktivitäten* zugeordnet werden. Dies sind u.a. einzelne Arbeitsgänge, die im Gegensatz zu Leistungen nicht individuell vermarktbar sind. Jeder Aktivität können zuständige *Organisationseinheiten*, *Stellen* und *Ressourcen* zugeordnet werden. *Kostenstellen*, die mit Stellen und Ressourcen verknüpft werden, dienen der späteren Kostenrechnung für das hybride Leistungsbündel. Der *Kunde* kann die zur Verfügung stehenden Leistungen selektieren und kombinieren. Das Kombinationsergebnis stellt die *Modul-Leistungs-Zuordnung* dar. Durch das *Hybride Leistungsbündel (Instanzebene)* wird letztendlich die kundenspezifische HLB-Variante abgebildet.

Die Anwendung der Modellierungssprache unterstützt ein Softwarewerkzeug [BBK+09, S. 85ff.].

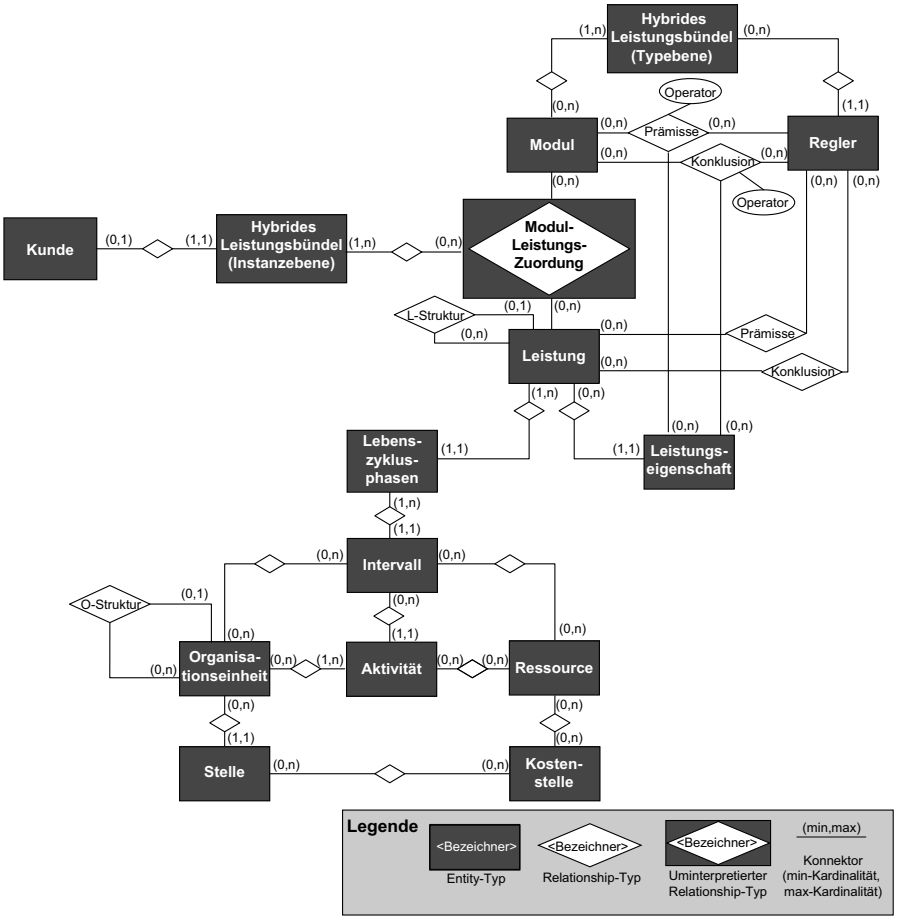


Bild A-5: Sprachbasiertes Metamodell der Hypro-Design-Modellierungssprache [BBK+09, S. 59]

Bewertung: Die Hypro-Design-Modellierungssprache dient zur Modellierung, Konfiguration und Bewertung hybrider Leistungsbündel. Dazu werden Sprachelemente, Beziehungen sowie grafische Repräsentationsformen bereitgestellt, die in einem Softwarewerkzeug implementiert sind. Durch die vorgegebenen Sprachelemente können hybride Leistungsbündel detailliert beschrieben werden. Dabei zielt Hypro Design insbesondere auf die Konfiguration von individuellen HLBs ab, die mittels Leistungseigenschaften verglichen werden können. Entsprechende Regeln schließen dabei inkonsistente Konfigurationen aus. Damit die Vielzahl von Modellierungsrichtlinien berücksichtigt werden kann, ist für die Anwendung der Modellierungssprache ein Software-Werkzeug vorgesehen.

Eine einfache Anwendbarkeit des Ansatzes ohne vorherige Beschaffung und Einarbeitung in die Software ist somit nicht gegeben. Die Anwendung der HLB-Layer-Methode im Rahmen der zu entwickelnden Systematik scheidet dadurch aus.

A3 Ergänzungen zum Reifegradmodell für CPS

A3.1 Steckbriefe der Leistungsstufen auf Gesamtsystemebene

1	Überwachung

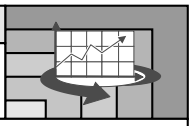
Kurzbeschreibung:
Umfassende physikalische Größen des Teilsystems, des Produkts/ Prozesses und des Umfelds werden erfasst, verarbeitet und zur Nachverfolgung gespeichert.

Charakterisierung:
Physikalische Prozesse werden konstant und mit geringer Toleranz beeinflusst. Die erfassten Informationsparameter sämtlicher messbarer physikalischer Größen (Teilsystem, Produkt/ Prozess, Umfeld) nehmen endlich viele Werte innerhalb des Wertebereichs an. Die Steuerung/Regelung erzeugt mindestens binäre bzw. wenige diskrete Ausgangsgrößen. Möglichkeiten zur Identifikation von Abweichungen und zur Optimierung des Systemverhaltens im Betrieb bestehen nicht. Das Teilsystem verfügt nicht über Schnittstellen zum Informationsaustausch und ist somit weder mit den IT-Systemen der unterschiedlichen Hierarchieebenen des Unternehmens noch mit Systemen entlang der Wertschöpfungskette vernetzt. Die Interaktion mit dem Benutzer beschränkt sich auf die Ein- und Ausgabe von Parametern über ein integriertes HMI und eine einzelne Modalität. Die Mehrheit erfasster Daten wird gespeichert, jedoch nicht analysiert. Externe Daten sowie Dienste werden nicht genutzt. Ferner besteht kein digitaler Kundenzugang.

