

Peter Iwanek

***Systematik zur Steigerung der
Intelligenz mechatronischer
Systeme im Maschinen- und
Anlagenbau***

***Approach for Increasing the
Intelligence of Mechatronic
Systems in Machinery and
Plant Engineering***

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Band 366 der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2017

ISBN: 978-3-942647-85-4

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: Peter Iwanek

Herstellung über: 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 Entwurfstechnik Mechatronik IEM.

Viele Unternehmen des Maschinenbaus und verwandter Branchen vollziehen mit ihren Produkten den Innovationssprung von mechatronischen hin zu intelligenten technischen Systemen. Derartige Systeme sind in der Lage sich autonom und flexibel an Veränderungen in ihrer Umgebung anzupassen. Sie sind adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich.

Die Realisierung von intelligenten technischen Systemen sowie der damit verbundene Innovationssprung stellt die strategische Stoßrichtung des Spitzenclusters it's OWL (Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe) dar. Dabei greift der Spitzencluster it's OWL auf eine Technologieplattform zurück, die u.a. Ansätze der Selbstoptimierung bereitstellt. Mit ihnen kann die Informationsverarbeitung von mechatronischen Systemen intelligenter realisiert werden.

Vor diesem Hintergrund hat Herr Iwanek eine Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau entwickelt. Die Systematik umfasst ein Stufenmodell, Methoden zur Planung der Umsetzung, ein Vorgehensmodell sowie Hilfsmittel zur Förderung der Kommunikation und Spezifikation. Zunächst wird der Bedarf zur Weiterentwicklung bestehender Maschinen und Anlagen identifiziert. Darauf basierend werden unter Berücksichtigung des Stufenmodells Ideen für intelligentes Systemverhalten spezifiziert. Die spezifizierten Ideen gilt es nachfolgend durch die Beteiligten hinsichtlich des Nutzens sowie des Umsetzungsaufwands zu bewerten. Auf diesem Wege entsteht eine fundierte Grundlage für die Entwicklung intelligenter Maschinen und Anlagen. Die Systematik wurde in einem anspruchsvollen Industrieprojekt validiert. Aufgabe in dem Projekt war die Identifikation und Auswahl von Ideen zur Steigerung der Intelligenz von Maschinen und Anlagen in Lackierstraßen.

Mit seiner Dissertation bewegt sich Herr Iwanek auf einem hochaktuellen und sehr herausfordernden Gebiet. Er leistet einen grundlegenden Beitrag für die Erforschung und Entwicklung intelligenter technischer Systeme in der Wissenschaft und Praxis. Die Arbeit ist ein weiterer wichtiger Baustein für unsere Paderborner Schule des Entwurfs intelligenter technischer Systeme.

Paderborn, im Januar 2017

Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier

Prof. Dr.-Ing. R. Dumitrescu

**Systematik zur Steigerung der Intelligenz
mechatronischer Systeme im
Maschinen- und Anlagenbau**

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Peter Lukas Iwanek
aus Tichau, Polen

Tag des Kolloquiums: 22. Dezember 2016
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Strategische Produktplanung und Systems Engineering am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn sowie 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 Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier für die stets fordernde und fördernde fachliche als auch persönliche Aus- und Weiterbildung in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Die übertragene Verantwortung und die Möglichkeit, verschiedene Projekte selbstständig auszugestalten und bearbeiten zu können waren außergewöhnlich.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler, dem Leiter des Fraunhofer-Instituts für Entwurfstechnik Mechatronik sowie der Fachgruppe für Regelungstechnik und Mechatronik der Universität Paderborn, danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie für die angenehme Zusammenarbeit im Rahmen des Spitzenclusters it's OWL.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu der mich im Rahmen des Spitzenclusters it's OWL sowie am Fraunhofer-Institut stets forderte und förderte. Die fachlichen Diskussionen, Anregungen und konstruktive Kritik haben wesentlich zu meiner fachlichen und persönlichen Entwicklung beigetragen.

Allen Kolleginnen und Kollegen der Fachgruppe, des Fraunhofer-Instituts sowie des Projektteams Selbstoptimierung im Spitzencluster it's OWL, danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit und den einzigartigen Teamgeist, der mich stets motiviert hat. Hervorheben möchte ich Anja Czaja, Dr.-Ing. Thomas Schierbaum, Thorsten Westermann, Dr.-Ing. Olga Echterhoff, Dr.-Ing. Mareen Vaßholz, Dr.-Ing. Harald Anacker, Dr.-Ing. Arno Kühn, Dr.-Ing. Rafał Dorociak, Michael Bansmann, Daniel Köchling, Tobias Mittag sowie Marcel Schneider. Vielen Dank für die angenehme und tolle Zusammenarbeit mit Euch! Stellvertretend für alle Studierenden, die mich im Rahmen von Abschlussarbeiten oder durch ihre studentische Hilfstätigkeit unterstützt haben, danke ich Sergej Miroshnikov, Viet Pham, Alice Pieper sowie Christian Tewes.

Hervorzuheben ist der Dank an meine Brüder Zbigniew und Marius, deren Familien sowie der Familie meiner Frau Julia. Franziska Bredenbröker danke ich dabei besonders für das Korrekturlesen der Arbeit. Besonderer Dank gilt meinen Eltern Danuta und Andreas, die mich bereits lange Zeit vor meinem Studium unterstützten und förderten und dies sicherlich auch noch lange Zeit nach meiner Promotion tun werden. Mein größter Dank gilt meiner Frau Julia. Du hast mich in den letzten Jahren mit viel Verständnis, Geduld, Kraft, Liebe und Deiner wundervollen Art unterstützt und motiviert. Vielen Dank!

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [DGG+12] DOROCIAC, R.; GAUKSTERN, T.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.: A Framework for the Improvement of Dependability of Self-Optimizing Systems. In: Proceedings of 1st Joint International Symposium on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering. 27.-29. Juni 2012, Hannover, 2012
- [GIK12] GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; KÖCHLING, D.: Das Produktionssystem der Zukunft denkt mit und lernt. *Industrieanzeiger, Konradin Mediengruppe*, Nr. 30, Jg. 134, Konradin, Leinfelden-Echterdingen 2012, S. 68-69
- [DGG+13] DOROCIAC, R.; GAUKSTERN, T.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, M.: A Methodology for the Improvement of Dependability of Self-Optimizing Systems. *Production Engineering*, 1, 2013, S. 53-67
- [GID+13] GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; DOROCIAC, R.; STILLE, K. S.; BÖCKER, J.: Konzipierung eines selbstoptimierenden hybriden Energiespeichersystems unter besonderer Berücksichtigung der Verlässlichkeit. In: Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): *Entwurf mechatronischer Systeme*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013, S. 205-220
- [KGI+13] KESSLER, J.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; KÖCHLING, D.; KRÜGER, M.; TRÄCHTLER, A.: Erstellung von Prozessmodellen für den Entwurf selbstoptimierender Regelungen. In: Internationales Forum Mechatronik. 30.-31. Oktober 2013, Winterthur, 2013
- [IKD+13] IWANEK, P.; KAISER, L.; DUMITRESCU, R.; NYBEN, A.: Fachdisziplinübergreifende Systemmodellierung mechatronischer Systeme mit SysML und CONSENS. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering*. Carl Hanser, München, 2013
- [DGI+14a] DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, M.: From Mechatronics to Intelligent Technical Systems. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Hrsg.): *Design Methodology for Intelligent Technical Systems*. Springer, Berlin, 2014, S. 2-5
- [DGI14a] DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.: Introduction to Self-optimization. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Hrsg.): *Design Methodology for Intelligent Technical Systems*. Springer, Berlin, 2014, S. 5-8
- [DDG+14] DOROCIAC, R.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.: Specification Technique CONSENS for the Description of Self-optimizing Systems. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Hrsg.): *Design Methodology for Intelligent Technical Systems*. Springer, Berlin, 2014, S. 119-127
- [IMP+14] IWANEK, P.; MEYER, T.; PRIESTERJAHN, C.; SEXTRO, W.; VABHOLZ, M.: Challenges. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Sextro, W. (Hrsg.): *Dependability of Self-optimizing Mechatronic Systems*. Springer, Berlin, 2014, S. 12-15
- [DGI14b] DOROCIAC, R.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.: Methodology for the Selection of Dependability Methods for the Development of Self-optimizing Systems. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Sextro, W. (Hrsg.): *Dependability of Self-optimizing Mechatronic Systems*. Springer, Berlin, 2014, S. 158-162
- [DGI+14b] DOROCIAC, R.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; MEYER, T.; SEXTRO, W.: Selecting Suitable Methods Using the Methodology. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Sextro, W. (Hrsg.): *Dependability of Self-optimizing Mechatronic Systems*. Springer, Berlin, 2014, S. 174-178
- [DGI+14c] DOROCIAC, R.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; MEYER, T.; SEXTRO, W.; SONDERMANN-WÖLKE, C.: Development of the Active Guidance Module. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Sextro, W. (Hrsg.): *Dependability of Self-optimizing Mechatronic Systems*. Springer, Berlin, 2014, S. 178-182

- [MGG+14] MITTAG, T.; GAUSEMEIER, J.; GRÄBLER, I.; IWANEK, P.; KÖCHLING, D.; PETERSEN, M.: Conceptual Design of a Self-Optimising Production Control System. In: Constantinescu, C.; Bauer, W.; Sauer, O.; Maropoulos, P. (Hrsg.): Proceedings of the 8th International CIRP Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014 Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution. Fraunhofer Verlag, München, 2014
- [PBG+14] PETERSEN, M.; BANDAK, S.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; SCHNEIDER, M.: Methodik zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem in den Frühen Phasen der Produktentwicklung - Ein Praxisbeispiel. In: Schenk, M. (Hrsg.): Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme - IFF-Wissenschaftstage. 24.-26. Juni 2014, Magdeburg, 2014
- [ADG+14] ANACKER, H.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; SCHIERBAUM, T.: Methodology for the Identification of Self-optimising Potentials for Mechatronic Systems. In: Proceedings of 2nd Joint Symposium on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering (SysInt). 2.-4. Juli 2014, Bremen, 2014
- [GIV+14] GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, M.; REINHART, F.: Selbstoptimierung im Maschinen- und Anlagenbau. Industrie Management, Nr. 6, 2014, S. 55-58
- [IDG15] IWANEK, P.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.: Identifikation von Potentialen zur Integration von Lösungen im Kontext der Selbstoptimierung für technische Systeme des Maschinen- und Anlagenbaus. In: Bertram, T., Corvers, B.; Janschek, K. (Hrsg.): Tagungsband VDI-Mechatronik-Tagung 2015, 12.-13. März 2015, Dortmund, 2015
- [WIF+15] WEISSKE, A.; IWANEK, P.; FLOTTMEIER, S.; CZAJA, A.; TRÄCHTLER, A.; DUMITRESCU, R.: Planung der Inbetriebnahme mechatronischer Prototypen auf Basis einer disziplinübergreifenden Systemmodellierung. In: Bertram, T., Corvers, B.; Janschek, K. (Hrsg.): Tagungsband VDI-Mechatronik-Tagung 2015, 12.-13. März 2015, Dortmund, 2015
- [TIS15] TRÄCHTLER, A.; IWANEK, P.; SCHEFFELS, G.: Der Mensch als Vorbild. elektrotechnik - Automatisierung, Sonderausgabe August 2015, 2015, S. 32-33
- [IRD+15] IWANEK, P.; REINHART, F.; DUMITRESCU, R.; BRANDIS, R.: Expertensystem zur Steigerung der Effizienz im Bereich der Produktion. productivITy, 4, 2015, S. 57-59
- [IGB+15] IWANEK, P.; GAUSEMEIER, J.; BANSMANN, M.; DUMITRESCU, R.: Integration of Intelligent Features by Model-Based Systems Engineering. Proceedings of the ISERD, 15. Nov. 2015, Tokyo, Japan, 2015, S. 31-38
- [IK16] IWANEK, P.; KÜHN, A.: Die sich selbst optimierende Lackieranlage. JOT Journal für Oberflächentechnik, 3, 2016, S. 28-31
- [WID16] WESTERMANN, T.; IWANEK, P.; DUMITRESCU, R.: Maschinen- und Anlagen auf dem Weg zu Cyber-Physical Systems. In: 19. IFF-Wissenschaftstage: Kooperation im Anlagenbau, 21. Juni 2016, Magdeburg, 2016

Zusammenfassung

Die absehbaren Entwicklungen der Informations- und Kommunikationstechnik ermöglichen zunehmend die Entwicklung von technischen Systemen mit inhärenter Teilintelligenz. Diese Systeme können als Intelligente Technische Systeme bezeichnet werden. Schlagworte, die in diesem Kontext stets genannt werden sind: „Cyber-Physical Systems“, „Industrie 4.0“ oder „Selbstoptimierung“. Die Ansätze in den Bereichen weisen hohes Potential zur Weiterentwicklung bestehender mechatronischer Systeme auf, jedoch werden diese von den Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus nicht systematisch berücksichtigt. Es bedarf einer Systematik, mit der die Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau gesteigert werden kann.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau. Sie umfasst vier Bestandteile: ein Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme, Methoden zur Planung und Umsetzung von intelligentem Verhalten, ein Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme sowie Hilfsmittel zur Förderung der Kommunikation und Spezifikation. Die Systematik unterstützt die Unternehmen bei der Analyse bestehender Systeme sowie der Identifikation, Spezifikation und Auswahl Erfolg versprechender Lösungsideen. Diese bilden die Basis zur Umsetzung von zukünftigen intelligenten Maschinen und Anlagen.

Summary

The foreseeable development of communication and information technologies open up fascinating perspectives which move far beyond current standards of mechatronics: mechatronic systems having inherent partial intelligence. These systems are also called “Intelligent Technical Systems”. Keywords such as “Cyber-Physical Systems”, “Industrie 4.0” or “Self-Optimization” express this perspective of Intelligent Technical Systems. However, a major challenge is to consider the possibility of the integration of intelligent features into mechatronic systems and to show a way for the integration. Especially for companies in machinery and plant engineering this is a challenge. In order to provide companies from machinery and plant engineering to integrate intelligence into the systems, it is necessary to support them with a systematic approach.

The aim of this thesis is an approach for increasing the intelligence of mechatronic systems in machinery and plant engineering. The approach consists of four components: a stage model for increasing the intelligence of mechatronic systems, methods for planning the realization of intelligent behavior, a procedure model for increasing the intelligence of mechatronic systems and tools to support the communication and specification within the project team. The approach supports the experts in the companies in a systematic way to analyze current systems and identify, specify and to choose the ideal ideas for the integration of intelligence into machines.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung	1
1.1 Problematik.....	1
1.2 Zielsetzung	5
1.3 Vorgehensweise	6
2 Problemanalyse	7
2.1 Begriffsdefinition und Ausrichtung der Arbeit.....	7
2.2 Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau.....	8
2.2.1 Charakteristika des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus	9
2.2.2 Zukunftsperspektiven im Maschinen- und Anlagenbau	11
2.3 Fortgeschrittene mechatronische Systeme	13
2.3.1 Mechatronische Systeme	14
2.3.2 Adaptiv geregelte Systeme.....	16
2.3.3 Selbstoptimierende Systeme	17
2.3.3.1 Definition der Selbstoptimierung.....	18
2.3.3.2 Operator-Controller-Modul.....	20
2.3.3.3 Ansätze zur Realisierung der Selbstoptimierung	22
2.3.3.4 Selbstoptimierung in der Anwendung	25
2.4 Produktentstehung	28
2.4.1 Referenzmodell der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen	28
2.4.2 Strategische Produktplanung im Innovationsprozess	30
2.4.3 Produktentwicklung	31
2.4.3.1 Entwicklung mechatronischer Systeme	31
2.4.3.2 Entwicklung selbstoptimierender Systeme	33
2.5 Kundeneinbindung in der Produktentstehung.....	35
2.5.1 Kundenbedürfnisse an technische Systeme.....	37
2.5.2 Kundeneinbindung in den frühen Phasen sowie Kundenrollen..	39
2.6 Herausforderungen.....	41
2.7 Anforderungen an die Systematik.....	43
3 Stand der Technik.....	47
3.1 Förderung von Innovationen durch die Integration von Intelligenz	47
3.1.1 Integration kognitiver Funktionen nach METZLER	48
3.1.2 Integration kognitiver Funktionen nach DUMITRESCU	50

3.1.3	Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender Systeme nach POOK.....	52
3.1.4	Intelligente Systeme nach ISERMANN.....	53
3.1.5	Einsatzgestaltung intelligenter Objekte nach DEINDL.....	55
3.1.6	Leitfaden Industrie 4.0 nach ANDERL ET AL.....	57
3.2	Bedarfsidentifikation zur Modifikation.....	59
3.2.1	Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen.....	59
3.2.2	Identifikation von Produktfeatures nach BACCIOTTI ET AL.....	60
3.2.3	Produktbenchmarking nach SABISCH und TINTELOT.....	62
3.2.4	Quality Function Deployment.....	64
3.2.5	KANO-Modell der Kundenzufriedenheit.....	65
3.2.6	Lead-User Integration.....	67
3.2.7	Empathic Design.....	69
3.2.8	Service Driven Design nach EISENHUT.....	70
3.3	Stufen von Intelligenz in technischen Systemen.....	72
3.3.1	Reifegradmodell smarterer Objekte.....	72
3.3.2	Architektur von Cyber-Physical Systems nach LEE ET AL.....	74
3.3.3	Bewertung der Selbststeuerung von Logistiknetzwerken.....	76
3.3.4	Klassifizierungsrahmen für Embedded Devices.....	78
3.3.5	Stufen der Industrie 4.0 Readiness.....	79
3.3.6	Stufenmodell nach PORTER und HEPPELMANN.....	80
3.4	Bewertung und Auswahl von Lösungsideen.....	82
3.4.1	Einfache Methoden zur ganzheitlichen Bewertung.....	82
3.4.2	Nutzwertanalyse.....	83
3.4.3	Analysen auf Basis von Portfolios.....	84
3.4.4	Conjoint-Analyse.....	85
3.5	Handlungsbedarf.....	86
4	Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme.....	91
4.1	Die Systematik im Überblick.....	91
4.2	Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz.....	93
4.2.1	Das Stufenmodell im Überblick.....	93
4.2.2	Messen und Agieren.....	97
4.2.3	Steuern und Regeln.....	101
4.2.4	Identifizieren und Adaptieren.....	106
4.2.5	Optimieren.....	110
4.2.6	Zusätzliche Funktionen der Informationsverarbeitung.....	113
4.2.7	Einsatzszenarien des Stufenmodells.....	116
4.3	Planung der Umsetzung von intelligentem Verhalten.....	118
4.3.1	Einsatz von mathematischen Optimierungsverfahren.....	119
4.3.2	Entwurf von Prozessmodellen intelligenter Regelungen.....	122

4.3.3	Einsatz von maschinellen Lernverfahren	126
4.3.4	Erweiterte Analyse der Verlässlichkeit.....	129
4.4	Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau	132
4.4.1	Phase 1: Disziplinübergreifende Systemspezifikation	133
4.4.2	Phase 2: Identifikation von Potentialen.....	135
4.4.3	Phase 3: Spezifikation von Lösungsideen	136
4.4.4	Phase 4: Bewertung und Auswahl von Lösungsideen.....	137
4.5	Hilfsmittel zur Förderung der Kommunikation und Spezifikation.....	138
4.5.1	Spezifikation des Systems.....	139
4.5.1.1	Spezifikation von Prozessen	139
4.5.1.2	Spezifikation von mechatronischen Systemen	142
4.5.2	Abbildung von Potentialen.....	143
4.5.3	Ansatz zur Spezifikation von Lösungsideen	147
4.5.4	Unterstützung der Bewertung und Auswahl	149
5	Anwendung und Bewertung	153
5.1	Anwendungsbeispiel: Lackieranlage	153
5.1.1	Phase 1: Disziplinübergreifende Systemspezifikation	154
5.1.2	Phase 2: Identifikation von Potentialen.....	156
5.1.3	Phase 3: Spezifikation von Lösungsideen	158
5.1.4	Phase 4: Bewertung und Auswahl der Lösungsideen	159
5.2	Bewertung der Systematik anhand der Anforderungen	162
6	Zusammenfassung und Ausblick	165
7	Abkürzungsverzeichnis	169
8	Literaturverzeichnis	173

Anhang

A1 Ergänzungen zur Problemanalyse	A-1
A1.1 Modelle in der Entwicklung	A-1
A1.2 Stellung des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus	A-4
A1.3 Arten zur Identifikation von Ideen	A-5
A1.4 Dimensionen von Kundenbedürfnissen	A-6
A1.5 Rollen der Kundeneinbindung	A-7
A1.6 Nutzung von Informationen aus dem Produktlebenszyklus	A-8
A2 Ergänzungen zum Stand der Technik	A-9
A2.1 Klassifikation von smarten Produkten (BRIDGE).....	A-9
A2.2 Aufbau von Embedded Devices	A-10
A2.3 Dimensionen des Industrie 4.0 Readiness Modells	A-11
A3 Ergänzungen zur Systematik	A-13
A3.1 Möglichkeit zur Spezifikation der Leistungsstufen	A-13
A3.2 Spezifikationstechnik CONSENS	A-13
A3.3 Vereinfachte Workshop-Vorlage zur Bewertung von Ideen	A-15

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Cluster-Querschnittsprojekts „Selbstoptimierung“ im BMBF-Spitzencluster „Intelligente Technische Systeme OstWestfalen-Lippe“ (it's OWL). Ziel des Cluster-Querschnittsprojekts „Selbstoptimierung“ ist ein Instrumentarium für die Integration von Intelligenz in die maschinenbaulichen Systeme von morgen. Hierzu wurden Methoden und Verfahren erarbeitet, mit denen Unternehmen bei der Realisierung von selbstoptimierenden Systemen unterstützt werden können. Durch die intensive Kooperation mit den beteiligten Unternehmen des Spitzenclusters wurden die Methoden und Verfahren stetig validiert und weiterentwickelt.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist eine *Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau*. Die entwickelte Systematik zeigt auf, wie der Bedarf zur Modifikation bestehender Systeme identifiziert sowie Lösungsideen spezifiziert, bewertet und Erfolg versprechende Lösungsideen ausgewählt werden können.

In den Abschnitten 1.1 und 1.2 werden Problematik und Zielsetzung der vorliegenden Arbeit dargestellt. Abschnitt 1.3 gibt einen Überblick über den Aufbau der Arbeit.

1.1 Problematik

Innovationen sind insbesondere in Deutschland die Basis für Wachstum, Beschäftigung und Wohlstand [BGR+07], [GGL10]. Zukünftig werden neue Innovationen und damit verbundene Technologien verstärkt aus dem Bereich der **Informations- und Kommunikationstechnik** kommen [BSW+09, S. 27]. Heutige Erzeugnisse des Maschinen- und Anlagenbaus (wie z.B. Verpackungs-, Textil- oder Werkzeugmaschinen) sind in der Regel mechatronische Systeme, die durch die Mechanik geprägt sind. Hierdurch entstanden in der Vergangenheit Innovationen maßgeblich durch die Arbeiten der Mechanik-Konstruktion und den damit verbundenen mechanischen Komponenten. In den letzten Jahren hat jedoch der Anteil der Elektronik und der Softwaretechnik an der Produktentstehung enorm zugenommen, wenngleich natürlich ein gewisser Anteil an Mechanik stets notwendig sein wird [Gla93, S. 2], [Koh90, S. 263ff.]. Im Vergleich zu anderen Branchen (z.B. Unterhaltungselektronik) steht die Digitalisierung¹ der Produkte im Kontext des Maschinen- und Anlagenbaus noch am Anfang [Sau13, S. 14].

¹ Für den Begriff der Digitalisierung wird in der Arbeit auf folgende Beschreibung zurückgegriffen: „Die Digitalisierung [...]. In Deutschland firmiert sie aktuell unter dem Titel »Industrie 4.0« und setzt auf selbstorganisierende und echtzeitfähige Systeme. Sichtbar wird sie in Form vernetzter Produktionsanlagen, höher Durchgängigkeit der IT-Systeme, intelligenter Werkstücke und Transporthilfsmittel sowie in der Nutzung mobiler Kommunikationstechnik“ [BSH+14, S. 5].

Aus der sich abzeichnenden Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik eröffnen sich neue Perspektiven für mechatronische Systeme: Mechatronische Systeme mit inhärenter Teilintelligenz. Diese Systeme werden auch als **Intelligente Technische Systeme (ITS)** bezeichnet [DJG12, S. 24]. Im Kontext von ITS werden häufig folgende Schlagworte genannt: „Cyber-Physical Systems“, „Internet der Dinge“, „Industrie 4.0“ oder „Selbstopтимierung“. Systeme aus diesem Bereich werden nicht mehr durch rein ingenieurwissenschaftliche Ansätze entstehen. Verstärkt werden Ansätze aus den Bereichen des maschinellen Lernens, der Kognitionswissenschaften oder der mathematischen Optimierung ihre Berücksichtigung finden [Dum11, S. 42]. Diese Systeme können durch vier zentrale Eigenschaften charakterisiert werden: Sie sind adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich [Gau11, S. 23], [DJG12, S. 24], [GDS+13, S. 18].

Zahlreiche **Beispielanwendungen** zeigen die Nutzenpotentiale Intelligenter Technischer Systeme auf [GDE+16]. Beispiel ist ein Teigknetter der Fa. WP Kemper. Bei der Bedienung von Knetmaschinen zur Herstellung von Teig (z.B. für Brötchen) ist Expertenwissen von geschulten Bäckern notwendig. Der Bäcker weiß in Abhängigkeit der eingesetzten Zutaten und der eingestellten Parameter am Teigknetter, wie lange der Knetvorgang stattfinden muss, um eine optimale Qualität des Teigs zu erzielen. Hierdurch wird sowohl eine Überknetung als auch eine zu geringe Knetung vermieden [GIV+14, S. 56]. Dieses Wissen über die Zusammenhänge ist beim Bäcker in Form von impliziten Wissen vorhanden, welches mit Hilfe von Ansätzen der theoretischen Modellbildung (auf Basis von physikalischen Gesetzen) nur schwer abbildbar ist. Zur erhöhten Automatisierung bedarf es der Externalisierung des Expertenwissens sowie der Integration des Wissens in die Maschine. Die Externalisierung und Integration ist mit Hilfe von maschinellen Lernverfahren aus dem Bereich der experimentellen Modellbildung möglich. Das erlernte Modell analysiert eingehende Sensorwerte und schließt automatisiert Rückschlüsse auf den Teigzustand [GIV+14, S. 56].

Obwohl die Integration solcher Funktionen hohes Nutzenpotential aufweist, werden z.B. die Ansätze aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz im Maschinen- und Anlagenbau kaum berücksichtigt, um die Leistungsfähigkeit der technischen Systeme zu steigern [Kre15, S. 47]. Gleiches betrifft auch den Einsatz von mathematischen Optimierungsverfahren zur Verbesserung des Systemverhaltens. Dies kann sowohl an einer fehlenden Sensibilisierung der Unternehmen bezüglich der zu erschließenden Nutzenpotentiale liegen, als auch an fehlenden Kompetenzen in diesen Bereichen.

Die systematische Weiterentwicklung von Systemen (z. B. auf Basis von maschinellen Lern- oder mathematischen Optimierungsverfahren) basiert im Wesentlichen auf drei

Aufgaben: 1. Identifikation des Bedarfs zur Modifikation bestehender Systeme, 2. Spezifikation von intelligenten Lösungsideen² sowie 3. Bewertung und Auswahl Erfolg versprechender Lösungsideen. Darüber hinaus gilt es den Kunden frühzeitig und bedarfsgerecht in diese Aufgaben einzubinden, um den Markterfolg abzusichern. Diese Aufgaben stellen für den Maschinen- und Anlagenbau eine **Herausforderung** dar. Vor diesem Hintergrund ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Wie kann der Bedarf zur Weiterentwicklung bestehender Maschinen und Anlagen systematisch identifiziert werden?
- Welche Möglichkeiten existieren, um zukünftige Maschinen und Anlagen intelligenter zu realisieren?
- Wie kann eine geeignete Bewertung und Auswahl von intelligenten Lösungsideen sichergestellt werden?
- In welcher Art und Weise kann der Kunde bedarfsgerecht in die Weiterentwicklung eingebunden werden?
- Welche Hilfsmittel sind zur Verfügung zu stellen, um Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus bei den genannten Aufgaben und Herausforderungen zu unterstützen?

Die dargestellten Herausforderungen führen zu der Notwendigkeit, eine Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau methodisch zu unterstützen. Hierzu gilt es im Wesentlichen zwei Aspekte integrativ zu betrachten. Zum einen gilt es den Kunden bei der Weiterentwicklung von Maschinen und Anlagen zu berücksichtigen. Denn nur wenn die **Bedürfnisse des Kunden** durch weiterentwickelte Maschinen und Anlagen adressiert werden, kann der Reiz zum Kauf generiert werden [Rup12, S. 36ff], [HF11, S. 2f]. Des Weiteren sind die **Lösungen aus dem Bereich der Selbstoptimierung** bedarfsgerecht einzusetzen, um die Intelligenz in mechatronischen Systemen zu steigern. Die entsprechenden Lösungen aus dem Bereich der Selbstoptimierung weisen das Nutzenpotential auf, um die Informationsverarbeitung von mechatronischen Systemen intelligenter zu realisieren [GDJ+14, S. 6]. Zu diesen zählen mathematische Optimierung, maschinelles Lernen, fortgeschrittene Regelungstechnik sowie Verlässlichkeitskonzepte fortgeschrittener Systeme [its16]. Bild 1-1 visualisiert diesen Sachverhalt sowie die daraus resultierende Notwendigkeit einer Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme.

² Im Rahmen dieser Arbeit beschreiben intelligente Lösungsideen Ideen zum Realisieren von intelligentem Systemverhalten. Intelligentes Systemverhalten wird durch folgende vier Eigenschaften charakterisiert: adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich [Gau11, S. 23].

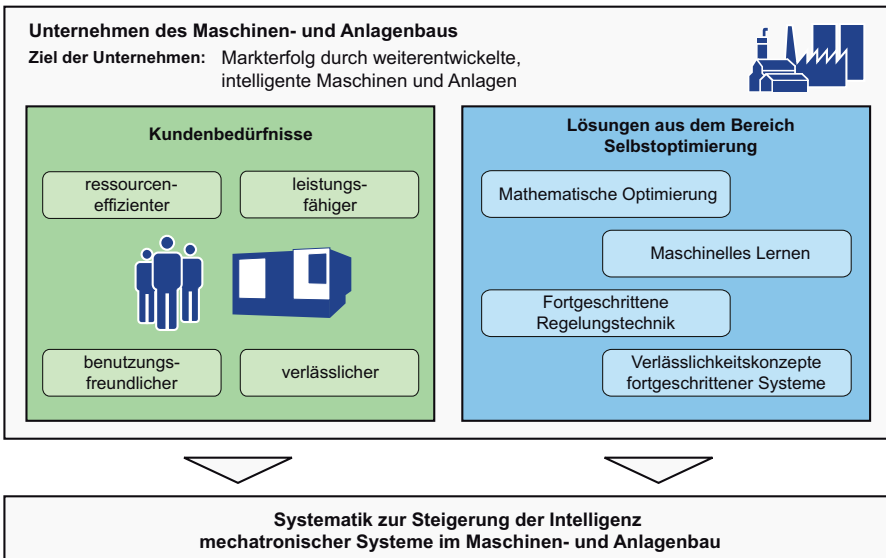


Bild 1-1: Notwendigkeit einer Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau

Der beschriebenen Notwendigkeit folgend lassen sich **Handlungsfelder** definieren. Es bedarf an Möglichkeiten, aktuelle Maschinen und Anlagen ganzheitlich und disziplinübergreifend abzubilden und nachfolgend systematisch auf Potentiale hin zu analysieren. Die Motivation zur Identifikation dieser Potentiale ist die Steigerung der Intelligenz. Zudem gilt es das Lösungswissen aus dem Bereich der Selbstoptimierung zu externalisieren und für die Weiterentwicklung des Systems bereitzustellen. Ferner sind geeignete Methoden und Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen, mit denen Lösungsideen für intelligentes Systemverhalten spezifiziert, bewertet und ausgewählt werden können. Die resultierenden Ergebnisse sollen zudem eine bedarfsgerechte Einbindung des Kunden ermöglichen sowie für den Einsatz im Maschinen- und Anlagenbau geeignet sein.

Fazit:

Zukünftig werden neue Innovationen und damit verbundene Technologien verstärkt aus dem Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik kommen. Insbesondere die Entwicklungen im Bereich der Selbstoptimierung zeigen die resultierenden Nutzenpotentiale für technische Systeme auf. Zurzeit werden diese Nutzenpotentiale und die damit verbundenen Ansätze jedoch nicht ausreichend berücksichtigt, um Innovationen hervorzubringen. Dies betrifft insbesondere die Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau. Vor diesem Hintergrund bedarf es einer Systematik, mit der die Intelligenz in Maschinen und Anlagen gesteigert werden kann.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist eine *Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau*. Die Systematik unterstützt insbesondere die Spezifikation zukünftiger, intelligenter Produktideen. Der Einsatz der Systematik ist für die frühen Phasen der Produktentstehung bestimmt.

Die Systematik soll eine **Bedarfsidentifikation zur Modifikation** des bestehenden mechatronischen Systems ermöglichen, um Schwachstellen des Systems oder auch Wünsche der Kunden zu identifizieren, die durch eine Steigerung der Intelligenz adressiert werden. Auf Basis des identifizierten Bedarfs soll nachfolgend eine **Spezifikation von intelligenten Lösungsideen** ermöglicht werden, welche auf Lösungen aus dem Bereich der Selbstoptimierung aufsetzen (z.B. Maschinelles Lernen oder mathematische Optimierung). Ferner soll die Systematik eine **Bewertung und Auswahl Erfolg versprechender Lösungsideen** unterstützen. Im Kern soll die Systematik aus folgenden Bestandteilen bestehen:

- einem **Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme**,
- Methoden zur **Planung der Umsetzung** von intelligenten Lösungsideen,
- einem **Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau** sowie
- Hilfsmitteln zur **Förderung der Kommunikation und Spezifikation**.

Das **Stufenmodell** soll aufzeigen, wie die Vision von selbstoptimierenden Systemen schrittweise realisiert werden kann. In diesem Zusammenhang soll es Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des mechatronischen Systems umfassen, wie z.B. aus dem Kontext der mathematischen Optimierung, des maschinellen Lernens, fortgeschrittene Steuerungs- und Regelungskonzepte und Ansätze zur Steigerung der Verlässlichkeit intelligenter Systeme. Die Methoden zur **Planung der Umsetzung** sollen für die zuvor genannten Bereiche die Umsetzungsschritte aufzeigen, um eine frühzeitige Abschätzung des Umsetzungsaufwands sowie der damit verbundenen Kompetenzen zu erreichen. Das **Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme** soll die beteiligten Personen bei der Analyse des bestehenden Systems sowie der Identifikation, Spezifikation sowie Auswahl und Bewertung von intelligenten Lösungsideen unterstützen. Vor dem Hintergrund der Interdisziplinarität der Aufgabe sollen die Hilfsmittel zur **Förderung der Kommunikation und Spezifikation** den Wissensaustausch und -transfer im Projektteam unterstützen.

Als Resultat der Anwendung liegen bewertete und ausgewählte Lösungsideen für zukünftige Maschinen und Anlagen mit intelligenten Systemfunktionen vor. Die Lösungsideen bilden die Grundlage für die weiteren Schritte im Rahmen der Produktentstehung.

1.3 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. In **Kapitel 2** erfolgt eine Präzisierung der in Abschnitt 1.1 dargelegten Problematik. Hierfür erfolgt zunächst eine Definition der relevanten Begriffe. Im Anschluss werden die Charakteristika des deutschen Maschinen- und Anlagebaus, fortgeschrittene mechatronische Systeme, die Aufgaben im Rahmen der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen sowie die Bedeutung der Kundeneinbindung in der Produktentstehung erläutert. In diesem Kontext werden die Handlungsfelder zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau präzisiert, um zuletzt Anforderungen an die Systematik zu formulieren.

In **Kapitel 3** wird der Stand der Technik vor dem Hintergrund der Anforderungen an die Systematik diskutiert. Es werden Ansätze vorgestellt, die die Thematik der vorliegenden Arbeit adressieren und sich für die Erfüllung der formulierten Anforderungen eignen. Zunächst werden übergreifende Ansätze erläutert, die die Integration von Intelligenz in technische Systeme verfolgen. Ferner werden Ansätze und Methoden zur Identifikation des Modifikationsbedarfs technischer Systeme vorgestellt. Da die Steigerung der Intelligenz in der Regel schrittweise erfolgt, werden sukzessive Ansätze zur Spezifikation von Fähigkeiten von Intelligenz im Sinne von Stufen beschrieben. Zur Bewertung von ausgearbeiteten, intelligenten Lösungsideen werden darüber hinaus Methoden zur Bewertung und Auswahl von Lösungsideen vorgestellt. Zuletzt werden die dargestellten Ansätze hinsichtlich der in Kapitel 2 formulierten Anforderungen bewertet, um den resultierenden Handlungsbedarf abzuleiten.

Kapitel 4 beinhaltet die Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau. Zunächst wird ein Überblick über die Systematik gegeben. In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Bestandteile der Systematik näher vorgestellt. Hierzu zählen ein Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme, Methoden zur Planung der Umsetzung von intelligentem Verhalten, das Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau sowie Hilfsmittel zur Förderung der Kommunikation und Spezifikation.

Die Systematik wird in **Kapitel 5** an einem Validierungsbeispiel vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einer Bewertung der Systematik hinsichtlich der definierten Anforderungen aus Kapitel 2.

Kapitel 6 fasst die wesentlichen Inhalte der Arbeit zusammen und zeigt den zukünftigen Forschungsbedarf auf.

2 Problemanalyse

Ziel der Problemanalyse sind Anforderungen an eine *Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau*. Hierfür werden in Abschnitt 2.1 die wesentlichen Begriffe definiert. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 der deutsche Maschinen- und Anlagenbau charakterisiert. In Abschnitt 2.3 werden fortgeschrittene mechatronische Systeme sowie deren Funktionsweise vorgestellt. Im Fokus stehen mechatronische Systeme, adaptiv geregelte Systeme sowie selbstoptimierende Systeme im Sinne von Intelligenten Technischen Systemen. In Abschnitt 2.4 werden die Strategische Planung und integrative Entwicklung von Marktleistungen erläutert und die vorliegende Arbeit eingeordnet. Im Fokus von Abschnitt 2.5 stehen Ansätze zur Einbindung von Kunden im Rahmen der Produktentstehung. In Abschnitt 2.6 werden die wesentlichen Herausforderungen zur Ausarbeitung der Systematik erläutert, aus welchen in Abschnitt 2.7 die Anforderungen an die Systematik folgen.

2.1 Begriffsdefinition und Ausrichtung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist eine *Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau*. Im Rahmen dieser Arbeit orientiert sich der Begriff **Systematik** an der Definition von DUMITRESCU zur Entwicklungssystematik [Dum11, S. 5f.], [Han55, S. 36]. Vor diesem Hintergrund beschreibt eine Systematik ein Rahmenwerk, das ein Vorgehensmodell sowie Hilfsmittel zur erfolgreichen Bearbeitung einer gegebenen Aufgabe zur Verfügung stellt [Dum11, S. 6]. In der vorliegenden Arbeit besteht die Aufgabe in der Spezifikation von Erfolg versprechenden Lösungsideen zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme.

Die qualitative Beschreibung von **Intelligenz mechatronischer Systeme** erfolgt auf Basis von vier zentralen Eigenschaften Intelligenter Technischer Systeme. Intelligente Technische Systeme sind adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich [DJG12, S. 24f.], [Gau11, S. 22f.], [Dum11, S. 41], [Eur09-ol, S. 27].

- **Adaptiv:** Die Systeme interagieren mit dem Umfeld und passen ihr Systemverhalten dementsprechend an. Hierdurch können sie sich im Betrieb in einem vom Entwickler vorgesehenen Rahmen weiterentwickeln [Gau11, S. 23], [Nau00, S. 7f.].
- **Robust:** Die Systeme sind in der Lage auch vom Entwickler nicht berücksichtigte Situationen in einem dynamischen Umfeld zu bewältigen. Unsicherheiten und fehlende Informationen werden bis zu einem gewissen Grad ausgeglichen [Gau11, S. 23], [Nau00, S. 7f.].
- **Vorausschauend:** Mit Hilfe von akquiriertem Erfahrungswissen (aus vergangenen Betriebsituationen) können diese Systeme künftige Wirkungen und Einflüsse und mögliche Zustände antizipieren. Hierdurch können Potentiale für den Betrieb

zur Steigerung der Leistungsfähigkeit frühzeitig erkannt und Verhaltensanpassungen durchgeführt werden. Dies ist vor allem in Situationen sinnvoll, in denen die Grenzen der entworfenen Modelle überschritten werden [SFB01, S. 11], [Gau11, S. 23], [Nau00, S. 7f.].

- **Benutzungsfreundlich:** Die Systeme passen sich dem spezifischen Benutzerverhalten an und stehen in einer bewussten Interaktion mit dem Benutzer. Hierbei sollte das Systemverhalten stets nachvollziehbar für den Benutzer sein [Gau11, S. 23].

Auf Grundlage dieser Definition resultiert aus einer Verbesserung der Systemeigenschaften in den Bereichen adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich eine Steigerung der Intelligenz von mechatronischen Systemen. In diesem Sinne gilt es die Systeme adaptiver, robuster, vorausschauender und benutzungsfreundlicher zu gestalten.

Die Systematik zur Steigerung der Intelligenz adressiert **mechatronische Systeme**. Mechatronische Systeme basieren auf dem synergetischen Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik [VDI2221, S. 14].

Im Fokus der Arbeit stehen mechatronische Systeme des Maschinen- und Anlagenbaus. Zu diesen Systemen gehören z.B. Verpackungs-, Textil- oder Werkzeugmaschinen. Im Folgenden wird für die Charakterisierung des **Maschinen- und Anlagenbaus** auf die Definition der sogenannten Abteilung „Maschinenbau“ des STATISCHEN BUNDESAMTES zurückgegriffen:

[...] 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. [...] umfasst ferner die Herstellung von Hebezeugen und Fördermitteln“ [Sta08, S. 291].

2.2 Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau

Die zu erarbeitende Systematik soll maßgeblich im Maschinen- und Anlagenbau zum Einsatz kommen, da dort verstärkt ein Wandel von mechatronischen Systemen hin zu Intelligenten Technischen Systemen bevorsteht [PFV14, S. 160f.], [VDM14, S. 5]. Vor diesem Hintergrund werden in Abschnitt 2.2.1 zunächst die Charakteristika des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus beschrieben. Nachfolgend werden in Abschnitt 2.2.2 die Zukunftsperspektiven diskutiert, welche die Stärke des Maschinen- und Anlagenbaus zukünftig ausbauen sollen.

2.2.1 Charakteristika des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus

Der Maschinen- und Anlagenbau gilt mit über 3% Anteil an der Bruttowertschöpfung als einer der wichtigsten Industriezweige der deutschen Wirtschaft. Dies wird auch mit dem erwirtschafteten Gesamtumsatz von 218 Milliarden Euro im Jahr 2015 ausgedrückt. Zudem ist der **Maschinen- und Anlagenbau** mit 1.009.000 Beschäftigten (Jahresdurchschnitt im Jahr 2015) der größte industrielle Arbeitgeber **in Deutschland** [VDM16, S. 7]. Unter den Beschäftigten waren im Jahr 2013 über 183.000 Ingenieure, Wirtschaftsingenieure und Informatiker [VDM14, S. 33]. Die Stellung des Maschinen- und Anlagenbaus gegenüber weiteren großen Industriezweigen, wie z.B. der Elektroindustrie, kann im Anhang betrachtet werden (vgl. Anhang A1.2). Zu den umsatzstärksten Fachzweigen im deutschen Maschinen- und Anlagenbau (bezogen auf den Maschinenaußenhandel) zählten im Jahr 2015 die Antriebstechnik, die Fördertechnik, Werkzeugmaschinen sowie die sogenannte allgemeine Lufttechnik [VDM16, S. 27].

Zudem sind die deutschen Hersteller des Maschinen- und Anlagenbaus im Export führend. In 24 von 31 vergleichbaren Fachzweigen sind die deutschen Unternehmen unter den drei umsatzstärksten Ländern vertreten. Bei 18 von diesen sogar führend. China ist mit 23 und die USA mit 18 Fachzweigen unter den ersten drei Rängen vertreten [VDM16, S. 30f.]. Eine Tendenzumfrage³ im Jahr 2012 unterstreicht diese Stellung ebenfalls. In dieser Umfrage sahen sich ein Fünftel der befragten deutschen Unternehmen als Weltmarktführer; 43% schätzten sich als Teil der Spitzengruppe „Top Five“ ein [VDM12, S. 3]. Die **internationale Wettbewerbsstärke des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus** liegt u.a. in dem kontinuierlichen Ausbau des Exportgeschäftes begründet. Hierdurch konnte im Vergleich zu den übrigen westlichen Nationen seit den neunziger Jahren ein konstanter Anteil am Weltmarkt gehalten werden [Thi12, S. 56]. Im Jahr 2014 erzielten die Fachzweige Reinigungssysteme (Anteil von 29,7%), Mess- und Prüftechnik (Anteil von 26,9%) sowie Holzbearbeitungsmaschinen (Anteil von 24,9%) die höchsten Werte bei den Marktanteilen [VDM16, S. 31].

Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau ist geprägt von **mittelständischen Unternehmensstrukturen**. So beschäftigten laut Statistischem Bundesamt ca. 85,4% der Unternehmen im Maschinenbau im Jahr 2013 weniger als 250 Mitarbeiter, ca. zwei Drittel der Unternehmen sogar weniger als 100 Mitarbeiter. Nur ca. 2% der Unternehmen beschäftigen mehr als 1.000 Mitarbeiter [Sta14, S. 18]. Bild 2-1 visualisiert den Anteil der Unternehmen in den jeweiligen Betriebsgrößenklassen⁴.

³ Der VDMA führte die Umfrage im Sommer 2012 durch. Im Rahmen der Studie teilten die Unternehmen mit, wie laut ihrer Einschätzung die Wettbewerbsposition im internationalen Vergleich aussieht. An der Studie haben 483 Unternehmen teilgenommen [VDM12, S. 1].

⁴ Im Rahmen der Datenerhebung des STATISTISCHEN BUNDESAMTES sind Unternehmen mit weniger als 20 beschäftigten Personen nicht in der Statistik berücksichtigt (nicht Teil des Berichtskreises) [Sta14, S. 4]. Somit ist der tatsächliche Anteil der kleineren Unternehmen höher anzunehmen als ermittelt.

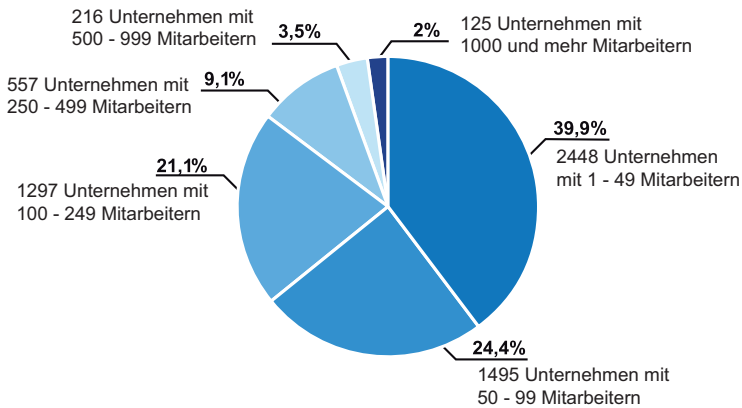


Bild 2-1: Anzahl der Unternehmen in den jeweiligen Betriebsgrößenklassen (Absolut und Anteilen) nach [Sta14, S. 18]

Die Unternehmen mit unter 250 Beschäftigten erzielten im Jahr 2013 einen Anteil von 29,8% am Umsatz im gesamten Bereich des Maschinenbaus. Unternehmen mit einer Beschäftigtenanzahl von 250 bis unter 1000 haben einen Anteil von 37,1% und die Unternehmen mit über 1000 Mitarbeitern 33,1% am gesamten Umsatz [Sta14, S. 40].

Die mittelständischen Unternehmensstrukturen sind u.a. in der hohen **Spezialisierung** der Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau begründet. Die Spezialisierung betrifft sowohl die bedienten Kundenanforderungen an die Systeme, als auch die verbundene und erforderliche technologische Kompetenz. Die Bedienung der unterschiedlichen Kundenanforderungen, der teils sehr kleinen Kundensegmente, resultiert in einer Positionierung als sogenannte Nischenplayer [EDB+15-ol, S. 24]. Hervorzuheben ist, dass viele der kleinen und mittleren Unternehmen aufgrund der Spezialisierung weltweit führend sind [VDM14-ol].

Gleichzeitig stellen die mittelständisch geprägten Strukturen die Unternehmen vor Herausforderungen im **Umgang mit Wissen** bzw. dem gezielten Wissensmanagement. Oft ist das wertvolle Wissen nur in den Köpfen einzelner Mitarbeiter implizit vorhanden. Aufgrund dessen kann das implizite Wissen nicht von allen im Unternehmen genutzt werden. Die Folge: Wertvolles Wissen kann verloren gehen oder nur ungenügend genutzt werden [OVK11, S. 5ff.]. Dieser Umstand ist kritisch, da Wissen Grundlage für Innovationen ist [OVK11, S. 5]. Im Umkehrschluss können durch einen gezielten Wissenstransfer hoch innovative Lösungen entstehen [KSH14, S. 4].

Fazit:

Die Unternehmen des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus weisen eine starke Positionierung im internationalen Wettbewerb auf. Viele Unternehmen sehen sich als Weltmarktführer oder zählen zu den Topunternehmen auf dem Weltmarkt. Diese Position gilt

es in Zukunft zu festigen und auszubauen. Zudem ist der deutsche Maschinen- und Anlagenbau geprägt durch mittelständische Unternehmensstrukturen. Für mittelständisch geprägte Unternehmen ist der gezielte Wissenstransfer entscheidend, um Innovationen zu realisieren. Vor diesem Hintergrund soll die Systematik den Wissenstransfer innerhalb des Unternehmens durch geeignete Hilfsmittel fördern.

2.2.2 Zukunftsperspektiven im Maschinen- und Anlagenbau

Als wesentlicher Treiber für die gute Positionierung der Unternehmen des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus am Markt werden **Innovationen** gesehen. Dies liegt an der Notwendigkeit, dass der deutsche Maschinen- und Anlagenbau u.a. aufgrund geringer Finanzreserven Innovationen benötigt [Sch08, S. 1], um Rezessionsphasen durch verbesserte Margen zu kompensieren [Har13, S. 7], [Thi12, S. 3]. Zudem erfordert der globale Wettbewerb durch Mitbewerber aus Asien insb. eine **Qualitäts- und Technologieführerschaft** zur Differenzierung gegenüber den Mitbewerbern. Infolgedessen werden in Premiumsegmenten fortgeschrittene Technologien sowie anwendungsfallspezifische Lösungen angeboten, um Kostennachteile durch einen hohen Verkaufspreis zu kompensieren [Thi12, S. 57]. Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau erwirtschaftete ca. 23% des Umsatzes mit neuen oder verbesserten Produkten. Dies zeigt die hohe Bedeutung von Innovationen sowie den Bedarf, Potentiale zur Weiterentwicklung systematisch zu identifizieren [VDM14-ol].

Ein weiterer Aspekt, der die hohe Bedeutung der Innovation im Maschinen- und Anlagenbau untermauert, ist die Anzahl der **Patentanmeldungen**⁵. Deutsche Unternehmen meldeten 25,7% der Patente im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus an. Im Vergleich hierzu haben die übrigen 27 EU-Mitgliedsstaaten zusammen einen Anteil von 28,4% und die Vereinigten Staaten einen Anteil von 19,4% der Patentanmeldungen (Quelle: Eurostat, VDMA) [Aue14-ol, S. 7].

In Deutschland sind Innovationen häufig das Ergebnis von **systematischen Innovationsprozessen**. Beispielsweise stellen Kooperationen zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen einen wesentlichen Erfolgsfaktor dar. Hierdurch können sowohl neue technische Möglichkeiten als auch gut ausgebildete Fachkräfte identifiziert werden [MV14, S. 27]. Aber auch funktionenübergreifende Teams (z.B. aus Service, Entwicklung und Vertrieb) sowie das Reflektieren von Kundenbedürfnissen (z.B. Einbeziehen von Kundenwünschen sowie das Wissen aus dem Service und Vertrieb) sind entscheidend [MV14, S. 63]. Eine fortführende Berücksichtigung dieser Faktoren sowie der Ausbau sind von hoher Relevanz, um auch zukünftig die gute Positionierung am internationalen Markt sicherzustellen.

⁵ Die Aussage bezieht sich auf die Anzahl der Patentanmeldungen im European Patent Office in den Jahren 2001 bis 2010.

Die Fortführung bzw. den **Ausbau der Fähigkeit zur Innovation** schlägt auch eine im Jahr 2014 veröffentlichte Studie von MCKINSEY & COMPANY und dem VDMA vor [MV14, S. 45]. In dieser werden sechs Maßnahmen definiert, welche den Erfolg in Zukunft sichern sowie ausbauen (vgl. Bild 2-2) [MV14, S. 8f.]. Hierzu zählen *Optimierung des Produkt-/Portfoliowerts*, *Ausbau des Aftersales-/Servicegeschäfts*, *zielgerichtete Internationalisierung*, *Exzellenz in der heimischen Wertschöpfung*, *Standardisierung und Modularisierung* sowie *Verbesserung des Projektmanagements*. Vor dem Hintergrund der Arbeit ist die Maßnahme *Optimierung des Produkt-/Portfoliowerts* hervorzuheben: Sie motiviert die systematische Weiterentwicklung bestehender Systeme [MV14, S. 8f.].



Bild 2-2: Maßnahmen zur Sicherstellung und zum Ausbau des Erfolgs deutscher Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau in Anlehnung an [MV14, S. 50]

Die Weiterentwicklung des Systems kann durch die zunehmenden Möglichkeiten aus dem Bereich der **Informations- und Kommunikationstechnik** erfolgen. Infolgedessen können technologische Innovationen entstehen [MV14, S. 45]. Beispielsweise können mit Hilfe integrierter IKT Systeme intelligenter realisiert werden, um z.B. die Adaptivität oder Robustheit von Systemen zu erhöhen (vgl. Abschnitt 2.1). Zudem eröffnet die Vernetzung und Auswertung von Sensordaten eine verbesserte Funktionalität der Systeme, da Systemstörungen auf Grund des konsolidierten Erfahrungswissens vermieden werden können. Neue Fernwartungssysteme können entstehen, die einen Ausbau des Servicegeschäftes ermöglichen [MV14, S. 56]. Diese Entwicklungen können unter den Begriffen „Industrie 4.0“ oder „Cyber-Physische Produktionsanlagen“ zusammengefasst werden. Experten sehen in dieser Entwicklung hohes Potential, um den Maschinen- und Anlagenbau zu stärken [SGG+13, S. 121f.].

Eine Herausforderung zum Ergreifen des Potentials besteht insb. im Hinblick auf die Organisationsstrukturen in den produzierenden Unternehmen. So belegt eine Studie des Fraunhofer IAO, dass eine systematische Entwicklung der Kompetenzen der Mitarbeiter

erfolgen muss, um die Potentiale von intelligenten Systemen zu ergreifen [SGG+13, S. 124]. Dies betrifft besonders den Ausbau der Kompetenzen im Bereich der Informationstechnik [SGG+13, S. 124]. Ein Beispiel für produzierende Unternehmen, die einen Wandel in der Kostenstruktur der Produkte und daraus folgend der Mitarbeiter-Kompetenzstruktur erleben werden, ist die Automobilindustrie. Hier ist eine Steigerung des Kostenanteils von Software von 15% im Jahre 2010 auf 25% im Jahr 2025 zu erwarten [RK10-ol, S. 4]. Zu den identifizierten Trends in diesem Bereich gehören u.a. **Vernetzung, Cloud-Dienste, Big Data** und **künstliche Intelligenz** [Kre15, S. 47].

Ein Überblick über die zukünftig geforderten **Kompetenzen** im Kontext **Industrie 4.0** geben zudem BAUER ET AL. So werden z.B. höhere Kompetenzen im Bereich der Informationstechnik und stärkeres interdisziplinäres Denken und Handeln der Mitarbeiter (vgl. Bild 2-3) gefordert [BSH+14, S. 26]. Den Ausbau der interdisziplinären Vorgehensweise im Maschinen- und Anlagenbau schlägt auch BICK vor, um die starke Stellung im internationalen Wettbewerb zu stärken und auszubauen [Bic13-ol].

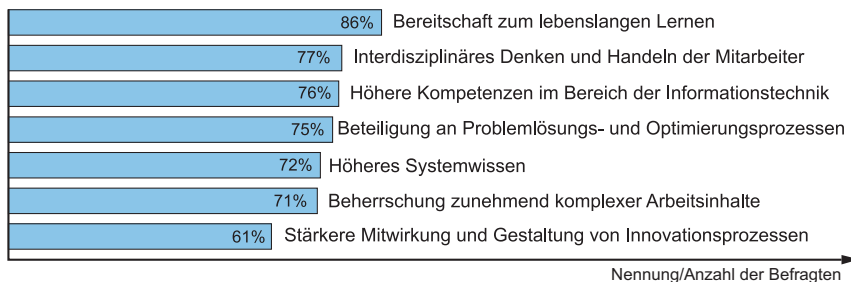


Bild 2-3: *Geforderte Kompetenzen an die Mitarbeiter in den Unternehmen durch die Entwicklungen im Kontext Industrie 4.0 nach [BSH+14, S. 26]*

Fazit:

Die Positionierung als Technologie- und Qualitätsführer gilt als Erfolg versprechend, um sich auch zukünftig am Markt zu differenzieren. Erfolgsfaktor ist u.a. eine starke Innovationsorientierung [FRS+15, S. 47]. Vor dem Hintergrund, dass ca. 23% des Umsatzes mit neuen oder verbesserten Produkten erwirtschaftet werden, gilt es Potentiale zur Weiterentwicklung systematisch zu identifizieren. Eine Weiterentwicklung ist u.a. durch Ansätze aus dem Kontext der ITS möglich. Die daraus resultierenden Nutzenpotentiale für den Maschinen- und Anlagenbau zeigt eine Studie des Spitzenclusters it's OWL [its14-ol, S. 38]. Die zu erarbeitende Systematik soll insbesondere die Positionierung als Technologieführer unterstützen und auf Ansätze aus dem Kontext ITS zurückgreifen.

2.3 Fortgeschrittene mechatronische Systeme

Die Erzeugnisse des Maschinen- und Anlagenbaus vollziehen einen Wandel hin zu Systemen mit inhärenter Teilintelligenz. Wesentlicher Treiber dieser Entwicklung ist die **Informations- und Kommunikationstechnik** [GCD15, S. 11]. Derartige Systeme sind in

der Lage, sich ihrer Umgebung und den Wünschen ihrer Anwender im Betrieb anzupassen. Im Folgenden wird der Innovationssprung von der Mechatronik hin zu fortgeschrittenen mechatronischen Systemen beschrieben. Hierzu erfolgt im Abschnitt 2.3.1 zunächst die Erläuterung zu mechatronischen Systemen. In Abschnitt 2.3.2 werden adaptiv, geregelte Systeme vorgestellt. Die in diesem Zusammenhang vorgestellten Adaptionsstrategien ermöglichen eine Weiterentwicklung von geregelten, mechatronischen Systemen. Gegenstand des Abschnitts 2.3.3 sind selbstoptimierende Systeme.

2.3.1 Mechatronische Systeme

Der Begriff **Mechatronik** – im Englischen „mechatronics“ – wurde erstmalig im Jahr 1969 von dem Unternehmen YASKAWA ELECTRIC CORPORATION verwendet und nachfolgend als Handelsname eingetragen [Com94, S. 46], [Roh08-ol], [Ise08, S. 3]⁶. Laut KYURA und OHO wurde der Begriff „mechatronics“ aus den Begriffen „mechanism“ und „electronics“ zusammengeführt [KO96, S. 10], [Mor69], [Jap72]. Derzeit existieren zahlreiche Definition des Begriffs „Mechatronik“ [Ise08, S. 3]. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Definition der VDI-Richtlinie 2206 verwendet [VDI2206, S. 14], welche auf den Arbeiten von HARASHIMA, TOMIZUKA und FUKUDA basiert [HTF96, S. 1ff.]:

„Mechatronik bezeichnet das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie bei der Prozessgestaltung“ [VDI2206, S. 14].

Mechatronische Systeme bestehen aus einem Grundsystem, Sensorik, Aktorik sowie einer Informationsverarbeitung. Die Systeme sind zudem eingebettet in einer Umgebung und können über entsprechende Schnittstellen mit dem Menschen sowie mit anderen Informationsverarbeitungen interagieren. Bild 2-4 zeigt die **Grundstruktur eines mechatronischen Systems** nach der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206, S. 14].

Das **Grundsystem** bildet i.d.R. eine mechanische, elektromechanische oder hydraulische Struktur. Es sind jedoch auch weitere physikalische Systeme denkbar [VDI2206, S. 14]. Diese Systeme können wiederum als hierarchisch, strukturierte mechatronische Systeme dargestellt werden. Die **Sensorik** hat die Aufgabe, Zustandsgrößen des Grundsystems sowie der Systemumgebung zu erfassen, zu digitalisieren und an die Informationsverarbeitung zu übergeben. Die **Informationsverarbeitung** bestimmt die Stellgrößen für die **Aktorik**, um das Verhalten des Systems aktiv zu verändern. Dies erfolgt auf Basis von Informationen der Sensorik, vernetzter Informationsverarbeitungen sowie des Menschen.

⁶ In der Literatur existieren widersprüchliche Aussagen bzgl. des Ursprungs des Begriffes „mechatronics“. COMERFORD folgend geht der Begriff auf den Japaner KO KIKUCHI zurück [Com94, S. 46]. Im Gegensatz dazu verweist ROHDE in einem Bericht des Unternehmens YASKAWA auf MORI [Roh08-ol].

Die einzelnen Einheiten des Systems sind über Flüsse miteinander verbunden. In Anlehnung an PAHL/BEITZ werden folgende drei Flussarten unterschieden: Stoff-, Energie- und Informationsflüsse [VDI2206, S. 15], [FG13, S. 241].

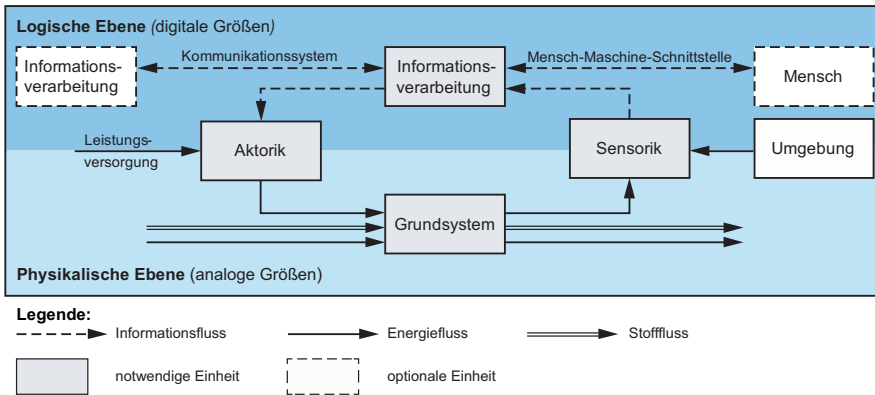


Bild 2-4: Struktur mechatronischer Systeme nach [GEK01, S. 32], [VDI2206, S. 14]

Mechatronische Systeme können in verschiedenen **Hierarchieebenen** eines Systems vorkommen oder selbst aus vernetzten eigenständigen Systemen bestehen. Zur Strukturierung von mechatronischen Systemen kann die Unterscheidung nach HONEKAMP ET. AL verwendet werden [HSN+97, S. 3f.], [Nau00, S. 22f.], [GRS14a, S. 8]:

Mechatronische Funktionsmodule bilden in der Regel die unterste Ebene in der Hierarchie. Sie bestehen aus dem mechanischen Grundsystem, Sensorik, Aktorik sowie Komponenten für die lokale Informationsverarbeitung. Beispiele hierfür sind eine aktive Fahrzeuffederung oder das Antiblockiersystem im Automobil [Nau00, S. 22].

Autonome Mechatronische Systeme stehen auf der mittleren Ebene und setzen sich zusammen aus mehreren MFM. Die Kopplung zu diesen kann mechanisch und/oder informationstechnisch realisiert werden. Die Bezeichnung *autonom* beschreibt, dass das System „selbständig“ Handlungen ausführen kann. Beispiele für solche Systeme sind fahrerlose Transportsysteme oder Roboter [Nau00, S. 22f.].

Vernetzte Mechatronische Systeme bilden die oberste Hierarchieebene bei mechatronischen Systemen. Gruppen von autonomen mechatronischen Systemen bilden gemeinsam ein VMS. Die Kopplung von VMS erfolgt ausschließlich informationstechnisch. Hervorzuheben ist, dass die Kopplung dynamisch erfolgt und sich hierdurch die Systemgrenze verändert. Beispiele hierfür sind kooperierende Roboter oder Fahrzeugkolonnen im Sinne von Konvois [Nau00, S. 22] In diesem Zusammenhang kann auch von *System of Systems* oder *Cyber-Physical Systems* gesprochen werden [EGN12, S. 34].

Fazit:

Die Steigerung der Leistungsfähigkeit mechatronischer Systeme weist im Wesentlichen vier Handlungsfelder auf: Verbesserung von Grundsystem, Sensorik, Aktorik und Informationsverarbeitung. Vor dem Hintergrund einer Steigerung der Intelligenz wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit der Fokus vorrangig auf der Informationsverarbeitung liegen. Da Verbesserungen der Informationsverarbeitung auch Verbesserungen der eingesetzten Sensorik und Aktorik erfordern können, werden diese ebenfalls berücksichtigt.

2.3.2 Adaptiv geregelte Systeme

Das Verhalten mechatronischer Systeme ist im Betriebsfall vom definierten Betriebspunkt des Systems abhängig. Dieser wird in Abhängigkeit der vorliegenden Situation (z.B. einer entsprechenden Last, wie Drehmoment oder Temperatur) auf Basis des definierten Prozessmodells im Betrieb verändert [Ise08, S. 319]. Jedoch verändern sich die Prozesse während ihrer Betriebszeit, sodass die dazugehörigen Prozessmodelle (z.B. durch Verschleiß oder nicht berücksichtigte Einflüsse) nicht mehr übereinstimmen und die Güte der Regelung abnimmt [Ise08, S. 326]. **Adaptive Regelungen** adressieren dies und tragen dazu bei, eine höhere Güte der Regelung im Betrieb zu erreichen [Ise08, S. 326]. Das Prinzip der adaptiven Regelung basiert auf der Erfassung von veränderlichen Streckeneigenschaften. Bei adaptiven Regelungen ist zunächst die Identifikation von Streckenparametern erforderlich sowie eine Auswertung mit Hilfe von Parameterschätzverfahren. Die identifizierten Parameteränderungen der Strecke erfordern nachfolgend (z.B. auf Basis eines Entscheidungssystems [Nau00, S. 9f.], [SR88, S. 18]) eine Modifikation der Reglerparameter oder der Reglerstruktur [RB11, S. X19]. Prinzipiell können adaptive Regler unterschieden werden in adaptive Regler mit und ohne Rückführung. In Bild 2-5 sind die beiden Strukturen von adaptiven Reglern dargestellt.

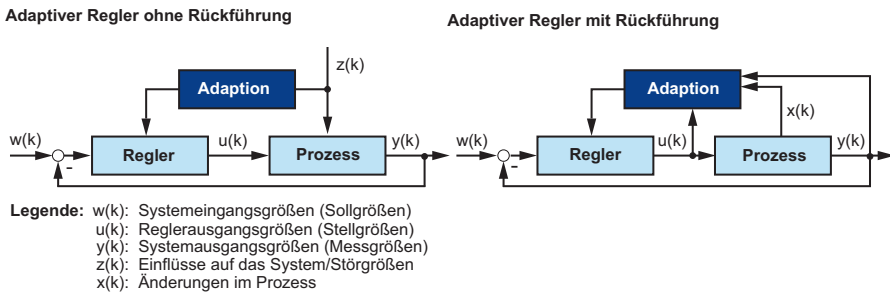


Bild 2-5: Grundlegende Strukturen von adaptiven Regelungen nach [ILM92, S. 6f.], [Nau00, S. 10f.], [ÄW08, S. 2f.]

Bei **adaptiven Reglern ohne Rückführung** erfolgt die Adaption auf Basis der Störgrößen, welche auf den Prozess wirken. Vor diesem Hintergrund muss das Systemverhalten hinreichend genau bekannt sein, um die relevanten Störgrößen zu identifizieren. Im Gegensatz dazu werden beim **adaptiven Regler mit Rückführung** die Stellgrößen und die

Systemgrößen bei der Adaption berücksichtigt. Hierdurch kann trotz unbekannter Streckenparameter ein verbessertes Systemverhalten realisiert werden [Nau00, S. 10].

Fazit:

Ansätze im Kontext von adaptiven Regelungen, wie z.B. Identifikationsverfahren, liefern Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von mechatronischen Systemen. Vor diesem Hintergrund sind diese als erste Möglichkeit für eine schrittweise Weiterentwicklung von regelten oder gesteuerten mechatronischen Systemen zu verstehen.

2.3.3 Selbstoptimierende Systeme

Die Entwicklungen im Bereich der **Informations- und Kommunikationstechnik** eröffnen neue Möglichkeiten, um Verbesserungen zukünftiger Produkte und Produktionssysteme zu realisieren: Intelligente Technische Systeme (ITS). Diese Systeme sind in der Lage, sich an ihre Umgebung und die Wünsche ihrer Anwender im Betrieb anzupassen. Schlagworte die zukünftige ITS beschreiben sind „Cyber-Physical Systems“ [GB12], „Industrie 4.0“ [Pa13] oder „Selbstoptimierung“ [GRS14a]. ITS zeichnen sich durch vier Eigenschaften aus: adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich (vgl. Abschnitt 2.1) [DJG12, S. 24f.], [Gau11, S. 22f.], [Dum11, S. 41], [Eur09-ol, S. 27].

Die Entwicklung von maschinenbaulichen Systemen mit den vorgestellten Eigenschaften stellt für die Unternehmen eine Herausforderung dar, wenngleich die resultierenden Systeme hohes Nutzenpotential aufweisen können [BH15, S. 54], [aca09, S. 8f.]. Dieser Herausforderungen begegnet der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte **Spitzencluster „Intelligente Technische Systeme OstWestfalen-Lippe“ (it’s OWL)** [GTD13, S. 49ff.]. Ziel der beteiligten Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Organisationen ist es, gemeinsam den Innovationssprung von der Mechatronik zu Intelligenen Technischen Systemen zu gestalten [its16-ol].

Die **Technologieplattform** im Spitzencluster „it’s OWL“ bilden fünf Querschnittsthemen. Die Themen sind *Selbstoptimierung*, *Mensch-Maschine-Interaktion*, *Intelligente Vernetzung*, *Energieeffizienz* und *Systems Engineering* [GDJ+14, S. 6f.]. Eine Zuordnung dieser zu den Bestandteilen eines ITS im Sinne des Spitzenclusters it’s OWL ist in Bild 2-6 dargestellt [GDJ+14, S. 6]⁷.

Im Folgenden wird das Querschnittsthema Selbstoptimierung im Detail erläutert, da der Fokus dieser Arbeit auf den Ansätzen der Selbstoptimierung liegt. Hierzu wird in Abschnitt 2.3.3.1 zunächst die Definition zur Selbstoptimierung vorgestellt. Nachfolgend wird in Abschnitt 2.3.3.2 das Operator-Controller-Modul (OCM) erläutert. In Abschnitt 2.3.3.3 werden die Ansätze zur Realisierung der Selbstoptimierung aufgezeigt. In Abschnitt 2.3.3.4 werden abschließend verschiedene Anwendungsbeispiele vorgestellt.

⁷ Weiterführende Erläuterungen zu der Technologiekonzeption sind [GDJ+14] zu entnehmen.

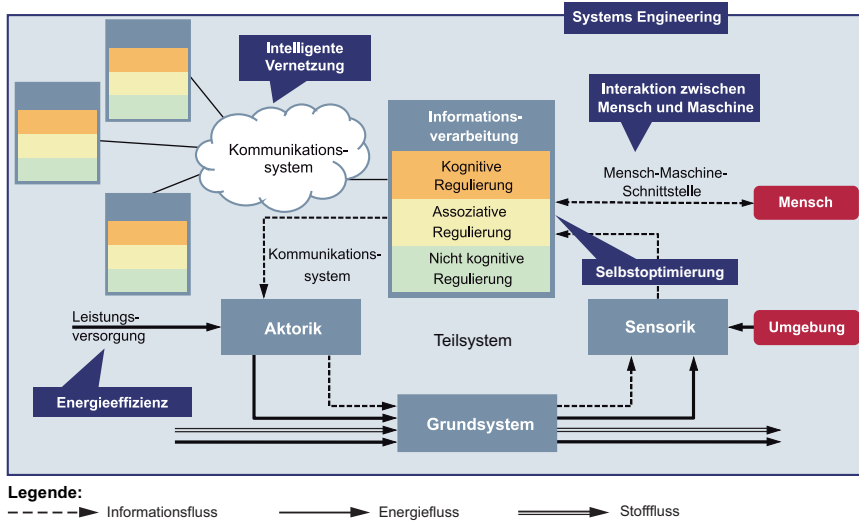


Bild 2-6: Technologiekonzeption von Intelligenten Technischen Systemen nach [Gau11, S. 25], [DJG12, S. 25], [GDJ+14, S. 6]⁸

2.3.3.1 Definition der Selbstoptimierung

Zukünftige Systeme werden in der Lage sein, autonom und flexibel auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren. Zu diesen Systemen zählen insbesondere **selbstoptimierende Systeme**. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ wurde das Wirkparadigma der Selbstoptimierung für den Maschinenbau betrachtet [GRS14a]. Der Begriff „Selbstoptimierung“ wurde im SFB 614 folgendermaßen definiert:

„Unter Selbstoptimierung eines technischen Systems wird die endogene Anpassung der Ziele des Systems auf veränderte Einflüsse und die daraus resultierende zielkonforme autonome Anpassung der Parameter und ggf. der Struktur und somit des Verhaltens dieser Systeme verstanden. Damit geht Selbstoptimierung über die bekannten Regel- und Adaptionsstrategien wesentlich hinaus; Selbstoptimierung ermöglicht handlungsfähige Systeme mit inhärenter „Intelligenz“, die in der Lage sind, selbständig und flexibel auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren“ [SFB04, S. 11f.]

Im Kern vollzieht sich die Selbstoptimierung als stets wiederkehrender Prozess in der Betriebsphase eines technischen Systems, der sogenannte Selbstoptimierungsprozess.

⁸ Die dargestellten Ebenen der Informationsverarbeitung sind in Anlehnung an STRUBE entstanden [Str98].

Der **Selbstoptimierungsprozess** besteht aus drei aufeinanderfolgenden Aktionen [GRS14a, S. 7]. In Bild 2-7 ist der Selbstoptimierungsprozess dargestellt sowie die grundlegenden Aufgaben/Fragestellungen in den jeweiligen Phasen eingeordnet.

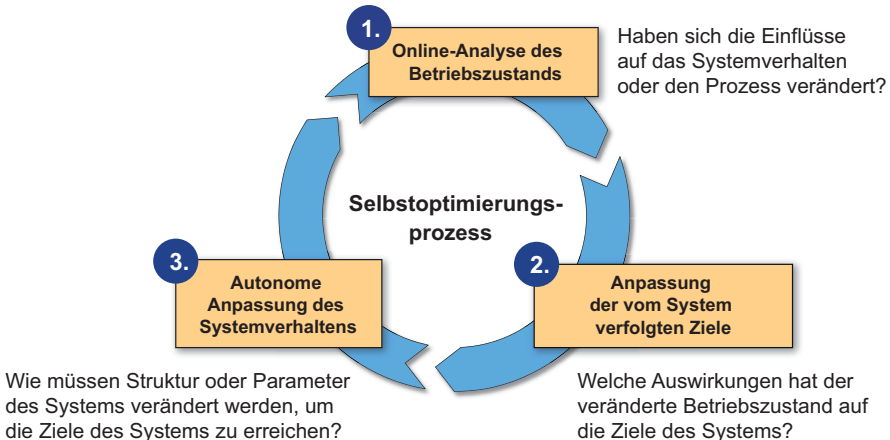


Bild 2-7: Der Selbstoptimierungsprozess nach [GRS+14b, S. 3], [GIV+14, S. 56]

Online-Analyse des Betriebszustandes: Im Rahmen der Online-Analyse werden die Einflüsse auf das System analysiert. Die Einflüsse können unterschieden werden in Einflüsse aus der Umgebung des Systems (z.B. verändertes Drehmoment, Temperatur), Einflüsse vom Benutzer (z.B. Änderung der Benutzerwünsche) sowie Einflüsse des Systems selbst (z.B. Verschleiß von Systemkomponenten). Die Einflüsse werden entweder vom System selbst (z.B. mit Hilfe von Sensorik), durch Kommunikation mit anderen Systemen oder durch die Benutzerschnittstelle erfasst. Zudem wird geprüft, ob die Ziele für die aktuelle Situation angemessen sind [ADG+09, S. 5f.], [GIV+14, S. 55f.].

Anpassung der vom System verfolgten Ziele: Auf Basis der Online-Analyse erfolgt die Anpassung der Systemziele. Systemziele im Sinne der Selbstoptimierung sind z.B. „minimiere Energieverbrauch“ oder „maximiere Leistungsfähigkeit“ des technischen Systems. Die Ziele werden als Zielfunktionen abgebildet, die von bestimmten Systemgrößen abhängig sind. In den jeweiligen Situationen erhält das System hierdurch einen quantitativen Zielfunktionswert (Erfüllungsgrad). Mit Hilfe der Selbstoptimierung werden optimale Kompromisse zwischen konkurrierenden Zielen gebildet, die in der vorliegenden Aktion zur Verfügung stehen und situationsspezifisch priorisiert werden können [ADG+09, S. 8], [GIV+14].

Autonome Anpassung des Systemverhaltens: Die neue Situation und die damit verbundene Zielanpassung erfordert nachfolgend eine Anpassung des Systemverhaltens. Das Systemverhalten kann durch die Veränderung von Parametern oder gegebenenfalls der Systemstruktur erfolgen. Die einfachste Art der Veränderung ist die Modifikation der Parameter des Reglers [Nau00, S. 31]. Bei der Änderung der Systemstruktur erfolgt eine

Modifikation der Anordnung und Beziehungen zwischen den Elementen eines Systems [ADG+09, S. 8]. Dies stellt die komplexeste Art der Veränderung dar [Nau00, S. 32]. Nachfolgend wird wiederum im ersten Schritt geprüft, welche Auswirkungen die Anpassung des Systemverhaltens hatte und ob ein verbesserter Zielfunktionswert erreicht wurde [ADG+09, S. 8f.].

Durch die situationsspezifische Berücksichtigung und Veränderung der Systemziele ergeben sich **selbstoptimierende Regelungen**, die über bekannte Regel- und Adaptionstrategien hinausgehen [BSK+06, S. 4673f.]. Diese sind nicht als Alternative zu den klassischen oder adaptiven Regelungen zu sehen sondern als Erweiterung [Dum11, S. 15f.], [BSK+06, S. 4673f.]. Diese Erweiterung ist in Bild 2-8 dargestellt. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Forderung nach einer geeigneten Strukturierung der Informationsverarbeitung des selbstoptimierenden Systems [HOG04], [Nau00].

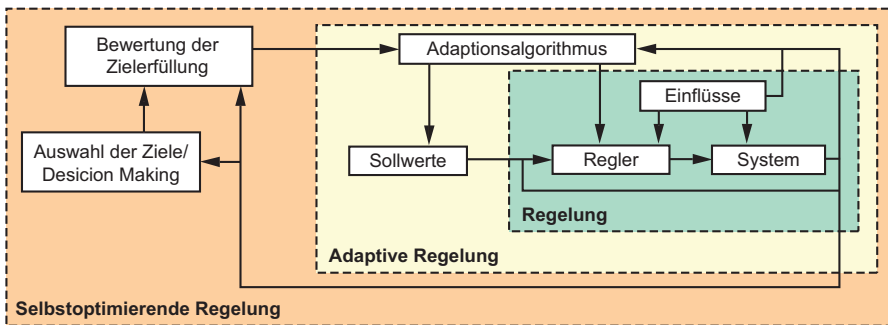


Bild 2-8: Erweiterung von geregelten und adaptiven Regelungen zu selbstoptimierenden Regelungen in Anlehnung an [BSK+06, S. 4674]

Fazit:

Die Handlungsoptionen zur Entwicklung von ITS sind vielfältig. Durch die Selbstoptimierung können intelligente Systeme realisiert werden. Die schrittweise Umsetzung zur Selbstoptimierung kann auf Basis von Regelungen und Ansätzen der adaptiven Regelung vollzogen werden. Eine Steigerung der Intelligenz kann durch die vier Eigenschaften von ITS charakterisiert werden: adaptiver, robuster, vorausschauender oder benutzungsfreundlicher (vgl. Abschnitt 2.1).

2.3.3.2 Operator-Controller-Modul

Selbstoptimierende Regelungen erweitern durch die Berücksichtigung von Systemzielen klassische Regelungen und erhöhen somit die Flexibilität und Leistungsfähigkeit des Systems [Nau00, S. 28]. Dies erfordert jedoch die Trennung der bereits bekannten Steuer- und Regelaufgaben von den Aufgaben, die zur Kontrolle dieser Aufgaben und zur Optimierung dienen. Dies ist insbesondere durch die Betrachtung von zeitlichen Restriktionen notwendig, da einige Aufgaben in Echtzeit erfüllt werden müssen, wohingegen andere

z.B. Zeit zur Simulation und Optimierung benötigen. Aus diesen Anforderungen heraus wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinebaus“ das sogenannte **Operator-Controller-Modul (OCM)** nach NAUMANN weiterentwickelt [Nau00, S. 27ff.], [HOG04], [GRS14a, S. 10f.]. Bild 2-9 zeigt die drei Ebenen des OCM: *Controller*, *reflektorischer Operator* und *kognitiver Operator*.

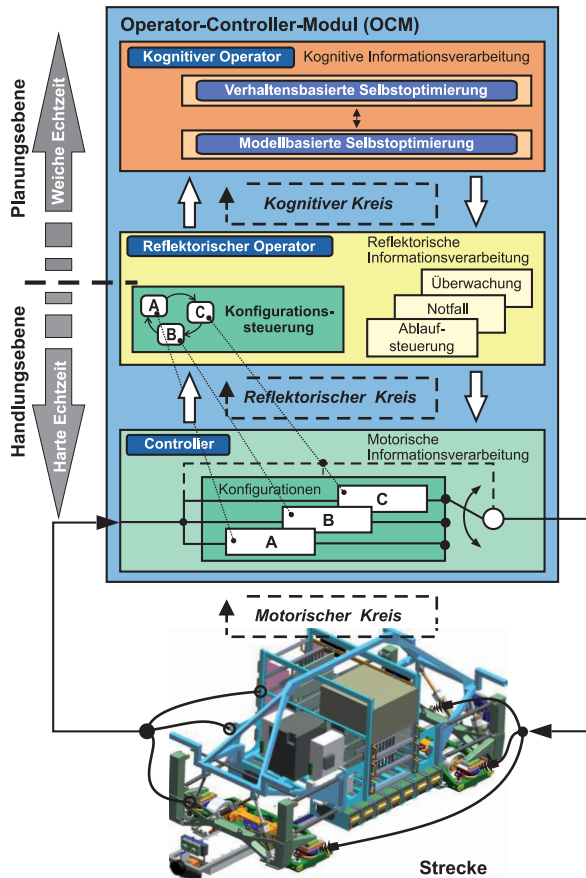


Bild 2-9: Struktur des OCM nach [HOG04, S. 2], [ADG+09, S. 14]

Auf unterster Ebene des OCM befindet sich der **Controller**. Er übernimmt die Aufgaben der klassischen Regelungstechnik. Hierzu existieren z.B. ein oder mehrere Regler, die über entsprechende Sensorik Informationen über das System selbst oder über die Umgebung erhalten und eine Berechnung der Stellgrößen für die Aktorik durchführen. Der Regelkreis des Controllers mit dem System, der Sensorik und Aktorik wird als motorischer Kreis bezeichnet. Charakteristisch für den Controller ist, dass Sensordaten und Stellgrößen in Echtzeit verarbeitet und erzeugt werden, um das gewünschte dynamische Verhalten des Systems zu realisieren [Krü14, S. 7f.], [HOG04], [ADG+09, S. 13ff.].

Der **reflektorische Operator** bildet die mittlere Ebene des OCM. Dieser beeinflusst die Aktorik des Systems indirekt, indem er Änderungen am Controller durchführt und diesen überwacht. Der reflektorische Operator initiiert Änderungen an den Parametern der Regler oder Strukturanpassungen. So können Umschaltvorgänge von Reglern durchgeführt oder Komponenten des Controllers entfernt oder hinzugefügt werden. Die Verbindung zwischen reflektorischem Operator und dem Controller wird auch als reflektorischer Kreis bezeichnet. Die möglichen Änderungen können aus Adaptionstrategien oder definierten Ablaufsteuerungen resultieren. Zudem können Sicherheits- oder Notfallroutinen hinterlegt werden. Da der Controller durch den reflektorischen Operator konfiguriert wird, muss dieser ebenfalls harten Echtzeitbedingungen genügen. Auf Basis von Schnittstellen zum kognitiven Operator (Lernen aus der Vergangenheit, Optimierung etc.) müssen nicht alle Funktionen Echtzeitanforderungen genügen [Krü14, S. 9f.], [HOG04] [ADG+09, S. 15].

Die oberste Ebene bildet der **kognitive Operator**. Im kognitiven Operator finden alle Methoden und Verfahren Einsatz, welche nicht den harten Echtzeitbedingungen des Systems genügen müssen. Diese sollen im Wesentlichen dazu beitragen, Wissen über das System selbst sowie seiner Umgebung aufzubauen und eine Verbesserung des Systemverhaltens zu realisieren. Die Methoden und Verfahren können in Ansätze zur modellbasierten und verhaltensbasierten Selbstoptimierung unterschieden werden. Beispielsweise können bei den modellbasierten Ansätzen auf Basis von physikalischen Modellen des Systems sowie der Umgebung, optimale Systemkonfigurationen berechnet werden, um das Systemverhalten zu verbessern. Bei verhaltensbasierten Verfahren, können auf Basis von Black-Box-Modellen Wirkzusammenhänge identifiziert und für die Verbesserung des Systems genutzt werden. Einsatz finden z.B. maschinelle Lernverfahren. Die Anpassung des Systemverhaltens erfolgt durch Zugriff auf den reflektorischen Operator (kognitiver Kreis) [HOG04], [Krü14, S. 9f.], [ADG+09, S. 15f.].

Fazit:

Der OCM zeigt eine vollständige Strukturierung von selbstoptimierenden Systemen auf. In diesem Zusammenhang werden Elemente aus der Erweiterung von Regelungen und adaptiven Regelung aufgegriffen. Für den Einsatz im Maschinen- und Anlagenbau weisen die Begriffe jedoch Potential auf, da sie eine ausführliche Erläuterung erfordern und nicht intuitiv sind.

2.3.3.3 Ansätze zur Realisierung der Selbstoptimierung

Zur Realisierung der Selbstoptimierung existieren zahlreiche Ansätze, die in den verschiedenen Aktionen im Selbstoptimierungsprozess eingesetzt werden können. Diese beinhalten z.B. ingenieurwissenschaftliche Ansätze der *fortgeschrittenen Regelungstechnik* zur Adaption des Systemverhaltens oder dem Auslegen von Adaptionalgorithmen, aber auch Ansätze aus den Bereichen *maschinellen Lernens* sowie *mathematische Optimie-*

zung. Darüber hinaus existieren Ansätze, welche die *Verlässlichkeit des selbstoptimierenden Systems* sicherstellen bzw. erhöhen [Son14]. Bild 2-10 zeigt eine Auswahl an Ansätzen, die zur Realisierung des Selbstoptimierungsprozess im mechatronischen System beitragen können [ADG+09, S. 123f.].

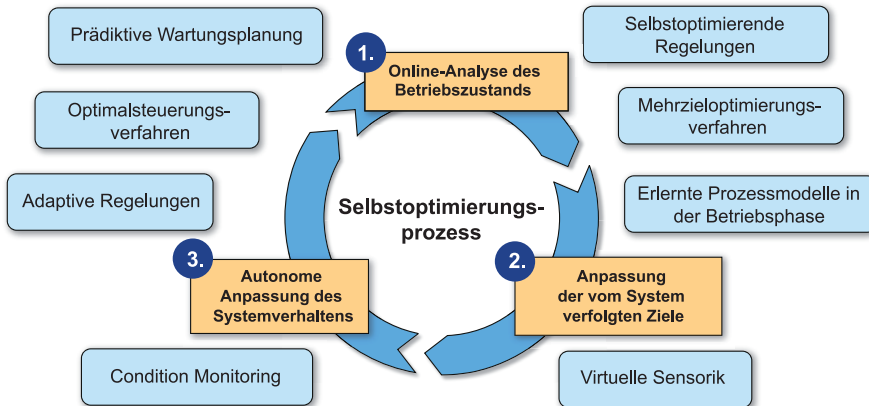


Bild 2-10: Der Selbstoptimierungsprozess sowie Lösungsansätze zur Unterstützung des Prozesses nach [GRS+14b, S. 3], [GIV+14, S. 56]

Online-Analyse des Betriebszustands: Im Rahmen der Online-Analyse werden der Systemzustand sowie die Umgebung analysiert (vgl. Abschnitt 2.3.3.1). Dies erfolgt auf Basis von Modellen, welche Wirkzusammenhänge beschreiben [Ise08, S. 47ff.]. Die Modelle ermöglichen die Identifikation von notwendigen Eingriffen in das System in den betrachteten Situationen.

Im Bereich der **quantitativen Modellbildung** kann zwischen der **theoretischen** und **experimentellen Modellbildung** unterschieden werden [Ise08, S. 47ff.]. In den klassischen Ingenieurwissenschaften wird in der Regel die Vorgehensweise zur theoretischen Modellbildung als vorteilhaft betrachtet [Ise08, S. 51]. Dennoch stellen maschinelle Lernverfahren einen geeigneten Ansatz dar, um bei komplexen und schwer beschreibbaren Systemen valide Modelle zu erhalten (*erlernte Prozessmodelle*) [MRB14, S. 2170]. Technische Prozesse, wie z.B. Umform- oder Knetprozesse, sind mitunter schwer oder unter Umständen nicht mit physikalischen Modellen abzubilden. So weiß z.B. ein Prozessexperte, dass bestimmte Einflussgrößen (wie die Temperatur) positiv oder aber auch negativ auf einen Prozess wirken. Warum diese Einflussgrößen aber den Prozess beeinflussen, ist meist nicht physikalisch beschreibbar. Dieser Umstand erschwert das Reproduzieren von Prozessergebnissen und die damit verbundene Automatisierung.

Lernverfahren erlauben es jedoch, den betrachteten Prozess ausschließlich anhand beobachteter Eingangs- und Ausgangsgrößen zu modellieren [Neu13, S. 1ff.]. **Maschinelle Lernverfahren** extrahieren dazu Regelmäßigkeiten aus den beobachteten Größen und repräsentieren diese Zusammenhänge in effizient ausführbaren, erlernten Modellen.

Durch den Einsatz von Lernverfahren eröffnen sich somit neue Perspektiven für die Automatisierung von komplexen technischen Prozessen, wie z.B. *virtuelle Sensoren* [USA+14, S. 2170ff.] oder Ansätze zur Zustandsvorhersage [GIV+14]. Auf Basis der Systemdaten können bspw. Schädigung von Systemkomponenten (*Condition Monitoring* [Mat13, S. 116f.]) erkannt und bei der Anpassung des Systemverhaltens berücksichtigt werden (z.B. im Rahmen einer *prädiktiven Wartungsplanung* [LKY14, S. 3f.]). Beispielsweise setzte ThyssenKrupp Elevator gemeinsam mit Microsoft eine neue Service-Lösung um, die auf diesem Prinzip beruht. In die Aufzüge wurden Sensoren integriert, die verschiedene Daten aufgenommen haben, wie z.B. Temperatur des Antriebsmotors oder Kabinengeschwindigkeit und mit Wartungen bzw. Störungen der Aufzüge korreliert. Resultierend entstand ein Modell, welches ThyssenKrupp Elevator nun nutzen kann, um präventiven Service anzubieten und somit Ausfallzeiten zu minimieren und die Kundenzufriedenheit zu erhöhen [Rid14-ol].

Anpassung der vom System verfolgten Ziele: Auf Basis der Online-Analyse erfolgt die Anpassung der Systemziele (vgl. Abschnitt 2.3.3.1). Ziele im Sinne der Selbstoptimierung sind z.B. „minimiere Energieverbrauch“ oder „maximiere Leistungsfähigkeit“. In Abhängigkeit der Situation werden die Ziele priorisiert und das Verhalten entsprechend angepasst. Die Zielauswahl kann durch Verfahren aus dem Bereich der mathematischen Optimierung unterstützt werden [IDG15, S. 186]. Hierzu zählen u.a. *Mehrzieloptimierungs-* sowie *Optimalsteuerungsverfahren*. Mehrzieloptimierungsverfahren ermöglichen die Optimierung mehrerer Zielfunktionen. Die Zielfunktionen werden mathematisch beschrieben [ADG+09, S. 125ff.]. Bei dieser Optimierung wird die sogenannte Paretomenge approximiert, die aus den optimalen Kompromissen zwischen konkurrierenden Zielfunktionen besteht. In diesem Zusammenhang bestehen zahlreiche Möglichkeiten die Paretomenge zu berechnen, wie z.B. durch Optimierung gewichteter Summen (ein Überblick ist in [Mie98, S. 78ff.] gegeben), mittels Beschränkungsmethoden [Ehr05, S. 97ff.], Unterteilungsverfahren (z.B. [DSH05, S. 113ff.]) oder Pfadverfolgungstechniken (z.B. [Hil01, S. 87ff.]). Aufgabe der optimalen Steuerung ist es, einen Prozess bezüglich einer Zielgröße zu optimieren, wobei das durch Modelle beschriebene dynamische Verhalten des technischen Systems zu berücksichtigen ist. Beispielsweise sind Fahrwege eines Roboterarms so zu gestalten, dass sie möglichst energieeffizient abgefahren werden, wenn gleich gewisse Nebenbedingungen erfüllt werden müssen [LOM+10, S. 1f.]. Voraussetzungen für den Einsatz von mathematischen Optimierungsverfahren sind simulationsfähige Modelle [ADG+09, S. 123f.].

Autonome Anpassung des Systemverhaltens: Die neue Situation sowie die damit verbundene Zielanpassung- bzw. Optimierung erfordert eine Anpassung des Systemverhaltens (vgl. Abschnitt 2.3.3.1). Dies kann durch eine **Parameteranpassung** erfolgen, wenn z.B. Reglerparameter im Betrieb verändert werden. Es können aber auch Parameter im zugrundeliegenden Modell des Systems selbst verändert werden, wenn beispielsweise Identifikationsverfahren (bei *adaptiven Regelungen* eingesetzt) aktuellere Parameterwerte bestimmen [Krü14, S. 5]. Neben Parameteranpassungen kann zudem auch die

Struktur des Systems angepasst werden. Dies erfolgt, wenn zwischen verschiedenen Reglern im System umgeschaltet wird. Ein Beispiel hierfür ist die Umschaltung von Abstands- auf Geschwindigkeitsregler in Fahrzeugen [Krü14, S. 5]. Eine Form der Strukturanpassung stellt auch die **Rekonfiguration** dar. Falls z.B. ein Sensor- oder Aktorausfall vorliegt, kann das Einfügen eines Rekonfigurationsblocks in der Regelungsstruktur ein zufriedenstellendes Systemverhalten realisieren [ADG+09, S. 6f.], [Krü14, S. 6]. Hierdurch kann insbesondere bei kritischen Systemen die Verlässlichkeit gesteigert werden [LKT12, S. 1f.]. Die Umsetzung des vollständigen Selbstoptimierungsprozesses ermöglicht *selbstoptimierende Regelungen* [KGI+13].

Fazit:

Die Ansätze zur Realisierung der Selbstoptimierung (z.B. Condition Monitoring, Adaptive Regelungen, Mehrzieloptimierung) lassen sich auch unabhängig vom Selbstoptimierungsprozess einsetzen. Vor diesem Hintergrund können diese individuell eingesetzt werden, um eine Leistungssteigerung von bestehenden Systemen zu erreichen, wenngleich gewisse Abhängigkeiten bestehen. Diese werden jedoch nicht mit dem Selbstoptimierungsprozess dargestellt. Zudem zeigt die Architektur der Informationsverarbeitung (OCM) die konkreten Zusammenhänge und Abhängigkeiten nicht ausreichend auf. Zusammenfassend existieren im Bereich der Selbstoptimierung zahlreiche Lösungsmöglichkeiten, um die Maschinen und Anlagen intelligenter zu realisieren. Dies resultiert jedoch in unüberschaubaren Handlungsoptionen für die Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus.

2.3.3.4 Selbstoptimierung in der Anwendung

Im Rahmen dieses Abschnittes werden Beispiele für selbstoptimierende Systeme aus dem Sonderforschungsbereich (SFB) 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ sowie aus dem Spitzencluster it's OWL vorgestellt. Die Methoden und Verfahren zur Entwicklung selbstoptimierender Systeme wurden im SFB 614 an forschungsseitigen **Demonstratoren** erprobt. Bild 2-11 zeigt eine Auswahl der betrachteten Demonstratoren. Im Folgenden werden das Schienenfahrzeug RailCab sowie das X-by-Wire Versuchsfahrzeug Chamäleon kurz vorgestellt.

Ein Demonstrator des SFB 614 war das System **Railcab** der Neuen Bahntechnik Paderborn⁹. Ein Railcab ist ein schienengebundenes Verkehrssystem, das als umfassende Versuchsanlage im Maßstab 1:2,5 realisiert ist. Kern des Systems bilden autonome Fahrzeuge (RailCabs) für den Personen- und Gütertransport. Besonders ist, dass diese nach Bedarf und nicht nach Fahrplan fahren. Sie handeln proaktiv; beispielsweise bilden sie Konvois, um den Energiebedarf zu verringern [ADG+09, S. 29]. Ein RailCab umfasst mehrere selbstoptimierende Funktionsmodule, wie z.B. das Antriebsmodul des Fahrzeugs, ein

⁹ Website des Projekts „Neue Bahntechnik Paderborn/RailCab“ der Universität Paderborn: <http://nbp-www.upb.de>.

hybrides Energieversorgungsmodul (bestehend aus Doppelschichtkondensator (DLC) und Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH)) und ein Energiemanagement [ADG+09, S. 3]. Die Module sowie das gesamte System verfolgen im Betrieb verschiedene Ziele, die auch im Konflikt zueinander stehen. Diese werden in Abhängigkeit der Betriebssituation priorisiert. Beispielsweise kann das Energieversorgungsmodul des RailCabs zwischen den Zielen „max. Ladegrad des DLC“ und „max. Energieeffizienz“ priorisieren. Durch das Ziel „max. Energieeffizienz“ wird eine möglichst häufige Nutzung des DLC angestrebt. Hierdurch werden die Energieverluste minimiert, da beim Laden und Entladen des DLC aufgrund des geringen Innenwiderstandes wesentlich weniger Verluste auftreten, als durch die Nutzung der NiMH-Batterie [Rom13, S. 21ff.]. Durch das Ziel „max. Leistungsreserve“ wird der DLC, in den dafür vorgesehenen Situationen, auf einem bestimmten Ladegrad gehalten, mit dem der energetische Bedarf der meisten unerwarteten Leistungsspitzen abgedeckt werden kann [GID+13, S. 215f.].

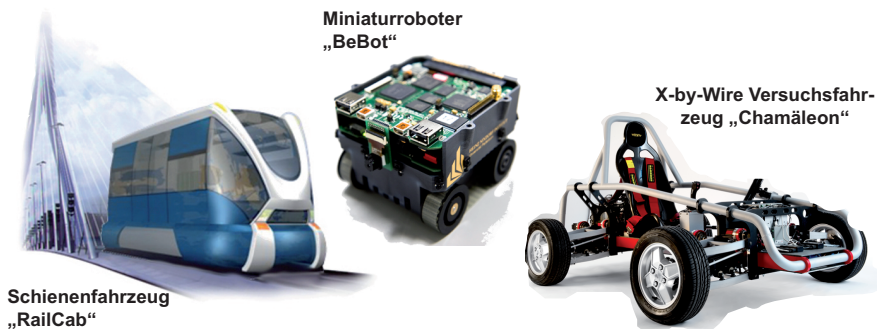


Bild 2-11: Beispiele für selbstoptimierende Systeme (Quelle: SFB 614)

Ein weiterer Demonstrator für die Selbstoptimierung ist das X-by-Wire-Versuchsfahrzeug **Chamäleon**. Es ist ein vollaktives mechatronisches Versuchsfahrzeug, das ausschließlich elektrisch aktuiert wird. Es wird by-Wire gesteuert¹⁰. Eine vollständig elektrische Lenkung bietet z.B. die Möglichkeit einer situationsspezifischen variablen Lenkübersetzung [KGB+10, S. 160]. In den Arbeiten zur Selbstoptimierung wurde eine Mehrzieloptimierung zur Bestimmung optimaler Bremskraftverteilungen durchgeführt. Zudem wurden auch Ansätze zur Rekonfiguration der Fahrwerksaktuatorik betrachtet, um z.B. Aktorausfälle zu kompensieren [RT14, S. 56ff.], [LKT12].

Im Rahmen des SFB 614 wurden die Demonstratoren in der Regel eingesetzt, um den ganzen Prozess der Selbstoptimierung zu realisieren. Im Spitzencluster it's OWL wurde das Potential erkannt, die **Lösungen aus dem Bereich der Selbstoptimierung** unabhängig vom vollständigen Selbstoptimierungsprozess einzusetzen. Dies erfolgt am Beispiel

¹⁰ X-by-Wire Systeme verzichten auf eine mechanische Kopplung zwischen Bedienelement und Wirkeinheit [RT14].

eines intelligenten Teigkneters auf Basis von maschinellen Lernverfahren, die eine Online-Analyse des Betriebszustandes unterstützen sollen. Maschinelle Lernverfahren ermöglichen die effiziente Abbildung von Wirkzusammenhängen in komplexen technischen Prozessen [USA+14, S. 1ff.]. Im Selbstoptimierungsprozess sind somit maschinelle Lernverfahren besonders für die Online-Analyse des Betriebszustands relevant.

Im Innovationsprojekt „**Intelligenter und optimierter Teigknetter**“ des Spitzenclusters it's OWL ist die sensorische Erkennung des Teigzustands ein wichtiger Erfolgsfaktor für eine Automatisierung des Knetprozesses. Diese Erkennung kann sowohl mit Hilfe der theoretischen Modellbildung erfolgen, oder aber auch auf Basis von experimentellen Ansätzen, wie z.B. durch den Einsatz maschineller Lernverfahren. In dem durch die Firma WP KEMPER geleiteten Projekt, wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kognition und Robotik der Universität Bielefeld eine solche Teigphasenerkennung maschinell gelernt. Basierend auf der Teigtemperatur, dem Motormoment des Knetbackens sowie des Motordrehmoments des Teigbottichs bestimmt ein maschinell trainierter Klassifikator die aktuelle Knetphase, so dass der Knetprozess automatisch nach Erreichen der gewünschten Teigqualität vom System selbst beendet werden kann [GIV+14, S. 56f.]. Bild 2-12 visualisiert die Klassifikation der Zustände am Teigknetter.

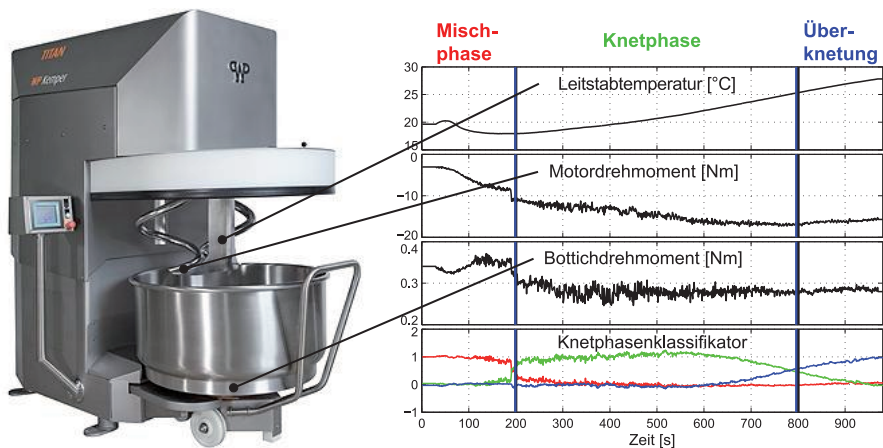


Bild 2-12: Klassifikation von Zuständen des Teigkneters mit Hilfe von maschinellen Lernverfahren (Quelle: Kemper) nach [GIV+14]

Darüber hinaus existieren **weitere Beispiele** für den Einsatz ausgewählter Ansätze der Selbstoptimierung in technischen Systemen. Hierzu zählen u.a. folgende Anwendungsbeispiele: Kupferbondmaschinen (Maschinelles Lernen zur Modellierung des Systemverhaltens) [USA+14], elektrisch angetriebene Fahrzeuge (Mathematische Optimierung für eine optimale Gaspedalstellung) [DEF+14], Fräsmaschine (Zustandsüberwachung des Werkzeugs einer Fräsmaschine) [MKS15] oder Fertigungen (Maschinelles Lernen zum Entwurf eines Expertensystems) [IRD+15].

Fazit:

Die Beispiele zeigen die Potentiale, welche sich durch die Umsetzung der Selbstoptimierung sowie den Ansätzen der Selbstoptimierung ergeben. Die entsprechenden Nutzenpotentiale für einzelne Ansätze im Kontext der Selbstoptimierung sollten vor diesem Hintergrund ausgearbeitet werden, um eine bedarfsgerechte Auswahl dieser zu unterstützen.

2.4 Produktentstehung

Zum besseren Verständnis der vorliegenden Arbeit ist die Beschreibung der Aufgaben im Bereich der Strategischen Produktplanung und Produktentwicklung von besonderer Bedeutung. Vor diesem Hintergrund wird im Abschnitt 2.4.1 zunächst das Referenzmodell der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen nach GAUSEMEIER erläutert, das u.a. die Wechselwirkung der beiden Bereiche beschreibt. Für die detaillierte Betrachtung der Potential- und Produktfindung wird in Abschnitt 2.4.2 der Innovationsprozess nach IHMELS vorgestellt. Anschließend wird in Abschnitt 2.4.3 das Vorgehen im Rahmen der Produktentwicklung analysiert.

2.4.1 Referenzmodell der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen

Das **Referenzmodell** der Strategischen Planung und Entwicklung von Marktleistungen nach GAUSEMEIER erstreckt sich von der Produkt- bzw. Geschäftsidee bis zum Serienanlauf. Es umfasst die Aufgabenbereiche Strategische Produktplanung, Produktentwicklung, Dienstleistungsentwicklung und Produktionssystementwicklung. Das Referenzmodell wird nicht als stringente Folge von Phasen und Meilensteinen verstanden. Vielmehr handelt es sich hierbei um ein Wechselspiel von Aufgaben, die sich in vier Zyklen gliedern lassen [GAD+14, S. 13f.], [GP14, S. 25ff.]. Das Referenzmodell ist in Bild 2-13 visualisiert (wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die vollständige Darstellung der drei Entwicklungszyklen verzichtet wird).

Die **Strategische Produktplanung** bildet den ersten Zyklus. Ihr Ziel ist eine aus unternehmerischer und technischer Sicht Erfolg versprechende Produktkonzeption, welche auch als Prinziplösung verstanden werden kann [GBK10, S. 345]. Der erste Zyklus deckt die Aufgabenbereiche Potentialfindung, Produktfindung, Geschäftsplanung und Produktkonzipierung ab. Die Produktkonzipierung bildet die Schnittstelle zwischen dem ersten und dem zweiten Zyklus – der Produktentwicklung [GP14, S. 25f.].

Im Zyklus der **Produktentwicklung** erfolgen neben der Produktkonzipierung, der fachdisziplinspezifische Entwurf sowie die entsprechende Ausarbeitung und die Integration der Ergebnisse zu einer verifizierten Gesamtlösung. Die Produktentwicklung erfolgt durch die verschiedenen Fachdisziplinen der Mechatronik, wie z.B. Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik [GP14, S. 25f.].

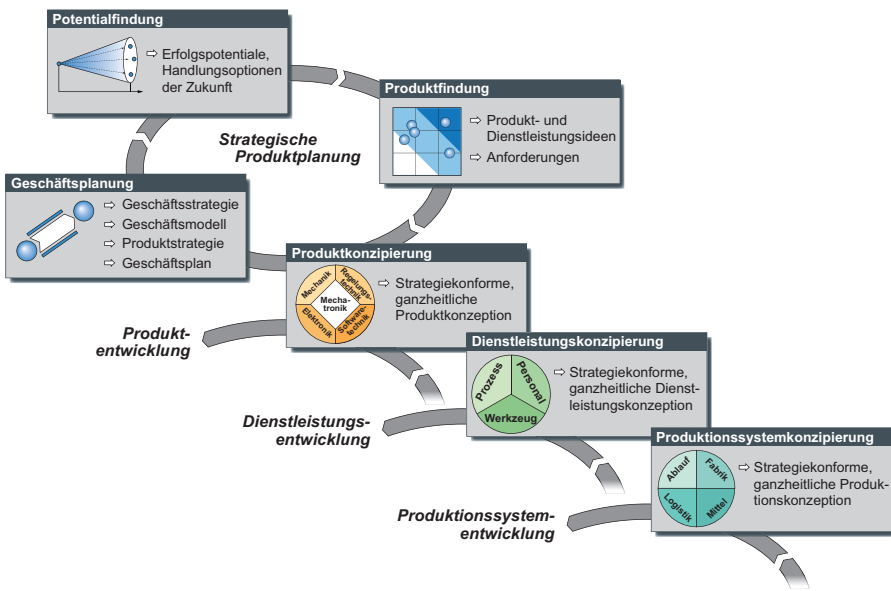


Bild 2-13: Referenzmodell der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen nach [GAD+14, S. 15]

Ziel der **Dienstleistungsentwicklung** ist eine Marktleistung, die auf Basis der Dienstleistungsidee erarbeitet wird [BS06], [GAD+14, S. 13ff.]. Im Rahmen der Dienstleistungsentwicklung werden die Aufgaben Dienstleistungskonzipierung, Dienstleistungsplanung und Dienstleistungsintegration im Wechselspiel erarbeitet [GAD+14, S. 13ff.].

Ausgangspunkt des dritten Zyklus – der **Produktionssystementwicklung** – ist die Konzeption des Produktionssystems. Die Produktionssystementwicklung behandelt und integriert die Fachdisziplinen Arbeitsablaufplanung, Arbeitsstättenplanung sowie die Materialfluss- und Arbeitsmittelplanung. Zudem besteht ein Wechselspiel zwischen der Arbeitsplanung und der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase der Produktentwicklung, um frühzeitige Entscheidungen z.B. über neue Technologien ganzheitlich zu treffen [GP14, S. 26].

Fazit:

Das Referenzmodell zeigt die verschiedenen Aufgabenbereiche der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen auf. Für die Entwicklung einer Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme sind insb. die Aufgabenbereiche der Potentialfindung, der Produktfindung und Produktkonzipierung von Relevanz. Vor diesem Hintergrund werden in den nachfolgenden Abschnitten diese Bereiche näher vorgestellt.

2.4.2 Strategische Produktplanung im Innovationsprozess

Der **Innovationsprozess** beschreibt, welche Aktivitäten die Definition von Erfolg versprechenden Produktideen unterstützen [Ihm10, S. 6]. Grundsätzlich kann der Innovationsprozess für zwei verschiedene Stoßrichtungen des Innovationsmanagements definiert werden: Technology Push (technologie-induziert) sowie Market Pull (nachfrage-induziert) [Ger05, S. 51], [VB13, S. 63]. Für die zu erarbeitenden Systematik sind die Aktivitäten aus dem Bereich des Market Pull von besonderer Relevanz, da diese den Anstoß zur Modifikation des bestehenden Systems aus Kundensicht adressieren.

Bild 2-14 visualisiert den **generischen Innovationsprozess** für nachfrageinduzierte Innovationen nach IHMELS (Market Pull) [Ihm10, S. 82ff.]. Aus Sicht der Strategischen Produktplanung umfasst dieser Innovationsprozess die Phasen Potentialfindung, Ideenfindung sowie Konzipierung. Der Entwicklungsauftrag bildet das Bindeglied zwischen den Phasen im Innovationsprozess: der Strategischen Produktplanung und der Entwicklung. Im Folgenden werden die Phasen der Strategischen Produktplanung beschrieben.

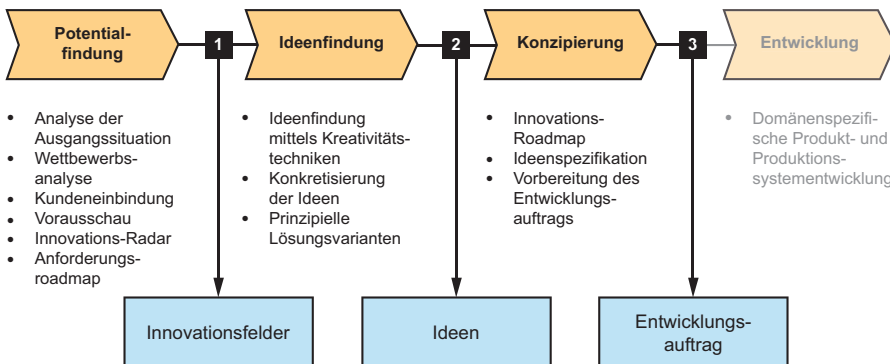


Bild 2-14: Nachfrageinduzierter Innovationsprozess mit Fokus auf die Phasen der Strategischen Produktplanung nach IHMELS [Ihm10, S. 82]

Potentialfindung: Im Rahmen der Potentialfindung werden Chancen für neue Innovationen erkannt. Es werden u.a. Marktentwicklungen, Wettbewerber, das Geschäftsumfeld sowie Kunden analysiert, um Innovationsfelder zu definieren. Zudem wird z.B. auch die Szenario-Technik eingesetzt, um einen detaillierten Überblick über mögliche Entwicklungen des Umfeldes oder des Marktes zu erhalten [Ihm10, S. 83ff.].

Ideenfindung: In der Ideenfindung werden basierend aus den Ergebnissen der Potentialfindung Ideen für zukünftige Produkte bzw. Produktgenerationen entwickelt. Hierbei werden insbesondere auch Kreativitätstechniken eingesetzt, um z.B. zu den identifizierten Kundenbedürfnissen entsprechende Lösungsmöglichkeiten zu definieren [Ihm10, S. 83]. Die Ideenfindung kann auf zwei Arten erfolgen, unterstützt durch das intuitive Denken (z.B. Brainstorming) sowie durch das diskursive Denken (z.B. morphologischer Kasten und Konstruktionskataloge) [GEK01, S. 122ff.], [FG13, S. 311]. Darüber hinaus

existieren auch Methodensammlungen, die beide Denkart adressieren (z.B. laterales Denken, TRIZ – Theorie des erfinderischen Problemlösens) [GEK01, S. 123].

Konzipierung: Die Konzipierung hat im Innovationsprozess nach IHMELS den Entwicklungsauftrag als Ziel. Hierbei wird u.a. auch der Zeitpunkt der Produkteinführung unter Berücksichtigung der vorliegenden Markt- und Wettbewerbssituation bestimmt. Darüber hinaus wird analysiert, welche Technologien zum Einsatz kommen, um die Produktidee zu realisieren. Um den Entwicklungsauftrag zu beschreiben, werden zudem auch die notwendigen Entwicklungsressourcen und Innovationsaufwendungen ermittelt. Dies bildet die Basis, um die Entwicklung des Produkts zu beginnen [Ihm10, S. 83].

Fazit:

Der nachfrageinduzierte Innovationsprozess nach IHMELS beschreibt die Aktivitäten der Strategischen Produktplanung ausführlich. Vor dem Hintergrund der vorliegenden Arbeit sind die Aktivitäten in der Produktfindung von hoher Relevanz, um Erfolg versprechende Ideen zu identifizieren. Der aus Kundensicht resultierende Bedarf zur Modifikation soll im Rahmen der Systematik insbesondere durch Ansätze aus dem Bereich der Selbstoptimierung adressiert werden (im erweiterten Sinne eines „Science Push“ [Gaul1, S. 20]). Hierdurch soll eine Steigerung der Intelligenz des mechatronischen Systems unterstützt werden.

2.4.3 Produktentwicklung

Im Anschluss an die Aktivitäten der Strategischen Produktplanung folgt die Produktentwicklung. Für ein besseres Verständnis der Tätigkeiten in der Produktentwicklung wird in Abschnitt 2.4.3.1 zunächst die Produktentwicklung mechatronischer Systeme vorgestellt. Da an der Entwicklung selbstoptimierender Systeme zudem weitere Disziplinen beteiligt sind, wird in Abschnitt 2.4.3.2 die Entwicklung dieser Systeme erläutert.

2.4.3.1 Entwicklung mechatronischer Systeme

Erzeugnisse des Maschinenbaus und verwandter Branchen waren lange Zeit durch eine Mechanik-zentrierte Entwicklung geprägt. Dies hat sich in den letzten Jahren durch die verstärkte Integration von elektronischen und softwaretechnischen Komponenten gewandelt [Her07, S. 26]. Heutige maschinenbauliche Systeme sind in der Regel **mechatronische Systeme**. Ihre Entwicklung beruht auf dem Zusammenwirken der Fachdisziplinen Mechanik, Elektrotechnik und Informationstechnik [VDI2206, S. 2].

Für die Entwicklung derartiger Systeme schlägt die VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ das sog. V-Modell vor. Dieses umfasst u.a. einen interdisziplinären Entwurf des System, um ein gemeinsames Verständnis über das zu entwickelnde System zu erhalten sowie eine begleitete Modellbildung und -analyse [VDI2206, S. 29f.]. Das V-Modell der VDI 2206 ist im Bild 2-15 dargestellt.

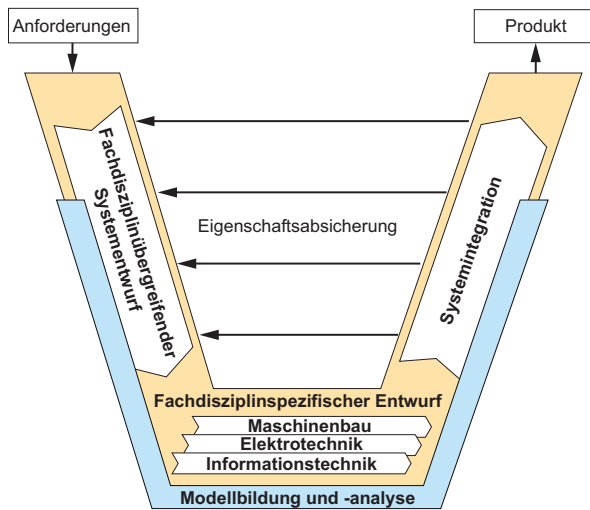


Bild 2-15: V-Modell der VDI-2206 [GTS14, S. 11] nach [VDI2206, S. 29]

Ausgangspunkt der Entwicklung mechatronischer Systeme bilden **Anforderungen**, [VDI2206, S. 29], welche in der Strategischen Produktplanung definiert werden und in Form eines Entwicklungsauftrages vorliegen. Der Entwicklungsauftrag beinhaltet das für die Entwickler relevante Wissen und umfasst marktorientierte Produktspezifikationen [WDG15, S. 252f.] [GP14, S. 16]. Die Anforderungen dienen in den späteren Phasen als Maßstab, anhand dessen das System zu bewerten ist [VDI2206, S. 29].

Die erste Phase der Entwicklung gemäß der VDI 2206 bildet der **fachdisziplinübergreifende Systementwurf**. Ziel ist die Festlegung eines fachdisziplinübergreifenden Konzepts, welches die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Systems beschreibt. Hierzu wird die zu realisierende Gesamtfunktion eines Systems in Teilfunktionen zerlegt. Diesen Teilfunktionen werden geeignete Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente zugeordnet [VDI2206, S. 29f.], [GTS14, S. 11]. Zudem können bereits erste Analysen durchgeführt werden [GCD15, S. 38f.].

Nach der disziplinübergreifenden Spezifikation eines Lösungskonzepts, erfolgt der **fachdisziplinspezifische Entwurf**. Die weitere Konkretisierung des Lösungskonzepts erfolgt meist getrennt voneinander in den beteiligten Fachdisziplinen sowie mit den entsprechenden fachdisziplinspezifischen Entwicklungsmethodiken¹¹ [VDI2206, S. 29].

¹¹ Zur Vertiefung wird auf folgende Literatur verwiesen: Maschinenbau auf die VDI 2221 [VDI2221] und die Konstruktionslehre nach PAHL/BEITZ [FG13]; Elektrotechnik auf die VDI/VDE 2422 [VDI2422], das Y-Diagramm nach GAJSKI/KUHN [GK83] oder die Layoutsynthese nach LIENIG [Lie06]; Softwaretechnik auf den Rational Unified Process [Kru04], das V-Modell XT [HH08] oder der UML (Unified Modeling Language) [Kle13]. Einen Überblick liefern auch GAUSEMEIER ET AL., BENDER sowie EIGNER ET AL. [GEK01], [Ben05], [ERZ14].

Die Entwicklung mechatronischer Systeme schließt mit der **Systemintegration**. Bei der Systemintegration werden die Ergebnisse aus den einzelnen Fachdisziplinen sukzessiv zu einem Gesamtsystem integriert. Hierdurch können disziplinintegrierende Simulationen durchgeführt werden [GCD15, S. 38ff.], [VDI2206, S. 30].

Zudem kann das System auch auf Basis von realen Prototypen analysiert werden. Ergebnis der Phase ist ein **Produkt** in entsprechender Reife, wie z.B. Labormuster, Funktionsmuster, Serienprodukt [GTS14, S. 11].

Begleitet wird die Entwicklung durch Maßnahmen zur **Eigenschaftsabsicherung**. Der Entwurfsfortschritt wird fortlaufend anhand des spezifizierten Konzepts und der Anforderungen überprüft werden. Es ist sicherzustellen, dass realisierte und geforderte Systemeigenschaften übereinstimmen [VDI2206, S. 30].

Die genannten Phasen werden begleitet durch Tätigkeiten der **Modellbildung und -analyse**. Durch die modellbasierte Beschreibung des Systems sowie entsprechenden Analysen kann ein tiefergehendes Systemverständnis erzielt werden, um das Erreichen der geforderten Anforderungen frühzeitig sicherzustellen [VDI2206, S. 30]. Eine tiefergehende Analyse der Bedeutung von Modellen im Rahmen der Entwicklung mechatronischer Systeme ist im Anhang zu finden (vgl. Anhang A1.1).

Neben dem V-Modell der VDI 2206 existieren noch zahlreiche weitere Vorgehensmodelle im Bereich der Mechatronik, wie z.B. das W-Modell nach NATTERMANN und ANDERL [NA10] oder das 3-Ebenen-Vorgehensmodell nach BENDER [Ben05].

Fazit:

An der Entwicklung von mechatronischen Systemen sind mehrere Disziplinen mit ihren eigenen Sichtweisen beteiligt. Vor diesem Hintergrund gilt es, frühzeitig ein einheitliches Systemverständnis im Sinne einer disziplinübergreifenden Systembeschreibung zu schaffen. Um die Sichtweisen der verschiedenen Disziplinen und ihre Expertise auch bei der Weiterentwicklung bestehender Systeme zu nutzen, kann diese Systembeschreibung zudem bereits in der Potential- und Produktfindung nächster Systemgenerationen als Basis genutzt werden.

2.4.3.2 Entwicklung selbstoptimierender Systeme

Die Entwicklung von selbstoptimierenden Systemen bedarf einer geeigneten Entwicklungsmethodik, welche insb. die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Fachdisziplinen der Mechatronik (Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik, Softwaretechnik) aber auch den Experten aus den Bereichen der mathematischen Optimierung und der künstliche Intelligenz adressiert [DGI+14, S. 4f.]. Im Rahmen des SFB 614 wurde ein interdisziplinärer Ansatz zur Entwicklung dieser Systeme entwickelt. Das Vorgehen gliedert sich, wie in Bild 2-16 gezeigt, grundsätzlich in die Phasen disziplinübergreifende Konzipierung und disziplinspezifischer Entwurf und Ausarbeitung [GFD+09, S. 201ff.] [GV14b, S. 25ff.], [GV14a, S. 66f.].

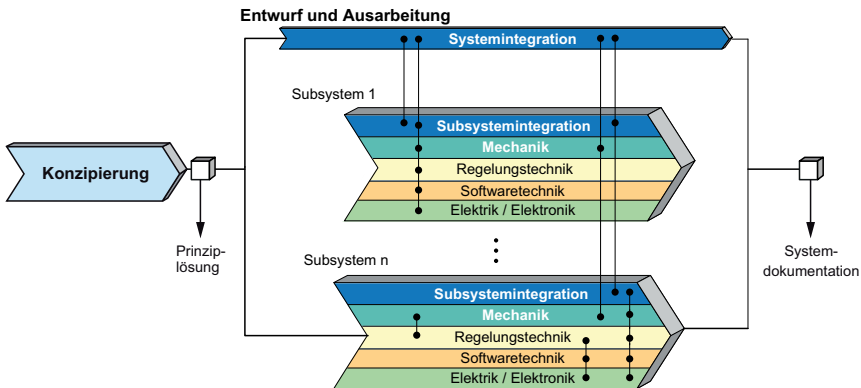


Bild 2-16: Vorgehen bei der Entwicklung selbstoptimierender Systeme nach [GFD+09, S. 266], [GV14a, S. 67]

Das **Vorgehen zur Entwicklung selbstoptimierender Systeme** ist vergleichbar mit dem V-Modell der VDI-Richtlinie 2206. Die Phase Entwurf und Ausarbeitung umfasst im Gegensatz zur VDI 2206 sowohl den fachdisziplinspezifischen Entwurf als auch die Systemintegration. Hierdurch werden fachdisziplinspezifische Ergebnisse so früh wie möglich zu Systemkomponenten sowie zum Gesamtsystem integriert und disziplinintegrierende Simulationen zum Funktionsnachweis durchgeführt. Zudem werden Prozessschritte zum Entwurf der Optimierung des Systems (im Sinne der Selbstoptimierung) oder von Lernstrategien für die Betriebsphase im Rahmen der System- oder Subsystemintegration durchgeführt [GV14a, S. 67ff.].

In der **Konzipierung** erarbeiten die beteiligten Akteure der Fachdisziplinen Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungs- und Softwaretechnik gemeinsam mit den Experten der mathematischen Optimierung sowie der künstlichen Intelligenz die Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Diese legt den grundsätzlichen Aufbau sowie die Wirkungsweise des Systems fest. In diesem Zusammenhang kommen insb. auch neue Ansätze zur Entwicklung selbstoptimierender Systeme zum Einsatz, wie z.B. Vorgehensweisen zur Entwicklung eines Zielsystems (im Sinne von Zielen der Selbstoptimierung) sowie zur Integration kognitiver Funktionen. Ferner können erste Analysen auf Basis der Prinziplösung des Systems durchgeführt werden (z.B. zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit [Vaß15] und zur Absicherung der Verlässlichkeit [Dor15]) [GV14c, S. 69ff.].

Die Entwicklung in **Entwurf und Ausarbeitung** erfolgt parallel in den einzelnen Subsystemen, in dem die involvierten Fachdisziplinen die sie betreffenden Aspekte ausarbeiten. Hierbei werden fachdisziplinspezifischen Methoden, Werkzeuge und Beschreibungssprachen genutzt. Die Phase Entwurf und Ausarbeitung ist durch einen hohen Abstimmungs- und Koordinationsaufwand geprägt. Die Ergebnisse werden kontinuierlich im Rahmen der Subsystem-Integration sowie der System-Integration integriert und synchronisiert. Hierzu werden Modelltransformation, Synchronisationstechniken sowie virtuelle

Prototypen eingesetzt. Zudem werden Experten der mathematischen Optimierung sowie der künstlichen Intelligenz maßgeblich involviert, da hier die Umsetzung der Selbstoptimierung erfolgt. Das Ergebnis sind die Fertigungsunterlagen für das zu entwickelnde selbstoptimierende System. Der Entwicklungsprozess für eine konkrete Entwicklungsaufgabe ist auf Basis des Referenzprozesses auszuprägen. Eine detaillierte Darstellung des Referenzprozesses erfolgt in GAUSEMEIER ET AL. [GV14a, S. 66ff.].

Für die Entwicklung von mechatronischen, selbstoptimierenden Systemen sind **Modelle** essentiell. Die Modelle repräsentieren Aspekte des technischen Systems zweckorientiert und können somit ein Abbild des technischen Systems oder auch Vorbild für ein zu entwickelndes technisches System sein [HGP06, S. 21], [Sta73, S. 128ff.], [ERZ14, S. 80]. Vor diesem Hintergrund ist im Anhang (vgl. Anhang A1.1) eine Analyse der Bedeutung von Modellen beigefügt. Aus der Analyse folgt der Bedarf insbesondere interdisziplinäre Modelle zur Systemspezifikation und frühzeitigen Analyse bereits in den frühen Phasen der Produktentstehung zu nutzen, um Potentiale zur Weiterentwicklung zu identifizieren und auch die Möglichkeiten zur Einbindung des Kunden wahrzunehmen.

Fazit:

Die Entwicklung selbstoptimierender Systeme adressiert neben den Fachdisziplinen der Mechatronik explizit eine Beteiligung der mathematische Optimierung sowie des maschinellen Lernens. Die Motivation zur Integration der Selbstoptimierung resultiert aus konkurrierenden Zielen des Systems (z.B. maximiere Leistungsfähigkeit und minimiere Energieverbrauch), die auf Basis der bestehenden Ansätze nicht im Betrieb optimal gelöst werden können [GV14c, S. 70ff.]. Eine Analyse hinsichtlich einer stufenweisen Leistungssteigerung hin zur Selbstoptimierung erfolgt nicht. Ebenso ist eine Berücksichtigung des Kunden im gesamten Prozess nicht vorgesehen. Darüber hinaus gilt es insbesondere interdisziplinäre Modelle bereits in den frühen Phasen der Produktentstehung zu nutzen, um Potentiale zur Weiterentwicklung zu identifizieren.

2.5 Kundeneinbindung in der Produktentstehung

Die Erfüllung von Kundenanforderungen ist von zentraler Bedeutung, um am Markt erfolgreich zu sein und somit Innovationen hervorzubringen (**Fit-to-Market** [KPS15, S. 19]). Die Möglichkeiten eigene Innovationen hervorzubringen sind bei vielen Unternehmen jedoch begrenzt [DBJ06, S. 69], [Jan12, S. 34]. Dies gilt z.B. in Bezug auf verfügbare Zeiten der Mitarbeiter im Unternehmen für Projekte im Bereich der Forschung und Entwicklung (FuE), verfügbare finanzielle Mittel (z.B. für Erhalt und Ausbau von FuE-Vorhaben) aber insbesondere auch bzgl. des unternehmensinternen Potentials zu Problem- sowie Lösungs Ideen für zukünftige Innovationen [Jan12, S. 34f.].

Ein Lösungsansatz um dieser Herausforderung zu begegnen, liegt in einer verstärkten **Kundeneinbindung** im Rahmen der Produktentstehung. Unter Kundeneinbindung können alle Aktivitäten verstanden werden, welche die Produktentstehung durch Wissen über Kunden, von Kunden oder durch andere direkte Kundenbeiträge in der Produktentstehung

beeinflussen [Wec05, S. 35]. In Abhängigkeit der Aktivität der eingebundenen Kunden können drei **Grundtypen** der Kundeneinbindung unterschieden werden: Kundenbeobachtung, Kundenbeteiligung und Kundenintegration [Wec05, S. 35ff.].

Die **Kundenbeobachtung** weist die geringste Einbindung bzw. Aktivität des Kunden auf. Die Kundenbeobachtung verfolgt das Ziel, ein besseres Verständnis über den Kunden sowie seiner Bedürfnisse zu erhalten. Der Kunde hat in diesem Zusammenhang eine passive Rolle. Hierdurch ist es erforderlich, aus den Beobachtungen Informationen abzuleiten. Diese können jedoch auch Fehlinterpretationen darstellen [Wec05, S. 37]. Die **Kundenbeteiligung** verfolgt den Grundsatz, dass der Kundenwunsch das höchste Entwicklungsziel darstellt. Infolgedessen wird der Kunde hinsichtlich seiner Wünsche und Bedürfnisse befragt. Bedürfnisse können auch durch die Betrachtung der Produktverwendungen identifiziert werden [Wec05, S. 37]. Bei der **Kundenintegration** sollen Kunden aktiv in den wertschöpfenden Prozess eingebunden werden. Hierdurch können sowohl Bedürfnisse, als auch Kundenideen zu möglichen Produktinnovationen berücksichtigt werden [Wec05, S. 35ff.].

Insbesondere die **Integration von Kunden** in die eigenen Wertschöpfungsprozesse weist hohes Nutzenpotential auf [Jan12, S. 35f.], [GFS13, S. 371]. Das Mitwirken bzw. die **Integration** kann in verschiedenen Phasen der **Marktleistungserstellung** (vgl. Abschnitt 2.4.1) erfolgen. Diesen Zusammenhang visualisiert Bild 2-17. Beispielsweise kann der Kunde Bedürfnisse formulieren oder bei der Generierung von Ideen unterstützend mitwirken [Sch06, S. 6], [Ste06, S. 120]. Vor diesem Hintergrund werden in den nachfolgenden Abschnitten die Möglichkeiten zur Integration des Kunden in den frühen Phasen tiefergehend analysiert (vgl. Abschnitte 2.5.1 und 2.5.2).

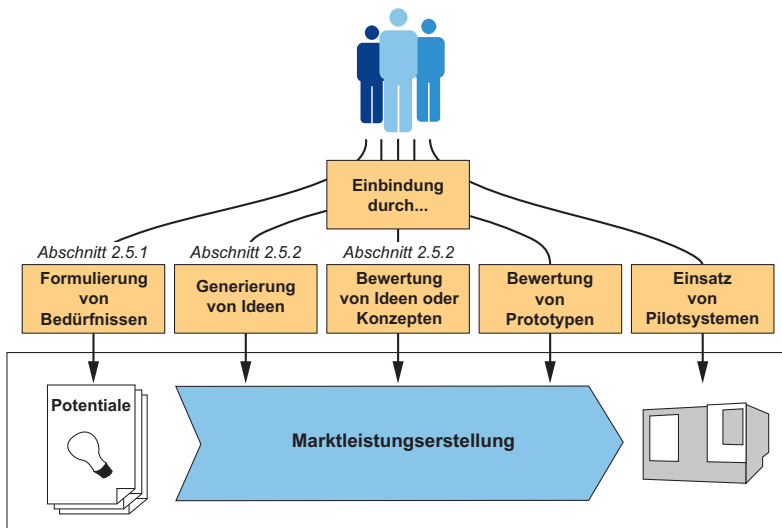


Bild 2-17: Integration des Kunden in Anlehnung an [Sch06, S. 6], [Ste06, S. 120]

Kunden werden durch die verstärkte Berücksichtigung zu externen Ressourcen, die den Innovationsprozess nachhaltig verbessern können [Jan12, S. 34f.]. Hierdurch lassen sich Kundenbedürfnisse systematisch identifizieren, womit die Entwicklung von ungewünschten oder nicht geforderten Produktfunktionen vermieden werden kann (im Sinne des Over-Engineering [Sch06, S. 3]). Zudem kann hierdurch die Qualität der Innovation gesteigert werden [RJ15, S. 93]. Eine stärkere Ausrichtung von Systemen an den Kunden motivieren KLEINSCHMIDT ET AL. folgendermaßen:

„Nur beim Kunden selbst kann man erkunden, welche Probleme ihn beschäftigten, welche Produktfunktionen ihm Vorteile bringen würden, welche Präferenzen er hat und für welche Bedürfnisse er bereit wäre, Geld auszugeben. Das neue Produkt muß auf diesen Innovationsbedarf ausgerichtet werden“ [KGC96, S. 107].

Fazit:

Die Einbindung des Kunden in die Produktentstehung weist hohes Potential auf, um Innovationen hervorzubringen. Infolgedessen sind in der vorliegenden Arbeit geeignete Ansätze zum Erschließen der Potentiale zu berücksichtigen, um auf diese Weise den Markterfolg durch eine Leistungssteigerung des mechatronischen Systems frühzeitig abzusichern. Vor diesem Hintergrund werden in Abschnitt 2.5.1 zunächst Bedürfnisse des Kunden an technische Systeme tiefergehend analysiert. In Abschnitt 2.5.2 werden nachfolgend die Möglichkeiten zur Einbindung des Kunden in den frühen Phasen erläutert.

2.5.1 Kundenbedürfnisse an technische Systeme

Der Kunde erwartet bei einer Investition in neue technische Systeme, dass diese bestimmte Bedürfnisse und Wünsche erfüllen, die vorher nicht oder nur bedingt erfüllt wurden. Vor diesem Hintergrund bildet die Identifikation von Kundenbedürfnissen die Basis, um Kundennutzen zu generieren. **Kundenbedürfnisse** bilden bei einer kundenintegrierten Entwicklung die Basis zur Weiterentwicklung des Systems. Bedürfnisse können als Ausdruck des Mangels an Zufriedenstellung verstanden werden. Eine Möglichkeit zur Strukturierung von menschlichen Bedürfnissen im Allgemeinen entwickelte MASLOW mit der Bedürfnispyramide [Mas43]. Der Pyramide liegt die Theorie zugrunde, dass sich mit wachsendem Wohlstand die Bedürfnisse verändern. Auf technische Produkte (insb. des hochpreisigen Industriegütermarkts) bezogen, resultiert dies in höheren Ansprüchen des Kunden, wie z.B. hinsichtlich zusätzlicher Funktionen, höherer Leistung oder erhöhtem Komfort [HF11, S. 2f.]. Das Erfüllen von Kundenbedürfnissen kann durch verschiedene Faktoren repräsentiert werden (z.B. Produktivität, Qualität, Verlässlichkeit, Bequemlichkeit und Image) [Rup12, S. 36ff.]. Einen Überblick über verschiedene Arbeiten in diesem Bereich liefert RUPERTI [Rup12, S. 36]. Im Kontext dieser Arbeit wird folgende Unterteilung von Kundenbedürfnissen verwendet [Gau11, S. 21]: Steigerung der Leistungsfähigkeit, Steigerung der Verlässlichkeit, Erhöhung der Ressourceneffizienz und Verbesserung der Benutzungsfreundlichkeit.

Steigerung der Leistungsfähigkeit: Die Leistungsfähigkeit technischer Systeme wird maßgeblich von der Anzahl der Funktionen des Systems sowie dem Erfüllungsgrad dieser bestimmt. Beispielsweise kann die Leistungsfähigkeit bei Lackieranlagen durch den Durchsatz der lackierten Werkstücke pro Stunde bestimmt werden und durch die erreichte Lackierqualität. In Anlehnung an die Gegenüberstellung von RUPERTI werden hierbei u.a. Faktoren adressiert, wie z.B. Produktqualität, Produktivität, Funktionale Leistung, Flexibilität und Schnelligkeit [Rup12, S. 37ff.].

Steigerung der Verlässlichkeit: In Anlehnung an die AVIZIENIS ET AL. wird im Rahmen dieser Arbeit unter Steigerung der Verlässlichkeit auch Steigerungen von Sicherheit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Vertraulichkeit, Integrität und Instandhaltbarkeit verstanden [ALR+04, S. 4], [Gau11, S. 21]. Dies bedeutet beispielsweise, dass durch Ansätze der prädiktiven Wartungsplanung die Verfügbarkeit einer Anlage verbessert werden kann. Das wiederum erhöht den Kundennutzen und befriedigt ein Bedürfnis. Faktoren die hierzu zählen sind Ausfallrisiko, Garantien, Sicherheit und Abnutzung [Rup12, S. 37ff.].

Erhöhung der Ressourceneffizienz: Die Funktionalität von technischen Systemen erfordert den Einsatz von verschiedenen Ressourcen [Gau11, S. 21]. So benötigt eine Lackieranlage zum Lackieren von Werkstücken u.a. elektrische Leistung, Lack und Druckluft. Für den Kunden ist ein effizienter Einsatz dieser Ressourcen entscheidend, da dies unmittelbar Kosten im Betrieb verursacht. In gleicher Weise bewerten Kunden aber auch die Investitionskosten für ein System. Faktoren die hierzu zählen sind Kosten (Akquisitionskosten, Lohnkosten) und Energieaufwand [Rup12, S. 37ff.].

Verbesserung der Benutzungsfreundlichkeit: Die Bedienung von Systemen soll intuitiv und für den Benutzer nachvollziehbar sein [Gau11, S. 21]. Infolgedessen sollen sich die Systeme an das spezifische Benutzerverhalten anpassen. Die Benutzungsfreundlichkeit kann durch verbesserte Schnittstellen realisiert werden, die z.B. verständliche Benutzeroberflächen oder auch Sprachsteuerung unterstützen. Faktoren die hiervon beeinflusst werden, sind z.B. Bequemlichkeit, Flexibilität und Vertrauen [Rup12, S. 37ff.].

Diese dargestellte Unterteilung von Bedürfnissen liefert jedoch nur ein Hilfsmittel zur Strukturierung. Eine eindeutige Zuordnung zu den entsprechenden Gruppen ist vor dem Hintergrund der Arbeit nicht immer möglich. Dennoch hilft die Unterteilung die Motivation der Kunden besser zu verstehen. Zudem können Kundenbedürfnisse in **explizite und implizite Bedürfnisse** unterschieden werden [RJ15, S. 93]. Explizite Kundenbedürfnisse werden i.d.R. vom Kunden artikuliert. Implizite Bedürfnisse sind schwieriger zu identifizieren, insb. weil diese vom Kunden weder als Problem noch als Chance bewusst erkannt werden [RJ15, S. 93]. Die Notwendigkeit der Berücksichtigung von impliziten und expliziten Bedürfnissen begründeten HAMEL und PRAHALAD:

“However well a company meets the articulated need of current customers, it runs a great risk if it doesn’t have a view of the need customers can’t yet articulate, but would love to have satisfied” [HP94, S. 111].

Für die Entwicklung von fortgeschrittenen technischen Systemen ist es nicht ausreichend herauszufinden, welche impliziten und expliziten Bedürfnisse die derzeit bedienten Kunden haben. Vielmehr sind auch zukünftige Kundenbedürfnisse von noch nicht bedienten Kunden zu identifizieren [HP95, S. 161ff.], [GEK01, S. 75]. Weiterführende Informationen hierzu sind im Anhang zu finden (vgl. Anhang A1.4).

Fazit:

Kunden erwarten bei einer Investition das Erfüllen von Bedürfnissen und Wünschen. Daher erzeugt das Erfüllen dieser den entsprechenden Kundennutzen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf fünf ausgewählten Bedürfnissen, die mit Hilfe von Ansätzen zur Steigerung der Intelligenz des mechatronischen Systems adressiert werden sollen. Diese sind: Steigerung der Leistungsfähigkeit, Steigerung der Verlässlichkeit, Erhöhung der Ressourceneffizienz und Verbesserung der Benutzungsfreundlichkeit. Zudem gilt es idealerweise gegenwärtige und zukünftige, explizite und implizite Bedürfnisse sowie Bedürfnisse bedienter Kunden als auch nicht bedienter Kunden zu adressieren [Hil05, S. 50].

2.5.2 Kundeneinbindung in den frühen Phasen sowie Kundenrollen

Die **Einbindung des Kunden** kann in der Produktentstehung an verschiedenen Stellen erfolgen. Hervorzuheben ist die Einbindung des Kunden bei den Tätigkeiten der Ideengenerierung und -bewertung (in der Produktfindung) [GFS13, S. 372f.], [Tho80]. Darüber hinaus existieren auch Möglichkeiten, den Kunden bereits in der Potentialfindung und somit vor der Ideengenerierung (z.B. bei der Definition von Suchfeldern [GEK01, S. 117f.]) zu integrieren [Let13, S. 129f.]. Im Rahmen dieser Arbeit stehen die Tätigkeiten Ideengenerierung und Ideenbewertung im Fokus.

Ideengenerierung: Die Entwicklung von zukünftigen Maschinen- und Anlagen stellt selten eine vollständige Neuentwicklung dar: In der Regel basieren diese auf vorangegangenen Systemgenerationen. Das führt dazu, dass Wissen über die Anwendung älterer Systeme (z.B. über Informationen aus dem After-Sales Bereich) die Entwicklung neuer Systemgenerationen deutlich beeinflusst [GFS13, S. 373], [Nam02, S. 394]. Vor diesem Hintergrund ist eine verstärkte Zusammenarbeit mit systemerfahrenen Kunden bei der Ideengenerierung Erfolg versprechend. Es wird der Bedarf zur Modifikation (Bedürfnis) aus Kundensicht geprüft (Problemeidee) [Küh03, S. 88]. Bei der Identifikation von Problemeiden treten die Kunden als sogenannte **Bedürfnis- bzw. Problemträger**¹² auf [Rei02, S. 43]. Die Problemeiden bilden nachfolgend die Grundlage zur Generierung von Lösungsideen [Küh03, S. 88].

¹²Die verschiedenen Rollen des Kunden im Rahmen der Kundeneinbindung resultieren in unterschiedlichen Intensitäten. Hierzu erarbeitete STEINHOFF eine sogenannte Intensitätsskala der Kundeneinbindung. Weitere Informationen zu diesen Arbeiten können im Anhang (Anhang A1.4) eingesehen werden [Ste06, S. 235f.].

Die **Identifikation von Ideen** zur Systemmodifikation auf Basis von Kundenbedürfnissen kann in drei Ansätze unterteilt werden. Einen Überblick dieser drei Arten visualisiert Bild 2-18 [Sch06, S. 55f.].

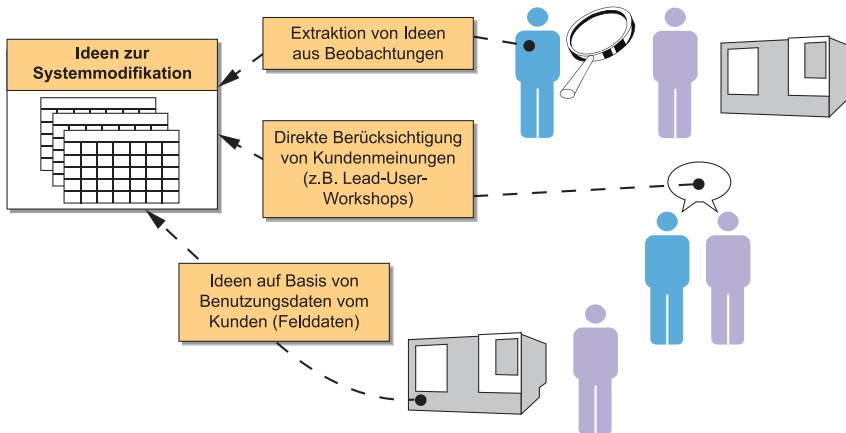


Bild 2-18: Identifikation von Ideen zur Modifikation in Anlehnung an [Sch06, S. 55f.]

Zu den **Arten** zählen: *Extraktion von Ideen aus Beobachtungen des Kunden*, *direkte Berücksichtigung von Kundenmeinungen* und *Ideengenerierung auf Basis von Benutzungsdaten (Felddaten)* (in Anlehnung an [Sch06, S. 55f.]). Informationen zu Kundenbedürfnissen stellen in der Regel einen Engpass dar [Ste06, S. 152]. Nachfolgend werden die Arten kurz erläutert. Eine detaillierte Erläuterung ist im Anhang zu finden (Anhang A1.3).

- Bei der **Extraktion von Ideen auf Basis von Beobachtungen** erfolgt die Integration der Kundenmeinung auf Basis von Wahrnehmungen der Mitarbeiter im Unternehmen. Diese extrahieren die Ideen aus der Beobachtung des Kunden [Sch06, S. 55f.]. Diese Quelle für Ideen zeichnet sich in der Regel durch eine schnelle Verfügbarkeit und verhältnismäßig geringe Kosten aus [HH13, S. 127].
- Die Ansätze aus dem Bereich der **direkten Berücksichtigung von Kundenmeinungen** integrieren den Kunden bewusster in die sog. Ideenakquise [Sch06, S. 57]. Es gilt es die Bedürfnisse des Kunden durch strukturierte oder unstrukturierte sowie direkte oder indirekte Fragen zu identifizieren [Sch06, S. 57].
- Die **Identifikation von Ideen auf Basis von Benutzungsdaten** adressiert eine systematische Informationsrückführung aus der Betriebsphase des Systems, um zukünftige Systemgenerationen zu entwickeln [Sch06, S. 58ff.]. So werden z.B. Informationen über Fehler und Produktschwachstellen erhoben, die in der Produktentstehung noch nicht erkannt wurden oder über das Produktverhalten im kundenspezifischen Betrieb (Lebensdauer etc.) [Edl01, S. 1].

Ideenbewertung: Die Ideengenerierung resultiert i.d.R. in einer Vielzahl von potentiellen Handlungsoptionen. Jedoch ist es nicht sinnvoll alle Ideen zu konkretisieren, insb.

unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Aspekte [GB04, S. 5]. Hierdurch gilt es zu prüfen, welche Ideen die höchsten Erfolgchancen im Markt aufweisen (unter Berücksichtigung der jeweiligen Risiken). Um genau diese Marktsicht abzubilden, können Kunden den Prozess in der Rolle von **Evaluatoren** unterstützen [Rei02, S. 43]. Falls eine Validierung der Ideen auf Basis bestehender Produktkonzepte (Produktarchitekturen etc.) erfolgt, kann auch von Kunden als **Co-Creatoren** gesprochen werden [Nam02, S. 403]. Hierdurch könnte also die Konzipierung des Produkts kundenintegriert erfolgen. Darüber hinaus kann der Kunde auch Präferenzen hinsichtlich Produkteigenschaften äußern sowie auf notwendige Schnittstellen hinweisen [GFS13, S. 373].

Fazit:

Im Rahmen der Systematik ist die Kundeneinbindung auf die frühen Phasen auszurichten. Als Erfolg versprechend zeigt sich die Integration des Kunden zum Formulieren von Problemen sowie dem frühzeitigen Bewerten von Konzepten. Zudem ist insb. auch eine indirekte Kundeneinbindung durch Vertrieb und Service zu berücksichtigen.

2.6 Herausforderungen

Es existieren zahlreiche Lösungsmöglichkeiten (z.B. im Bereich der mathematischen Optimierung oder des maschinellen Lernens), um die Intelligenz bestehender mechatronischer Systeme zu steigern (vgl. Abschnitt 2.3.3) und somit den Ausbau der Innovationsfähigkeit im Maschinen- und Anlagenbau sicherzustellen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die zahlreichen Lösungsmöglichkeiten resultieren jedoch in unüberschaubaren Handlungsoptionen für die Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus (vgl. Abschnitt 2.3.3.4). Zwar existieren Vorgehen, die z.B. eine Entwicklung von selbstoptimierenden Systemen unterstützen (vgl. Abschnitt 2.4.3), jedoch adressieren diese keine bedarfsgerechte Integration der Lösungsansätze (vgl. Abschnitt 2.3.3.3). Insbesondere die frühzeitige Berücksichtigung der Lösungsansätze in der Produktentstehung fehlt. Dies gilt insbesondere für die Aufgaben der Strategischen Produktplanung (z.B. Produktfindung). In diesem Zuge ist es erforderlich, die Lösungen zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme am Bedarf zur Modifikation auszurichten. In diesem Zusammenhang ist der Kunde besonders zu berücksichtigen, da Innovationen erst dann stattfinden, wenn die Bedürfnisse der Kunden durch die Neuerungen verbessert oder überhaupt zum ersten Mal erfüllt werden (vgl. Abschnitt 2.5.1). Infolgedessen gilt es den Kunden frühzeitig in die Produktentstehung einzubinden, um den Markterfolg sicherzustellen (vgl. Abschnitt 2.5.2).

Vor diesem Hintergrund basiert die **systematische Weiterentwicklung von Systemen** (z.B. auf Basis von maschinellen Lern- oder mathematischen Optimierungsverfahren) im Wesentlichen auf drei Aufgaben: 1.) Identifikation des Bedarfs zur Modifikation bestehender Systeme, 2.) Spezifikation von intelligenten Lösungsideen sowie 3.) Bewertung und Auswahl Erfolg versprechender Lösungsideen. Darüber hinaus gilt es den Kunden frühzeitig und bedarfsgerecht in diese Aufgaben einzubinden, um den Markterfolg abzu-

sichern. Diese Aufgaben stellen für den Maschinen- und Anlagenbau eine Herausforderung dar. Aus der beschriebenen Notwendigkeit lassen sich drei Handlungsfelder definieren. Diese sind in Bild 2-19 visualisiert.

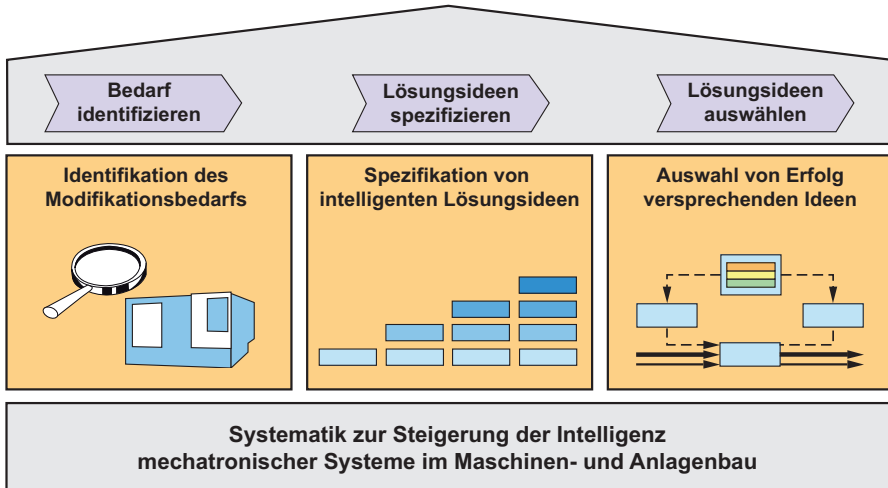


Bild 2-19: Handlungsfelder zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau

Handlungsfeld 1: Identifikation des Modifikationsbedarfs

Es bedarf an Möglichkeiten, aktuelle Systeme systematisch auf Potentiale zur Weiterentwicklung hin zu analysieren. Die Potentiale zeigen auf, wie eine Optimierung des Produktwertes umgesetzt werden kann (vgl. Abschnitt 2.2.2). Zudem ist hervorzuheben, dass die Entstehung eines weiterentwickelten Systems verstärkt z.B. durch Phasen der Nutzung einer vorangegangenen Generation des Systems (z.B. Informationen aus dem After-Sales Bereich) beeinflusst wird. Die Informationen aus der Anwendung können im Sinne eines *Reuse* zur Weiterentwicklung genutzt werden¹³ [Wes13, S. 147f.], [Roh13, S. 227ff.]. Daraus resultierend ist u.a. eine frühzeitige Einbindung des Kunden zu berücksichtigen, um z.B. den Bedarf des Marktes zur Automatisierung zu identifizieren sowie eine Absicherung des Markterfolgs für das zukünftige System sicherzustellen (vgl. Abschnitt 2.5.2).

Handlungsfeld 2: Spezifikation von intelligenten Lösungsideen

Auf Basis des identifizierten Modifikationsbedarfs gilt es nachfolgend die Lösungen zur Verbesserung des Systems zu spezifizieren. In diesem Zusammenhang gilt es insbesondere die Lösungsmöglichkeiten im Kontext der Selbstoptimierung bedarfsgerecht einzu-

¹³ Dieser Sachverhalt kann vertiefend im Anhang betrachtet werden (vgl. Anhang A1.5).

setzen (vgl. Abschnitt 2.3.3.3). Der bedarfsgerechte Einsatz soll die Vision eines selbst-optimierenden Systems aufzeigen, jedoch auch eine schrittweise Umsetzung unterstützen (vgl. Abschnitt 2.3.3.4). Die Lösungen sowie die dazugehörigen Potentiale sind in einer Lösungsidee zusammenzufassen. Die Lösungsideen sind zu dokumentieren, um einen Wissensaustausch im Unternehmen (vgl. Abschnitt 2.2.1) sowie mit den Kunden zu unterstützen (vgl. Abschnitt 2.5.2).

Handlungsfeld 3: Auswahl von Erfolg versprechenden Ideen

Die spezifizierten Lösungsideen geben einen Überblick über die Optionen zur Weiterentwicklung bestehender Systeme. Die Entscheidung, welche Lösungsidee mit den gegebenen Ressourcen (Kompetenzen im Unternehmen, finanzielle und zeitliche Rahmenbedingungen etc.) zu welchem Zeitpunkt konkretisiert wird, ist jedoch nicht ohne eine Bewertung und Priorisierung möglich (vgl. Abschnitt 2.4.2), [Küh03, S. 16f.]. Neben dem Aufwand ist auch der Nutzen aus Kundensicht zu bewerten (vgl. Abschnitt 2.5.2). Infolgedessen bedarf es einer Analyse der Lösungsideen unter Berücksichtigung des Kunden.

2.7 Anforderungen an die Systematik

Um den in Abschnitt 2.6 zusammengefassten Herausforderungen und Handlungsfeldern bei der Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau zu begegnen, hat die zu entwickelnde Systematik die folgenden Anforderungen zu erfüllen. Eine Zuordnung der abgeleiteten Anforderungen zu den Handlungsfeldern der Systematik ist in Bild 2-20 dargestellt.

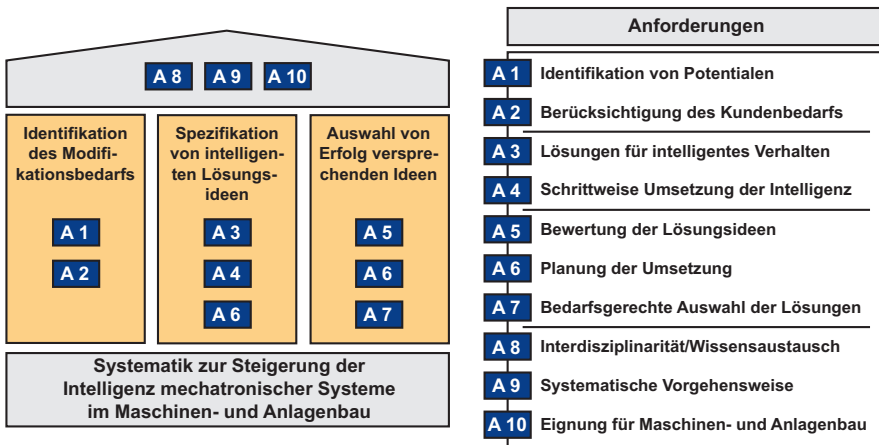


Bild 2-20: Ableitung von Anforderungen an die Systematik auf Basis der definierten Handlungsfelder

A1: Identifikation von Potentialen

Potentiale zeigen auf, wie eine Optimierung des Produktwertes umgesetzt werden kann (vgl. Abschnitt 2.2.2). Infolgedessen soll die Systematik eine Analyse von Potentialen in bestehenden technischen Systemen ermöglichen. Potentiale können u.a. Störungen des Betriebsverhaltens des Systems darstellen, die z.B. den Benutzungskomfort oder die Leistungsfähigkeit (nicht optimale Betriebspunkte des Systems) beeinträchtigen. Zudem ist die Identifikation von Potentialen auch auf Basis von bereits bekannten Schwachstellen des Systems (z.B. aus Sicht von Service-Mitarbeitern) zu ermöglichen [Eis99, S. 22f.].

A2: Berücksichtigung des Kundenbedarfs

Kunden erwarten bei einer Investition das Erfüllen von Bedürfnissen und Wünschen. Daher erzeugt das Erfüllen dieser den entsprechenden Kundennutzen (vgl. Abschnitt 2.5.1). Die zu erarbeitende Systematik soll Ansätze bereitstellen, mit denen der Bedarf zur Modifikation aus Kundensicht berücksichtigt werden kann, um Kundennutzen zu stiften. Bedarfe aus Kundensicht können z.B. die Leistungsfähigkeit des technischen Systems, die Verlässlichkeit oder die Ressourceneffizienz adressieren (vgl. Abschnitt 2.5.1). Darüber hinaus soll die Systematik auch eine Analyse hinsichtlich einer Steigerung der Benutzungsfreundlichkeit ermöglichen (z.B. Integration von Aktivitäten des Kunden in das System). Fokus liegt auf funktionalen Bedarfen im erweiterten Betrieb des Systems (Betriebsphase, Inbetriebnahme, Wartung etc.). Zudem ist auch eine indirekte Kundeneinbindung durch Vertrieb und Service stärker zu berücksichtigen [DWB09, S. 155].

A3: Lösungen für intelligentes Verhalten

Die Systematik soll Lösungen zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme aufzeigen (vgl. Abschnitt 2.1). Hierzu ist das Wissen über die Lösungen aus den Bereichen des maschinellen Lernens, der mathematischen Optimierung, der fortgeschrittenen Regelungstechnik sowie Ansätzen der Verlässlichkeit aufzubereiten, um Anwendungen für diese zu identifizieren (vgl. Abschnitt 2.3.3.3).

A4: Schrittweise Umsetzung der Intelligenz

Die Suche nach Lösungsmöglichkeiten soll bedarfsgerecht erfolgen. Dies bedeutet, dass eine Weiterentwicklung des mechatronischen Systems unter Verwendung des Lösungswissens schrittweise erfolgen sollte (vgl. Abschnitte 2.1 und 2.3.3.4). Hierzu muss der Entwickler in der Lage sein, die aktuelle Intelligenz des mechatronischen Systems zu charakterisieren sowie mögliche Leistungsstufen von intelligenten mechatronischen Systemen zu identifizieren, auszuwählen und in einer Idee zu spezifizieren.

A5: Bewertung der Lösungsideen

Die Systematik soll den Entwickler bei der Erarbeitung einer Entscheidungsgrundlage hinsichtlich auszuwählender Lösungsideen unterstützen. Diese Entscheidung ist auf Basis verschiedener Kriterien des Unternehmens hinsichtlich Nutzen und Aufwand zu erarbei-

ten. Der Nutzen kann z.B. durch Kriterien, wie z.B. Alleinstellungsmerkmal oder Synergieeffekte, bewertet werden [Küh03, S. 16ff.]. Bei der Bewertung des Aufwands kann z.B. auch die Berücksichtigung von unternehmensinternen Kompetenzen von Bedeutung sein (vgl. Abschnitt 2.4.2). Bei der Bewertung des Nutzens sind auch die Möglichkeiten zur Einbindung des Kunden zu analysieren (vgl. Abschnitt 2.5.2).

A6: Planung der Umsetzung

Die Abschätzung des Umsetzungsaufwandes für Ideen, welche Lösungen aus dem Kontext der Selbstoptimierung adressieren, stellt eine Herausforderung dar. In diesem Zusammenhang ist den Experten im Unternehmen meist nicht bekannt, welche nachfolgenden Schritte zur Umsetzung notwendig sind und welche Kompetenzen diese erfordern könnten (vgl. Abschnitt 2.4.3.2), [Sto09]. Infolgedessen gilt es z.B. aufzuzeigen, welche Schritte im Kontext der mathematischen Optimierung durchgeführt werden, um Optimalsteuerungen zu realisieren. Der Fokus liegt auf Schritten im Bereich der fortgeschrittenen Regelungen, der mathematischen Optimierung, des maschinellen Lernens und erweiterten Verlässlichkeitskonzepten (vgl. Abschnitt 2.3.3.3).

A7: Bedarfsgerechte Auswahl der Lösungsideen

Die Bewertung des Unternehmens hinsichtlich Nutzen und Aufwand der Lösungsideen zur Weiterentwicklung des technischen Systems bildet die Grundlage, um die Lösungsideen nachfolgend auszuwählen. Um jedoch eine ganzheitliche Sicht bzgl. der Bewertung zu erhalten, ist eine Berücksichtigung des Kunden vorzunehmen. Auf Basis seiner Rückmeldung zu Ideen oder auch der Priorisierung von Ideen, erhält das Unternehmen die Sicherheit, dass erarbeitete Ideen den Kunden ansprechen und somit das Potential für erfolgreiche Produkte aufweisen (vgl. Abschnitt 2.5.2).

A8: Interdisziplinarität/Wissensaustausch

Neben dem Zusammenwirken der ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen sowie der Softwaretechnik im Unternehmen (vgl. Abschnitt 2.4.3.1), muss die Systematik auch die Disziplinen der mathematischen Optimierung sowie des maschinellen Lernens berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.4.3.2). Vor diesem Hintergrund ist eine disziplinübergreifende und ganzheitliche Spezifikation anzustreben, um die Kommunikation zwischen den Beteiligten zu unterstützen. Darüber hinaus sollte die Systematik die Kommunikation mit dem Kunden fördern und mit geeigneten Hilfsmitteln einen Austausch ermöglichen (vgl. Abschnitt 2.5.2).