CPS-Komponente	Nr.	Handlungs-element	Leistungsstufen 1	2	3	4	5
Aktorik	AK1	Prozesseingriff	Keine Aktorik	Unstetiger Prozesseingriff	Konstanter Prozesseingriff	Variabler Prozesseingriff	Stetiger Prozesseingriff
	AK2	Positionier-genauigkeit	Geringe Positioniergenauigkeit	Positioniergenauigkeit mit großer Toleranz	Positioniergenauigkeit mit geringer Toleranz	Hohe Positionier-genauigkeit	Robuste Position-iergenauigkeit
Sensorik	SE1	Messsignale	Keine Signale	Binäre Signale	Grenzwerte	Diskrete Signale	Kontinuierliche Signale
	SE2	Informationsquelle	Keine Informationsquellen	Punktuelle Informationsquellen	Vielfältige Informationsquellen	Umfassende Informationsquellen	Virtuelle Informationsquellen
Informations-verarbeitung	IV1	Steuerung/Regelung	Keine Steuerung/ Regelung	Binäre Steuerung/ unstetige Regelung	Stetige Steuerung/ Regelung	Optimale Steuerung/ Regelung	Robuste Steuerung/ Regelung
	IV2	Identifkation und Adaption	Keine Identifikation	Identifikation und Warnung	Ablaufsteuerung	Parameter-anpassung	Strukturanpassung
	IV3	Optimierung	Keine Optimierung	Entwurfspunkt-selektion auf Basis von Zielen	Online-Mehrziel-optimierung	Vorausschauende Online-Mehrziel-optimierung	Mehrstufiges Verlässlichkeits-konzept
Kommuni-kations-system	KO1	Vertikale Integration	Keine vertikale Integration	Rudimentäre vertikale Integration	Partielle vertikale Integration	Umfangreiche vertikale Integration	Durchgängige vertikale Integration
	KO2	Horizontale Integration	Keine horizontale Integration	Rudimentäre horizontale Integration	Partielle horizontale Integration	Umfangreiche horizontale Integration	Durchgängige horizontale Integration
	KO3	Konnektivität	Keine Schnittstellen	Senden und Empfangen von I/O-Signalen	Konnektivität über Feldbus-Schnittstellen	Konnektivität über Industrial Ethernet-Schnittstellen	Drahtlose Kommunikation
	KO4	Netzwerkverbindung	Keine Netzwerkverbindung	Punkt-zu-Punkt-Verbindung	Einbindung in lokale Netzwerke	Einbindung in globale Netzwerke	Zugang zum Internet
	KO5	Security	Unverschlüsselte Kommunikation	Authentifizierte/ Autorisierte Verbindungen	Sichere Interfaces	Verschlüsselte Kommunikation	Modernste Kommunikations-standards
HMI	HM1	Funktionalität des HMI	Kein HMI	Ein- und Ausgabe von Parametern	Vorgegebene Nutzerprofile	Individuelle Nutzerprofile	Automatische Anpassung an den Bediener
	HM2	Ort des HMI	Integriertes HMI	Drahtgebundenes HMI	Drahtloses HMI	Ortsunge-bundenes HMI	Geräteunab-hängiges HMI
	HM3	Multimodalität	Spezialisierter Gebrauch einzelner Modalitäten	Sequentieller Gebrauch einzelner Modalitäten	Paralleler Gebrauch einzelner Modalitäten	Feste multimodale Bedienung	Flexible multi-modale Bedienung
Daten	DA1	Datenspeicherung	Keine Daten-speicherung	Partielle Daten-speicherung	Umfangreiche Datenspeicherung	Durchgehende Datenspeicherung	Flexible Daten-speicherung
	DA2	Datenanalyse	Keine Datenanalyse	Einfache Visualisierung	Zustands-erkennung	Fehlerdiagnose und -vorhersage	Kontrolle und Lernfähigkeit
	DA3	Nutzung externer Daten	Keine Nutzung externer Daten	Partielle Nutzung externer Daten	Umfassende Nutzung externer Daten	Veränderung externer Daten	Situationsspezi-fische Nutzung externer Daten
Dienste	DI1	Dienstapplikation	Keine Dienste	Nutzung von Diensten	Nutzung und Bereitstellung von Diensten	Selbstständige Ausführung von Diensten	Situationsspezi-fische Dienste-komposition
	DI2	Digitaler Kundenzugang	Kein digitaler Kundenzugang	Erfassung von historischen Nutzungsdaten	Analyse von Nutzungsdaten	Erfassung u. Analyse von Nutzungs-daten in Echtzeit	Interaktion mit dem Kunden über das System

Bild A-6: Steckbrief der Leistungsstufe „Überwachung“ auf Gesamtsystemebene

2 Kommunikation und Analyse



Kurzbeschreibung:
Das Teilsystem ist partiell mit weiteren Systemen vernetzt, analysiert Echtzeit- und historische Daten und stellt diese anderen Systemen zur Verfügung.

Charakterisierung:
Die Beeinflussung physikalischer Prozesse erfolgt mit hoher Positioniergenauigkeit und kann durch fest vorgegebene Stellgrößen variiert werden. Die erfassten Informationsparameter sämtlicher messbarer physikalischer Größen (Teilsystem, Produkt/Prozess, Umfeld) können theoretisch beliebig viele Werte innerhalb des Wertebereichs annehmen. Die Steuerung/Regelung erzeugt stetig Stellgrößen. Abweichungen im Betrieb werden erkannt und der Benutzer darüber informiert. Eine Optimierung des Systemverhaltens im Betrieb ist nicht möglich. Über Feldbus-Verbindungen und Einbindung in lokale Netzwerke ist das Teilsystem mit eng verknüpften Hierarchieebenen des Unternehmens sowie mit mehreren Systemen entlang der innerbetrieblichen Wertschöpfungskette vernetzt. Dabei sind die Verbindungen authentifiziert. Die Ein- und Ausgabe von Informationen in vorgegebenen Nutzerprofilen erfolgt mittels drahtgebundenem HMI und wählbaren Modalitäten. Daten werden umfassend gespeichert, jedoch nicht analysiert. Externe Daten einzelner Systeme werden lesend genutzt. Dienste werden nicht eingebunden. Ferner besteht kein digitaler Kundenzugang.