A9: Systematische Vorgehensweise

Die zu erarbeitende Systematik soll ein Vorgehensmodell bereitstellen, welches sowohl die Bedarfsanalyse zur Modifikation des technischen Systems als auch die Spezifikation von neuen Funktionen des Systems im Sinne von Lösungsideen unterstützt (vgl. Abschnitt 2.4.2). Infolgedessen gilt es folgende abstrakte Prozessschritte in das Vorgehens-

modell zu integrieren: *Bedarf identifizieren, Lösungsideen spezifizieren* sowie *Lösungsideen auswählen*. Weitere Hilfsmittel sind anwendungsspezifisch in das Vorgehensmodell einzubetten.

A10: Eignung für den Maschinen- und Anlagenbau

Die Positionierung des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus im internationalen Wettbewerb basiert auf der Innovationsfähigkeit der Unternehmen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Von besonderer Relevanz für zukünftige Ideen und damit verbundenen Innovation sind zum einen die wachsende Nachfrage nach Lösungen aus dem Kontext der Intelligenten Technischen Systeme [its14-ol, S. 38] sowie ein effizienter Umgang mit Wissen im Unternehmen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Vor diesem Hintergrund soll die zu erarbeitende Systematik die Innovationsfähigkeit der Unternehmen fördern: Es gilt die Lösungen aus dem Kontext der Selbstoptimierung in geeigneter Weise bereitzustellen (vgl. Abschnitte 2.1 und 2.3.3.3) und darüber hinaus soll der Wissensaustausch im Unternehmen durch geeignete Hilfsmittel zur Kommunikation gefördert werden (vgl. Abschnitt 2.2.1).

3 Stand der Technik

Ziel des Kapitels ist ein systematisch hergeleiteter Handlungsbedarf für die Entwicklung einer Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau. Hierzu werden Methoden und Ansätze aus dem Stand der Technik vor dem Hintergrund der identifizierten Anforderungen aus Abschnitt 2.7 diskutiert. Die untersuchten Ansätze können in vier Bereiche unterteilt werden (vgl. Bild 3-1). In Abschnitt 3.1 werden übergreifende Ansätze erläutert, die die Integration von Intelligenz in technische Systeme verfolgen. In Abschnitt 3.2 werden Ansätze und Methoden zur Identifikation des Modifikationsbedarfs vorgestellt. In Abschnitt 3.3 werden Ansätze erläutert, die verschiedene Stufen bzw. Fähigkeiten von Intelligenz beschreiben. Abschnitt 3.4 umfasst Methoden zur Bewertung und Auswahl von Lösungsideen. Ein Abgleich der Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.7) mit den Ansätzen aus dem Stand der Technik erlaubt die Ableitung des Handlungsbedarfs in Abschnitt 3.5.

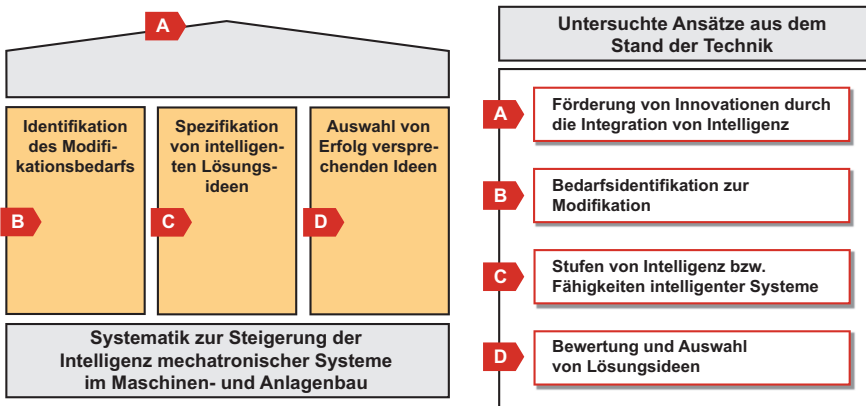


Bild 3-1: Struktur des analysierten Stands der Technik mit der Zuordnung zu den abgeleiteten Handlungsfeldern

3.1 Förderung von Innovationen durch die Integration von Intelligenz

Im Rahmen der Problemanalyse wurde gezeigt, dass der Bedarf einer Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau besteht. Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend Ansätze und Methoden vorgestellt, die eine Integration von Intelligenz in technischen Systemen adressieren. Hierzu gehören die Ansätze zur Integration von kognitiven Funktionen nach METZLER (vgl. Abschnitt 3.1.1) sowie nach DUMITRESCU (vgl. Abschnitt 3.1.2), das Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender Systeme nach POOK (vgl. Abschnitt 3.1.3), die Beschreibung intelligenter Systeme nach ISERMANN (vgl. Abschnitt 3.1.4), die Einsatzgestaltung intelligenter Objekte nach DEINDL (vgl. Abschnitt 3.1.5) sowie der Leitfaden Industrie 4.0 nach ANDERL ET AL. (vgl. Abschnitt 3.1.6).

3.1.1 Integration kognitiver Funktionen nach METZLER

Der Exzellenzcluster CoTeSys (Cognition for Technical Systems) erforschte die Möglichkeiten der Kognition für technische Systeme. In diesem Rahmen erarbeitet METZLER eine **Systematik zur Integration von kognitiven Funktionen in Produktkonzepte**. Die Systematik umfasst eine Taxonomie von kognitiven Funktionen im Kontext technischer Systeme, ein Vorgehen zur Identifikation und Integration von kognitiven Funktionen in Produktkonzepten sowie Hilfsmittel zur Unterstützung der Integration [Met16, S. 4ff.].

Im Rahmen der Taxonomie folgt METZLER folgender **Definition**: Die Gesamtfunktion kognitiver Produkte setzt sich sowohl aus nicht kognitiven als auch kognitiven Funktionen zusammen. Kognitive Funktionen repräsentieren kognitive Aufgaben des Produkts und werden durch eine Substantiv-Verb-Kombination beschrieben. Die kognitiven Funktionen werden von der Informationsverarbeitung des Produkts ausgeführt [Met16, S. 25], [MS11], [MS10].

Insbesondere die **Verben**, die auf kognitive Funktionen hindeuten (z.B. *Planen* oder *Erfassen*) werden in der Taxonomie spezifiziert. In der Taxonomie werden primäre, sekundäre sowie tertiäre kognitive Funktionen unterschieden. Die Funktion *Wahrnehmen* stellt z.B. eine primäre Funktion dar. *Erfassen* und *Auswerten* sind sekundäre Funktionen der Funktion *Wahrnehmen*. *Hören*, *Sehen*, *Riechen* sind wiederum tertiäre Funktionen der Funktion *Erfassen*. Die sechs Primärfunktionen der Taxonomie sind *Wahrnehmen*, *Lernen*, *Verstehen*, *Denken*, *Entscheiden* sowie *Agieren* [Met16, S. 131f.], [MS11].

Die Taxonomie bildet einen wesentlichen Beitrag im Rahmen des **Vorgehens zur Integration von kognitiven Funktionen** in Produkte. Das Vorgehen für bestehende Produkte ist in Bild 3-2 dargestellt [Met16, S. 141ff.]. Das Vorgehen ist darüber hinaus auch in das V-Modell der VDI 2206 eingebettet [Met16, S. 139f.].

Im Rahmen der Phase **Identifikation von relevanten Stakeholdern** wird das zu betrachtende Produkt ausgewählt. Basierend auf dieser Auswahl wird der Produktlebenszyklus des Produkts beschrieben und Lebenszyklusphasen mit hoher Interaktion ausgewählt (z.B. Betrieb und Wartung). Für die ausgewählten Phasen werden relevante Stakeholder (mit Interaktionen mit dem Produkt) identifiziert und beschrieben [Met16, S. 141ff.].

Nachfolgend werden die **Produktfunktionen modelliert**. In diesem Schritt werden die bereits realisierten Produktfunktionen mit Hilfe des Ansatzes zur Funktionsmodellierung von STONE und WOOD abgebildet [SW00, S. 359ff.]. Zudem können aber auch bereits bekannte, neue Produktfunktionen abgebildet werden [Met16, S. 148ff.].

Im nächsten Schritt erfolgt die **Modellierung von Stakeholderinteraktionen** mit Hilfe von Interaktionsdiagrammen. Die Interaktionen werden z.B. mit Hilfe von Interviews identifiziert. Die Interaktionen repräsentieren im Wesentlichen Funktionen, die aktuell von Personen durchgeführt werden und zukünftig durch integrierte Systemelemente realisiert werden können (Produkt übernimmt die Funktion) [Met16, S. 150ff.].

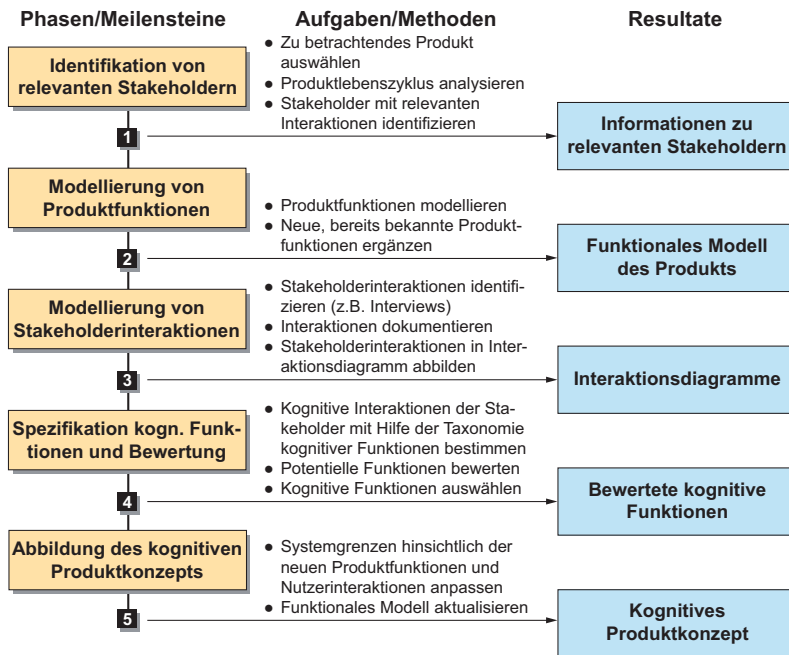


Bild 3-2: Vorgehen zur Integration von kognitiven Funktionen in bestehende Produkte nach METZLER [Met16, S. 14]ff.]

Anschließend erfolgt die **Spezifikation kognitiver Funktionen und Bewertung**. In diesem Schritt werden die kognitiven Funktionen mit Hilfe der Taxonomie erkannt und als potentielle Produktfunktionen ausgewählt. Nach der Spezifikation der Funktionen werden diese nachfolgend bewertet. Bewertungskriterien sind z.B. Chancen und Risiken der Funktion, die Bewertung durch die Stakeholder oder die Kosten der Umsetzung [Met16, S. 152ff.], [MSL13].

Die Erfolg versprechenden Funktionen werden nachfolgend ausgewählt und das **kognitive Produktkonzept wird abgebildet**. Hierbei werden das bereits erarbeitete funktionale Modell des Produkts sowie die Systemgrenzen aktualisiert [Met16, S. 157].

Bewertung:

Die Systematik nach METZLER ermöglicht die Integration von kognitiven Funktionen in Produkte. Sie unterstützt u.a. die Identifikation von möglichen kognitiven Funktionen auf Basis von Interaktionen der Stakeholder sowie mit Hilfe der Taxonomie kognitiver Funktionen. Zudem liefert sie Hilfsmittel zur Bewertung und Auswahl dieser. Darüber hinaus verfolgt die Systematik den Einsatz von Modellen, wie z.B. der funktionalen Modellierung oder den Interaktionsdiagrammen. Im Rahmen der Systematik fehlen jedoch Beschreibungen zur schrittweisen Umsetzung der Intelligenz. Beispielsweise wird nicht deutlich, welche Schritte notwendig sind, um die Funktion *Lernen* oder *Entscheiden* zu

realisieren. Zudem werden die Möglichkeiten zum Realisieren der Funktionen nicht erläutert. Die Kundeneinbindung wird zwar adressiert (z.B. Interaktionen der Mitarbeiter des Kunden als Stakeholder), jedoch fehlt eine explizite Darstellung von Art und Umfang der Kundeneinbindung.

3.1.2 Integration kognitiver Funktionen nach DUMITRESCU

DUMITRESCU folgend zeigen neue Trends (wie z.B. Vernetzung von Informationssystemen oder Miniaturisierung der Elektronik) sowie die Integration von kognitiven Funktionen offensichtliche Nutzenpotentiale in zukünftigen Produkten auf. Das Ergreifen dieser Nutzenpotentiale findet jedoch nach DUMITRESCU nicht systematisch und umfassend statt. Vor diesem Hintergrund entwickelte DUMITRESCU eine **Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme** [Dum11, S. 2f.]. Kognitive Funktionen adressieren z.B. Fähigkeiten, wie das Wahrnehmen, Verstehen oder Problemlösen. Die erarbeitete Systematik soll bei der Entwicklung von fortgeschrittenen mechatronischen Systemen unterstützen. Die zu entwickelnden Systeme weisen intelligentes und adaptives Verhalten auf und verfügen zudem über eine erhöhte Flexibilität und Robustheit [Dum11, S. 197]. Die Entwicklungssystematik umfasst folgende Bestandteile:

- ein **Vorgehensmodell**, das den Entwicklungsablauf strukturiert und die systematische Integration von kognitiven Funktionen in eine Systemspezifikation sicherstellt [Dum11, S. 99ff.]
- eine **Technik zur Systembeschreibung**, die u.a. eine generische Entwurfsschablone für die disziplinübergreifende Spezifikation der kognitiven Informationsverarbeitung bereitstellt und sich an der Spezifikationstechnik nach FRANK orientiert [Dum11, S. 109ff.]
- **wiederverwendbares Lösungswissen** (in Form einer einheitlichen Spezifikation von Lösungsmustern) für den Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme, welches in der Regel nur einzelne Experten besitzen, wie z.B. der Softwaretechnik oder der künstlichen Intelligenz [Dum11, S. 128ff.]
- ein **Konzept zur Werkzeugunterstützung**, das die Aufgaben Dokumentation, Suche, Analyse und Auswahl von Lösungswissen im Entwurf unterstützt [Dum11, S. 156ff.]

Das **Vorgehensmodell der Systematik** ist in vier Phasen unterteilt (vgl. Bild 3-3). In der Phase **Systemanalyse** werden die Potentiale kognitiver Funktionen ermittelt. Hierzu werden auf Basis von Situationsbeschreibungen Zielabhängigkeiten analysiert, die mit Hilfe von Lösungen der Selbstoptimierung im Betrieb situationsspezifisch gelöst werden können [Dum11, S. 102ff.]. Die Auswahl der Lösungen ist jedoch in der Regel nicht unmittelbar möglich. Daher folgt die Phase der **Funktionssynthese**, bei der zunächst eine abs-

trakte Beschreibung der Funktionen der zu entwerfenden Informationsverarbeitung erarbeitet wird [Dum11, S. 105]. Basierend auf der lösungsneutralen, funktionalen Beschreibung wird nachfolgend die Phase **Lösungsauswahl** durchlaufen. Hierbei sind für die Funktionen potentielle Lösungen zu ermitteln [Dum11, S. 105f.]. Die Auswahl wird durch die spezifizierten Lösungsmuster für fortgeschrittene mechatronische Systeme unterstützt. Die Phase **Systemspezifikation** bildet die letzte Phase des Vorgehensmodells, bei der die frühzeitige Spezifikation der Informationsverarbeitung erarbeitet wird. Diese kann nachfolgend in die bestehende Spezifikation des Gesamtsystems integriert werden [Dum11, S. 106f.].

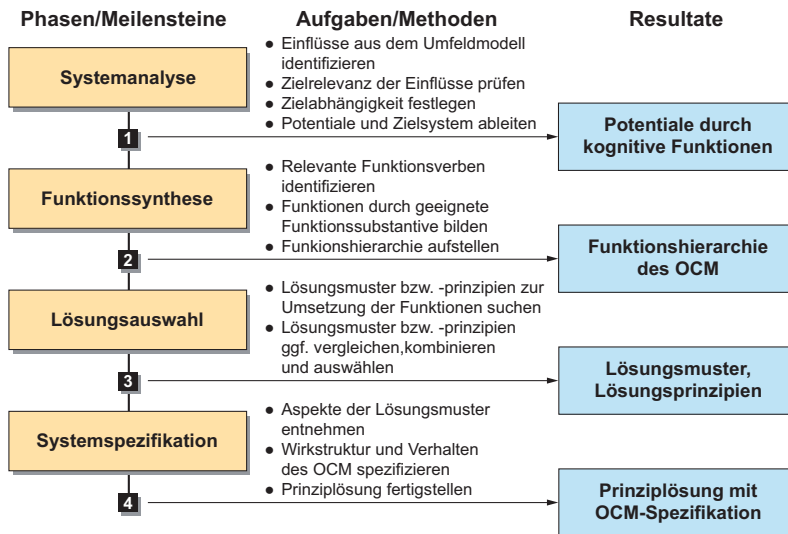


Bild 3-3: Vorgehensmodell der Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme nach DUMITRESCU [Dum11, S. 100]

Bewertung:

Die Entwicklungssystematik nach DUMITRESCU beschreibt umfassende Möglichkeiten zur Weiterentwicklung von mechatronischen Systemen unter Berücksichtigung von Lösungen für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Die erarbeiteten Lösungsmuster unterstützen den Entwickler beim Entwurf einer intelligenten Informationsverarbeitung. Jedoch erfordert der Einsatz der Muster ein tiefes Verständnis hinsichtlich der Struktur der intelligenten Informationsverarbeitung. Dieses Verständnis ist in der Regel bei den Experten der Unternehmen im Maschinen- und Anlagebau nicht vorhanden. Darüber hinaus zeigt die Systematik keine schrittweise Umsetzung der Lösungen auf. Eine Integration des Kunden ist in der Systematik nicht vorgesehen.

3.1.3 Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender Systeme nach POOK

Selbstoptimierung stellt laut POOK eine Möglichkeit dar, um mechatronische Systeme weiterzuentwickeln. Die Erweiterung eines mechatronischen Systems um Selbstoptimierung erfordert u.a. die Erweiterung der bestehenden Informationsverarbeitung. Hierzu müssen die Entwickler insb. die Ziele des Systems im Sinne der Selbstoptimierung ermitteln und Informationen über Veränderungen der Betriebsbedingungen erfassen, auf die das System zukünftig durch die Anpassung der Ziele reagieren soll. Um dies zu unterstützen, entwickelte POOK eine Methode zum **Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender Systeme**. Die Methode wird auf Basis der Prinziplösung angewendet, die mit Hilfe der Spezifikationstechnik nach FRANK [Fra06] erarbeitet werden kann [Poo11, S. 4ff.]. Bild 3-4 zeigt die Hauptphasen der Methode zum Entwurf von Zielsystemen.

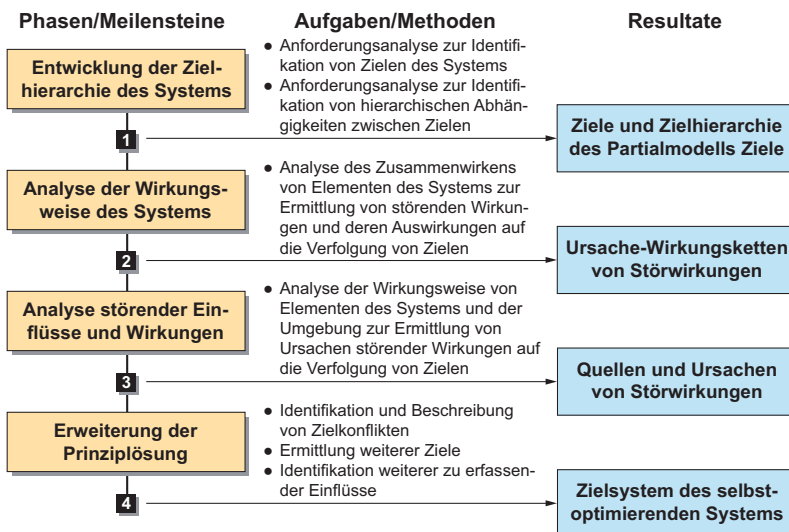


Bild 3-4: Methode zum Entwurf von Zielsystemen nach POOK [Poo11, S. 97]

Die Anwendung der Methode zum Entwurf von Zielsystemen setzt drei Grundlagen voraus. Zum einen muss eine **vorläufige Prinziplösung** des Systems vorhanden sein. Zudem müssen die **Zusammenhänge zwischen den Elementen zu den Anwendungsszenarien** der Prinziplösung abgebildet sein. Ferner muss der Anwender der Methode über genügend technisches Verständnis verfügen, um die für die Methode relevanten **Zusammenhänge der Wirkprinzipien und Lösungsmuster** zu erkennen [Poo11, S. 96].

Im Rahmen einer Anforderungsanalyse werden in der ersten Phase mögliche Ziele des Systems identifiziert. In diesem Zusammenhang werden auch hierarchische Abhängigkeiten von Zielen identifiziert. Die möglichen Ziele werden nachfolgend im **Partialmo-**

dell Ziele in einer Zielhierarchie abgebildet. In dieser Phase wird noch nicht entschieden, ob die identifizierten Ziele tatsächlich die finalen Ziele für die Betriebsphase des Systems sind [Poo11, S. 98f.].

In der nachfolgenden Phase wird analysiert, welche Störungen das Erreichen der entsprechenden Ziele im Betrieb behindern könnten. Hierzu wird für jedes Ziel ein Fehlzustandsbaum erstellt, um **Ursache-Wirkungsketten** zu repräsentieren [Poo11, S. 98].

Basierend auf diesem Ergebnis werden in der dritten Phase die Fehlzustandsbäume um Beschreibungen von **Einflüssen und Störwirkungen als Ursachen** von Ereignissen erweitert. Die Ergebnisse sind für die Gestaltung des Selbstoptimierungsprozesses erforderlich [Poo11, S. 141ff.].

Nachfolgend werden dann die Zielkonflikte herausgearbeitet, die eine Priorisierung der Ziele im Betrieb erfordern. Als Resultat liegt eine, um ein **Zielsystem** erweiterte, Prinziplösung des zu entwickelnden Systems vor [Poo11, S. 152ff.].

Bewertung:

Die Methode nach POOK ermöglicht eine systematische Identifikation von Zielen sowie eine Analyse von Zielkonflikten. Bei der Analyse von Zielkonflikten werden Fehlzustandsbäume erarbeitet, die die Schwachstellen der Prinziplösung aufdecken. Hierzu gilt es Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Partialmodellen abzubilden. Mit Hilfe der Methode ist eine Analyse der Schwachstellen des Systems sehr gut möglich. Die Methode verweist jedoch ausschließlich auf eine Veränderung von Zielen im Betrieb als mögliche Lösung (in diesem Sinne Selbstoptimierung). Die Integration von Kunden sowie eine schrittweise Umsetzung von weiteren Lösungsmöglichkeiten werden nicht adressiert.

3.1.4 Intelligente Systeme nach ISERMANN

Nach ISERMANN ermöglicht eine verbesserte Informationsgewinnung mechatronische Systeme, die intelligente Eigenschaften aufweisen. ISERMANN definiert Intelligenz folgendermaßen:

„Dabei ist unter Intelligenz die Fähigkeit zu verstehen, den Prozess und seine Automatisierung innerhalb eines gegebenen Rahmens zu modellieren, zu erlernen, Folgerungen zu ziehen (schließen) und zielorientiert zu beeinflussen“ [Ise08, S. 30], [Ise93, S. 233ff.]

ISERMANN beschreibt, dass ein **intelligentes System** auch als Online-Expertensystem betrachtet werden kann. Es umfasst die Bereiche: *Automatisierung in mehreren Ebenen, Wissensbasis, Interferenzstrategien* sowie *Kommunikation* (vgl. Bild 3-5). Darüber hinaus kann ein intelligentes System in *einfache intelligente Systeme* sowie *weiter entwickelte intelligente Systeme* unterschieden werden [Ise08, S. 31].

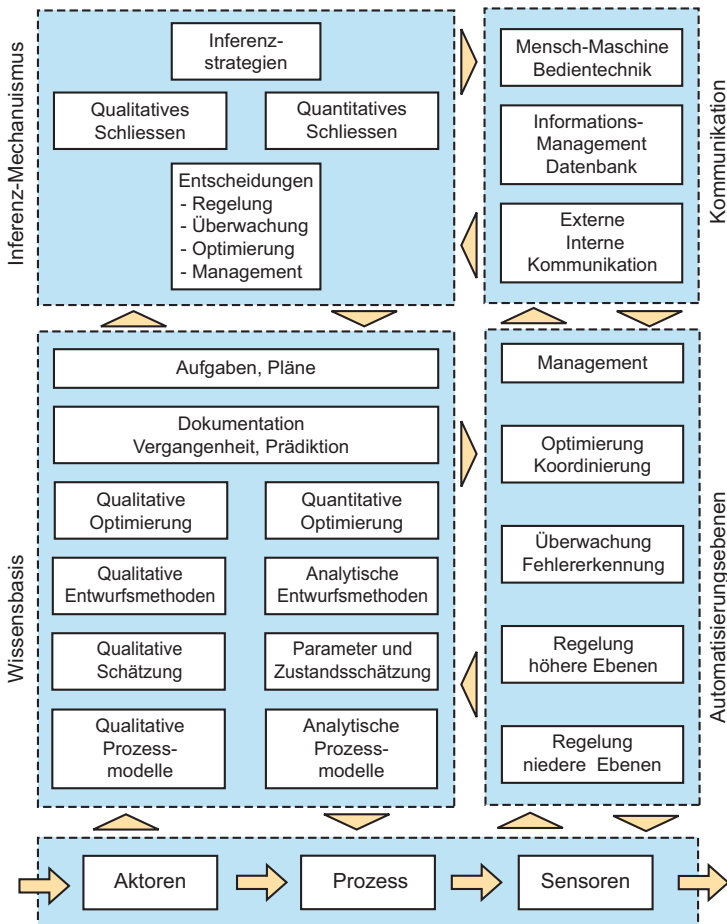


Bild 3-5: Intelligentes System nach ISERMANN [Ise08, S. 32]

Einfache intelligente Systeme umfassen eine *Regelung* oder *Steuerung* und sind in der Lage, sich an nichtlineares Verhalten durch *Adaption* anzupassen. Die Parameter der Regelung werden in Abhängigkeit der Situation und dem verbundenen Erfolg gespeichert und abgerufen (*Lernen*). Zudem werden Elemente überwacht und Fehler können diagnostiziert werden (*Überwachung*). Basierend auf den Informationen können weitere *Maßnahmen* zum Sicherstellen der Sicherheit ergriffen werden. Diese Systeme können auch als **zielgerichtete mechatronische Systeme** bezeichnet werden [Ise08, S. 31].

Bei **weiter entwickelten intelligenten Systemen** umfasst die Informationsverarbeitung neben der *Regelung* (oder *Steuerung*) und der *Überwachung* zusätzlich Ebenen des Managements. Diese Ebenen ermöglichen das *Optimieren* (z.B. Wirkungsgrad), die *Koordination* von Subsystemen sowie ein allgemeines *Prozessmanagement* ([Ise08, S. 25ff.]).

Die Wissensbasis umfasst zudem z.B. auszuführende *Pläne und Aufgaben*, eine Dokumentation der Vergangenheit (*Prozesshistorie*) und ermöglicht eine Vorhersage für *prä-diktive Strategien*. Weitere Funktionen dieser Systeme (insb. im Bereich der Interferenz sowie der Kommunikation) sind im Bild 3-5 dargestellt [Ise08, S. 31f.].

Der **Bedarf zur Entwicklung von intelligenten Systemen** kann nach ISERMANN auf Basis von Analysen der Sicherheit und Zuverlässigkeit identifiziert werden [Ise08, S. 546]. Der Bedarf resultiert zum einen aus erkennbaren Ausfällen des Systems, die durch Funktionen der Überwachung erkannt werden können. Zum anderen besteht der Bedarf für die Umsetzung von höheren Ebenen bedingt durch unvermeidbare, gefährliche Ausfälle des Systems, auf die das spezifiziertere System noch nicht reagieren kann [Ise08, S. 546].

Bewertung:

ISERMANN beschreibt die Funktionen von intelligenten Systemen aus Sicht der Mechatronik. ISERMANN folgend werden Funktionen in die vier Bereiche *Automatisierung, Wissensbasis, Interferenzstrategien* sowie *Kommunikation* unterteilt. Für den Bereich der Automatisierung werden mehrere Ebenen definiert, die eine schrittweise Integration verdeutlichen. Zudem wird im Rahmen des Vorgehens zur Analyse des Systems hinsichtlich Zuverlässigkeit und Sicherheit aufgezeigt, wann der Bedarf für die Integration von Funktionen höherer Ebenen vorhanden ist. Eine detaillierte Erklärung hierzu fehlt. Es werden zwar Funktionen von intelligentem Verhalten genannt, eine ausführliche Beschreibung dieser erfolgt jedoch nur in Teilen. Eine Integration des Kunden ist nicht vorgesehen, ebenso wie Ansätze zum verbesserten Wissensaustausch.

3.1.5 Einsatzgestaltung intelligenter Objekte nach DEINDL

DEINDL entwickelte Methoden und Modelle zur Gestaltung des Einsatzes intelligenter Objekte in der Produktion und Logistik. DEINDL definiert **intelligente Objekte** als materielle betriebliche Objekte, die mit Informationstechnologien ausgestattet sind. Hierdurch sind diese in der Lage, zusätzliche Funktionen im betrieblichen Kontext zu realisieren, wie z.B. Lokalisierung im Umfeld oder Überwachung von Zuständen [Dei14, S. 72ff.]. Zudem müssen sie mit ihrem Umfeld interagieren können und eindeutig identifizierbar sein. Bei Bedarf können sie Informationen verarbeiten, Zustände über die Sensorik aufnehmen und ihr Verhalten durch die Aktorik anpassen [Dei14, S. 72].

Die Definition von intelligenten Objekten wird durch DEINDL mit Hilfe von **gestaltungsrelevanten Merkmalen** und **Ausprägungen** konkretisiert. Zudem erfolgt einer Unterteilung in anwendungsbezogene-, systembezogene sowie objektbezogene Merkmale. Nach DEINDL besitzt ein intelligentes Objekt folgende objektbezogenen Merkmale: *Grad der Informationsverarbeitung, Sensorik, Aktorik* und *Mobilität*. Das intelligente Objekt kann wiederum Teil eines Systems intelligenter Objekte sein. Die Systeme intelligenter Objekte besitzen systembezogene Merkmale, wie *Koordination, Ort der Informationsverarbeitung* sowie *Ort der Datenhaltung*. Vor dem Hintergrund eines bestimmten Zwecks setzen die Systeme intelligenter Objekte bestimmte Anwendungen um.

Beispiele für intelligente Anwendungen sind *Intelligente Instandhaltung*, *Assistenzsysteme* und *Automatische Transaktion*. Die Anwendungen werden durch die Merkmale *Grundfunktion*, *Automatisierungsgrad* sowie *horizontale Integration* beschrieben [Dei14, S. 75ff.]. Bild 3-6 stellt die Merkmale und Merkmalsausprägungen zusammenfassend dar. Die Zusammenhänge und Abhängigkeiten bei der Gestaltung von intelligenten Objekten hat DEINDL in einer Ontologie abgebildet, die Auswahl zu unterstützen [Dei14, S. 119].

Anwendung	Grundfunktion	Lokalisierung	Überwachung	Objektinformation	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 3-6: Beschreibende Merkmale und Ausprägungen für intelligente Objekte nach DEINDL [Dei14, S. 92]

Für die Gestaltung von intelligenten Objekten entwickelte DEINDL eine **Vorgehensweise**, die sich an den Hauptphasen der Konstruktion orientiert (u.a. nach VDI 2221 oder PAHL/BEITZ): Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten [Dei14, S. 183ff.]. Ein wesentlicher Unterschied zu den Tätigkeiten der Konstruktion zu der Vorgehensweise von DEINDL liegt in der Phase des Konzipierens. DEINDL definiert, dass das Konzipieren im Wesentlichen die Ermittlung von Funktionen und Funktionsstrukturen sowie die Suche nach prinzipiellen Lösungen umfasst. Die erarbeiteten Hilfsmittel sollen in dieser Phase bei der Definition von Funktionen intelligenter Objekte sowie entsprechenden Lösungen unterstützen. Das Wissen über Funktionen und Lösungen stellt die entwickelte Ontologie zur Verfügung [Dei14, S. 139ff.].

Bewertung:

Der Ansatz von DEINDL gibt eine Übersicht über die Anwendung intelligenter Objekte sowie der damit verbundenen Merkmale und Merkmalsausprägungen. Mit Hilfe der Vorgehensweise zur Gestaltung intelligenter Objekte und der Ontologie können Entwickler bei der Entwicklung intelligenter Objekte unterstützt werden. Die Vorgehensweise orientiert sich an etablierten Vorgehen der Konstruktion (wie z.B. PAHL/BEITZ). Daher ist sie

prinzipiell für die Anwendung im Maschinen- und Anlagenbau geeignet. Jedoch bleibt sie insb. für die Analyse von Potentialen unkonkret. Die Integration von Kunden ist nicht vorgesehen. Der Einsatz von mathematischen Optimierungsverfahren oder maschinellen Lernverfahren wird nicht zur Weiterentwicklung der Systeme vorgeschlagen.

3.1.6 Leitfaden Industrie 4.0 nach ANDERL ET AL.

Mit der Vision der vierten industriellen Revolution verschmelzen Produktionstechnik und moderne Informations- und Kommunikationstechnik zunehmend zu einer neuen Stufe der Wertschöpfung. Vor diesem Hintergrund bietet die Einführung von Lösungsansätzen von Industrie 4.0 für die Unternehmen des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus eine Chance, auf die veränderten Bedingungen globaler Märkte zu reagieren [APW+15, S. 4]. Jedoch stellt die Umsetzung dieser Vision für viele Unternehmen eine Herausforderung dar, da zumeist Lösungsansätze zur Umsetzung nicht bekannt sind. Aus dieser Motivation heraus haben ANDERL ET AL. einen Leitfaden erarbeitet, mit denen mittelständische Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus in die Lage versetzt werden, die eigene Umsetzung von Industrie 4.0 zu unterstützen. Der erarbeitete **Leitfaden Industrie 4.0** umfasst eine Vorgehensweise sowie einen sogenannten Werkzeugkasten Industrie 4.0 [APW+15, S. 6].

Die **Vorgehensweise** besteht aus fünf Phasen, die in einem Projektteam im Unternehmen bearbeitet werden. Die Phasen sind Vorbereitung, Analyse, Kreativität, Bewertung und Einführung. Das Ziel der **Vorbereitungsphase** ist ein einheitliches Verständnis zum Thema Industrie 4.0 im eigenen Unternehmen bzw. der eigenen Produktion. Hierzu werden die grundlegenden Kenntnisse des eigenen Marktes bzw. der eigenen Produktion erfasst. Basierend auf diesen Kenntnissen wird die Grundlage zur Erarbeitung von Produktideen bzw. Verbesserungen der eigenen Produktion geschaffen. Nachfolgend beginnt die Analysephase. In der **Analysephase** werden die bereits vorhandenen Kompetenzen von Industrie 4.0-Technologien identifiziert. Bei der Identifikation der Kompetenzen erfolgt eine Orientierung an dem Werkzeugkasten Industrie 4.0. Im nächsten Schritt beginnt die **Kreativitätsphase**, bei der neue Ideen definiert sowie damit verbundene Geschäftsmodelle ausgearbeitet werden. Die Ideen werden in Workshops identifiziert, gesammelt, diskutiert und weiterentwickelt. Der Werkzeugkasten unterstützt die kreative Phase. Die erarbeiteten Konzepte für Geschäftsmodelle werden im Rahmen der anschließenden **Bewertungsphase** hinsichtlich des Marktpotentials und des Umsetzungsaufwandes bewertet. Ziel ist die Identifikation von Geschäftsmodellen mit geringem Aufwand sowie hohem Potential unter Berücksichtigung der eigenen Stärken. Als letzter Schritt folgt die **Einführungsphase**. In dieser Phase arbeitet das Projektteam die Vorschläge zur Vorlage bei der Unternehmensleitung aus. Bei positiver Prüfung erfolgt die Überführung in eigenständige Projekte [APW+15, S. 10].

Der **Werkzeugkasten Industrie 4.0** zeigt handhabbare Entwicklungsstufen für verschiedene Anwendungsebenen (z.B. Integration von Sensoren/Aktoren) von Industrie 4.0 auf. Der Werkzeugkasten wird in der Analysephase sowie Workshops (z.B. zur Ideengenerierung) angewendet. Er ist als Impulsgeber zur Umsetzung von Industrie 4.0 zu verstehen. Der Werkzeugkasten gliedert sich in die Bereiche **Produkt** und **Produktion** [APW+15, S. 11ff.]. Bild 3-7 zeigt einen Ausschnitt des Werkzeugkastens für den Bereich Produkt.

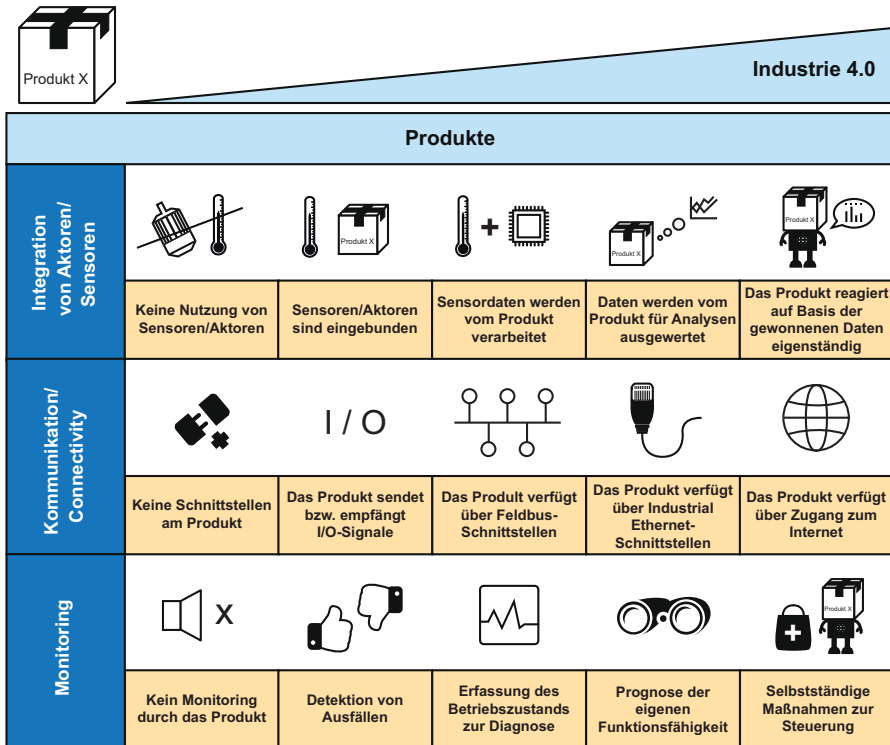


Bild 3-7: Ausschnitt des Werkzeugkastens (Bereich: Produkt) nach [APW+15, S. 12]

Bewertung:

Der Leitfaden Industrie 4.0 unterstützt mittelständische Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus bei der Identifikation von Potentialen im Kontext von Industrie 4.0. Der Leitfaden wurde bereits bei Unternehmen eingesetzt und ist daher als geeignet für den Einsatz im Maschinen- und Anlagenbau einzuschätzen. Insbesondere der Werkzeugkasten liefert einen guten Ansatzpunkt für die Einschätzung der eigenen Leistungsfähigkeit und unterstützt bei der Definition von Zielen des Unternehmens zur Weiterentwicklung von Produktion und Produkten. Hinsichtlich der Lösungen zur Leistungssteigerung der Informationsverarbeitung des technischen Systems bleibt der Leitfaden jedoch unkonkret. Die Bedeutung des Kunden für die Weiterentwicklung wird beschrieben, eine Einbindung im Sinne der Kundenintegration wird jedoch nicht näher erläutert.

3.2 Bedarfsidentifikation zur Modifikation

Schwachstellen des bestehenden Systems oder Wünsche des Kunden an neue Systemgenerationen bilden den Ausgangspunkt zur Systemverbesserung. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Abschnitt Methoden vorgestellt, mit denen der Bedarf zur Modifikation identifiziert werden kann. Auf dieser Basis ist die Suche nach Lösungen möglich. Hierzu gehören Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen (vgl. Abschnitt 3.2.1), die Identifikation von Produktfeatures nach BACCIOTTI ET AL. (vgl. Abschnitt 3.2.2), das Produktbenchmarking nach SABISCH und TINTELNOT (vgl. Abschnitt 3.2.3), Quality Function Deployment (vgl. Abschnitt 3.2.4), das KANO-Modell der Kundenzufriedenheit (vgl. Abschnitt 3.2.5), die Lead-User-Integration (vgl. Abschnitt 3.2.6), der Empathic Design-Ansatz (vgl. Abschnitt 3.2.7) sowie der Ansatz des Service Driven Design nach EISENHUT (vgl. Abschnitt 3.2.8).

3.2.1 Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen

Methoden zur **Ermittlung der Sicherheit und Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme** haben das Ziel, den Entwickler bei der Prognose der Zuverlässigkeit und Sicherheit eines Systems sowie der Erkennung von Schwachstellen zu unterstützen, um diese nachfolgend zu beseitigen [BGJ+09, S. 7f.], [Dor15, S. 68]. Die Analysen können unterteilt werden in qualitative und quantitative Analysen. Qualitative Analysen ermöglichen das Ermitteln von Ausfallmöglichkeiten sowie die Klassifizierung und qualitative Bewertung der zugehörigen Ursache-Wirkungsketten. Zu den bekanntesten qualitativen Analysen gehören die FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis; Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse*) sowie die FTA (*Fault Tree Analysis, Fehlerbaumanalyse*) [Dor15, S. 15f.], [BGJ+09, S. 7ff.]. Quantitative Methoden sind eng verknüpft mit Verfahren aus der Statistik und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, da z.B. Lebensdauerversuche oder Schadenstatistiken zum Einsatz kommen, um Ausfälle etc. zu quantifizieren [BGJ+09, S. 9]. Hierzu zählen u.a. auch Regressionsmodelle. Mit Hilfe dieser können einfache Modelle zur Beschreibung der Lebensdauer erstellt werden [BGJ+09, S. 16f.]. Nachfolgend wird stellvertretend für die Analysemethoden die etablierte FMEA näher vorgestellt, um ein tiefergehendes Verständnis für diese Ansätze zu vermitteln.

Die **FMEA** wird typischerweise in moderierten Workshops mit Fachexperten aus den involvierten Fachdisziplinen durchgeführt [Eri05, S. 235ff.], [Dor15, S. 86]. Ziel der FMEA ist die Identifikation aller möglichen Ausfallarten im System oder den Teilsystemen. Zudem werden die Ausfallursachen sowie Ausfallfolgen ermittelt. Mögliche Ausfallarten adressieren beispielsweise folgende abstrakte Fehler: Funktion wird nicht ausgeführt, Funktion wird nicht korrekt ausgeführt, Funktion wird nicht zum richtigen Zeitpunkt ausgeführt oder Funktion verursacht inkorrektes Verhalten [Eri05, S. 242]. Basierend auf den Ergebnissen der Arten, Ursachen und Folgen wird die sogenannte Risikoprioritätszahl (RPZ) bestimmt (repräsentiert durch Auftretenswahrscheinlichkeit, Entde-

ckungswahrscheinlichkeit sowie Schwere). Im nachfolgenden Schritt werden Möglichkeiten zur Verbesserung des Systems bestimmt [BGJ+09, S. 8f.], [Eri05, S. 235ff.]. Die Ergebnisse der Analyse werden in einem FMEA-Formblatt dokumentiert (vgl. Bild 3-8).

Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)										
System: ... Blatt: .. Bearbeiter: ... Stand: ...										
Nr.	Systemelement	Funktion(en)	Ausfallmöglichkeit	Ausfallauswirkung(en)	S	Ausfallursache(n)	E	A	RPZ	Verbesserungsmaßnahme(n)
...	...									

S: Schwere der Ausfallauswirkung **A:** Auftretenswahrscheinlichkeit der Ausfallursache
E: Entdeckungswahrscheinlichkeit der Ausfallursache **RPZ:** Risikoprioritätszahl ($RPZ = S \times E \times A$)

Bild 3-8: FMEA-Formblatt nach [Eri05, S. 247ff.], [Dor15, S. 87]

Die FMEA kann im Allgemeinen auf **Basis** von Prozessen (Prozess-FMEA) sowie Produkten (Produkt-FMEA) durchgeführt werden [Eri05, S. 242]. Die Produkt-FMEA umfasst u.a. auch eine Analyse der Hardware (Konstruktions-FMEA etc.), Software sowie der Produktfunktionen (System-FMEA) [Eri05, S. 242], [Dor15, S. 87f.]. Mit Hilfe der Prozess-FMEA können z.B. Prozessfehler in Produktion, Wartung oder dem Betrieb identifiziert werden [Eri05, S. 242]. Hierdurch eignet sich die FMEA sowohl in den frühen Phasen der Produktentstehung, wie z.B. der Konzipierung, als auch in Entwurf und Ausarbeitung, wie z.B. im Rahmen der Mechanik-Konstruktion [Dor15, S. 86ff.].

Bewertung:

Die beschriebenen Methoden ermöglichen eine systematische Analyse von Schwachstellen des Systems. Die Schwachstellen werden in vielfältiger Weise dokumentiert und dienen als Ausgangspunkt zur Verbesserung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind insb. die qualitativen Methoden von besonderer Bedeutung, da diese besonders für die frühen Phasen der Produktentstehung geeignet sind (insbesondere die FMEA sowie die FTA). Darüber hinaus können diese auch integrativ auf Basis frühzeitiger Spezifikationen des Systems (SysML [Alt12, S. 145ff.], [JT13, S. 828ff.], UML [Dou09-ol], CONSENS [GKP09] etc.) genutzt werden.

3.2.2 Identifikation von Produktfeatures nach BACCIOTTI ET AL.

Die Qualität des Ideenfindungsprozesses sowie der resultierenden Ergebnisse ist in der Regel abhängig von der Fähigkeit, den möglichen Entwurfsraum für ein spezifisches Problem zu analysieren. Somit ist eine systematische und ganzheitliche Analyse des Entwurfsraums sicherzustellen, um Nutzenpotentiale für die Produktentwicklung zu identifizieren [BBR16b, S. 81]. Vor diesem Hintergrund haben BACCIOTTI ET AL. einen Ansatz entwickelt, mit dem die **Ideenfindung** unterstützt werden kann. In Rahmen des Ansatzes werden mit Hilfe eines Software-Werkzeugs **Stimuli** erzeugt, die eine erweiterte Analyse von Problemen sowie Lösungen ermöglichen sollen [BBR16b, S. 80ff.].

Die im Software-Werkzeug dargestellten Stimuli adressieren **vier Sichten bzw. Dimensionen**, die den Entwickler bei der Ideenfindung anregen sollen: *Wünsche und Forderungen*, *Stakeholder*, *Hierarchien des Systems* sowie *Lebenszyklen*. Bild 3-9 zeigt einen Überblick über die Sichten bzw. Dimensionen sowie die darin enthaltenen Elemente [BBR16b, S. 85ff.]. Die Elemente sind wiederum durch Spezifikationen weiter definiert. In der Dimension *Wünsche und Forderungen* sind z.B. die **Elemente** *Verlässlichkeit*, *Komfort der Nutzung* und *Ästhetik* enthalten. Das Element *Verlässlichkeit* ist weiter untergliedert in folgende **Spezifikationen**: *Schädigung des Umfelds durch das Produkt*, *Schädigung des Produkts durch Einflüsse des Umfelds*, etc. [BBR16b, S. 86].



Bild 3-9: Sichten/Dimensionen zur Ideenfindung nach [BBR16b, S. 85ff.]

Das **Vorgehen** zur Anwendung des Ansatzes wird nachfolgend beschrieben. Im Rahmen der Produktfindung kann der Entwickler z.B. die Spezifikation *Individualisierung des Produkts oder bestimmter Eigenschaften* aus dem Element *Style* auswählen. Durch diese Auswahl überlegt der Entwickler bewusst, ob die *Individualisierung des Produkts oder bestimmter Eigenschaften* Schwächen bzw. Potentiale aufweist und welche Lösungsideen hierzu definiert werden können. Zudem können im Software-Werkzeug auch Kombinationen von Spezifikationen ausgewählt oder automatisiert vorgeschlagen werden. Die Dokumentation der Ideen erfolgt stets integriert im Werkzeug [BBR16a, S. 5ff.].

Bewertung:

Der Ansatz beschreibt Sichten/Dimensionen, die bei der Definition von Produktideen zu berücksichtigen sind. Die Sichten/Dimensionen ermöglichen den Beteiligten eine erweiterte Sicht auf das Produkt sowie mögliche Potentiale zur Weiterentwicklung. Die beschriebenen Dimensionen und damit verbundenen Elemente sind sehr umfassend und ermöglichen eine tiefergehende Analyse des Systems. Das Vorgehen zur Anwendung des Software-Werkzeugs unterstützt den Entwickler nur bedingt bei Analyse. Zudem wird die Entwicklung von fortgeschrittenen Systemen nicht mit geeigneten Elementen bzw. Spezifikationen unterstützt.

3.2.3 Produktbenchmarking nach SABISCH und TINTELNOT

Unternehmen können nur dann im Wettbewerb bestehen, wenn ihre Leistungen ständig verbessert werden und Differenzierungen zum Wettbewerb bestehen [ST97, S. 11]. Vor diesem Hintergrund erarbeiteten SABISCH und TINTELNOT einen **integrierten Benchmarking-Ansatz**. Der Ansatz beruht auf der systematischen Analyse und der Bewertung der eigenen Marktleistung im Vergleich zu Leistungen der relevanten Wettbewerber. Zudem werden auch Trends der Branche berücksichtigt [ST97, S. 12]. Der Benchmarking-Ansatz erfüllt vier Grundfunktionen, die nachfolgend erläutert werden [ST97, S. 12ff.].

Mess- und Maßstabsfunktion: In diesem Rahmen wird identifiziert, wer die relevanten Mitbewerber sind und welche Leistungen diese am Markt positioniert haben. Auf dieser Basis wird nachfolgend analysiert, welche Leistungen die besten Lösungen hinsichtlich definierter Kriterien darstellen. Diese sind als Maßstab für die eigenen Leistungen zu betrachten. Darüber hinaus wird geprüft, wie sich die Leistungen zukünftig weiterentwickeln werden, um zukünftige Referenzen auszuwählen [ST97, S. 14].

Erkenntnisfunktion: Hierbei wird analysiert, welche Produktleistungen der Mitbewerber im Vergleich zur Eigenen besser oder schlechter sind. Zudem wird insbesondere auch der Markterfolg der Produkte bewertet. Im nächsten Schritt sind die Ursachen für die Abweichungen auszuarbeiten, um eine differenzierte Bewertung von Teillösungen zu ermöglichen. Die möglichen Referenzleistungen sind darauf basierend auszuwählen und als Ausgangsbasis für die eigene Weiterentwicklung zu nutzen [ST97, S. 14].

Zielfunktion: Nach der Erkenntnisphase gilt es zu definieren, welche Verbesserungen notwendig sind, um die Position des Unternehmens dauerhaft zu verbessern. Es gilt zu bestimmen, welche Voraussetzungen im Unternehmen geschaffen werden müssen, um z.B. zukünftig die beste Branchenlösung anbieten zu können [ST97, S. 14].

Implementierungsfunktion: Nach der Zieldefinition werden Maßnahmen definiert, um die Verbesserungen umzusetzen. Hierdurch sollen Randbedingungen geschaffen werden, um die Ziele zu erreichen und die gewünschte Marktposition auszubauen [ST97, S. 14].

Durch die Integration der beschriebenen Funktionen in der Produktentwicklung haben SABISCH und TINTELNOT ein **Vorgehen zur Produktentwicklung mit integriertem Benchmarking** erarbeitet. Das Vorgehen ist in Bild 3-10 dargestellt [ST97, S. 72ff.].

Zu Beginn erfolgt die **Ideenfindung**. Hierbei wird definiert, welche Ideen z.B. zur Weiterentwicklung von Produkten bestehen und welche verfügbaren Technologien prinzipiell genutzt werden können. Nachfolgend werden hinsichtlich dieser Ideen die potentielle Kunden und Wettbewerber identifiziert. Auf Basis einer **Analyse der Produkte der Wettbewerber** erhält das Unternehmen Kenntnisse über Referenzprodukte und über Möglichkeiten der Weiterentwicklung [ST97, S. 72f.]. Im nächsten Schritt erfolgt die **Projektheftarbeit**, die der Zielfestlegung dient. Hierbei werden die organisatorischen Rahmenbedingungen geklärt, um die Entwicklung ausreichend zu unterstützen. Darüber hinaus werden die wesentlichen Anforderungen und Wünsche hinsichtlich des Produkts

definiert [ST97, S. 73]. Auf Basis dieser Informationen beginnt die **Suche und Bewertung von dominanten Lösungen**. Die dominanten Lösungen repräsentieren das grundlegende Lösungsprinzip. Auf Basis der dominanten Lösungen werden nachfolgend konkrete **Lösungen für Teilkomponenten und Teilprozesse** gesucht. In dieser Phase erfolgt stets ein Benchmarking, um sogenannte Bestlösungen hinsichtlich der Teilkomponenten und -prozesse zu identifizieren. In einem letzten Schritt erfolgen Aufgaben, um ein **marktfähiges Produkt** zu erhalten [ST97, S. 74ff.].

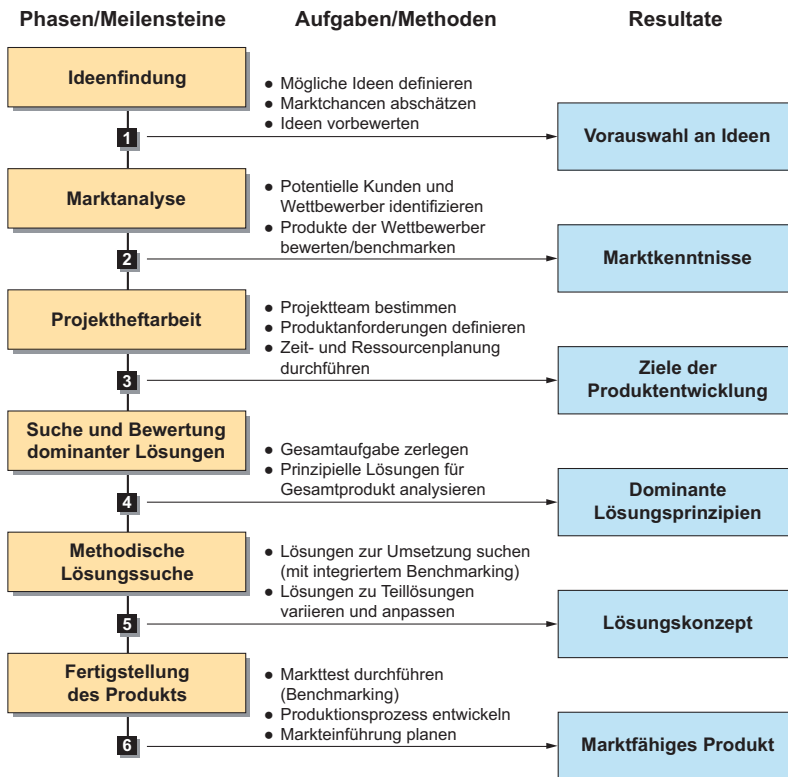


Bild 3-10: Produktentwicklung mit Benchmarking in Anlehnung an [ST97, S. 72ff.]

Bewertung:

Der Ansatz des integrierten Benchmarking adressiert einen kontinuierlichen Abgleich zwischen den eigenen Produkten, den Produkten der Wettbewerber, den technologischen Möglichkeiten als auch den Bedürfnissen der Kunden. Eine systematische Schwachstellenanalyse ist nicht vorgesehen. Der Ansatz schlägt keine Möglichkeiten vor, die Komplexität einer interdisziplinären Produktentwicklung mit Hilfsmitteln zu unterstützen. Die Berücksichtigung des Kunden findet mit der Analyse der Bedürfnisse und einem Markttest statt, jedoch erfolgt keine frühzeitige Bewertung des Konzepts durch den Kunden.

3.2.4 Quality Function Deployment

Die Methode **Quality Function Deployment (QFD)** hat das Ziel, Kundenanforderungen („Stimme des Kunden“) in Qualitätsmerkmale von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen zu übersetzen und einzuplanen. Hierdurch soll insb. die Kundenzufriedenheit gesteigert werden [GN05, S. 2]. Darüber hinaus soll durch den engen Kundenbezug das „Over-Engineering“ vermieden werden [PHF12, S. 124]. Die Methode verfolgt folgende drei übergeordnete **Ziele**: *Robustheit*, *Fehlerfreiheit* und *Treffsicherheit*. *Robustheit* definiert das Ziel, dass ausgewählte Lösungen sich robust hinsichtlich Marktänderungen und technischen Änderungen verhalten sollen. *Fehlerfreiheit* soll durch das frühzeitige Vermeiden von Fehlern erreicht werden. *Treffsicherheit* soll durch die Berücksichtigung der Kundenbedürfnisse sichergestellt werden [PS07, S. 22]. Der konzeptionelle Kern der QFD ist das **House of Quality (HoQ)**. Bild 3-11 stellt das *House of Quality* vereinfacht dar und visualisiert die **Schritte der Methode QFD**.

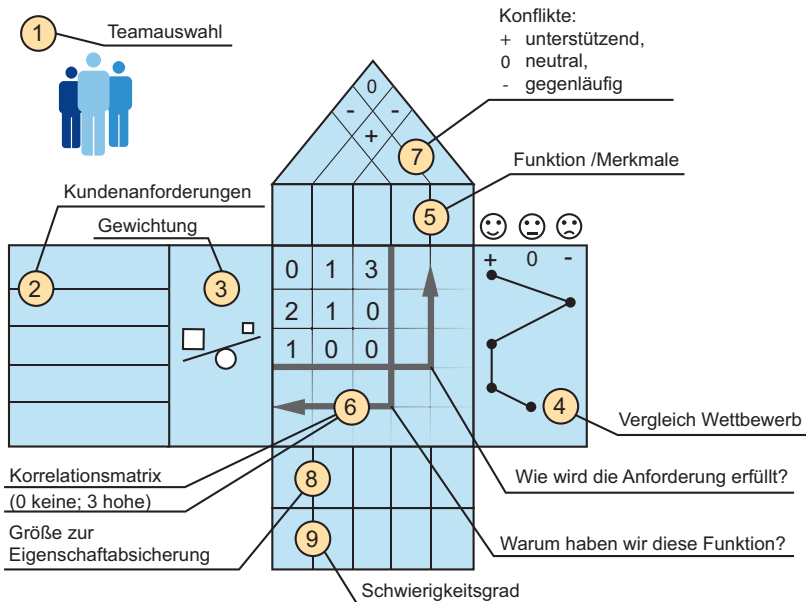


Bild 3-11: House of Quality in Anlehnung an [PS07, S. 496ff.] und [GEK01, S. 68]

Das *HoQ* kann als Verständigungsmittel zwischen den beteiligten Abteilungen verstanden werden. Vor diesem Hintergrund ist das Durchführen der QFD auch in interdisziplinären Projektteams möglich. Nach der Definition des Projektteams (1) werden die Kundenanforderungen z.B. durch Marktanalysen oder Interviews identifiziert (2). Diese bilden den Ausgangspunkt für das *HoQ* [PS07, S. 495]. Nach der Identifikation der Kundenanforderungen können diese im *HoQ* gewichtet werden (3). Zudem kann geprüft werden, wie gut oder schlecht z.B. der Wettbewerb ausgewählte Anforderung adressiert (4) [GEK01, S. 66]. Nachfolgend werden die Funktionen bzw. Merkmale aufgelistet (5), die

die Anforderungen umsetzen sollen. Das Resultat ist eine Korrelationsmatrix, die beschreibt, welche Anforderungen mit welchen Funktionen/Merkmalen zusammenhängen (6). In der QFD können zudem die Funktionen gegeneinander abgeglichen werden. Es wird geprüft, ob sich Funktionen gegenseitig unterstützen, gegenläufig sind oder sich neutral zu einander verhalten (7). Um die Zielerfüllung sicherzustellen werden zudem Zielgrößen definiert (8). Darüber hinaus wird im *HoQ* definiert, wie schwierig das Unternehmen die Erfüllung einschätzt (9). Nachfolgend werden im Projektteam Maßnahmen definiert, um die definierten Ziele umzusetzen [GEK01, S. 65ff.], [PS07, S. 495ff.].

Bewertung:

Die Methode unterstützt sowohl die Neu- als auch Weiterentwicklung von Produkten. Ferner unterstützt sie interdisziplinäre Teams und ermöglicht eine detaillierte Darstellung von Kundenanforderungen sowie die Gewichtung dieser. Die QFD umfasst ein systematisches Vorgehen. Die Durchführung ist in der Regel mit hohem Aufwand verbunden [GEK01, S. 68f.]. Die tabellarische Darstellung ist für den Einsatz in interdisziplinären Teams geeignet, wird jedoch bei umfangreichen Analysen komplex.

3.2.5 KANO-Modell der Kundenzufriedenheit

Das KANO-Modell stellt ein Hilfsmittel zur **Bewertung der Kundenzufriedenheit** dar. Der Ansatz basiert auf der Annahme, dass Produktattribute in drei Klassen unterschieden werden können. In Abhängigkeit der Klassen sowie dem Erfüllungsgrad der Kundenanforderungen (hinsichtlich der Erwartungen) resultieren unterschiedliche Effekte der Kundenzufriedenheit. Bei der Klassifikation der **Produktattribute** kann unterschieden werden in: *Basis-, Leistungs- sowie Begeisterungsattribute* [MSH09, S. 19f.], [GEK01, S. 76f.].

Der **Zusammenhang** zwischen der Klassifikation der **Produktattribute**, der **Erwartungserfüllung aus Kundensicht** (*Erwartungen nicht erfüllt bis Erwartungen übertroffen*) und resultierender **Kundenzufriedenheit** (*Kunde zufrieden, begeistert bis Kunde unzufrieden, enttäuscht*) kann im Kano-Modell abgebildet werden [MSH09, S. 19f.], [MH98, S. 28ff.]. Das Modell ist in Bild 3-12 dargestellt.

Auf der x-Achse ist die Erwartungserfüllung abgebildet. Die y-Achse stellt die Kundenzufriedenheit dar. Die Attributklassen erklären die verschiedenen Zusammenhänge zwischen Erwartungserfüllung und Kundenzufriedenheit [Höl08, S. 80ff.], [MSH09, S. 19f.], [GEK01, S. 76]. Die Zusammenhänge werden nachfolgend anhand der drei Klassen erläutert:

Basisattribute (*,must-be‘*) werden vom Kunden vorausgesetzt. Diese werden in der Regel nicht explizit vom Kunden artikuliert und werden meist als Mindestanforderungen angesehen. Das Nicht-Erfüllen geforderter Attribute resultiert in großer Unzufriedenheit des Kunden. Das Übertreffen der Erwartungserfüllung resultiert nicht in Zufriedenheit, sondern vermeidet Unzufriedenheit des Kunden [Höl08, S. 82], [MH98, S. 28].

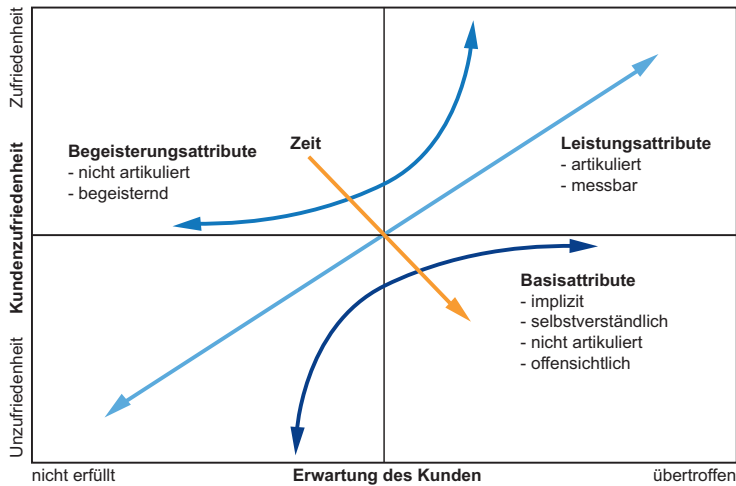


Bild 3-12 KANO-Modell nach [MH98, S. 29], [MSH09, S. 20]

Leistungsattribute („one-dimensional“-requirements) werden entgegen der Basisattribute vom Kunden explizit verlangt. Bei diesen Attributen fällt bzw. steigt die Kundenzufriedenheit proportional zum Erfüllungsgrad der Kundenerwartungen. Leistungsattribute werden vom Kunden häufig auch zum Vergleich von Produkten verwendet. Daher können diese auch als Vergleichsattribute bzw. Vergleichsanforderungen bezeichnet werden [MH98, S. 28f.], [Höl08, S. 82, S. 46f.], [Par10, S. 46f.].

Begeisterungsattribute („attractive quality“-requirements) werden vom Kunden nicht explizit gefordert. Sie repräsentieren Attribute, zu denen Kunden geringe oder keine Erwartungshaltung aufgebaut haben (unbewusste Bedürfnisse). Vor diesem Hintergrund steigt die Kundenzufriedenheit überproportional. Begeisterungsattribute führen zu einer Differenzierung zu Produkten im Wettbewerb [Höl08, S. 82], [MH98, S. 29f.].

Die **Einschätzung der Attributklasse** ist abhängig von dem untersuchten **Kundensegment** und weist eine Veränderung über die Zeit auf. Beispielsweise existiert im Premiumsegment eine andere Wahrnehmung der Attribute als im Low-Cost Bereich. Darüber hinaus werden Begeisterungsattribute nach einer gewissen **Zeit** zu Leistungsattributen. Dies erfolgt z.B. wenn Mitbewerber ebenfalls diese Attribute anbieten und eine entsprechenden Vergleichshaltung entsteht [Höl08, S. 84ff.].

Die **Einschätzung der Attributklasse** ist abhängig von dem untersuchten **Kundensegment** und weist eine Veränderung über die Zeit auf. Beispielsweise existiert im Premiumsegment eine andere Wahrnehmung der Attribute als im Low-Cost Bereich. Darüber hinaus werden Begeisterungsattribute nach einer gewissen **Zeit** zu Leistungsattributen. Dies erfolgt z.B. wenn Mitbewerber ebenfalls diese Attribute anbieten und eine entsprechenden Vergleichshaltung entsteht [Höl08, S. 84ff.].

Bewertung:

Das KANO-Modell stellt einen Ansatz dar, die Zusammenhänge zwischen Produktattributen und resultierender Kundenzufriedenheit in Abhängigkeit der Erwartungserfüllung des Kunden qualitativ zu beschreiben. Das Produkt wird nicht als Ganzes betrachtet, sondern stets hinsichtlich einzelner Attribute. Hierdurch kann eine gezielte Analyse von einzelnen, neuen Attributen erfolgen. Vor diesem Hintergrund ist eine Berücksichtigung der im Rahmen der Systematik zur Bewertung der neuen Produktfunktionen sinnvoll.

3.2.6 Lead-User Integration

In den 80er-Jahren entwickelte VON HIPPEL den sogenannten Lead-User Ansatz, der eine **aktive Kundenintegration in den Innovationsprozess** vorsieht [SW04, S. 31f.]. Beim Lead-User Ansatz wird die Expertise von innovativen Anwendern – den sogenannten Lead-Usern – genutzt, um fortschrittliche Produktideen zu finden [Lüt07, S. 48ff.]. Die Lead-User unterstützen bei der Formulierung von Bedürfnissen, der Ausarbeitung von Produktkonzepten sowie der Absicherung der Konzepte hinsichtlich der Marktrelevanz [Lüt07, S. 50f.], [Wec05, S. 18f.]. Die wesentlichen Charakteristika von Lead-Usern im Unterschied zu anderen Nutzern sind folgende:

- Die **Bedürfnisse** von Lead-Usern sind in der Regel dem Markt weit voraus. Daher repräsentieren ihre Bedürfnisse eine Art Vorhersage für den Markt von morgen [Lüt07, S. 49], [Hip88, S. 107].
- Der **Nutzen von innovativen Lösungen** bzgl. ihrer Bedürfnisse ist für Lead-User als besonders hoch einzuschätzen. Der erwartete Nutzen für Lead-User kann sogar so hoch sein, dass selbst innovative Lösungen entwickelt werden („Not macht erfinderisch“) [Lüt07, S. 49], [Hip88, S. 107].

Aus dieser Motivation heraus sind Lead-User bereit, ihre eigenen Ideen in die Produktfindung einzubringen, um von den resultierenden Lösungen zu profitieren. Der Lead-User Ansatz umfasst vier Prozessschritte. Das **Vorgehen** ist in Bild 3-13 dargestellt [HLL07, S. 65ff.].

In der ersten Phase **Definition des Projekts** wird ein interdisziplinäres Team zusammengestellt, das die Ziele des Projekts bestimmt und die Zielmärkte festlegt. Das Team sollte aus ca. drei bis sechs Personen bestehen, die in etwa die Hälfte der Arbeitszeit im Lead-User-Projekt mitwirken. Die gesamte Projektphase erstreckt sich in der Regel auf vier bis neun Monate [HLL07, S. 65f.].

In der nächsten Phase **Identifikation von Bedürfnissen und Trends** werden relevante Trends ermittelt. Diese sind häufig Ursache dafür, dass Lead-User entsprechende Bedürfnisse entwickeln werden. In diesem Zusammenhang werden u.a. Gesellschafts-, Markt-, Wirtschafts- und Technologietrends ermittelt. Die Quellen für entsprechende Trends sind vielfältig, wie Publikationen von Trendforschern, amtliche Statistiken, Befragungen von Experten oder auch Patentrecherchen [HLL07, S. 66f.].

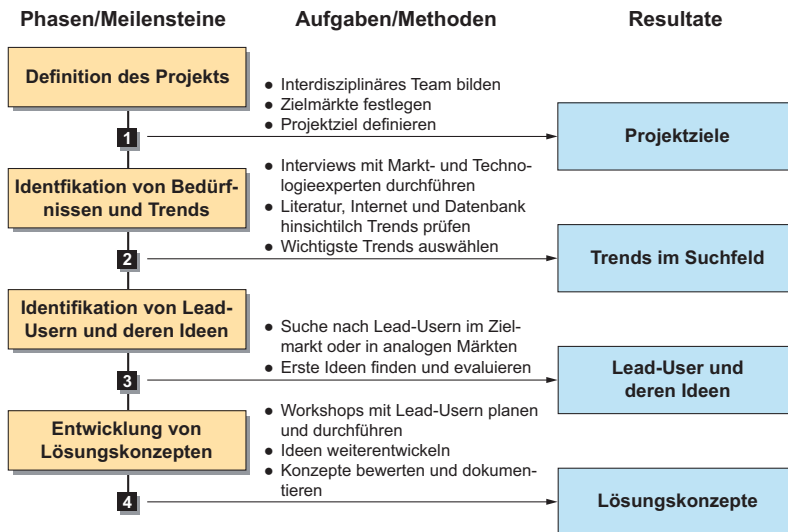


Bild 3-13: Identifikation und Einbindung von Lead-Usern nach [HLL07, S. 66]

Nachfolgend beginnt die Phase **Identifikation von Lead-Usern und deren Ideen**. Es gilt die Lead-User zu identifizieren, die die zuvor identifizierten Trends anführen können. Hierzu ist es sinnvoll, zunächst Indikatoren festzulegen, mit denen die zu suchenden Lead-User gut charakterisiert werden können. Bei der nachfolgenden Identifikation der Lead-User existieren zwei unterschiedliche Vorgehensweisen. Beim **Screening-Ansatz** werden aus einer großen Anzahl an Produktanwendern, diejenigen gesucht, die eine hohe Übereinstimmung mit den definierten Indikatoren aufweisen („Rasterfahndung“). Das Vorgehen ist sinnvoll, wenn die Anzahl der Kunden überschaubar ist, sodass ein vollständiges Screening möglich ist. Beim **Networking-Ansatz** werden hingegen zunächst nur einige wenige Kunden einbezogen. Diese werden gefragt, ob ihnen selbst weitere Produktanwender bekannt sind, die bereits neue Bedürfnisse geäußert haben. Auf Basis der „Weiterempfehlungen“ werden relevante Anwender identifiziert [HLL07, S. 67f.].

Die letzte Phase befasst sich mit der **Entwicklung von Lösungskonzepten**. Hierbei werden Ideen identifiziert, ausgearbeitet und kombiniert. Dies erfolgt z.B. in Workshops mit Lead-Usern und Mitarbeitern. Die Workshops dauern typischerweise zwei bis drei Tage. Im Vorfeld sollte zudem definiert werden, wie die Verwertung von Nutzungsrechten abgestimmt ist („Intellectual Property Rights“). Zu Beginn der Workshops werden i.d.R. Probleme von bestehenden Marktlösungen identifiziert und Anforderungen an zukünftige Produkte abgeleitet. Zu den entsprechenden Anforderungen können mit Hilfe von Kreativitätstechniken Innovationsideen in Form von Skizzen, Konzeptbeschreibungen bzw. Modellen ausgearbeitet werden. Spezifizierte Ideen werden nachfolgend durch das Team geprüft und bewertet, bevor eine Vorstellung bei den Entscheidungsträgern im Unternehmen stattfindet [HLL07, S. 68].

Bewertung:

Mit Hilfe des Lead-User Ansatzes soll zum einen die Auswahl von Kunden unterstützt werden, die zur Teilnahme an fortschrittlichen Projekten geeignet sind. Zum anderen sollen diese eingebunden werden, um Bedürfnisse und Ideen hinsichtlich neuer Produktinnovationen einzubringen. Der Lead-User Ansatz wurde zudem schon im Industriegüterbereich und Endverbrauchermarkt erfolgreich eingesetzt [HLL07, S. 64]. Dennoch ist eine Dauer von ca. vier bis neun Monaten als sehr hoch einzuschätzen, insb. für den Einsatz in mittelständischen Unternehmen. Vor dem Hintergrund der zu erarbeitenden Systematik ist insb. die Phase der Trendermittlung weniger relevant. Der Nutzen bei der Einbindung im Rahmen der Formulierungen von Bedürfnissen und Lösungen ist trotzdem als hoch einzuschätzen.

3.2.7 Empathic Design

Kunden sind sich ihrer Bedürfnisse nicht immer bewusst. Beispielsweise erarbeiten Kunden selbstständig implizite Lösungen im Umgang mit den Produkten, um auftretende Probleme zu lösen. Die Ursache wird nicht mehr bewusst wahrgenommen [Lüt07, S. 46]. **Empathic Design** bezeichnet die Methode, bei der Kunden in natürlicher Umgebung beim Umgang mit dem Produkt beobachtet werden, um die entsprechenden unbewussten Probleme und Lösungen identifizieren zu können [LR97a, S. 102f.]. Im Gegensatz dazu verfolgt das Konzept der **Produktklinik** eine Beobachtung im künstlichen Laborumfeld [Bre12, S. 29]. Viele Informationen bleiben jedoch im künstlichen Umfeld unentdeckt, wie z.B. eine alternative Produktverwendung des Kunden [Lüt07, S. 47]. Ein **Beispiel** für identifizierte Anwendungen durch Empathic Design stellt die Verwendung von Speiseöl bei Rasenmähern dar. So beobachtete ein Produktmanager für Speiseöl, wie sein Nachbar Speiseöl auf die Unterseite des Rasenmähers sprühte. Das Speiseöl verhinderte, dass auf der Unterseite des Rasenmähers der Rasen haften bleibt [Lüt07, S. 47].

Das **Vorgehen** beim Empathic Design kann in vier Phasen unterteilt werden. In der ersten Phase wird die **Beobachtung organisiert**. Hierzu gilt es verschiedene Nutzergruppen zu identifizieren. Nachfolgend wird definiert, wer die Beobachtung durchführen soll. Dies können z.B. Entwickler oder Experten für Ergonomie sein. In einem letzten Schritt ist zu definieren, welches Verhalten im Fokus der Beobachtung steht. In der nächsten Phase erfolgt die **Durchführung der Datenerfassung**. Hierbei werden offene Fragen an den Kunden gestellt („Warum tun Sie das gerade?“). Daraus resultierend können Ursachen für alternative Verwendungen identifiziert werden. Die Beobachtungen werden in einem Protokoll festgehalten und ggf. durch Fotos und/oder Videos ergänzt. Anschließend beginnt die Phase **Auswertung und Interpretation der Daten**. In diesem Rahmen werden Probleme hinsichtlich der Verwendung abgeleitet. Es ist zu definieren, welche Produktfunktionen Verbesserungsbedarf aufweisen. In der nächsten Phase erfolgt die **Entwicklung erster Problemlösungen**. Hierzu werden Workshops mit den entsprechenden Teammitgliedern unter Verwendung von Kreativitätstechniken durchgeführt. Die resultierenden Ideen werden dokumentiert und bewertet [Lüt07, S. 47f.], [LR97a, S. 108ff.].

Bewertung:

Auf Basis aktueller Marktlösungen können durch den Empathic Design-Ansatz implizite Bedürfnisse des Kunden identifiziert werden. Hierzu wird der Kunde in seinem natürlichen Umfeld beobachtet, um alternative Verwendungen oder Vorgehensweisen des Kunden zu identifizieren. Hierdurch können Rückschlüsse auf Probleme bei der Verwendung offengelegt oder auch mögliche Lösungen aufgezeigt werden. Diese Art der Kundenbeobachtung kann ggf. auch im Rahmen von Servicearbeiten beim Kunden durchgeführt werden, ohne den Kunden bewusst zu konfrontieren. Im Vergleich zu anderen Branchen sind im Maschinen- und Anlagenbau Besuche beim Kunden z.B. zu Service- bzw. Wartungszwecken häufig. Vor diesem Hintergrund ergibt sich das Potential, den Service verstärkt für die Weiterentwicklung bestehender Systeme einzubringen.

3.2.8 Service Driven Design nach EISENHUT

Im Unternehmen bestehen i.d.R. zahlreiche Quellen von implizitem und explizitem Kundenwissen. Dieses Wissen gilt es als wichtige Quelle für neue Ideen zur Verbesserung von bestehenden Produkten zu nutzen [Her05, S. 119]. Zu den **Quellen und Formen des Kundenwissens** zählen z.B. mündlich kommunizierte Einwände in einem Verkaufsgespräch, Beschwerden, formulierte Verbesserungsvorschläge oder auch Service-Berichte [Her05, S. 119ff.], [HR09, S. 163]. Das Konzept des **Service-Driven Designs** adressiert insb. den Einsatz von Service-Berichten, um Schwachstellen von Produkten systematisch zu erfassen, zu sammeln und in der Entwicklung zu nutzen [Eis99, S. 1ff.].

Service-Berichte werden vom technischen Kundendienst erstellt und umfassen als wesentliche Information, die **Störfall-Beschreibung**. Die Beschreibung kann folgendermaßen gestaltet sein: Prosatext ohne Vorstrukturierung, Prosatext mit gegebener Vorstrukturierung (z.B. mit der Klassifikation von Symptomen, Auslösern und durchgeführten Tätigkeiten) oder aus einer Vorstrukturierung mit definierten Schlagworten und ergänzendem Prosatext [Eis99, S. 65]. Oft bestimmt die Struktur das Nutzenpotential der Berichte. Schlecht formulierte, reine Prosatexte sind z.B. nur schwierig auszuwerten und bedingt geeignet [WPS+12, S. 89f.]. Um das Wissen weiter zu formalisieren und gezielt als Informationsrückfluss aus der Betriebsphase für die Produktentwicklung zu nutzen, erarbeitet EISENHUT u.a. eine kausalerorientierte Informationsstruktur für die Beschreibung von Störfällen. Bild 3-14 gibt einen Überblick über diese Struktur [Eis99, S. 155ff.].

Im Rahmen der **Spezifikation** wird zunächst der Störfall mit einer eindeutigen Nummer erfasst. Nachfolgend wird das Symptom spezifiziert. Für eine Druckmaschine könnte ein schlechter Ausdruck ein mögliches Symptom darstellen. Zu diesem Symptom wird in einem nächsten Schritt zunächst die fehlerverursachende Funktion identifiziert (z.B. *Farbe auf Druckplatte übertragen*). Anschließend werden dieser Funktion die relevante Baugruppe sowie das verantwortliche Einzelteil (z.B. *Farbwerk*) zugeordnet. Die Auslöser-Beschreibung spezifiziert den Störfall noch weiterführend (z.B. *fehlerhafte Justage*).

Basierend auf diesen Erkenntnissen kann eine spezifische Tätigkeit durchgeführt und dokumentiert werden (z.B. *Neu justiert* und *Testlauf durchgeführt*). In einem letzten Schritt können Folge-Maßnahmen definiert werden, wie z.B. *Klärung mit der Entwicklung*, falls bereits mehrere identische Fälle durch den Techniker bekannt sind [Eis99, S. 156ff.].

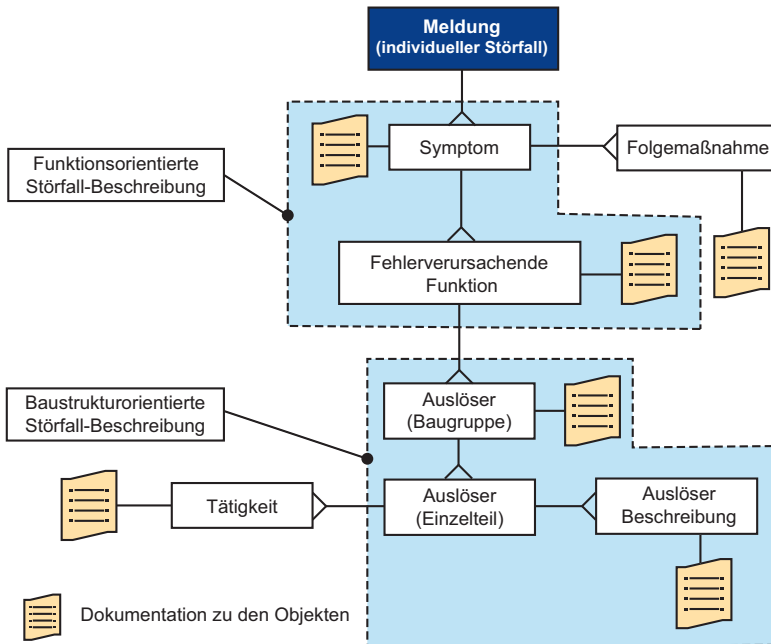


Bild 3-14: Kausalorientierte Informationsstruktur nach [Eis99, S. 156]

Bewertung:

Der Ansatz von EISENHUT stellt eine systematische Berücksichtigung von Störfällen zur Weiterentwicklung technischer Systeme dar. Mit Hilfe der kausalorientierten Informationsstruktur wird zudem frühzeitig der Bezug zu den Funktionen des Systems und den Systemelementen geschaffen. Über den Ansatz von EISENHUT hinaus, bestehen zahlreiche weitere Vorschläge, die Service-Mitarbeiter stärker in die Produktentstehung mit einzubeziehen ([Her05, S. 126]), um das implizite Kundenwissen zu nutzen. Insbesondere für den Maschinen- und Anlagenbau ergeben sich daraus viele Potentiale, da die Mitarbeiter in der Regel einen intensiven Kontakt zu Kunden pflegen und oftmals auch ein besseres Verständnis von spezifischen Anwendersituationen und -problemen (bzw. Anwenderbedürfnissen) aufweisen [Her05, S. 126ff.].

3.3 Stufen von Intelligenz in technischen Systemen

Die zu erarbeitende Systematik hat das Ziel, mechatronische Systeme intelligenter zu realisieren und somit die Leistungsfähigkeit des Systems zu steigern. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Abschnitt Ansätze zur Beschreibung von Möglichkeiten bzw. Fähigkeiten von intelligenten Systemen vorgestellt. Hierzu gehören das Reifegradmodell smarter Objekte (vgl. Abschnitt 3.3.1), die Architektur von Cyber-Physical Systems nach LEE ET AL. (vgl. Abschnitt 3.3.2), die Bewertung der Selbststeuerung von Logistiknetzwerken (vgl. Abschnitt 3.3.3), der Klassifizierungsrahmen von Embedded Devices (vgl. Abschnitt 3.3.4), Stufen der Industrie 4.0 Readiness (vgl. Abschnitt 3.3.5) sowie das Stufenmodell nach PORTER und HEPPELMANN (vgl. Abschnitt 3.3.6).

3.3.1 Reifegradmodell smarter Objekte

Die fortschreitende Umsetzung der Vision „Internet of Things“ führt zunehmend zur Entwicklung von sogenannten smarten Objekten, wie z.B. Smart Phones. PERÉZ HERNÁNDEZ und REIFF-MARGANIEC erkannten, dass zwar zahlreiche smarte Objekte existieren, jedoch meist nicht klar wird, welche Unterschiede zwischen diesen bestehen. Daraus resultierend sind auch die Potentiale zur Weiterentwicklung von smarten Objekten nicht immer bekannt. Vor diesem Hintergrund erarbeiteten PERÉZ HERNÁNDEZ und REIFF-MARGANIEC ein **Reifegradmodell für smarte Objekte** [PR14, S. 309ff.]. Grundlage des Modells war das Reifegradmodell *Capability Maturity Model Integration* [PR14, S. 310].

Die Klassifikation des Reifegrads von smarten Objekten basiert auf **fünf Leistungsstufen**. Jede Leistungsstufe ist von unteren Leistungsstufen abhängig. Das Erreichen von Leistungsstufen erfordert bestimmte Fähigkeiten, die ebenfalls von PERÉZ HERNÁNDEZ und REIFF-MARGANIEC definiert wurden [PR14, S. 314]. Insgesamt werden **17 Fähigkeiten** definiert. Zudem bestehen zahlreiche Abhängigkeiten zwischen den Fähigkeiten. Bild 3-15 zeigt eine Übersicht über das Reifegradmodell.

Die unterste Leistungsstufe wird als **essentielle Leistungsstufe** (*essential*) bezeichnet und umfasst die sogenannten Kernfähigkeiten von smarten Objekten. Auf Basis der *Identifikation* soll eine eindeutige Zuordnung und Abgrenzung zu anderen Objekten ermöglicht werden. Der Informationsaustausch zu anderen Objekten und dem Benutzer erfordert die Fähigkeit der *Kommunikation*. Smarte Objekte müssen darüber hinaus über eine *Energieversorgung* verfügen, um entsprechende Aktionen ausführen zu können. Die letzte Kernfähigkeit stellt ein *Informationsspeicher* dar. Hierdurch ist das Objekt in der Lage Informationen über sich selbst, dem Umfeld oder zumindest bzgl. der eigenen Identität zu speichern. Wenn ein System diese Fähigkeiten aufweist, kann es bereits als *smartes Objekt* bezeichnet werden [PR14, S. 312ff.].

Alle weiteren Fähigkeiten werden als **optionale Fähigkeiten** bezeichnet. Zwei dieser Fähigkeiten sind von besonderer Bedeutung, da sie Voraussetzungen für viele weitere Fähigkeiten darstellen. Diese sind *Vernetzung* und *Informationsverarbeitung*. Die beiden

Fähigkeiten erfordern die Integration von zusätzlicher Hardware in das System. Die *Vernetzung* soll eine Kommunikation auf mehreren Ebenen ermöglichen (angelehnt an das OSI-Schichtenmodell (Open Systems Interconnection Model) der International Organization for Standardization (ISO)). Die Fähigkeit der *Informationsverarbeitung* unterstützt das Ausführen von Operationen [PR14, S. 312f.]. Die Integration der Fähigkeiten *Vernetzung* und *Informationsverarbeitung* sowie *Programmierbarkeit* gelten als Voraussetzungen für das Erreichen der Leistungsstufe **Vernetzt** (*networked*). Die *Programmierbarkeit* ermöglicht eine Anpassung des Systems (z.B. Upgrade) [PR14, S. 314].

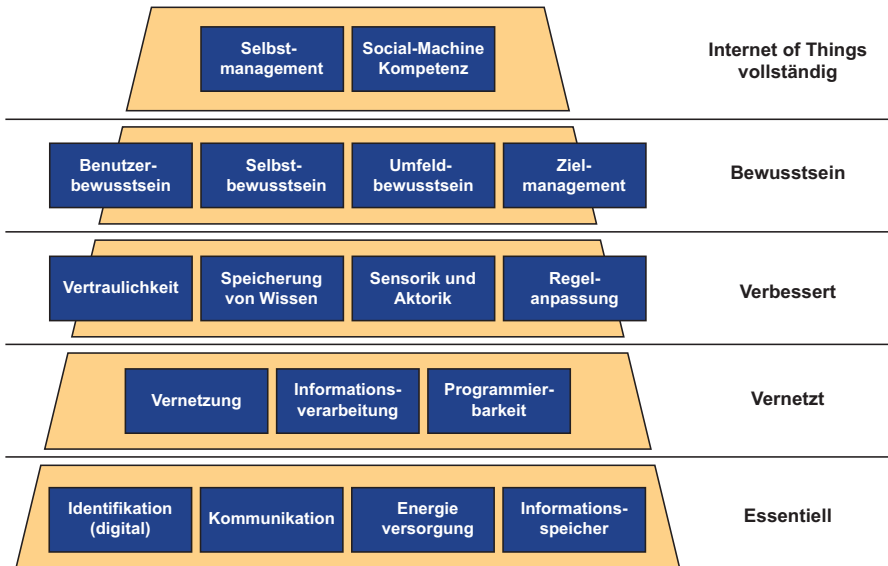


Bild 3-15: Reifegradmodell für smarte Objekte mit Leistungsstufen und Fähigkeiten in Anlehnung an [PR14, S. 312ff.]

Die nachfolgende Leistungsstufe wird als **Verbessert** bezeichnet (*enhanced*). Diese Leistungsstufe umfasst z.B. die Fähigkeit der *Vertraulichkeit*. Hierdurch sollen z.B. Informationen mit Schutzmaßnahmen vor unbefugtem Zugriff geschützt werden. Die *Speicherung von Wissen* beschreibt die Möglichkeit Aktionen des Systems zu speichern und ggf. an anderen Systeme weiterzuleiten. Fähigkeiten der *Sensorik und Aktorik* ermöglichen z.B. das Erfassen von Umweltinformationen sowie das Eingreifen zur Verhaltensanpassung. Darüber hinaus ermöglicht die Fähigkeit der *Regelanpassung* eine Adaption des Systems und der Verhaltensweisen auf Basis von vordefinierten Strategien [PR14, S. 313ff.].

Die Leistungsstufe **Bewusstsein** (*aware*) umfasst die Fähigkeiten zu einem bewussten Umgang hinsichtlich entsprechender Handlungsfelder. So beschreibt das *Benutzerbewusstsein* einen verbesserten Umgang mit dem Benutzer, in dem z.B. Gewohnheiten mit der Zeit erlernt werden. Das *Umfeldbewusstsein* adressiert das adaptive Verhalten des

Systems hinsichtlich Änderungen im Umfeld des Systems. Das *Selbstbewusstsein* beschreibt die Fähigkeit, den eigenen Systemzustand zu kennen (z.B. Schädigungen an Systemelementen) und darauf basierend das Verhalten anzupassen. Die Fähigkeit *Zielmanagement* ermöglicht das Berücksichtigen von Zielen und die Verhaltensanpassung gemäß dieser [PR14, S. 313ff.].

Die höchste Leitungsstufe wird als **vollständige Internet of Things-Stufe** bezeichnet (*IoT-complete*). Hierzu gehören die Fähigkeiten *Selbstmanagement* und die sogenannte *Social-Machine-Kompetenz*. Das *Selbstmanagement* ermöglicht ein eigenständiges Management über verschiedene Lebenszyklen des Systems. Die *Social-Machine-Kompetenz* beschreibt die Fähigkeit, mit anderen Objekten eigenständig zu kommunizieren und beispielsweise bedarfsgerecht Informationen auszutauschen [PR14, S. 313ff.].

Für das beschriebene Modell wurden von PERÉZ HERNÁNDEZ und REIFF-MARGANIEC zudem weitere mögliche **Anwendungsfelder** für den Einsatz beschrieben. Hierzu gehört z.B. die Verwendung durch Kunden, um Produktfunktionen und Charakteristika schnell zu verstehen und smarte Objekte besser differenzieren zu können. Software-Entwickler können beispielsweise Anforderungen an neue Systeme einfacher ableiten und zielgerichtet Lösungen erarbeiten [PR14, S. 315f.].

Bewertung:

Das Reifegradmodell stellt viele Möglichkeiten dar, um smarte Objekte leitungsfähiger zu gestalten. Zudem werden auch Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den Fähigkeiten beschrieben. Jedoch scheinen die Grenzen der Fähigkeiten in gewissen Bereichen zu verschwimmen. Teilweise werden konkrete Fähigkeiten des Systems (z.B. Informationen speichern) im Sinne von Produktfunktionen mit Handlungsfeldern bzw. Anwendungen (z.B. verbesserter Umgang mit dem Benutzer) vermischt. Daher bieten insb. die höheren Leistungsstufen keine konkreten Möglichkeiten zur Weiterentwicklung an. Aus Sicht der Mechatronik ist eine schrittweise Umsetzung nicht in der Art und Weise umsetzbar, da insb. die Berücksichtigung von Sensorik und Aktorik bereits essentiell ist.

3.3.2 Architektur von Cyber-Physical Systems nach LEE ET AL.

Mit der Vision von **Cyber-Physical Systems** entstehen zunehmend Systeme, die Teil einer global vernetzten Welt sind und mit eingebetteter Hardware und Software auch über ihre Anwendungsgrenzen hinweg miteinander agieren. Sie verfügen über Sensoren, um Daten in der physikalischen Welt zu erfassen und die Daten für netzbasierte Dienste zur Verfügung zu stellen sowie über Aktoren, mit denen auf Vorgänge in der physikalischen Welt eingewirkt werden kann [aca11, S. 5].

Um die Umsetzung dieser Vision zu unterstützen, erarbeiteten LEE ET AL. eine **Architektur** für **Cyber-Physical Systems**. Die Architektur besteht aus fünf Ebenen, die aufeinander aufbauen. Den Ebenen sind zudem Attribute zugeordnet. Bild 3-16 visualisiert die Architektur mit den Ebenen und ausgewählten Attributen [LBK15, S. 18ff.].

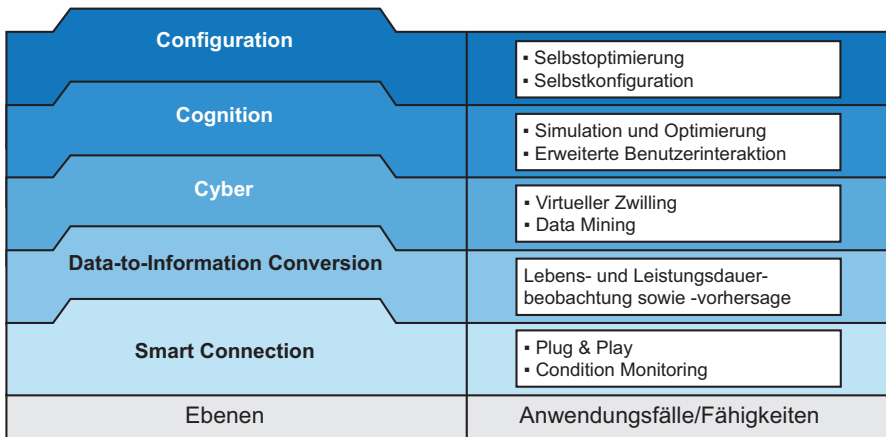


Bild 3-16: Architektur für Cyber-Physical Systems nach LEE ET AL. [LBK15, S. 18ff.]

Die Basis bildet die **Smart Connection**-Ebene. Diese beschreibt das Erfassen von verlässlichen Daten mit Hilfe von integrierter Sensorik oder durch andere Systeme. Anwendungsfälle sind z.B. *Plug & Play* oder *Condition Monitoring* [LBK15, S. 19].

Ziel der **Data-to-Information Conversion**-Ebene ist es, weiterführende Informationen aus den zur Verfügung stehenden Daten zu erhalten. Beispielsweise soll es durch Algorithmen möglich sein, Zustände des Systems zu extrahieren und die Restlebensdauer vorherzusagen. Hierdurch soll das System ein erweitertes Selbstbewusstsein erhalten. Darüber hinaus sind Anwendungsfälle im Bereich Smart Analytics möglich [LBK15, S. 19].

Die **Cyber**-Ebene ist die dritte Ebene der Architektur. In dieser werden u.a. virtuelle Zwillinge der Komponenten bzw. des gesamten Systems erzeugt. Diese ermöglichen insb. in den höheren Ebenen weitere Anwendungsfälle, wie z.B. dem Einsatz von *virtuellen Zwillingen*. Zudem finden weitere Cluster-Algorithmen Anwendung. Durch die Analyse von Prozesshistorien sollen zudem auch zukünftige Situationen vorhergesagt werden können [LBK15, S. 20].

Die **Cognition**-Ebene ermöglicht auf Basis des virtuellen Zwillings das Durchführen von entkoppelten Simulationen und Optimierungen, um z.B. Betriebspunkte für den zukünftigen Betrieb zu bestimmen. Darüber hinaus erfolgt z.B. auf Basis von Grafiken eine verbesserte Kommunikation mit dem Benutzer, um Entscheidungen effizient herbeizuführen [LBK15, S. 20].

Die **Configuration**-Ebene adressiert insbesondere Eigenschaften hinsichtlich der Resilienz des Systems. Die Ebene überwacht die Cognition-Ebene. Darüber hinaus unterstützen verschiedene Algorithmen eine Selbstoptimierung, Selbstkonfiguration oder Selbstadaptation [LBK15, S. 19f.].

Bewertung:

Die Architektur nach LEE ET AL. stellt ein Hilfsmittel zur Entwicklung von Cyber-Physical Systems dar. LEE ET AL. folgend umfasst die Architektur fünf verschiedene Ebenen, die aufeinander aufbauen. Die Architektur beschreibt die Möglichkeiten zur Gestaltung Cyber-Physical Systems. Durch die aufeinander aufbauenden Ebenen ist eine schrittweise Umsetzung denkbar, bleibt jedoch im Detail unkonkret. Eine Systematik zum Einsatz fehlt, ebenso wie Werkzeuge zur Identifikation der Potentiale in bestehenden Systemen.

3.3.3 Bewertung der Selbststeuerung von Logistiknetzwerken

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ wurde an der Universität Bremen der Paradigmenwechsel von Planungs- und Steuerungssystemen hin zu einer verstärkten Dezentralisierung erforscht. Die **Selbststeuerung** beschreibt Prozesse zur dezentralen Entscheidungsfindung. Ziel des Einsatzes von Selbststeuerung ist eine höhere Robustheit sowie die positive Emergenz des Gesamtsystems durch eine verteilte flexible Bewältigung von Dynamik und Komplexität [Win08, S. 350], [WH07, S. 1ff.],

Eine Herausforderung bei der Umsetzung der Selbststeuerung stellt die Wahl eines angemessenen **Selbststeuerungsgrads** dar. WINDT folgend soll der Selbststeuerungsgrad die Logistikleistung (z.B. hohe Termintreue, kurze Durchlaufzeiten) in angemessener Weise verbessern [Win08, S. 354]. Vor diesem Hintergrund wurde ein Evaluierungssystem erarbeitet. Dieses besteht aus folgenden vier Komponenten: *Mess- und Regelsystem*, *Potentialbestimmung der Selbststeuerung*, *Komplexitätswürfel* und *Kriterienkatalog zur Abschätzung des Selbststeuerungsgrads* (vgl. Bild 3-17) [Win08, S. 354ff.], [BW07, S. 52ff.].

Im Rahmen dieser Arbeit ist der morphologische **Kriterienkatalog zur Abschätzung des Selbststeuerungsgrads** von besonderer Relevanz. Der Katalog umfasst 13 Selbststeuerungsmerkmale (bzw. Kriterien) für logistische Systeme und zugehörige Ausprägungen [Win08, S. 356], [BW07, S. 52ff.]. Die Kriterien sind zudem in drei Kriteriengruppen unterteilt: *Entscheidungsfindung*, *Informationsverarbeitung* und *Entscheidungsausführung*. Bild 3-17 zeigt den Kriterienkatalog zur Abschätzung des Selbststeuerungsgrads [Win08, S. 357].

Die **Ausprägungen** sind so angeordnet, dass von links nach rechts eine Zunahme des Selbststeuerungsgrads resultiert. Um den Wert des Selbststeuerungsgrads zu bestimmen, sind zudem im Vorfeld die Kriterien zu gewichten, z.B. mit Hilfe einer Nutzwertanalyse oder dem paarweisen Vergleich. Aus der Summe der jeweiligen Multiplikation von Ausprägung und Gewichtung (kann individuell bestimmt werden) ergibt sich der sogenannte Selbststeuerungsgrad [Win08, S. 357f.].

Kriterien-kategorie	Kriterium	Gewichtung	Ausprägung			
Entscheidungsfindungs-Kriterien	Zeitliches Verhalten des Zielsystems	9	statisch ⁰	überwiegend statisch ¹	überwiegend dynamisch ²	dynamisch ³
	Organisationsstruktur	12	hierarchisch ⁰	überwiegend hierarchisch ¹	überwiegend heterarchisch ²	heterarchisch ³
	Anzahl Entscheidungsalternativen	12	keine ⁰	einige ¹	viele ²	unbegrenzt ³
	Art der Entscheidungsfindung	8	statisch ⁰	regelbasiert ^{1.5}		lernend ³
	Ort der Entscheidungsfindung	8	Systemebene ⁰	Subsystemebene ^{1.5}		Systemelementebene ³
	Vorhersagbarkeit des System-/Elementverhaltens	11	SV und EV deterministisch ⁰	EV nicht-/SV deterministisch ¹	SV nicht-/EV deterministisch ²	SV und EV nicht deterministisch ³
Informationsverarbeitungs-Kriterien	Ort der Datenhaltung	1	zentral ⁰	überwiegend zentral ¹	überwiegend dezentral ²	dezentral ³
	Ort der Datenverarbeitung	6	zentral ⁰	überwiegend zentral ¹	überwiegend dezentral ²	dezentral ³
	Interaktionsfähigkeit	1	keine ⁰	Datenbereitstellung ¹	Kommunikation ²	Koordination ³
Entscheidungsausführungs-Kriterien	Flexibilität	2	unflexibel ⁰	wenig flexibel ¹	flexibel ²	sehr flexibel ³
	Identifizierbarkeit	4	keine Elemente identifizierbar ⁰	einige Elemente identifizierbar ¹	viele Elemente identifizierbar ²	alle Elemente identifizierbar ³
	Fähigkeit zur Zustandsmessung	5	keine ⁰	andere ¹	selbst ²	selbst und andere ³
	Mobilität	1	stationär ⁰	gering mobil ¹	mobil ²	stark mobil ³

Bild 3-17: Morphologischer Kriterienkatalog zur Abschätzung des Selbststeuerungsgrads nach [Win08, S. 356], [BW07, S. 52ff.]

Bewertung:

Durch den beschriebenen Ansatz kann ein geeigneter Selbststeuerungsgrad identifiziert werden, um die logistischen Ziele zu verbessern. Der Grad wird durch einen morphologischen Kriterienkatalog ermittelt. Die Ausprägungen im Kriterienkatalog sind nicht ausreichend präzise, um Systeme systematisch weiterzuentwickeln. Die Potentialfindung erfordert zudem quantitative Aussagen über die Logistik, die insbesondere in den frühen Phasen nicht vorhanden sind [Win08, S. 355ff.].

3.3.4 Klassifizierungsrahmen für Embedded Devices

DIEKMANN und HAGENHOFF analysierten die Einsatzgebiete von Ubiquitous Computing-Technologien¹⁴ entlang der betrieblichen Wertschöpfungskette [DH06]. In Anlehnung an STRASSNER wurden im Rahmen der Analyse auch die **Wirkungsweisen** von **Ubiquitous Computing-Technologien** im betrieblichen Umfeld beschrieben [DH06, S. 2], [Str06, S. 99ff.]. Diese können in drei Ebenen beschrieben werden. Die erste Ebene erklärt die **Integration** von realer Welt in die virtuelle Welt. Mit zunehmender Integration können die betrieblichen Informationssysteme mit mehr Informationen versorgt werden, wodurch Aufgaben mit erhöhter Qualität realisiert werden können [DH06, S. 2]. Die zweite Ebene betrifft die **Automatisierung**. Eine erhöhte Automatisierung vermindert manuelle Aktivitäten, Verzögerungen, Fehler bzw. Folgekosten [Str06, S. 100]. Die dritte Ebene betrifft die **Dezentralisierung**. Durch Ubiquitous Computing-Technologien sollen zentrale Steuerungsinstanzen entlastet werden und eine höhere Flexibilität erreicht werden [Str06, S. 100], [DH06, S. 2].

Für die Umsetzung der Vision des Ubiquitous Computing schlagen DIEKMANN und HAGENHOFF **Embedded Devices** vor¹⁵ [DH06, S. 4]. Nach DIEKMANN und HAGENHOFF sind Embedded Devices hinsichtlich der integrierten Fähigkeiten vielfältig. Vor diesem Hintergrund wurde ein Klassifizierungsrahmen erarbeitet (vgl. Bild 3-18).

Identifikation	ohne	lokal gültig	global gültig
Bauform/-größe	in physisches Objekt integriert	mit physischem Objekt kombiniert	isoliert
Netzwerkschnittstelle	ohne	kabelgebunden	kabellos (PAN/WAN)
Benutzerschnittstelle	ohne	technisch (Tastatur/Display)	natürlich (Sprache, Gesten etc.)
Energieversorgung	über Stromnetz	induktiv	intern (Batterie, Brennstoffzelle, kinetisch)
Sensorik	ohne	einfach (Temperatur, Helligkeit etc.)	komplex (GPS)
Datenspeicher	ohne	unveränderbar	veränderbar
Programmierbarkeit	ohne	mit proprietärer Programmiersprache	mit offener Programmiersprache
Aktuatorik	ohne	über Standardschnittstelle	über proprietäre Schnittstelle

Bild 3-18: Klassifizierungsrahmen für Embedded Devices nach [DH06, S. 6]

¹⁴ Nach WEISER bezeichnet Ubiquitous Computing eine Allgegenwärtigkeit von rechnergestützten Systemen [Wei91, S. 94].

¹⁵ Weitere Informationen zu Embedded Devices befinden sich im Anhang (vgl. Anhang A2.2).

Der **Klassifizierungsrahmen** umfasst wesentliche Merkmale in Form von Fähigkeiten und Komponenten sowie entsprechende Ausprägungen dieser. Hierzu sind jedem Merkmal drei Ausprägungsstufen zugeordnet. So können z.B. zu dem Merkmal *Identifikation* die Ausprägungsstufen *ohne*, *lokal gültig* und *global gültig* ausgewählt werden [DH06, S. 5f.].

Bewertung:

Embedded Devices sollen die Umsetzung der Vision des Ubiquitous Computing unterstützen. Um die erforderlichen Fähigkeiten der Embedded Devices zu spezifizieren, erarbeiteten DIEKMANN und HAGENHOFF einen Klassifizierungsrahmen. Der Klassifizierungsrahmen zeigt mögliche Merkmale und Ausprägungen auf. Hinsichtlich der Informationsverarbeitung bleibt der Ansatz jedoch unkonkret. Eine geeignete Systematik zur Bedarfsidentifikation und Spezifikation der Systeme wird nicht vorgeschlagen.

3.3.5 Stufen der Industrie 4.0 Readiness

Industrie 4.0 beschreibt die Vision vieler Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau. LICHTBLAU ET AL. folgend stellt Industrie 4.0 jedoch viele Unternehmen vor eine Herausforderung: Häufig ist nicht klar, wie eine Umsetzung von Industrie 4.0 für die Unternehmen konkret aussehen könnte [LSB+15, S. 8]. Vor diesem Hintergrund wurde ein Konzept zur Einschätzung des aktuellen Umsetzungsstandes von Industrie 4.0 erarbeitet. Dieses soll Schritte zur Umsetzung von Industrie 4.0 aufzeigen [LSB+15, S. 10].

Im Rahmen des **Readiness-Modells** wurden Kriterien zur Klassifikation des Umsetzungsstandes von Industrie 4.0 erarbeitet. Dieses unterscheidet im Wesentlichen folgende drei Unternehmenstypen sowie damit verbundene Reifegrade: *Neuling (Außenstehender und Anfänger)*, *Einsteiger (Fortgeschrittener)* und *Pioniere (Erfahrener, Experte und Exzellenz)*. Die Klassifikation erfolgt in Abhängigkeit von sechs Dimensionen von Industrie 4.0. Hierzu zählen: *Strategie und Organisation*, *Smart Factory*, *Smart Operations*, *Smart Products*, *Data-driven Services* und *Mitarbeiter* [LSB+15, S. 8ff.]. Den sechs Dimensionen von Industrie 4.0 sind darüber hinaus insgesamt 18 Themenfelder zugeordnet. Die Themenfelder werden im Rahmen der Erhebung mit geeigneten Indikatoren gemessen [LSB+15, S. 21ff.]. Einen Überblick über die sechs Dimensionen und den damit verbundenen Themenfeldern kann dem Anhang entnommen werden (vgl. Anhang A2.3).

Im Rahmen der **Erhebung** spezifizieren die Unternehmen gemäß der Themenfelder ihr eigenes **Leistungsniveau**. In der Dimension *Smart Products* wird z.B. das Leistungsniveau hinsichtlich zusätzlicher *IKT-Funktionalitäten* definiert (vgl. Bild 3-19) [LSB+15, S. 71ff.]. Zusätzliche Funktionalitäten sind z.B. *Produktgedächtnis*, *Selbstauskunft*, *Vernetzung* oder *Lokalisierung*. Hierzu existieren, gemäß den oben genannten Reifegraden, sechs Stufen. Stufe 0 entspricht *Außenstehender (Einsteiger)* und Stufe 5 entspricht der *Exzellenz (Pionier)*. Stufe 0 bedeutet bei den *IKT-Zusatzfunktionalitäten*, dass diese nicht umgesetzt sind. Stufe 5 zeigt auf, dass die Produkte umfangreiche Zusatzfunktionen besitzen [LSB+15, S. 71ff.].

	Dimension	Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Smart Products	IKT - Zusatz-funktionalitäten	Keine Zusatz-funktionen	Produkte besitzen Ansätze für Zusatz-funktionen	Produkte besitzen erste Zusatz-funktionen	Produkte besitzen zusammen-hängende Zusatz-funktionen	Produkte besitzen Zusatz-funktionen verschiedener Bereiche	Produkte besitzen umfangreiche Zusatz-funktionen
	Nutzung der Daten	Keine Aufnahme von Daten	Keine Aufnahme von Daten	Aufnahme von Daten, aber keine Analyse der Daten	Analyse/ Nutzung der Daten	Analyse/ Nutzung der Daten	Analyse/ Nutzung der Daten
Smart Factory	Datenerfassung	Es werden keine Daten erfasst	Es werden keine Daten erfasst	Daten werden aufgenommen, größtenteils jedoch manuell	In einzelnen Bereichen werden Daten digital erfasst	Umfangreiche digitale Daten-aufnahme	Daten werden in allen Bereichen digital erfasst
	Datennutzung	Es liegen keine Daten zur Nutzung vor	Es liegen keine Daten zur Nutzung vor	Daten werden für wenige Maßnahmen genutzt (z.B. Schaffung Transparenz)	Nutzung der Daten zur Optimierung von Prognosen (z.B. Predictive Maintenance)	Daten werden in mehreren Bereichen zur Optimierung genutzt	Umfangreiche Nutzung von Daten zur Prozess-optimierung

Bild 3-19: Ausschnitt aus dem Readiness-Modell nach [LSB+15, S. 71ff.]

Nach der Erhebung sind die Unternehmen in der Lage, die gegenwärtigen Haupthürden gemäß des Readiness-Modells zu definieren. Beispielsweise kann definiert werden, dass hinsichtlich der Dimension *Smart Products* keine Analysen und Nutzung der aufgenommenen Daten zur Optimierung stattfinden. Die Ursachen für das Fehlen der Funktionen können wiederum fehlende Kompetenzen sein. Aus dieser Ursache heraus können nachfolgend spezifische **Handlungsfelder** definiert werden [LSB+15, S. 60ff.].

Bewertung:

Das Readiness-Modell stellt ein Hilfsmittel dar, um das Leistungsniveau des Unternehmens hinsichtlich verschiedener Dimensionen und Themenfeldern von Industrie 4.0 zu bestimmen. Die Einschätzung ist jedoch unpräzise. So können z.B. hinsichtlich des Themenfelds IKT-Funktionalitäten Produkte erste Ansätze von Zusatzfunktionen (Stufe 1) oder erste Zusatzfunktionen umfassen. Es werden nur einige ausgewählte Beispiele in diesem Kontext genannt. Ein systematisches Vorgehen zur Analyse wird nicht beschrieben, ebenso fehlen Hilfsmittel zur Auswahl und Bewertung oder der Kundeneinbindung.

3.3.6 Stufenmodell nach PORTER und HEPPELMANN

PORTER und HEPPELMANN erarbeiteten ein **Stufenmodell**, dass zur Einschätzung der Funktionalität von **smarten Produkten** genutzt werden kann. Im Rahmen des Stufenmodells besitzen Produkte vier wesentliche Arten von Funktionen: Funktionen zur Überwachung, Steuerung, Optimierung und Autonomie. Die Funktionen können jedoch nicht unabhängig voneinander realisiert werden, sondern bauen aufeinander auf. Beispielsweise kann eine Steuerung des Systems nur erfolgen, wenn eine Überwachung des Systems sichergestellt ist [PH14, S. 40ff.]. Die verschiedenen Arten sind in Bild 3-20 visualisiert.

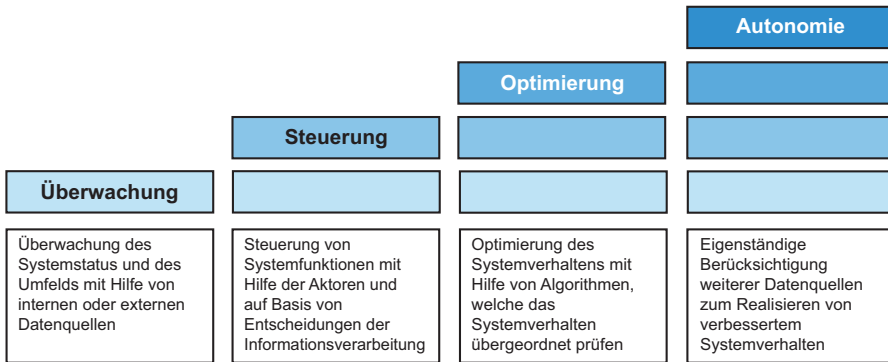


Bild 3-20: Funktionen smarter Produkte nach PORTER und HEPPELMANN [PH14, S. 40]

Bei der **Überwachung** werden Daten über das System, die Umgebung sowie des Benutzers gesammelt. Hierzu greift das System auf eigene Quellen zur Datenakquise zurück (integrierte Sensorik, Mensch-Maschine-Schnittstelle etc.) oder auch auf externe Quellen, wie z.B. Daten von vernetzten Systemen. Durch Überwachungsfunktionen können dem Benutzer z.B. Informationen zum Status gegeben werden [PH14, S. 40f.].

Bei der **Steuerung** werden auf Basis akquirierter Daten eigenständig Verhaltensanpassungen durchgeführt. Hierdurch wird eine robustere Verhaltensweise des Systems realisiert. Die Verarbeitung von Informationen ist in diesem Zusammenhang sicherzustellen. Beispielsweise wird definiert, dass ein Ventil geschaltet wird, wenn ein Druck zu hoch wird [PH14, S. 40ff.].

Die Überwachung und Steuerung eines Systems ermöglicht eine **Optimierung**. Es erfolgt beispielsweise die Bewertung der Verhaltensanpassung sowie eine bedarfsgerechte, erneute Verhaltensanpassung. Hierdurch kann die Intelligenz des technischen Systems zusätzlich gesteigert werden [PH14, S. 41f.].

Laut PORTER und HEPPELMANN können auf Basis von Überwachung, Steuerung und Optimierung auch Funktionen zur **Autonomie** in das System integriert werden. Unter Autonomie wird ein erhöhter Automatisierungsgrad des Systems verstanden, in dem sich das System z.B. weitere relevante Daten aus der Umgebung oder von vernetzten Systemen bezieht und diese für eine verbesserte Verhaltensanpassung nutzt [PH14, S. 42].

Bewertung:

Das Stufenmodell zeigt die Funktionen von smarten Produkten auf und verdeutlicht die Abhängigkeiten dieser. Beispiele erläutern, welche Anwendungsmöglichkeiten sich durch die Funktionen realisieren lassen. Genauere Angaben zu diesen fehlen jedoch. Das Stufenmodell zeigt Schritte zur Weiterentwicklung des Systems auf, die Umsetzung dieser bleibt jedoch unkonkret. Ein Vorgehen zur Realisierung der Stufen fehlt vollständig.

3.4 Bewertung und Auswahl von Lösungsideen

Zur Auswahl von Ideen existiert im Stand der Technik eine Vielzahl von Bewertungsansätzen [Ges06, S. 235ff.]. Vor dem Hintergrund der gestellten Anforderungen werden nachfolgende Ansätze vorgestellt: einfache Methoden zur ganzheitlichen Bewertung (vgl. Abschnitt 3.4.1), die Nutzwertanalyse (vgl. Abschnitt 3.4.2), Analysen auf Basis von Portfolios (vgl. Abschnitt 3.4.3) und die Conjoint-Analyse (vgl. Abschnitt 3.4.4). Einen umfassenden Überblick über weitere Bewertungsmethoden kann ADAM entnommen werden [Ada12, S. 257ff.].

3.4.1 Einfache Methoden zur ganzheitlichen Bewertung

Durch Methoden der ganzheitlichen Bewertung sollen zu bewertende Ideen als Ganzes betrachtet werden; Teilaspekte von Ideen werden nicht isoliert betrachtet [Ges06, S. 236]. Zu diesen Methoden zählen z.B. paarweiser Vergleich, Punktekleben oder Rosinenpicken [Win14, S. 136]. Diese werden nachfolgend kurz vorgestellt.

Beim **paarweisen Vergleich** werden jeweils zwei Ideen miteinander verglichen und darüber entschieden, welche Idee besser erscheint. Nach der Bewertung aller möglichen Ideen kann eine Rangfolge gebildet werden [Ges06, S. 238]. Zum Erstellen der Rangfolge eignet sich beispielweise eine Relevanzmatrix, mit der die Relevanzsumme nach vollständigem Vergleich betrachtet werden kann [Ihm10, S. 110].

Das **Punktekleben** stellt eine einfache und schnelle Möglichkeit zur Priorisierung von Ideen dar. Die Teilnehmer erhalten eine definierte Anzahl von Klebepunkten. Diese können nachfolgend auf die zu analysierenden Ideen verteilt werden. Hierdurch kann in Gruppen ein Meinungsbild zu einer Vielzahl von Ideen erreicht werden [Ges06, S. 237].

Beim **Rosinenpicken** wählen die Teilnehmer der Bewertung ihre favorisierten Ideen aus einem Ideenpool aus. Es können sowohl mehrere als auch einzelne Ideen von den Teilnehmern ausgewählt werden. Hierzu sollten die Ideen in Kartenform vorliegen. Die ausgewählten Ideen werden nachfolgend noch detaillierter analysiert [Ges06, S. 236].

Bewertung:

Die einfachen Methoden zur ganzheitlichen Bewertung unterstützen das schnelle Bewerten und Priorisieren von Ideen. Durch die Methoden können Meinungen in Gruppen schnell zusammengefasst werden. Zudem sind diese sehr einfach zu verstehen. Insbesondere in Workshops finden diese Methoden Anwendung. Die Methoden sind jedoch subjektiv und liefern keine umfassende Grundlage zur Entscheidung. Vor diesem Hintergrund gilt es diese bei einem möglichen Einsatz mit anderen Methoden zu kombinieren.

3.4.2 Nutzwertanalyse

Die **Nutzwertanalyse** wurde 1970 von ZANGEMEISTER erarbeitet und eignet sich besonders für komplexe Entscheidungsaufgaben [Zan70], [FG13, S. 390]. Die Nutzwertanalyse wird z.B. zur Bewertung von komplexen Produktalternativen sowie einer großen Anzahl relevanter Bewertungskriterien eingesetzt.

Das strukturierte **Aufstellen von Bewertungskriterien** ist ein wesentlicher Bestandteil der Analyse. Hierzu werden Ziele zur Bewertung definiert, die wiederum aus Teilzielen bestehen. Somit können verschiedene Zielbereiche ausgearbeitet werden, wie z.B. zu technischen und wirtschaftlichen Zielen. Das Resultat ist der hierarchische Zielsystem-Baum [FG13, S. 390]. Beim Aufstellen des **Zielsystems** werden zudem die Teilziele mit einer **Gewichtung** (prozentuelle Gewichtung der Teilziele) versehen [FG13, S. 391].

Nachfolgend werden für die zu bewertenden Alternativen, die **Eigenschaftsgrößen** zu den jeweiligen Bewertungskriterien ermittelt. Es gilt, möglichst zahlenmäßige Kennwerte zu bestimmen oder Eigenschaften zumindest verbal zu beschreiben. Auf Basis der Eigenschaftsgrößen wird die **Bewertung** durchgeführt. Für jede Eigenschaft gilt es, eine Maßzahl zwischen 0 und 10 zu vergeben (0 unbrauchbare Funktionserfüllung; 10 ideale Lösung) [FG13, S. 391f.]. Durch die Multiplikation der einzelnen Maßzahlen mit den jeweiligen Gewichtungen wird die Wertungszahl ausgerechnet. Die Summe der einzelnen Wertungszahlen ergibt den **Nutzwert** für die Alternativen. Die Zusammenhänge können in Form der Nutzwertmatrix abgebildet werden (vgl. Bild 3-21) [FG13, S. 392].

Bewertungskriterium			Eigenschaftsgrößen		Variante V1			...	Vn
ID	Benennung	Gew.	Benennung	Einheit	Eigenschaftsgröße	Maßzahl	Wertungszahl		
Z _{n11}	Betriebsfestigkeit	0,1	Ertragbare Lastspiele	—	900.000	9	0,9		
Z _{n12}	Schwingungsverhalten	0,23	Erste Eigenfrequenz	Hz	88	8	1,84		
...									
Z _n		g _{Kn}			c _{1n}	m _{1n}	W _{1n}		
							Nutzwert $G_{w1} = \sum w_n$		

Bild 3-21: Auszug einer Nutzwertmatrix nach [FG13, S. 392]

Bewertung:

Die Nutzwertanalyse unterstützt den Entwickler bei der Bewertung mehrerer Alternativen hinsichtlich einer Vielzahl von Kriterien. Wesentliche Stärke der Nutzerwertanalyse ist die Strukturierung der Kriterien sowie die Bewertung dieser [FG13, S. 392]. Die Bewertung kann auch in frühen Phasen der Produktentstehung erfolgen, wenngleich die Quantifizierung von Eigenschaften nicht immer möglich ist.

3.4.3 Analysen auf Basis von Portfolios

Im Rahmen von **Portfolio-Analysen** werden zwei unterschiedliche Kenngrößen in einer Matrix gegenübergestellt. Die zu untersuchenden Ideen werden hinsichtlich dieser Kenngrößen bewertet und in der Matrix positioniert. Darüber hinaus kann auch eine dritte Kenngröße mit Hilfe des Kreisdurchmessers visualisiert werden. Durch die Bewertung der Kenngrößen können Prioritäten zur Realisierung von Ideen abgeleitet werden. Die Kenngrößen können aus weiteren untergeordneten Größen mit gleicher Wirkrichtung bestehen [Ges06, S. 240ff.], [Bra02, S. 31ff.]. Für die Bewertung von Produktideen kann z.B. der Nutzen aus Marktsicht (unterteilt in erwartetes Marktvolumen und Erfolgswahrscheinlichkeit) und aus Technologiesicht (unterteilt Entwicklungsaufwand und Fit mit Kernkompetenzen) bewertet werden [Ihm10, S. 117]. Nachfolgend werden die Portfolio-Analysen auf Basis eines Marktportfolios erläutert [GP14, S. 129]. Ein Beispiel für ein Marktportfolio ist in Bild 3-22 dargestellt [GP14, S. 129f.].

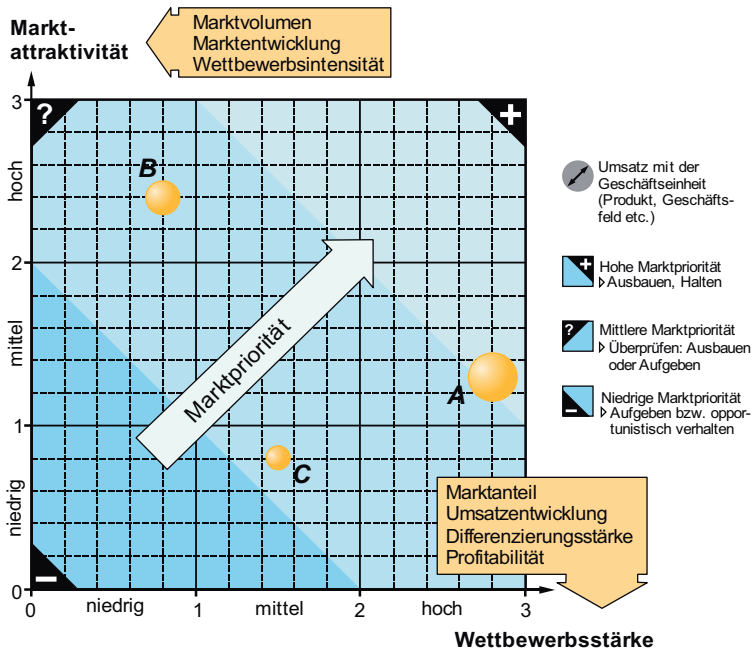


Bild 3-22: Ermittlung der Marktpriorität durch ein Marktportfolio nach [GP14, S. 130]

Bei einem **Marktportfolio** werden z.B. Produkte hinsichtlich der beiden Dimensionen Marktattraktivität und Wettbewerbsstärke bewertet. Die Marktattraktivität kann darüber hinaus noch in Marktvolumen, Marktentwicklung sowie Wettbewerbsintensität unterteilt werden. Die Wettbewerbsstärke wird auf Basis von Marktanteilen, der Umsatzentwicklung, Differenzierungsstärke sowie Profitabilität bewertet. Im ersten Schritt wird eine klassische Nutzwertanalyse durchgeführt. In diesem Schritt werden die einzelnen Kriterien gewichtet. Nachfolgend werden die zu analysierenden Produkte gemäß der Kriterien

bewertet. Auf Basis der Bewertung sowie der Gewichtung kann für jedes Produkt ein Wert für Marktattraktivität und Wettbewerbsstärke berechnet werden [GP14, S. 129f.].

Bewertung:

Portfolio-Analysen ermöglichen eine intuitive Darstellung von Bewertungen hinsichtlich zwei oder drei Kenngrößen. Darüber hinaus lassen sich diese Kenngrößen unterteilen, so dass z.B. auch eine Kombination mit der Nutzwertanalyse möglich ist. Hierdurch können komplexe Sachverhalte anschaulich visualisiert werden. Dies schafft eine hohe Transparenz von Ergebnissen [Bra02, S. 33]. Vor dem Hintergrund der Arbeit können Portfolios eine gute Möglichkeit zur Bewertung und Kommunikation der Ergebnisse darstellen.

3.4.4 Conjoint-Analyse

In der Marketing-Forschung sind unter dem Begriff der **Conjoint-Analyse** verschiedene multivariate Untersuchungsansätze zusammengefasst, mit denen Zusammenhänge zwischen Ausprägungen von Produkten und dem resultierenden Nutzenbeitrag zum Gesamtprodukt analysiert werden können [Hei99, S. 99f.]. Die Conjoint-Analyse soll somit eine differenzierte Erforschung der subjektiven Kundenmeinung zu Produkteigenschaften und deren Ausprägungen unterstützen [Hei99, S. 100]. Die Conjoint-Analyse wird u.a. in den Aufgabenbereichen Produktentstehung, Preispolitik und Markenwertbestimmung eingesetzt [SH08, S. 109]. In der Produktentstehung stellt sich z.B. die Frage, wie ein Produkt zu gestalten ist, um die Bedürfnisse des Marktes zu adressieren [BEP+16, S. 519]. Das Vorgehen zum Durchführen ist in Bild 3-23 dargestellt [BEP+16, S. 522].

In der Phase **Auswahl von Eigenschaften und -ausprägungen** werden das Produkt und die zu untersuchenden Eigenschaften und -ausprägungen ausgewählt. Zu beachten ist, dass die Eigenschaften noch im Rahmen der Produktentstehung beeinflussbar, unabhängig voneinander sowie realisierbar sind. Beispiel für eine Produkteigenschaft ist z.B. die *Verpackung* sowie die Ausprägung *Plastikverpackung* [BEP+16, S. 522ff.].

In der Phase **Festlegung des Erhebungsdesigns** erfolgt die Definition der Stimuli und der Stimuli-Anzahl. Stimuli repräsentieren Kombinationen von Eigenschaftsausprägungen. Diese werden den Auskunftspersonen zur Beurteilung vorgelegt. Bei wenigen Eigenschaften und Ausprägungen kann eine vollständige Befragung der Kombination möglich sein. Bei einer Vielzahl von Eigenschaften ist es sinnvoll, die Anzahl der Stimuli durch eine geeignete Auswahl zu senken [BEP+16, S. 524ff.].

In der Phase **Durchführung der Erhebung** werden die Stimuli den Auskunftspersonen vorgelegt. Üblich ist die Erhebung durch eine Rangreihung, bei der die Stimuli priorisiert werden (auf Basis des empfundenen Nutzens) [BEP+16, S. 528f.].

Die Phase **Schätzung der Nutzwerte** wird durchgeführt, um für jede Eigenschaft den Teilnutzenwert zu bestimmen. Hierdurch können der Gesamtnutzenwert für alle Stimuli und die relative Wichtigkeit von Eigenschaften berechnet werden [BEP+16, S. 529ff.].

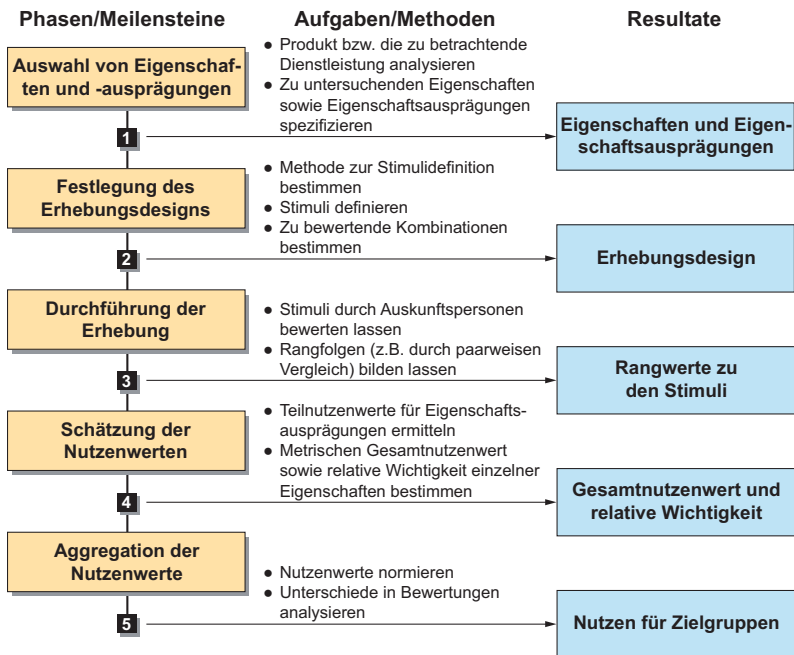


Bild 3-23: Vorgehen der Conjoint-Analyse nach [BEP+16, S. 520ff.], [GEK01, S. 70]

In der Phase **Aggregation der Nutzenwerte** wird eine Normierung der Nutzenwerte durchgeführt. Hierdurch wird eine Vergleichbarkeit zwischen den Individualanalysen ermöglicht. So wird sichergestellt, dass die Teilnutzenwerte der Befragten jeweils auf dem gleichen „Nullpunkt“ und der gleichen Skaleneinheit basieren [BEP+16, S. 536ff.].

Bewertung:

Conjoint-Analysen ermöglichen eine frühzeitige Bewertung von Produkten auf Basis von Kundenmeinungen. Hierzu werden Alternativen des Produkts vom Kunden in eine Rangfolge gebracht. Für die Rangfolgen müssen zunächst die entsprechenden Alternativen ausgearbeitet werden, um eine Bewertung durchzuführen.

3.5 Handlungsbedarf

Bild 3-24 fasst die Bewertung der vorgestellten Ansätze aus dem Stand der Technik hinsichtlich der Anforderungen an eine Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau zusammen (vgl. Abschnitt 2.7). Keiner der betrachteten Ansätze erfüllt alle Anforderungen. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt der verbleibende Handlungsbedarf aufgezeigt.

Bewertung der untersuchten Ansätze hinsichtlich der gestellten Anforderungen.		Anforderungen (A)									
		Identifikation von Potentialen	Berücksichtigung des Kundenbedarfs	Lösungen für intelligentes Verhalten	Schrittweise Umsetzung der Intelligenz	Bewertung der Lösungsideen	Planung der Umsetzung	Bedarfsgerechte Auswahl von Lösungsideen	Interdisziplinär/Wissensaustausch	Systematische Vorgehensweise	Eignung für den Maschinen- und Anlagenbau
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Integration von Intelligenz in technischen Systemen	Integration von kognitiven Funktionen nach METZLER										
	Integration kognitiver Funktionen nach DUMITRESCU										
	Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender Systeme nach POOK										
	Intelligente Systeme nach ISERMANN										
	Einsatzgestaltung intelligenter Objekte nach DEINDL										
	Leitfaden Industrie 4.0 nach ANDERL ET AL.										
Bedarfsidentifikation zur Modifikation	Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen										
	Identifikation von Produktfeatures nach BACCIOTTI ET AL.										
	Produktbenchmarking nach SABISCH UND TINELNOT										
	Quality Function Deployment										
	KANO-Modell der Kundenzufriedenheit										
	Lead-User Integration										
	Empathic Design										
Service Driven Design nach EISENHUT											
Stufen von Intelligenz in technischen Systemen	Reifegradmodell smarterer Objekte										
	Architektur von Cyber-Physical Systems nach LEE ET AL.										
	Bewertung der Selbststeuerung von Logistiknetzwerken										
	Klassifizierungsrahmen für Embedded Devices										
	Stufen der Industrie 4.0 Readiness										
	Stufenmodell nach PORTER UND HEPPELMANN										
Bewertung und Auswahl	Einfache Methoden zur ganzheitlichen Bewertung										
	Nutzwertanalyse										
	Analysen auf Basis von Portfolios										
	Conjoint-Analyse										

Bild 3-24: Bewertung der untersuchten Ansätze hinsichtlich der Anforderungen

A1: Identifikation von Potentialen

Die Systematik muss eine umfassende Analyse des bestehenden Systems ermöglichen, um Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Systems aufzuzeigen. Die meisten Ansätze aus dem Bereich *Integration von Intelligenz in Systemen* erfüllen diese Anforderungen in Teilen. Jedoch zeigt nur die Methode nach POOK weitreichende Möglichkeiten für die Analyse des Systems auf. POOK greift hierzu auf die Ansätze aus dem Bereich der Sicherheits- und Zuverlässigkeitstechniken zurück. Diese Ansätze können unter Berücksichtigung anderer Anforderungen bei der Entwicklung einer Systematik unterstützen.

A2: Berücksichtigung des Kundenbedarfs

Die Anforderung hinsichtlich einer Berücksichtigung des Kundenbedarfs wird in den Ansätzen zur *Integration von Intelligenz in Systemen* nur von METZLER ausreichend adressiert. In diesem Zusammenhang schlägt METZLER die Integration von Nutzerinteraktionen in das System vor (erhöhte Automatisierung). Weitere Methoden im Bereich der *Bedarfsidentifikation* erfüllen diese Anforderungen ebenfalls sehr gut, wenngleich die Einbettung in eine Gesamtsystematik fehlt. Es gilt die entsprechenden Ansätze bei der Entwicklung der Systematik zu prüfen und ggf. zu integrieren.

A3: Lösungen für intelligentes Verhalten

Das Vorgehen von DUMITRESCU stellt Lösungen für intelligentes Verhalten im Sinne von Lösungsmustern zur Verfügung. Diese unterstützen eine Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme, erfordern jedoch ein umfangreiches Verständnis bzgl. der eingesetzten Lösungsmuster. Darüber hinaus beschreiben Ansätze aus dem Bereich *Stufen von Intelligenz in Systemen* gut nachvollziehbare Möglichkeiten für die Umsetzung von intelligentem Verhalten, jedoch bleiben die Ansätze bzgl. der Umsetzung unkonkret. Eine Kombination der Ansätze erscheint vor diesem Hintergrund Erfolg versprechend.

A4: Schrittweise Umsetzung der Intelligenz

Viele Ansätze aus dem Bereich *Stufen von Intelligenz in Systemen* zeigen Leistungsstufen von intelligenten Systemen auf. Hierdurch kann eine schrittweise Umsetzung der Intelligenz realisiert werden. In Teilen sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Stufen jedoch sehr groß oder trivial (z.B. *Sensoren und Aktoren nicht integriert* und *Sensoren und Aktoren sind integriert* [APW+15]). Infolgedessen gilt es, die Ansätze geeignet zu kombinieren, um eine schrittweise Steigerung von Intelligenz zu realisieren.

A5: Bewertung der Lösungsideen

Die Bewertung von Lösungsideen zur Steigerung der Intelligenz in Systemen wird von den Ansätzen zur *Integration von Intelligenz in Systemen* thematisiert – explizite Empfehlungen für entsprechende Bewertungsansätze werden jedoch nicht beschrieben. Die Ansätze im Bereich *Bewertung und Auswahl von Ideen* erfüllen die Anforderung sehr gut und können einen geeigneten Beitrag leisten. Insbesondere Portfolios und ganzheitliche Ansätze zur Bewertung erlauben eine effiziente Bewertung.

A6: Planung der Umsetzung

Die zu erarbeitende Systematik soll die Planung der Umsetzung von intelligenten Lösungsideen aufzeigen, um den Aufwand der Umsetzung adäquat abzuschätzen. Diese Anforderung wird von einigen Ansätzen teilweise erfüllt; eine vollumfängliche Systematik existiert nicht. Infolgedessen resultiert Handlungsbedarf, um eine frühzeitige Aufwandsabschätzung zu unterstützen.

A7: Bedarfsgerechte Auswahl der Lösungsideen

Die Auswahl Erfolg versprechender Lösungsideen zur Steigerung der Intelligenz in Systemen kann vor dem Hintergrund des analysierten Stands der Technik durch Ansätze aus dem Bereich *Bewertung und Auswahl von Ideen* unterstützt werden. Daher besteht der Handlungsbedarf diese, in der zu erarbeitenden Systematik, zu prüfen und in geeigneter Weise zu integrieren.

A8: Interdisziplinarität/Wissensaustausch

Diese Anforderung wird von allen Ansätzen aus dem Bereich *Integration von Intelligenz in Systemen* mindestens in Teilen erfüllt. Insbesondere METZLER, DUMITRESCU und POOK erfüllen die gestellte Anforderung voll. Bei der Entwicklung der Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme sind die angeführten Ansätze zu berücksichtigen und für den Einsatz anzupassen. Hierdurch kann eine effiziente Kommunikation sichergestellt werden.

A9: Systematische Vorgehensweise

Die zu erarbeitende Systematik soll ein durchgängiges Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz bereitstellen, welches insbesondere die abstrakten Prozessschritte (*Bedarf identifizieren, Lösungsideen spezifizieren* sowie *Lösungsideen auswählen*; vgl. Abschnitt 2.6) adressiert. Diese Anforderung wird von vielen Ansätzen aus dem Bereich *Integration von Intelligenz in Systemen* erfüllt. Sinnvolle Aspekte der Ansätze sind für die zu entwickelnde Systematik auf Tauglichkeit zu prüfen und zu integrieren.

A10: Eignung für den Maschinen- und Anlagenbau

Aus dem Bereich *Integration von Intelligenz in Systemen* erfüllt nur der Ansatz von ANDERL ET AL. die Anforderung voll. In den weiteren Bereichen existieren viele weitere Ansätze, welche die Anforderungen vollumfänglich erfüllen. Vor diesem Hintergrund muss die zu erarbeitende Systematik ein vergleichbares Abstraktionsniveau zu ANDERL ET AL. aufweisen sowie die Stärken anderer Ansätze berücksichtigen. Vor dem Hintergrund, dass der Wissenstransfer in mittelständisch geprägten Unternehmen entscheidend ist (vgl. Abschnitt 2.2.1), sind Hilfsmittel zur Spezifikation und Kommunikation in die Systematik zu integrieren (z.B. aus dem Ansatz nach DUMITRESCU).

4 Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme

Dieses Kapitel bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Es stellt eine *Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau* vor. Die Systematik soll den identifizierten Herausforderungen und Anforderungen der Problemanalyse (vgl. Abschnitt 2.6 und 2.7) sowie dem dargestellten Handlungsbedarf (vgl. Abschnitt 3.5) gerecht werden.

Abschnitt 4.1 gibt einen Überblick über die Systematik und ihre Bestandteile. Die Systematik umfasst ein Stufenmodell, Methoden, ein Vorgehensmodell sowie unterstützende Hilfsmittel. Abschnitt 4.2 stellt das Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme vor. Abschnitt 4.3 fokussiert Methoden zur Planung der Umsetzung von intelligentem Verhalten. In Abschnitt 4.4 wird das Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme beschrieben. Abschließend präsentiert Abschnitt 4.5 ergänzende Hilfsmittel zur Förderung der Kommunikation und Spezifikation der beteiligten Personen. Die durchgängige Anwendung der Systematik und insb. des Vorgehensmodells erfolgt im Anschluss in Kapitel 5.

4.1 Die Systematik im Überblick

Die *Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau* besteht aus vier Bestandteilen. Diese werden nachfolgend vorgestellt (vgl. Bild 4-1):

- Ein **Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme**, das die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Informationsverarbeitung sowie der Sensorik und Aktorik darstellt.
- Methoden zur **Planung der Umsetzung von intelligentem Verhalten**, die eine frühzeitige Abschätzung des Umsetzungsaufwandes sowie der benötigten Kompetenzen aufzeigen.
- Ein **Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme**, das die Entwickler in die Lage versetzt, Lösungsideen zur Weiterentwicklung des mechatronischen Systems zu finden.
- Hilfsmittel zur **Förderung der Kommunikation und Spezifikation**, die unter Einbindung des Kunden bei der Weiterentwicklung des bestehenden mechatronischen Systems unterstützen. Zudem unterstützen sie die Kommunikation aller beteiligten Fachdisziplinen in den Schritten des Vorgehensmodells.

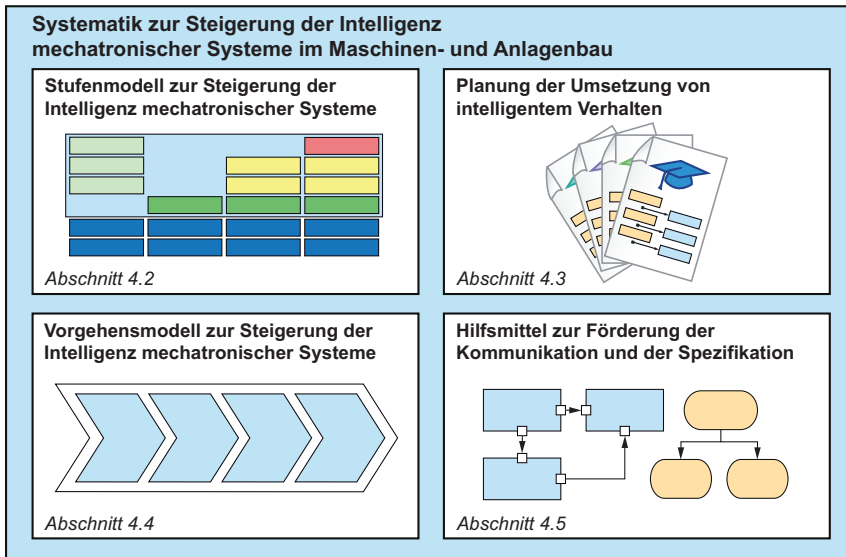


Bild 4-1: Bestandteile der Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau

Auf Basis der Problemanalyse sowie der Analyse des Stands der Technik bildet das **Stufenmodell** den Kern der Systematik (vgl. Abschnitt 4.2). Es berücksichtigt andere Stufenmodelle zur Entwicklung intelligenter Systeme sowie deren Möglichkeiten zur Weiterentwicklung und zeigt dabei auf, wie die Vision von selbstoptimierenden Systemen schrittweise realisiert werden kann. Es umfasst Möglichkeiten zur Weiterentwicklung von mechatronischen Systemen aus dem Kontext der Automatisierungstechnik, der mathematischen Optimierung, des maschinellen Lernens, fortgeschrittener Steuerungs- und Regelungskonzepte und Ansätze zur Steigerung der Verlässlichkeit intelligenter Systeme. Die Methoden zur **Planung der Umsetzung** zeigen für die zuvor genannten Bereiche die Schritte zum Realisieren auf. Hierdurch soll eine frühzeitige Abschätzung des Aufwands sowie der damit verbundenen Kompetenzen unterstützt werden (vgl. Abschnitt 4.3). Das **Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme** unterstützt die beteiligten Personen bei der Analyse des bestehenden Systems sowie der Identifikation, Spezifikation, Auswahl und Bewertung von intelligenten Lösungsideen (vgl. Abschnitt 4.4). Die genannten Schritte des Vorgehensmodells werden i.d.R. von Beteiligten unterschiedlicher Fachdisziplinen (z.B. Entwicklung, Vertrieb und Service) sowie dem Kunden durchgeführt. Vor diesem Hintergrund unterstützen die **Hilfsmittel zur Förderung der Kommunikation und Spezifikation** den Wissensaustausch und -transfer im interdisziplinären Projektteam (vgl. Abschnitt 4.5).

Als **Resultat** der Anwendung liegen Ideen für zukünftige mechatronische System mit intelligenten Systemfunktionen vor. Die Funktionen genügen den Anforderungen der

Kunden und berücksichtigten die internen Kompetenzen des Unternehmens zum Realisieren dieser. Die Ideen bilden die Grundlage für die weiteren Schritte im Rahmen der Produktentstehung (Produktkonzipierung etc.).

4.2 Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz

Das Stufenmodell zeigt Möglichkeiten für eine schrittweise Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme auf. Es bildet den Kern der Systematik. Ein Überblick über das Stufenmodell wird in Abschnitt 4.2.1 gegeben. Das Stufenmodell umfasst Funktionsbereiche sowie darin enthaltenen Leistungsstufen. Die einzelnen Funktionsbereiche sowie deren Leistungsstufen werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben (vgl. Abschnitte 4.2.2 bis 4.2.6). Zudem werden in Abschnitt 0 die Einsatzszenarien des Stufenmodells vorgestellt.

4.2.1 Das Stufenmodell im Überblick

Fortgeschrittene mechatronische Systeme (z.B. selbstoptimierende Systeme) basieren auf der Grundstruktur mechatronischer System. Sie bestehen aus einem Grundsystem, Sensorik, Aktorik und der Informationsverarbeitung [VDI2206, S. 14]. Die Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme kann in allen genannten Elementen erfolgen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus vorrangig auf den Möglichkeiten zur Steigerung der Intelligenz durch Ansätze der Selbstoptimierung (vgl. Abschnitt 2.3.3.3), welche im Bereich der Informationsverarbeitung Anwendung finden. Da die **Steigerung der Intelligenz** in der **Informationsverarbeitung** auch Verbesserungen der eingesetzten **Sensorik** und **Aktorik** erfordern kann, sind diese ebenfalls im Stufenmodell berücksichtigt. Einen Überblick über das erarbeitete Stufenmodell liefert Bild 4-2.

Das Stufenmodell umfasst die **Funktionsbereiche** der Sensorik (*Messen*), der Aktorik (*Agieren*) sowie der Informationsverarbeitung. Hinsichtlich der Informationsverarbeitung existieren die Funktionsbereiche *Steuern und Regeln*, *Identifizieren* und *Adaptieren* sowie *Optimieren*. Begleitend gilt es aber auch die Wissensspeicherung (*Wissen speichern*), die Kommunikation mit anderen Systemen (*Kommunizieren–Systeme*) und dem Benutzer (*Kommunizieren–Benutzer*) zu analysieren.

Messen: Kenntnisse über das System selbst oder über Umfeldbedingungen bilden die Basis für jegliche Aktionen des Systems oder des Benutzers. Bei mechatronischen Systemen ermitteln Sensoren funktionsrelevante Messgrößen. Auf Basis der Messgrößen werden nachfolgend z.B. Führungsgrößen zur Anpassung des Systemverhaltens weitergegeben [Czi15, S. 29]. Da im Rahmen der Arbeit insbesondere die lösungsneutrale Aufgabe der Sensorik im Vordergrund steht, wird der Begriff des Messens verwendet.

Agieren: Anpassungen des technischen Prozesses erfolgen in der Regel über Stelleinrichtungen bzw. Aktoren, die bestimmte Prozesseingangsgrößen verändern. Die Ein-

gangsgrößen der Steleinrichtungen oder Aktoren können von einer Steuerung oder Regelung oder aber auch vom Bediener verstellt werden [Ise08, S. 441]. Unter dem Funktionsbereich *Agieren* werden daher Funktionen zum Anpassen des Prozesses verstanden.

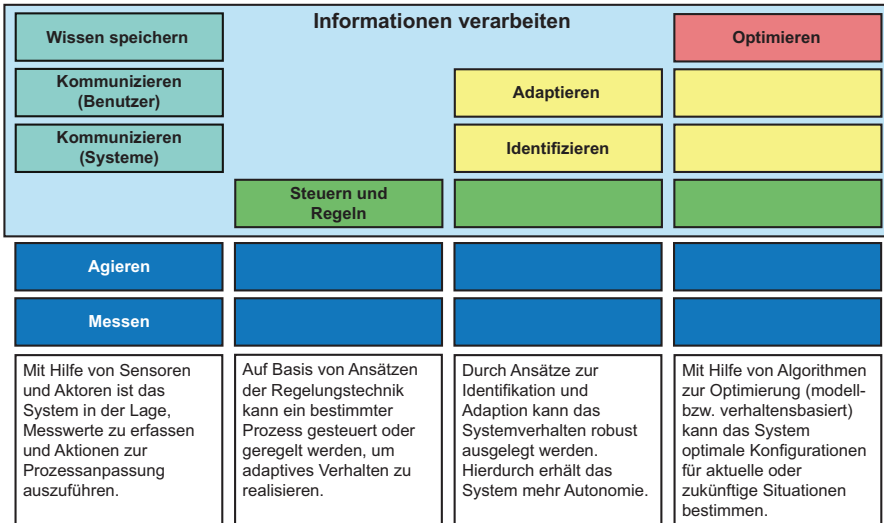


Bild 4-2: Überblick über das Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme sowie die darin enthaltenen Funktionsbereiche

Steuern und Regeln: Die Integration von Funktionen zum *Messen* und *Agieren* ermöglichen Funktionen aus dem Bereich *Steuern und Regeln*. Auf Basis von gemessenen Größen können mit Hilfe von Steuerungen und Regelungen sowie Aktoren technische Prozesse beeinflusst werden (z.B. Geschwindigkeiten, Temperaturen oder Dämpfungen) [Ise08, S. 21]. Die Regelung hat das Ziel, eine funktionelle Größe im Prozess (Regelgröße) trotz des Einflusses äußerer Störungen (Störgrößen) auf die Sollgröße (Führungsgröße) zu führen. Es erfolgt eine Rückführung von Prozess- und/oder Störgrößen. Im Unterschied zur Regelung ist die Wirkungsweise einer Steuerung nicht in sich geschlossen (offene Wirkkette). Eine Rückführung von Regelgrößen (oder auch Prozessgrößen) findet somit nicht statt [Czi15, S. 65f.].

Identifizieren: Reale Systeme weisen in der Regel Abweichungen von den Modellen auf, die z.B. im Rahmen des Entwurfs der Steuerung oder Regelung eingesetzt wurden. Hierdurch verbleibt ein gewisser Unbekanntheitsgrad der Strecke, auf der nur bedingt mit der Steuerung und Regelung reagiert werden kann. Daher ist es ggf. notwendig diese Abweichungen zu identifizieren, um z.B. die Regelung anzupassen oder das System in einen sicheren Zustand zu überführen [FD08, S. 14f.]. Die dafür notwendigen Funktionen werden im Bereich *Identifizieren* zusammengefasst.

Adaptieren: Funktionen aus dem Bereich *Identifizieren* erkennen ungewünschte Verhaltensweisen, denen mit der aktuellen Steuerung und Regelung nur bedingt entgegengewirkt werden kann. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird jedoch eine Adaption des Systems ermöglicht. So können z.B. Reglerparameter im Sinne einer Parameteranpassung verstellt werden oder das System wird mit Hilfe von Notfall-Mechanismen in einen sicheren Zustand überführt [FD08, S. 15], [KSR+09, S. 105ff.].

Optimieren: Der Funktionsbereich *Optimieren* beschreibt Funktionen, die das Systemverhalten im laufenden Betrieb hinsichtlich definierter Zielfunktionen bzw. Gütekriterien anpassen (im Sinne der Selbstoptimierung). Hierdurch werden z.B. die Modelle des dynamischen Systemverhaltens nicht nur im Rahmen des Entwurfs, sondern auch im Betrieb zur Optimierung verwendet [DP06, S. 590ff.], [ADG+09, S. 26]. In diesem Zusammenhang kommen auch modellbasierte Mehrzieloptimierungsverfahren zum Einsatz, wie auch Ansätze der verhaltensbasierten Selbstoptimierung [ADG+09, S. 123ff.].

Wissen speichern: Die Möglichkeit Wissen im System zu speichern, eröffnet weitere Potentiale für das System. Falls das System z.B. Prozesshistorien abspeichern kann, ist eine Analyse der Daten möglich, um tiefergehende Informationen zu extrahieren und eine Verhaltensverbesserung zu ermöglichen [PR14, S. 312ff.], [LRP+11]. Vor diesem Hintergrund bestehen zahlreiche Wechselwirkungen mit den anderen Funktionsbereichen.

Kommunizieren–Benutzer: Bei mechatronischen Systemen spielt der Benutzer des Systems eine entscheidende Rolle. Benutzerschnittstellen (oder auch Mensch-Maschine-Schnittstellen) ermöglichen Interaktionen zwischen dem Benutzer und dem System [VDI2206, S. 14ff.]. Hierdurch kann der Benutzer z.B. Änderungen von Führungsgrößen der Steuerung und Regelung initiieren [FGK+04, S. 17ff.]. Der Austausch kann auditiv, visuell oder auch haptisch erfolgen [Dei14, S. 27].

Kommunizieren–Systeme: Die Zustandsüberwachung mechatronischer Systeme erfolgt i.d.R. durch den Einsatz integrierter Sensorik. Hierdurch sind jedoch nur Informationen aus dem nahen Umfeld des Systems verfügbar. Ansätze aus dem Bereich der Sensorfusion weisen das Potential auf, Informationen verteilter Systeme zu erhalten und ggf. das Verhalten des Systems situationsspezifisch anzupassen [MBD+13, S. 305], [MTD+14, S. 35ff.]. Infolgedessen wird die Kommunikation mit weiteren Systemen im Stufenmodell explizit berücksichtigt, um Systeme intelligenter zu realisieren.

Die Funktionsbereiche zeigen die verschiedenen funktionellen Möglichkeiten zur Weiterentwicklung mechatronischer Systeme schrittweise auf (vgl. Bild 4-2). Die definierten **Funktionsbereiche** können zudem auch in die **Struktur der Informationsverarbeitung selbstoptimierender Systeme** eingegliedert werden. Diese Zuordnung ist in Bild 4-3 dargestellt. Das *Messen* und *Agieren* findet außerhalb der Informationsverarbeitung statt. Der Controller realisiert Funktionen aus dem Bereich *Steuern und Regeln*. Der reflektorische Operator ermöglicht das *Identifizieren* von Abweichungen im Verhalten der Steuerung und Regelung. Nachfolgend können Notfall-Mechanismen, Anpassungen der Reglerparameter oder der Struktur im Sinne des *Adaptierens* initiiert werden. Der kognitive

Operator realisiert die Funktionen zum *Optimieren*. Hierzu werden z.B. modellbasierte oder verhaltensbasierte Ansätze eingesetzt. Die Funktionsbereiche *Wissen speichern*, *Kommunizieren mit dem Benutzer* und *Kommunizieren mit anderen Systemen* sind Teil der Informationsverarbeitung, jedoch lassen sich diese keiner Ebene zuordnen. Sie werden in den jeweiligen Ebenen anwendungsfallspezifisch eingesetzt.

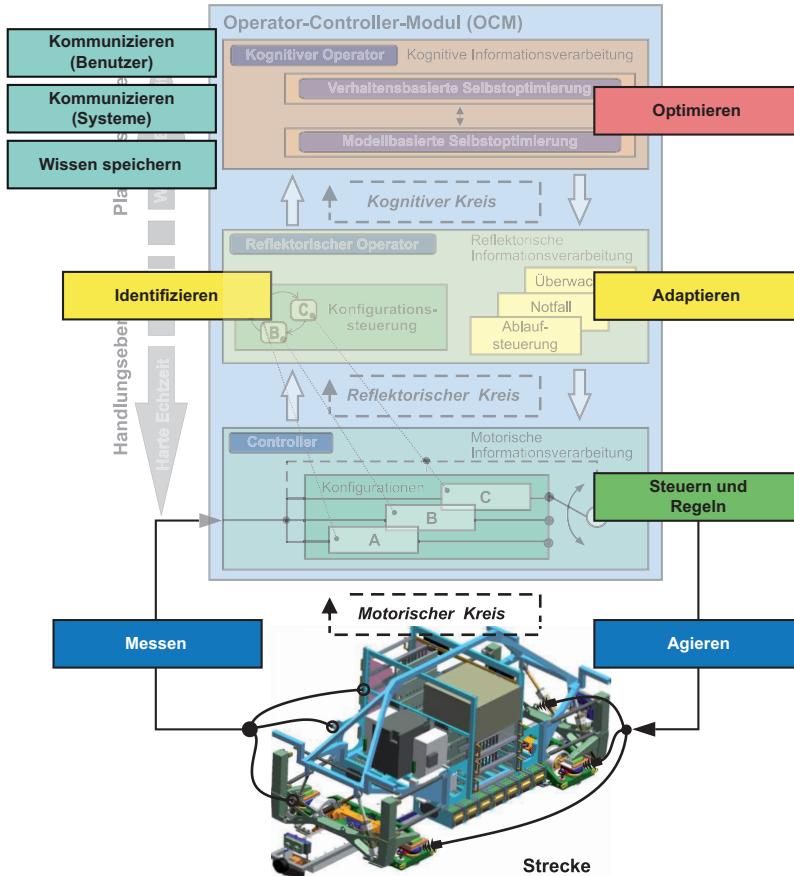


Bild 4-3: Zuordnung der Funktionsbereiche zu den Ebenen des OCM in Anlehnung an [HOG04, S. 2], [ADG+09, S. 14]

Die genannten Funktionsbereiche setzen gemäß Bild 4-2 im Wesentlichen aufeinander auf. So erfordert der Ansatz von Regelungen auch die Integration von Sensoren und Aktoren. Ansätze zum *Identifizieren* und *Adaptieren* prüfen bzw. adaptieren wiederum die realisierte Regelung. Diese Darstellung ist jedoch nur **idealtypisch** und muss stets für die jeweilige Anwendung analysiert werden. Zudem adressiert das Modell ausschließlich **mechatronische Systeme**. Hierdurch können z.B. mechanisch umgesetzte Regelungen nicht ohne Weiteres im Stufenmodell eingeordnet werden (z.B. Thermostatventil zur

Temperaturregelung). Zur Steigerung der Intelligenz ist es zudem notwendig, die Funktionsbereiche im Detail zu betrachten. Dies erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten.

4.2.2 Messen und Agieren

Mechatronische Systeme sind in der Lage, das Systemverhalten eigenständig zu verbessern. Hierzu werden mit Hilfe von Sensoren Informationen über die Umgebung aber auch über das System selbst erfasst. Die Informationsverarbeitung verarbeitet die Informationen und steuert integrierte Aktoren an, um Reaktionen zur Verbesserung des Systemverhaltens auszuführen [VDI2206, S. 10]. Hierdurch bildet das **Messen und Agieren** eine zentrale Voraussetzung, um die Intelligenz mechatronischer Systeme zu steigern. In diesem Zusammenhang bestehen jedoch spezifische Unterschiede. Daher wurden Leistungsstufen definiert, die eine detaillierte Analyse der Möglichkeiten unterstützen. Die **Leistungsstufen** für den Funktionsbereich **Messen** sind im Bild 4-4 visualisiert.

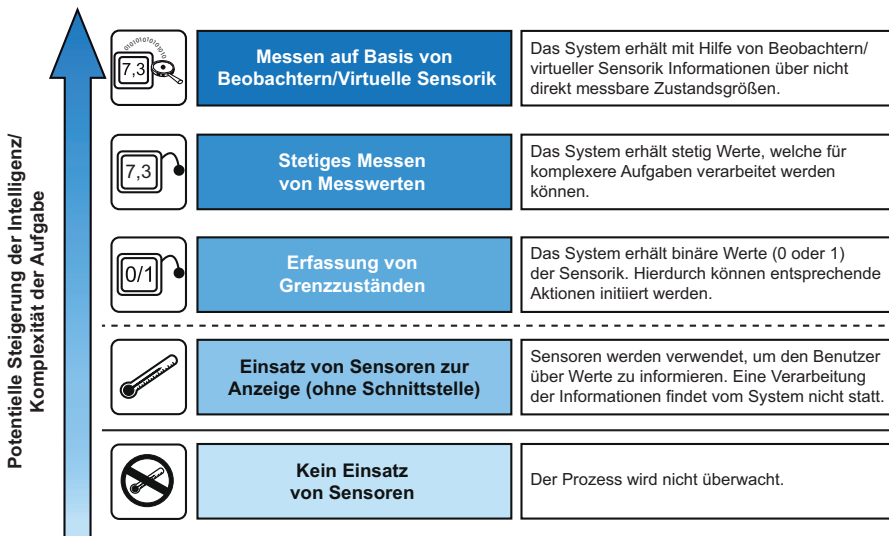


Bild 4-4: Leistungsstufen für den Funktionsbereich „Messen“

Die im Bild 4-4 dargestellten Leistungsstufen sind von unten nach oben zu lesen. Mit jeder Stufe steigt zum einen die **potentielle Intelligenz** des Systems, zum anderen aber auch die Komplexität der Entwurfsaufgabe. Die Intelligenz ist potentiell, da die tatsächliche Intelligenz von der Anwendung abhängig ist. Falls beispielsweise für bestimmte Prozesse das Überschreiten von kritischen Grenztemperaturen erforderlich ist, stiften stetige Messungen der Temperatur keinen zusätzlichen Nutzen im Sinne der Eigenschaften *adaptiv*, *robust*, *vorausschauend* und *benutzungsfreundlich*. Es ist ausreichend Sensorik

zur Erfassung von Grenzzuständen zu implementieren. Die **Komplexität der (Entwurfs-)Aufgabe** steigt dennoch für diesen Fall, da eine andere Verarbeitung der Messwerte auf der Informationsverarbeitung erfolgen muss.

Nachfolgend werden die Leistungsstufen erläutert. Die **Leistungsstufen** werden beginnend mit einer geringen potentiellen Intelligenz beschrieben. Der Bereich *Messen* umfasst fünf Leistungsstufen. Die ersten zwei Leistungsstufen ermöglichen keine autonome Prozessanpassung¹⁶ (*Kein Einsatz von Sensoren, Einsatz von Sensoren zur Anzeige*).

Kein Einsatz von Sensoren: Bei dieser Leistungsstufe werden keine Sensoren eingesetzt, um Informationen über Zustände zu erhalten. Hierdurch ist eine autonome Anpassung des Systemverhaltens nicht möglich. Bei Bedarf kann der Benutzer selbst Informationen über Zustände des Systems erfassen, um den Prozess zu überwachen oder Eingriffe zu initiieren [APW+15, S. 12f.].

Einsatz von Sensoren zur Anzeige: Im Rahmen dieser Leistungsstufe werden Sensoren zur Anzeige eingesetzt. Hierdurch erhält der Benutzer Informationen über den Prozess auf deren Basis er nachfolgend Aktionen zur Prozessanpassung ausführen kann. Beispielfhaft sei an dieser Stelle ein Temperatursensor mit eigener Temperaturanzeige genannt. Der Benutzer kann diese Anzeige zur regelmäßigen Kontrolle betrachten. Das Implementieren solcher Sensoren erfordert Kompetenzen im Bereich der Automatisierungstechnik.