CPS-Komponente	Nr.	Handlungs-element	Leistungsstufen 1	2	3	4	5
Aktorik	AK1	Prozesseingriff	Keine Aktorik	Unstetiger Prozesseingriff	Konstanter Prozesseingriff	Variabler Prozesseingriff	Stetiger Prozesseingriff
	AK2	Positionier-genauigkeit	Geringe Positioniergenauigkeit	Positioniergenauigkeit mit großer Toleranz	Positioniergenauigkeit mit geringer Toleranz	Hohe Positionier-genauigkeit	Robuste Position-iergenauigkeit
Sensorik	SE1	Messsignale	Keine Signale	Binäre Signale	Grenzwerte	Diskrete Signale	Kontinuierliche Signale
	SE2	Informationsquelle	Keine Informationsquellen	Punktuelle Informationsquellen	Vielfältige Informationsquellen	Umfassende Informationsquellen	Virtuelle Informationsquellen
Informations-verarbeitung	IV1	Steuerung/Regelung	Keine Steuerung/ Regelung	Binäre Steuerung/ unstetige Regelung	Stetige Steuerung/ Regelung	Optimale Steuerung/ Regelung	Robuste Steuerung/ Regelung
	IV2	Identifkation und Adaption	Keine Identifikation	Identifikation und Warnung	Ablaufsteuerung	Parameter-anpassung	Strukturanpassung
	IV3	Optimierung	Keine Optimierung	Entwurfspunkt-selektion auf Basis von Zielen	Online-Mehrziel-optimierung	Vorausschauende Online-Mehrziel-optimierung	Mehrstufiges Verlässlichkeits-konzept
Kommuni-kations-system	KO1	Vertikale Integration	Keine vertikale Integration	Rudimentäre vertikale Integration	Partielle vertikale Integration	Umfangreiche vertikale Integration	Durchgängige vertikale Integration
	KO2	Horizontale Integration	Keine horizontale Integration	Rudimentäre horizontale Integration	Partielle horizontale Integration	Umfangreiche horizontale Integration	Durchgängige horizontale Integration
	KO3	Konnektivität	Keine Schnittstellen	Senden und Empfangen von I/O-Signalen	Konnektivität über Feldbus-Schnittstellen	Konnektivität über Industrial Ethernet-Schnittstellen	Drahtlose Kommunikation
	KO4	Netzwerkverbindung	Keine Netzwerkverbindung	Punkt-zu-Punkt-Verbindung	Einbindung in lokale Netzwerke	Einbindung in globale Netzwerke	Zugang zum Internet
	KO5	Security	Unverschlüsselte Kommunikation	Authentifizierte/ Autorisierte Verbindungen	Sichere Interfaces	Verschlüsselte Kommunikation	Modernste Kommunikations-standards
HMI	HM1	Funktionalität des HMI	Kein HMI	Ein- und Ausgabe von Parametern	Vorgegebene Nutzerprofile	Individuelle Nutzerprofile	Automatische Anpassung an den Bediener
	HM2	Ort des HMI	Integriertes HMI	Drahtgebundenes HMI	Drahtloses HMI	Ortsunge-bundenes HMI	Geräteunab-hängiges HMI
	HM3	Multimodalität	Spezialisierter Gebrauch einzelner Modalitäten	Sequentieller Gebrauch einzelner Modalitäten	Paralleler Gebrauch einzelner Modalitäten	Feste multimodale Bedienung	Flexible multi-modale Bedienung
Daten	DA1	Datenspeicherung	Keine Datenspeicherung	Partielle Datenspeicherung	Umfangreiche Datenspeicherung	Durchgehende Datenspeicherung	Flexible Datenspeicherung
	DA2	Datenanalyse	Keine Datenanalyse	Einfache Visualisierung	Zustandserkennung	Fehlerdiagnose und -vorhersage	Kontrolle und Lernfähigkeit
	DA3	Nutzung externer Daten	Keine Nutzung externer Daten	Partielle Nutzung externer Daten	Umfassende Nutzung externer Daten	Veränderung externer Daten	Situationsspezifische Nutzung externer Daten
Dienste	DI1	Dienstapplikation	Keine Dienste	Nutzung von Diensten	Nutzung und Bereitstellung von Diensten	Selbstständige Ausführung von Diensten	Situationsspezifische Dienste-komposition
	DI2	Digitaler Kundenzugang	Kein digitaler Kundenzugang	Erfassung von historischen Nutzungsdaten	Analyse von Nutzungsdaten	Erfassung u. Analyse von Nutzungsdaten in Echtzeit	Interaktion mit dem Kunden über das System

Bild A-7: Steckbrief der Leistungsstufe „Kommunikation und Analyse“ auf Gesamtsystemebene

3	Interpretation und Dienste

Kurzbeschreibung:
Erfasste Daten werden interpretiert, mit Informationen vernetzter Systeme und Dienste angereichert und Handlungsempfehlungen für ein zielkonformes Systemverhalten ausgegeben.

Charakterisierung:
Die Beeinflussung physikalischer Prozesse erfolgt mit hoher Positioniergenauigkeit und kann durch fest vorgegebene Stellgrößen variiert werden. Die erfassten Informationsparameter sämtlicher messbarer sowie nicht direkt messbarer physikalischer Größen (Teilsystem, Produkt/Prozess, Umfeld) können theoretisch beliebig viele Werte innerhalb des Wertebereichs annehmen. Die Steuerung/Regelung beeinflusst den Prozess so, dass ein optimaler Wert erreicht werden kann. Auf Basis identifizierter Abweichungen im Betrieb kann das Teilsystem in einen anderen Zustand überführt werden. Zur Optimierung des Systemverhaltens werden optimale Kompromisse online vom Benutzer oder vom System gewählt. Über Feldbus-Verbindungen und Einbindung in lokale Netzwerke ist das Teilsystem mit eng verknüpften Hierarchieebenen des Unternehmens sowie mit mehreren Systemen entlang der innerbetrieblichen Wertschöpfungskette vernetzt. Dabei werden sichere Interfaces eingesetzt. Die Ein- und Ausgabe von Informationen in vorgegebenen Nutzerprofilen erfolgt mittels drahtgebundenem HMI und mehreren wählbaren Modalitäten. Daten werden umfassend gespeichert und der Zustand auf Basis von Regeln automatisch erkannt. Externe Daten mehrerer Systeme sowie deren Dienste werden genutzt (lesen). Über einen digitalen Kundenzugang können historische Nutzungsdaten analysiert und ausgewertet werden.