Erfassung von Grenzzuständen: Diese Leistungsstufe beschreibt im Wesentlichen Binärsensoren. Binärsensoren sind zweiwertige Schalter, die ausschließlich mit den zwei Signalen EIN und AUS arbeiten. Hierzu zählen z.B. Näherungssensoren oder Druckschalter [HS12, S. 8]. Diese Sensoren werden z.B. als Grenzwert- oder Notschalter eingesetzt [HS12, S. 393]. Binäre Sensoren werden zahlreich in Maschinen und Anlagen eingesetzt. Die binären Werte werden meist in speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) genutzt, um z.B. binär Aktoren zu schalten [RWW+99, S. 305ff.]. Das Implementieren erfordert Kompetenzen im Bereich der Automatisierungstechnik.

Stetiges Messen von Messwerten: Der Einsatz von Sensoren dieser Leistungsstufe ermöglicht das stetige Messen physikalischer Größen. Dadurch werden stetig Zwischenwerte erfasst [HS12, S. 391]. Es kann unterschieden werden zwischen Analog- und Digitalsensoren. Analogsensoren liefern Spannungs- oder Stromwerte als Ausgang, die nachfolgend noch auf die Zielgröße verarbeitet werden (z.B. Kraft) [HS12, S. 8f.]. Bei Digitalsensoren können Informationen direkt weiterverarbeitet werden (u.a. busfähig). Zudem sind sie weniger anfällig gegenüber Störungen [Czi15, S. 178f.]. Das Umsetzen erfordert Kompetenzen im Bereich der Automatisierungstechnik.

¹⁶ Ein System erfüllt i.d.R. mehrere Prozesse (Funktionen), wie z.B. heizen, transportieren oder heben. Vor diesem Hintergrund gilt es für die unterschiedlichen Funktionen einzeln zu entscheiden, ob die Funktionserfüllung durch entsprechende Sensorik erfasst wird (Temperatur erfassen, Endposition erfassen etc.). Analog hierzu gilt diese Betrachtung auch für die weiteren Funktionsbereiche des Stufenmodells.

Messen auf Basis von Beobachtern/Virtuelle Sensorik: Das Messen von relevanten Zustandsgrößen ist in einigen Fällen nur mit hohem technischen Aufwand oder gar nicht möglich (z.B. Integration von Sensoren aufgrund des Bauraums nicht möglich). Für solche Anwendungen kann das Konzept der virtuellen Sensorik genutzt werden. Bei virtuellen Sensoren werden zur Erfassung der nicht-verfügbaren Zustandsgrößen andere verfügbare Zustandsgrößen betrachtet [Fic12, S. 81], [Ott03]. Dies ist nur möglich, wenn die verfügbaren Zustandsgrößen ausreichende Informationen zu nicht verfügbaren Größen liefern. Im weitesten Sinne kann ein virtueller Sensor auch als Beobachter interpretiert werden, wenngleich ein virtueller Sensor im Vergleich zu klassischen Beobachtern ([Lun13b, S. 333ff.]) ohne Zustandsrückführung auskommt [Fic12, S. 82], [Ott03]. Das Umsetzen erfordert Kompetenzen der Regelungstechnik und des maschinellen Lernens.

Die Leistungsstufen helfen bei der Charakterisierung und Weiterentwicklung des aktuellen Systems. Da das Stufenmodell in den frühen Phasen der Produktentstehung eingesetzt wird, sind tieferegehende Betrachtungen nicht erforderlich. Infolgedessen liefert das Stufenmodell **keine Informationen** zur Signalvorverarbeitung, dem Messprinzip, der Messgenauigkeit oder der Messfrequenz. Analysen hierzu müssen in nachfolgenden Schritten der Produktentstehung (Konzipierung und Entwurf und Ausarbeitung) erfolgen¹⁷.

Das *Messen* von Zustandsgrößen ermöglicht das Eingreifen in den Prozess. Das Eingreifen in den Prozess selbst wird in dem Funktionsbereich *Agieren* erläutert. Die **Leistungsstufen** für den Funktionsbereich *Agieren* sind im Bild 4-5 dargestellt.

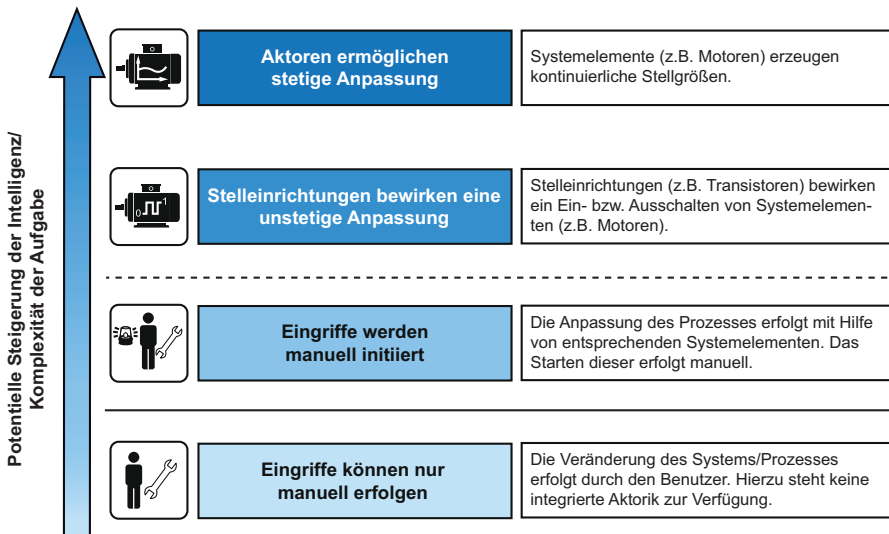


Bild 4-5: Leistungsstufen für den Funktionsbereich „Agieren“

¹⁷ Weiterführende Informationen sind HESSE und SCHNELL sowie CZICHOS zu entnehmen [HS12], [Czi15].

Für den Bereich *Agieren* existieren vier Leistungsstufen. Es ergeben sich zwei Leistungsstufen, die kein oder kein vollautomatisiertes Eingreifen in den Prozess ermöglichen (*Eingriffe können nur manuell erfolgen, Eingriffe werden manuell initiiert*). Im Folgenden werden die Leistungsstufen für den Funktionsbereich *Agieren* beschrieben. Die Leistungsstufen werden beginnend mit einer geringen potentiellen Intelligenz beschrieben.

Eingriffe können nur manuell erfolgen: Für bestimmte Eingriffe stehen keine integrierte Aktoren zur Verfügung. Ein Eingriff zur Systemanpassung erfolgt durch den Benutzer manuell [APW+15, S. 12f.]. So ist z.B. bei Minderbeständen (z.B. Lack) in verarbeitenden Maschinen (z.B. Lackieranlagen) das Eingreifen des Benutzers erforderlich, um den Prozess des Lackierens sicherzustellen (z.B. Lackbehälter wechseln).

Eingriffe werden manuell initiiert: Diese Leistungsstufe nutzt unterstützende Hilfsmittel oder Systemelemente für das Eingreifen in den Prozess. Ein Starten dieser integrierten Hilfsmittel erfordert Aktionen des Benutzers. Beispielsweise kann für Lackbehälter in einer Lackieranlage eine Wechsellvorrichtung realisiert werden. Bei Minderbeständen wechselt diese automatisch Lackbehälter aus. Der Benutzer initiiert diesen Vorgang.

Stelleinrichtungen bewirken eine unstetige Anpassung: In automatisierten Prozessen erfolgt die Veränderung von Prozessgrößen mit Hilfe von Stelleinrichtungen (bzw. Aktoren). Diese ermöglichen das Erzeugen von Bewegungen oder das Ausüben von Kräften [Ise08, S. 441f.]. In einfachen Anwendungsfällen wird jedoch nicht das vollständige Übertragungsverhalten der Aktoren benötigt und eingesetzt [Ise08, S. 447]. Falls z.B. elektrische Schaltungen nur geöffnet oder geschlossen werden sollen, ist der Einsatz von Transistoren als Schalter ausreichend. Vor diesem Hintergrund repräsentiert diese Leistungsstufe die vereinfachte Funktion von klassischen Stelleinrichtungen [Hei05, S. 93]. Die Leistungsstufe adressiert Stelleinrichtungen, die informationstechnisch angesteuert werden. Das Umsetzen erfordert Kompetenzen im Bereich der Automatisierungstechnik.

Aktoren ermöglichen stetige Anpassung: Diese Leistungsstufe beschreibt klassische Aktoren. Diese Aktoren bestehen in Anlehnung an CZICHOS aus einem Signalumformer, einem Steller sowie dem Stellglied. Der Signalumformer formt die Eingangsgröße in eine Stellgröße um. Der Steller wandelt die Stellgröße durch Hilfsenergie in die benötigte Stellenergie. Das Stellglied überführt die Stellenergie in Energie zum Verändern des Prozesses [Czi15, S. 158]. Im Gegensatz zur vorherigen Leistungsstufe werden in dieser stetige Anpassungen des Prozesses bzw. der Strecke unterstützt. Die beschriebenen Aktoren können durch Kompetenzen aus dem Bereich der Automatisierungstechnik realisiert werden.

Für die gezeigten Leistungsstufen findet keine Berücksichtigung verschiedener Aktortypen statt, wie z.B. elektromagnetisch oder piezoelektrisch. Ebenso wird das detaillierte Übertragungsverhalten der Aktoren **nicht** bei der Ideenfindung **berücksichtigt** [Czi15, S. 157ff.]¹⁸.

¹⁸ Weitere Informationen zu Aktoren können CZICHOS und ISERMANN entnommen werden [Czi15], [Ise08].

4.2.3 Steuern und Regeln

Die Integration von automatisierten Funktionen zum *Messen* und *Agieren* ermöglichen Funktionen aus dem **Funktionsbereich Steuern und Regeln**. Steuerungen und Regelungen ermöglichen automatisierte Anpassungen des Systemverhaltens mit Hilfe von Akteuren [Ise08, S. 21]. Im Unterschied zur Regelung erfolgt bei einer Steuerung keine Rückführung der zu beeinflussenden Regelgröße (oder auch Prozessgröße) [Czi15, S. 65f.].

Steuerungen sind grundsätzlich nicht in der Lage, auf Störeinflüsse – die im Entwurf nicht explizit mit berücksichtigt wurden – zu reagieren. Beispielsweise würde bei einer Temperatursteuerung zum Heizen eines Wohnraumes auf Basis der Außentemperatur eine Steuerung auftretende Einflüsse nicht berücksichtigen. Eine Temperatursteuerung zum Heizen eines Wohnraums würde z.B. auftretenden Einflüsse nicht berücksichtigen. Zu diesen Einflüssen können u.a. geöffnete Fenster oder der Einsatz weiterer Heizungen zählen. Infolgedessen eignen sich Steuerungen nicht, wenn Störeinflüsse den Prozess stark beeinflussen können, so dass die Steuerungsaufgabe nicht ausreichend erfüllt werden kann. Hierfür sind **Regelungen** besser geeignet, wenngleich diese zusätzliche Sensorik im Prozess erfordern [Czi15, S. 65ff.].

Darüber hinaus kann beim **Entwurf** von Steuerungen und Regelungen zwischen einem **verhaltensbasierten** (experimentelle Modellbildung) und **modellbasierten** (theoretische Modellbildung) Entwurf unterschieden werden. Beim modellbasierten Entwurf erfolgt die Modellbildung basierend auf physikalischen Gesetzen, die den Prozess beschreiben. Der verhaltensbasierte Entwurf wird eingesetzt, wenn die Physik eines Prozesses nicht oder nicht umfassend bekannt ist. Die Modellbildung kann dann mit Hilfe von Laborversuchen bzw. Experimenten unterstützt werden. Dadurch können die Wirkzusammenhänge extrahiert werden [Ise08, S. 47ff.].

Ein erarbeiteter **Entscheidungsbaum** soll die Auswahl hinsichtlich Steuerungen und Regelungen sowie dem modellbasierten und verhaltensbasierten Entwurf dieser unterstützen. Der Entscheidungsbaum ist im Bild 4-6 dargestellt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden für den gesamten Funktionsbereich *Steuern und Regeln* drei untergeordnete Funktionsbereiche erstellt. In Abhängigkeit der Bedingungen unterstützt der Entscheidungsbaum eine Zuordnung zu diesen.

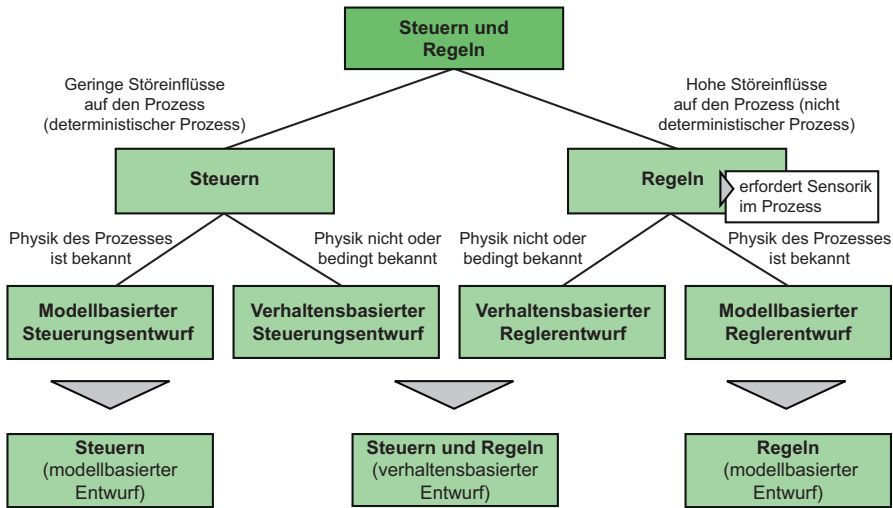


Bild 4-6: Aufteilung von Steuern und Regeln sowie Zuordnung zu den relevanten Funktionsbereichen des Stufenmodells in Anlehnung an CZICHOS und ISERMANN [Czi15, S. 65ff.], [Ise08, S. 47ff.]

Nachfolgend wird zunächst der Funktionsbereich **Steuern (modellbasierter Entwurf)** vorgestellt. Die entsprechenden Leistungsstufen des Funktionsbereich sind im Bild 4-7 dargestellt.

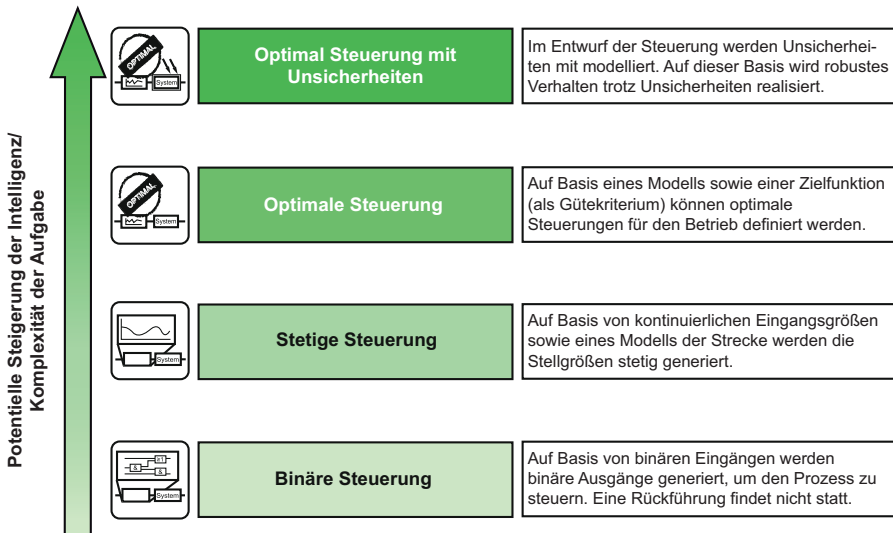


Bild 4-7: Leistungsstufen für den Funktionsbereich „Steuern (modellbasierter Entwurf)“

Binäre Steuerung: Binäre Steuerungen repräsentieren einen Sonderfall in diesem Funktionsbereich. Durch ihre einfachen Verarbeitungen erfolgt die Modellierung nicht zwangsläufig auf Basis physikalischer Gesetze. Da sie aber der klassischen Steuerungstechnik zugeordnet sind, werden sie im Bereich der modellbasierten Steuerungen berücksichtigt. Binäre Steuerungen steuern technische Prozesse durch Binärsignale. Diese können entweder den Zustand „0“ oder „1“ annehmen. Die Verarbeitung findet durch Verknüpfungs-, Zeit- oder Speicherglieder statt. Typische Verknüpfungsglieder sind z.B. UND- sowie ODER-Gatter. Binäre Steuerungen werden z.B. durch speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) umgesetzt [Czi15, S. 73f.]. Die Umsetzung erfordert Kompetenzen in der Automatisierungstechnik.

Stetige Steuerung: Klassische Steuerungen haben die Aufgabe, Ausgangsgrößen technischer Systeme kontinuierlich entsprechend vorgegebenen Eingangsgrößen zu beeinflussen. Die Steuerungen weisen einen offenen Wirkungsfluss auf, ohne eine Rückführung der Prozessgröße. Bei einer Temperatursteuerung wird z.B. durch einen Sollwertgeber die Soll-Temperatur voreingestellt. Die Steuereinrichtung kann den Prozess darauf basierend beeinflussen. Dies erfolgt i.d.R. mit Hilfe vordefinierter Kennlinien im Sinne eines Modells [Czi15, S. 65ff.]. Das Umsetzen von stetigen Regelungen erfordert Kompetenzen in der Regelungstechnik.

Optimale Steuerung: Aufgabe der Steuerung ist das Beeinflussen eines Prozesses hinsichtlich der vorgegebenen Soll-Werte. Bei optimalen Steuerungen kann ein Gütekriterium definiert werden, um das Verhalten der Steuerung im Sinne des festgelegten Gütekriteriums zu reflektieren [PLB12, S. 6], [FO14, S. 239ff.]. Hierdurch kann sich eine Steuerung z.B. zeitoptimal oder verbrauchsoptimal verhalten [PLB12, S. 246ff.], [FO14, S. 239ff.]. Die Optimierung kann mit verschiedenen Ansätzen¹⁹ durchgeführt werden, wie z.B. linear-quadratische Optimierung (LQ-Optimierung) oder durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Das Realisieren von optimalen Steuerungen erfordert neben Kompetenzen in der Regelungstechnik, Kompetenzen im Bereich der mathematischen Optimierung.

Optimale Steuerung mit Unsicherheiten: Optimale Steuerung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten können durch spezielle Ansätze realisiert werden. Unsicherheiten können u.a. im Rahmen der Modellbildung auftreten. Beispielsweise sind im Entwurf Parameter im Streckenmodell nicht vollständig bekannt oder identifizierbar. Ein unsicherer Parameter kann als zufällige Variable modelliert werden, der bei der Optimierung berücksichtigt wird. Das Optimalsteuerungsproblem wird hierzu als Mehrzieloptimierungsproblem definiert. So können Steuerungen berechnet werden, welche zum einen bezüglich des vorgeschriebenen Gütekriteriums optimiert sind und zum anderen den Einfluss von Unsicherheiten minimieren [OS13, S. 204ff.]. Das Umsetzen erfordert Kompetenzen in der Regelungstechnik sowie der mathematischen Optimierung.

¹⁹ Einen Überblick über Optimierungsmethoden kann PAPAGEORGIU ET AL. entnommen werden [PLB12].

Im nächsten Schritt wird der Funktionsbereich **Regeln (modellbasierter Entwurf)** beschrieben. Zu diesem Funktionsbereich gehören drei Leistungsstufen. Bild 4-8 zeigt die entsprechenden Leistungsstufen.

Unstetige Regelung: Eine Regelung dieser Leistungsstufe wird als unstetig bezeichnet, wenn die Ausgangsgröße der Regelung nur wenige diskrete Werte annehmen kann [ZR11, S. 100]. Beispiel ist ein Zweipunktregler zur Temperaturregelung, der die zwei diskreten Zustände „Heizung aus“ und „Vollast“ umfasst. In realen Systemen weisen die Regelungen eine Hysterese auf, sodass das Einschalten bei einem höheren Wert der Eingangsgröße liegt als beim Ausschalten [ZR11, S. 302]. Unstetige Regler sind in vielen Anwendungsfällen kostengünstig [ZR11, S. 100]. Die Realisierung von unstetigen Regelungen erfordert Kompetenzen der Automatisierungstechnik.

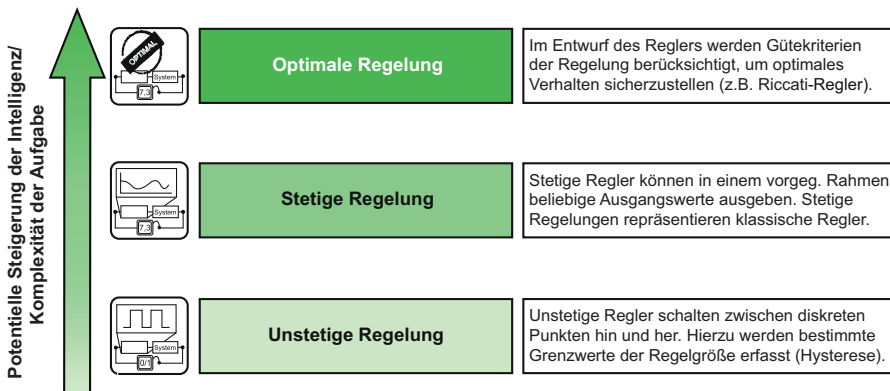


Bild 4-8: Leistungsstufen für den Funktionsbereich „Regeln (modellbasierter Entwurf)“

Stetige Regelung: Im Gegensatz zu unstetigen Regelungen können stetige Regelungen im Beharrungszustand jeden Wert innerhalb des Stellbereichs annehmen [ZR11, S. 100]. Sie repräsentieren die klassischen Regelungen. Vor diesem Hintergrund werden eine stetige Messung sowie eine stetig agierende Aktorik benötigt. Für stetige Regelungen sind Kompetenzen der Regelungstechnik erforderlich.

Optimale Regelung: Aufgabe der Regelung ist es, auf Grundlage von Messung den Prozess so zu beeinflussen, dass trotz Störungen ein vorgegebener Wert erreicht wird. Diese Aufgabe kann durch die Berücksichtigung eines bestimmten Gütekriteriums auch optimal erfolgen [PLB12, S. 6]. So kann das Erreichen zeitoptimal oder verbrauchsarm erfolgen. Der Entwurf von optimalen Regelungen kann z.B. durch H_2 - und H_∞ -Verfahren oder durch den Einsatz der RICCATI-Gleichung realisiert werden [Lun13b, S. 281ff.], [ADG+09, S. 26]. Das Umsetzen dieser Leistungsstufe erfordert Kompetenzen in der Regelungstechnik sowie der mathematischen Optimierung.

Neben den Funktionsbereichen *Steuern und Regeln* (jeweils auf Basis eines modellbasierten Entwurfs) wird im Rahmen der Systematik auch der Funktionsbereich **Steuern und Regeln (verhaltensbasierter Entwurf)** berücksichtigt. Bild 4-9 zeigt die drei enthaltenen Leistungsstufen. Die nachfolgenden Erklärungen beschreiben verhaltensbasierte Regelungen, jedoch kann dies analog auch für Steuerungen angenommen werden.

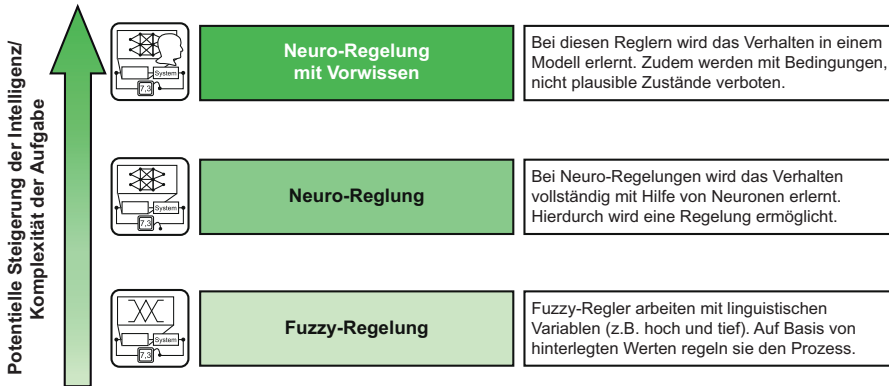


Bild 4-9: Leistungsstufen für den Funktionsbereich „Steuern und Regeln (verhaltensbasierter Entwurf)“²⁰

Fuzzy-Regelung: Bei der Fuzzy-Regelung wird die sogenannte Fuzzy-Logik verwendet. Diese formuliert eindeutige Messgrößen (z.B. Temperatur) im Gegensatz zu numerischen Variablen nicht in Zahlen, sondern in linguistischen Variablen (z.B. hoch oder tief). Hierdurch wird eine übersichtliche Darstellung ohne mathematische Beschreibungen realisiert. Die Einteilung auf linguistische Variablen wird als *Fuzzyfizierung* bezeichnet [Kie12, S. 594], [ZR11, S. 371]. Die Variablen werden nachfolgend durch Regeln verarbeitet, wodurch wiederum unscharfe Ausgangsvariablen entstehen. Aus diesen werden exakte Stellgrößen gebildet. Dieser Schritt wird als *Defuzzyfizierung* bezeichnet [ZR11, S. 371f.]. Fuzzy-Regelungen sind im regelungstechnischen Sinne robust und der Zeitaufwand sowie die Kosten zur Umsetzung sind geringer als bei klassischen Regelungen [ZR11, S. 371ff.]. Das Umsetzen von Fuzzy-Regelungen erfordert Kompetenzen der Automatisierungstechnik oder Regelungstechnik.

Neuro-Regelung: Mit Hilfe von neuronalen Netzen können sogenannte Neuro-Regelungen realisiert werden. Die neuronalen Netze sind lernfähig, da die Gewichtungen in den einzelnen Neuronen verändert werden können. Falls z.B. die Physik eines Prozesses nicht mathematisch beschrieben werden kann, können Laborversuche durchgeführt werden,

²⁰ Im Bild sind die Leistungsstufen für eine Regelung abgebildet. Ein Einsatz im Rahmen von Steuerungen kann jedoch analog erfolgen. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf das Nennen des Begriffs Steuerung im Bild verzichtet.

um das Eingangs- und Ausgangsverhalten des Prozesses zu beobachten. Diese Beobachtungen können nachfolgend eingesetzt werden, um das Verhalten mit Hilfe des neuronalen Netzes zu erlernen. Das erlernte Modell kann im Folgenden zur Regelung des Prozesses eingesetzt werden [ZR11, S. 377ff.], [USA+14]. Neuro-Regelungen erfordern Kompetenzen im Bereich des maschinellen Lernens.

Neuro-Regelung mit Vorwissen: Das Verhalten von Neuro-Regelungen wird bestimmt durch das erlernte Verhalten des neuronalen Netzes. Bei Neuro-Regelungen können auch physikalisch nicht mögliche oder fehlerhafte Zustände erlernt werden, welche die Verlässlichkeit der Regelung mindern können. Vor diesem Hintergrund entwickelte NEUMANN einen Ansatz, um Vorwissen beim Erlernen von neuronalen Netzen einzusetzen. Hierdurch können Forderungen hinsichtlich der Monotonie oder maximal mögliche Werte im Rahmen des Lernvorgangs berücksichtigt werden [Neu13, S. 75ff.]. Das Umsetzen erfordert Kompetenzen im Bereich des maschinellen Lernens.

Nach der Auswahl von entsprechenden Leistungsstufen aus dem Funktionsbereich Steuern und Regeln gilt es in nachfolgenden Schritten der Produktentstehung tiefergehende Untersuchungen durchzuführen. In diesem Zusammenhang können z.B. Erweiterungen von Reglerstrukturen analysiert werden. Hierzu zählen z.B. Mehrgrößenregelung, Störgrößenaufschaltung oder Kaskadenregelungen. Ferner gilt es Taktfrequenzen oder konkrete Verfahren zur Optimierung oder dem Erlernen von Zusammenhängen zu analysieren²¹.

4.2.4 Identifizieren und Adaptieren

Technische Systeme weisen in der Realität Abweichungen von Modellen auf, die in der Entwurfsphase zur Auslegung von Steuerungen und Regelungen eingesetzt werden. So können sich beispielsweise auch die Parameter des Streckenmodells während der Betriebsphase verändern [ZR11, S. 364]. Vor diesem Hintergrund besteht für einige Anwendungen der Bedarf, Abweichungen im Betrieb zu identifizieren und nach Möglichkeit das System auf diese Veränderungen hin zu adaptieren. Nachfolgend werden daher die beiden Funktionsbereiche **Identifizieren** und **Adaptieren** näher vorgestellt. In der Praxis werden die Funktionsbereiche *Identifizieren* und *Adaptieren* im Rahmen von adaptiven Regelungen integrativ umgesetzt. Um jedoch eine differenzierte Analyse der Leistungsstufen in beiden Bereichen zu ermöglichen, wurden diese getrennt voneinander beschrieben (analog zum *Messen* und *Agieren*).

²¹ Für weiterführende Informationen zu Steuerungen und Regelungen sei auf LUNZE, FÖLLINGER und DÖRRSCHEIDT sowie ZACHER und REUTER verwiesen [Lun13], [FD08], [ZR11].

Im klassischen Sinne wird unter der Identifikation das Erkennen von zeitvarianten oder unbekanntem Systemparametern des Grundsystems verstanden [Nau00, S. 9]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dieser Begriff erweitert. Infolgedessen soll unter **Identifizieren** das Erkennen von Zuständen verstanden werden, die nicht mit Hilfe der bestehenden Steuerung und Regelung behandelt werden können, das Identifizieren von abweichenden Systemparametern und das Erkennen von zukünftigen Veränderungen des Systems. Bild 4-10 zeigt die Leistungsstufen für den Funktionsbereich *Identifizieren*.

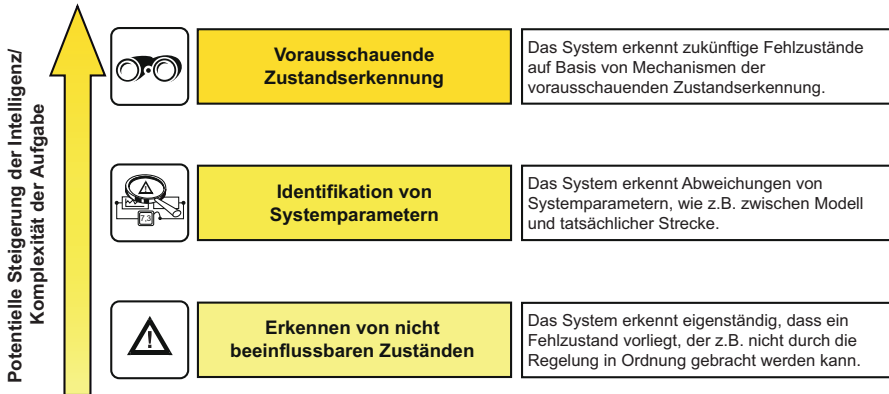


Bild 4-10: Leistungsstufen für den Funktionsbereich „Identifizieren“

Erkennen von nicht beeinflussbaren Zuständen: Durch das Umsetzen dieser Leistungsstufe können Fehlzustände erkannt werden, für die die implementierte Steuerung oder Regelung nicht ausgelegt wurde. Vor diesem Hintergrund ergibt sich nachfolgend die Notwendigkeit, das Systemverhalten anzupassen. Beispielsweise kann bei bekannten Prozessen eine Reglerumschaltung oder das Eingreifen des Benutzers initiiert werden [Ise08, S. 323ff.], [IRD+15, S. 57ff.]. Das Erkennen dieser Zustände kann mit zusätzlicher Sensorik zur Prozessüberwachung oder durch Ansätze des maschinellen Lernens realisiert werden [Ise08, S. 333]. Maschinelle Lernverfahren sind z.B. in der Lage, ungewünschte Prozessmuster in den Daten zu erkennen, um hierdurch entsprechende Maßnahmen zu initiieren [LSB+15, S. 35], [IRD+15, S. 57]. Aufgrund verschiedener Möglichkeiten der Erkennung können u.a. Kompetenzen im Bereich der Automatisierungstechnik, der Regelungstechnik oder des maschinellen Lernens benötigt werden.

Identifikation von Systemparametern: Diese Leistungsstufe ermöglicht die Identifikation von zeitvarianten oder unbekanntem Systemparametern im Betrieb. Hierdurch ist eine Adaption der Steuerung oder Regelung möglich, wodurch ein erweiterter Betriebsbereich sichergestellt werden kann [Nau00, S. 9], [UGB74]. Bei der Identifikation von Systemparametern werden maschinelle Lernverfahren eingesetzt [Ise08, S. 333ff.]. Die eingesetzten Verfahren zur Identifikation werden, neben dem Einsatz im Betrieb, auch häufig im Rahmen des Entwurfs eingesetzt [MRB14, S. 2170ff.]. Die Umsetzung dieser Leistungsstufe erfordert Kompetenzen der Regelungstechnik und des maschinellen Lernens.

Vorausschauende Zustandserkennung: Durch konventionelle Regelungsstrategien wird der Prozess auf Basis von aktuell vorliegende Messungen geregelt. Durch die Berücksichtigung von zukünftigen Zuständen kann ein vorausschauendes Verhalten der Regelung realisiert werden. Hierdurch können prädiktive Regelungen²² realisiert werden. Für eine Heizungsregelung können z.B. Wetterprognosen genutzt werden, um verbessertes Systemverhalten zu realisieren [Bia06, S. 4ff.]. Die Informationen zu Zustandsänderungen können aus unterschiedlichen Quellen stammen. Beispielsweise könnten andere Systeme diese Informationen übermitteln oder die Änderungen sind bereits im Entwurf bekannt (im Sinne einer gesteuerten Adaption [Ise08, S. 326]). Darüber hinaus können auch maschinelle Lernverfahren langfristige Trends in der Betriebsphase erkennen, die in Zukunft eine Adaption erforderlich machen [IRD+15, S. 58f.]. Infolgedessen sind Kompetenzen in den Bereichen Regelungstechnik und maschinelles Lernen erforderlich.

Nachfolgend wird der Funktionsbereich **Adaptieren** im Detail erläutert. Basierend auf umgesetzten Leistungsstufen des Funktionsbereichs *Identifizieren*, ermöglichen die Leistungsstufen des *Adaptierens* die Veränderung bzw. Adaption des Systems. So können z.B. Reglerparameter im Sinne einer Parameteranpassung verstellt werden oder das System wird mit Hilfe von Notfall-Mechanismen in einen sicheren Zustand überführt [FD08, S. 15], [KSR+09, S. 105ff.]. Bild 4-11 zeigt die Stufen des Funktionsbereichs *Adaptieren*.

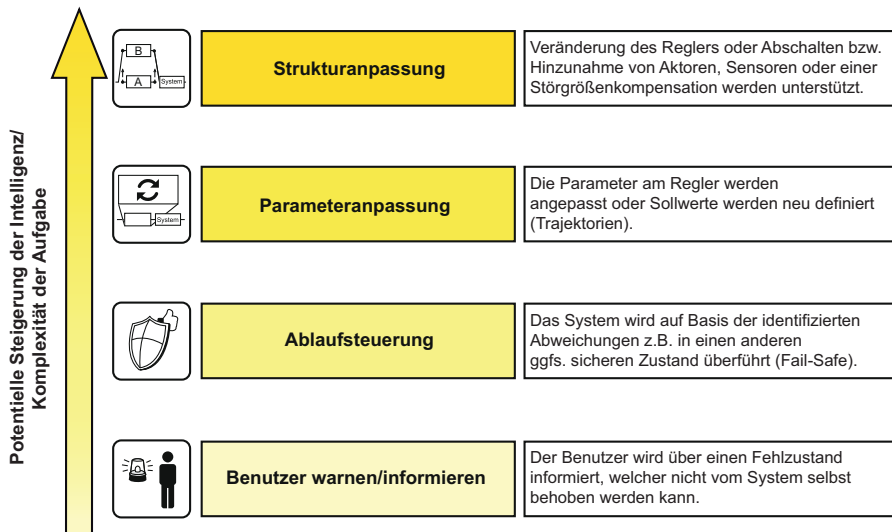


Bild 4-11: Leistungsstufen für den Funktionsbereich „Adaptieren“

²² Im Englischen auch MPC (Model Predictive Control) genannt [DP06, S. 590].

Benutzer warnen/informieren: Die einfachste Form des Adaptierens ist das Warnen bzw. Informieren des Benutzers. Dies kann z.B. erforderlich sein, wenn die umgesetzte Regelung oder Steuerung nicht im davor vorgesehenen Betriebsbereich arbeitet. Durch das Eingreifen des Benutzers kann das System manuell in einen sicheren Systemzustand überführt werden oder der Benutzer passt das System manuell an die Veränderung an.

Ablaufsteuerung: Ablaufsteuerungen ermöglichen den Ablauf von Routinen, um das Systemverhalten an die veränderten Betriebsbedingungen anzupassen. In diesem Zusammenhang können auch Notfallprozesse ausgelöst werden, um das System in einen sicheren Systemzustand zu überführen. Beispielsweise beschreibt das Fail-Safe-Prinzip eine Fehlererkennung des Systems und eine hinreichend schnelle Überführung in den sicheren Zustand [Dor15, S. 27], [ALR+04, S. 9]. In Abhängigkeit der Anwendung erfordert das Umsetzen von Ablaufsteuerungen Kompetenzen der Automatisierungstechnik oder auch der Verlässlichkeit technischer Systeme.

Parameteranpassung: Auf Basis der Identifikation von Systemparametern kann eine Parameteranpassung umgesetzt werden. So können z.B. Reglerparameter im Betrieb verändert werden, wenn dies die aktuelle Situation erfordert. Der Anpassung der Parameter liegt in der Regel ein Adaptionsalgorithmus zu Grunde, der mit Hilfe von Optimierungsverfahren optimale Reglerparameter berechnet [Nau00, S. 9f.]. Im Zusammenhang mit der Online-Optimierung zur Anpassung von Reglerparametern kann auch in Anlehnung an LUNZE von modellbasierten Regelungen gesprochen werden (Internal Model Control [Lun13a, S. 551ff.]). Hierbei ist das Modell des Reglers sowie der Strecke ein Teil der Regelung [Lun13a, S. 551]. Zur Parameteranpassung werden Kompetenzen im Bereich der Regelungstechnik sowie der mathematischen Optimierung benötigt.

Strukturanpassung: Strukturanpassungen ermöglichen u.a. das Wechseln von einzusetzenden Reglern oder Systemelementen. Falls z.B. ein Sensor- oder Aktorausfall vorliegt, kann das Einfügen eines Rekonfigurationsblocks in der Regelungsstruktur ein zufriedenstellendes Systemverhalten sicherstellen [ADG+09, S. 6f.], [Krü14, S. 6]. Darüber hinaus können Strukturanpassungen unterschieden werden in Rekonfiguration und kompositionale Anpassung. Bei einer Rekonfiguration können die Anordnung und Beziehungen zwischen einer fest verfügbaren Menge von Systemelementen verändert werden. Bei einer kompositionalen Anpassung werden neue Elemente hinzu genommen oder aktiviert bzw. bestehende entfernt oder deaktiviert [FGK+04, S. 13]. Das Umsetzen dieser Leistungsstufe erfordert Kompetenzen im Bereich der Regelungstechnik.

In nachfolgenden Schritten der Produktentstehung müssen für das *Identifizieren* und *Adaptieren* weitere Zusammenhänge analysiert werden²³. Hierzu gehören u.a. Verfahren zur Identifikation (z.B. Fourier-Analyse oder Frequenzgang-Messung [Ise08, S. 335f.]).

²³ Weiterführende Informationen zur Identifikation, Adaption sowie adaptiven Regelungen können ISERMANN, LUNZE und BIANCHI entnommen werden [Ise08], [Lun13], [Bia06].

4.2.5 Optimieren

Der Funktionsbereich **Optimieren** beschreibt verschiedene Funktionen, die das Systemverhalten im laufenden Betrieb hinsichtlich definierter Zielfunktionen bzw. Gütekriterien optimieren. In diesem Zusammenhang werden z.B. die Modelle des dynamischen Systemverhaltens nicht nur im Rahmen des Entwurfs sondern auch im Betrieb zur Ziel-Optimierung verwendet [DP06, S. 590ff.], [ADG+09, S. 26]. Für den Funktionsbereich *Optimieren* wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die modellbasierte und verhaltensbasierte Optimierung vorgestellt [DFH+14, S. 12ff.].

Bild 4-12 zeigt die beiden **Möglichkeiten zum Realisieren** des Funktionsbereichs *Optimieren*. Zum einen können Ansätze der mathematischen Optimierung auf Basis von regelungstechnischen Modellen (theoretische Modellbildung) zum Einsatz kommen. Zum anderen ist auch der Einsatz von Ansätzen aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz und des Soft-Computing möglich. Diese betrachten das Systemverhalten als Blackbox (experimentelle Modellbildung) [ADG+09, S. 123].

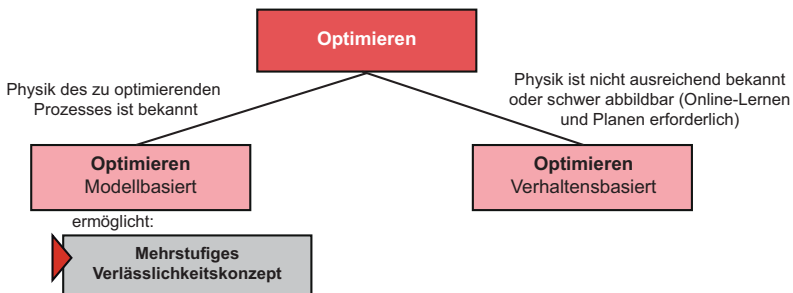


Bild 4-12: Möglichkeiten zur Realisierung des Funktionsbereichs „Optimieren“ in Anlehnung an [Dum11, S. 154f.], [ADG+09, S. 123f.]

Die **modellbasierte Optimierung** findet Anwendung, wenn die Physik des zu optimierenden Prozesses hinreichend bekannt ist, sodass entsprechende Modelle spezifiziert werden können. Falls der zu optimierende Prozess nicht hinreichend bekannt ist, können Ansätze der **verhaltensbasierten Optimierung** eingesetzt werden. In diesem Rahmen werden u.a. auch Lern- und Planverfahren zur Optimierung berücksichtigt [ADG+09, S. 123ff.], [Dum11, S. 154f.]. Die *modellbasierte Optimierung* ermöglicht darüber hinaus das Umsetzen des *mehrstufigen Verlässlichkeitskonzepts*, welches im Rahmen der Leistungsstufen der *modellbasierten Optimierung* erläutert wird. Nachfolgend werden zunächst die Leistungsstufen des Funktionsbereichs *Optimieren (modellbasiert)* vorgestellt. Bild 4-13 stellt die Leistungsstufen grafisch dar.

Entwurfspunktelektion auf Basis von Zielen: Die Lösung von Mehrzieloptimierungsproblemen ist in der Regel kein (globales) Optimum, sondern eine Menge optimaler Kompromisse (Paretomenge). Die Paretomenge umfasst mögliche Betriebspunkte, die z.B. Reglerparameter repräsentieren. Die Betriebspunkte können als Paretopunkte

bezeichnet werden, die in Abhängigkeit der vorliegenden Situation ausgewählt werden [ADG+09, S. 125f.]. Die Berechnung der Paretomenge und somit der Paretopunkte kann jedoch zeitaufwändig sein und je nach Anwendung nicht im Betrieb erfolgen. Vor diesem Hintergrund beschreibt die vorliegende Leistungsstufe die Auswahl von Paretopunkten im Betrieb auf Basis einer im Entwurf bestimmten Paretomenge. In diesem Zusammenhang kann der Benutzer z.B. im Betrieb die Ziele „maximiere Leistungsfähigkeit“ oder „minimiere Energieverbrauch“ eigenständig unpriorisieren [Dep06, S. 78ff.]. Für die Umsetzung dieser Leistungsstufe sind Kompetenzen der mathematischen Optimierung erforderlich.

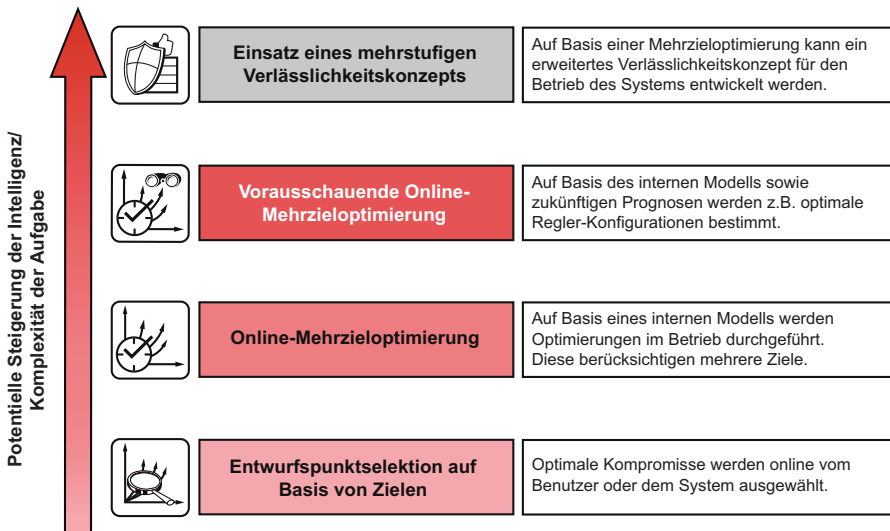


Bild 4-13: Leistungsstufen für den Funktionsbereich „Optimieren (modellbasiert)“

Online-Mehrzieloptimierung: Diese Leistungsstufe beschreibt die Bestimmung und Auswahl von Paretopunkten im laufenden Betrieb. Bei der Online-Mehrzieloptimierung werden die aktuellen Parameter des Systems bzw. der Strecke berücksichtigt, um optimale Betriebspunkte zu bestimmen [Dep06, S. 125f.]. Das Umsetzen dieser Leistungsstufe erfordert Kompetenzen im Bereich der mathematischen Optimierung.

Vorausschauende Online-Mehrzieloptimierung: Diese Leistungsstufe beschreibt ebenfalls eine Online-Optimierung. Im Vergleich zu der zuvor beschriebenen Stufe werden jedoch nicht nur aktuelle Informationen zum System oder der Strecke berücksichtigt, sondern auch Information über zukünftige Zustände (z.B. durch Prognosen). Das Umsetzen dieser Leistungsstufe erfordert ebenfalls Kompetenzen der mathematischen Optimierung.

Einsatz eines mehrstufigen Verlässlichkeitskonzepts: Das Umsetzen der modellbasierten Optimierung ermöglicht die Implementierung des sogenannten mehrstufigen Verlässlichkeitskonzepts [Son14]. Dieses Konzept umfasst vier Stufen, welche in

Abhängigkeit der vorliegenden Situation und Bewertung der Verlässlichkeit im Betrieb berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 4.3.4). In diesem Zusammenhang kann z.B. die Verlässlichkeit als eigenständiges Ziel definiert werden, welches bei Bedarf höher priorisiert werden kann. Darüber hinaus berücksichtigt das Konzept weitere Ansätze zur Steigerung der Verlässlichkeit technischer Systeme, wie z.B. das Fail-Safe-Prinzip [KMS+14, S. 55ff.]. Das Umsetzen erfordert Kompetenzen im Bereich der Verlässlichkeit.

Im nächsten Schritt wird der Funktionsbereich *Optimieren (verhaltensbasiert)* beschrieben, der auf Basis von verhaltensbasierten Ansätzen realisiert werden kann. Bild 4-14 zeigt die Leistungsstufen.

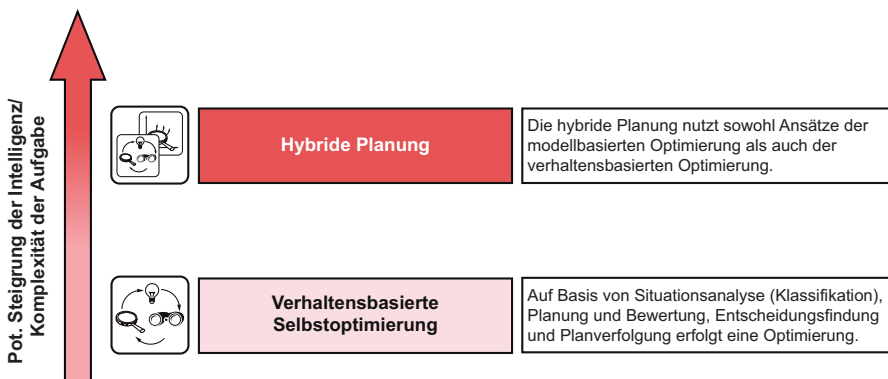


Bild 4-14: Leistungsstufen für den Funktionsbereich „Optimieren (verhaltensbasiert)“

Verhaltensbasierte Selbstoptimierung: Die Ansätze der verhaltensbasierten Optimierung, wie z.B. Lern- und Planverfahren werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit der Leistungsstufe verhaltensbasierte Selbstoptimierung zugeordnet. Vor diesem Hintergrund adressiert diese Leistungsstufe die Optimierung verschiedener Ziele auf Basis von Black-Box-Modellen [Har14a, S. 16ff.] Hierzu erfasst das System zunächst die aktuelle Situation und klassifiziert diese. Nachfolgend findet eine Planung und Bewertung statt. Nach der Bewertung wird entschieden, welcher Plan ausgeführt werden soll. Im Anschluss wird dieser Plan ausgeführt [Obe08, S. 74f.]. Darüber hinaus können im Rahmen der Planung, Bewertung und Entscheidung, Ansätze zur Verhaltensantizipation und -regelungen eingesetzt werden [Har14b, S. 57f.]. Das Umsetzen dieser Leistungsstufe erfordert Kompetenzen im Bereich des maschinellen Lernens.

Hybride Planung: Die hybride Planung vereinigt sowohl die Ansätze der modellbasierten Optimierung als auch die Leistungsstufe der verhaltensbasierte Selbstoptimierung. In diesem Zuge werden z.B. Verhaltensantizipationen genutzt, um basierend auf den hinterlegten Modellen optimale zukünftige Betriebspunkte zu bestimmen [Dum11, S. 18], [Obe08, S. 75]. Die Umsetzung dieser Leistungsstufe erfordert Kompetenzen in den Bereichen der mathematischen Optimierung sowie des maschinellen Lernens.

Basierend auf der Auswahl der Leistungsstufen wird in nachfolgenden Schritten der Produktentstehung entschieden, welche Verfahren konkret zum Einsatz kommen. Dies betrifft sowohl Ansätze der Optimierung, als auch eingesetzte Lern- oder Planverfahren²⁴.

4.2.6 Zusätzliche Funktionen der Informationsverarbeitung

Begleitend zu den Funktionsbereichen *Messen, Agieren, Steuern und Regeln, Identifizieren, Adaptieren* sowie *Optimieren* umfasst das Stufenmodell noch drei **weitere Funktionsbereiche** mechatronischer Systeme: *Wissen speichern, Kommunizieren–Systeme* und *Kommunizieren–Benutzer*. Diese adressieren in Anlehnung an die Struktur mechatronischer Systeme die Informationsverarbeitung, die Kommunikation mit anderen Systemen und die Kommunikation mit dem Benutzer [VDI2206, S. 14ff.]. Im Gegensatz zu den vorherigen Leistungsstufen werden in den nachfolgenden Leistungsstufen keine Kompetenzen zur Umsetzung genannt. Dies erfolgt vor dem Hintergrund, dass die zuvor erwähnten Kompetenzen (z.B. Regelungstechnik oder mathematische Optimierung) keine Berücksichtigung finden. Nachfolgend werden die drei Funktionsbereiche vorgestellt.

Die Möglichkeit Wissen im System zu speichern eröffnet zusätzliche Potentiale für das System. Falls das System z.B. Prozesshistorien abspeichern kann, ist nachfolgend eine Analyse der Daten möglich, um tiefergehende Informationen zu extrahieren. Diese Informationen können zur Verhaltensanpassung genutzt werden [PR14, S. 312ff.], [LRP+11]. Bild 4-15 gibt einen Überblick über die Leistungsstufen im Funktionsbereich **Wissen speichern**. Im Wesentlichen werden in diesem Zusammenhang unter dem Begriff Wissen Informationen über Prozessdaten (Prozesswerte und Prüfmerkmale) zusammengefasst [GP14, S. 388]. Die einzelnen Leistungsstufen werden nachfolgend erläutert.

Keine Speicherung/Nutzung von Daten: In dieser Leistungsstufe erfolgt keine Speicherung von Daten auf dem System und infolgedessen stehen keine Daten zur weiteren Nutzung zur Verfügung. Das Systemverhalten ergibt sich somit durch die Einstellungen, die im Entwurf realisiert wurden (z.B. elektronisch, elektromechanisch oder pneumatisch). In Zusammenhang mit Steuerungen kann u.a. von verbindungsprogrammierbaren Steuerungen gesprochen werden (z.B. durch Relaisstechnik) [Czi15, S. 73]. Veränderungen des Systemverhaltens erfordern somit stets einen Eingriff des Benutzers auf Hardwareebene.

Datenspeicher steht lesend zur Verfügung: Diese Leistungsstufe beschreibt die Möglichkeit, Daten zum Systemverhalten (z.B. Einstelldaten wie Prozesszeiten, Drücke, Temperaturen etc.) lesend zu nutzen [GP14, S. 388]. Die Vorgaben zu Parametern kommen z.B. vom Benutzer des Systems oder vom Systemhersteller. Das Verändern dieser Daten ist für das System selbst nicht möglich [APW+15, S. 14f.]. Dem System stehen dennoch temporäre Speicher zur Verfügung (z.B. für Zustände der SPS-Steuerung).

²⁴ Detaillierte Einblicke in die Optimierung geben u.a. MIETTINEN, ANACKER, ET AL. und HARTMANN [Mie98], [ADF+14], [Har14b].

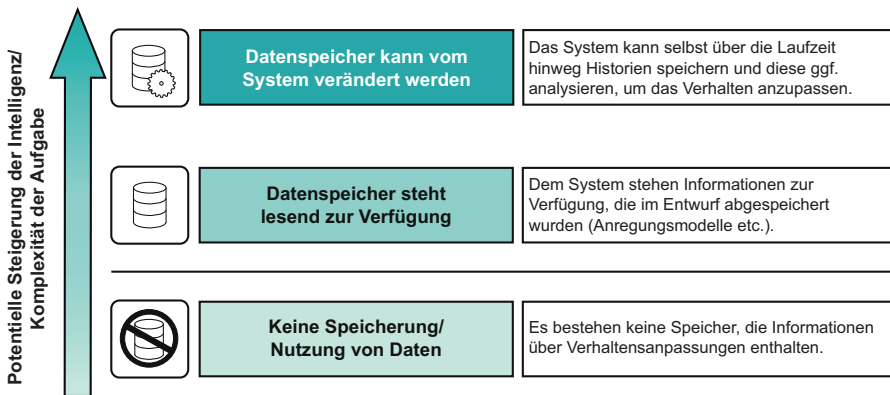


Bild 4-15: Leistungsstufen für den Funktionsbereich „Wissen speichern“

Datenspeicher kann vom System verändert werden: Bei dieser Leistungsstufe kann das System eigenständig gespeicherte Prozesswerte verändern, um das Systemverhalten anzupassen. Darüber hinaus kann das System auch Prüfmerkmale speichern und auswerten [DH06, S. 6], [APW+15, S. 14f.]. Hierdurch können Adaptionen des Systemverhaltens realisiert werden, wie z.B. Anpassung von Reglerparametern.

In nachfolgenden Schritten der Produktentstehung gilt es z.B. zu definieren, in welcher Geschwindigkeit das Lesen oder Schreiben von Daten erfolgt oder welche Mengen an Daten insgesamt oder zu einem bestimmten Zeitpunkt gespeichert werden können. Das Auslegen der Datenspeicher erfolgt dann auf dieser Basis.

Neben der Datenspeicherung ist die **Kommunikation mit dem Benutzer** ebenfalls zur Bewertung der Intelligenz entscheidend. Hierdurch kann das System Informationen erhalten, die für die Anpassung des Systemverhaltens relevant sind; auch der Benutzer kann erweiterte Informationen zum Systemzustand erhalten [VDI2206, S. 14ff.]. Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend die Leistungsstufen für den Funktionsbereich *Kommunizieren–Benutzer* beschrieben. Diese sind im Bild 4-16 dargestellt.

Benutzer kann nur einfache Bedienungen durchführen: Bei dieser Leistungsstufe kann der Benutzer einfache Interaktionen durchführen. Im einfachsten Fall umfasst dies das Ein- und Ausschalten des Systems oder eines Prozesses [APW+15, S. 14f.]. Darüber hinaus umfasst diese Leistungsstufe die Anzeige von kritischen Grenzüberschreitungen.

Benutzer kann Informationen austauschen: Auf Basis dieser Leistungsstufe können Informationen ausgetauscht werden [APW+15, S. 14f.]. So können z.B. Prozesswerte vom Benutzer verändert werden, wie Soll-Temperaturen oder der Durchfluss. Darüber hinaus können Informationen z.B. auf einem Display angezeigt werden. Hierzu gehören Verläufe von Messwerten oder das Auftreten von Störungen.

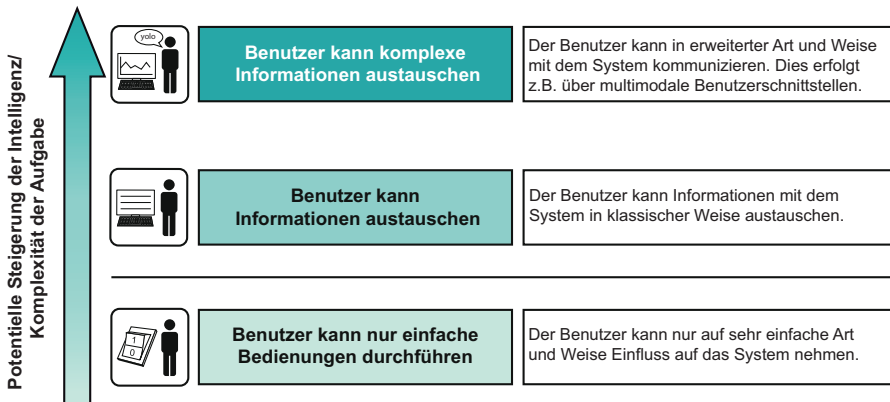


Bild 4-16: Leistungsstufen für den Funktionsbereich „Kommunizieren–Benutzer“

Benutzer kann komplexe Informationen austauschen: Diese Leistungsstufe beschreibt eine erweiterte Interaktion mit dem Benutzer. So erhält der Benutzer über multimodale Schnittstellen komplexe Informationen über das System oder kann selbst dem System Informationen mitteilen. Hierzu gehört z.B. eine Sprachsteuerungen [Dei14, S. 27]. Die Informationen des Systems können Wissen aus erweiterten Analysen des Systems und konkrete Vorschläge zur Anpassung umfassen [APW+15, S. 14f.].

Die Auswahl von konkreten Technologien der Kommunikation erfolgt in nachfolgenden Schritten. In diesem Zusammenhang wird z.B. spezifiziert, ob die Kommunikation durch Virtual oder Augmented-Reality-Ansätze (visuell) oder auditive und haptische Kommunikationsschnittstellen (z.B. Touchscreen oder Sprachsteuerung) unterstützt wird.

Ein weiterer Funktionsbereich der Informationsverarbeitung adressiert die **Kommunikation des Systems mit anderen Systemen**. Hierdurch können z.B. Dienste realisiert werden. Der Funktionsbereich umfasst drei Leistungsstufen, die im Bild 4-17 dargestellt sind.

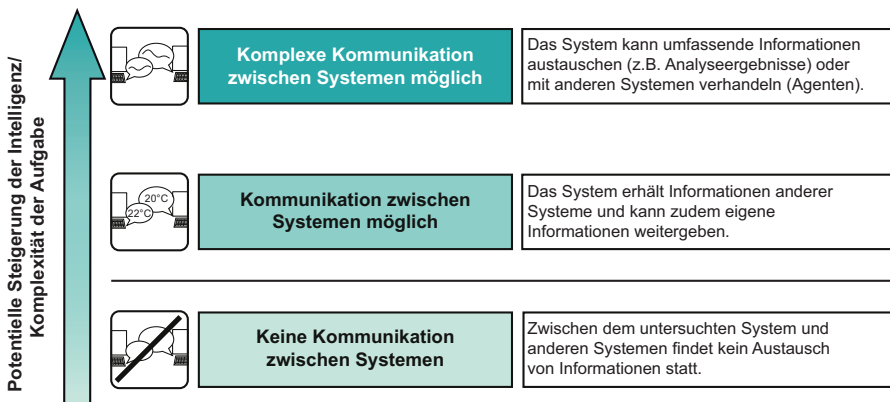


Bild 4-17: Leistungsstufen für den Funktionsbereich „Kommunizieren–Systeme“

Keine Kommunikation zwischen Systemen: In dieser Leistungsstufe werden keine Informationen mit anderen Systemen ausgetauscht. Hierdurch kann das System lediglich Informationen vom Benutzer oder den integrierten Sensoren erhalten. Informationen zu den Systemzuständen können somit nur lokal vom Benutzer eingesehen werden; eine Verarbeitung der Daten z.B. durch zentrale Rechner findet nicht statt [APW+15, S. 14f.].

Kommunikation zwischen Systemen möglich: In dieser Leistungsstufe besteht grundsätzlich die Möglichkeit einer Kommunikation zwischen beteiligten Systemen. Hierdurch kann das betrachtete System Informationen von anderen Systemen erhalten oder den eigenen Zustand an andere Systeme übermitteln. Fernwartungen oder andere Dienste sind hierdurch möglich [APW+15, S. 14f.], [MBD+13, S. 305].

Komplexe Kommunikation zwischen Systemen möglich: In dieser Leistungsstufe wird eine erweiterte Form der Kommunikation adressiert. So werden z.B. Agenten eingesetzt, die die Interessen des Systems mit erhöhter Autonomie verfolgen. Die Agenten können u.a. ihr Verhalten bzw. das des Systems selbstständig an die wahrgenommene Situation anpassen [ADG+09, S. 16ff.]. In diesem Rahmen können die Systeme z.B. auch konkrete Anpassungen für andere Systeme ausgeben.

In nachfolgenden Schritten der Produktentstehung erfolgt eine Detaillierung der ausgewählten Funktionsbereiche. So werden u.a. Datenraten oder Kommunikationsarten spezifiziert [APW+15, S. 14f.].

4.2.7 Einsatzszenarien des Stufenmodells

Das Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme ermöglicht eine systematische Weiterentwicklung des Systems in verschiedenen Funktionsbereichen (z.B. *Messen* oder *Identifizieren*). In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie das Stufenmodell prinzipiell von den Experten im Unternehmen eingesetzt werden kann (**Einsatzszenarien des Stufenmodells**). Den Stoßrichtungen des Innovationsmanagements folgend (vgl. Abschnitt 2.4.2) kann der Einsatz nachfrage- sowie technologieinduziert erfolgen. Die beiden Einsatzszenarien werden nachfolgend erläutert.

Der **nachfrageinduzierte Einsatz des Stufenmodells** erfolgt auf Basis einer marktseitig geprägten Betrachtungsweise [Ihm10, S. 82]. Vor diesem Hintergrund ist der Kunde besonders relevant, da dieser Wünsche zur Anpassungen des bestehenden Systems äußert. Der prinzipielle Ablauf dieser Vorgehensweise ist in Bild 4-18 dargestellt. Im ersten Schritt des **prinzipiellen Vorgehens** ist eine Analyse des Systems erforderlich. Hierdurch erhalten alle Beteiligten einen Überblick über integrierte Systemelemente sowie damit verbundene Funktionen. Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse kann nachfolgend der Modifikationsbedarf im bestehenden System identifiziert werden. Hierzu können z.B. Workshops mit Kunden durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 2.5.2). Darüber hinaus können auch die unternehmensinternen Abteilungen (z.B. Service und Vertrieb) wichtige Informationen zum Modifikationsbedarf äußern (vgl. Abschnitt 2.5.2). Im nächsten Schritt

kann geprüft werden, wie mit Hilfe des Stufenmodells die identifizierten Bedarfe adressiert werden können. Ziel es ist eine Verbesserung des Systems hinsichtlich der Eigenschaften adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich zu erzielen. Auf Basis der Kombination aus Bedarf und möglicher Lösung (in Form einer Leistungsstufe) kann nachfolgend die Lösungsidee spezifiziert werden. Diese bildet die Grundlage für die weiteren Schritte in der Strategischen Planung bzw. Entwicklung.

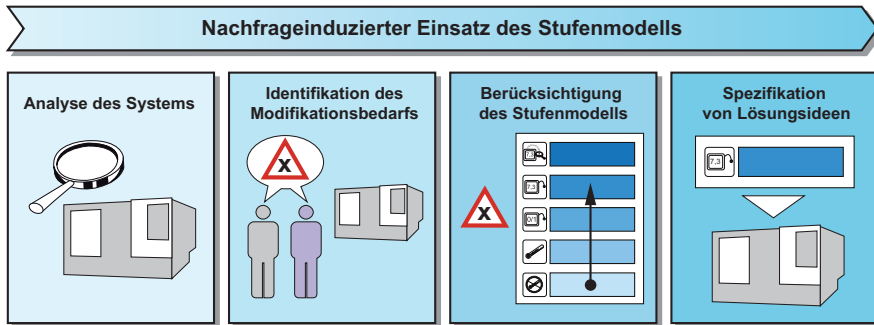


Bild 4-18: Prinzip des nachfrageinduzierten Einsatzes des Stufenmodells zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme

Im Gegensatz zur nachfrageinduzierten Vorgehensweise, adressiert der **technologieinduzierter Einsatz des Stufenmodells** eine technologisch geprägte Betrachtungsweise der Entwicklungsabteilungen [Ihm10, S. 82]. Motivation ist eine Analyse der technologischen Möglichkeiten, um das System intelligenter zu realisieren. Bild 4-19 visualisiert die prinzipielle Vorgehensweise dieses Einsatzes.

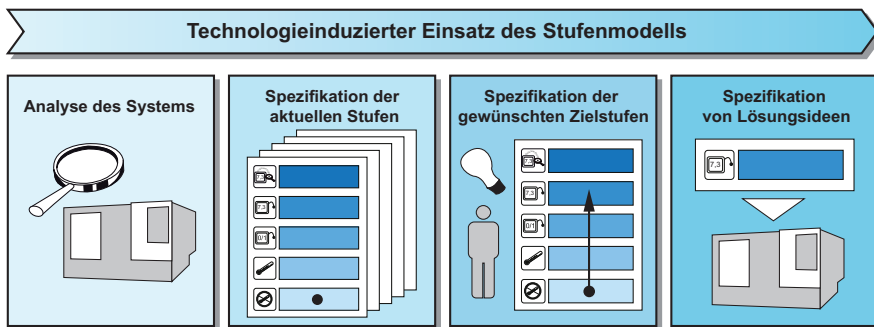


Bild 4-19: Prinzip des technologieinduzierten Einsatzes des Stufenmodells zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme

Im Rahmen dieses **Vorgehens** erfolgt zunächst ebenfalls die Analyse des Systems, um die Basis für die weiteren Schritte zu schaffen. Im Anschluss an die Analyse wird geprüft, welche Leistungsstufen im derzeitigen System (oder in Teilprozessen des Systems) umgesetzt sind. Die entsprechenden Stufen werden spezifiziert, um nachfolgend Potentiale

zur Weiterentwicklung auszuarbeiten. Infolgedessen prüfen die Beteiligten mit Hilfe des Stufenmodells, welche höheren Leistungsstufen umgesetzt werden könnten [APW+15, S. 24]. Die gewünschten Zielstufen werden ausgewählt und im nächsten Schritt erfolgt die Spezifikation der Lösungsideen. Die Lösungsideen können analog zum Vorgehen des nachfrageinduzierten Einsatzes in den nächsten Schritten der Strategischen Planung und Entwicklung genutzt werden.

In der vorliegenden Arbeit liegt der **Fokus** auf dem prinzipiellen Vorgehen des nachfrageinduzierten Einsatzes, wenngleich die erarbeiteten Methoden und Hilfsmittel auch das technologieinduzierte Vorgehen unterstützen können. Die Schritte des nachfrageinduzierten Einsatzes sind im Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme berücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.4). Hervorzuheben ist, dass im Rahmen des Vorgehensmodells die Schritte Identifikation des Modifikationsbedarfs sowie Berücksichtigung des Stufenmodells integrativ erfolgen.

4.3 Planung der Umsetzung von intelligentem Verhalten

Die Auswahl von Leistungsstufen im Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme (vgl. Abschnitt 4.2) determiniert im weiteren Verlauf der Produktentstehung bestimmte Schritte zum Umsetzen der Leistungsstufen. Vor diesem Hintergrund ist es erforderlich, frühzeitig einen Überblick über diese Schritte zu erhalten, um den damit verbundenen Aufwand sowie die erforderlichen Kompetenzen abzuschätzen. Dies ist insbesondere von Relevanz, da die Abschätzung direkten Einfluss auf die Bewertung und Auswahl von Lösungsideen aufweisen kann. Darüber hinaus kann bei einer positiv bewerteten Idee die Umsetzung besser geplant werden. Infolgedessen werden im vorliegenden Abschnitt ausgewählte Methoden vorgestellt, mit denen eine Planung der Umsetzung unterstützt werden kann. Die Methoden adressieren den Einsatz mathematischer Optimierungsverfahren in technischen Systemen, den Entwurf von Prozessmodellen intelligenter Regelungen, das Vorgehen beim Einsatz von maschinellen Lernverfahren sowie das Vorgehen zur erweiterten Analyse der Verlässlichkeit. Bild 4-20 gibt einen Überblick über die Einsatzbereiche der Methoden zur Planung der Umsetzung.

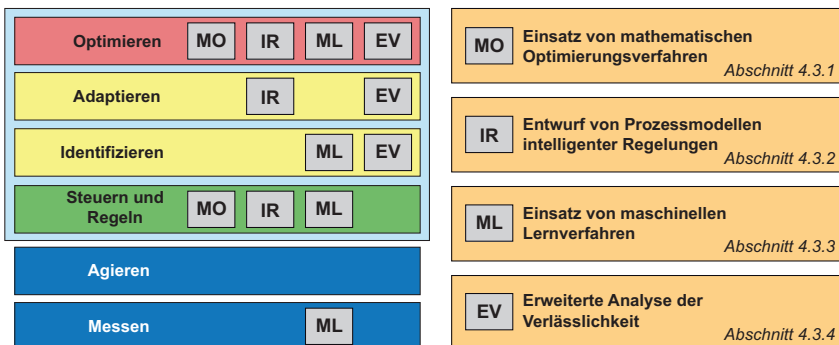


Bild 4-20: Einsatzbereiche der Methoden zur Planung der Umsetzung

Der Überblick ist vereinfacht dargestellt, da i.d.R. die Leistungsstufen in den Funktionsbereichen den Einsatz der entsprechenden Methoden erfordern. So wird z.B. die Methode zum Einsatz von maschinellen Lernverfahren ausschließlich für die Leistungsstufe *Virtuelle Sensorik* im Funktionsbereich *Messen* benötigt.

Hervorzuheben ist zudem, dass das prinzipielle Vorgehen zum Einsatz mathematischer Optimierungsverfahren sowie der Entwurf von Prozessmodellen starke Wechselwirkungen aufweisen, jedoch in der Regel von Experten unterschiedlicher Disziplinen eingesetzt werden (mathematische Optimierung und Regelungstechnik).

4.3.1 Einsatz von mathematischen Optimierungsverfahren

Durch den Einsatz von **Optimierungsverfahren** in mechatronischen Systemen können Systeme intelligenter realisiert werden. Optimierungsverfahren können u.a. für den Entwurf von optimalen Steuerungen und Regelungen zum Einsatz kommen. Um den Einsatz der mathematischen Optimierungsverfahren sowie die Umsetzung der damit verbundenen Leistungsstufen vor auszuplanen, wurde eine entsprechende Methode erarbeitet²⁵. Die Methode repräsentiert das implizierte Wissen eines Experten der mathematischen Optimierung und zeigt das spezifische Vorgehen auf. Nachfolgend wird exemplarisch dargestellt, in welchen **Leistungsstufen und Funktionsbereichen des Stufenmodells** die Methode unterstützend eingesetzt werden können.

- **Steuern und Regeln:** Die Methode kann insb. beim Entwurf von *optimalen Steuerungen*, *optimalen Steuerungen mit Unsicherheiten* sowie *optimalen Regelungen* zum Einsatz kommen. Vor diesem Hintergrund unterstützt sie z.B. bei der Spezifikation von Gütekriterien (bzw. Zielen) und zeigt den Bedarf an auswertbaren Modellen des Systems bzw. der Regler und Steuerungen auf.
- **Optimieren:** Im Funktionsbereich *Optimieren* unterstützt die Methode das Realisieren vieler Leistungsstufen. So können z.B. mit Hilfe der Methode optimale Kompromisse für die Auswahl von Betriebspunkten berechnet werden. Diese können anschließend durch eine entsprechende *Entwurfspunktselektion* ausgewählt werden. Für die *Online-Mehrzieloptimierung* können zudem mit Hilfe der Methode die Randbedingungen und Berechnungen so angepasst werden, dass eine Berechnung in den vorgegebenen Zeiten realisierbar ist.

Die Phasen der Methode sind in Bild 4-21 dargestellt. Die Phasen werden nachfolgend vorgestellt [Kei96, S. 639f.], [PLB12, S. 5f.].

²⁵ Die Methode basiert auf bislang unveröffentlichten Projektergebnissen im Rahmen des Spitzenclusters it's OWL. An der Erstellung waren neben IWANEK zudem ZIESSLER, HORENKAMP, HESSEL-VON MOLO und DELLNITZ beteiligt.



Bild 4-21: Einsatz mathematischer Optimierungsverfahren in Anlehnung an [Kei96, S. 639f.], [PLB12, S. 5f.]²⁶

Optimierzweck identifizieren: Ausgangspunkt der Methode ist ein vorliegendes Systemmodell des mechatronischen Systems²⁷. Auf dieser Basis können Potentiale für den Einsatz von Optimierungen identifiziert werden. Hierzu werden mögliche Ziele der

²⁶ Die Methode basiert auf bislang unveröffentlichten Projektergebnissen. An der Erstellung waren neben IWANEK zudem ZISSLER, HORENKAMP, HESSEL-VON MOLO und DELLNITZ beteiligt.

²⁷ Das Systemmodell (oder auch mechatronische Systembeschreibung) dient als Verständigungsmittel in der Entwicklung, indem es alle wesentlichen fachdisziplinübergreifenden Informationen über das System enthält. Hierdurch erhalten die Entwickler der verschiedenen Fachdisziplinen (z. B. Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik) eine ganzheitliche Sicht auf das System [IKD+13]. Das Erstellen des Systemmodells kann z.B. mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS erfolgen (vgl. Abschnitt 0).

Optimierung qualitativ beschrieben. Für das Beispiel eines schienengebundenen Fahrzeugs²⁸ könnten mögliche Ziele „min. Energieverbrauch“ und „max. Komfort“ sein. Darüber hinaus gilt es zu prüfen, welche Parameter Einfluss auf diese Ziele haben (Optimierungsparameter wie z.B. Reglerparameter) und mit welchen Größen eine Bewertung zur Zielerfüllung quantifiziert werden kann (z.B. Fahrzeugbewegungen als Observable für Komfort) [KGI+13, S. 15f.].

Modell prüfen bzw. anpassen: Nach der Identifikation des Zwecks sowie möglicher Optimierungsparameter gilt es, das Modell der Strecke und des Reglers zu analysieren [KGI+13, S. 14ff.]. So wird u.a. geprüft, ob das Modell bzgl. des Optimierungszwecks geeignet ist (z.B. differenzierbar). Dies ist u.a. für die Auswahl von Optimierungsalgorithmen wichtig. Bei Bedarf ist das Modell anzupassen.

Zielfunktion/Nebenbedingungen formulieren: Nach dem der Zweck und die Parameter der Optimierung bekannt sind und das Modell angepasst wurde, können die Zielfunktionen formuliert (quantitativ) und die Nebenbedingungen bestimmt werden. In diesem Zuge wird z.B. bestimmt, dass der Komfort eines schienengebundenen Fahrzeugs durch die Querbeschleunigung sowie die Gierbeschleunigung des Fahrzeugschwerpunktes beschrieben werden kann [KGI+13, S. 17]. Der Komfort wäre demzufolge hoch, wenn die Zielfunktionswerte minimal sind [KGI+13, S. 17].

Optimierungsalgorithmus auswählen: Im nächsten Schritt gilt es geeignete Algorithmen zur Optimierung auszuwählen. Hierzu wurde ein sogenannter Entscheidungsbaum erarbeitet, der die Entscheidungsauswahl unterstützen soll. Einen Ausschnitt des Entscheidungsbaums zeigt Bild 4-22. Basierend auf den zuvor durchgeführten Schritten kann entschieden werden, welches Optimierungsproblem vorliegt und welche Algorithmen zur Lösung genutzt werden können.

Optimierungsproblem lösen: Nach der Auswahl geeigneter Algorithmen wird das Optimierungsproblem durch den Einsatz des Algorithmus gelöst. Als Resultat liegt das gelöste Optimierungsproblem vor.

Prozessmodelle berücksichtigen: Diese Phase ist optional und kommt in der Regel nur bei Problemen zur Mehrzieloptimierung (Realisierung von selbstoptimierenden Regelungen) zum Einsatz. Es gilt zu prüfen, in welchen vorliegenden Situationen, welche Ziele stärker priorisiert werden sollten als andere. Für das Beispiel eines schienengebundenen Fahrzeugs bedeutet dies, dass bei sehr rauen Strecken das Ziel „maximiere Komfort“ höher gewichtet werden sollte, als „minimiere Energieverbrauch“ [KGI+13, S. 17ff.]. Vor dem Hintergrund der Relevanz der Prozessmodelle (vgl. Abschnitt 4.3.2), wird die Methode zum Entwurf von Prozessmodellen in Abschnitt 4.3.2 detailliert beschrieben.

²⁸ Die Methode ist prinzipiell für den Einsatz in technischen Systemen ausgelegt. Systeme des Maschinen- und Anlagenbaus sind selbstredend ebenfalls eingeschlossen, wenngleich das Evaluierungsbeispiel aus einer anderen Branche stammt.

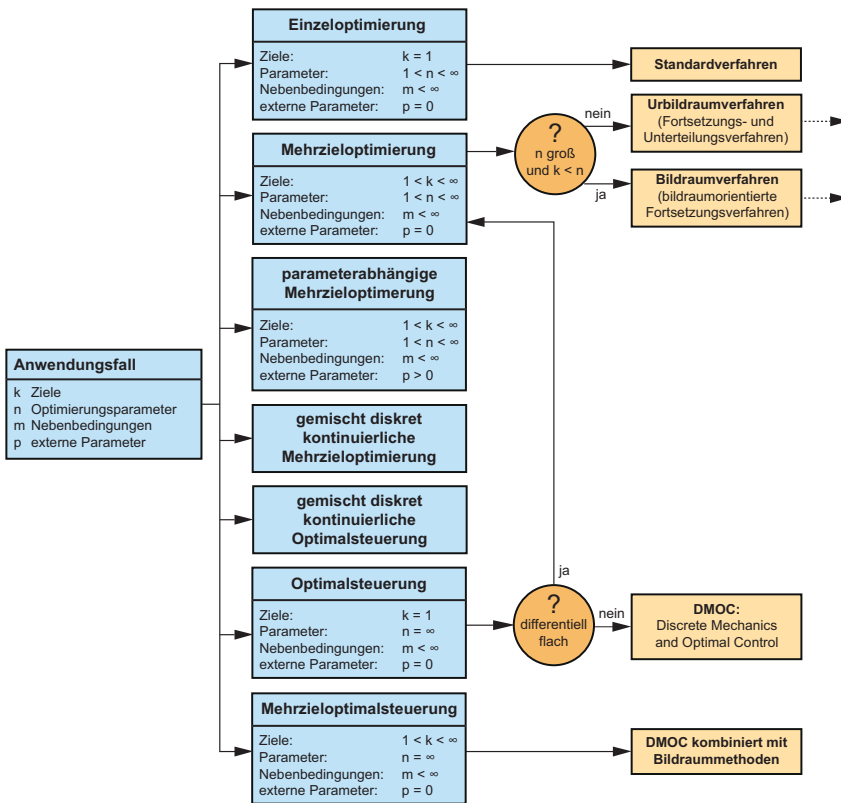


Bild 4-22: Entscheidungsbaum zur Auswahl geeigneter Algorithmen²⁹

Lösungen implementieren: Der letzte Schritt beschreibt das Implementieren der Lösungen. Hierdurch ist das System in der Lage, die Lösung für das Realisieren von intelligentem Systemverhalten zu verwenden (z.B. als optimale Systemkonfigurationen).

4.3.2 Entwurf von Prozessmodellen intelligenter Regelungen

Mit Hilfe von **intelligente Regelungen** (z.B. selbstoptimierende Regelungen) kann intelligentes Systemverhalten in mechatronischen Systemen realisiert werden. Moderne Steuerungs- und Regelungskonzepte sehen die Verwendung von einfachen Verhaltensmodellen des zu regelnden Prozesses vor, z.B. Modellfolgeregelungen oder prädiktive Verfahren. Selbstoptimierende Regelungen bauen darauf auf. Sie weisen jedoch eine deutlich

²⁹ Der Entscheidungsbaum basiert auf bislang unveröffentlichten Projektergebnissen. An der Erstellung waren neben IWANEK zudem ZIESSLER, HORENKAMP, HESSEL-VON MOLO und DELLNITZ beteiligt.

komplexere hierarchische Struktur auf. Dementsprechend sind umfassendere Modelle erforderlich. Diese Modelle, im Folgenden als Prozessmodelle (vgl. Bild 4-23) bezeichnet, stellen u.a. die Grundlage selbstoptimierender Regelungen dar [KGI+13, S. 1].

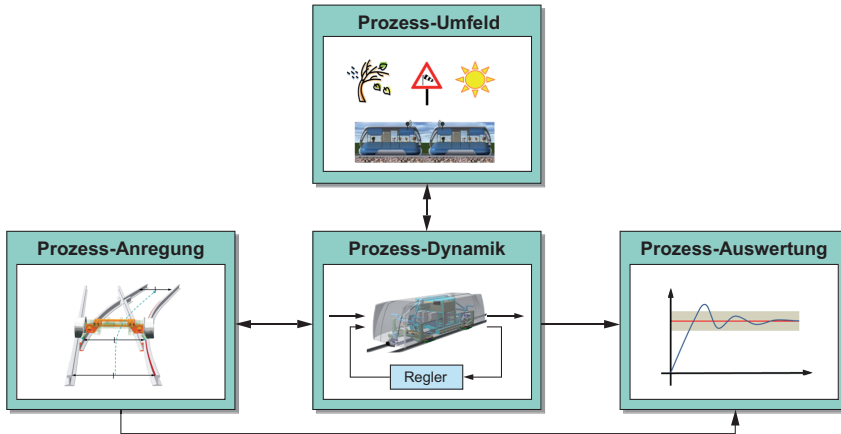


Bild 4-23: Prozessmodell fortgeschrittener mechatronischer Systeme [KGI+13, S. 5]

Prozessmodelle umfassen neben der Dynamik (*Prozess-Dynamik*) des zu regelnden Prozesses ein Anregungsmodell (*Prozess-Anregung*), ein Auswertungsmodell (*Prozess-Auswertung*) sowie ein Umfeldmodell (*Prozess-Umfeld*) zur vollständigen Beschreibung der Situation bzw. des Anwendungsszenarios. Das Modell *Prozess-Anregung* stellt eine Verallgemeinerung der Führungsgrößen aus dem klassischen Reglerentwurf dar. Das Modell *Prozess-Auswertung* dient der Auswertung der Ziele, die nicht direkt erkannt werden können. Beispielsweise kann der Wert einer Zielfunktion (Beschreibung des Fahrkomforts, Beschreibung der Leistungsfähigkeit etc.) nicht direkt aus den Systemgrößen bestimmt werden. Zusätzliche Störungen oder Wechselwirkungen mit anderen Systemen werden mit Hilfe des Modells *Prozess-Umfeld* abgebildet [KGI+13, S. 4ff.], [Mün12, S. 40ff.], [Kas85, S. 8ff.].

Die Prozessmodelle unterstützen beim Entwurf von selbstoptimierenden Regelungen und bei der geeigneten Auswahl von Entwurfspunkten für die jeweiligen Situationen. Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend exemplarisch die **Leistungsstufen** aufgezeigt, hinsichtlich derer der Einsatz von Prozessmodellen sinnvoll ist:

- **Adaptieren:** Der Entwurf von Prozessmodellen kann insb. für die Leistungsstufen *Parameteranpassung* sowie *Strukturanpassungen* sinnvoll sein. Durch das Aufstellen von Prozessmodellen kann analysiert werden, wie sich Parameteranpassungen auf die Güte von Regelungen auswirken und zu welchen Zeitpunkten Anpassungen geeignet erscheinen (durch Bewertung im Prozessmodell).

- **Optimieren:** Im Funktionsbereich *Optimieren* unterstützen Prozessmodelle insb. die Spezifikation der Entwurfspunktselektion. Hierzu kann für verschiedenen Situationen (auf Basis der Anregung) das Systemverhalten geprüft werden, um optimale Konfigurationen (aus Sicht des Entwicklers) vorherzusehen und dem Benutzer vorzuschlagen.

Der Entwurf von Prozessmodellen selbstoptimierender Regelungen stellt eine Herausforderung dar. Vor diesem Hintergrund wurde eine Methode zum Entwurf von Prozessmodellen erarbeitet [KGI+13, S. 6ff.]. Die Methode ist in Bild 4-24 dargestellt. Die **Methode erfordert** zudem ein sogenanntes Systemmodell (vgl. Abschnitt 4.5.1.2). Ein Systemmodell umfasst sogenannte Partialmodelle, die verschiedene Sichtweisen auf ein mechatronisches System ermöglichen (z.B. Anwendungsszenarien oder Wirkstruktur)³⁰.

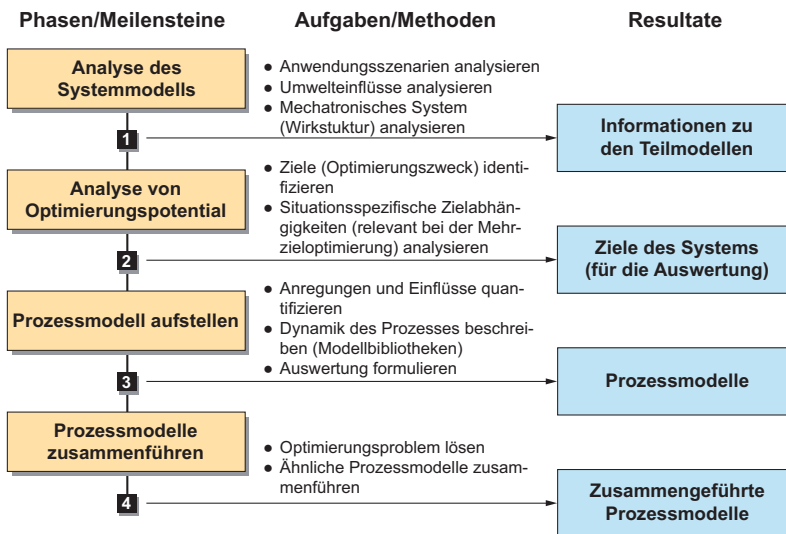


Bild 4-24: Entwurf von Prozessmodellen in Anlehnung an [KGI+13, S. 6]

Analyse des Systemmodells: In dieser Phase gilt es Informationen zu den Teilmodellen *Prozess-Umfeld*, *Prozess-Anregung* sowie *Prozess-Dynamik* zu erhalten. Als Grundlage wird das sogenannte Systemmodell mit Partialmodellen verwendet (Umfeldmodell, An-

³⁰Das Systemmodell (oder auch mechatronische Systembeschreibung) dient als Verständigungsmittel in der Entwicklung, indem es alle wesentlichen fachdisziplinübergreifenden Informationen über das System enthält. Hierdurch erhalten die Entwickler der verschiedenen Fachdisziplinen (z. B. Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik) eine ganzheitliche Sicht auf das System [IKD+13]. Das Erstellen des Systemmodells kann z.B. mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS erfolgen (vgl. Abschnitt 0).

wendungsszenarien, Wirkstruktur etc.; vgl. Abschnitt 4.5.1.2). Für die Identifikation relevanter Informationen für die Anregung, werden z.B. bestehende Anwendungsszenarien des Systems betrachtet bzw. diese neu erstellt. In diesen sind typische Einflüsse beschrieben, die es zu quantifizieren gilt. Für das Beispiel eines schienengebundenen Fahrzeugs³¹ bedeutet dies, die Analyse und Quantifizierung von Einflüssen hinsichtlich der Rauigkeit der Strecke. Informationen zu weiteren Einflüssen auf den Prozess sind dem Umfeldmodell zu entnehmen. Informationen zum System selbst sind in der sogenannten Wirkstruktur enthalten [KGI+13, S. 10ff.].

Analyse von Optimierungspotential: Auf Basis der vorliegenden Informationen des Systems, kann nachfolgend das Potential für eine Optimierung identifiziert werden³². Hierzu werden z.B. Ziele im Sinne der Selbstoptimierung definiert, welche die Grundlage für eine Bewertung darstellen. Diese werden in Abhängigkeit der auftretenden Situation (gemäß Anwendungsszenarien) unterschiedlich hoch priorisiert. Dabei ist es notwendig, die Situationsabhängigkeit der Ziele zu prüfen, um den Entwurf einer Entscheidungsheuristik für das automatisierte Priorisieren von Zielen vorzubereiten. Hierzu legt der Entwickler bereits qualitativ fest, welche Ziele der Optimierung in bestimmten Situationen wichtiger sind als andere Ziele. Dies erfolgt basierend auf den Anwendungsszenarien für jede Situation [KGI+13, S. 11f.].

Prozessmodelle aufstellen: Prozessmodelle beschreiben stets eine bestimmte Situation, in der sich das System befindet. Im Partialmodell Anwendungsszenarien sind die für den späteren Betrieb wesentlichen Situationen zu finden. Daher ist zunächst für jedes Anwendungsszenario ein eigenes Prozessmodell zu erstellen. Das Modell *Prozess-Dynamik* wird hierzu vorausgesetzt und sollte bereits bestehen (umfasst Strecke sowie Regler). Die übrigen drei Teilmodelle des Prozessmodells (*Prozess-Umfeld*, *Prozess-Anregung*, *Prozess-Auswertung*) werden jeweils situationsspezifisch erstellt. Beispielsweise werden in den Teilmodellen *Prozess-Umfeld* und *Prozess-Anregung* Einflussgrößen quantifiziert (zeitlicher Verlauf der Einflussgröße etc.). Das Teilmodell *Prozess-Auswertung* resultiert aus der Simulation der beiden Teilmodelle in Kombination mit dem Teilmodell *Prozess-Dynamik*. Eingangsinformationen liefern neben dem bereits genannten Partialmodell Anwendungsszenarien, die vier Partialmodelle Umfeld, Wirkstruktur, Zielsystem und Anforderungen (vgl. Abschnitt 4.5.1.2) [KGI+13, S. 14ff.].

³¹ Die Methode ist prinzipiell für den Einsatz in technischen Systemen ausgelegt. Systeme des Maschinen- und Anlagenbaus sind selbstredend ebenfalls eingeschlossen, wenngleich das Evaluierungsbeispiel aus einer anderen Branche stammt.

³² Dieser Prozessschritt weist hohe Ähnlichkeit zum Prozessschritt „Optimierungszweck identifizieren“ aus dem Bereich der mathematischen Optimierung auf (vgl. Abschnitt 4.3.1).

Prozessmodelle zusammenführen: Nach dem Erstellen der Prozessmodelle, wird eine Optimierung durchgeführt³³. Die Prozessmodelle können auch für tiefere Systemanalysen genutzt werden. Während oder nach der Analyse und Optimierung werden Ähnlichkeiten zwischen den Prozessmodellen identifiziert, um diese ggf. zusammenzuführen. Führen z.B. Analysen verschiedener Anwendungsszenarien zu ähnlichen Systemkonfigurationen, werden diese zusammengeführt [KGI+13, S. 8].

4.3.3 Einsatz von maschinellen Lernverfahren

Maschinelle Lernverfahren ermöglichen die effiziente Abbildung von Wirkzusammenhängen in technischen Systemen. Im Gegensatz zur theoretischen Modellbildung werden die Modelle aus vorliegenden Daten gewonnen [Ise08, S. 47ff.]. Dies erfolgt z.B. anhand beobachteter Eingangs- und Ausgangsgrößen. Dazu extrahieren maschinelle Lernverfahren Regelmäßigkeiten aus den beobachteten Größen und repräsentieren diese Zusammenhänge in effizient ausführbaren, erlernten Modellen. Durch den Einsatz von maschinellen Lernverfahren eröffnen sich neue Perspektiven für die Automatisierung von komplexen technischen Prozessen, welche nur schwer oder gar nicht durch theoretische Modelle (auf Basis physikalischer Gesetze) abgebildet werden können [GIV+14, S. 56].

Das Erlernen von Wirkzusammenhängen wird in verschiedenen **Funktionsbereichen und Leistungsstufen** benötigt. Nachfolgend werden einige exemplarisch erläutert:

- **Messen:** Im Funktionsbereich *Messen* kann die Methode beim Realisieren der Leistungsstufe *Virtuelle Sensorik* unterstützen. Durch das maschinelle Lernen können Zusammenhänge zwischen integrierter Sensorik und benötigten, unbekanntem Informationen hergestellt werden.
- **Identifizieren:** Im Funktionsbereich *Identifizieren* können Lernverfahren alle Leistungsstufen adressieren. Beispielsweise können *nicht beeinflussbare Zustände* erkannt werden, um z.B. einen Benutzereingriff zu initiieren. Zudem können *Parameter der Stecke* identifiziert werden, die eine zeitliche Abhängigkeit aufweisen. Zudem können maschinelle Lernverfahren Trendanalysen im Sinne von *vorausschauenden Zustandserkennungen* ermöglichen.

Beim maschinellen Lernen kann u.a. zwischen **überwachten** und **unüberwachten Lernen** unterschieden werden. Beim überwachten Lernen gilt es einen Zusammenhang zwischen bekannten Ein- und Ausgängen zu erlernen. Bekanntes Beispiel aus diesem Bereich ist die Handschrifterkennung. Beim unüberwachten Lernen gilt es Regelmäßigkeiten (versteckte Strukturen) in den Daten zu erkennen. Die Deutung bzw. Interpretation kann nachfolgend durch Experten durchgeführt werden [Kel00, S. 287f.].

³³ MÜNCH liefert einen Überblick über mögliche Ansätze zur Optimierung [Mün12, S. 16ff.].

Nachfolgend wird am Beispiel eines **Expertensystems** eine Methode zum Einsatz von maschinellen Lernverfahren erläutert. Das Expertensystem hat das Ziel, ungewünschte Verhaltensweisen oder Störungen in den Daten zu erkennen und autonom Anpassungen durchzuführen oder Anpassungen zu initiieren (vgl. Bild 4-25).

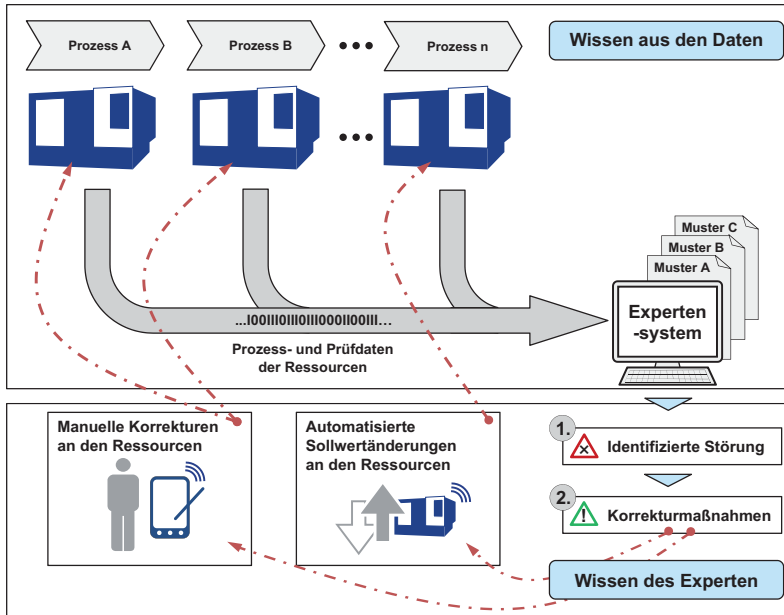


Bild 4-25: Expertensystem im Produktionsprozess [IRD+15, S. 58]

Die Methode orientiert sich am sogenannten „Knowledge Discovery in Databases“-Prozess (KDD) nach FAYYAD ET AL [FPS96]³⁴. Bild 4-26 zeigt die Methode zum Erlernen von Modellen. Die Methode umfasst vier Phasen, die nachfolgend erläutert werden.

Prozessanalyse: In dieser Phase ist es erforderlich, einen Überblick über den betrachteten technischen Prozess zu erhalten. Infolgedessen gilt es auch Anforderungen an das zu extrahierende Modell zu spezifizieren. In diesem Zusammenhang ist insbesondere der Zweck der Modellbildung zu bestimmen. Zudem werden Datenquellen identifiziert, die Daten zur Modellbildung bereitstellen (z.B. verfügbare Sensorwerte). Darüber hinaus werden Randbedingungen des technischen Prozesses analysiert (z.B. minimale und maximale Prozessgrößen etc.) [IRD+15, S. 58], [FPS96, S. 41 ff.].

Datenakquisition und Vorverarbeitung: Die akquirierte Datenbasis kann unter Umständen sehr umfangreich sein (z.B. sehr hohe zeitliche Diskretisierung im Bereich der

³⁴Neben dem Vorgehen nach FAYYAD existieren noch zahlreiche weitere Ansätze. Einen Überblick liefern KURGAN und MUSILEK [KM06].

Produktion) und zudem Artefakte (z.B. Messfehler) beinhalten. Um jedoch gute Ergebnisse des Lernens zu erhalten, sind die Daten zu bereinigen. Hierbei kann z.B. eine Filterung notwendig sein. Für den Entwurf eines Expertensystems in der Produktion kann z.B. auch der optimale Zustand ausgeblendet werden, um interessante Strukturen³⁵ in den übrigen Daten zu finden (Störungen etc.) [IRD+15, S. 58], [FPS96, S. 41ff.].

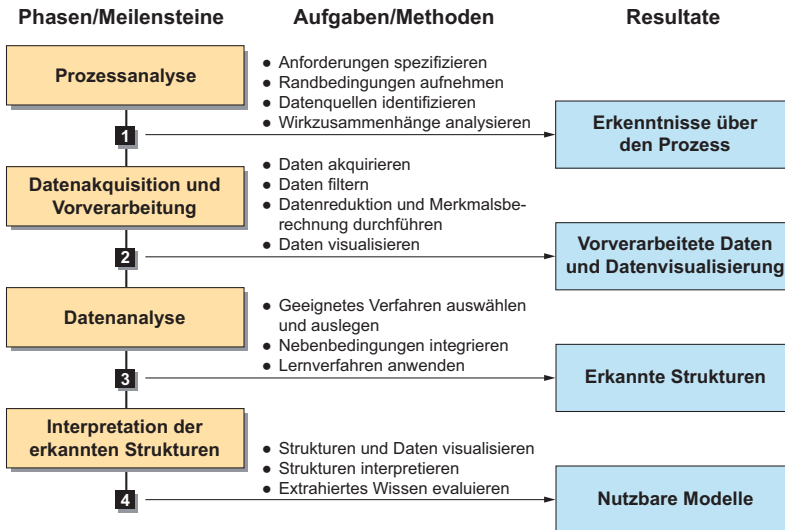


Bild 4-26: Lernen von Modellen in Anlehnung an [FPS96, S. 40ff.], [IRD+15, S. 57ff.]

Datenanalyse: Auf Basis der bereinigten Datenbasis können nachfolgend versteckte Strukturen in den Daten gesucht werden. Dies erfolgt mit Hilfe eines entsprechenden Lernverfahrens. Hierbei können z.B. unüberwachte Lernverfahren aus dem Bereich des Clustering eingesetzt werden, welche auf Basis der analysierten Daten prototypische Zustände erkennen [BC06, S. 274ff.]. Verschiedene Möglichkeiten zum Erkennen dieser sogenannten Prototypen (Strukturen) sind in Bild 4-27 dargestellt [IRD+15, S. 58f.], [FPS96, S. 41ff.].

Interpretation der erlernten Modelle: Im letzten Schritt werden die prototypischen Zustände bzw. Strukturen gemeinsam mit einem Experten des technischen Prozesses betrachtet. In diesem Schritt wird das Wissen des Prozessexperten mit den Zuständen zusammengebracht. Für den Entwurf eines Expertensystems bedeutete dies beispielsweise, dass den Zuständen Störungen aus der Produktion zugeordnet werden. Hierdurch erhält ein Expertensystem die Möglichkeit, beim Erkennen von Strukturen in den Online-Daten, die entsprechenden Korrekturen dem Mitarbeiter in der Produktion vorzuschlagen oder

³⁵ Beim vorliegenden Beispiel ist es wichtiger die nicht optimalen, störenden Zustände automatisiert zu erkennen, da diese ein Eingreifen in den Prozess erfordern.

eine Anpassung von Soll-Parametern an den entsprechenden Ressourcen selbstständig durchzuführen. Bevor die Modelle freigegeben werden, müssen diese evaluiert werden. Hierdurch kann z.B. die Güte bewertet werden [IRD+15, S. 59], [FPS96, S. 41ff.].

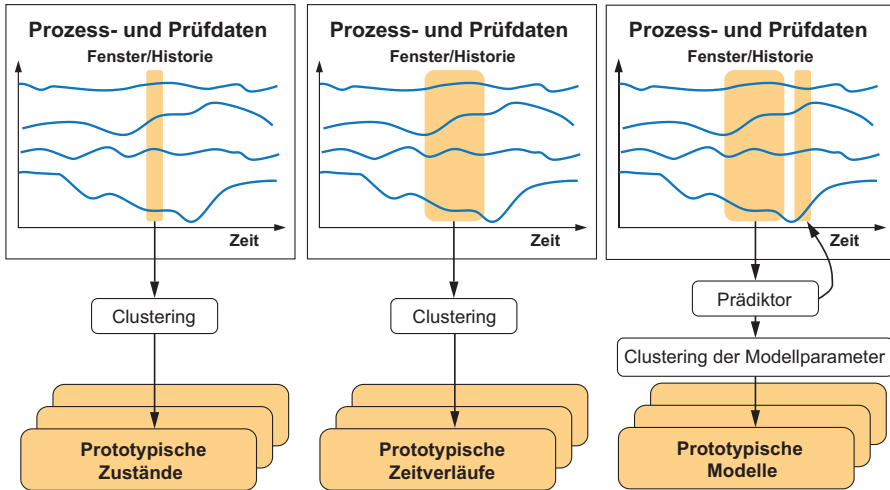


Bild 4-27: Erlernen von Prozessmustern durch Clustering [IRD+15, S. 59]

4.3.4 Erweiterte Analyse der Verlässlichkeit

Der Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme stellt eine **Herausforderung** dar; dies gilt insbesondere für das Erreichen der **Verlässlichkeit**³⁶ [BGJ+09, S. 2f.], [GID+13, S. 206]. Indikatoren hierfür sind die vielen Rückrufaktionen sowie Produktsicherheitsuntersuchungen der letzten Jahre in der Automobilindustrie; 235 Rückrufaktionen im Jahr 2014 (+30%), 571 Produktsicherheitsuntersuchungen im Jahr 2014 (+21%) [Kra15, S. 62f.]. Vor diesem Hintergrund gilt es eine Methode bereitzustellen, welche eine **erweiterte Analyse der Verlässlichkeit mechatronischer Systeme** unterstützt und zudem die Möglichkeit zur Verbesserung vorsieht.

Die Methode zur erweiterten Analyse der Verlässlichkeit kann im Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme in folgenden **Funktionsbereichen** unterstützend eingesetzt werden:

- **Identifizieren und Adaptieren:** Das autonome *Erkennen von nicht beeinflussbaren Zuständen* erfordert das Wissen, das entsprechende Situationen auftreten können.

³⁶ Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Definition der Verlässlichkeit nach AVIZIENIS ET AL. verwendet [ALR+04, S. 3ff.]. Demnach ist Verlässlichkeit ein Oberbegriff für Zuverlässigkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Vertraulichkeit und Integrität. Im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen die Verlässlichkeitsaspekte Zuverlässigkeit und Sicherheit.

nen und im Betriebsfall vorliegen. Dieses Wissen kann auf Basis der Verlässlichkeitsanalysen gewonnen werden. Falls die entsprechenden Situationen im Betrieb auftreten und erkannt werden, können zudem *Warnungen an den Benutzer* oder *Ablaufsteuerungen* (z.B. Fail-Safe Strategien [Bir97, S. 97ff.]) initiiert werden.

- **Optimieren:** Im Funktionsbereich *Optimieren* stellt insb. das *Mehrstufige Verlässlichkeitskonzept* eine Möglichkeit dar, eine Verbesserung des Systems hinsichtlich des Ziels Verlässlichkeit zu realisieren. Hierdurch können eigenständige Ziele der Verlässlichkeit spezifiziert werden.

Der Einsatz der Methode zur erweiterten Analyse der Verlässlichkeit wird auf Basis eines Systemmodells³⁷ durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.5.1.2). Hierdurch erhalten die Beteiligten einen ganzheitlichen Überblick über das technische System. Das Systemmodell wird nachfolgend auf Schwachstellen hin analysiert. Zur Behebung der Schwachstellen stehen häufig mehrere Möglichkeiten zur Auswahl z.B. Überdimensionierung bzw. redundante Auslegung, die Auswahl alternativer Lösungsmuster oder der Einsatz der Selbstoptimierung. Die Methode ist in Bild 4-28 dargestellt [GID+13, S. 205ff.], [DGG+13, S. 53ff.].

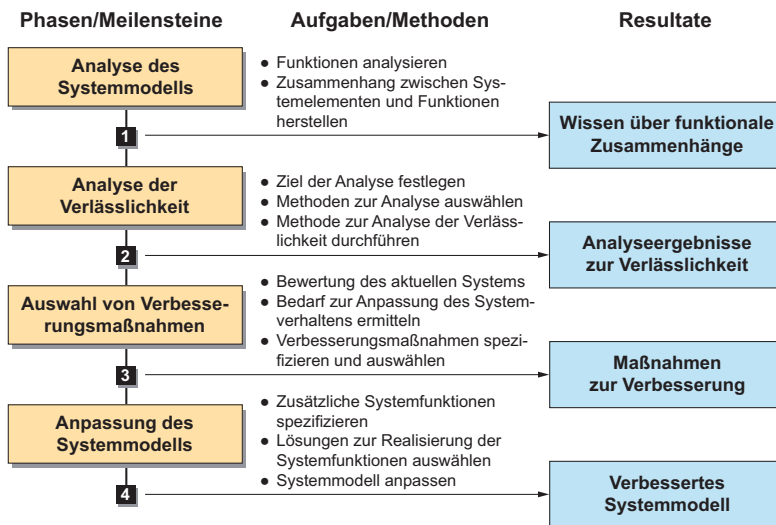


Bild 4-28: Analyse der Verlässlichkeit [DGG+13, S. 58ff.], [GID+13, S. 213ff.]

³⁷Das Systemmodell (oder auch mechatronische Systembeschreibung) dient als Verständigungsmittel in der Entwicklung, indem es wesentliche fachdisziplinübergreifende Informationen über das System enthält. Hierdurch erhalten die Entwickler verschiedener Fachdisziplinen (z. B. Mechanik, Elektrik/Elektronik und Regelungstechnik) eine ganzheitliche Sicht auf das System [IKD+13]. Das Erstellen des Systemmodells kann z.B. mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS erfolgen (vgl. Abschnitt 0).

Analyse des Systemmodells: Für die Analyse der Verlässlichkeit und die damit verbundene Verbesserung des Systems ist zunächst das Systemmodell zu analysieren. Infolgedessen gilt es, die Funktionen des Systems in Zusammenhang mit den auszuführenden Systemelementen zu stellen [GID+13, S. 214ff.]. Dies ist insbesondere sinnvoll, um z.B. bei auftretenden Fehlfunktionen die potentiell betroffenen Systemelemente zu erkennen [BGJ+09, S. 72ff.], [GID+13, S. 241ff.].

Analyse der Verlässlichkeit: Für die effiziente Analyse der Verlässlichkeit ist zunächst das Ziel der Analyse zu bestimmen. So wird z.B. festgelegt, welcher Aspekt der Verlässlichkeit analysiert werden soll (Sicherheit etc.) [DGG+13, S. 59ff.]. Auf dieser Basis können geeignete Methoden zur Analyse ausgewählt werden. Dies kann durch spezielle Methodendatenbanken realisiert werden [DGG+13, S. 60ff.]. Nachfolgend kann die entsprechende Methode durchgeführt werden [GID+13, S. 214ff.].

Auswahl von Verbesserungsmaßnahmen: Nach dem Erarbeiten der Analyseergebnisse werden diese bewertet. Falls die Analyseergebnisse unbefriedigend sind, werden entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen, um z.B. die Verlässlichkeit zu steigern. Hierbei können z.B. notwendige zusätzliche Funktionen (im Sinne von Nebenfunktionen) spezifiziert werden. Zudem kann auch das Wirkparadigma der Selbstoptimierung (betrifft den Funktionsbereich *Optimieren*) eingesetzt werden, um die Verlässlichkeit zu steigern. Zur Steigerung der Verlässlichkeit kann insbesondere das *Mehrstufige Verlässlichkeitskonzept* eingesetzt werden [DHK+09, S. 61ff.], [KMS+14, S. 55ff.]. Hierzu wird z.B. neben möglichen Zielfunktionen bzw. Gütekriterien des Systems (verbrauchsoptimal etc.) ein Ziel zur Verlässlichkeit spezifiziert. Bild 4-29 stellt das *Mehrstufige Verlässlichkeitskonzept* dar. Im Folgenden wird dieses kurz erläutert.

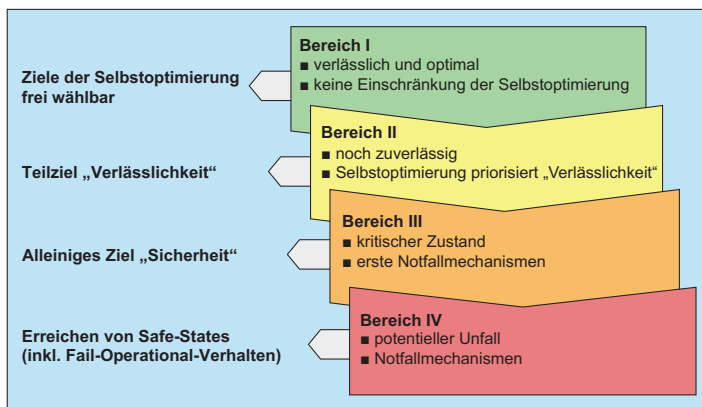


Bild 4-29: Mehrstufiges Verlässlichkeitskonzept [DHK+09, S. 62], [KMS+14, S. 56]

- **Bereich I:** Das System befindet sich in einem sicheren Zustand. Es existieren keine Einschränkungen hinsichtlich der Priorisierung der Ziele. Alle mögliche Ziele können priorisiert werden [DHK+09, S. 62], [DDG+14, S. 64ff.].

- **Bereich II:** Das Systemverhalten weist Störungen auf, so dass eine Gefährdung droht (z.B. Überschreiten von Grenzwerten). Um das System zu schützen, werden einige Ziele des Systems stärker eingeschränkt. So könnte z.B. das Verfolgen des Ziels „max. Leistungsfähigkeit“ das System zunehmend beschädigen. Infolgedessen gilt es das Ziel „max. Verlässlichkeit“ höher zu priorisieren [DHK+09, S. 62], [DDG+14, S. 64ff.].
- **Bereich III:** Im System wurde ein Fehlzustand erkannt. Ziel des Systems ist es, die Bereiche I und II zu erreichen, um einen sicheren Zustand zu erhalten. Relevante Ziele der Verlässlichkeit werden maximal priorisiert [DHK+09, S. 62], [DDG+14, S. 64ff.].
- **Bereich IV:** Das System befindet sich außer Kontrolle. Es gilt das System in einen sicheren Zustand zu überführen (Notfallmechanismen). Hierdurch soll Schaden am System vermieden oder minimiert werden [DHK+09, S. 62], [DDG+14, S. 64ff.].

Anpassung des Systemmodells: Nach der Spezifikation von Ansätzen zur Steigerung der Verlässlichkeit des mechatronischen Systems gilt es, das bestehende Systemmodell anzupassen bzw. zu ergänzen. Hierzu werden weitere Funktionen für das System spezifiziert sowie zusätzliche Systemelemente vorgesehen. Falls z.B. das *Mehrstufige Verlässlichkeitskonzept* umgesetzt werden soll, sind Leistungsstufen aus dem Funktionsbereich *Optimieren* zu realisieren oder Funktionen zur Interpretation und Bewertung der Situation zu integrieren. Es gilt insb. die Verlässlichkeit als Zielfunktion auszuwerten. Infolgedessen ist zu analysieren, wie die Verlässlichkeit im Betrieb quantifiziert werden kann [DHK+09, S. 62], [DDG+14, S. 64ff.], [GID+13, S. 217f.].

4.4 Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau

In diesem Abschnitt wird das **Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau** vorgestellt. Ziel sind Erfolg versprechende Lösungsideen zur Steigerung der Intelligenz bestehender Systeme des Maschinen- und Anlagenbaus. Das Vorgehensmodell wird idealtypisch im ersten Zyklus der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.4.1). Bild 4-30 visualisiert das Vorgehensmodell.

Im Rahmen des Vorgehensmodells werden das Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme (vgl. Abschnitt 4.2) und die Methoden zur Planung der Umsetzung von intelligentem Verhalten (vgl. Abschnitt 4.3) unterstützend eingesetzt. Das Vorgehensmodell ist in vier Phasen gegliedert, die nachfolgend erläutert werden. Bei dem Vorgehensmodell ist hervorzuheben, dass alle Prozesse eine Kooperation und Kommunikation der Beteiligten (Mitarbeiter des Unternehmens sowie Kunden) ermöglichen sollen [IDG15, S. 185ff.]. Vor diesem Hintergrund werden die erforderlichen Hilfsmittel zur Förderung der Kommunikation und Spezifikation in Abschnitt 4.5 vorgestellt.

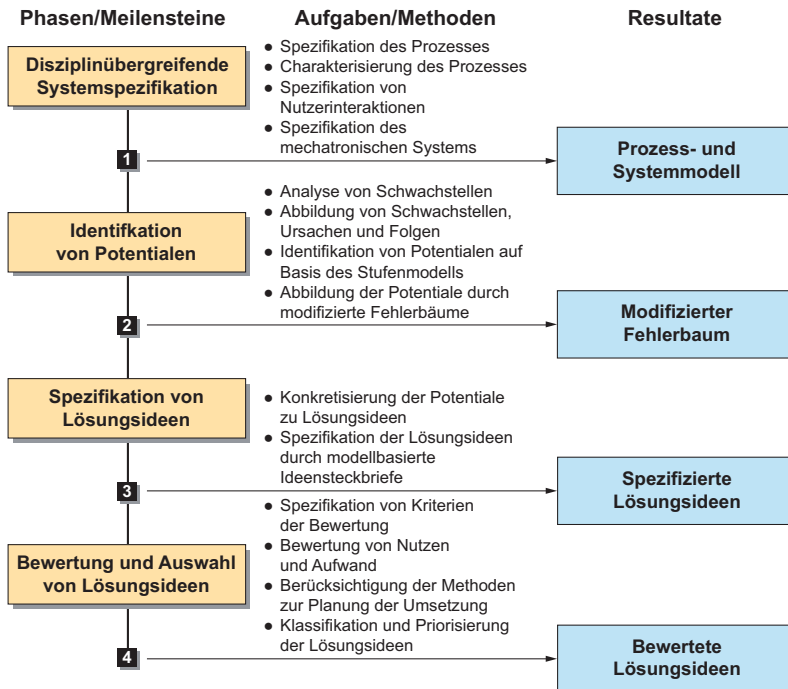


Bild 4-30: Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau [IGB+15, S. 34], [IDG15, S. 189]

4.4.1 Phase 1: Disziplinübergreifende Systemspezifikation

In der ersten Phase gilt es eine **disziplinübergreifende Spezifikation des Systems** zu erstellen. In dieser Phase wird die Einbettung des mechatronischen Systems als Betriebsmittel im Gesamtprozess sowie das betrachtete System selbst betrachtet. Hierdurch entsteht ein übergreifendes Kommunikations- und Kooperationsmittel für das unternehmensinterne Projektteam sowie den Kunden [IGB+15, S. 34f.].

Für die **Spezifikation des Gesamtprozesses** ist es sinnvoll, sowohl die kundennahen Fachdisziplinen im Unternehmen (z.B. Vertrieb und Service) als auch den Kunden selbst einzubinden. Dies ist relevant, da das betrachtete Betriebsmittel selbst nur eine Teilfunktion im Gesamtprozess ausführt und Anforderungen an intelligentere Systeme aus der Einbettung resultieren (hinsichtlich adaptiver, robuster, vorausschauender und benutzungsfreundlicher). Beispielsweise ist es nicht unbedingt erforderlich, ein Betriebsmittel leistungsfähiger im Sinne der Schnelligkeit zu realisieren, wenn die nachgelagerten Prozesse langsamer ablaufen. Hierzu wird die Methode OMEGA verwendet (vgl. Abschnitt 4.5.1.1).

Neben der Prozessspezifikation erfolgt eine **Charakterisierung des Prozesses**. Grundlage der Charakterisierung sind die typischen Kennzahlen zur Bewertung des Prozesses. Basierend auf diesen wird analysiert, welche Leistungsstufen sich aus dem Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme (vgl. Abschnitt 4.2) (gemäß der relevanten Kennzahlen) ergeben (vgl. Abschnitt 4.5.1.1).

In Anlehnung an METZLER bilden Nutzerinteraktionen mit dem bestehenden System Potentiale zur Integration von kognitiven Systemfunktionen [Met16, S. 150ff.]. Vor diesem Hintergrund kann die Methode OMEGA verwendet werden (vgl. Abschnitt 4.5.1.1), um **Nutzerinteraktionen** mit dem System zu **spezifizieren**. Hierdurch erhält das Projektteam eine Übersicht über die Nutzerinteraktionen und kann in weiteren Phasen entscheiden, ob eine Integration von ausgewählten Prozessschritten in das System sinnvoll ist (z.B. manuelle Überprüfung von Messwerten substituieren durch integrierte Sensorik).

Neben der detaillierten Analyse der Einbettung des Systems in den Gesamtprozess (inkl. Nutzerinteraktionen etc.) erfolgt die **Spezifikation des mechatronischen Systems** selbst. Diese erfolgt auf Basis von Ansätzen des Model-Based Systems Engineering, um eine disziplinübergreifende Beschreibung zu erhalten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz der Spezifikationstechnik CONSENS mit dem sogenannten SysML4CONSENS-Profil empfohlen (vgl. Abschnitt 4.5.1.2). Insbesondere das Modellieren der Aspekte *Umfeld* und *Wirkstruktur* gilt als entscheidend. Hierdurch erhält das Projektteam einen Überblick über die Einflüsse auf das mechatronische System (als Ergänzung zur Einbettung des Systems) sowie über die integrierten Systemelemente und deren Wechselwirkungen [IGB+15, S. 36]. Insbesondere letztere Betrachtung ist sinnvoll, da im System meist mehrere Prozesse (im Sinne von Teilfunktionen) ablaufen, die unabhängig voneinander in ihrer Leistungsstufe verbessert werden können. Darüber hinaus können bei Bedarf auch weitere Aspekte abgebildet werden.

Zusammenfassend werden in diese Phase folgende **Hilfsmittel** eingesetzt:

- Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme zur Charakterisierung der Prozesse (vgl. Abschnitt 4.2)
- Methode OMEGA zur Abbildung von Prozessen sowie Nutzerinteraktionen (vgl. Abschnitt 4.5.1.1)
- Spezifikationstechnik CONSENS (SysML4CONSENS-Profil) zur Spezifikation des mechatronischen Systems (vgl. Abschnitt 4.5.1.2)

Resultate dieser Phase sind ein *Prozess- und Systemmodell*. Das *Prozessmodell* umfasst die Spezifikation der Einbettung des mechatronischen Systems in den Gesamtprozess (z.B. beim Kunden) sowie die Charakterisierung des auszuführenden Prozesses sowie die Beschreibung von Nutzerinteraktionen. Das *Systemmodell* stellt eine disziplinübergreifende Abbildung des mechatronischen Systems im Sinne des Model-Based Systems Engineering dar.

4.4.2 Phase 2: Identifikation von Potentialen

In der zweiten Phase werden die **Potentiale zur Weiterentwicklung des mechatronischen Systems identifiziert**. Die Potentiale repräsentieren abstrakte Beschreibungen von Lösungsideen, die es in der nachfolgenden Phase zu konkretisieren gilt. Bei der Identifikation von Potentialen sind die kundennahen Fachdisziplinen (z.B. Service und Vertrieb) von besonderer Bedeutung, da diese meist wissen, wo der Bedarf zur Modifikation bestehender Systeme besteht. Nach Möglichkeit kann in diese Phase aber auch der Kunde eingebunden werden. So kann der Kunde mitteilen, welches ungewünschte Verhalten ein System aufweist sowie welche funktionalen Anforderungen sich an zukünftige Systemgenerationen ergeben und gewünscht sind [IGB+15, S. 34ff.], [IDG15, S. 188ff.].

Zur Identifikation der Potentiale werden die bereits erarbeiteten Ergebnisse der disziplinübergreifenden Beschreibung des Systems verwendet. Hierzu werden die Ergebnisse hinsichtlich **Schwachstellen analysiert**, die wiederum den Bedarf zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme aufzeigen. Schwachstellen können die Leistungsfähigkeit des Systems mindern oder ungewünschte Verhaltensweisen aus Kundensicht darstellen. Hierbei werden ausschließlich Schwachstellen betrachtet, die durch die Funktionsbereiche *Messen, Agieren* und *Informationen verarbeiten (Steuern und Regeln, Identifizieren* etc.) verbessert behandelt werden können [IGB+15, S. 34ff.], [IDG15, S. 188ff.].

Die **Schwachstellen** des Systems können mit Hilfe von FMEA-Moderationskarten **dokumentiert** werden (vgl. Abschnitt 4.5.2) [IGB+15, S. 34f.]. Hierzu gilt es z.B. einzelne Systemelemente aus der erarbeiteten Wirkstruktur des Systems auszuwählen (z.B. *Transportband*) und mögliches Fehlverhalten dieser zu identifizieren (z.B. *Ausdehnung des Transportbands*). Darüber hinaus können auch mögliche Folgen (z.B. *Positionierungsgenauigkeit wird inkorrekt*) sowie Ursachen des Fehlverhaltens spezifiziert werden (z.B. *Mechanische Schädigung des Transportbandes durch hohe Betriebslaufzeit*). Neben der Dokumentation der aktuellen Maßnahmen zur Entdeckung und Vermeidung werden die Potentiale zur verbesserten Behandlung der Schwachstelle spezifiziert. In diesem Zusammenhang kann z.B. dokumentiert werden, dass mit Hilfe der Leistungsstufe *Virtuelle Sensorik* aus dem Funktionsbereich *Messen* eine autonome Erkennung realisiert werden könnte. So könnte das Motordrehmoment des Antriebs des Transportbandes Informationen über den Verschleiß liefern. Dies ermöglicht eine bedarfsgerechte Wartung des Transportbandes, wodurch Stillstandzeiten im Betrieb vermieden werden können [IGB+15, S. 34f.].

Zur **Abbildung der Schwachstellen, Ursachen und Folgen** sowie der daraus abgeleiteten **Potentiale** kann die modifizierte Fehlerbaumanalyse verwendet werden (vgl. Abschnitt 4.5.2). Hierdurch erhält das Projektteam einen Überblick über den Einflussbereich der Potentiale (z.B. hinsichtlich der Folgen) [IGB+15, S. 36], [IRD+15, S. 57ff.].

Bei der **Identifikation der Potentiale** ist das **Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme** besonders zu **berücksichtigen** (vgl. Abschnitt 4.2). Die-

ses liefert Möglichkeiten, entsprechende Potentiale zu realisieren. Aus der Berücksichtigung des Stufenmodells können auch unabhängig von den Schwachstellen Potentiale zur Steigerung der Intelligenz abgeleitet werden (z.B. klassisch in Form von Anforderungen, die es zu realisieren gilt) [APW+15, S. 16]. Die Motivation zum Realisieren bestimmter Funktionsbereiche sowie damit verbundener Leistungsstufe geht aus den in Abschnitt 2.5.1 dargestellten Bedürfnissen hervor, wie z.B. Steigerung der Leistungsfähigkeit, Steigerung der Verlässlichkeit oder Erhöhung der Ressourceneffizienz.

Zusammenfassend werden in dieser Phase folgende **Hilfsmittel** eingesetzt:

- Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme zur Identifikation von Potentialen (vgl. Abschnitt 4.2)
- FMEA-Moderationskarten zur Dokumentation von Schwachstellen und Potentialen (vgl. Abschnitt 4.5.2)
- Modifizierte Fehlerbaumanalyse zur Visualisierung der erarbeiteten Ergebnisse (vgl. Abschnitt 4.5.2)

Als **Resultat** liegt ein *modifizierter Fehlerbaum* (auch Störungsbaum genannt) vor, der einen Überblick über Schwachstellen, Ursachen und Folgen sowie daraus abgeleitete Potentiale gibt. Die Potentiale haben stets einen Bezug zu den Leistungsstufen aus dem Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme.

4.4.3 Phase 3: Spezifikation von Lösungsideen

Nach der Identifikation der Potentiale auf Basis der Leistungsstufen des Stufenmodells sind die Potentiale zu sogenannten **Lösungsideen** zu **konkretisieren** und zu **spezifizieren**. Die Spezifikationen der Lösungsideen bilden die Grundlage zur Bewertung und Auswahl von Ideen sowie für die nachfolgende Umsetzung der Ideen durch die Entwicklung. Vor diesem Hintergrund gilt es die Spezifikation von Lösungsideen verständlich und intuitiv zu gestalten, um den Dialog zwischen den Beteiligten zu fördern.

Im Rahmen der vorliegenden Systematik werden die Lösungsideen in Form von **modellbasierten Ideensteckbriefen** spezifiziert (vgl. Abschnitt 4.5.3). Diese umfassen die allgemeine Beschreibung der Idee, die Motivation der Idee, Beschreibungen zu Nutzen sowie kritische Umsetzungspunkte und die Beschreibung von Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Idee (z.B. *Steuern und Regeln* auf Basis von *Messen*). Somit sind die Steckbriefe zur Spezifikation der Potentiale das **Hilfsmittel**, das im Rahmen dieser Phase verwendet wird.

Als **Resultat** dieser Phase liegen *spezifizierte Lösungsideen* vor, die auf Basis des modellbasierten Ideensteckbriefs aufbereitet wurden.

4.4.4 Phase 4: Bewertung und Auswahl von Lösungsideen

Nach der Spezifikation von **Lösungsideen** sind diese zu **bewerten** und zu **priorisieren**. Hierdurch erhält das Unternehmen einen verbesserten Überblick, um Entwicklungsprojekte zur Realisierung der identifizierten Potentiale zu initiieren. Diese repräsentieren aufbauende FuE-Projekte des Unternehmens.

Hierzu gilt es zunächst geeignete **Kriterien** zur Bewertung zu **spezifizieren**. Die Kriterien können gegliedert werden in Kriterien zur Bewertung des Nutzens sowie des Aufwandes der Umsetzung. Mögliche Kriterien sind beispielsweise: Realisierbarkeit, Dringlichkeit, Kostenabschätzung, Innovationsgrad etc. Die Kriterien zum Umsetzungsaufwand können unternehmensintern definiert werden. Kriterien zur Bewertung des Nutzens können darüber hinaus vom Kunden formuliert werden, um eine verbesserte Marktsicht zu erhalten. Bei einer hohen Anzahl von Kriterien ist es zudem sinnvoll, eine Gewichtung dieser vorzunehmen (in Anlehnung an die Nutzwertanalyse nach ZANGEMEISTER [Zan70]).

Im nächsten Schritt gilt es die spezifizierten Lösungsideen hinsichtlich der definierten Kriterien zu bewerten. Dies erfolgt durch Experten innerhalb des Unternehmens (Service, Vertrieb, etc.) und durch den Kunden. Bei Bedarf können neben der Bewertung zusätzliche Notizen dokumentiert werden, um eine bessere Diskussionsgrundlage zu fördern. Nach der individuellen Bewertung der Ideen werden die Ergebnisse in der Gruppe besprochen. Im Rahmen des Dialogs werden neue Erkenntnisse zu Nutzenpotentialen, aber auch kritische Umsetzungspunkte stets dokumentiert. Um insbesondere den Aufwand der Umsetzung besser bestimmen zu können, sind im Vorfeld auch die Methoden zur **Planung und Umsetzung von intelligentem Verhalten** zu verteilen und zu analysieren (vgl. Abschnitt 4.3). Hierdurch erhalten die Teilnehmer einen besseren Überblick über notwendige Kompetenzen zur Realisierung von entsprechenden Lösungsideen. Als Ergebnis liegt eine initiale Bewertung der Idee hinsichtlich Nutzen und Aufwand vor. Diese Bewertung wird nachfolgend visuell in Form eines Portfolios dargestellt (vgl. Abschnitt 4.4.4).

Nach dieser initialen Bewertung ist eine **Klassifikation** der Lösungsideen möglich. Hierdurch können aus der Vielzahl von Möglichkeiten zur Weiterentwicklung diejenigen ausgewählt werden (im Sinne einer Vorauswahl), die besonders hohes Potential zur Nachverfolgung aufweisen. Nach dieser Klassifikation wird zudem eine **Priorisierung** der verbleibenden Ideen durchgeführt. Dies kann z.B. im Rahmen eines Workshops erfolgen, bei dem die Teilnehmer jeweils zwei Punkte zur Priorisierung von Ideen erhalten. Zudem können die Argumente zur Auswahl dieser zwei Ideen in kurzen Stichworten spezifiziert werden (vgl. Abschnitt 4.5.4) [APW+15, S. 26ff.]. Hierdurch kann die Grundlage geschaffen werden, um z.B. der Geschäftsführung in prägnanter Weise das Ergebnis der Analyse vorzustellen.

Zusammengefasst werden folgende **Hilfsmittel** im Rahmen dieser Phase benötigt:

- Methoden zur Planung der Umsetzung von intelligentem Verhalten (vgl. Abschnitt 4.3)
- Vorlagen zur Bewertung von Nutzen und Aufwand (vgl. Abschnitt 4.5.4; Anhang A3.3)
- Portfolio zur Visualisierung der Ergebnisse (vgl. Abschnitt 4.5.4)
- Methode des Punkteklaubens zur Priorisierung von Lösungsideen (vgl. Abschnitt 4.5.4)

Als **Resultat** liegen *bewertete Lösungsideen* vor, mit denen die Intelligenz bestehender mechatronischer Systeme gesteigert werden kann. Diese bilden die Basis, um zukünftig Entwicklungsprojekte für die Realisierung zu initiieren.

4.5 Hilfsmittel zur Förderung der Kommunikation und Spezifikation

An der Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme ist eine Vielzahl von Fachdisziplinen bzw. Abteilungen im Unternehmen beteiligt (z.B. Mechanik-Konstruktion, Service, Vertrieb) sowie der Kunde. Vor diesem Hintergrund gilt es den vollständigen Prozess (vgl. Abschnitt 4.4) mit geeigneten **Hilfsmitteln zur Kommunikation und Spezifikation** zu unterstützen. Hierdurch soll zum einen der Wissensaustausch und -transfer angeregt werden (vgl. Abschnitt 2.2.1), zum anderen aber auch den Herausforderungen der vorliegenden interdisziplinären Aufgabe entgegen gewirkt werden. Daher werden zunächst in Abschnitt 4.5.1 Hilfsmittel zur Spezifikation des Systems vorgestellt. Nachfolgend werden in Abschnitt 4.5.2 Möglichkeiten aufgezeigt, um Schwachstellen des Systems und Potentiale zur Weiterentwicklung abzubilden. Die entsprechenden Potentiale gilt es zu konkretisieren und die resultierenden Lösungsideen in geeigneter Weise zu spezifizieren. Ein Hilfsmittel zur Spezifikation von Lösungsideen wird in Abschnitt 4.5.3 erläutert. Für die Bewertung und Auswahl der Lösungsideen sind geeignete Ansätze zur Verfügung zu stellen, um eine Diskussionsplattform zu schaffen. Diese werden im Abschnitt 4.5.4 vorgestellt.

Für die Beschreibung der einzelnen Hilfsmittel wird nachfolgend auf Prozesse und Betriebsmittel in der Zeitungsdrukerei zurückgegriffen (z.B. *Druckplatte belichten* durch eine *Computer-to-Plate*³⁸-*Belichtungsmaschine*). Durch den Einsatz der Beispiele soll eine anschauliche Vermittlung der erarbeiteten Ergebnisse gefördert werden.

³⁸ Die Computer-to-Plate Technologie beschreibt die Möglichkeit einer direkten Belichtung von Druckplatten. Durch diese Technologie entfällt die Verwendung von zusätzlichen Filmen [Kip00, S. 28]. Die Druckplatten können nachfolgend zum Drucken von Zeitungen etc. verwendet werden.

4.5.1 Spezifikation des Systems

Mechatronische Systeme aus dem Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus sind in der Regel in einem vollständigen Produktionsprozess eingebettet. Vor diesem Hintergrund ist sowohl eine Analyse der Einbettung des mechatronischen Systems im Gesamtprozess (z.B. Produktionsprozess) notwendig, als auch eine Analyse des mechatronischen Systems. Infolgedessen wird in Abschnitt 4.5.1.1 eine Möglichkeit zur Spezifikation und Charakterisierung des Prozesses vorgestellt. Nach dieser Spezifikation ist eine detaillierte Betrachtung des mechatronischen Systems durchzuführen. Hilfsmittel zur Spezifikation des mechatronischen Systems werden in Abschnitt 4.5.1.2 erläutert.

4.5.1.1 Spezifikation von Prozessen

Die **Spezifikation von Prozessen** ermöglicht einen Überblick über die Einbettung des betrachteten Systems in einen Gesamtprozess (z.B. Produktionsprozesse). Durch diesen Überblick wird die Grundlage für die Steigerung der Intelligenz des untersuchten mechatronischen Systems gebildet. Zudem können z.B. auch Vernetzungen zwischen anderen Systemen oder erforderliche Eingangsinformationen des Benutzers abgebildet werden. Für die Modellierung von Prozessen können verschiedene Ansätze eingesetzt werden (z.B. ARIS – Architektur Integrierter Informationssysteme [Sch01] oder BPMN – Business Process Model and Notation [OMG11-ol]). In der vorliegenden Systematik erfolgt die Spezifikation anhand der **Methode OMEGA** (Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse) [GP14, S. 254ff.], [Fah95]. Die Methode OMEGA ermöglicht einerseits die **vollständige Modellierung** einer Ablauforganisation in einem Modell und andererseits eignet sie sich durch ihre **einfache und prägnante Visualisierung** als Instrument zur anschaulichen Analyse und Planung von Leistungserstellungsprozessen [GP14, S. 254]. Bild 4-31 zeigt die Konstrukte der Methode OMEGA.

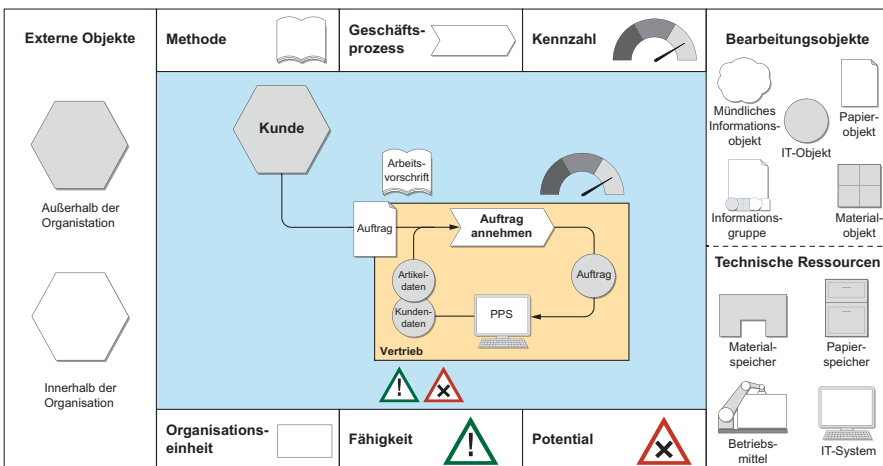


Bild 4-31: Überblick über die Konstrukte der Methode OMEGA nach [GP14, S. 254]

Die Prozessschritte werden über Eingangs- und Ausgangsgrößen (Bearbeitungsobjekte), technische Ressourcen, Methoden, Kennzahlen sowie die ausführende Organisationseinheit konkretisiert. Über die Konstrukte Betriebsmittel, Materialspeicher und Materialobjekt besteht die Möglichkeit, ein Produktionssystem zu modellieren [Mic06, S. 78f.].

Im Rahmen der Systematik erfüllt die Methode OMEGA **vier Aufgaben**, welche nachfolgend beschrieben werden.

- Die resultierenden Prozessmodelle **fördern das Verständnis des Gesamtprozesses** und zeigen auf, welchen Zweck die Maschine bzw. Anlage im Prozess des Kunden erfüllen muss. Hierdurch werden die Abhängigkeiten zwischen dem System als Betriebsmittel und der Einbettung in den Gesamtprozess für alle Beteiligten sichtbar [IRD+15].
- Die Modellierungsmethode OMEGA ermöglicht das Hinzufügen von Kommentaren bzw. Notizen an den Prozess [GP14, S. 261]. Dabei können z.B. Einstellparameter am Betriebsmittel bzw. dem mechatronischen System spezifiziert werden. Hierdurch erhalten alle Beteiligten einen **Überblick über verstellbare Parameter**, die zur Anpassung des Systems genutzt werden können. Dieser Ansatz wurde bereits in zahlreichen Projekten des HEINZ NIXDORF INSTITUTS angewendet und stellt keine Anpassung dar.
- Mit Hilfe des Konstrukts *Kennzahlen* können Informationen zur Messung der Leistungsfähigkeit eines Prozesses spezifiziert werden [GP14, S. 260]. Im Rahmen der Systematik wird dieses Konstrukt zusätzlich genutzt, um den Prozess hinsichtlich der **umgesetzten Leistungsstufen** zu **charakterisieren**. So kann z.B. spezifiziert werden, dass der Gesamtprozess durch eine binäre Steuerung gesteuert wird und z.B. keine Sensorik zur Überwachung und Anpassung des Prozesses integriert ist.
- Die Methode OMEGA eignet sich ebenfalls zur Abbildung von **Nutzerinteraktionen** mit dem System. So kann z.B. spezifiziert werden, wie eine Wartung, Qualitätsprüfung oder ein Eingreifen in den laufenden Prozess (z.B. Zufuhr von Verbrauchsmaterialien) erfolgt. In Anlehnung an METZLER repräsentieren diese Nutzerinteraktionen **Potentiale zur Automatisierung** [Met16, S. 150ff.]. Fragen in diesem Zusammenhang sind z.B.: Kann diese Nutzerinteraktion auch automatisiert erfolgen? Welche Funktionsbereiche (z.B. *Messen* oder *Adaptieren*) und Leistungsstufen sind dafür notwendig? Die Antworten auf diese Fragen repräsentieren wiederum Ideen zur Steigerung der Intelligenz des mechatronischen Systems.

Bild 4-32 zeigt den **Einsatz der Modellierungsmethode OMEGA im Rahmen der Systematik**. In dem genutzten Beispiel wird der Prozessschritt *Druckplatte stanzen* dargestellt. Die entsprechende Stanzanlage führt den Prozessschritt *Druckplatte stanzen* im Rahmen der Druckplattenherstellung auf Basis der Computer-to-Plate-Technologie durch

(z.B. im Zeitungsdruck) [BBS11, S. 586]. Die Druckplatten werden zuvor belichtet und gummiert, um eine Übertragung der Farbe von der Druckplatte auf die Zeitung zu erreichen. Bevor dies jedoch passiert, gilt es die Druckplatten zu stanzen und abzukanten, um druckfertige Druckplatten zu erhalten [BBS11, S. 586].

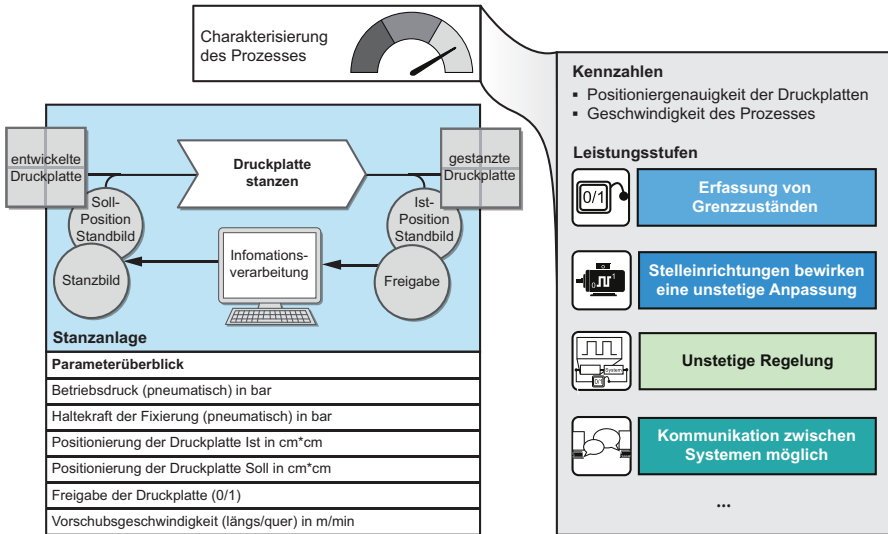


Bild 4-32: Abbildung von Prozessen und Charakterisierung dieser auf Basis des Stufenmodells am Beispiel einer Stanzanlage in Anlehnung an [GP14, S. 254]

In dem gezeigten **Beispiel** wird das Betriebsmittel *Stanzanlage* als auszuführende Organisationseinheit spezifiziert, die den Prozess *Druckplatte stanzen* ausführt. Des Weiteren werden die Eingangs- sowie Ausgangsgrößen des Prozessschrittes (z.B. *entwickelte Druckplatte*, *gestanzte Druckplatte*) abgebildet. In den Kommentaren zum Prozess werden die Parameter in tabellarischer Form spezifiziert, die z.B. vom Anlagenhersteller eingestellt wurden oder durch den Benutzer eingestellt werden können. Diese sind relevant, um einen Überblick über Eingriffsmöglichkeiten (Funktionsbereich *Agieren*) sowie integrierte Sensorik (Funktionsbereich *Messen*) zu erhalten. Das Konstrukt *Kennzahlen* wird in diesem Zusammenhang im Detail betrachtet. So werden z.B. klassische Kennzahlen bzgl. des betrachteten Prozesses spezifiziert, wie die *Positionierungsgenauigkeit der Druckplatten* sowie *Geschwindigkeit des Prozesses*. Darüber hinaus wird im Rahmen der Systematik das Konstrukt *Kennzahlen* zur Charakterisierung des Prozesses im Sinne der Leistungsstufen (vgl. Abschnitt 4.2) genutzt. So ist zu sehen, dass das betrachtete Betriebsmittel *Sensorik zum Erfassen von Grenzzuständen* umfasst (Erfassen der Endposition für das Stanzen). Dies ist insb. für die Kennzahl *Positionierungsgenauigkeit der Druckplatten* relevant. Dies bildet zudem die Basis für eine unstetige Regelung bzgl. der Positionierung (Antrieb zum Transport der Druckplatte wird durch diese Sensorik geregelt).

Der Einsatz der Methode OMEGA wird durch das **Softwarewerkzeug OPM** (OMEGA Process Modeller®) unterstützt. Das Werkzeug wurde von der UNITY AG entwickelt und in Projekten eingesetzt. Durch den Einsatz können die spezifizierten Prozesse anwendungsgerecht aufbereitet und wiederverwendet werden. Spezifikation von mechatronischen Systemen³⁹.

4.5.1.2 Spezifikation von mechatronischen Systemen

Nach der Spezifikation und Charakterisierung des Prozesses wird nachfolgend das mechatronische System detaillierter betrachtet. Hierzu ist das System disziplinübergreifend abzubilden, um eine Kommunikation und Kooperation zwischen den an der Entwicklung beteiligten Abteilungen, dem Vertrieb, dem Service sowie dem Kunden zu realisieren. Vor diesem Hintergrund wird ein sogenanntes **Systemmodell** erstellt [IKD+13, S. 337ff.], [FMS08, S. 15ff.]. Dieses beschreibt den Aufbau und die Funktionsweise des Systems ganzheitlich und disziplinübergreifend. Hierzu werden verschiedene Aspekte des Systems modelliert, wie z.B. die Funktionsweise und die Struktur des Systems. Die Modellierung des Systems kann mit Hilfe verschiedener Modellierungssprachen erfolgen, wie z.B. SysML [Wei06] oder mit der Spezifikationstechnik CONSENS [DDG+14].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die **Spezifikationstechnik CONSENS** zur Modellierung des Systemmodells verwendet. Ihre Stärke ist die zugrundeliegende ingenieurorientierte Methode, die sich in zahlreichen Industriekooperationen⁴⁰ bewährt hat. CONSENS ist eine am HEINZ NIXDORF INSTITUT entwickelte, fachdisziplinübergreifende Spezifikationstechnik [Fra06, S. 79ff.], [GFD+09], [GFD+08], [DDG+14]. Die Spezifikationstechnik besteht aus einer Modellierungssprache und einer zugehöriger Methode. Dabei sind Sprache und Methode stark aufeinander abgestimmt, sodass die zu erarbeitenden Aspekte (z.B. *Anforderungen, Anwendungsszenarien, Wirkstruktur*) das Ausdrucksmittel der Methode darstellen [IKD+13]. Die Aspekte werden rechnerintern durch Partialmodelle repräsentiert [GFD+08, S. 91]. Bild 4-33 zeigt die Partialmodelle der Spezifikationstechnik. Weiterführende Informationen zu den einzelnen Partialmodellen der Spezifikationstechnik sind im Anhang zu finden (vgl. Anhang A3.2).

Da Systeme des Maschinen- und Anlagenbau i.d.R. komplexe mechatronische Systeme darstellen, ist eine Unterstützung durch ein Softwarewerkzeug sinnvoll und erforderlich. Vor diesem Hintergrund wird das **SysML4CONSENS-Profil**⁴¹ im Software-Werkzeug

³⁹ Weiterführende Information zur Methode OMEGA können FAHRWINKEL [Fah95] sowie GAUSEMEIER und PLASS [GP14] entnommen werden.

⁴⁰ Die Spezifikationstechnik CONSENS wird in zahlreichen Projekten der Fraunhofer IEM verwendet. Darüber steht die Spezifikationstechnik im Mittelpunkt des Leistungsangebots „Mechatronische Systembeschreibung“ [Fra-ol].

⁴¹ Das SysML4CONSENS-Profil wurde in Kooperation des HEINZ NIXDORF INSTITUTS, der FRAUNHOFER IEM sowie der ITEMIS AG erarbeitet [IKD+13].

Enterprise Architect eingesetzt [IKD+13, S. 343]. Das Profil ermöglicht eine CONSENS-konforme Modellierung unter Verwendung von SysML-Werkzeugen.

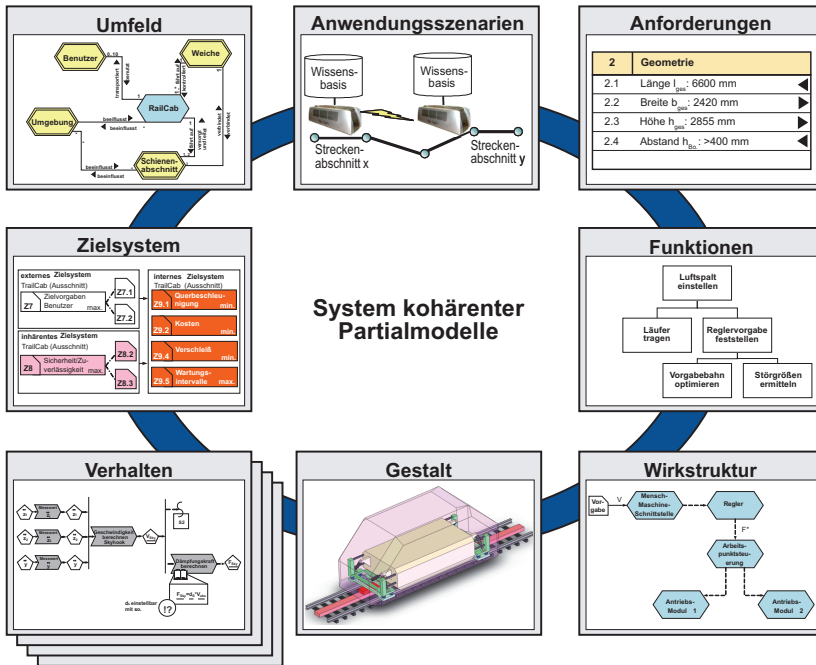


Bild 4-33: Partialmodelle zur Beschreibung des Systemmodells mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS [Fra06, S. 80], [ADG+09, S. 157]

Im Rahmen der Systematik werden insbesondere die Aspekte *Umfeld* und *Wirkstruktur* verwendet. Dabei werden z.B. die einzelnen Systemelemente des Betriebsmittels sowie deren Wechselwirkungen untereinander sowie mit der Umwelt spezifiziert, um Zusammenhänge zwischen den Systemelementen des Systems abzubilden [IK16, S. 29f.]. Auf Basis des Systemmodells können nachfolgend **Analysen** zur Identifikation von Schwachstellen und Potentialen erfolgen [IDG15]. Weiterführende Informationen zur Spezifikationstechnik CONSENS können DOROCIAC ET AL. [DDG+14] und IWANEK ET AL. [IKD+13] entnommen werden.

4.5.2 Abbildung von Potentialen

Auf Basis der abgebildeten Prozesse sowie des Systemmodells kann **eine Identifikation von Schwachstellen und Potentialen** durchgeführt werden. Vor dem Hintergrund der vorliegenden Arbeit gilt es die Schwachstellen zu identifizieren, die durch Ansätze aus dem Stufenmodell verbessert behandelt werden können (vgl. Abschnitt 4.2). Die identifizierten Schwachstellen bilden den Ausgangspunkt zur Systemverbesserung und damit die Grundlage für die Spezifikation von Potentialen.

Die Schwachstellen können mit Hilfe von **Methoden aus dem Bereich der Sicherheits- und Zuverlässigkeitstechnik** (z.B. FMEA oder FTA) identifiziert werden (vgl. Abschnitt 3.2.1). Die Identifikation kann z.B. im Rahmen von **Workshops** gemeinsam mit dem Kunden erfolgen oder auf Basis von Erfahrungswissen aus den Bereichen Service oder Vertrieb. Der Kunde gilt hierbei als wichtige Wissensquelle, da er bereits durch den Einsatz von bestehenden Systemgenerationen weiß, welche ungewünschten Verhaltensweisen ein System aufweist, welche physikalischen Ursachen dieses hat und was die resultierenden Folgen des Verhaltens sind (z.B. im Gesamtprozess beim Kunden). Darüber hinaus kann der Kunde Wünsche und Forderungen hinsichtlich funktionalen Anforderungen an zukünftige Systemgenerationen spezifizieren (vgl. Abschnitt 2.5.2).

Im Rahmen der Systematik erfolgt die Aufnahme von Schwachstellen und Potentialen in Anlehnung an eine **FMEA** auf Basis von abgebildeten Prozessen (vgl. Abschnitt 4.5.1.1) [IRD+15, S. 58f.], [GP14, S. 273] sowie auf Basis eines Systemmodells (vgl. Abschnitt 4.5.1.2) [IGB+15, S. 35ff.], [GKP09]. Insbesondere für die Analyse in kleineren Gruppen wurden **FMEA-Moderationskarten** erarbeitet, die eine Spezifikation von Potentialen unterstützten [IGB+15, S. 35]. Eine vereinfachte Form der FMEA-Moderationskarten ist in Bild 4-34 dargestellt.

Mögliche Fehlerfolge: Druckbild weicht vom Soll ab	Systemelement/ Betriebsmittel: Stanzsystem
Bedeutung/ Schwere: /	Funktion/ Prozess: Druckplatte stanzen
Mögliche Fehlerart/ Schwachstelle: Stanzposition nicht ok	Derzeitige Maßnahmen bzgl. der Fehlerart/ Störung Vermeidung: Stanzsystem kalibrieren Auftretenswahrscheinlichkeit: / Entdeckung: Druckbild prüfen (späte Entdeckung) Entdeckungswahrscheinlichkeit: / Risiko-Prioritätszahl (RPZ): /
Mögliche Fehlerursache: Stanzsystem nicht kalibriert	Zukünftige Maßnahmen/ Potentiale Vermeidung: / Messen: Druckplattenposition prüfen Information verarbeiten: Druckplattenposition korrigieren Verantwortlichkeit/ Termin: /

Bild 4-34: Vereinfachte Form von FMEA-Moderationskarten [IGB+15, S. 35]

Für den Einsatz der FMEA-Moderationskarten im Rahmen der Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme wird nachfolgende **Reihenfolge** vorgeschlagen. Zunächst gilt es das betrachtete *Systemelement/Betriebsmittel* und die damit verbundene *Funktion bzw. den Prozess* zu dokumentieren, um eine eindeutige Zuordnung sicherzustellen. Nachfolgend wird die *mögliche Fehlerart bzw. Schwachstelle* dokumentiert. Im

nächsten Schritt werden für diese Schwachstelle, die *mögliche Fehlerfolge* sowie die *mögliche Fehlerursache* spezifiziert. Die Dokumentation zwischen Ursache, Schwachstelle und Folge ermöglicht zudem das Aufstellen von Ursache-Wirkzusammenhängen (angelehnt an die Fehlerbaumanalyse). Wie bei einer klassischen FMEA⁴² werden zudem *aktuelle Maßnahmen* bzgl. der Fehlerart bzw. Störung definiert. Dabei werden Maßnahmen zur Vermeidung sowie Entdeckung dokumentiert. Darüber hinaus gilt es mögliche *zukünftige Maßnahmen* im Sinne von Potentialen zu spezifizieren. Diese werden in der Karte den Kategorien Vermeidung, Entdeckung und Reaktion zugeordnet. Insbesondere zukünftige Maßnahmen zur Entdeckung und Reaktion sind für die weitere Analyse entscheidend. Hier werden z.B. Maßnahmen geprüft, wie z.B. dass die Entdeckung automatisiert erfolgen kann (durch Leistungsstufen aus dem Funktionsbereich *Messen*) oder wie eine Reaktion durch die weiteren Leistungsstufen und Funktionsbereiche des Stufenmodells unterstützt werden kann [IGB+15, S. 35ff.]

Wie bei einer klassischen FMEA können zudem auch die **Kennzahlen zur Risikobewertung** dokumentiert werden. So werden z.B. folgende Kennzahlen qualitativ festgelegt: die Schwere der *möglichen Fehlerfolge* (S), die *Entdeckungswahrscheinlichkeit* der Fehlerart (E) und die *Auftretenswahrscheinlichkeit* der Fehlerart (A). Aus den drei Kennzahlen wird durch die Multiplikation von S, A und E die sogenannte *Risikoprioritätszahl* (RPZ) gebildet [BL04, S. 114], [Dor15, S. 86f.].

Für die Aufbereitung und Abbildung der aufgenommenen Ergebnisse wird eine **modifizierte Fehlerbaumanalyse** verwendet [IRD+15, S. 59], [Poo11, S. 98ff.], [Gau10, S. 102f.], [DGK+09]. Nachfolgend gilt es, aus den identifizierten möglichen Folgen von Schwachstellen bzw. Fehlerarten, die oberste Schwachstelle auszuwählen und anschließend Ursachen für deren Auftreten hierarchisch abzubilden. Diese werden über Gatter (und, oder etc.) miteinander verknüpft [DIN61025].

Nachfolgend wird das **Beispiel** einer Druckplattenherstellung aus Abschnitt 4.5.1.1 zur Erklärung des modifizierten Fehlerbaums verwendet (vgl. Bild 4-35). In diesem Zusammenhang kann z.B. als oberste Störung eine unzureichende Produktqualität (z.B. *Druckbild weicht vom Soll ab*) ausgewählt werden. Nachfolgend wird auf Basis der dokumentierten Ursache-Wirkzusammenhänge analysiert, welche Ursachen diese Schwachstellen hervorrufen können (z.B. Ursachen im Bereich der Belichtungsmaschine, Ursachen im Bereich der Stanzanlage). Neben diesen Schwachstellen, werden jeweils die aktuell umgesetzten sowie zukünftigen Maßnahmen abgebildet, um den Schwachstellen entgegenzuwirken. Beispielsweise wird aktuell die Störung *Schaden am Stanzwerkzeug* durch die

⁴² Als Ergänzung zu einer klassischen FMEA erfolgt die Analyse sowohl induktiv (Fragestellung: Was wäre die Folge?) als auch deduktiv (Fragestellung: Was wäre die Ursache?). Eine klassische FMEA unterstützt i.d.R. eine induktive Analyse [Dor15, S. 15f.], [Eri05, S. 49]. Darüber hinaus ist in den Moderationskarten ein Bezug zum Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme vorgesehen. So werden zukünftige Maßnahmen z.B. den Kategorien Vermeidung, Messen (vgl. Abschnitt 4.2.2) und Informationen verarbeiten (vgl. Abschnitte 4.2.2 bis 4.2.6) zugeordnet.

Maßnahme *Stanzwerkzeug austauschen* durch den *Maschinenbediener* durchgeführt. Diese Maßnahme ist jedoch nur reaktiv. Vor diesem Hintergrund besteht der Bedarf, ein verbessertes Systemverhalten hinsichtlich dieser Störung zu realisieren. Um z.B. proaktiv zu handeln, könnten Funktionen aus dem Funktionsbereich *Messen* integriert werden, um nicht kritische Schädigungen des Stanzwerkzeugs autonom zu erkennen, und Wartung frühzeitig zu initiieren. Als Resultat der Analyse liegt ein modifizierter Fehlerbaum vor, der sich an dem modellierten Prozess⁴³ bzw. Systemelementen orientiert und aktuelle und zukünftige Maßnahmen beschreibt [IRD+15, S. 58f.]. Die zukünftigen Maßnahmen stellen hierbei abstrakte Potentiale dar, die es im Folgenden zu spezifizieren gilt. Eine Möglichkeit zur Konkretisierung dieser im Sinne von Lösungsideen wird im nächsten Abschnitt (vgl. Abschnitt 4.5.3) erläutert.

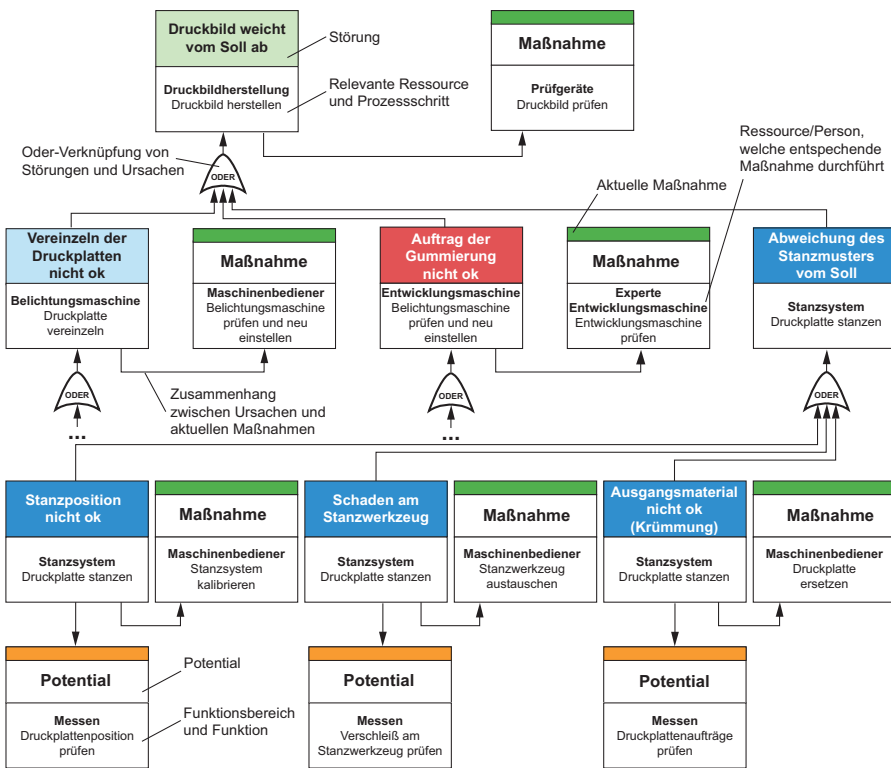


Bild 4-35: Modifizierter Fehlerbaum mit Störungen sowie aktuellen und potentiellen Maßnahmen [IRD+15, S. 57ff.]

⁴³ Im modifizierten Fehlerbaum sind Störungen stets mit Prozessen bzw. Systemelementen gekoppelt. Darüber hinaus soll eine identische Farbwahl die Visualisierung der Zusammenhänge zwischen Prozessspezifikation und Störungen im modifizierten Fehlerbaum fördern (vgl. Bild 4-35).

4.5.3 Ansatz zur Spezifikation von Lösungsideen

Die identifizierten Potentiale zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme gilt es zu konkretisieren und zu spezifizieren. Die **Spezifikation der Lösungsideen** kann nachfolgend genutzt werden, um Ideen unternehmensintern oder mit dem Kunden zu analysieren. Vor diesem Hintergrund bilden die Spezifikationen die Grundlage für die Bewertung und Auswahl Erfolg versprechender Ideen. Hierzu bedarf es Ideen so zu spezifizieren, dass diese einfach und schnell zu verstehen sind und auch von Beteiligten unterschiedlicher Fachdisziplinen und mit abweichendem Kenntnisstand nachvollzogen werden können [Küh03, S. 22f.].

Zur Spezifikation von Ideen stehen zahlreiche Ansätze zur Verfügung, wie z.B. das Formular zur Ablage von Ideen nach SCHWANKL und LINDEMANN [SL02], der Innovationssteckbrief nach VAHS und BREM [VB15, S. 312] oder der Ideensteckbrief nach IHMELS [Ihm10, S. 108ff.]. In Anlehnung an diese Arbeiten und unter Berücksichtigung der steigenden Bedeutung des MBSE, wird im Rahmen der Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme ein sogenannter **modellbasierter Ideensteckbrief**⁴⁴ verwendet [IGB+15, S. 37]. Dieser entstand im Rahmen von Industriekooperationen zur Identifikation von Potentialen der Selbstoptimierung. In den Kooperationen konnten die Ideen schnell nachvollzogen und verstanden werden. Zudem bestätigte sich die Eignung der Steckbrief im Rahmen von Workshops mit mehreren Personen.

Bild 4-36 zeigt den modellbasierten Ideensteckbrief sowie die dort verwendeten Konstrukte. Der **Ideensteckbrief** umfasst folgende **Bereiche**: *Beschreibung der Idee*, *Motivation der Idee*, *Nutzen* sowie *kritische Umsetzungspunkte* und *Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Idee*. Nachfolgend werden diese im Detail erläutert.

Die **Beschreibung der Idee** umfasst die Modellierung der Idee als Anwendungsfall (angelehnt an die SysML und UML [Wei06, S. 75ff.]). Bei der Beschreibung wird die Idee zunächst benannt (im Beispiel *Virtuelle Sensorik zum Erfassen der Position der Druckplatte*) sowie dem zu betrachtenden System (Betriebsmittel *Stanzanlage*) zugeordnet. Bei der Benennung ist darauf zu achten, sowohl die Lösungsmöglichkeit im Sinne der Leistungsstufen (wird als Link abgebildet), als auch das Potential zu berücksichtigen. Um eine bessere Vorstellung bzgl. der Idee zu erhalten, wird diese noch mit Hilfe von Aktivitäten konkretisiert. Im Rahmen von Industriekooperationen zeigten sich ca. drei bis vier Aktivitäten als geeignete Anzahl zur Abbildung. Durch eine textuelle Kurzbeschreibung kann die Idee zudem charakterisiert werden [IGB+15, S. 37].

⁴⁴ Der modellbasierte Ideensteckbrief setzt sich aus einzelnen Elementen zusammen. Die Elemente können wiederum in einem entsprechenden Datenmodell abgelegt werden. Hierdurch ist es möglich, Hierarchien zu bilden oder Querverweise zwischen Elementen zu setzen [Eig13, S. 105]. So können z.B. die einzelnen Elemente des Steckbriefes mit Systemelementen der Wirkstruktur oder zukünftigen Anforderungen verknüpft werden.