CPS-Komponente	Nr.	Handlungs-element	Leistungsstufen 1	2	3	4	5
Aktorik	AK1	Prozesseingriff	Keine Aktorik	Unstetiger Prozesseingriff	Konstanter Prozesseingriff	Variabler Prozesseingriff	Stetiger Prozesseingriff
	AK2	Positionier-genauigkeit	Geringe Posi-tioniergenauigkeit	Positioniergenau-igkeit mit großer Toleranz	Positioniergenau-igkeit mit geringer Toleranz	Hohe Positionier-genauigkeit	Robuste Position-iergenauigkeit
Sensorik	SE1	Messsignale	Keine Signale	Binäre Signale	Grenzwerte	Diskrete Signale	Kontinuierliche Signale
	SE2	Informationsquelle	Keine Informa-tionsquellen	Punktuelle In-formationsquellen	Vielfältige In-formationsquellen	Umfassende In-formationsquellen	Virtuelle In-formationsquellen
Informations-verarbeitung	IV1	Steuerung/Regelung	Keine Steuerung/ Regelung	Binäre Steuerung/ unstetige Regelung	Stetige Steuerung/ Regelung	Optimale Steuerung/ Regelung	Robuste Steuerung/ Regelung
	IV2	Identifkation und Adaption	Keine Identifikation	Identifikation und Warnung	Ablaufsteuerung	Parameter-anpassung	Strukturanpassung
	IV3	Optimierung	Keine Optimierung	Entwurfspunkt-selektion auf Basis von Zielen	Online-Mehrziel-optimierung	Vorausschauende Online-Mehrziel-optimierung	Mehrstufiges Ver-lässlichkeits-konzept
Kommuni-kations-system	KO1	Vertikale Integration	Keine vertikale Integration	Rudimentäre verti-kale Integration	Partielle vertikale Integration	Umfangreiche ver-tikale Integration	Durchgängige ver-tikale Integration
	KO2	Horizontale Integration	Keine horizontale Integration	Rudimentäre hori-zontale Integration	Partielle hori-zontale Integration	Umfangreiche horizontale Integration	Durchgängige hori-zontale Integration
	KO3	Konnektivität	Keine Schnittstellen	Senden und Em-pfangen von I/O-Signalen	Konnektivität über Feldbus-Schnitt-stellen	Konnektivität über Industrial Ether-net-Schnittstellen	Drahtlose Kommunikation
	KO4	Netzwerkverbindung	Keine Netzwerk-verbindung	Punkt-zu-Punkt-Verbindung	Einbindung in lokale Netzwerke	Einbindung in globale Netzwerke	Zugang zum Internet
	KO5	Security	Unverschlüsselte Kommunikation	Authentifizierte/ Autorisierte Ver-bindungen	Sichere Interfaces	Verschlüsselte Kommunikation	Modernste Kommunikations-standards
HMI	HM1	Funktionalität des HMI	Kein HMI	Ein- und Ausgabe von Parametern	Vorgegebene Nutzerprofile	Individuelle Nutzerprofile	Automatische Anpassung an den Bediener
	HM2	Ort des HMI	Integriertes HMI	Drahtgebundenes HMI	Drahtloses HMI	Ortsunge-bundenes HMI	Geräteunab-hängiges HMI
	HM3	Multimodalität	Spezialisierter Gebrauch einzel-ner Modalitäten	Sequentieller Gebrauch einzel-ner Modalitäten	Paralleler Ge-brauch einzelner Modalitäten	Feste multimodale Bedienung	Flexible multi-modale Bedienung
Daten	DA1	Datenspeicherung	Keine Daten-speicherung	Partielle Daten-speicherung	Umfangreiche Datenspeicherung	Durchgehende Datenspeicherung	Flexible Daten-speicherung
	DA2	Datenanalyse	Keine Datenanalyse	Einfache Visual-isierung	Zustands-erkennung	Fehlerdiagnose und -vorhersage	Kontrolle und Lernfähigkeit
	DA3	Nutzung externer Daten	Keine Nutzung externer Daten	Partielle Nutzung externer Daten	Umfassende Nutzung externer Daten	Veränderung externer Daten	Situationsspezi-fische Nutzung externer Daten
Dienste	DI1	Dienstapplikation	Keine Dienste	Nutzung von Diensten	Nutzung und Bereitstellung von Diensten	Selbstständige Ausführung von Diensten	Situationsspezi-fische Dienste-komposition
	DI2	Digitaler Kundenzugang	Kein digitaler Kundenzugang	Erfassung von historischen Nutz-ungsdaten	Analyse von Nutz-ungsdaten	Erfassung u. Ana-lyse von Nutzungs-daten in Echtzeit	Interaktion mit dem Kunden über das System

Bild A-8: Steckbrief der Leistungsstufe „Interpretation und Dienste“ auf Gesamtsystemebene

4	Autonomie

Kurzbeschreibung:
Das Teilsystem kann komplexe Aufgaben selbstständig lösen. Abhängig vom aktuellen Kontext generiert es eigenständig einen Handlungsplan, um das vom Betreiber des Teilsystems vorgegebene Gesamtziel ohne Fernsteuerung und den Eingriff Externer zu erreichen.

Charakterisierung:
Die Beeinflussung physik. Prozesse erfolgt robust mit hoher Positioniergenauigkeit und kann durch variable Stellgrößen verändert werden. Die erfassten Informationsparameter sämtlicher messbarer sowie nicht direkt messbarer physikalischer Größen (Teilsystem, Produkt/Prozess, Umfeld) können theoretisch beliebig viele Werte innerhalb des Wertebereichs annehmen. Die Steuerung/Regelung beeinflusst den Prozess so, dass trotz Störungen ein optimaler Wert erreicht werden kann. Bei Abweichungen im Betrieb passt das Teilsystem seine Struktur an. Optimierungen werden unter Berücksichtigung mehrerer Ziele im Betrieb durchgeführt. Das Teilsystem verfügt über Industrial Ethernet-Verbindungen und hat einen Zugang zum Internet. Es ist mit den meisten Hierarchieebenen des Unternehmens sowie mit den relevanten Systemen entlang der innerbetrieblichen und mit einigen Systemen der überbetrieblichen Wertschöpfungskette vernetzt. Dabei erfolgt die Kommunikation verschlüsselt. Die Ein- und Ausgabe von Informationen in individuellen Nutzerprofilen erfolgt mittels ortsungebundenem HMI und mehreren parallel einsetzbaren Modalitäten. Daten werden durchgehend gespeichert und mögliche Fehler auf Basis von Trends vorhergesagt. Externe Daten mehrerer Systeme werden genutzt (lesen und schreiben). Zudem nutzt das Teilsystem vorgegebene Dienste und stellt eigene bereit. Über einen digitalen Kundenzugang können historische und Echtzeit-Nutzungsdaten analysiert und ausgewertet werden.