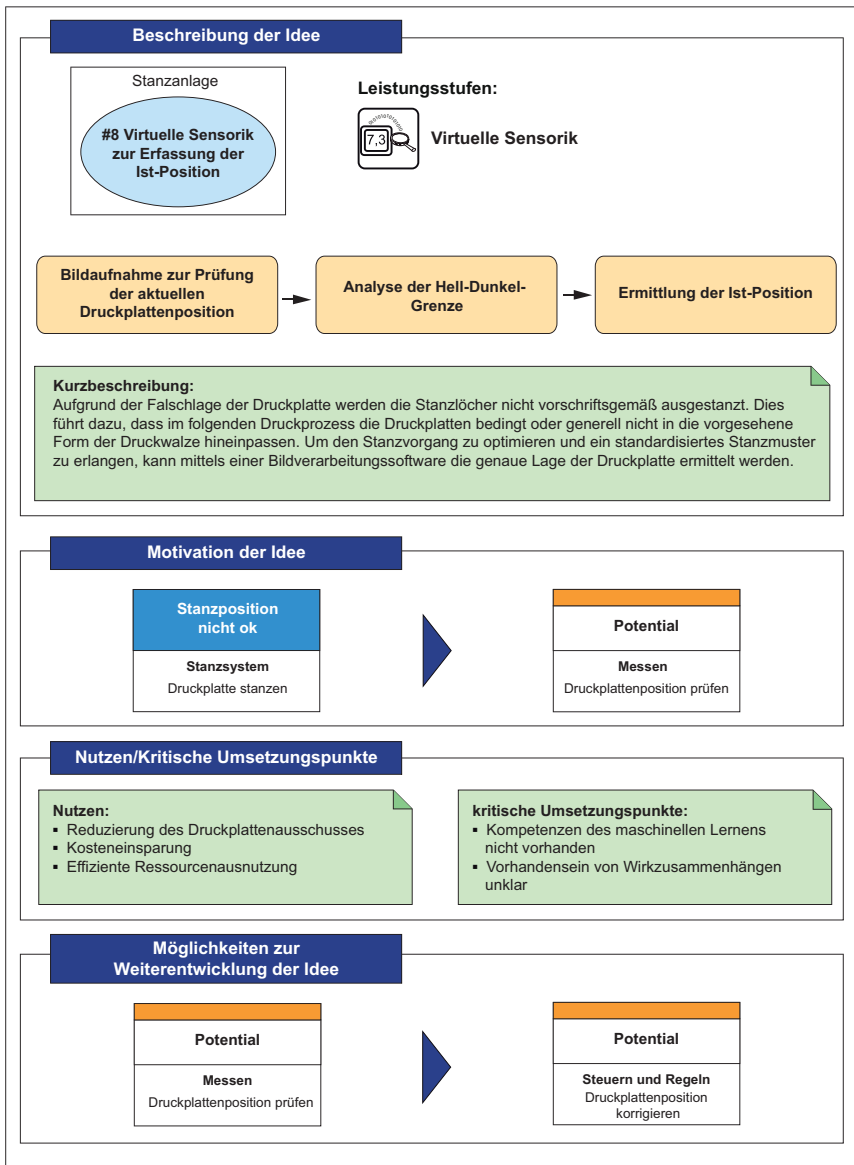


Bild 4-36: Modellbasierter Ideensteckbrief zur Ideenspezifikation [IGB+15, S. 37]

Die **Motivation der Idee** gliedert sich in zwei Einzelelemente. Dies ist zum einen die Schwachstelle (bzw. Störung), die der Ursprung der Idee war. In dem vorliegenden Beispiel ist dies die Schwachstelle *Stanzposition nicht ok*. Zum anderen gehört zur Motivation der Idee das zugehörige Potential. Im vorliegenden Beispiel ist dies das Potential

Durchplattenposition prüfen aus dem Funktionsbereich *Messen* [IGB+15, S. 37]. Die Dokumentation der Motivation ist sinnvoll, da in späteren Phasen der Produktentstehung besser nachvollzogen werden kann, warum das System diese Funktionen überhaupt aufweist. Dies erhöht die Akzeptanz von Veränderungen am System.

In ergänzenden Notizen werden zudem noch Informationen zu **Nutzen sowie kritischen Umsetzungspunkten** beschrieben. Die Beschreibungen liegen ausschließlich in Textform vor und können bei Bedarf noch durch weiterführende Informationen (z.B. tiefergehenden Analysen) angereichert werden [IGB+15, S. 37]. Durch diese Dokumentation ist eine bessere Bewertung von Nutzen und Aufwand möglich.

Darüber hinaus können in diesem Steckbrief auch noch **Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Idee** spezifiziert werden. Beispielsweise ermöglicht die Integration von Funktionen aus dem Bereich *Messen* eine automatisierte Anpassung des Prozesses. Für das vorliegende Beispiel kann z.B. die *Virtuelle Sensorik* genutzt werden, um eine *un-stetige Regelung* zu ermöglichen. In diesem Rahmen wird die Position der Druckplatte solange verändert, bis eine gewünschte Endposition erreicht ist.

4.5.4 Unterstützung der Bewertung und Auswahl

Die spezifizierten intelligenten Lösungsideen geben einen Überblick über die Optionen zur Weiterentwicklung bestehender Systeme. Die Entscheidung, welche Lösungsidee mit den gegebenen Ressourcen (z.B. Kompetenzen im Unternehmen, finanzielle und zeitliche Rahmenbedingungen) konkretisiert wird, erfordert eine Bewertung und Auswahl. Neben dem Aufwand ist zudem auch der Nutzen aus Kundensicht zu bewerten.

Zur **Bewertung von alternativen Lösungsideen** existiert eine Vielzahl an Methoden (vgl. Abschnitt 3.4). Diese bewerten Eigenschaften auf Basis festgelegter Kriterien. Idealerweise wird eine quantitative Bewertung durchgeführt. Jedoch kann im Rahmen der Strategischen Produktplanung i.d.R. nur qualitativ bewertet werden. In der Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme erfolgt die Bewertung und Auswahl in zwei Schritten. Zunächst werden aus einer Vielzahl von möglichen Optionen die Wichtigsten vorausgewählt. Hierzu hat sich eine Zahl an Lösungsideen von fünf bis maximal zehn als geeignet herausgestellt. Nachfolgend werden diese priorisiert, um eine Entscheidungsgrundlage (z.B. für die Geschäftsführung) zu erstellen.

Für die erste Bewertung der Lösungsideen gilt es zunächst **Kriterien** zu definieren, hinsichtlich derer die Lösungsideen bewertet werden. Eine Auswahl möglicher Kriterien liefert KÜHN [Küh03, S. 131ff.]. Die Kriterien können zudem in zwei Gruppen unterschieden werden: *Nutzen* sowie *Aufwand der Umsetzung*. Zur weiteren Erklärung werden unter der Gruppe *Nutzen* die *Begeisterungsfähigkeit*, eine Bewertung hinsichtlich des *Alleinstellungsmerkmals* sowie bzgl. der Steigerung der *Leistungsfähigkeit* (z.B. Schnelligkeit, Verlässlichkeit) bewertet. Der *Aufwand der Umsetzung* wird im Rahmen der Erklärung nicht weiter unterteilt.

Darüber hinaus besteht die **Möglichkeit**, den *Nutzen* und *Aufwand* weiter zu unterteilen und ggf. mit einer Gewichtung zu versehen. Hierdurch kann bei weiter konkretisierten Ideen eine tiefergehende Analyse durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang ist es sinnvoll, das **Konzept einer Nutzwertanalyse** (z.B. nach ZANGEMEISTER) zu verwenden [Zan70], [FG13, S. 390]. Im Folgenden wird auf die Erklärung zur Bewertung der Konzepte auf Basis einer Nutzwertanalyse verzichtet.

Für die Bewertung eignen sich **Workshops** sowohl mit den Experten in den Unternehmen als auch mit dem Kunden. Die Rolle des Kunden ist insb. für die Bewertung des Nutzens entscheidend. Die Bewertung kann direkt gemeinsam mit allen Beteiligten erfolgen oder die Bewertung erfolgt zunächst aus Sicht der Beteiligten einzeln und eine Zusammenführung (z.B. Mittelwertbildung) wird nachfolgend durchgeführt. Eine vereinfachte Vorlage zur Abbildung der quantitativen Bewertung ist im Anhang dargestellt (vgl. Anhang A3.3).

Neben der Abbildung der quantitativen Bewertung in tabellarischer Form kann eine ergänzende **Visualisierung der Ergebnisse auf Basis eines Portfolios** genutzt werden [Bra02, S. 31ff.] [GP14, S. 129f.], [APW+15, S. 25]. Hierdurch kann eine Klassifikation der Ideen in drei Gruppen erfolgen. Als geeignet haben sich im Rahmen von Industriekooperationen folgende drei Gruppen herausgestellt: *Hohes Potential*, *Mittleres Potential* und *Niedriges Potential*. Ein entsprechendes Portfolio wird in Bild 4-37 dargestellt.

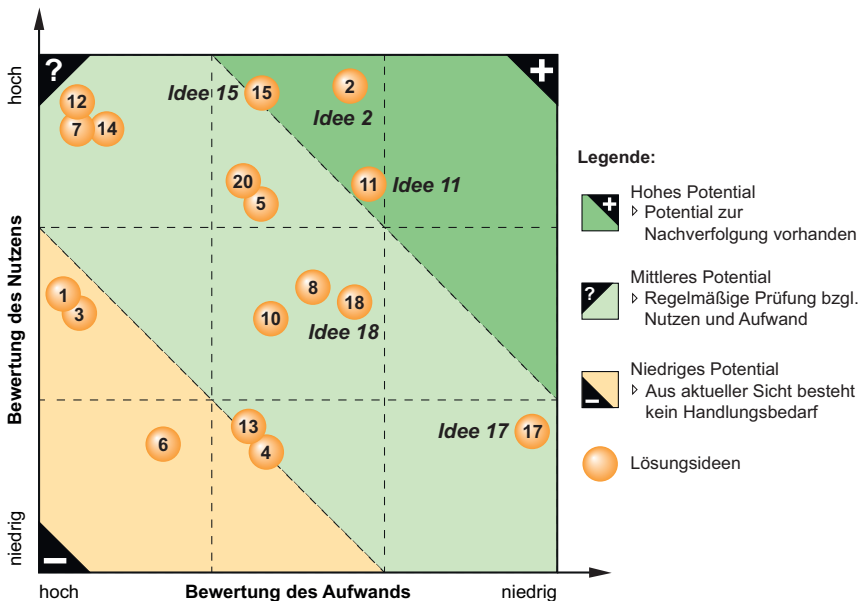


Bild 4-37: Portfolio als Basis für die Klassifikation der Ideen [IGB+15, S. 37] in Anlehnung an [GP14, S. 130]

Nach der Klassifikation der Ideen in die drei genannten Klassen kann zudem eine Priorisierung der verbleibenden Ideen erfolgen. Die **Priorisierung** kann zum einen bereits auf

Basis der Positionierung im Portfolio erfolgen. Zum anderen können Erfolg versprechende Ideen aber auch durch eine zusätzliche Auswahl-Runde explizit priorisiert werden. Hierzu eignet sich insbesondere die Methode *Punkteleben* aus der Gruppe der ganzheitlichen Methoden zur Bewertung (vgl. Abschnitt 3.4.1) [Ges06, S. 237], [APW+15, S. 25]. Dies kann z.B. im Rahmen eines Workshops erfolgen, bei dem die Teilnehmer jeweils zwei Punkte zur Priorisierung von Ideen erhalten. Darüber hinaus können die Argumente zur Auswahl dieser zwei Ideen in kurzen Stichworten spezifiziert werden [APW+15, S. 26ff.]. Hierdurch kann die Grundlage geschaffen werden, um z.B. der Geschäftsführung in prägnanter Weise das Ergebnis der Analyse vorzustellen. Ein Beispiel einer solchen Priorisierung ist in Bild 4-38 dargestellt.

Priorisierung der Potentiale		
	Priorisierung	Gründe für die Priorisierung
Idee 2		<ul style="list-style-type: none"> Einfache Realisierung Einfach Service Optimierung Wartung: Kunde wird stärker in die Pflicht genommen
Idee 11		<ul style="list-style-type: none"> Transport ist leichter zu überwachen Störung ist gut vorherzusagen
Idee 15		<ul style="list-style-type: none"> Geschlossene Argumentationskette Zusatzgeschäft Entlastung des Personals wichtig, sonst wird die Reinigung vernachlässigt Vereinfachung der Reinigung Reinigung fällt häufig an
Idee 17		<ul style="list-style-type: none"> Vereinfachung Kosteneinsparung Optimierung des Prozesses

Bild 4-38: Priorisierung der Potentiale auf Basis der ganzheitlichen Methode Punkteleben Anlehnung an [Ges06, S. 237]

5 Anwendung und Bewertung

In diesem Kapitel wird die *Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau* validiert. Da die einzelnen Bestandteile der Systematik im Rahmen des *Vorgehensmodells zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau* zum Einsatz kommen, erfolgt die Validierung gemäß der Phasen des Vorgehensmodells (vgl. Abschnitt 4.4). Die Validierung wird anhand ausgewählter Betriebsmittel einer Lackieranlage in Abschnitt 5.1 durchgeführt. Abschnitt 5.2 bildet den Abschluss des Kapitels. Die erarbeiteten und validierten Inhalte der Systematik werden anhand der Anforderungen aus der Problemanalyse (vgl. Abschnitt 2.7) bewertet.

5.1 Anwendungsbeispiel: Lackieranlage

Die Validierung des in Abschnitt 4.4 vorgestellten *Vorgehensmodells zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau* erfolgt beispielhaft an einer Lackieranlage bzw. an ausgewählten Betriebsmitteln in der Lackieranlage. Lackieranlagen stellen komplexe Systeme dar, die aus mehreren sequentiell angeordneten Betriebsmitteln mit eigener Funktionalität bestehen. Eine Lackieranlage umfasst maßgeblich die Prozessschritte Fördern, Reinigen und Vorbehandeln, Beschichten sowie Trocknen [Lak09, S. 1f.]. Durch die starke Verkettung der einzelnen Prozessschritte kann die Lackieranlage auch als vernetztes System verstanden werden [IK16, S. 28ff.].

Die hohe Varianz der zu lackierenden Werkstücke sowie immer kleiner werdende Losgrößen erfordern verstärkt anpassungsfähige Lackieranlagen, die stets optimale Ergebnisse hinsichtlich der Qualität und Ausbringungsmenge beim Kunden erzielen. Vor diesem Hintergrund können die Ansätze aus dem Kontext der Selbstoptimierung dazu beitragen, intelligente Lackieranlagen zu realisieren. Die zahlreichen prinzipiellen Möglichkeiten resultieren jedoch in einer unüberschaubaren Anzahl an Handlungsoptionen. Somit besteht der Bedarf zunächst zu prüfen, wo Modifikationen des bestehenden Systems sinnvoll erscheinen (z.B. aus Marktsicht durch das Erfüllen von Kundenbedürfnissen (vgl. Abschnitt 2.5.1)) und welche Leistungsstufen aus den Funktionsbereichen des Stufenmodells zur Lösung dieser geeignet sind [IK16, S. 28ff.].

Vor dem Hintergrund der Komplexität von Lackieranlagen wird im Rahmen der Validierung der Fokus auf die Komponente *Entstaubung/Ionisierung* sowie den damit verbundenen Prozessschritt *Werkstück entstauben* gelegt, wenngleich die zentrale Bedeutung dieser Komponenten im Gesamtsystems aufgezeigt wird. Um ein besseres Verständnis über das System zu erhalten, visualisiert Bild 5-1 die prinzipielle Wirkweise einer *Entstaubung/Ionisierung* [IK16, S. 28ff.], [Lak09, S. 9ff.]. An diesem Beispiel wird nachfolgend gezeigt, wie eine Steigerung der Intelligenz im maschinenbaulichen System mit Hilfe der Systematik realisiert werden kann. Ziel ist es, Erfolg versprechende Ideen auszuwählen, die eine Weiterentwicklung des Systems darstellen.

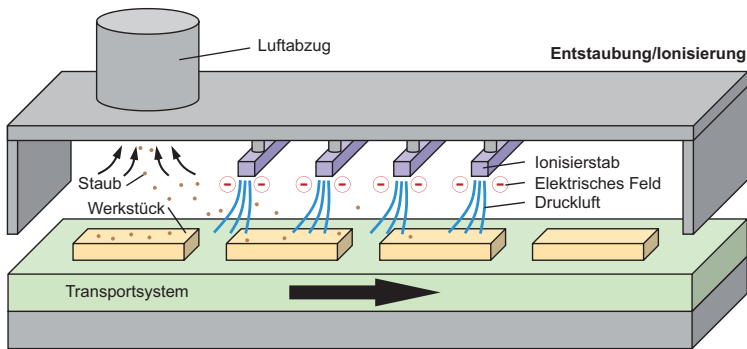


Bild 5-1: Wirkweise der Entstaubung/Ionisierung [Hom05-ol, S. 4], [IGB+15, S. 35]

5.1.1 Phase 1: Disziplinübergreifende Systemspezifikation

In der Phase disziplinübergreifende Beschreibung des Systems gilt es zunächst das System sowie die Einbettung dessen im Gesamtprozess zu spezifizieren. Dies erfolgt im Rahmen von Workshops, an denen Experten der Fachdisziplinen Mechanik-Konstruktion, Automatisierung, Service und Vertrieb beteiligt sind. Hierzu wird zunächst die **Methode OMEGA** eingesetzt, um die Prozessschritte der Lackieranlage (z.B. *Werkstück entstauben*, *Werkstück beflammen* und *Werkstück lackieren*) sowie Nutzerinteraktionen (z.B. *Lacktank austauschen*, *Werkstücke zuführen* und *Parameter an Werkstück anpassen*) zu spezifizieren (vgl. Abschnitt 4.5.1.1).

In Workshops werden zudem die **wesentlichen Wirkzusammenhänge** analysiert, um eine tieferehendes Verständnis über das System zu erhalten. So dient der Prozessschritt *Werkstück entstauben* dazu, ein mögliches Einlackieren von Staubpartikeln zu vermeiden. Erforderlich macht dies, die oft elektrostatisch geladene Oberfläche von Kunststoffwerkstücken: Staubpartikel werden angezogen und setzen sich fest. Abhilfe schaffen sogenannte *Ionisierstäbe* (auch *Ionisationsstäbe* genannt) in dem Betriebsmittel *Entstaubung/Ionisierung*. Durch die Ionisierstäbe werden die Staubpartikel auf der Oberfläche neutralisiert. Die Partikel werden anschließend problemlos von der Oberfläche abgeblasen; eine einwandfreie Lackierung ist möglich [IK16, S. 28ff.], [Lak09, S. 9ff.].

Die Modellierung dieser Zusammenhänge erfolgt mit Hilfe der **Spezifikationstechnik CONSENS**. Die rechnerinterne Repräsentation der Aspekte der Spezifikationstechnik CONSENS erfolgt mit Hilfe des sogenannten SysML4CONSENS-Profiles und unter Verwendung des Werkzeugs *Enterprise Architect* (vgl. Abschnitt 4.5.1.2) [IKD+13]. Bild 5-2 zeigt die erarbeitete Wirkstruktur der Lackieranlage sowie ausgewählte Systemelemente des Betriebsmittels *Entstaubung/Ionisierung*. Hier ist zu sehen, dass die *Ionisierstäbe* in Wechselwirkung mit dem Werkstück stehen, indem sowohl eine mechanische (*Luftdruck*), als auch eine elektrostatische Wirkung (*elektrisches Feld*) ausgeübt wird. Um diese Funktionalität zu realisieren, bedarf es u.a. der Übertragung der elektrischen Leistung (*Energiefluss*) durch ein *Netzteil* zum *Ionisierstab* [IK16, S. 28ff.].

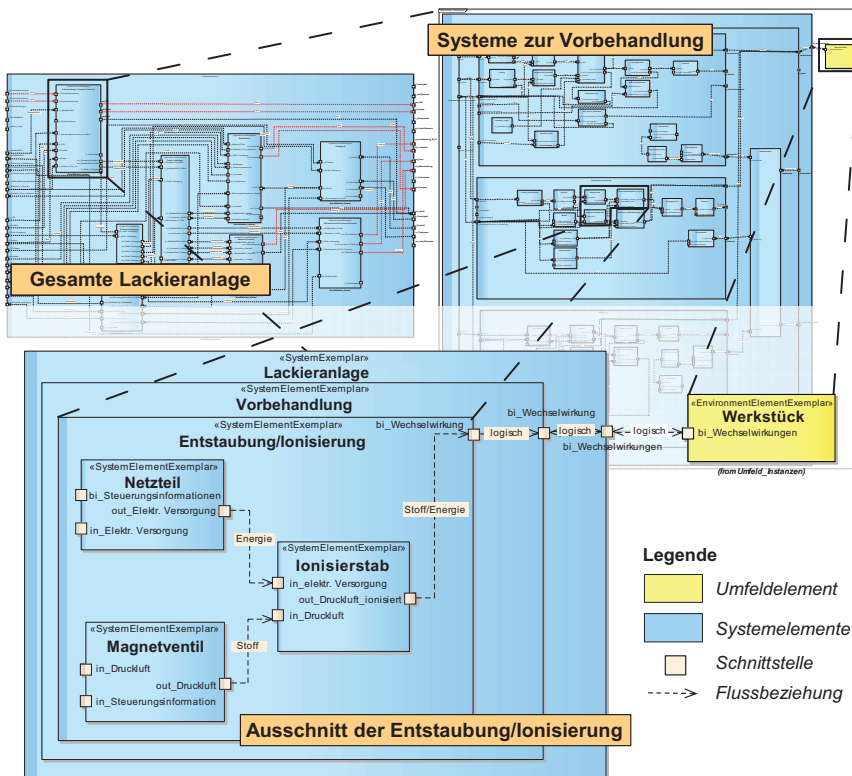


Bild 5-2: Wirkstruktur der Lackieranlage (SysML4CONSENS) [IGB+15, S. 36]

Als **Resultat** entsteht ein *Prozess- und Systemmodell*, das sowohl die Struktur als auch das Verhalten des Systems disziplinübergreifend abbildet. Der Vorteil dieser Vorgehensweise: alle Experten erhalten eine verständliche Sicht auf das System. Einen Überblick über die Ergebnisse aus den Workshops und die aufbereiteten Ergebnisse liefert Bild 5-3.

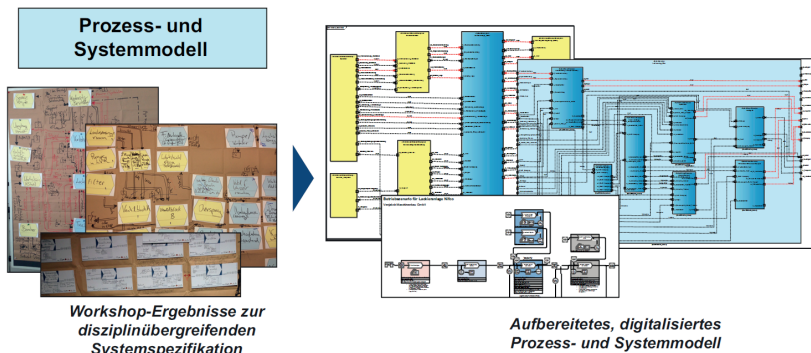


Bild 5-3: Erfassung und Aufbereitung der Ergebnisse aus der Phase 1

5.1.2 Phase 2: Identifikation von Potentialen

In der Phase Identifikation von Potentialen werden auf Basis der modellierten Wirkzusammenhänge zunächst die **Schwachstellen des Systems identifiziert**. Nachfolgend wird geprüft, welche Ursachen die Schwachstellen und Störungen bewirken bzw. welche Folgen das Eintreten der Störung aufweist. Basierend auf diesen Kenntnissen werden Potentiale zur Steigerung der Intelligenz spezifiziert. Hierzu wird auf das Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz zurückgegriffen (vgl. Abschnitt 4.2).

Die Identifikation der Potentiale erfolgt im **Rahmen von Workshops**; insb. mit den kundennahen Abteilungen oder mit dem Kunden selbst. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass Schwachstellen identifiziert werden, die hohe Relevanz hinsichtlich der Betriebsphase des Systems aufweisen. Der Workshop zur Identifikation der Potentiale für das Anwendungsbeispiel erfolgt mit Experten der Service-Abteilung sowie der Entwicklung (Mechanik-Konstruktion und Automatisierung). Zur Unterstützung werden die FMEA-Moderationskarten zur Dokumentation eingesetzt (vgl. Abschnitt 4.5.2). Ein Ausschnitt der Workshop-Ergebnisse ist in Bild 5-4 zu sehen.

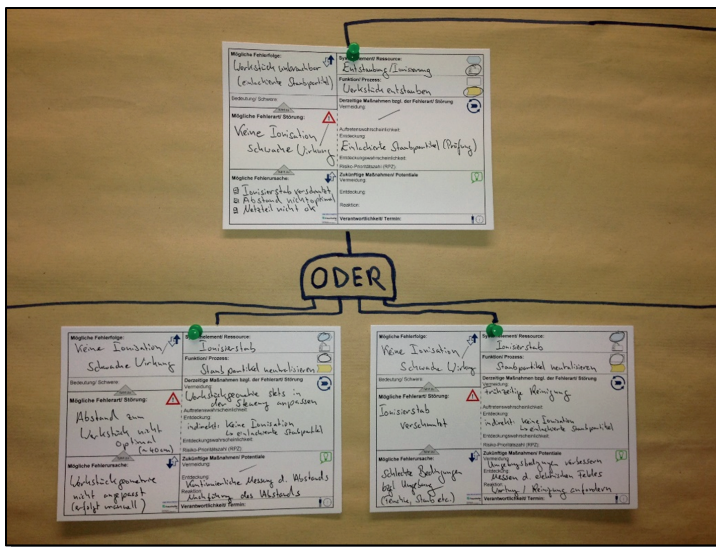


Bild 5-4: Workshop-Ergebnisse mit FMEA-Moderationskarten (Ausschnitt)

Fokus des Workshops ist die Identifikation von Potentialen für das Betriebsmittel *Ionisierung/Entstaubung*. Zunächst wird die Schwachstelle *Keine Ionisation/schwache Wirkung* dokumentiert. Diese Schwachstelle führt dazu, dass Staubpartikel auf dem Werkstück bleiben, einlackiert werden und dadurch das Werkstück unbrauchbar wird. Das Auftreten der Schwachstelle wird erst entdeckt, wenn das Werkstück bei der Endkontrolle manuell geprüft wird. Die Folge: Ausschuss wird in der Zwischenzeit produziert. Daher

sind nachfolgend die Ursachen zu analysieren. So können z.B. folgende Ursachen identifiziert werden: *Ionisierstab verschmutzt*, *Abstand zum Werkstück nicht optimal* und *Netzteil nicht ok*. Die Ursachen können wiederum als Schwachstellen formuliert werden.

Bei der **Analyse der Schwachstelle** *Abstand zum Werkstück nicht optimal* kann dokumentiert werden, dass die Schwachstelle aus aktueller Sicht nur vermieden werden kann, wenn der Benutzer zuvor den richtigen Abstand am System einstellt (Nutzerinteraktion *Parameter an Werkstück anpassen*)⁴⁵. Dieser manuelle Eingriff kann u.U. fehlerhaft sein und das Potential zur Automatisierung besteht. So kann bei den Potentials dokumentiert werden, dass durch eine Messung des Abstandes (z.B. mit Lichtschranken oder Abstandssensoren aus dem Funktionsbereich *Messen*) eine automatisierte Nachführung der Höhe der Ionisierstäbe möglich wäre (Kombination der Funktionsbereiche *Steuern und Regeln* und *Agieren*). Die dokumentierten Ergebnisse werden mit Hilfe des modifizierten Fehlerbaums abgebildet (vgl. Abschnitt 4.5.2). Ein Ausschnitt des modifizierten Fehlerbaums mit ausgewählten Störungen, Potentials und Maßnahmen ist in Bild 5-5 zu sehen.

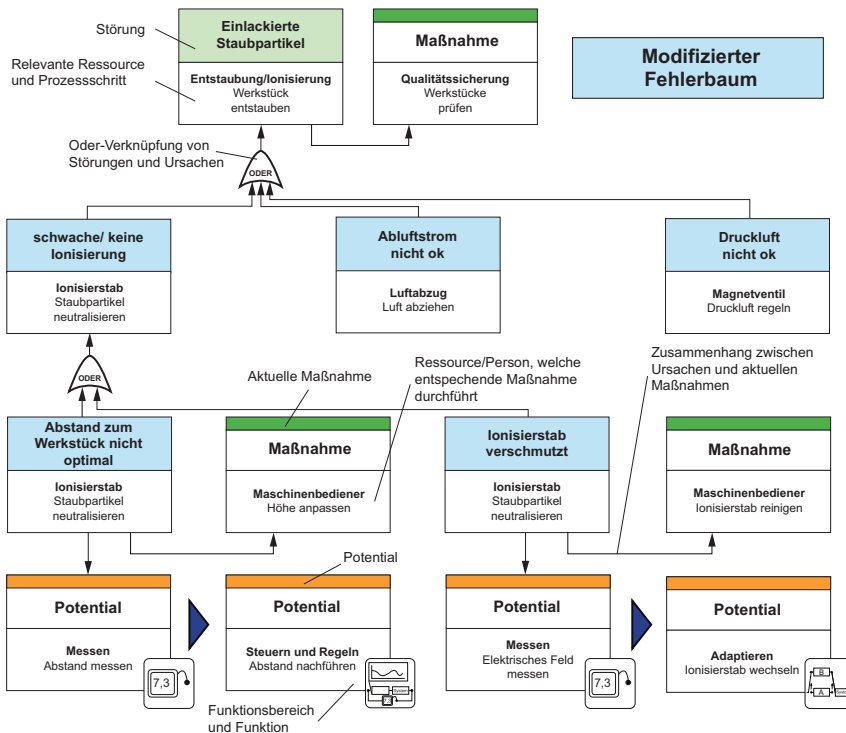


Bild 5-5: Modifizierter Fehlerbaum (Ausschnitt) [IRD+15, S. 57ff.]

⁴⁵ Ein idealer Abstand beträgt laut Produktspezifikation eines Herstellers ca. 40 cm [Hau12-ol, S. 8].

Neben der Abbildung von Potentialen, die auf Basis der Schwachstellen abgeleitet wurden, können darauf aufbauende **Potentiale im Sinne einer Weiterentwicklung** abgebildet werden. So ist im Bild 5-5 zu sehen, dass bei der Schwachstelle *Ionisierstab verschmutzt* zunächst das Potential aus dem Funktionsbereich *Messen* identifiziert werden kann: *Elektrisches Feld messen*. Basierend auf diesen Informationen könnten aber auch Funktionen aus dem Funktionsbereich *Adaptieren* realisiert werden. So könnte u.a. die Funktion *Ionisierstab wechseln* umgesetzt werden (Leistungsstufe *Struktur Anpassung*). So wird auf Basis einer redundanten Auslegung ein zusätzlicher Ionisierstab eingeschaltet, um eine Reinigung erst im nächsten geplanten Wartungsintervall durchzuführen. Die Produktion wird fortgesetzt, abweichende Produktqualität bzw. ein Stillstand wird vermieden.

Als **Resultat** der Identifikation liegt ein *modifizierter Fehlerbaum* (auch Störungsbaum genannt) vor, der einen Überblick über Schwachstellen, Ursachen und Folgen sowie daraus abgeleitete Potentiale gibt. Die Potentiale haben stets Bezug zu den Leistungsstufen aus dem Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme.

5.1.3 Phase 3: Spezifikation von Lösungsideen

Die identifizierten Potentiale werden nachfolgend als Lösungsideen spezifiziert. Dies erfolgt mit Hilfe der **modellbasierten Ideensteckbriefe** (vgl. Abschnitt 4.4.3). Die Steckbriefe bilden die Grundlage für die Bewertung und Auswahl der Potentiale. In der Phase Identifikation von Potentialen wurde z.B. das Potential identifiziert, dass der Abstand zum Werkstück basierend auf einer Messung kontinuierlich erfolgen kann. In Bild 5-6 ist der modellbasierte Ideensteckbrief für dieses Potential dargestellt. Der Steckbrief unterteilt sich in die vier Bereiche *Beschreibung der Idee*, *Motivation der Idee*, *Nutzen* und *kritische Umsetzungspunkte* sowie *Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Idee*. Bei den Weiterentwicklungsmöglichkeiten ist zu sehen, dass basierend auf der stetigen Messung des Abstandes eine autonome Anpassung der Höhe des Ionisierstabs realisiert werden kann. Eine manuelle Anpassung ist vor diesem Hintergrund nicht mehr notwendig: Fehler können vermieden werden.

Als **Resultat** dieser Phase liegen *spezifizierte Lösungsideen* vor, die auf Basis des modellbasierten Ideensteckbriefs aufbereitet wurden. Hierdurch ist eine effiziente Analyse und Bewertung der Ideen in nachfolgenden Schritten sichergestellt.

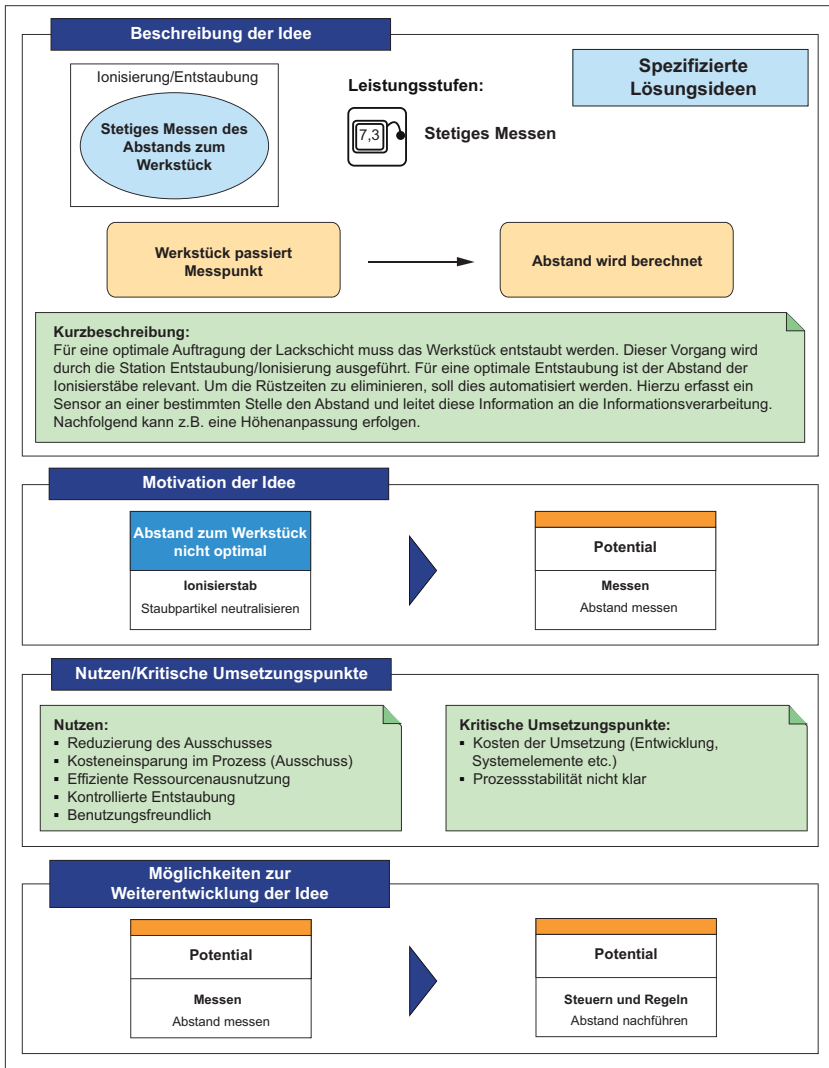


Bild 5-6: Modellbasierter Ideensteckbrief Messung des Abstandes [IGB+15, S. 37]

5.1.4 Phase 4: Bewertung und Auswahl der Lösungsideen

In der Phase Bewertung und Auswahl der Lösungsideen werden Erfolg versprechende Ideen priorisiert, um z.B. nachfolgend eigenständige FuE-Projekte zu initiieren. Für die Bewertung sind zunächst **Bewertungskriterien** für den Aufwand und den Nutzen zu definieren. Im Rahmen des vorliegenden Projekts werden bzgl. des Nutzens folgende Kriterien festgelegt: *Alleinstellungsmerkmal/Begeisterungsfähigkeit, Marktpotential* und *Verbesserung des Kundenprozesses*. Der Aufwand der Umsetzung wird beschrieben

durch: *Kosten zur Prüfung der Serienreife, Kompetenzen zum Realisieren, Kosten für zusätzliche Systemelemente sowie Kosten zur Anpassung des aktuellen Systems*. Aufgrund der Vielfalt der Kriterien wurde eine Gewichtung der Kriterien definiert. Vor diesem Hintergrund erfolgt die Bewertung mit Hilfe einer Nutzwertanalyse [Zan70].

Für die Bewertung der Ideen wird ein **Workshop** durchgeführt, bei dem Experten unterschiedlicher Abteilungen beteiligt sind. Dies ist sinnvoll, da die Bewertung hinsichtlich *Alleinstellungsmerkmal/Begeisterungsfähigkeit* z.B. sehr gut durch die Experten aus dem Vertrieb sowie dem Marketing erfolgen kann. Bei der Bewertung der Kosten von zusätzlichen Systemelementen kann die Entwicklung (Mechanik-Konstruktion und Automatisierung), aber auch der Einkauf unterstützen. Der Workshop wird so geplant, dass zunächst die Ideen vorgestellt werden und nachfolgend jede einzelne Person die Idee vollständig bewertet. Nach der Bewertung aller Ideen werden die Ergebnisse der Einzelpersonen diskutiert. Ziel ist es, eine einheitliche Bewertung der Ideen zu erhalten. Im Rahmen der Diskussion werden weitere Nutzen- und kritische Umsetzungsaspekte stets mit protokolliert. Das Ergebnis des Workshops ist eine **Nutzwertmatrix** hinsichtlich Nutzen sowie Aufwand. Die resultierende Nutzwertmatrix ist in Bild 5-7 dargestellt.

Bewertungskriterien (Zielsystem)	Gewichtung [in %]	Lösungsideen					
		#1 Regelung der Höhe		#2 Messen des elektrischen Feldes		#3 Strukturanpassung der Ionisierstäbe	
		Bew.	Wert	Bew.	Wert	Bew.	Wert
Nutzen	(100)						
1. Alleinstellungsmerkmal/ Begeisterungsfähigkeit	30	7	2,1	7	2,1	10	3,0
2. Marktpotential	40	8	3,2	5	2,0	7	2,8
3. Prozessverbesserung	30	7	2,1	2	0,6	6	1,8
Gesamtwert Nutzen			7,4		4,7		7,6
Aufwand	(100)						
1. Prüfung Serienreife	15	4	0,6	4	0,6	8	1,2
2. Kompetenzen	15	2	0,3	4	0,6	4	0,6
3. Kosten Systemelemente	20	3	0,6	6	1,2	8	1,6
4. Kosten Anpassung	50	2	1,0	4	2,0	7	3,5
Gesamtwert Aufwand			2,5		4,4		6,9

Bild 5-7: Nutzwertmatrix zur Bewertung der Ideen (in Anlehnung an [GP14, S. 418])

Beim Nutzen wird das *Messen des elektrischen Feldes* (#2) mit relativ geringem Nutzen bewertet, da eine Prozessverbesserung wiederum manuell erfolgen muss. Lediglich die Information, dass eine Reinigung erfolgen muss, könnte vom System kommen. Eine *Strukturanpassung der Ionisierstäbe* (#3) (z.B. bei hoher Verschmutzung) wird mit relativ hohem Nutzen bewertet. Dies erfolgte u.a. weil eine solche Lösung ein Alleinstellungsmerkmal darstellen würde. Der Aufwand der Umsetzung dieser Lösung wird jedoch als hoch erachtet. Dies ist darin begründet, dass zusätzliche Sensorik integriert werden müsste und ein weiterer Ionisierstab benötigt wird (aufgrund redundanter Auslegung). Der Aufwand der Umsetzung bei der *Regelung der Höhe des Ionisierstabes* (#1) wird als gering erachtet. Dies liegt darin begründet, da z.B. eine Anpassung der Höhe mit Hilfe

der bereits verbauten Antriebsmotoren erfolgen kann. Lediglich die Abstandssensoren müssten neu in das System integriert werden. Der Preis für diese wird als gering bewertet.

Die Ergebnisse der Analyse werden zur besseren Visualisierung in einem **Portfolio** dargestellt. Im Rahmen der Analyse wurden für die Entstaubung/Ionisierung neun Potentiale identifiziert. Auf Basis der Portfolio-Darstellung kann nachfolgend eine Klassifikation der Ideen erfolgen. Hierzu werden folgende drei Klassifikationen verwendet: *Hohes Potential*, *Mittleres Potential* und *Niedriges Potential*. Das resultierende Portfolio ist in Bild 5-8 dargestellt. Ziel der Klassifikation ist es, die identifizierten Potentiale auf die drei Klassen zu verteilen, um eine Auswahl der Ideen zu unterstützen.

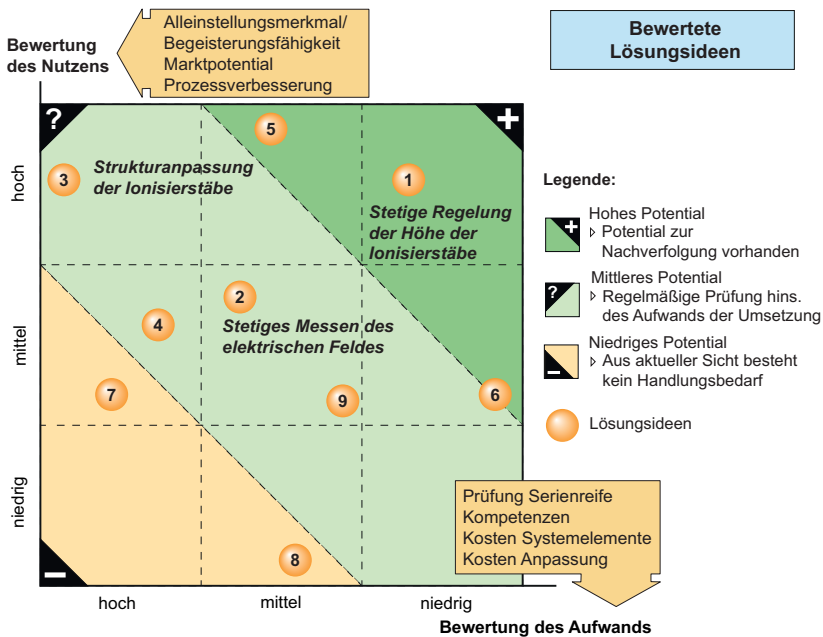


Bild 5-8: Portfolio zur Visualisierung der Ergebnisse aus der Nutzwertanalyse [IGB+15, S. 37] in Anlehnung an [GP14, S. 130]

Nach der Klassifikation der Ideen in die drei oben genannten Klassen kann zudem eine **Priorisierung der Erfolg versprechenden Ideen** durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 4.5.4). Dies kann ebenfalls im Rahmen eines Workshops erfolgen, bei dem die Teilnehmer jeweils zwei Punkte zur Priorisierung von Ideen erhalten sowie prägnante Argumente zur Auswahl dieser zwei Ideen äußern. Dies kann in Ergänzung auch mit dem Kunden durchgeführt werden, um seine Priorisierung zu erfahren. Hierdurch wird die Grundlage geschaffen, der Geschäftsführung die Ergebnisse der Analyse vorzustellen.

Als **Resultat** liegen *bewertete Lösungsideen* vor, mit denen die Intelligenz bestehender mechatronischer Systeme gesteigert werden kann. Diese bilden die Basis, um zukünftig Entwicklungsprojekte für die Realisierung zu initiieren.

5.2 Bewertung der Systematik anhand der Anforderungen

Im Rahmen dieses Abschnitts findet abschließend die Bewertung der erarbeiteten *Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau* anhand der Anforderungen aus Abschnitt 2.7 statt. Einen Überblick über die Anforderungen und ihren Bezug zur Systematik zeigt Bild 5-9.

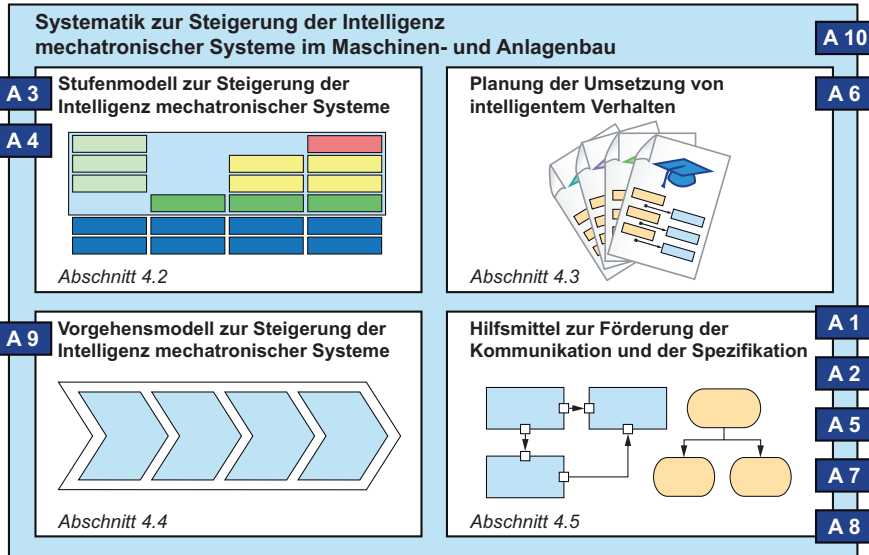


Bild 5-9: Erfüllung der Anforderungen durch die Systematik

A1: Identifikation von Potentialen

Mit Hilfe der erarbeiteten *FMEA-Moderationskarten* und der *modifizierten Fehlerbäume* können Schwachstellen des Systems, Folgen, Ursachen sowie daraus resultierende Potentiale zur Weiterentwicklung des mechatronischen Systems identifiziert und abgebildet werden (vgl. Abschnitt 4.5.2). Die disziplinübergreifende Abbildung in Form der *modifizierten Fehlerbäume* ermöglicht zudem die Berücksichtigung verschiedener unternehmensinterner Abteilungen sowie des Kunden.

A2: Berücksichtigung des Kundenbedarfs

Die Systematik adressiert die Einbindung des Kunden in mehreren Phasen des Vorgehensmodells der Systematik, um stets den Bedarf des Kunden zu berücksichtigen. So kann sich der Kunde z.B. bei der Identifikation von Schwachstellen und Potentialen zur Steigerung der Intelligenz beteiligen (auf Basis der *Hilfsmittel zur Förderung der Kommunikation und Spezifikation*; vgl. Abschnitt 4.5.2). Falls die Rahmenbedingungen eine direkte Einbindung des Kunden nicht erlauben, kann der Bedarf des Kunden indirekt berücksichtigt werden (z.B. über das Wissen aus dem Vertrieb sowie dem Service).

A3: Lösungen für intelligentes Verhalten

Das *Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme* zeigt auf, welche Funktionsbereiche und Leistungsstufen zur Weiterentwicklung des Systems genutzt werden können (vgl. Abschnitt 4.2). Hierzu wurden Funktionsbereiche zur Sensorik (*Messen*), Aktorik (*Agieren*) sowie der Informationsverarbeitung erarbeitet. Für die Informationsverarbeitung existieren darüber hinaus noch die Funktionsbereiche *Steuern und Regeln*, *Identifizieren*, *Adaptieren*, *Optimieren*, *Wissen speichern*, *Kommunizieren–Benutzer* sowie *Kommunizieren–Systeme*. Die Funktionsbereiche und Leistungsstufen zeigen Lösungen auf, mit denen das System intelligenter realisiert werden kann.

A4: Schrittweise Umsetzung der Intelligenz

Die Suche nach Lösungsmöglichkeiten soll bedarfsgerecht erfolgen. Vor diesem Hintergrund zeigt das *Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme* verschiedene Leistungsstufen in den jeweiligen Funktionsbereichen auf, die in Abhängigkeit der Aufgabe auszuwählen sind. So ist es für den jeweiligen Anwendungsfall z.B. schon ausreichend, wenn eine *stetige Regelung* realisiert wird, wohingegen eine *optimale Regelung* eine Weiterentwicklung dieser darstellen kann (vgl. Abschnitt 4.2). Die bedarfsgerechte Auswahl wird zudem durch die systematische Identifikation des Modifikationsbedarfs unterstützt (vgl. Abschnitt 4.5.2).

A5: Bewertung der Lösungsideen

Die Systematik soll den Entwickler bei der Erarbeitung einer Entscheidungsgrundlage hinsichtlich auszuwählender Lösungsideen unterstützen. Vor diesem Hintergrund wurden Hilfsmittel erarbeitet, die eine effiziente Bewertung von Lösungsideen ermöglichen. Hierzu zählen z.B. auch die *modellbasierten Ideensteckbriefe* (vgl. Abschnitt 4.5.3), um Ideen verständlich aufzubereiten sowie die *Hilfsmittel zur Unterstützung der Bewertung und Auswahl von Lösungsideen* (z.B. *Portfolio zur Visualisierung von Bewertungsergebnissen*; vgl. Abschnitt 4.5.4). Hierdurch können verschiedene Experten im Unternehmen (z.B. aus dem Service oder Marketing) aber auch der Kunde Lösungsideen bewerten.

A6: Planung der Umsetzung

Auf Basis der erarbeiteten *Methoden zur Planung der Umsetzung von intelligentem Verhalten* ist eine Abschätzung der erforderlichen Kompetenzen und durchzuführenden Schritte möglich. Die Methoden adressieren den Einsatz mathematischer Optimierungsverfahren in technischen Systemen, den Entwurf von selbstoptimierenden Regelungen auf Basis von Prozessmodellen, den Einsatz von maschinellen Lernverfahren sowie das Vorgehen zur Steigerung der Verlässlichkeit (vgl. Abschnitt 4.3).

A7: Bedarfsgerechte Auswahl der Lösungsideen

Die erarbeiteten *Hilfsmittel zur Unterstützung der Bewertung und Auswahl von Lösungsideen* unterstützen eine tiefgehende Analyse der spezifizierten Lösungsideen. Durch die Workshop-Tauglichkeit der Hilfsmittel wird zudem ein stetiger Austausch gefördert (vgl.

Abschnitt 4.5.4). Mit Hilfe der Visualisierung der Ergebnisse in einem Portfolio sowie der Priorisierung Erfolg versprechender Lösungsideen durch die eingesetzten Methoden, wird eine Grundlage zur Vorstellung der Ergebnisse geschaffen (z.B. an die Geschäftsführung). Ferner kann bei der Auswahl der Kunde eingebunden werden, um eine bessere Marktsicht hinsichtlich der spezifizierten Lösungsideen zu erhalten.

A8: Interdisziplinarität/Wissensaustausch

Die Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme kann nicht ausschließlich aus der Perspektive einer Fachdisziplin bzw. Abteilung im Unternehmen erfolgen. Vor diesem Hintergrund unterstützt die erarbeitete Systematik die interdisziplinäre Zusammenarbeit in allen Phasen und mit entsprechenden *Hilfsmitteln zur Förderung der Kommunikation und Spezifikation* (vgl. Abschnitte 4.5 und 4.4). So werden disziplinübergreifende Modelle eingesetzt, um das System zu spezifizieren. Darüber hinaus sind z.B. auch die Hilfsmittel zur Identifikation von Potentialen für den Einsatz in Workshops ausgelegt, so dass ein verbesserter Austausch von Wissen und Informationen gefördert wird.

A9: Systematische Vorgehensweise

Die erarbeitete Systematik stellt ein *Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau* zur Verfügung, welches sowohl die Bedarfsanalyse zur Modifikation des technischen Systems als auch die Spezifikation von intelligenten Lösungsideen unterstützt. Vor diesem Hintergrund stellt das Vorgehensmodell u.a. *Hilfsmittel zur Identifikation von Potentialen, Spezifikation von Lösungsideen* sowie *Bewertung und Auswahl von Lösungsideen* zur Verfügung (vgl. Abschnitt 4.4).

A10: Eignung für den Maschinen- und Anlagenbau

Die erarbeitete Systematik hat den Anspruch die Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau bei der Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme zu unterstützen und somit eine Optimierung des Produktwerts zu realisieren (vgl. Abschnitt 2.2.2). Dies unterstützt die Systematik insbesondere durch das *Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme*. Die erarbeiteten Funktionsbereiche und Leistungsstufen des *Stufenmodells* liefern zahlreiche Möglichkeiten für zukünftige weiterentwickelte Systeme. Darüber hinaus wurden alle weiteren Bestandteile der Systematik speziell für den Einsatz im Maschinen- und Anlagenbau ausgerichtet. Dies gilt insbesondere für die *Hilfsmittel zur Förderung der Kommunikation und Spezifikation* (vgl. Abschnitt 4.5). Diese begegnen den Herausforderungen hinsichtlich des Wissensaustauschs und -transfers von mittelständischen Unternehmen in besonderem Maße (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Die entwickelte *Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau* erfüllt somit die gestellten Anforderungen in vollem Umfang. Sie ist geeignet, um Potentiale zur Steigerung der Intelligenz zu identifizieren, Lösungsideen zu spezifizieren sowie Erfolg versprechende Lösungsideen zu bewerten und auszuwählen. Sie wurde mit Erfolg am Anwendungsbeispiel „Lackieranlage“ (Fokus: Entstaubung/Ionisierung) validiert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der absehbare Trend im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik ermöglicht zunehmend die Entwicklung von technischen Systemen mit inhärenter Teilintelligenz. Diese Systeme können als Intelligente Technische Systeme bezeichnet werden [DJG12, S. 24]. Intelligente Technische Systeme können durch vier zentrale Eigenschaften charakterisiert werden: Sie sind adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich [Gau11, S. 23], [DJG12, S. 24]. **Kapitel 1** zeigt: Obwohl die Integration von intelligenten Funktionen hohes Potential aufweist, werden z.B. die Ansätze aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz im Maschinen- und Anlagenbau kaum berücksichtigt, um die Leistungsfähigkeit mechatronischer Systeme zu steigern [Kre15, S. 47]. Die systematische Weiterentwicklung von Systemen basiert im Wesentlichen auf drei Aufgaben: 1.) Identifikation des Bedarfs zur Modifikation bestehender Systeme, 2.) Spezifikation von intelligenten Lösungsideen sowie 3.) Bewertung und Auswahl Erfolg versprechender Lösungsideen. Darüber hinaus gilt es den Kunden frühzeitig und bedarfsgerecht in diese Aufgaben einzubinden, um den Markterfolg abzusichern. Diese Aufgaben stellen für den Maschinen- und Anlagenbau eine **Herausforderung** dar. Vor diesem Hintergrund bedarf es einer Systematik, die Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus bei diesen Aufgaben adäquat unterstützt.

In **Kapitel 2** wurden drei **Handlungsfelder** zur Steigerung der Intelligenz in mechatronischen Systemen im Maschinen- und Anlagenbau herausgearbeitet. So bedarf es an Möglichkeiten, aktuelle Produktgenerationen systematisch auf Schwachstellen und Potentiale zur Weiterentwicklung zu analysieren (1). Auf Basis des identifizierten Modifikationsbedarfs sind nachfolgend die Lösungen zur Verbesserung des Systems zu spezifizieren. Hierzu gilt es insbesondere die Lösungen aus dem Kontext der Selbstoptimierung zu adressieren (2). Die spezifizierten intelligenten Lösungsideen geben einen Überblick über die Optionen zur Weiterentwicklung bestehender Systeme. Darüber hinaus bedarf es einer systematischen Bewertung und Auswahl intelligenter Lösungsideen (3). Ferner gilt es, mittelständisch-geprägte Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus durch geeignete Hilfsmittel beim Wissensaustausch und -transfer zu unterstützen. Zudem ist der Kunde bedarfsgerecht in das Vorgehen zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau einzubinden. Die Analyse des Stands der Technik in **Kapitel 3** verdeutlicht, dass keiner der untersuchten Ansätze alle Anforderungen erfüllt, ausgewählte Ansätze und Methoden können jedoch einen Beitrag leisten.

Vor diesem Hintergrund wurde in **Kapitel 4** eine *Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau* vorgestellt. Die Systematik greift einige Überlegungen und untersuchte Ansätze aus dem Stand der Technik auf, überträgt sie auf die Gegebenheiten der dargestellten Handlungsfelder, erweitert und ergänzt sie um neu entwickelte Hilfsmittel. Die resultierende Systematik setzt sich aus **vier Bestandteilen** zusammen:

- Ein **Stufenmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme**, das die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Informationsverarbeitung sowie der Sensorik und Aktorik darstellt.
- Methoden zur **Planung der Umsetzung von intelligentem Verhalten**, die eine frühzeitige Abschätzung des Umsetzungsaufwandes sowie der benötigten Kompetenzen aufzeigen.
- Ein **Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme**, das die Entwickler in die Lage versetzt, Lösungsideen zur Weiterentwicklung des mechatronischen Systems zu finden.
- Hilfsmittel zur **Förderung der Kommunikation und Spezifikation**, die unter Einbindung des Kunden bei der Weiterentwicklung des bestehenden mechatronischen Systems unterstützen. Zudem unterstützen sie die Kommunikation aller beteiligten Fachdisziplinen in den Schritten des Vorgehensmodells.

Das **Stufenmodell** umfasst die Funktionsbereiche der Sensorik (*Messen*), der Aktorik (*Agieren*) sowie der Informationsverarbeitung. Hinsichtlich der Informationsverarbeitung existieren die Funktionsbereiche *Steuern und Regeln*, *Identifizieren* und *Adaptieren* sowie *Optimieren*. Begleitend werden aber auch die Wissensspeicherung (*Wissen speichern*), die Kommunikation mit anderen Systemen (*Kommunizieren–Systeme*) und dem Benutzer (*Kommunizieren–Benutzer*) analysiert.

Darüber hinaus wurden Methoden vorgestellt, mit denen eine **Planung der Umsetzung** von intelligentem Systemverhalten unterstützt werden kann. Die Methoden adressieren den Einsatz mathematischer Optimierungsverfahren in technischen Systemen, den Entwurf von selbstoptimierenden Regelungen auf Basis von Prozessmodellen, den Einsatz von maschinellen Lernverfahren sowie die Analyse der Verlässlichkeit.

Das **Vorgehensmodell zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme** unterstützt die beteiligten Personen bei der Analyse des bestehenden Systems sowie der Identifikation, Spezifikation sowie Auswahl und Bewertung von intelligenten Lösungsideen. Das Vorgehensmodell wird idealtypisch im ersten Zyklus des Referenzmodells der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen eingesetzt.

Bei dem Vorgehensmodell ist hervorzuheben, dass alle Prozesse eine Kooperation und Kommunikation der beteiligten Mitarbeiter des Unternehmens sowie Kunden ermöglichen sollen. Vor diesem Hintergrund unterstützen die **Hilfsmittel zur Förderung der Kommunikation und Spezifikation** den Wissensaustausch und -transfer im interdisziplinären Projektteam.

Als **Resultat** der Anwendung liegen Ideen für zukünftige mechatronische System mit intelligenten Systemfunktionen vor. Die Funktionen genügen den Anforderungen der

Kunden und berücksichtigen die internen Kompetenzen des Unternehmens zum Realisieren dieser. Die Ideen bilden die Grundlage für die weiteren Schritte im Rahmen der Produktentstehung (Produktkonzipierung etc.).

Die **Praxistauglichkeit** der Systematik wurde anhand eines Validierungsbeispiels gezeigt. Das Validierungsbeispiel war eine Lackieranlage bzw. ausgewählte Betriebsmittel der Anlage. Im Rahmen der Validierung wurde das Vorgehensmodell der Systematik vollständig durchlaufen und die erarbeiteten Hilfsmittel der Systematik verwendet. Die Validierung zeigt, dass die *Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau* die Anforderungen in vollem Umfang erfüllt.

Für die Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme besteht **weiterer Forschungsbedarf**. Hierbei lassen sich kurz-, mittel- und langfristige Herausforderungen unterscheiden. **Kurzfristig** kann eine durchgängige Werkzeugunterstützung über alle Phasen des Vorgehensmodells zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau erarbeitet werden. Das Software-Werkzeug *Enterprise Architect* (mit dem SysML4CONSENS-Profil) ermöglicht das Modellieren von zahlreichen Wirkzusammenhängen, jedoch fehlt z.B. eine Schnittstelle zum Software-Werkzeug *OPM* zur Abbildung von Prozessen. Ergänzende Profile könnten hierbei unterstützen. Zudem weist die Systematik das Potential auf, auch in anderen Branchen eine Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme zu fördern. Infolgedessen gilt es die Systematik an weiteren Beispielen zu evaluieren und ggf. anzupassen.

Mittelfristig bedarf es spezifischer Vorgehensmodelle, die die einzelnen Leistungsstufen in den Funktionsbereichen des Stufenmodells zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme adressieren (z.B. Vorgehensmodell für die Umsetzung einer Optimalen Steuerung). Die erarbeiteten Vorgehensmodelle zur Planung der Umsetzung stellen hierzu einen ersten generischen Entwurf dar. Hierdurch kann eine verbesserte Planung der Umsetzung von Leistungsstufen realisiert werden. Darüber hinaus ist es erforderlich, weitere Funktionsbereiche zur Steigerung der Intelligenz zu erschließen. Die Entwicklungen im Bereich von Industrie 4.0 [Pa13] sowie Cyber-Physical Systems [GB12] erfordern z.B. eine differenzierte Betrachtung von Möglichkeiten Dienste zu realisieren und Daten in vernetzten technischen Systemen auszuwerten. Vor diesem Hintergrund bedarf es u.a. einer Referenzarchitektur, die die wesentlichen Handlungsfelder zur Realisierung von Cyber-Physical Systems aufzeigt und entsprechenden Funktionsbereiche und Leistungsstufen zur Verbesserung umfasst. Hierzu sind wiederum entsprechende Hilfsmittel und Vorgehensmodelle zu entwickeln.

Langfristig werden zudem weitere Ansätze der Grundlagenforschung aus dem Bereich *Intelligenz in technischen Systemen* für die mechatronischen Systeme im Maschinen- und Anlagenbau von Bedeutung sein. Zu diesen Ansätzen zählen u.a. Resilienz in technischen Systemen [Tho14] oder künstliche Immunsysteme [Bye13, S. 18ff.], [SD16]. Infolgedessen bedarf es einer Anpassung und Weiterentwicklung der vorgestellten Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau.

7 Abkürzungsverzeichnis

A	Anforderung
AG	Aktiengesellschaft
AMS	Autonome Mechatronische Systeme
ARIS	Architektur Integrativer Informationssysteme
Bew.	Bewertung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BPMN	Business Process Model and Notation
BRIDGE	Projekt „Building Radio Frequency Identification Solutions for the Global Environment“
bspw.	Beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer-aided Design
cm	Zentimeter
CoTeSys	Exzellenzcluster „Cognition for Technical Systems“
CPS	Cyber-Physical System
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLC	Doppelschichtkondensator (Double Layer Capacitor)
DMOC	Discrete Mechanics and Optimal Control
DRC	Design Rule Check
Ed.	Editor
ERC	Electrical Rule Check
et al.	et alii
etc.	et cetera
EU	Europäische Union

Eurostat	statistisches Amt der Europäischen Union
EV	Erweiterte Verlässlichkeit
f.	folgende
Fa.	Firma
ff.	fortfolgende
FMEA	Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (Failure Mode and Effect Analysis)
FTA	Fehlerbaumanalyse (Fault-Tree-Analysis)
FuE	Forschung und Entwicklung
Gew.	Gewichtung
ggf.	gegebenenfalls
GPS	Global Positioning System
HDL	Hardware Description Language
hins.	hinsichtlich
HoQ	House of Quality
Hrsg.	Herausgeber
Hz	Hertz
i.d.R.	in der Regel
ID	Identifikator
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IMC	Internal Model Control
insb.	insbesondere
IoT	Internet of Things
IR	Intelligente Regelungen
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
it's OWL	BMBF-Spitzencluster Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe
ITS	Intelligente Technische Systeme
IV	Informationsverarbeitung

KDD	Knowledge Discovery in Databases
LQ	linear-quadratisch
m	Meter
max.	maximal
MBSE	Model Based Systems Engineering
MFM	Mechatronische Funktionsmodule
min	Minute
min.	minimal
ML	Maschinelles Lernen
MO	Mathematische Optimierung
MPC	Model Predictive Control
NiMH	Nickel-Metallhydrid
OCM	Operator-Controller-Modul
OMEGA	Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse
OPM	OMEGA Process Modeller®
OSI	Open Systems Interconnection (als OSI-Schichtenmodell)
PAN	Personal Area Network
Pot.	Potentielle
QFD	Quality Function Deployment
RFID	Radio Frequency Identification
RFLP	Requirement, Functional, Logic, Physical
RPZ	Risikoprioritätszahl
S.	Seite
SFB 614	Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende System des Maschinenbaus“ der Universität Paderborn
sog.	sogenannte
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerungen
SV	Systemverhalten
SysML	Systems Modeling Language

T	Zeitraum als Variable
TRIZ	Theorie des erfinderischen Problemlösens (aus dem Russischen)
u.a.	unter anderem
u.U.	unter Umständen
UML	Unified Modeling Language
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
vgl.	vergleiche
VMS	Vernetzte Mechatronische Systeme
WAN	Wide Area Network
XT	Extreme Tailoring
z.B.	zum Beispiel

8 Literaturverzeichnis

- [aca09] ACATECH - DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN (Hrsg.): Intelligente Objekte – klein, vernetzt, sensitiv – Eine neue Technologie verändert die Gesellschaft und fordert zur Gestaltung heraus. Springer, Nr. 5, Berlin, Heidelberg, 2009
- [aca11] ACATECH - DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN (Hrsg.): Cyber-Physical Systems – Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion. Springer, Nr. 11, Berlin, Heidelberg, 2011
- [Ada12] ADAM, T.: Die Bewertung von Innovationsideen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2012
- [ADG+09] ADELT, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTÜHR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZE, B.; VÖCKING, H.; WITTOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSHCHYKOV, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definition, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009
- [Alt12] ALT, O.: Modell-basierte Systementwicklung mit SysML. Carl Hanser, 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
- [APW+15] ANDERL, R.; PICARD, A.; WANG, Y.; FLEISCHER, J.; DOSCH, S.; KLEE, B.; BAUER, J.: Leitfaden Industrie 4.0 – Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. VDMA Verlag, Frankfurt a. M., 2015
- [ÅW08] ÅSTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B.: Adaptive Control. 2. Auflage, Dover Publications, Mineola, 2008
- [Aue14-ol] AUER, J.: Neue Wachstumschancen für den deutschen Maschinenbau: Technologieführerschaft & Auslandsinvestitionen. Unter: https://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD000000000344155/Neue+Wachstumschancen+%C3%BCr+den+deutschen+Maschinenb.PDF, 13.10.2014
- [ALR+04] AVIZIENIS, A.; LAPRIE, J.-C.; RANDELL, B.; LANDWEHR, C.: Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, Vol. 1, No. 1, January-March, 2004
- [BBR16a] BACCIOTTI, D.; BORGIANNI, Y.; ROTINI, F.: A CAD tool to support idea generation in the product planning phase. Computer-Aided Design and Applications, 13(4), 2016, S. 1–13
- [BBR16b] BACCIOTTI, D.; BORGIANNI, Y.; ROTINI, F.: An original design approach for stimulating the ideation of new product features. Computers in Industry, 75, 2016, S. 80–100
- [BEP+16] BACKHAUS, K.; ERICHSON, B.; PLINKE, W.; WEIBER, R.: Multivariate Analysemethoden. 14. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 2016
- [BSH+14] BAUER, W.; SCHLUND, S.; HÄMMERLE, M.; STRÖLIN, T.: Industrie 4.0 - Eine Revolution der Arbeitsgestaltung – Wie Automatisierung und Digitalisierung unsere Produktion verändern werden. Ingenics AG, Fraunhofer IAO, 2014
- [BC06] BEEKMANN, F.; CHAMONI, P.: Verfahren des Data Mining. In: Chamoni, P.; Gluchowski, P. (Hrsg.): Analytische Informationssysteme. Springer, Berlin, 2006
- [Ben05] BENDER, K. (Hrsg.): Embedded Systems – Qualitätsorientierte Entwicklung. Springer, Berlin, 2005

- [BGJ+09] BERTSCHE, B.; GÖHNER, P.; JENSEN, U.; SCHINKÖTTE, W.; WUNDERLICH, H.-J.: Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme – Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen. Springer, Berlin, 2009
- [BL04] BERTSCHE, B.; LECHNER, G.: Zuverlässigkeit in Maschinenbau und Fahrzeugtechnik – Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten. 3. Auflage, Springer, Berlin, 2004
- [Bia06] BIANCHI, M. A.: Adaptive modellbasierte prädiktive Regelung einer Kleinwärmepumpenanlage. Dissertation, Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH Zürich, Zürich, 2006
- [Bic13-ol] BICK, W.: Was der Maschinenbau in Sachen Mechatronik lernen kann – Warum der Maschinenbau hinterherhinkt. Unter: <http://www.harvardbusinessmanager.de/blogs/was-der-maschinenbau-in-sachen-mechatronik-lernen-kann-a-916589.html>, 16.08.2013
- [Bir97] BIROLINI, A.: Quality and Reliability of Technical Systems – Theory, Practice, Management. Second edition, Springer, Berlin, 1997
- [BSK+06] BÖCKER, J.; SCHULZ, B.; KNOKE, T.; FRÖHLEKE, N.: Self-Optimization as a Framework for Advances Control Systems. Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics, 2006, S. 4672–4676
- [BBS11] BÖHRINGER, J.; BÜHLER, P.; SCHLAICH, P.: Kompendium der Mediengestaltung. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011
- [BW07] BÖSE, F.; WINDT, K.: Catalogue of Criteria for Autonomous Control in Logistics. In: Hülsmann, M.; Windt, K. (Hrsg.): Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics. Springer, Berlin, 2007
- [BH15] BOTTHOF, A.; HARTMANN, E. (Hrsg.): Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Springer Vieweg, Berlin, 2015
- [Bra02] BRANDENBURG, F.: Methodik zur Planung technologischer Produktinnovationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen, Shaker, Band 7, Aachen, 2002
- [Bre12] BRETSCHNEIDER, U.: Die Ideen-Community zur Integration von Kunden in den Innovationsprozess. Dissertation, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, TU München, Springer Gabler, München, 2012
- [Bro97] BROCKHOFF, K.: Wenn der Kunde stört – Differenzierungsnotwendigkeit bei der Einbeziehung von Kunden in die Produktentwicklung. In: Bruhn, M.; Steffenhagen, D.; Meffert, H. (Hrsg.): Marktorientierte Unternehmensführung. Gabler, Wiesbaden, 1997
- [BGR+07] BULLINGER, H.-J.; GAUSEMEIER, J.; REICHWALD, R.; SCHREYÖGG, G.; SPATH, D.; WARSCHAT, J.: Impulse für ein Forschungsprogramm „Treiber und Mechanismen von Innovationsprozessen“ zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des High Tech Standortes Deutschland. Fraunhofer IAO, 2007
- [BS06] BULLINGER, H.-J.; SCHEER, A.-W.: Service Engineering – Entwicklung und Gestaltung innovativer Dienstleistungen. Springer, Berlin, 2006
- [BSW+09] BULLINGER, H.-J.; SPATH, D.; WARNECKE, H.-J.; WESTKÄMPER, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung. 3. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009
- [Bye13] BYE, R.: Group-based IDS Collaboration Framework - A Case Study of the Artificial Immune System. Dissertation, Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik, Technische Universität Berlin, D83, Berlin, 2013
- [Com94] COMERFORD, R.: Mecha ... what? IEEE Spectrum, 31 (8), 1994, S. 46–49
- [CHW+06] CUMMING, D. R.; HAMMOND, P. A.; WANG, L.; COOPER, J.; JOHANNESSEN, E. A.: Wireless Sensor Microsystem Design: A Practical Perspective. In: Yang, G.-Z. (Hrsg.): Body Sensor Networks. Springer, London, 2006

- [Czi15] CZICHOS, H.: Mechatronik – Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme. 3. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2015
- [DKK+11] DAMERAU, T.; KAUFMANN, U.; KNOTHE, T.; STARK, R.; ULBRICH, A.: Modellbasierte Prozess- und Systemgestaltung für die Innovationsbeschleunigung. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), 6/2011, 2011, S. 449–453
- [Dei14] DEINDL, M.: Gestaltung des Einsatzes von intelligenten Objekten in Produktion und Logistik. Dissertation, Forschungseinrichtung für Rationalisierung, RWTH Aachen, Apprimus, Band 118, Aachen, 2014
- [DHK+09] DELL'AERE, A.; HIRSCH, M.; KLÖPPER, B.; KOESTER, M.; KRUPP, A.; KRÜGER, M.; MÜLLER, T.; OBERTHÜR, S.; POOK, S.; PRIESTERJAHN, C.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; TICHY, M.; VÖCKING, H.; ZIMMER, D.: Verlässlichkeit selbstoptimierender Systeme – Potenziale nutzen und Risiken vermeiden. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 235, Paderborn, 2009
- [DEF+14] DELLNITZ, M.; ECKSTEIN, J.; FLABKAMP, K.; FRIEDEL, P.; HORENKAMP, C.; KÖHLER, U.; OBER-BLÖBAUM, S.; PEITZ, S.; TIEMEYER, S.: Development of an Intelligent Cruise Control Using Optimal Control Methods. Procedia Technology, 2014, S. 285–294
- [DFH+14] DELLNITZ, M.; FLABKAMP, K.; HARTMANN, P.; OBER-BLÖBAUM, S.: Self-optimization in Intelligent Technical Systems. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Hrsg.): Design Methodology for Intelligent Technical Systems. Springer, Berlin, 2014
- [DSH05] DELLNITZ, M.; SCHÜTZE, O.; HESTERMEYER, T.: Covering Pareto Sets by Multilevel Subdivision Techniques. Journal of Optimization Theory and Applications, 2005, S. 113–136
- [Dep06] DEPPE, M.: Verteilte Online-Mehrziel-Parameter-Optimierung in mechatronischen Systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Paderborn, 2006
- [DWB09] DEUSE, J.; WISCHNIEWSKI, S.; BIRKMANN, S.: Knowledgebase für die kontinuierliche Innovationsarbeit im Technischen Kundendienst. In: Herrmann, T.A.; Kleinbeck, U.; Ritterskamp, C. (Hrsg.): Innovationen an der Schnittstelle zwischen technischer Dienstleistung und Kunden 2. Physica-Verlag, Heidelberg, 2009
- [DIN61025] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (Hrsg.): Fehlzustandsbaumanalyse (IEC 61025:2006). Beuth Verlag, Berlin, 2007
- [DGK+09] DEYTER, S.; GAUSEMEIER, J.; KAISER, L.; PÖSCHL, M.: Modeling and Analyzing Fault-Tolerant Mechatronic Systems. In: Bergendahl, M.N. (Hrsg.): ICED 09. Design Society, 2009
- [DH04] DIEKMANN, T.; HAGENHOFF, S.: Eignung von Web Services für Embedded Devices in betrieblichen Anwendungssystemen. Schumann, M. (Hrsg.): Arbeitsbericht des Instituts für Wirtschaftsinformatik, 7/2004, 2004
- [DH06] DIEKMANN, T.; HAGENHOFF, S.: Einsatzgebiete von Ubiquitous Computing-Technologien entlang der betrieblichen Wertschöpfungskette. Schumann, M. (Hrsg.): Arbeitsbericht des Instituts für Wirtschaftsinformatik, 2/2006, 2006
- [Die14] DIENST, S.: Analyse von Maschinendaten zur Entscheidungsunterstützung bei der Produktverbesserung durch die Anwendung eines Feedback Assistenz Systems. Dissertation, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Universität Siegen, Siegen, 2014
- [DP06] DITTMAR, R.; PFEIFFER, B.-M.: Modellbasierte prädiktive Regelung in der industriellen Praxis (Industrial Application of Model Predictive Control). at – Automatisierungstechnik, 12, 2006
- [Dor15] DOROCIAC, R.: Systematik zur frühzeitigen Absicherung der Sicherheit und Zuverlässigkeit fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 340, Paderborn, 2015

- [DDG+14] DOROCIAC, R.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.: Specification Technique CONSENS for the Description of Self-optimizing Systems. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Hrsg.): Design Methodology for Intelligent Technical Systems. Springer, Berlin, 2014
- [DGG+13] DOROCIAC, R.; GAUKSTERN, T.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, M.: A methodology for the improvement of dependability of self-optimizing systems. Production Engineering, 7(1), 2013, S. 53–67
- [Dou09-ol] DOUGLASS, B. P.: Build Safety-Critical Designs with UML-based Fault Tree Analysis – The basics. Unter: <http://www.embedded.com/print/4008275>, 27.04.2009
- [DBJ06] DUBÉ, L.; BOURHIS, A.; JACOB, R.: Towards a Typology of Virtual Communities of Practice. Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management, Volume 1, 2006, S. 69–93
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortschrittliche mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011
- [DGI+14] DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, P.: From Mechatronics to Intelligent Technical Systems. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Hrsg.): Design Methodology for Intelligent Technical Systems. Springer, Berlin, 2014
- [DJG12] DUMITRESCU, R.; JÜRGENHAKE, C.; GAUSEMEIER, J.: Intelligent Technical Systems OstWestfalenLippe. Proceedings of the SysInt 2012, 2012, S. 24–27
- [Dun74] DUNCKER, K.: Zur Psychologie des produktiven Denkens. 3. Auflage, Springer, Berlin, 1974
- [Edl01] EDLER, A.: Nutzung von Felddaten in der qualitätsgetriebenen Produktentwicklung und im Service. Dissertation, Verkehrs- und Maschinensysteme, Technische Universität Berlin, Berlin, 2001
- [Eig13] EIGNER, M.: Modellbasierte Virtuelle Prdouktentwicklung auf einer Plattform für Systems Lifecycle Management. In: Sendler, U. (Hrsg.): Insutrie 4.0. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013
- [EGN12] EIGNER, M.; GILZ, G.; Nem M.: Informationstechnologie für Ingenieure. Springer Vieweg, Berlin, 2012
- [ERZ14] EIGNER, M.; ROUBANOV, D.; ZAFIROV, R. (Hrsg.): Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014
- [Eis99] EISENHUT, A.: Service driven design – Konzepte und Hilfsmittel zur informationstechnischen Kopplung von Service und Entwicklung auf der Basis moderner Kommunikations-Technologien. VDI-Verlag, Nr. 297, Düsseldorf, 1999
- [EDB+15-ol] EMMRICH, V.; DÖBELE, M.; BAUERNHANSEL, T.; PAUSLUS-ROHMER, D.; SCHATZ, A.; WESKAMP, M.: Geschäftsmodell-Innovation durch Industrie 4.0 – Chancen und Risiken für den Maschinen- und Anlagenbau. Unter: http://www.wieselhuber.de/lib/public/modules/attachments/files/Geschaeftsmodell_Industrie40-Studie_Wieselhuber.pdf03æ8D, März 2015
- [Erd96] ERDMANN, A.: Neue Chancen durch Virtual-Reality-unterstützte Car Clinics. Planung und Analyse (Zeitschrift für Marktforschung und Marketing), 5, 1996, S. 46–51
- [Eri05] ERICSON, C. A.: Hazard analysis techniques for system safety. Wiley-Interscience, Hoboken, N.J., 2005
- [Eur09-ol] EUROPEAN COMMISSION: Cooperation Theme 3 – ICT - Information and Commucitons Technologies. Updated Work Programme 2009 and Work Programme 2010. Unter: ftp://ftp.cor-dis.europa.eu/pub/fp7/ict/docs/ict-wp-2009-10_en.pdf, 29.07.2009

- [Fah95] FAHRWINKEL, U.: Methode zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 1, Paderborn, 1995
- [FPS96] FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIO, G.; SMYTH, P.: From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. AI Magazin - American Association for Artificial Intelligence, Fall 1996, 1996, S. 37–54
- [FG13] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. vollständig überarbeitete Auflage, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013
- [Fic12] FICK, M.: Modellbasierter Entwurf virtueller Sensoren zur Regelung von PKW-Dieselmotoren. Dissertation, Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2012
- [FO14] FLABKAMP, K.; OBER-BLÖBAUM, S.: Optimal Control of Mechanical and Mechatronic Systems. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Hrsg.): Design Methodology for Intelligent Technical Systems. Springer, Berlin, 2014
- [FD08] FÖLLINGER, O.; DÖRRSCHEIDT, F.: Regelungstechnik – Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. 10. Auflage, Hüthig, Heidelberg, 2008
- [Fra06] FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2006
- [FGK+04] FRANK, U.; GIESE, H.; KLEIN, F.; OBERSCHELP, O.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITTING, K.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 155, Paderborn, 2004
- [Fra-01] FRAUNHOFER IEM: Mechatronische Systembeschreibung – Effizienzsteigerung durch MBSE. Unter: <http://www.iem.fraunhofer.de/de/kompetenzen/unsereforschungsabteilungen/produktentstehung/leistungsangebot/mechatronische-systembeschreibung.html>
- [FMS08] FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A.; STEINER, R.: A practical guide to SysML – Systems Model Language. Elsevier/Morgan Kaufmann, Burlington, Mass., 2008
- [FRS+15] FRIETSCH, R.; RAMMER, C.; SCHUBERT, T.; SOM, O.; BEISE, M.; SPIELKAMP, A.: Innovationssindikator 2015. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Berlin, 2015
- [FBE+06] FÜLLER, J.; BARTL, M.; ERNST, H.; MÜHLBACHER, H.: Community Based Innovation. Electronic Commerce Research. 6(1), 2006, S. 57–73
- [GK83] GAJSKI, D. D.; KUHN, R. H.: New VLSI Tools. Computer, Volume 16, Issue 12, 1983, S. 11–14
- [GFS13] GÄNGL-EHRENWERT, C.; FAULLANT, R.; SCHWARZ, E. J.: Kundenintegration in den Neuproduktentwicklungsprozess. In: Krause, D.E. (Hrsg.): Kreativität, Innovation und Entrepreneurship. Springer Gabler, Wiesbaden, 2013
- [Gau10] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Carl Hanser, München, Wien, 2010
- [Gau11] GAUSEMEIER, J.: Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe – Strategie. Paderborn, OstWestfalenLippe Marketing GmbH, 2011
- [GAD+14] GAUSEMEIER, J.; AMSHOFF, B.; DÜLME, C.; KAGE, M.: Strategische Planung von Marktleistungen im Kontext von Industrie 4.0. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung, 20. und 21. November 2014, Berlin. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 334, Paderborn, 2014
- [GB04] GAUSEMEIER, J.; BERGER, T.: Ideenmanagement in der strategischen Produktplanung. Konstruktion, 9, 2004, S. 64–68

- [GBK10] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; KAISER, L.: Auswahl von Montageverfahren auf Basis der Produktkonzeption. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, Paderborn, 2010
- [GCD15] GAUSEMEIER, J.; CZAJA, A.; DÜLME, C.: Innovationspotentiale auf dem Weg zu Industrie 4.0. In: Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 343, Paderborn, 2015
- [GDE+16] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; EBBESMEYER, P.; FECHTELPELTER, C.; HOBSCHEIDT, D.; KÜHN, A.: Auf dem Weg zu Industrie 4.0: Technologietransfer in den Mittelstand. it's OWL Clustermanagement GmbH, 2016
- [GDJ+14] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; JASPERNEITE, J.; KÜHN, A.; TRSEK, H.: Auf dem Weg zu Industrie 4.0 – Lösungen aus dem Spitzencluster it's OWL. Paderborn, it's OWL Clustermanagement GmbH, 2014
- [GDS+13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; STEFFEN, D.; CZAJA, A.; WIEDERKEHR, O.; TSCHIRNER, C.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. Paderborn, Heinz Nixdorf Institut; Fraunhofer IPT, Unity AG, 2013
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Carl Hanser, München, 2001
- [GFD+08] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus (Teil 2). Konstruktion, 9, 2008, S. 91-99, 108
- [GFD+09] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems. Research in Engineering Design, 4, 2009, S. 201–223
- [GGL10] GAUSEMEIER, J.; GROTE, A.-C.; LEHNER, M.: Eine Analyse des Innovationsgeschehens in Deutschland - wie innovativ ist Deutschland wirklich? In: Gausemeier, J. (Hrsg.): 6. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 276, Paderborn, 2010
- [GID+13] GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; DOROCIAC, R.; STILLE, K. S.; BÖCKER, J.: Konzipierung eines selbstoptimierenden hybriden Energiespeichersystems unter besonderer Berücksichtigung der Verlässlichkeit. In: Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013
- [GIV+14] GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; VABHOLZ, M.; REINHART, F.: Selbstoptimierung im Maschinen- und Anlagenbau. Industriemanagement, 30 (6/2014), 2014, S. 55–58
- [GKP09] GAUSEMEIER, J.; KAISER, L.; POOK, S.: FMEA von komplexen mechatronischen Systemen auf Basis der Spezifikation der Prinziplösung. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. Carl Hanser, 11/2009, München, 2009
- [GLR+00] GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.: Kooperatives Produktengineering – Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79, Paderborn, 2000
- [GP14] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. 2. Auflage, Carl Hanser, München, 2014
- [GRS14a] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer, Berlin, 2014
- [GRS+14b] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.J.; SCHÄFER, W.; SEXTRO, W. (Hrsg.): Dependability of self-optimizing mechatronic systems. Springer, Berlin, 2014

- [GTS14] GAUSEMEIER, J.; TRÄCHTLER, A.; SCHÄFER, W.: Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme – Effektiver Austausch von Lösungswissen in Branchenwertschöpfungsketten. Carl Hanser, München, 2014
- [GTD13] GAUSEMEIER, J.; TSCHIRNER, C.; DUMITRESCU, R.: Der Weg zu Intelligenten Technischen Systemen. *Industriemanagement*, 1/2013, 2013, S. 49–52
- [GV14a] GAUSEMEIER, J.; VABHOLZ, M.: Design Methodology for Self-optimizing Systems. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Hrsg.): *Design Methodology for Intelligent Technical Systems*. Springer, Berlin, 2014
- [GV14b] GAUSEMEIER, J.; VABHOLZ, M.: Development of Self-Optimizing Systems. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Hrsg.): *Design Methodology for Intelligent Technical Systems*. Springer, Berlin, 2014
- [GV14c] GAUSEMEIER, J.; VABHOLZ, M.: Domain-Spanning Conceptual Design. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Hrsg.): *Design Methodology for Intelligent Technical Systems*. Springer, Berlin, 2014
- [GB12] GEISBERGER, E.; BROY, M. (Hrsg.): *agendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*. Springer, Berlin, acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2012
- [Ger05] GERPOTT, T. J.: *Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement*. 2. Auflage, Schäffer-Poeschel, Band 162, Stuttgart, 2005
- [Ges06] GESCHKA, H.: Kreativitätstechniken und Methoden der Ideenbewertung. In: Sommerlatte, T. (Hrsg.): *Innovationskultur und Ideenmanagement*. Symposium, Düsseldorf, 2006
- [Gla93] GLAS, J.: *Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware*. Springer, Band 61, Berlin, New York, 1993
- [GN05] GRABNER, J.; NOTHHAFT, R.: *Konstruieren von Pkw-Karosserien – Grundlagen, Elemente und Baugruppen, Vorschriftenübersicht*. 3. Auflage, Springer, Berlin, 2005
- [HWF+12] HABBERFELLNER, R.; WECK, O.; FRICKE, E.; VÖSSNER, S.: *Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung*. 12. Auflage, Orell Füssli Verlag, Zürich, 2012
- [HP94] HAMEL, G.; PRAHALAD, C. K.: *Competing for the future*. Harvard Business School Press, Boston, Mass., 1994
- [HP95] HAMEL, P.; PRAHALAD, C. K.: *Wettlauf um die Zukunft – Wie Sie mit bahnbrechenden Strategien die Kontrolle über Ihre Branche gewinnen und die Märkte von morgen schaffen*. Wirtschaftsverlag Ueberreuter, Wien, 1995
- [HR09] HANDLBAUER, G.; RENZL, B.: *Kundenorientiertes Wissensmanagement*. In: Hinterhuber, H.H.; Matzler, K. (Hrsg.): *Kundenorientierte Unternehmensführung*. Gabler, Wiesbaden, 2009
- [Han55] HANSEN, F.: *Konstruktionssystematik – Eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure*. 2. Auflage, VEB Verlag, Berlin, 1955
- [HTF96] HARASHIMA, F.; TOMIZUKA, M.; FUKUDA, T.: *Mechatronics - "What Is It, Why, and How?"*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No. 1, 1996, S. 1–4
- [Har13] HARTMANN, M.: *Die Wettbewerbsstärke deutscher Unternehmen in der Maschinenbaubranche – Eine theoretisch konzeptionelle Erklärung anhand der Diamant- und Clustertheorie*. Würzburg, Lehrstuhl für BWL und Marketing; Universität Würzburg, 2013
- [Har14a] HARTMANN, P.: Behavior-Oriented Self-optimization. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Hrsg.): *Design Methodology for Intelligent Technical Systems*. Springer, Berlin, 2014

- [Har14b] HARTMANN, P.: Ein Beitrag zur Verhaltensantizipation und -regelung kognitiver mechatronischer Systeme bei langfristiger Planung und Ausführung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 331, Paderborn, 2014
- [Hau12-ol] HAUG GMBH: Bedienungsanleitung Ionisationsstab El DC. Unter: http://www.haug-biel.ch/de/produkte-finden-ueber-die-produktlinien/dc-line/ionisationsgeraete/item/download/136_60a17459e0905f73cd18685335b7971.html, 03.04.2012
- [HGP06] HEIMANN, B.; GERTH, W.; POPP, K.: Mechatronik – Komponenten - Methoden - Beispiele. 3. Auflage, Carl Hanser, München, 2006
- [Hei99] HEINA, J.: Variantenmanagement – Kosten-Nutzen-Bewertung zur Optimierung der Variantenvielfalt. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 1999
- [Hei05] HEINRICH, B. (Hrsg.): Kaspers/Küfner – Messen, Steuern, Regeln. 8. Auflage, Vieweg, Wiesbaden, 2005
- [HH13] HERRMANN, A.; HUBER, F.: Produktmanagement – Grundlagen - Methoden - Beispiele. 3. Auflage, Imprint: Springer Gabler, Wiesbaden, 2013
- [HF11] HERRMANN J.; FRITZ, H.: Qualitätsmanagement – Lehrbuch für Studium und Praxis. Carl Hanser, München, 2011
- [Her05] HERSTATT, C.: Kundendialog. In: Kukat, F.; Blümelhuber, C. (Hrsg.): Beschwerdemanagement in der Praxis. Symposium, Düsseldorf, 2005
- [HKS14] HERSTATT, C.; KALOGERAKIS, K.; SCHULTHESS, M. (Hrsg.): Innovation durch Wissenstransfer – Mit Analogien schneller und kreativer Lösungen entwickeln. Springer Gabler, Wiesbaden, 2014
- [HLL07] HERSTATT, C.; LÜTHJE, C.; LETTL, C.: Fortschrittliche Kunden zu Breakthrough- Innovationen stimulieren. In: Herstatt, C.; Verworn, B. (Hrsg.): Management der frühen Innovationsphasen. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2007
- [Her07] HERTEL, G.: Mercer-Studie Autoelektronik. Automobil-Elektronik, Juni 2007, 2007, S. 26–27
- [Her08] HERWIG, H.: Strömungsmechanik – Einführung in die Physik von technischen Strömungen. 1. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2008
- [HS15] HERWIG, H.; SCHMANDT, B.: Strömungsmechanik – Physik - mathematische Modelle - thermodynamische Aspekte. 3. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, 2015
- [HS12] HESSE, S.; SCHNELL, G.: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation – Funktion - Ausführung - Anwendung. 5., korrigierte und verbesserte Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- [HOG04] HESTERMEYER, T.; OBERSCHELP, O.; GIESE, H.: Structured Information Processing for Self-Optimizing Mechatronic Systems. Proceedings of the 1st International Conference on Informatics in Control, Automation, and Robotics, 2004
- [Hil01] HILLERMEIER, C.: Nonlinear multiobjective optimization – A generalized homotopy approach. Springer Basel AG, v. 135, Basel, 2001
- [Hil05] HILZENBECHER, U.: Innovategy. In: Berndt, R. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Innovation. Springer, Berlin, 2005
- [Hip86] HIPPEL, E. V.: Lead Users: A Source of Novel Product Concepts. Management Science, Vol. 32, No. 7, 1986, S. 791–805
- [Hip88] HIPPEL, E. V.: The sources of innovation. Oxford University Press, New York, 1988
- [HH08] HÖHN, R.; HÖPPNER, S.: Das V-Modell XT – Anwendungen, Werkzeuge, Standards. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008

- [Höl08] HÖLZING, J. A.: Die Kano-Theorie der Kundenzufriedenheitsmessung – Eine theoretische und empirische Überprüfung. Gabler Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2008
- [Hom05-ol] HOMOLKA, S. U.: Funktionsweise aktiver Ionisatoren – HAUG Ionisation. Unter: http://www.haug-biel.ch/images/pfd_allgemein/AktiveIonisatoren_DE.pdf, Juni 2005
- [HSN+97] HONEKAMP, U.; STOLPE, R.; NAUMANN, R.; LÜCKEL, J.: Structuring Approach for Complex Mechatronic Systems. 30th ISATA Conference on Mechatronics, June, 16-19, Florence, Italy, 1997
- [Ihm10] IHMELS, S.: Verfahren zur integrierten informationstechnischen Unterstützung des Innovationsmanagements. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 271, Paderborn, 2010
- [Ise93] ISERMANN, R.: Towards intelligent control of mechanical processes. Control Engineering Practice, 2, 1993, S. 233–252
- [Ise08] ISERMANN, R.: Mechatronische Systeme – Grundlagen. 1. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008
- [ILM92] ISERMANN, R.; LACHMANN, K.-H.; MATKO, D.: Adaptive Control Systems. Prentice Hall, New York, 1992
- [its14-ol] IT'S OWL: Zukunftsszenarien Intelligenter Technischer Systeme. Unter: <http://www.scmi.de/images/downloads/dateien/scmi-itsowl-szenariostudie-maschinen-anlagenbau-webversion.pdf>, 2014
- [its16-ol] IT'S OWL Clustermanagement GmbH: Webseite it's OWL. Unter: <http://www.its-owl.de/home/>
- [IDG15] IWANEK, P.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.: Identifikation von Potentialen zur Integration von Lösungen im Kontext der Selbstoptimierung für technische Systeme des Maschinen- und Anlagenbaus. Tagungsband der VDI Mechatroniktagung 2015, 12.-13. März 2015, Dortmund, 2015, S. 185–190
- [IGB+15] IWANEK, P.; GAUSEMEIER, J.; BANSMANN, M.; DUMITRESCU, R.: Integration of Intelligent Features by Model-Based Systems Engineering. Proceedings of the ISERD, 15. Nov. 2015, Tokyo, Japan, 2015, S. 31–38
- [IKD+13] IWANEK, P.; KAISER, L.; DUMITRESCU, R.; NYBEN, A.: Fachdisziplinübergreifende Systemmodellierung mechatronischer Systeme mit SysML und CONSENS. Tag des Systems Engineering 2013, Carl Hanser, München, 2013
- [IK16] IWANEK, P.; KÜHN, A.: Die sich selbst optimierende Lackieranlage. JOT Journal für Oberflächentechnik, 3, 2016, S. 28–31
- [IRD+15] IWANEK, P.; REINHART, F.; DUMITRESCU, R.; BRANDIS, R.: Expertensystem zur Steigerung der Effizienz im Bereich der Produktion. productITy, 4, 2015, S. 57–59
- [Jan12] JANZIK, L.: Motivanalyse zu Anwenderinnovationen in Online-Communities. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012
- [Jap72] JAPAN TRADEMARK REGISTRATION: No. 946594. 1972
- [JT13] JENSEN, D. C.; TUMER, I. Y.: Modeling and Analysis of Safety in Early Design. Procedia Computer Science, 2013, S. 824–833
- [KSH14] KALOGERAKIS, K.; SCHULTHESS, M.; HERSTATT, C.: Die kreative Kraft von Analogien. In: Herstatt, C.; Kalogerakis, K.; Schulthess, M. (Hrsg.): Innovation durch Wissenstransfer. Springer Gabler, Wiesbaden, 2014
- [Kas85] KASPER, R.: Entwicklung und Erprobung eines instrumentellen Verfahrens zum Entwurf von Mehrgrößenregelungen. VDI Verlag, Reihe 8, Nr. 90, Düsseldorf, 1985

- [Kei96] KEIL, F. J.: Optimierung verfahrenstechnischer Prozesse. Chemie Ingenieur Technik - CIT, 6, 1996, S. 639–650
- [Kel00] KELLER, H.B. (Hrsg.): Maschinelle Intelligenz – Grundlagen, Lernverfahren, Baustein intelligenter Systeme. Vieweg, Wiesbaden, 2000
- [KGI+13] KESSLER, J.; GAUSEMEIER, J.; IWANEK, P.; KÖCHLING, D.; KRÜGER, M.; TRÄCHTLER, A.: Erstellung von Prozessmodellen für den Entwurf selbstoptimierender Regelungen. Internationales Forum Mechatronik, 30. - 31. Okt. 2013, Winterthur, 2013
- [KMS+14] KESSLER, J. H.; MEYER, T.; SEXTRO, W.; SONDERMANN-WOLKE, C.; TRÄCHTLER, A.: Increasing the Dependability of Self-optimizing Systems during Operation Using the Multi-Level Dependability Concept. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.J.; Schäfer, W.; Sextro, W. (Hrsg.): Dependability of self-optimizing mechatronic systems. Springer, Berlin, 2014
- [Kie12] KIENDL, H.: Computational Intelligence: Muster ihrer Entstehung. at - Automatisierungstechnik, 10, 2012, S. 589–599
- [KPS15] KIND, C.; PFEIFER, M.; SCHWADTKE, U.: Zukunft hat einen Namen – Zur Bedeutung von Innovation. In: Stark, R.; Lüddemann, J. (Hrsg.): Sicher zur Innovation. LOG_X, Ludwigsburg, 2015
- [Kip00] KIPPAN, H.: Handbuch der Printmedien – Technologien und Produktionsverfahren. Springer, Berlin, 2000
- [Kle13a] KLEINER, S.: Modellbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme auf Basis V6 Systems. In: Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013
- [KGC96] KLEINSCHMIDT, E. J.; GESCHKA, H.; COOPER, R. G.: Erfolgsfaktor Markt – Kundenorientierte Produktinnovationen. Springer, Berlin, 1996
- [Kle13b] KLEUKER, S.: Grundkurs Software-Engineering mit UML – Der pragmatische Weg zu erfolgreichen Softwareprojekten. 3. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2013
- [KSR+09] KLÖPPER, B.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; ROMAUS, C.; VOCKING, H.: Probabilistic planning integrated in a multi-level dependability concept for mechatronic systems. IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation (CICA 2009), Nashville, TN, USA, 2009, S. 104–111
- [Koh90] KOHEN, E.: Informationsverarbeitung in FFS. In: VDI-Berichte (830), 1990
- [Kra15] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: Jahresbericht 2013/2014. 2015
- [KGB+10] KREFT, S.; GAUSEMEIER, J.; BERSENBRÜGGE, J.; LORENZ, W.; TRÄCHTLER, A.: Integration eines voll-aktiven X-by-wire Versuchsfahrzeugs in eine VR-basierte Simulationsumgebung. In: Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 274, Paderborn, 2010
- [Kre15] KREIMEIER, N.: Digitalisierung spaltet die Wirtschaft. Capital, 04/2015, 2015
- [Kru04] KRUCHTEN, P.: The Rational Unified Process – An Introduction. 3. Auflage, Pearson Education, Boston, MA, 2004
- [Krü14] KRÜGER, M.: Parametrische Modellordnungsreduktion für hierarchische selbstoptimierende Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Paderborn, 2014
- [Küh03] KÜHN, A.: Systematik des Ideenmanagements im Produktentstehungsprozess. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 130, Paderborn, 2003
- [KM06] KURGAN, L. A.; MUSILEK, P.: A survey of Knowledge Discovery and Data Mining process models. The Knowledge Engineering Review, 1, 2006

- [KO96] KYURA, N.; OHO, H.: Mechatronics---An Industrial Perspective - Mechatronics. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No. 1, 1996, S. 10–15
- [Lak09] LAKE, M. (Hrsg.): Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung – Vorbehandeln, Beschichten, Funktionalisieren und Kennzeichnen von Kunststoffoberflächen. Hanser, München, 2009
- [LBK15] LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A.: A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters, 2015, S. 18–23
- [LKY14] LEE, J.; KAO, H.-A.; YANG, S.: Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment. Procedia CIRP, 2014, S. 3–8
- [LR97a] LEONARD, D.; RAYPORT, J. F.: Spark innovation through empathic design. Harvard Business Review, 6, 1997, S. 102–113
- [LR97b] LEONARD, D.; RAYPORT, J. F.: Spark Innovation through Empathic Design. Harvard Business Review, November-December, 1997, S. 102–113
- [Let13] LETTMANN, S.: Marktorientierte Innovation. In: Abele, T. (Hrsg.): Suchfeldbestimmung und Ideenbewertung. Imprint: Springer Gabler, Wiesbaden, 2013
- [LOM+10] LEYENDECKER, S.; OBER-BLÓBAUM, S.; MARSDEN, J. E.; ORTIZ, M.: Discrete mechanics and optimal control for constrained systems. Optimal Control Applications and Methods, 6, 2010, S. 505–528
- [LSB+15] LICHTBLAU, K.; STICH, V.; BERTENRATH, R.; BLUM, M.; BLEIDER, M.; MILLACK, A.; SCHMITT, K.; SCHMITZ, E.; SCHRÖTER, M.: Industrie 4.0-Readiness. Aachen, Köln, IMPULS-Stiftung für den Maschinenbau, Anlagenbau und die Informationstechnik, 2015
- [Lie06] LIENIG, J.: Layoutsynthese elektronischer Schaltungen – Grundlegende Algorithmen für die Entwurfsautomatisierung. Springer, Berlin, 2006
- [LRP+11] LÓPEZ, T. S.; RANASINGHE, D. C.; PATKAI, B.; MCFARLANE, D.: Taxonomy, technology and applications of smart objects. Information Systems Frontiers, 2, 2011, S. 281–300
- [Lun13a] LUNZE, J.: Regelungstechnik 1. 9. Auflage, Springer, Berlin, 2013
- [Lun13b] LUNZE, J.: Regelungstechnik 2. 7. Auflage, Springer, Berlin, 2013
- [LKT12] LURYE, O.; KROMOV, I.; TRACHTLER, A.: Automated Design of Reconfiguration Strategies Increases Reliability. Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2012 Proceedings - Annual, 2012, S. 1–6
- [Lüt07] LÜTHJE, C.: Methoden zur Sicherstellung von Kundenorientierung in den frühen Phasen des Innovationsprozesses. In: Herstatt, C.; Verworn, B. (Hrsg.): Management der frühen Innovationsphasen. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2007
- [MRB14] MALZAHN, F.; REINHART, R. F.; BERTRAM, T.: Dynamics Identification of a Damped Multi Elastic Link Robot Arm under Gravity. IEEE International Conference in Robotics & Automation (ICRA), 2014, S. 2170–2175
- [Mas43] MASLOW, A. H.: A Theory of Human Motivation. Psychological Review, Vol 50, No 4, July, 1943, S. 370–396
- [Mat13] MATYAS, K.: Instandhaltungslogistik – Qualität und Produktivität steigern. 5. aktualisierte Auflage, Carl Hanser, München, 2013
- [MH98] MATZLER, K.; HINTERHUBER, H. H.: How to make product development projects more successful by integrating Kano's model of customer satisfaction into quality function deployment. Technovation, 1, 1998, S. 25–38
- [MSH09] MATZLER, K.; STAHL, H. K.; HINTERHUBER, H.: Die Customer-based View der Unternehmung. In: Hinterhuber, H.H.; Hinterhuber, H.H. (Hrsg.): Kundenorientierte Unternehmensführung. Gabler, Wiesbaden, 2009

- [MSC+02] MCFARLANE, D.; SARMA, S.; CHIRN LUNG, J.; ASHTON, K.: The intelligent product in manufacturing control and management. 15th Triennial World Congress, Jul. 21, 2002, IFAC, Elsevier, 2002, S. 9
- [MV14] MCKINSEY & COMPANY; VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU E.V. (VDMA) (Hrsg.): Zukunftsperspektive deutscher Maschinenbau – Erfolgreich in einem dynamischen Umfeld agieren. 2014
- [Met16] METZLER, T.: Models and Methods for the Systematic Integration of Cognitive Functions into Product Concepts. Dissertation, Produktentwicklung, TU München, Dr. Hut Verlag, München, 2016
- [MSL13] METZLER, T.; SCHMID, H.; LINDEMANN, U.: Bewertungsmethodik zur systematischen Integration kognitiver Funktionen in Produkte. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013, 20.06.2013, Stuttgart, Fraunhofer Verlag, 2013
- [MS10] METZLER, T.; SHEA, K.: Cognitive Products: Definition and Framework. In: Marjanovic, D.; Štorga, M.; Pavkovic, N.; Bojčević, N. (Hrsg.): Proceedings of the 11th International Design Conference DESIGN 2010, 2010
- [MS11] METZLER, T.; SHEA, K.: Taxonomy of Cognitive Functions. Proceedings of 18th International Conference on Engineering Design (ICED11), 15.-18. August 2011, Kopenhagen, Dänemark, Technical University of Denmark, 2011, S. 1–12
- [MKS15] MEYER, T.; KIMOTHO, J. K.; SEXTRO, W.: Anforderungen an Condition-Monitoring-Verfahren zur Nutzung im zuverlässigkeitsgeregelten Betrieb adaptiver Systeme. Tagungsband der 27. Tagung Technische Zuverlässigkeit (TTZ 2015) - Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte, 2015
- [Mic06] MICHELS, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 196, Paderborn, 2006
- [Mie98] MIETTINEN, K.: Nonlinear Multiobjective Optimization. 12. Auflage, Springer US, Boston, MA, 1998
- [Min01] MINDER, S.: Wissensmanagement in KMU - Beitrag zur Ideengenerierung im Innovationsprozess. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität St. Gallen, Verlag, HSG, St. Gallen, 2001
- [MBD+13] MÖNKS,.; BATOR, M.; DICKS, A.; LOHWEG, V.: Informationsfusion mit verteilter elektromotorischer Sensorik im Maschinen- und Anlagenbau. In: Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013
- [MTD+14] MÖNKS, U.; TRSEK, H.; DÜRKOP, L.; GENEIB, V.; LOHWEG, V.: Assisting the Design of Sensor and Information Fusion Systems. Procedia Technology, 2014, S. 35–45
- [Mor69] MORI, T.: Mecha-tronics – Yaskawa Internal Trademark Application Memo. 1969
- [MSW10] MÜLLER, N.; SCHLUND, S.; WINZER, P.: Modellierung komplexer meachtronischer Systeme anhand des Demand Compliant Design. In: Jumar, U.; Schnieder, E.; Diesdrich, C. (Hrsg.): Entwurf komplexer Automatisierungssysteme, Magdeburg, 2010
- [Mün12] MÜNCH, E.: Selbstoptimierung verteilter mechatronischer Systeme auf Basis paretooptimaler Systemkonfigurationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 321, Paderborn, 2012
- [Nam02] NAMBIAN, S.: Designing Virtual Customer Environments for New Product Development. The Academy of Management Review, Vol. 27, No. 3, 2002, S. 392–413
- [NA10] NATTERMANN, R.; ANDERL, R.: Approach for a Data-Management-System and a Proceeding-Model for the Development of Adaptronic Systems. Proceedings for the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2010

- [Nau00] NAUMANN, R.: Modellierung und Verarbeitung vernetzter intelligenter mechatronischer Systeme. Dissertation, Fachbereich 10 Maschinentechnik, Universität-Gesamthochschule Paderborn, Paderborn, 2000
- [Neu13] NEUMANN, K.: Reliability of Extreme Learning Machines. Dissertation, Technische Fakultät, Universität Bielefeld, Bielefeld, 2013
- [OS13] OBER-BLÖBAUM, S.; SEIFRIED, A.: A Multiobjective Optimization Approach for Optimal Control Problems of Mechanical Systems with Uncertainties. In: Control Conference (ECC), 2013 European, 2013
- [Obe08] OBERSCHELP, O.: Strukturierter Entwurf selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 241, Paderborn, 2008
- [OMG11-ol] OBJECT MANAGEMENT GROUP (OMG): Business Process Model and Notation (BPMN) – Version 2.0. Unter: www.omg.org, 03.01.2011
- [OVK11] ORTH, R.; VOIGT, S.; KOHL, I.: Praxisleitfaden Wissensmanagement – Prozessorientiertes Wissensmanagement nach dem ProWis-Ansatz. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Fraunhofer IPK, 2011
- [Ott03] OTTO, C.: Modellierung virtueller Sensoren im Kraftfahrzeug mit neuronalen Netzen. VDI-Verlag, Nr. 532, Düsseldorf, 2003
- [PBF+05] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHOSEN, J.; GROTE, K. H.: Pahl / Beitz Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. 6. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 2005
- [PLB12] PAPAGEORGIOU, M.; LEIBOLD, M.; BUSS, M.: Optimierung – Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung. 3. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, 2012
- [Par10] PARTSCH, H. A.: Requirements-Engineering systematisch – Modellbildung für softwaregestützte Systeme. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010
- [PR14] PEREZ HERNANDEZ, M. E.; REIFF-MARGANIEC, S.: Classifying Smart Objects using capabilities. 2014 International Conference on Smart 2014, 2014, S. 309–316
- [PS07] PFEIFER, T.; SCHMITT, R.: Masing – Handbuch Qualitätsmanagement. 5. Auflage, Carl Hanser, München, 2007
- [Poo11] POOK, S.: Eine Methode zum Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 296, Paderborn, 2011
- [PH14] PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E.: Wie smarte Produkte den Wettbewerb verändern. Harvard Business Manager, Dezember 2014, 2014
- [PFV14] PÖTTER, T.; FOLMER, J.; VOGEL-HEUSER, B.: Enabling Industrie 4.0 – Chancen und Nutzen für die Prozessindustrie. In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. TEN; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014
- [Pa13] PROMOTORENGRUPPE KOMMUNIKATION DER FORSCHUNGSUNION WIRTSCHAFT - WISSENSCHAFT; ACATECH - DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN (Hrsg.): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. 2013
- [PHF12] PUNZ, S.; HEHENBERGER, P.; FOLLMER, M.: Modeling and Design of a Production Concept for Skinless Pretzel-Shaped Sausages. In: Hutchison, D.; Kanade, T.; Kittler, J.; Kleinberg, J.M.; Mattern, F.; Mitchell, J.C.; Naor, M.; Nierstrasz, O.; Pandu Rangan, C.; Steffen, B.; Sudan, M.; Terzopoulos, D.; Tygar, D.; Vardi, M.Y.; Weikum, G.; Moreno-Díaz, R.; Pichler, F.; Quesada-Arencibia, A. (Hrsg.): Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2011. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012

- [Rei02] REICHART, S. V.: Kundenorientierung im Innovationsprozess – Die erfolgreiche Integration von Kunden in den frühen Phasen der Produktentwicklung. Springer Gabler, Wiesbaden, 2002
- [RB11] REINHARDT, H.; BONGARDS, M.: Spezielle Formen der Regelung. In: Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): *Dubbel*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011
- [RT14] REINHOLD, P.; TRÄCHTLER, A.: X-by-Wire Test Vehicle. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W. (Hrsg.): *Design Methodology for Intelligent Technical Systems*. Springer, Berlin, 2014
- [Rid14-ol] RIDDER, M.: ThyssenKrupp Elevator entwickelt bahnbrechende Servicelösung. Unter: http://www.thyssenkrupp.com/de/presse/art-detail.html&eid=TKBase_1405580782468_1683683164, 17.07.2014
- [RK10-ol] ROEMER, M.; KRAMER, A.: The Intelligent Car – Embedded Systems, a success story for the German job market. A.T. Kearney Study Overview. Unter: http://www.at-kearney.de/documents/856314/1214538/BIP_The_Intelligent_Car.pdf, Dezember 2010
- [Roh08-ol] ROHDE, T.: The Straight Dope on Mechatronics – Yaskawa, the company that invented the term, describes its evolution. Unter: <http://www1.yaskawa.com/site/aboutYEA.nsf/about/86256E8300693011862574A60055746C?opendocument>, April 2008
- [Roh13] ROHMANN, S.: Integration von Wissensmanagement-Technologien in das Produktlebenszyklusmanagement. In: Eyemann, T. (Hrsg.): *Tagungsband zum Doctoral Consortium der WI 2013*, 54, Bayreuth, 2013
- [Rom13] ROMAUS, C.: Selbstoptimierende Betriebsstrategien für ein hybrides Energiespeichersystem aus Batterien und Doppelschichtkondensatoren. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Shaker Verlag, Berichte aus dem Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Band 3, Paderborn, 2013
- [RWW+99] ROSENSTIEL, W.; WEIB, K.; WEILER, C.; HERGENHAN, A.: Internet-basierte eingebettete Systeme in der industriellen Automation/ Internet-based Services in Industrial Automation. at - Automatisierungstechnik, 7, 1999
- [RJ15] ROTHE, M.; JOCHEM, R.: Innovationen absichern – Konzept und Methoden zur Absicherung der Innovationsqualität. In: Stark, R.; Lüddemann, J. (Hrsg.): *Sicher zur Innovation*. LOG_X, Ludwigsburg, 2015
- [Rup12] RUPERTI, F.: Marketing von Low-Cost-Airlines – Analyse der Gestaltungsoptionen des Marketingprogrammes von Low-Cost-Airlines im deutschen Markt im Hinblick auf den Kundennutzen mit dem Ziel einer nachhaltigen Verbesserung der Wettbewerbsposition. In: Zerres, M.; Zerres, C. (Hrsg.): *Hamburger Schriften zur Marketingforschung*. Rainer Hampp Verlag, München, 2012
- [ST97] SABISCH, H.; TINTELNOT, C.: Integriertes Benchmarking – Für Produkte und Produktentwicklungsprozesse. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997
- [SW04] SANDMEIER, P.; WECHT, C. H.: Von der Kundenorientierung zur Kundenintegration. *Technische Rundschau* (4/2004), 2004, S. 31–33
- [SH08] SATTLER, H.; HARTMANN, A.: Commercial Use of Conjoint Analysis. In: Höck, M.; Voigt, K.-I. (Hrsg.): *Operations Management in Theorie und Praxis*. Gabler, Wiesbaden, 2008
- [Sau13] SAUER, O.: Informationstechnik für die Fabrik der Zukunft. *Industriemanagement*, 1/2013, 2013, S. 11–14
- [Sch01] SCHEER, A.-W.: *ARIS - Modellierungsmethoden, Metamodelle, Anwendungen*. 4. Auflage, Springer, Berlin, 2001
- [Sch08] SCHÖNUNG, M. M.: *Kundenwertorientierte Preissetzung für Leistungssysteme im Maschinen- und Anlagenbau*. Apprimus Wissenschaftsverlag, Aachen, 2008

- [Sch06] SCHULTE, S.: Integration von Kundenfeedback in die Produktentwicklung zur Optimierung der Kundenzufriedenheit. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2006
- [SD16] SILVA, G.C.; DASGUPTA, D.: A Survey of Recent Works in Artificial Immune Systems. In: Angelov, P.P. (Hrsg.): Handbook on Computational Intelligence. WORLD SCIENTIFIC, 2016
- [SR88] SCHULZE, K. P.; REHBERG, K. J.: Entwurf von adaptiven Systemen – Eine Darstellung für Ingenieure. VEB, Berlin, 1988
- [SL02] SCHWANKL, L.; LINDEMANN, U.: Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung. Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung, 2002, S. 83–86
- [SFB01] SFB 1799: Finanzierungsantrag für den Sonderforschungsbereich 1799 "Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus" – 2/2002 - 1/2005. Universität Paderborn, 2001
- [SFB04] SFB 614: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Finanzierungsantrag. 1, Universität Paderborn, 2004
- [Son14] SONDERMANN-WÖLKE, C.: Entwurf und Anwendung einer erweiterten Zustandsüberwachung zur Verlässlichkeitssteigerung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Shaker Verlag, Schriften des Lehrstuhls für Mechatronik und Dynamik, Band 3, Paderborn, 2014
- [SGG+13] SPATH, D.; GANSCHAR, O.; GERLACH, S.; HÄMMERLE, M.; KRAUSE, T.; SCHLUND, S.: Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0, 2013
- [Sta73] STACHOWIAK, H.: Allgemeine Modelltheorie. Springer-Verlag, Wien, New York, 1973
- [Sta08] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008 – Mit Erläuterungen. Wiesbaden, 2008
- [Sta14] STATISTISCHES BUNDESAMT (Destatis): Produzierendes Gewerbe, Fachserie 4, Reihe 4.1.2, 2014
- [Ste07] STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagschriftenreihe, Band 207, Paderborn, 2007
- [Ste06] STEINHOFF, F.: Kundenorientierung bei hochgradigen Innovationen. Technische Universität Berlin, Deutscher Universitäts-Verlag, Berlin, 2006
- [Sto09] STOCKSTROM, C.: Planung und Umsetzung von Innovationsprojekten – Zur Wirkung des Coalignment. Gabler, Wiesbaden, 2009
- [SW00] STONE, R. B.; WOOD, K. L.: Development of a functional basis for design. Journal of Mechanical design (ASME), 122, 2000, S. 359–370
- [Str06] STRASSNER, M.: RFID im Supply Chain Management – Auswirkungen und Handlungsempfehlungen am Beispiel der Automobilindustrie. 1. Aufl., Nachdr., Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 2006
- [Thi12] THIEBES, F.: Maschinenbaumarketing. In: Zerres, M.; Zerres, C. (Hrsg.): Hamburger Schriften zur Marketingforschung. Rainer Hampp Verlag, München, 2012
- [Tho80] THOM, N.: Grundlagen des betrieblichen Innovationsmanagements. 2. Auflage, Königstein, Hanstein, 1980
- [Tho14] THOMA, K. (Hrsg.): Resilien-Tech – „Resilience-by-Design“: Strategie für die technologischen Zukunftsthemen. Berlin, acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2014
- [UGB74] UNBEHAUEN, H.; GÖHRING, B.; BAUER, B.: Parameterschätzverfahren zur Systemidentifikation. Oldenbourg, München, Wien, 1974

- [USA+14] UNGER, A.; SEXTRO, W.; ALTHOFF, S.; MEYER, T.; BRÖKELMANN, M.; NEUMANN, K.; REINHART, F.; GUTH, K.; BOLOWSKI, D.: Data-driven Modeling of the Ultrasonic Softening Effect for Robust Copper Wire Bonding. CIPS 2014, 2014
- [VB13] VAHS, D.; BREM, A.: Innovationsmanagement – Von der Idee zur erfolgreichen Vermarktung. 4. Auflage, Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2013
- [VB15] VAHS, D.; BREM, A.: Innovationsmanagement – Von der Idee zur erfolgreichen Vermarktung. 5. Auflage, Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2015
- [VWB+09] VAJNA, S.; WEBER, C.; BLEY, H.; ZEMAN, K.: CAX für Ingenieure – Eine praxisbezogene Einführung. 2., völlig neu bearb. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, 2009
- [Vaß15] VABHOLZ, M.: Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme. Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagschriftenreihe, Band 346, Paderborn, 2015
- [VDI2221] VDI Verein Deutscher Ingenieure: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte (VDI 2221) – Mai 1993. Beuth Verlag, Düsseldorf, 2221
- [VDM14-ol] VDMA: Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau. Unter: <http://www.vdma.org/article/-/articleview/648216>, 20.01.2014
- [VDM12] VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU E.V. (VDMA) (Hrsg.): Tendenzbefragung – Internationale Wettbewerbsposition des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus. 2012
- [VDM14] VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU E.V. (VDMA): Maschinenbau in Zahl und Bild 2014 – Volkswirtschaft und Statistik. 2014
- [VDM16] VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU E.V. (VDMA): Maschinenbau in Zahl und Bild 2016. VDMA Verlag, Mühlheim am Main, 2016
- [VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [VDI2422] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI); Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE): Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. Beuth Verlag, Berlin, 1994
- [Wec05] WECHT, C. H.: Frühe aktive Kundenintegration in den Innovationsprozess. Dissertation, Universität St. Gallen, St. Gallen, 2005
- [Wei06] WEILKIENS, T.: Systems Engineering mit SysML -UML. dpunkt, Heidelberg, 2006
- [Wes13] WESTKÄMPER, E.: Lebenszyklusbetrachtung technischer Systeme. In: Westkämper, E.; Spath, D.; Constantinescu, C.; Lentjes, J. (Hrsg.): Digitale Produktion. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013
- [WDG15] WIEDERKEHR, O.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.: Systematische Vernetzung von Strategischer Produktplanung und Produktentwicklung. Tagungsband der VDI Mechatroniktagung 2015, 12.-13. März 2015, Dortmund, 2015, S. 251–256
- [Win08] WINDT, K.: Ermittlung des angemessenen Selbststeuerungsgrades in der Logistik – Grenzen der Selbststeuerung. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Springer, Berlin, 2008
- [WH07] WINDT, K.; HÜLSMANN, M.: Changing Paradigms in Logistics — Understanding the Shift from Conventional Control to Autonomous Cooperation and Control. In: Hülsmann, M.; Windt, K. (Hrsg.): Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007
- [Win14] WINTER, S.: Management von Lieferanteninnovationen – Eine gestaltungsorientierte Untersuchung über das Einbringen und die Bewertung. Springer Gabler, Wiesbaden, 2014

-
- [Win13] WINZER, P.: *Generic Systems Engineering – Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung*. Springer Vieweg, Berlin, 2013
- [WMA+02] WONG, C. Y.; MCFARLANE, D.; AHMAD ZAHARUDIN, A.; AGARWAL, V.: *The intelligent product driven supply chain*. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 6-9 Oct. 2002, Tunisia, 2002
- [WPS+12] WÜHR, D.; PFEIFFER, S.; SCHÜTT, P.; HUCHLER, N.: *Innovation im Maschinenbau entlang des Produktlebenszyklus (PLC)*. In: Pfeiffer, S.; Schütt, P.; Wühr, D. (Hrsg.): *Smarte Innovation*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2012
- [ZR11] ZACHER, S.; REUTER, M.: *Regelungstechnik für Ingenieure – Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen*. 13. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2011
- [Zan70] ZANGEMEISTER, C.: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik*. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, TU Berlin, Berlin, 1970

Anhang

Inhaltsverzeichnis	Seite
A1 Ergänzungen zur Problemanalyse	A-1
A1.1 Modelle in der Entwicklung	A-1
A1.2 Stellung des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus	A-4
A1.3 Arten zur Identifikation von Ideen	A-5
A1.4 Dimensionen von Kundenbedürfnissen	A-6
A1.5 Rollen der Kundeneinbindung	A-7
A1.6 Nutzung von Informationen aus dem Produktlebenszyklus	A-8
A2 Ergänzungen zum Stand der Technik	A-9
A2.1 Klassifikation von smarten Produkten (BRIDGE)	A-9
A2.2 Aufbau von Embedded Devices	A-10
A2.3 Dimensionen des Industrie 4.0 Readiness Modells	A-11
A3 Ergänzungen zur Systematik	A-13
A3.1 Möglichkeit zur Spezifikation der Leistungsstufen	A-13
A3.2 Spezifikationstechnik CONSENS	A-13
A3.3 Vereinfachte Workshop-Vorlage zur Bewertung von Ideen	A-15

A1 Ergänzungen zur Problemanalyse

A1.1 Modelle in der Entwicklung

Für die Entwicklung von mechatronischen, selbstoptimierenden Systemen sind **Modelle** essentiell. Dabei repräsentieren Modelle Aspekte des technischen Systems zweckorientiert und können somit ein Abbild des technischen Systems oder auch Vorbild für ein zu entwickelndes technisches System sein [HGP06, S. 21], [Sta73, S. 128ff.], [ERZ14, S. 80]. Die frühzeitige Nutzung von Modellen im Rahmen der Entwicklung bietet dabei sowohl Zeit- als auch Kostenvorteile [VDI2206, S. 47]. So kann mit Hilfe der Modelle und durchgeführten Simulationen das Verhalten einer Komponente bereits lange vor der Fertigstellung erster realer Prototypen überprüf- und analysierbar sein. Hierdurch erlangt z.B. ein realer Prototyp in der Regel eine wesentlich höhere Reife [VDI2206, S. 47].

Insbesondere für die Entwicklung **selbstoptimierender Systeme** werden **Modelle** vielfältig eingesetzt. Beispielsweise wird zur frühzeitigen Spezifikation des Systems die disziplinübergreifende Spezifikationstechnik CONSENS eingesetzt [DDG+14, S. 119ff.], der Entwurf von selbstoptimierenden Regelungen erfolgt u.a. auf Basis von Modellen der Anregung, der Strecke oder des Reglers selbst [KGI+13] und für die Ansätze aus dem Bereich der mathematischen Optimierung müssen Modelle vorliegen, welche berechenbar bzw. simulierbar sind, um entsprechende Optima zu ermitteln [GRS14a, S. 223].

Eine Auswahl von Modellen ist im Bild A-1 dargestellt. Dabei erfolgt die Zuordnung zu den Phasen auf Basis des V-Modells der VDI 2206, da dort die Systemintegration explizit dargestellt ist und die entsprechenden Modelle genauer zugeordnet werden können. Nichtsdestotrotz gilt dies ebenso für die Entwicklung selbstoptimierender Systeme.

Modelle können im Rahmen der Entwicklung von mechatronischen, selbstoptimierenden Systemen im Wesentlichen zwei Bereichen zugeordnet werden:

- **Interdisziplinäre Modelle zur Systemspezifikation und frühzeitigen Analyse** [GTS14, S. 36ff.], [ERZ14, S. 87]
- **Modelle zur Simulation des technischen Systems** [GTS14, S. 39ff., S. 47], [ERZ14, S. 87ff.]

Interdisziplinäre Modelle zur Systemspezifikation und frühzeitigen Analyse: Bei der Entwicklung mechatronischer Systeme sind in der Regel Experten verschiedener Fachdisziplinen beteiligt, wie z.B. der Mechanik, Elektronik oder Softwaretechnik. Vor diesem Hintergrund bedarf es insbesondere in der frühen Phasen der Entwicklung (dem Systementwurf) ein Verständigungsmittel, welches alle wesentlichen fachdisziplinübergreifenden Informationen über das System enthält. Hierzu stellt **Model-Based Systems Engineering** (MBSE) einen Ansatz dar, der dieser Herausforderungen begegnet [IKD+13],

[Wei06, S. 15]. Die zu erarbeitenden Modelle in diesem Bereich repräsentieren das System qualitativ (oder auch mental) und können in der Regel nicht simuliert werden. Zu diesen Modellen können Anforderungs-, Funktions-, Struktur-, Verhaltens- sowie erste Gestaltmodelle gezählt werden [GTS14, S. 30], [VWB+09, S. 148f.]. Auf Basis dieser Modelle sind bereits frühzeitige Analysen z.B. hinsichtlich der Sicherheit und Zuverlässigkeit [Dor15, S. 135f.] sowie der Modularisierung [Ste07, S. 87ff.] möglich.

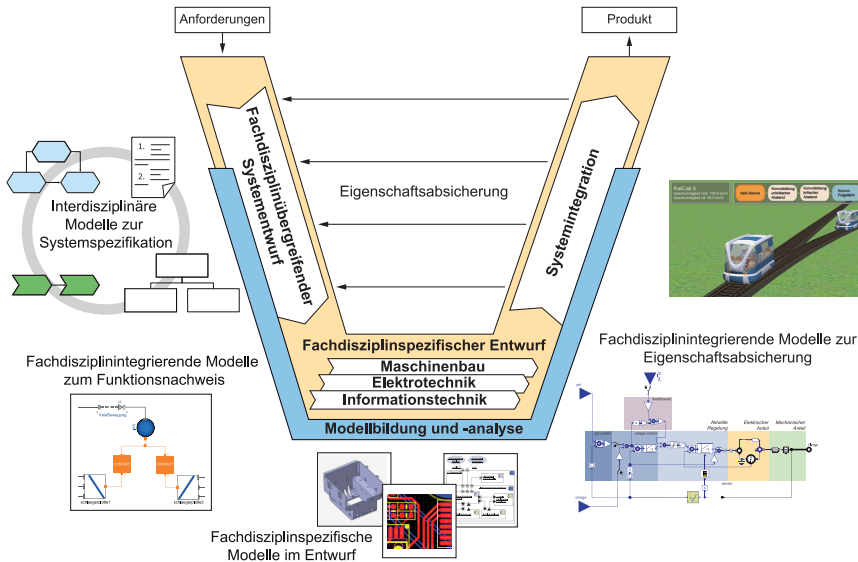


Bild A-1: Das V-Modell der VDI 2206 als Basis für Modellierung und Analyse nach [GCD15, S. 39], [GTS14, S. 105/S. 167]

Modelle zur Simulation des technischen Systems müssen der Eigenschaft genügen, dass die simulierten Ergebnisse ausreichend mit der Realität übereinstimmen [VDI2206, S. 47] und somit eine erforderliche Genauigkeit erreichen [VDI2206, S. 51]. Hierzu erfolgt die Modellbildung auf verschiedenen Abstraktionsebenen: die topologische, physikalische, mathematische und numerische Modellbildung. Die **Topologie** beschreibt die Anordnung und Verknüpfung funktionserfüllender Elemente, wie z.B. von Baugruppen oder Komponenten. Hierzu zählen u. a. auch disziplinspezifische Prinzipskizzen. Ausgehend von der Topologie erfolgt das Erstellen des **physikalischen Modells** [VDI2206, S. 52]. Basis hierfür bilden physikalische Wirkprinzipien und Axiome, wie z.B. das Kräftegleichgewicht an Körpern oder die Erhaltung von Masse, Impuls und Energie bei Prozessen [HS15, S. 14f.], [Her08, S. 1f.]. Hierdurch können in einem nächsten Schritt **mathematische Modelle** erstellt werden, welche z.B. Grundgleichungen der Mechanik beinhalten [HS15, S. 15]. Die in diesen Modellen beschriebenen Gleichungen können bereits exakt gelöst werden (algebraische Berechnung) [Her08, S. 45]. In komplexen Fällen ist jedoch eine rechnerunterstützte Bearbeitung des Modells notwendig. Dies erfordert ein

numerisches Modell, welches das mathematische Modell so aufbereitet, dass eine algorithmische Behandlung möglich ist. Falls dieses Modell auf Basis der physikalischen Wirkprinzipien und der mathematischen Modelle abgeleitet werden kann, wird von **theoretischer Modellbildung** gesprochen. Falls die Modelle nicht auf Basis physikalischer Wirkprinzipien hergeleitet werden können, kommen Ansätze zur **experimentellen Modellbildung** zum Einsatz. Dabei wird das Modell auf Basis von Messungen eines Prozesses gewonnen [VDI2206, S. 53], [Ise08, S. 47]. In diesem Zusammenhang kann auch von einer datengetriebenen Modellbildung gesprochen werden [USA+14, S. 1].

Der Einsatz von Modellen zur Simulation kann zudem noch unterteilt werden in:

- **Disziplinintegrierende Modelle zum Funktionsnachweis und der Eigenschaftsabsicherung** [GTS14, S. 39 ff., S. 222 ff.], [ERZ14, S. 87]
- **Disziplinspezifische Modelle im Entwurf** [GTS14, S. 47, S. 194ff.], [ERZ14, S. 88]

Disziplinintegrierende Modelle zum Funktionsnachweis und der Eigenschaftsabsicherung: Mit Hilfe von disziplinintegrierenden Modellen können Aussagen in Bezug auf die Erfüllung von Anforderungen getroffen werden [GTS14, S. 39]. Hierzu müssen die entsprechenden Aspekte des Systems quantitativ beschrieben sein, um Simulationen des Systems zu ermöglichen [ERZ14, S. 97ff.]. Disziplinintegrierende Modelle können dabei bereits im Rahmen des Entwurfs zum Einsatz kommen, um frühzeitig einen Funktionsnachweis des zu entwickelnden Systems sicherzustellen [GTS14, S. 36], [DKK+11, S. 449ff.] oder im Rahmen der Systemintegration, um Eigenschaftsabsicherungen an einem virtuellen Prototypen durchführen zu können [GP14, S. 354]. Vor dem Hintergrund der frühzeitigen Analysen ist der Einsatz von Modell- oder Komponentenbibliotheken entscheidend, da hierdurch bereits Wirkzusammenhänge in einem bestimmten Rahmen quantifiziert vorliegen und somit Simulationen realisiert werden können [GTS14, S. 165ff.], [ERZ14, S. 103]. Dabei berücksichtigten die disziplinintegrierenden Modelle relevante Aspekte der einzelnen Fachdisziplinen, wie z.B. der Mechanik (z.B. 3-D-CAD und der Kinematik von Mehrkörpersystemen) in Kombination mit Aspekten der Regelungstechnik (z.B. Abläufe zur Regelung) oder der Softwaretechnik (z.B. Zustandsautomaten) [GP14, S. 349ff.]. Einen Ansatz für frühzeitige Analysen umfasst z.B. auch der RFLP-Ansatz. Dabei erfolgt zunächst die Definition der Anforderungen (Requirements) und der Funktionen (functions). Nachfolgend werden die logische (logic) und die physische Architektur (physical) definiert [Kle13a, S. 97]. Letztere ermöglichen dabei die Simulation des technischen Systems.

Disziplinspezifische Modelle im Entwurf: Erste Simulationen auf Basis von bestehenden Komponenten- und Modellbibliotheken ermöglichen einen frühzeitigen Funktionsnachweis des technischen Systems. Diese Modelle sind jedoch in der Regel nicht ausreichend, um hinreichende Aussagen zur Erfüllung der geforderten Anforderungen zu ermöglichen. Hierzu sind detaillierte disziplinspezifische Modelle notwendig [GTS14,

S. 203]. Dabei erfolgt der Entwurf dieser Modelle mit Hilfe disziplinspezifischer Hilfsmittel und Werkzeuge. Beispielsweise werden in der Mechanik die gestaltbehafteten Komponenten modelliert sowie ihre Kinematik oder Festigkeit analysiert [FG13, S. 429], [GRS14a, S. 76ff.]. In der Elektronik werden Schaltungen z.B. mit Hilfe von Hardwarebeschreibungssprachen (HDL – Hardware Description Language) abgebildet. Diese ermöglichen nachfolgende Analysen, wie z.B. hinsichtlich der elektrischen Funktionsfähigkeit und Eigenschaftsabsicherung der Schaltung (ERC – Electrical Rule Check) oder der Realisierbarkeit der Schaltungslayouts (DRC – Design Rule Check) [CHW+06, S. 387].

Fazit:

Modelle sind für die Entwicklung mechatronischer, selbstoptimierender Systeme von besonderer Bedeutung. Daher gilt es insbesondere interdisziplinäre Modelle zur Systemspezifikation und frühzeitigen Analyse bereits in den frühen Phasen der Produktentstehung zu nutzen, um Potentiale zur Weiterentwicklung zu identifizieren und dabei auch die Möglichkeiten zur Einbindung des Kunden wahrzunehmen. Darüber hinaus sollten im Rahmen der Produktfindung bereits frühzeitig die Aufwände berücksichtigt werden, die mit entsprechenden Lösungen zur Leistungssteigerung des mechatronischen Systems zusammenhängen. Dabei gilt es auch die Modellbildung z.B. auch Sicht der Regelungstechnik zu berücksichtigen.

A1.2 Stellung des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus

Tabelle A-1: Vergleich des Maschinenbaus mit weiteren Wirtschaftsgruppen im Jahr 2015 [VDM16, S. 7]

Wirtschaftsgruppe	Zahl der Unternehmen im Jahr 2014	Beschäftigte in Tsd. (Jahresdurchschnitt) in 2015	Umsatz in Mrd. EUR in 2015
Maschinenbau	6.389	1009	218
Elektroindustrie	4.423	848	179
Kraftwagen und Kraftwagenteile	1.004	751	297
Chemische Industrie	1.208	294	109
Ernährungsgewerbe	5.143	443	134
Verarbeitendes Gewerbe	36.641	5.208	1.398

A1.3 Arten zur Identifikation von Ideen

Die **Identifikation von Ideen** zur Systemmodifikation auf Basis von Kundenbedürfnissen kann in drei Ansätze unterteilt werden. Nachfolgend werden diese näher erläutert.

Bei der **Extraktion von Ideen auf Basis von Beobachtungen** erfolgt die Integration der Kundenmeinung maßgeblich auf Basis von Wahrnehmungen der Mitarbeiter im Unternehmen. Diese extrahieren die Ideen aus der Beobachtung des Kunden [Sch06, S. 55f.]. Diese Quelle für Ideen zeichnet sich in der Regel durch eine schnelle Verfügbarkeit und verhältnismäßig geringe Kosten aus [HH13, S. 127]. Dabei existieren Ansätze, welche sich mit einer gezielten passiven Beobachtung des Kunden auszeichnen, um ausschließlich aus dem Verhalten des Kunden Erkenntnisse zur Systemmodifikation zu ziehen. Dies kann einerseits in künstlicher Umgebung erfolgen (z.B. im Labor oder einer Produktklinik [Erd96, S. 46ff.]) oder in der natürlichen Umgebung des Kunden (Empathic Design [LR97b, S. 104f.]) [Sch06, S. 55f.]. Durch diese Beobachtungen werden subjektive Kundenmeinungen ausgeblendet (Bewertung liegt ausschließlich beim Beobachter) und die Ideen basieren auf nicht artikulierten Bedürfnissen des Kunden [Sch06, S. 55f.], [LR97b, S. 107]. Hierdurch können z.B. auch Bedürfnisse identifiziert werden, die der Kunde nicht bewusst wahrnimmt, weil er bereits selbst Lösungsstrategien im Umgang mit dem Produkt entwickelt hat [Lüt07, S. 46].

Die Ansätze aus dem Bereich der **direkten Berücksichtigung von Kundenmeinungen** integrieren den Kunden stärker und bewusster in die Ideenakquise [Sch06, S. 57]. Dabei gilt es die Bedürfnisse des Kunden durch strukturierte oder unstrukturierte sowie direkte oder indirekte Fragen zu identifizieren. Hierzu können auch verschiedene Medien zum Einsatz kommen. Mögliche Ansätze zur direkten Berücksichtigung von Kundenmeinungen sind: Marktforschung (telefonisch oder schriftlich) durch unabhängige Institute [Sch06, S. 57]; Kundenbefragung durch Fragebögen zum Produkt [Sch06, S. 58], Kundenworkshops oder Interviews (z.B. im Rahmen des Lead-User-Ansatzes [Hip86, S. 791ff.]) [Sch06, S. 57]; Virtuelle Integration des Kunden (z.B. Online-Befragungen [Sch06, S. 58], [Jan12, S. 37], Community Based Innovation [Jan12, S. 48f.], [FBE+06, S. 57ff.]). Die entsprechenden Ansätze unterscheiden sich dabei stark im **Aufwand zur Durchführung sowie Art der der Rückmeldung**. Beispielsweise hängen wiederum die Ergebnisse von klassischen Marktforschungsansätzen stark von den bereitgestellten Möglichkeiten zur Integration sowie den ausgewählten Kunden der Umfrage ab [HLL07, S. 62]. Hierdurch ist es mit diesen Ansätzen nur begrenzt möglich, zukünftige Anforderungen an Produkte von morgen zu ermitteln [HLL07, S. 62]. Im Gegensatz dazu, lassen sich mit Hilfe des Lead-User-Ansatzes auch sehr gut zukünftige Bedürfnisse identifizieren [Hip86, S. 781ff.]. Dies liegt insbesondere auch an der Auswahl fortschrittlicher Kunden mit hoher Eigenmotivation zusammen [HLL07, S. 63].

Die **Identifikation von Ideen auf Basis von Benutzungsdaten** adressiert eine systematische Informationsrückführung aus der Betriebsphase des Systems, um zukünftige Sys-

temgenerationen zu entwickeln [Sch06, S. 58ff.]. Dabei werden z.B. Informationen erhoben über Fehler und Produktschwachstellen, welche in der Produktentstehung noch nicht erkannt wurden oder über das Produktverhalten im kundenspezifischen Betrieb (Lebensdauer etc.) [Edl01, S. 1]. Dabei erhalten beispielsweise Mitarbeiter aus dem Bereich Service/Instandhaltung im Rahmen von Gesprächen mit dem Kunden sehr gute Einblicke in die Verhaltensweisen des Kunden mit dem System sowie daraus resultierende artikulierte oder nicht artikulierte Bedürfnisse [HH13, S. 127]. Dies kann z.B. im Rahmen von Wartungsarbeiten oder Instandsetzungen erfolgen und wird vom Kunden nicht als zusätzlicher Aufwand empfunden. Dieser Ansatz zeigt sehr hohes Potential auf, sodass Mitarbeiter auch darauf geschult werden, Kundenwünsche in Gesprächen zu erkennen und diese weiter zutragen [HH13, S. 127]. Die Rückführung der Informationen in die Produktentwicklung erfordert jedoch geeignete Prozesse zwischen den in der Regel getrennten Abteilungen im Unternehmen [Sch06, S. 59]. Darüber hinaus existieren Ansätze, die Maschinendaten (z.B. integrierte Sensoren) nutzen, um eine Verbesserung des Systems in zukünftigen Systemgenerationen zu fördern [Die14, S. 1f.].

A1.4 Dimensionen von Kundenbedürfnissen

In Anlehnung an HAMEL und PRAHALAD existieren verschiedenen Dimensionen von Kundenbedürfnissen. Diese sind in Bild A-2 (vor dem Hintergrund einer umfassenden Kundenorientierung) dargestellt. Weitere Informationen hierzu können [HP95] entnommen werden.

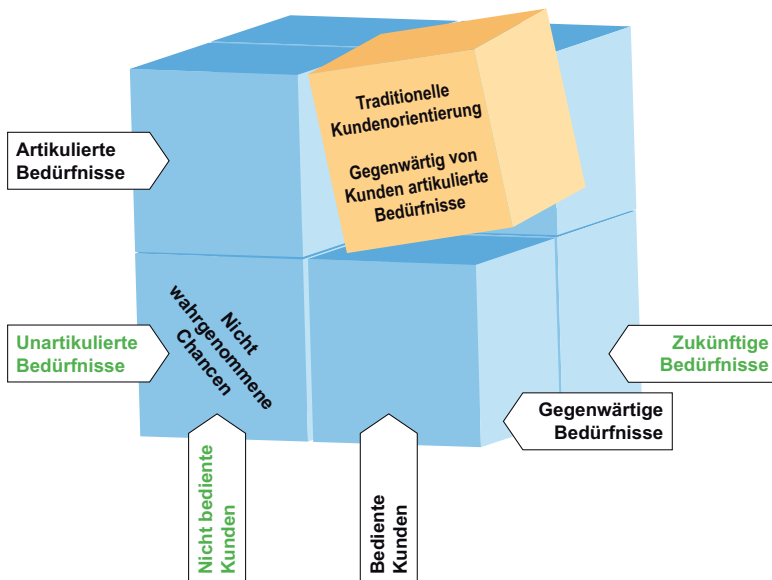


Bild A-2: Kundenorientierung in Anlehnung an HAMEL und PRAHALAD [HP95, S. 167], [GEK01, S. 75], [Vaß15, S. 39]

A1.5 Rollen der Kundeneinbindung

Aus der Analyse der Kundeneinbindung (vgl. Abschnitt 2.5.2) kann abgeleitet werden, dass die Intensität der Kundenintegration von der Rolle abhängt, die der Kunden in der Produktentstehung einnimmt. Hierzu erarbeitete STEINHOFF eine sogenannte **Intensitäts-skala der Kundenintegration**, die insbesondere auch Bezug zu den entsprechenden Rollen nimmt [Ste06, S. 235f.], [Bro97, S. 356ff.]. Bild A-3 stellt diesen Zusammenhang grafisch dar. STEINHOFF nutzt dabei **fünf Ausprägungsstufen** und erläutert diese beispielhaft durch die Rollen der Kunden im Rahmen der Integration. Nachfolgend werden die Ausprägungen kurz beschrieben. Die tieferergehende Diskussion sowie Herleitung der Ausprägungen kann in STEINHOFF nachgelesen werden [Ste06, S. 236ff.].

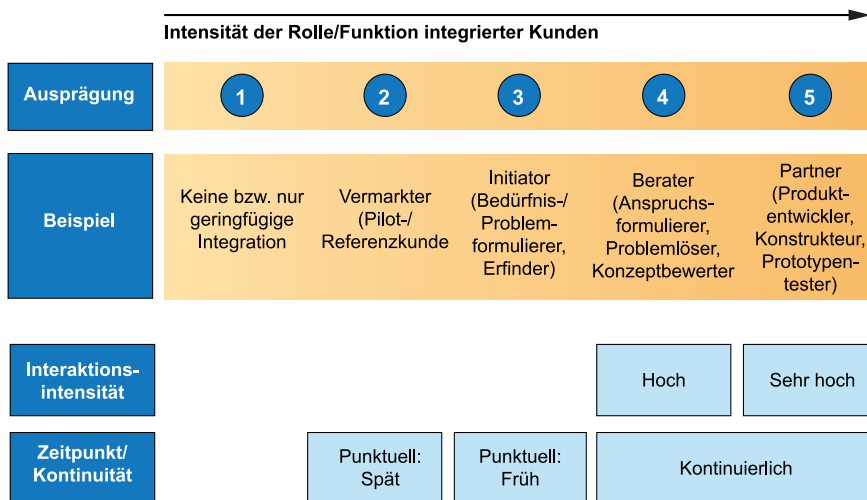


Bild A-3: Intensitätsausprägung in Abhängigkeit der Rollen des Kunden bei der Integration in Anlehnung an [Ste06, S. 236], [Bro97, S. 356ff.]

Die erste Ausprägung beschreibt den niedrigsten Intensitätsgrad, bei der **keine Kundenintegration** vorgesehen ist bzw. diese nur in sehr geringen Umfang erfolgt [Ste06, S. 236]. Die zweite Ausprägung beschreibt eine punktuelle und späte Integration des Kunden. Die Intensität ist dabei nicht hoch. Die Rollen zur beispielhaften Beschreibung dieser Ausprägung sind *Pilot- und Referenzkunden* (im Sinne von **Vermarktern** [Ste06, S. 236f.]). Einen höheren Interaktionsgrad weisen die sogenannten **Initiatoren** auf. **Initiatoren** formulieren Bedürfnisse und Probleme aktueller Systeme und wirken für einige Problemstellungen als *Erfinder* mit. Die Integration erfolgt in den frühen Phasen und ist in der Regel auf diesen begrenzt (punktuelle Integration) [Ste06, S. 236f.]. Höhere Ausprägungen werden durch die beispielhaften Rollen *Berater* und *Partner* repräsentiert. Die Einbindung erfolgt dabei stets kontinuierlich. So wirkt der **Berater** als sogenannter *Anspruchsformulierer, Problemlöser* und *Konzeptbewerter* in mehreren Phasen der Produktentstehung mit [Ste06, S. 237]. Stärker erfolgt die Integration durch die Rolle des

Partners. Er unterstützt die Produktentstehung darüber hinaus z.B. als *Produktentwickler*, *Konstrukteur* oder *Prototypentester* in enger Partnerschaft mit dem Unternehmen [Ste06, S. 237].

A1.6 Nutzung von Informationen aus dem Produktlebenszyklus

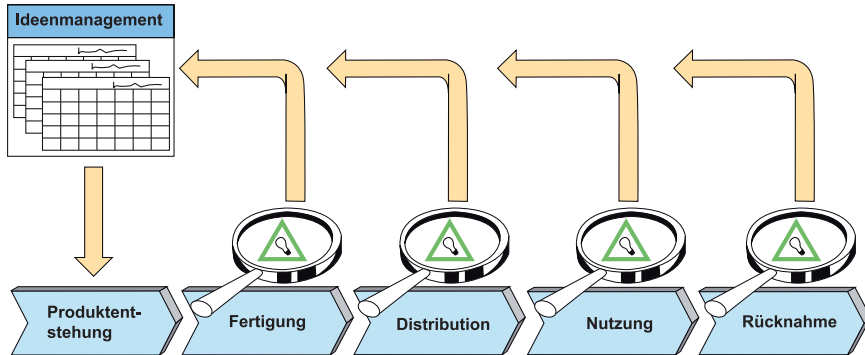


Bild A-4: Rückführung von erkannten Potentialen in den einzelnen Produktlebenszyklusphasen in die Produktentstehung nach [MSW10], [Win13, S. 189f.]; in Anlehnung an [GLR+00, S. 3]

A2 Ergänzungen zum Stand der Technik

A2.1 Klassifikation von smarten Produkten (BRIDGE)

Im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten BRIDGE-Projekts (**B**uilding **R**adio Frequency **I**dentification Solutions for the **G**lobal **E**nvironment) wurden die Herausforderungen und Potentiale zum Einsatz von RFID-Technologien (Radio Frequency Identification) untersucht. In diesen und nachfolgenden Forschungsarbeiten wurde der Begriff eines *smarten Objekts* analysiert. Basierend darauf wurde eine Klassifikation für die Fähigkeiten von smarten Objekten vorgeschlagen. LÓPEZ ET AL. orientierten sich dabei zunächst an der Definition von intelligenten Produkten nach WONG ET AL. und MCFARLANE ET AL. [LRP+11]. Zusammengefasst weisen **intelligente Produkte** folgende **Charakteristika** auf: Intelligente Produkte besitzen eine eindeutige Identifikation. Sie sind in der Lage, in ihrer Umgebung zu kommunizieren. Sie können Daten über sich selbst speichern und abrufen. Sie unterstützen eine Sprache, um andere z.B. über die Produktfunktionen und Anforderungen zum Einsatz zu informieren. Sie können eigenständig Entscheidungen treffen, um eigene Ziele zu erfüllen [MSC+02, S. 5], [WMA+02, S. 2]. Vor diesem Hintergrund definierten LÓPEZ ET AL. smarte Objekte wie folgt:

“A ‘smart object’ is any object or product that is -by way of embedded technologies -aware of its environment and state, and it may have the ability to make its own decisions about itself and its uses, communicate state information, and achieve actuation under its own control” [LRP+11].

Aus dieser Definition heraus beschreiben LÓPEZ ET AL. die Notwendigkeit, dass **ein smartes Objekt** mindestens zwei der nachfolgenden **fünf Charakteristika/Fähigkeiten** aufweisen muss: *Identifikation und Datenspeicherung*, *Erfassung* von Zuständen des Systems und der Umgebung, *Ansteuern* von internen oder externen Komponenten (*Agieren*), *Entscheiden* auf Basis von Eingangsinformationen, um z.B. andere Systeme zu beeinflussen sowie das *Vernetzen* mit anderen Systemen (kabellos oder kabelgebunden) [LRP+11]. Bild A-5 fasst diese Charakteristika grafisch zusammen.

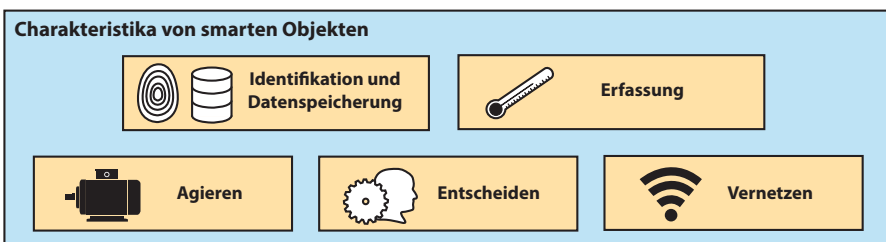


Bild A-5: Charakteristika von smarten Objekten nach LÓPEZ ET AL. [LRP+11]

Mit Hilfe dieser **Klassifikation** soll es nun nachfolgend möglich sein, verschiedene smarte Objekte treffend zu beschreiben. Hierzu verwenden LÓPEZ ET AL. Abkürzungen für die Fähigkeiten: *Identifikation und Datenspeicherung* (I für *identification*), *Erfassung* (S für *sensing*), *Agieren* (A für *actuation*), *Entscheiden* (D für *decision making*) und *Vernetzen* (N für *networking*). So beschreibt z.B. ein Objekt mit der Fähigkeit „ADN-smart“ ein Objekt, welches Agieren, Entscheiden und sich Vernetzen kann [LRP+11]. Zudem beschreiben LÓPEZ ET AL. **Schlüsseltechnologien**, die zur Umsetzung von smarten Objekten und somit der entsprechenden Fähigkeiten genutzt werden können. Hierzu zählen die RFID-Technologie, Sensortechnologien sowie Technologien der Informationsverarbeitung. In diesem Zusammenhang werden z.B. Filter, Datenspeicher, integrierte Schaltkreise und Protokolle zur Kommunikation (z.B. ZigBee) genannt.

Bewertung:

Die Klassifikation nach LÓPEZ ET AL. stellt ein Hilfsmittel zum Entwurf von smarten Objekten dar. Auf dieser Basis können nachfolgend die damit verbundenen Technologien ausgewählt und implementiert werden. Der Ansatz zeigt die Handlungsfelder zur Realisierung verbesserter, smarterer Objekte auf, bleibt jedoch bzgl. der Umsetzung unkonkret. Ansätze werden genannt, stellen aber eher eine unstrukturierte Beispielsammlung dar.

A2.2 Aufbau von Embedded Devices

Embedded Devices stellen physische Objekte dar, die mit Hilfe einer informationstechnischen Schnittstelle mit anderen Systemen kommunizieren können. Das physische Objekt erhält zudem einen Controller, der über Sensoren und Aktuatoren das Objekt kontrollieren kann [DH04, S. 8ff.]. Der Aufbau von Embedded Devices ist im Bild A-6 dargestellt.

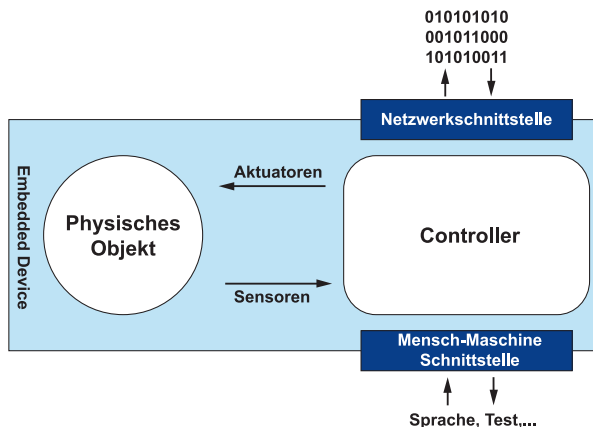


Bild A-6: Aufbau von Embedded Devices [DH04, S. 9]

A2.3 Dimensionen des Industrie 4.0 Readiness Modells

Einen Überblick über die sechs Dimensionen und den damit verbundenen Themenfeldern des Industrie 4.0 Readiness Modells ist in Bild A-7 zu sehen [LSB+15, S. 21ff.].



Bild A-7: Dimensionen und zugeordnete Themenfelder von Industrie 4.0 nach LICHTBLAU ET AL. [LSB+15, S. 22]

A3 Ergänzungen zur Systematik

A3.1 Möglichkeit zur Spezifikation der Leistungsstufen

Optimale Regelung (Ausschnitt)	
<p>Motivation Stetige Regler haben das Ziel, die Regelgröße mit Hilfe einer entsprechenden Stellgröße der Führungsgröße anzunähern. Jedoch kann dies hins. verschiedener Gütekriterien (Schnelligkeit der Nachführung) erfolgen, die das Verhalten der Regelung beschreiben. Optimale Regelungen helfen dabei, den Regler hins. eines bestimmten Gütekriteriums optimal zu gestalten.</p>	<p>Voraussetzungen</p> <p>Leistungsstufen: Stetige Regler</p>
<p>Nutzenpotentiale Mit Hilfe von optimalen Regelungen kann optimales Regelverhalten hins. eines definierten Gütekriteriums (z.B. Schnelligkeit) erreicht werden.</p>	<p>Zusätzliche Voraussetzungen: Gütekriterium</p>
<p>Kompetenzbereich</p> <p>Automatisierung Regelungstechnik Verlässlichkeit</p> <p>Math. Optimierung Künstliche Intelligenz</p>	<p>Hilfsdokumente zum Ansatz</p>
<p>Schlagwörter</p>	<p>Verwandte Ansätze</p>
<p>Literatur/Verweise</p>	
<p>Author: next update::</p>	<p>created: Database link:</p>
<p>PDF created:</p>	

Bild A-8: Steckbrief als Möglichkeit zur Spezifikation von Leistungsstufen am Beispiel der Optimalen Regelung in Anlehnung an [DGG+13, S. 63] sowie [Ana15, S. 64ff.]

A3.2 Spezifikationstechnik CONSENS

Nachfolgend werden die einzelnen Partialmodelle der Spezifikationstechnik CONSENS erläutert. Die verschiedenen Partialmodelle werden dabei i.d.R. integrativ erarbeitet, wengleich eine gewisse Reihenfolge der Bearbeitung besteht [GFD+08, S. 92]: Zu Beginn wird die Systemgrenze festgelegt. Dabei wird das System als Black Box betrachtet und in seinem **Umfeld** dargestellt. Elemente aus dem Umfeld, die mit dem System in Beziehung stehen, werden identifiziert und die Wechselwirkung untersucht. Zusätzlich zu der gewollten Wirkung werden ungewünschte bzw. störende Wechselwirkungen (Wärmestrahlung angrenzender Elemente) sowie Einflussgrößen (Temperatur, Regen) identifiziert und modelliert. Diese Störgrößen werden im Aspekt Anforderungen weiter spezifiziert [GFD+08, S. 92], [IKD+13].

Im nächsten Schritt erfolgt eine Analyse der verschiedenen Situationen, in denen das System agieren muss. Die sogenannten **Anwendungsszenarien** beschreiben die Situation

sowie das gewünschte Systemverhalten in dieser Situation. Zusätzlich werden mögliche Betriebsmodi des Systems beschrieben. Ergebnis der Analyse sind Anforderungen und evtl. Ergänzungen in der Interaktion mit Umfелеlementen [GFD+08, S. 92f.], [IKD+13].

Nachfolgend werden die **Anforderungen** spezifiziert. In diesem Rahmen kann z.B. eine Anforderungsliste erstellt werden, die eine strukturierte Sammlung aller Anforderungen darstellt. Die Anforderungen gelten während der Entwicklung als „Messlatte“ für das zu entwickelnde System [GFD+08, S. 93], [IKD+13].

Aus den Anforderungen werden funktionale Anforderungen gefiltert und in **Funktionen** übersetzt (Substantiv-Verb-Kombination). Eine Funktion ist der allgemeine und gewollte Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen. Die Beschreibung einer Funktion zeigt eine lösungsneutrale Sicht auf das System. Hierzu wird eine Funktionshierarchie gebildet. Dabei stellt die oberste Funktion die Grundfunktion des Systems dar. Die Unterteilung in Subfunktionen erfolgt so lange, bis Wirkprinzipien oder Lösungsmuster zur Realisierung gefunden werden. Dieser Schritt kann durch den Einsatz eines morphologischen Kastens erfolgen [PBF+05], [GFD+08, S. 93], [IKD+13].

Aus der Summe aller Wirkprinzipien und Lösungsmuster wird eine geeignete Kombination zur **Wirkstruktur** synthetisiert. In dieser werden die Systemelemente mit deren Merkmalen sowie Beziehungen zueinander beschrieben. Ziel ist die Abbildung des grundsätzlichen Aufbaus und der prinzipiellen Wirkungsweise [GFD+08, S. 93f.], [IKD+13].

Alle gestaltbehafteten Systemelemente werden im Aspekt **Gestalt** dargestellt. Damit kann eine Abstimmung der Bauräume, Anordnung, Lage, Art der Wirkflächen und Wirkorte erfolgen. Bei der Spezifikation von mechatronischen Systemen spielt die Betrachtung von zusätzlichen **Verhaltensmodellen** wie Zuständen, Aktivitäten und Sequenzen oder auch den **Zielsystemen** ebenfalls eine wesentliche Rolle. Diese vervollständigen die Beschreibung des Systemmodells [GFD+08, S. 92ff.], [IKD+13].

Im Rahmen der Erstellung des SysML4CONSENS-Profiles wurde zudem eine Einteilung der Partialmodelle in Gruppen durchgeführt. Diese sind *Anforderungen*, *Struktur* und *Verhalten* [IKD+13, S. 339ff.]. Im Bild A-9 ist diese Einteilung zu sehen.

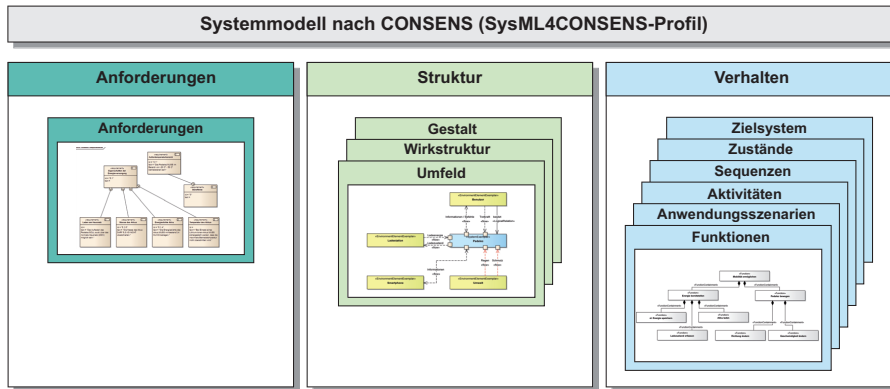


Bild A-9: Aspekte zur Abbildung des Systemmodells auf Basis der Spezifikationstechnik CONSENS (SysML4CONSENS-Profil) [IKD+13, S. 339f.], in Anlehnung an [ADG+09, S. 157]

A3.3 Vereinfachte Workshop-Vorlage zur Bewertung von Ideen

Bewertung der erarbeiteten Ideen

Einschätzung der Ideen	Nutzen			Aufwand
	Begeisterungsfähigkeit	Steigerung der Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit etc.	Alleinstellungsmerkmal	Aufwand der Umsetzung
Idee 1				
Idee 2				
Idee 3				
Idee 4				
Idee 5				

Punktesystem:
Nutzen: 1 - gering, 6 - hoch
Aufwand: 1 - gering, 6 - hoch

Bild A-10: Bewertung von Nutzen und Aufwand im Rahmen eines Workshops

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Peter Lukas Iwanek

Anschrift:

7. Januar 1986

Geburtsdatum:

Tichau, Polen

Geburtsort:

verheiratet

Familienstand:

deutsch / polnisch

Staatsangehörigkeit:

Edith-Stein Grundschule in Gütersloh

Schulbildung

Elly-Heuss-Knapp Realschule in Gütersloh

08/1992 – 07/1996

Carl-Miele-Berufskolleg in Gütersloh

08/1996 – 07/2002

Abschluss: Staatlich geprüfter Informationstechnischer Assistent mit Erwerb der Fachhochschulreife

08/2002 – 06/2005

Universität Paderborn, Diplomstudiengang Elektrotechnik

Abschluss: Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Studium

10/2005 – 11/2011

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn

Fachgruppe Strategische Produktplanung und

Systems Engineering, Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier

Berufliche Tätigkeiten

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

01/2012 – 06/2016

Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik

Produktentstehung, Prof. Dr.-Ing. R. Dumitrescu

Funktionale Sicherheit

HELLA KGaA Hueck & Co.

09/2014 – 06/2016

seit 10/2016

Gütersloh, im Januar 2017

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. 335 RIEKE, J.: Model Consistency Management for Systems Engineering. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 335, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-54-0
- Bd. 336 HAGENKÖTTER, S.: Adaptive prozess-integrierte Qualitätsüberwachung von Ultraschalldrahtbondprozessen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 336, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-55-7
- Bd. 337 PEITZ, C.: Systematik zur Entwicklung einer produktlebenszyklusorientierten Geschäftsmodell-Roadmap. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 337, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-56-4
- Bd. 338 WANG, R.: Integrated Planar Antenna Designs and Technologies for Millimeter-Wave Applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 338, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-57-1
- Bd. 339 MAO, Y.: 245 GHz Subharmonic Receivers For Gas Spectroscopy in SiGe BiCMOS Technology. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 339, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-58-8
- Bd. 340 DOROCIĄK, R.: Systematik zur frühzeitigen Absicherung der Sicherheit und Zuverlässigkeit fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 340, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-59-5
- Bd. 341 BAUER, F.: Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 341, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-60-1
- Bd. 342 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): 12. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 342, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-61-8
- Bd. 343 GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 10. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 343, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-62-5
- Bd. 344 BRÖKELMANN, J.: Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 344, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-63-2
- Bd. 345 SHAREEF, Z.: Path Planning and Trajectory Optimization of Delta Parallel Robot. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 345, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-64-9
- Bd. 346 VASSHOLZ, M.: Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 346, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-65-6
- 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 349, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-68-7
- Bd. 350 RÜBELKE, R.: Systematik zur innovationsorientierten Kompetenzplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 350, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-69-4

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 351 BRENNER, C.: Szenariobasierte Synthese verteilter mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 351, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-70-0
- Bd. 352 WALL, M.: Systematik zur technologie-induzierten Produkt- und Technologieplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 356, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-75-5
- Bd. 357 AMSHOFF, B.: Systematik zur musterbasierten Entwicklung technologie-induzierter Geschäftsmodelle. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 360, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-79-3
- Bd. 361 PETER, S.: Systematik zur Antizipation von Stakeholder-Reaktionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, 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, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 365, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-84-7