CPS-Komponente	Nr.	Handlungs-element	Leistungsstufen 1	2	3	4	5
Aktorik	AK1	Prozesseingriff	Keine Aktorik	Unstetiger Prozesseingriff	Konstanter Prozesseingriff	Variabler Prozesseingriff	Stetiger Prozesseingriff
	AK2	Positionier-genauigkeit	Geringe Posi-tioniergenauigkeit	Positioniergenau-igkeit mit großer Toleranz	Positioniergenau-igkeit mit geringer Toleranz	Hohe Positionier-genauigkeit	Robuste Position-iergenauigkeit
Sensorik	SE1	Messsignale	Keine Signale	Binäre Signale	Grenzwerte	Diskrete Signale	Kontinuierliche Signale
	SE2	Informationsquelle	Keine Informa-tionsquellen	Punktuelle In-formationsquellen	Vielfältige In-formationsquellen	Umfassende In-formationsquellen	Virtuelle In-formationsquellen
Informations-verarbeitung	IV1	Steuerung/Regelung	Keine Steuerung/ Regelung	Binäre Steuerung/ unstetige Regelung	Stetige Steuerung/ Regelung	Optimale Steuerung/ Regelung	Robuste Steuerung/ Regelung
	IV2	Identifkation und Adaption	Keine Identifikation	Identifikation und Warnung	Ablaufsteuerung	Parameter-anpassung	Strukturanpassung
	IV3	Optimierung	Keine Optimierung	Entwurfspunkt-selektion auf Basis von Zielen	Online-Mehrziel-optimierung	Vorausschauende Online-Mehrziel-optimierung	Mehrstufiges Ver-lässlichkeits-konzept
Kommuni-kations-system	KO1	Vertikale Integration	Keine vertikale Integration	Rudimentäre verti-kale Integration	Partielle vertikale Integration	Umfangreiche ver-tikale Integration	Durchgängige ver-tikale Integration
	KO2	Horizontale Integration	Keine horizontale Integration	Rudimentäre hori-zontale Integration	Partielle hori-zontale Integration	Umfangreiche horizontale Integration	Durchgängige hori-zontale Integration
	KO3	Konnektivität	Keine Schnittstellen	Senden und Em-pfangen von I/O-Signalen	Konnektivität über Feldbus-Schnitt-stellen	Konnektivität über Industrial Ether-net-Schnittstellen	Drahtlose Kommunikation
	KO4	Netzwerkverbindung	Keine Netzwerk-verbindung	Punkt-zu-Punkt-Verbindung	Einbindung in lokale Netzwerke	Einbindung in globale Netzwerke	Zugang zum Internet
	KO5	Security	Unverschlüsselte Kommunikation	Authentifizierte/ Autorisierte Ver-bindungen	Sichere Interfaces	Verschlüsselte Kommunikation	Modernste Kommunikations-standards
HMI	HM1	Funktionalität des HMI	Kein HMI	Ein- und Ausgabe von Parametern	Vorgegebene Nutzerprofile	Individuelle Nutzerprofile	Automatische Anpassung an den Bediener
	HM2	Ort des HMI	Integriertes HMI	Drahtgebundenes HMI	Drahtloses HMI	Ortsunge-bundenes HMI	Geräteunab-hängiges HMI
	HM3	Multimodalität	Spezialisierter Gebrauch einzel-ner Modalitäten	Sequentieller Gebrauch einzel-ner Modalitäten	Paralleler Ge-brauch einzelner Modalitäten	Feste multimodale Bedienung	Flexible multi-modale Bedienung
Daten	DA1	Datenspeicherung	Keine Daten-speicherung	Partielle Daten-speicherung	Umfangreiche Datenspeicherung	Durchgehende Datenspeicherung	Flexible Daten-speicherung
	DA2	Datenanalyse	Keine Datenanalyse	Einfache Visual-isierung	Zustands-erkennung	Fehlerdiagnose und -vorhersage	Kontrolle und Lernfähigkeit
	DA3	Nutzung externer Daten	Keine Nutzung externer Daten	Partielle Nutzung externer Daten	Umfassende Nutzung externer Daten	Veränderung externer Daten	Situationsspezi-fische Nutzung externer Daten
Dienste	DI1	Dienstapplikation	Keine Dienste	Nutzung von Diensten	Nutzung und Bereitstellung von Diensten	Selbstständige Ausführung von Diensten	Situationsspezi-fische Dienste-komposition
	DI2	Digitaler Kundenzugang	Kein digitaler Kundenzugang	Erfassung von historischen Nutz-ungsdaten	Analyse von Nutz-ungsdaten	Erfassung u. Ana-lyse von Nutzungs-daten in Echtzeit	Interaktion mit dem Kunden über das System

Bild A-9: Steckbrief der Leistungsstufe „Autonomie“ auf Gesamtsystemebene

5	Kooperation

Kurzbeschreibung:
Global vernetzte und kooperierende Systeme verhandeln ihr Verhalten unter Berücksichtigung der Ziele des Systemverbunds.

Charakterisierung:
Die Beeinflussung physikalischer Prozesse erfolgt robust mit hoher Positioniergenauigkeit und kann durch variable Stellgrößen verändert werden. Die erfassten Informationsparameter sämtlicher messbarer sowie nicht direkt messbarer physikalischer Größen (Teilsystem, Produkt/Prozess, Umfeld) können theoretisch beliebig viele Werte innerhalb des Wertebereichs annehmen. Die Steuerung/Regelung beeinflusst den Prozess so, dass trotz Störungen ein optimaler Wert erreicht werden kann. Bei Abweichungen im Betrieb passt das Teilsystem seine Struktur an. Optimale Regler-Konfigurationen werden auf Basis interner Modelle und Prognosen bestimmt. Das Teilsystem verfügt über Möglichkeiten zur drahtlosen Kommunikation und hat einen Zugang zum Internet. Es ist mit den meisten Hierarchieebenen des Unternehmens sowie mit den relevanten Systemen entlang der innerbetrieblichen und mit einigen Systemen der überbetrieblichen Wertschöpfungskette vernetzt. Zur Verschlüsselung werden modernste Kommunikationsstandards eingesetzt. Die Ein- und Ausgabe von Informationen in individuellen Nutzerprofilen erfolgt mittels geräteunabhängigem HMI und mehreren vorgegebenen Modalitäten. Daten werden flexibel und situationsabhängig gespeichert. Modelle und Grenzwerte können auf Basis der analysierten Daten autonom nachgeführt werden. Externe Daten mehrerer Systeme werden in Abhängigkeit von der Situation genutzt (lesen und schreiben) und vorgegebene Dienste selbstständig ausgeführt. Der digitale Kundenzugang wird sowohl zur Analyse und Auswertung von historischen und Echtzeit-Nutzungsdaten sowie zur Kommunikation mit dem Kunden genutzt.

CPS-Komponente	Nr.	Handlungs-element	Leistungsstufen 1	2	3	4	5
Aktorik	AK1	Prozesseingriff	Keine Aktorik	Unstetiger Prozesseingriff	Konstanter Prozesseingriff	Variabler Prozesseingriff	Stetiger Prozesseingriff
	AK2	Positionier-genauigkeit	Geringe Positioniergenauigkeit	Positioniergenauigkeit mit großer Toleranz	Positioniergenauigkeit mit geringer Toleranz	Hohe Positionier-genauigkeit	Robuste Position-iergenauigkeit
Sensorik	SE1	Messsignale	Keine Signale	Binäre Signale	Grenzwerte	Diskrete Signale	Kontinuierliche Signale
	SE2	Informationsquelle	Keine Informationsquellen	Punktuelle Informationsquellen	Vielfältige Informationsquellen	Umfassende Informationsquellen	Virtuelle Informationsquellen
Informations-verarbeitung	IV1	Steuerung/Regelung	Keine Steuerung/ Regelung	Binäre Steuerung/ unstetige Regelung	Stetige Steuerung/ Regelung	Optimale Steuerung/ Regelung	Robuste Steuerung/ Regelung
	IV2	Identifkation und Adaption	Keine Identifikation	Identifikation und Warnung	Ablaufsteuerung	Parameter-anpassung	Strukturanpassung
	IV3	Optimierung	Keine Optimierung	Entwurfspunkt-selektion auf Basis von Zielen	Online-Mehrziel-optimierung	Vorausschauende Online-Mehrziel-optimierung	Mehrstufiges Verlässlichkeits-konzept
Kommuni-kations-system	KO1	Vertikale Integration	Keine vertikale Integration	Rudimentäre vertikale Integration	Partielle vertikale Integration	Umfangreiche vertikale Integration	Durchgängige vertikale Integration
	KO2	Horizontale Integration	Keine horizontale Integration	Rudimentäre horizontale Integration	Partielle horizontale Integration	Umfangreiche horizontale Integration	Durchgängige horizontale Integration
	KO3	Konnektivität	Keine Schnittstellen	Senden und Empfangen von I/O-Signalen	Konnektivität über Feldbus-Schnittstellen	Konnektivität über Industrial Ethernet-Schnittstellen	Drahtlose Kommunikation
	KO4	Netzwerkverbindung	Keine Netzwerkverbindung	Punkt-zu-Punkt-Verbindung	Einbindung in lokale Netzwerke	Einbindung in globale Netzwerke	Zugang zum Internet
	KO5	Security	Unverschlüsselte Kommunikation	Authentifizierte/ Autorisierte Verbindungen	Sichere Interfaces	Verschlüsselte Kommunikation	Modernste Kommunikations-standards
HMI	HM1	Funktionalität des HMI	Kein HMI	Ein- und Ausgabe von Parametern	Vorgegebene Nutzerprofile	Individuelle Nutzerprofile	Automatische Anpassung an den Bediener
	HM2	Ort des HMI	Integriertes HMI	Drahtgebundenes HMI	Drahtloses HMI	Ortsunge-bundenes HMI	Geräteunab-hängiges HMI
	HM3	Multimodalität	Spezialisierter Gebrauch einzelner Modalitäten	Sequentieller Gebrauch einzelner Modalitäten	Paralleler Gebrauch einzelner Modalitäten	Feste multimodale Bedienung	Flexible multi-modale Bedienung
Daten	DA1	Datenspeicherung	Keine Daten-speicherung	Partielle Daten-speicherung	Umfangreiche Datenspeicherung	Durchgehende Datenspeicherung	Flexible Daten-speicherung
	DA2	Datenanalyse	Keine Datenanalyse	Einfache Visualisierung	Zustands-erkennung	Fehlerdiagnose und -vorhersage	Kontrolle und Lernfähigkeit
	DA3	Nutzung externer Daten	Keine Nutzung externer Daten	Partielle Nutzung externer Daten	Umfassende Nutzung externer Daten	Veränderung externer Daten	Situationsspezi-fische Nutzung externer Daten
Dienste	DI1	Dienstapplikation	Keine Dienste	Nutzung von Diensten	Nutzung und Bereitstellung von Diensten	Selbstständige Ausführung von Diensten	Situationsspezi-fische Dienste-komposition
	DI2	Digitaler Kundenzugang	Kein digitaler Kundenzugang	Erfassung von historischen Nutzungsdaten	Analyse von Nutzungsdaten	Erfassung u. Analyse von Nutzungs-daten in Echtzeit	Interaktion mit dem Kunden über das System

Bild A-10: Steckbrief der Leistungsstufe „Kooperation“ auf Gesamtsystemebene

A3.2 Katalog der Verbesserungsziele

Tabelle A-2: Katalog der Verbesserungsziele

Nr.	Verbesserungsziel	Beschreibung
1	Adaptivität steigern	Die Systeme können sich innerhalb vorgegebener Rahmenbedingungen autonom an veränderte Umfeldbedingungen anpassen [AAM+15], [GTD13].
2	Vernetzung steigern	Steigerung der Vernetzung des Teilsystems mit weiteren Systemen, sowohl horizontal als auch vertikal.
3	Kundenzugang verbessern	Lebenszyklusweite Generierung und Auswertung von Produktdaten auch während der Nutzungsphase stärkt die Kundenbindung und zeigt Optimierungspotentiale auf. Grundlage ist ein digitaler Kundenzugang [BHV14], [GB12].
3	Rüstzeiten reduzieren	Reduktion des Zeitaufwands zur Umrüstung der Systeme, z.B. durch Fähigkeiten der Selbstkonfiguration [VDI13].
4	Robustheit steigern	Verbesserte Fähigkeit des Systems, auf unvorhergesehene Situationen und Fehler zu reagieren und Unsicherheiten oder fehlende Informationen ausgleichen zu können [Dum10], [GB12].
5	Ressourceneffizienz erhöhen	Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauchs, z.B. durch intelligente Start-Stopp-Funktionen [Kae15], [AAM+15].
6	Systemauslastung erhöhen	Erhöhte Auslastung der Systeme, selbst bei variantenreichen Produkten, z.B. durch situative Anpassung der Prozesse [MI14], [KWH13].
7	Systemverfügbarkeit erhöhen	Erhöhung der Systemverfügbarkeit durch verbesserte Systemüberwachung. Technische Probleme können frühzeitig erkannt und ihre Auswirkungen durch vorbeugende Maßnahmen abgemildert werden [MI14], [VDI13].
8	Verschleiß verringern	Reduzierung der Abnutzung, z.B. durch Selbstdiagnose der Komponenten [VDI13].
9	Ausschuss reduzieren	Reduzierung von Ausschuss, z.B. durch Prozessüberwachung und frühzeitiges Erkennen von Prozessabweichungen [GB12], [BHV14].
10	Herstellkosten senken	Reduzierung der Kosten und Aufwendungen, die bei der Herstellung eines Produktes anfallen [AAM+15].

Tabelle A-2: Katalog der Verbesserungsziele

Nr.	Verbesserungsziel	Beschreibung
11	Produktionsgeschwindigkeit erhöhen	Steigerung der durchschnittlichen Ausbringungsmenge des Systems pro Zeiteinheit, z.B. durch verkürzte Durchlauf- und minimierte Stillstandzeiten [AAM+15].
12	Kundenindividualisierung verbessern	Vereinfachte Anpassung der Systeme an Kundenbedürfnisse, z.B. durch softwarebasierte Systemfunktionen und Dienstleistungen [SRA+17], [PH15].
13	Automatisierungsgrad steigern	Steigerung des Anteils automatisierter Prozessschritte im Vergleich zu manuellen Prozessschritten.
14	Prozesstransparenz erhöhen	Erhöhte Transparenz des ausführenden Prozesses, z.B. hinsichtlich Prozessparametern, Ressourcenverbrauch oder Prozessqualität [KWH13], [BHV14].
15	Rüstzeiten reduzieren	Reduktion des Zeitaufwands zur Umrüstung der Systeme, z.B. durch Fähigkeiten der Selbstkonfiguration [VDI13].
16	Mobilität der Nutzer erhöhen	Möglichkeit einer ortsunabhängigen Kommunikation zwischen Mensch und System durch die Übertragbarkeit digitaler Benutzeroberflächen auf verschiedene Endgeräte [PH15].
17	Wartungskosten verringern	Geringere Wartungskosten u.a. durch Selbstdiagnose der Systeme und optimierte, kundenindividuelle Wartungspläne auf Basis einer Datenanalyse [VDI13], [Sch16].
18	Dienstleistungseffizienz verbessern	Steigerung der Effizienz von Dienstleistungsprozessen im Kundendienstgeschäft durch vorbeugenden, aktiven und vernetzten Kundendienst, z.B. durch Ferndiagnose und -wartung [PH15].
19	Dienstebereitstellung verstärken	Anzahl der bereitgestellten Dienste erhöhen. Grundlage bildet die umfassende Sammlung und Auswertung von Daten [BHV14], [AF15].

Tabelle A-2: Katalog der Verbesserungsziele

Nr.	Verbesserungsziel	Beschreibung
20	Inbetriebnahme beschleunigen	Schnellere Integration von Systemen und deren Komponenten in Produktionssysteme durch erhöhte Interoperabilität und offene, standardisierte Schnittstellen [GB12], [LGK+14].
21	Engineeringprozesse verbessern	Verbesserung der Engineeringprozesse durch Rückführung von Systeminformationen aus der Nutzungsphase ins Engineering [BK13].
22	Prozesswissen verbessern	Erzeugung und Auswertung von Systemdaten ermöglichen bessere Kenntnisse über die Prozesse, die z.B. zur kontinuierlichen Verbesserung des Systems genutzt werden können [SRA+17].
23	Benutzungsfreundlichkeit verbessern	Verbesserung der Kommunikation zwischen System und Benutzter, z.B. mittels zunehmend natürlicher Mensch-Maschine-Interaktion durch multimodale Bedienung und Anpassung an den Benutzer [MI14].
24	Prozesseffizienz erhöhen	Optimierung der Prozessgestaltung im Hinblick auf bedarfsgerechte Ressourcenbereitstellung und -nutzung. Stellhebel sind z.B. die Minimierung von Materialhandhabung oder die Erhöhung der Prozessauslastung [AAM+15].
25	Flexibilität erhöhen	Kürzere Reaktionszeiten bei Bedarfsschwankungen, Systemausfällen und Produktspezifikationsänderungen u.a. durch adaptivere Prozesse [KWH13], [VDI13].

A4 Ergänzungen zur Validierung

Im alternativen Lösungskonzept zur Leistungssteigerung ist der Separator mit weiteren Systemen des übergeordneten Prozesses vernetzt. Die Informationsverarbeitung erfolgt mittels Industrie-PC. Die Interaktion mit dem Bediener wird über einen Tablet-PC realisiert. Der Separator verfügt über eine lokale Festplatte mit Expertenregeln. Die Expertenregeln werden bei der Inbetriebnahme gespeichert und bei Servicetätigkeiten regelmäßig erneuert. Auf Basis der Expertenregeln wird der Dienst „Fehlersuche führen“ angeboten. Dieser Dienst unterstützt Bediener im Störungsfall bei der Fehlersuche. Auf Basis der Störungsmeldungen werden verschiedene Fehlerursachen und dazugehörige Behebungsmaßnahmen vorgeschlagen. Bei durchgeführter Reparatur kann der Benutzer dem System eine Rückmeldung geben, ob der vorgeschlagene Fehler tatsächlich die Ursache für die Störung war. Somit ist das System in der Lage, die eigenen Vorschläge zu verbessern und dem Benutzer Angaben zur Fehlerwahrscheinlichkeit anzuzeigen. Bild A-11 zeigt das Systemmodell des alternativen Lösungskonzepts.

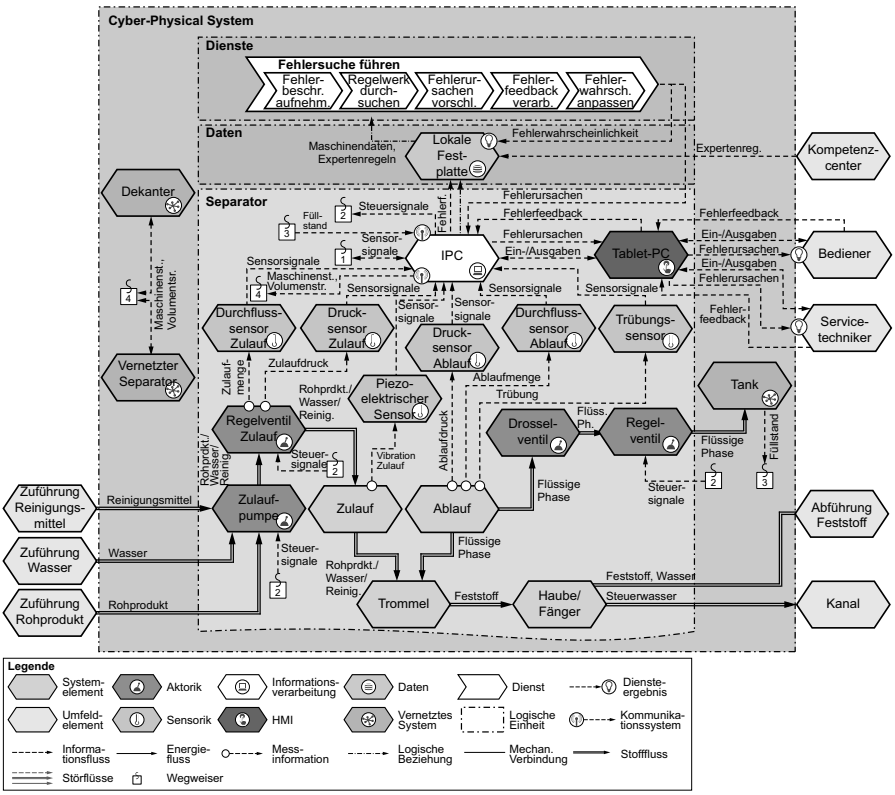


Bild A-11: Alternatives Lösungskonzept zur Leistungssteigerung des Separators

Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut neun Professoren mit insgesamt 150 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Pro Jahr promovieren hier etwa 20 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: Enroute to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrows economy.

Today nine Professors and 150 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. Per year approximately 20 young researchers receive a doctorate.

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

Bd. 347 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 11. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 29. und 30. Oktober 2015, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 347, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-66-3

Bd. 348 HEINZEMANN, C.: Verification and Simulation of Self-Adaptive Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 348, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-67-0

Bd. 349 MARKWART, P.: Analytische Herleitung der Reihenfolgeregeln zur Entzerrung hochauslastender Auftragsmerkmale. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 349, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-68-7

Bd. 350 RÜBBELKE, R.: Systematik zur innovationsorientierten Kompetenzplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 350, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-69-4

Bd. 351 BRENNER, C.: Szenariobasierte Synthese verteilter mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 351, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-70-0

Bd. 352 WALL, M.: Systematik zur technologieinduzierten Produkt- und Technologieplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 352, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-71-7

Bd. 353 CORD-LANDWEHR, A.: Selfish Network Creation - On Variants of Network Creation Games. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 353, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-72-4

Bd. 354 ANACKER, H.: Instrumentarium für einen lösungsmusterbasierten Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 354, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-73-1

Bd. 355 RUDTSCH, V.: Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 355, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-74-8

Bd. 356 SÖLLNER, C.: Methode zur Planung eines zukunftsfähigen Produktportfolios. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 356, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-75-5

Bd. 357 AMSHOFF, B.: Systematik zur musterbasierten Entwicklung technologieinduzierter Geschäftsmodelle. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 357, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-76-2

Bd. 358 LÖFFLER, A.: Entwicklung einer modellbasierten In-the-Loop-Testumgebung für Waschautomaten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 358, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-77-9

Bd. 359 LEHNER, A.: Systematik zur lösungsmusterbasierten Entwicklung von Frugal Innovations. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 359, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-78-6

Bd. 360 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 12. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 8. und 9. Dezember 2016, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 360, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-79-3

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

Bd. 361 PETER, S.: Systematik zur Antizipation von Stakeholder-Reaktionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 361, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-80-9

Bd. 362 ECHTERHOFF, O.: Systematik zur Erarbeitung modellbasierter Entwicklungsaufträge. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 362, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-81-6

Bd. 363 TSCHIRNER, C.: Rahmenwerk zur Integration des modellbasierten Systems Engineering in die Produktentstehung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 363, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-82-3

Bd. 364 KNOOP, S.: Flachheitsbasierte Positionsregelungen für Parallelkinematiken am Beispiel eines hochdynamischen hydraulischen Hexapoden. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 364, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-83-0

Bd. 365 KLIEWE, D.: Entwurfssystematik für den präventiven Schutz Intelligenter Technischer Systeme vor Produktpiraterie. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 365, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-84-7

Bd. 366 IWANEK, P.: Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 366, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-85-4

Bd. 367 SCHWEERS, C.: Adaptive Sigma-Punkte-Filter-Auslegung zur Zustands- und Parameterschätzung an Black-Box-Modellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 367, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-86-1

Bd. 368 SCHIERBAUM, T.: Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices (MID). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 368, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-87-8

Bd. 369 BODDEN, E.; DRESSLER, F.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; MEYER AUF DER HEIDE, F.; SCHEYTT, C.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): Intelligente technische Systeme. Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 369, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-88-5

Bd. 370 KÜHN, A.: Systematik zur Release-Planung intelligenter technischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 370, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-89-2

Bd. 371 REINOLD, P.: Integrierte, selbstoptimierende Fahrdynamikregelung mit Einzelradaktorik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 371, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-90-8

Bd. 372 Bäumer, F. S.: Indikatorbasierte Erkennung und Kompensation von ungenauen und unvollständig beschriebenen Softwareanforderungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 372, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-91-5

Bd. 373 ECKELT, D.: Systematik zum innovationsorientierten Intellectual Property Management. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 373, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-92-2

Bd. 374 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 13. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 23. und 24. November 2017, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 374, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-93-9

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn