

Anja Maria Schierbaum

Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau

Framework for deriving need-based systems engineering guidelines in mechanical engineering

Geleitwort

Systems Engineering für den Entwurf Intelligenter Technischer Systeme ist die verbindende Leitidee des Heinz Nixdorf Instituts und des damit verbundenen Fraunhofer-Instituts für Entwurfstechnik Mechatronik IEM. Unser generelles Ziel ist die Steigerung der Innovationskraft von Industrieunternehmen. Zentrale Schwerpunkte der Arbeiten an den beiden Instituten sind die Strategische Planung und das Systems Engineering.

Viele Unternehmen des Maschinenbaus und verwandter Branchen vollziehen mit ihren Produkten den Innovationssprung von mechatronischen hin zu Intelligenten Technischen Systemen. Dies erfordert neue Herangehensweisen in der Produktentstehung dieser Systeme. Interdisziplinäres Denken und Handeln sowie ein ganzheitliches Systemverständnis aller beteiligten Akteure werden wichtiger denn je. Systems Engineering (SE) versteht sich als durchgängiger fachdisziplinübergreifender Ansatz. SE erhebt den Anspruch die Herausforderungen in der interdisziplinären Produktentstehung zu adressieren und die Akteure bei der Realisierung komplexer Systeme zu orchestrieren. Es kann so, ergänzend zu den etablierten Entwicklungsmethodiken, als Lösungsansatz dienen. Mit der Veränderung der Systeme zeichnet sich ein steigender Druck der Unternehmen des Maschinenbaus und verwandter Branchen ab Systems Engineering einzuführen. Geprägt durch die klassischen Anwendungsfälle in der Luft- und Raumfahrt, lässt sich Systems Engineering allerdings nicht einfach für den mittelständisch geprägten Maschinenbau in Deutschland übernehmen. Hier bedarf es Forschungsarbeit, um SE entsprechend weiterzuentwickeln und die Hindernisse in der Anwendung zu überwinden.

Vor diesem Hintergrund hat Frau Schierbaum eine Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau entwickelt. Die Systematik umfasst eine Übersicht über Nutzenpotentiale des SE im Maschinenbau sowie ein Vorgehensmodell zur Ableitung von SE-Leitfäden. Mit einer Bedarfsanalyse werden die Unternehmen bei der Identifikation von Verbesserungspotentialen hinsichtlich der interdisziplinären Produktentwicklung unterstützt. Anschließend werden unternehmensspezifische SE-Lösungen abgeleitet. Ein Werkzeugkoffer stellt hierzu Prozessschritte, Methoden und Rollen sowie ihre Zusammenhänge bereit und unterstützt die Identifikation geeigneter Lösungen. Die Einbettung in den Gesamtprozess und eine Umsetzungsplanung unterstützen die schrittweise Implementierung der entsprechenden Methoden. Die Systematik entstand im Rahmen des BMBF-Spitzencluster „Intelligente Technische Systeme OstWestfalen- Lippe“ (it's OWL) und wurde in einem anspruchsvollen Transferprojekt validiert. Ziel des Projekts war die Definition eines bedarfsgerechten Systems Engineering Prozesses für einen Hersteller von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik.

Wir glauben, dass Systems Engineering die Grundlage der Innovationskraft Deutschlands ist und die laufende Transformation der Wertschöpfung sicherstellt. Wir bezeichnen diese Perspektive als Advanced Systems Engineering (ASE). Das ASE zeichnet sich dabei durch eine breite Akzeptanz vom Mittelstand bis zum Konzern aus. Frau Schierbaum leistet mit ihrer Dissertation hierfür einen wichtigen Beitrag. Ihre entwickelte Systematik zeichnet sich durch ihre hohe Praxisrelevanz für den mittelständischen Maschinenbau aus und ist Anker für weitere wissenschaftliche Fragestellungen im Kontext ASE.

Paderborn, im März 2020

Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier

Prof. Dr.-Ing. R. Dumitrescu

**Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter
Systems Engineering
Leitfäden im Maschinenbau**

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Wirt.-Ing. Anja Maria Schierbaum geb. Czaja
aus Paderborn

Tag des Kolloquiums: 12. April 2019
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Fachgruppe Strategische Produktplanung und Systems Engineering am Heinz Nixdorf Institut (HNI) sowie am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in dem Forschungsbereich Produktentstehung. Sie ist das Ergebnis meiner wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen von Forschungs- und Industrieprojekten.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier für die einzigartige Ausbildung. Durch die vielfältigen spannenden Projekte konnte ich viele wertvolle Erfahrungen sammeln. Vielen Dank für Ihr Vertrauen, die fachlichen Diskussionen und konstruktive Kritik. Sie habe mich nicht nur fachlich, sondern auch persönlich in dieser Zeit geprägt.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu bedanken, der mich am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM stets gefördert hat. Vielen Dank für die vertrauensvolle und inspirierende Zusammenarbeit – auch in Zeiten in denen der Weg steinig war.

Allen Kolleginnen und Kollegen der Fachgruppe sowie des Fraunhofer-Instituts danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit und den besonderen Teamgeist, der mich stets motiviert hat. Hervorheben möchte ich meinen langjährigen Bürokollegen Dr.-Ing. Peter Iwanek. Ich freue mich dich während meiner Promotionszeit als tollen Wegbegleiter gehabt zu haben und seitdem um einen tollen Freund reicher zu sein. Im Rahmen meiner Dissertation danke ich besonders: Dr.-Ing. Lydia Kaiser, Dr.-Ing. Harald Anacker, Dr.-Ing. Thorsten Westermann, Dr.-Ing. Christian Ts chirner, Christian Bremer und Daniela Hobscheidt. Danke für die gemeinsame Zeit und die intensiven Diskussionen rund um das Thema Systems Engineering. Darüber hinaus danke ich allen Studierenden, die mich in der Promotionszeit im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten oder durch ihre studentische Hilfs tätigkeit unterstützt haben.

Meinen Freunden danke ich für jedes offene Ohr und die ein oder andere positive Ablenkung während der Promotionszeit. Der größte Dank gilt meiner Familie. Insbesondere danke ich meinen Eltern Jolanthe und Stanislaus für den bedingungslosen Rückhalt und die großartige Unterstützung. Meinem Bruder Felix danke ich dafür, dass er mir immer wieder hilft die Dinge mit der notwendigen Leichtigkeit anzugehen. Von Herzen danke ich meinem Mann Thomas. Du hast mich in den letzten Jahren mit viel Verständnis, Geduld, Kraft und Liebe unterstützt und motiviert. Du und unsere Kinder zeigen mir immer wieder, was das wichtigste im Leben ist. Ihr seid wunderbar!

Paderborn, im März 2020

Anja Maria Schierbaum

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [CAD+17] CZAJA, A.; AMON, M.; DUMITRESCU, R.; GAARMANN, D.; LAMPERT, R.: Bedarfsgerechter SE Prozess für einen mittelständischen Hersteller von Automatisierungskomponenten. In: MAURER, M.; SCHULZE, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineerings 2017, Paderborn, 2017
- [CAD16] CZAJA, A.; ANACKER, H.; DUMITRESCU, R.: Target-oriented implementation of Systems Engineering methods in medium sized mechanical engineering companies. 2nd IEEE International Symposium on Systems Engineering, Edinburgh, 2016
- [CD15] CZAJA, A.; DUMITRESCU, R.: Guideline for a target-oriented Systems Engineering Process in small and medium sized enterprises. 4th International Conference on Advances in Mechanical Engineering, German-Malaysian Workshop Series 2015 “Systems Engineering for Advanced Mechatronics, ICAME 2015, Bali, Indonesia, 2015
- [GAC+13] GAUSEMEIER, J.; ANACKER, H.; CZAJA, A.; WASSMANN, H.; DUMITRESCU, R.: Auf dem Weg zu intelligenten technischen Systemen. In: GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013
- [GCD+13] GAUSEMEIER, J.; CZAJA, A.; DUMITRESCU, R.; TSCHIRNER, C.; STEFFEN, D.; WIEDERKEHR, O.: Studie: Systems Engineering in der industriellen Praxis. In: GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013
- [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.): 10. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 343, Paderborn, 2015
- [GDC+13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; CZAJA, A.; STEFFEN, D.; TSCHIRNER, C.; WIEDERKEHR, O.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. In: GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn 2013
- [GDS+15] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; STEFFEN, D.; CZAJA, A.; TSCHIRNER, C.; WIEDERKEHR, O.: Systems Engineering in industrial practice. Paderborn, 2015
- [GDS+13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; STEFFEN, D.; CZAJA, A.; TSCHIRNER, C.; WIEDERKEHR, O.: Systems Engineering in industriellen Praxis. Paderborn, 2013
- [SES+16] STEFFEN, D.; ENGE, E.; SCHULZE S.-O.; CZAJA, A.: Pragmatisches Reifegradmodell zur Einführung von Systems Engineering. In: MAURER, M.; SCHULZE, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineerings 2016, Herzogenaurach, 2016
- [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, Dortmund, 2015

Zusammenfassung

Der technologische Wandel und insbesondere die Informations- und Kommunikationstechnologie verändern die Erzeugnisse im Maschinenbau und damit auch die Produktentstehung. Die Systeme sind interdisziplinär und können nicht mehr aus dem Blickwinkel einer einzelnen Fachdisziplin entwickelt werden. Etablierte primär fachdisziplinorientierte Entwicklungsmethodiken stoßen an ihre Grenzen. Systems Engineering (SE) unterstützt die erforderliche fachgebietsübergreifende Herangehensweise und kann als Lösungsansatz dienen. SE ist nicht neu, trotzdem konnten bisher nur wenige Unternehmen des Maschinenbaus eine solche Herangehensweise umzusetzen. Daher bedarf es einer Systematik, die es den Unternehmen ermöglicht einen ihrem Bedarf entsprechenden SE-Leitfaden abzuleiten. Dabei ist die Weiterentwicklung von SE entsprechend der Problemstellungen des Maschinenbaus zu berücksichtigen und relevante Nutzenpotentiale aufzuzeigen.

Ziel dieser Arbeit ist eine Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter SE-Leitfäden im Maschinenbau. Sie umfasst vier Bestandteile: eine Übersicht über Nutzenpotentiale des SE, ein Vorgehensmodell SE-Leitfaden, eine Bedarfsanalyse sowie ein Werkzeugkoffer SE, der Prozessschritte, Methoden und Rollen sowie ihre Zusammenhänge bereitstellt. Die Systematik unterstützt die Unternehmen, die Nutzenpotentiale des SE für ihren Bedarf zu identifizieren und entsprechende Prozessschritte und Methoden schrittweise zu implementieren.

Summary

The mechanical engineering as well as related industries are undergoing a massive shift from classic mechanic-centered products to mechatronics and intelligent systems. This confronts the industry with high demands for the product development process. The development of these systems can no longer be analyzed from the perspective of an individual specialist discipline; the established discipline specific methodologies thus reach their limits. Systems engineering (se) is an interdisciplinary approach that has the potential to satisfy these new requirements. Nonetheless, until now it could not yet be established in a wide range of small and medium-sized enterprises in the mechanical engineering. They need to be supported to define a se guideline for their company based on their company's needs. Therefore, it is necessary to consider se and its potential benefits in relation to the issues of machinery.

The aim of this thesis is to define specific se guidelines for companies in machinery based on their needs. The approach consists of four components: overview of potential benefits of se for companies, a procedure model for defining and implementing needs-based se guidelines, a method for the assessment of needs and as well as a process and methods kit. Thereby, the approach supports the experts to identify the potential benefits of se for their company and to gradually implement the new aspects.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung	5
1.1 Problematik.....	5
1.2 Zielsetzung	7
1.3 Vorgehensweise	8
2 Problemanalyse	11
2.1 Begriffsdefinitionen	11
2.2 Maschinenbau in Deutschland.....	14
2.3 Fortschrittliche mechatronische Systeme	18
2.3.1 Von der Mechatronik zu fortschrittlichen mechatronischen Systemen.....	18
2.3.2 Herausforderungen bei der Entwicklung von fortschrittlichen mechatronischen Systemen im Maschinenbau	22
2.4 Interdisziplinäre Produktentwicklung	23
2.4.1 Referenzmodell zur Entwicklung von Marktleistungen	24
2.4.2 Entwicklung mechatronischer Systeme	26
2.5 Systems Engineering.....	29
2.5.1 Aufgabenbereiche	32
2.5.2 Model-Based Systems Engineering.....	34
2.5.3 Systems Engineering im Maschinenbau.....	36
2.5.4 Nutzen von Systems Engineering.....	37
2.5.5 Hindernisse in der Anwendung von Systems Engineering	40
2.6 Produktentwicklung(sprozesse) im Kontext zukunftsorientierter Unternehmensgestaltung	42
2.7 Problemabgrenzung	43
2.8 Anforderungen an die Systematik.....	45
3 Stand der Technik.....	49
3.1 Ansätze zur Bedarfsanalyse Systems Engineering	49
3.1.1 Capability Maturity Model Integration for Development (CMMI-DEV)	49
3.1.2 VPS-Benchmark.....	51
3.1.3 Betriebliche Einführungsstrategie für ein anwendungsorientiertes Vorgehensmodell (BESTVOR)	53

3.1.4	Methode zur Leistungsbewertung und -steigerung der Mechatronikentwicklung nach BALÁŽOVÁ	55
3.2	Ansätze zur Bereitstellung von Methoden und Prozessen im SE	57
3.2.1	Methodenbeschreibung und -sammlungen in der Produktentwicklung	58
3.2.2	ISO/IEC TR29110 – Systems and software engineering - Lifecycle profiles for Very Small Entities	63
3.2.3	Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte nach PONN	64
3.3	Planung und Verbesserung von Entwicklungsprozessen	66
3.3.1	Transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse nach HELLENBRAND.....	66
3.3.2	Rahmenwerk für einen selbstoptimierenden Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme nach KAHL..	68
3.3.3	Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen nach ROELOFSEN	70
3.4	Ansätze zur Einführung von Systems Engineering.....	72
3.4.1	Einführung von modellbasierter Systementwicklung nach ALT ..	72
3.4.2	Guide for the Application of Systems Engineering in Large Infrastructure Projects nach INCOSE	74
3.5	Handlungsbedarf	75
4	Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden	79
4.1	Die Systematik im Überblick	79
4.2	Nutzenpotentiale Systems Engineering im Maschinenbau.....	80
4.2.1	Analysemethode zur Identifikation von Nutzenpotentialen Systems Engineering.....	81
4.2.2	Problemstellungen des Maschinenbaus	83
4.2.3	Nutzenpotentiale.....	86
4.2.4	Erschließung der Nutzenpotentiale.....	90
4.3	Vorgehensmodell SE-Leitfaden.....	98
4.3.1	Phase 1: Bedarfsanalyse Systems Engineering	98
4.3.2	Phase 2: Identifikation und Auswahl geeigneter SE-Lösungen	100
4.3.3	Phase 3: Definition eines SE Soll-Prozesses	101
4.3.4	Phase 4: Planung der Umsetzung	102
4.4	Bedarfsanalyse	104
4.4.1	Erhebung der Unternehmensrahmenbedingungen.....	105
4.4.2	Grobanalyse Nutzenpotentiale	106
4.4.3	Entwicklungsprozessanalyse	114

4.5 Werkzeugkoffer Systems Engineering.....	117
4.5.1 Prozessschritte	117
4.5.2 Methoden.....	118
4.5.3 Rollen	120
4.5.4 Prozess- und Methodenlandkarte.....	122
5 Anwendung und Bewertung.....	125
5.1 Anwendung der Systematik am Beispiel eines Herstellers von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik	125
5.1.1 Phase 1: Bedarfsanalyse Systems Engineering	126
5.1.2 Phase 2: Identifikation und Auswahl geeigneter SE-Lösungen	134
5.1.3 Phase 3: Definition eines SE Soll-Prozesses	136
5.1.4 Phase 4: Planung der Umsetzung	140
5.2 Bewertung der Systematik anhand der Anforderungen	142
6 Zusammenfassung und Ausblick	147
Abkürzungsverzeichnis	151
Literaturverzeichnis	153

Anhang

A1 Ergänzende Hilfsmittel.....	A-1
A1.1 Liste der Transferprojekte	A-1
A1.2 Adressierte Problemstellungen der Unternehmen aus den Transferprojekten.....	A-3
A1.3 Nutzenpotentialsteckbriefe.....	A-5
A1.4 Nutzenpotentiale/ Unternehmensausprägungen.....	A-10
A1.5 Prozess- und Methodenlandkarte	A-11
A2 Methode zum Vergleich von verschiedenen MBSE-Werkzeugen.....	A-19
A3 Vorgehen zur schrittweisen Einführung von Systems Engineering aus der Schulungsperspektive	A-21

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Cluster-Querschnittsprojekts „Systems Engineering“ im BMBF-Spitzencluster „Intelligente Technische Systeme OstWestfalen-Lippe“ (it's OWL)¹. Ziel des Cluster-Querschnittsprojekts „Systems Engineering“ ist ein Instrumentarium für die fachdisziplinübergreifende Entwicklung intelligenter Produkte und Produktionssysteme. Das Instrumentarium unterstützt Unternehmen bei der Entwicklung multidisziplinärer Systeme und ermöglicht eine Leistungssteigerung durch Systems Engineering. Hierzu wurden eine disziplinübergreifende Spezifikationstechnik sowie Methoden und Werkzeuge erarbeitet. Mit den beteiligten Unternehmen des Spaltenclusters wurden die erarbeiteten Ansätze stetig validiert und weiterentwickelt.

1.1 Problematik

Der **Maschinenbau** und verwandte Branchen, wie der Anlagenbau, gelten als Rückgrat der deutschen Wirtschaft. Er ist der Industriezweig mit den meisten Beschäftigten in Deutschland: Im Jahr 2016 erreichte der Beschäftigtenstand der Branche ca. 1.014 Tsd. beschäftigte Personen in der Stammbelegschaft [VDM17]. Der deutsche Maschinenbau ist sehr stark mittelständisch geprägt. Dies lässt sich zum einen aus der Anzahl der Beschäftigten pro Unternehmen, zum anderen aber auch durch typische Merkmale ableiten [EM13], [Heß06], [Ins16-ol]. Darüber hinaus zeichnet sich der Maschinenbau durch seine hohe Innovationsfähigkeit aus [VDM14], [VDM17]. Viele Unternehmen verstehen sich als Innovationsführer oder frühe Innovationsfolger. Sie sehen dies als einen entscheidenden Erfolgsfaktor, um auch in Zukunft erfolgreich im internationalen Wettbewerb agieren zu können. Nach einer Studie des VERBANDS DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU und MCKINSEY von 2014 wollen die deutschen Maschinenbauer den Druck im internationalen Wettbewerb auch weiterhin vor allem von ihrem heimischen Standort aus meistern [VM14].

Produktinnovationen aus dem Maschinenbau beruhen heute aber zunehmend auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software. Der Begriff Mechatronik bringt dies zum Ausdruck [HTF96]. Die zu beobachtende Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik ist ein wesentlicher Treiber für einen fortlaufenden Wandel der Erzeugnisse und Produktionssysteme des Maschinenbaus hin zu Systemen mit inhärenter Teileintelligenz. In enger Beziehung zur Kognitionswissenschaft ermöglicht diese Entwicklung Systeme, die adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich sind [Dum10], [GAC+13]. Diese **fortgeschrittenen mechatronischen**

¹ Intelligente Technische Systeme OstWestfalen-Lippe“ (it's OWL) ist ein Technologie-Netzwerk aus über 180 Unternehmen, Hochschulen und weiteren Partner. Ausgezeichnet als Spitzencluster durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Systeme können auch global über das Internet miteinander kommunizieren und im Verbund agieren. Beispiele sind Landmaschinen, die sich selbstständig an die jeweiligen Erntebedingungen anpassen können oder eine ressourceneffiziente selbstoptimierende Großwäscherei [its15-ol]. Populäre Begriffe wie Intelligente Technische Systeme, Cyber-Physical Systems und Industrie 4.0 charakterisieren diesen Wandel. Diese Systeme bieten gleichermaßen Chancen als auch Herausforderungen für die Unternehmen im internationalen Wettbewerb [ASS14], [FAS13], [GAD+14], [DMG15].

Eine der größten Herausforderungen ist die **Entwicklung** dieser Systeme, sie zeichnet sich durch ihre hohe Interdisziplinarität und Komplexität aus. Die Erzeugnisse können nicht mehr aus dem Blickwinkel einer einzelnen Fachdisziplin betrachtet und entwickelt werden. Die heute etablierten Entwicklungsmethodiken, wie die Konstruktionslehre nach PAHL/BEITZ [PBF+07] im klassischen Maschinenbau, sind fachgebietszentriert. Auch übergreifende Ansätze, wie die VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ [VDI2206] in der Mechatronik, greifen nicht weit genug.

Systems Engineering (SE) hat das Potential, Disziplinen und vielfältige Aspekte zu integrieren, und kann somit als Grundlage für eine Weiterentwicklung der Entwicklungsmethodik dienen [HFW+12], [GDS+13]. Systems Engineering versteht sich als durchgängige, fachdisziplinübergreifende Disziplin zur Entwicklung technischer Systeme, die alle Aspekte ins Kalkül zieht. Es stellt das multidisziplinäre System in den Mittelpunkt und umfasst die Gesamtheit aller Entwicklungsaktivitäten. Im Vordergrund stehen also die Interdisziplinarität und die zielgerichtete ganzheitliche Problembetrachtung [HFW+12], [GDS+13], [INC15].

SE ist kein neuer Ansatz, jedoch konnte er sich trotz der Nutzenpotentiale insbesondere im mittelständisch geprägten Maschinenbau bisher nicht etablieren [GDS+13]. Aus den Ergebnissen der Studie *Systems Engineering in der industriellen Praxis* lassen sich hierfür unter anderem folgende Gründe ableiten: Nicht eindeutige Begriffsabgrenzung, die unzureichende Bereitstellung von Einführungs- und Entwicklungsmethoden, die fehlende Adaptierbarkeit von Systems Engineering und fehlende SE-Expertise in den Unternehmen [Arm05], [FH14], [Gau13], [GDS+13].

Gepaart mit den Eigenschaften des Maschinenbaus wiegen diese Punkte umso schwerer. Die von der Mechanik geprägten Unternehmen müssen sich dem Thema parallel zum Alltagsgeschäft nähern. Bedingt durch ihre begrenzten Ressourcen ist der Zugang und der Aufbau von Systems Engineering Expertise besonders mühsam. Weiterhin ist die Branchenstruktur des Maschinenbaus sehr heterogen, so dass auch der Systems Engineering Bedarf von Unternehmen zu Unternehmen ebenfalls verschieden ist [Gau13], [VM14]. Die Unternehmen müssen die Potentiale des Systems Engineering für ihren Bedarf zielorientiert nutzen können; dafür benötigen sie allerdings fundiertes Fachwissen über Systems Engineering, über das sie heute nicht verfügen.

Trotz der vorhandenen Barrieren haben viele Unternehmen des Maschinenbaus die Notwendigkeit für sich erkannt, ihre Produktentwicklung fachdisziplinübergreifend auszurichten. Sie sehen darin das Potential, die stetig steigende Komplexität ihrer Systeme zu beherrschen und die Chancen neuer Märkte zu nutzen [GDS+13]. Es ist zu beobachten, dass sich die Unternehmen der Branche nur langsam hauptsächlich aus der Entwicklungsabteilung heraus und nur punktuell dem Themenfeld SE nähern. Um aber eine Leistungssteigerung und somit einen Vorsprung im internationalen Wettbewerb zu erzielen bzw. zu sichern, gilt es fachdisziplinübergreifende Herangehensweisen im Maschinenbau zu etablieren [GP14], [LAW11].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der technologische Wandel und insbesondere die Informations- und Kommunikationstechnologie die Produkte im Maschinenbau und damit auch die Produktentstehung verändert.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher eine Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau. Die Systematik richtet sich an die Leitung der Produktentstehung von Maschinenbauunternehmen, z.B. Entwicklungsleiter². Es gilt die Unternehmen dabei zu unterstützen, die Nutzenpotentiale des Systems Engineering für ihren Bedarf zu erkennen und auszuschöpfen. Nicht das grundsätzlich Mögliche, sondern das für die spezifische Situation Notwendige soll erkannt und praktikabel im Unternehmen eingesetzt werden.

Die Systematik soll sich aus sich aus vier Bestandteilen zusammensetzen. Als Fundament sollen **Nutzenpotentiale des Systems Engineering** im Maschinenbau dienen. Außerdem soll ein **Vorgehensmodell** die Ableitung und Umsetzung eines praktikablen und bedarfsgerechten Systems Engineering Leitfadens ermöglichen. Das Vorgehensmodell soll die Grundlage schaffen, neue Prozessschritte, Methoden und Rollen schrittweise und zielorientiert im Unternehmen zu implementieren. Eine Methode zur **Bedarfsanalyse** soll hierzu die Identifikation von Schwachstellen und Verbesserungspotentialen im Themenfeld Systems Engineering in einem Unternehmen ermöglichen. Ein weiterer Bestandteil der Systematik soll ein **Werkzeugkoffer Systems Engineering** sein. Dieser soll Prozessschritte, Methoden und Rollen sowie ihre Zusammenhänge vor dem Hintergrund der Charakteristika des Maschinenbaus bereitstellen und somit das benötigte Expertenwissen leicht verständlich verfügbar machen. Die Prozessschritte und Methoden sollen über die Nutzenpotentiale SE mit den Problemstellungen aus dem Maschinenbau verknüpft sein.

² Es wird im Folgenden die maskuline Form verwendet und zwar ausschließlich wegen der einfachen Lesbarkeit.

1.3 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. In **Kapitel 2** wird die in Abschnitt 1.1 dargelegte Problematik konkretisiert. Hierzu werden zunächst relevante Begriffe definiert. Betrachtungsgegenstand der Arbeit sind mittelständische Unternehmen des Maschinenbaus sowie verwandter Branchen. Daher werden zunächst die Charakteristika des deutschen Maschinen- und Anlagebaus und ihrer Marktleistung herausgearbeitet. Anschließend werden fortgeschrittene mechatronische Systeme beleuchtet und die damit einhergehenden Herausforderungen bei der Entwicklung derartiger Systeme herausgestellt. Ferner wird die interdisziplinäre Produktentwicklung betrachtet, hierzu wird die Produktentwicklung in die Entstehung von Marktleistungen eingeordnet und ein Überblick über etablierte Entwicklungsmethodiken bereitgestellt. Im Zuge dessen werden die Grenzen der etablierten Entwicklungsmethodiken herausgestellt und Systems Engineering als möglicher Ansatz identifiziert und untersucht. Ergänzend wird die Produktentwicklung mit Hilfe eines Models zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung im Hinblick auf die Unternehmensstrategie, -prozesse und IT-Unterstützung eingeordnet. Im Anschluss erfolgt in einer Problemabgrenzung die Zusammenfassung der grundlegenden Handlungsfelder. Die Problemanalyse schließt mit der Ableitung von Anforderungen an die angestrebte Systematik.

Gegenstand von **Kapitel 3** ist die Analyse des Stands der Technik. Vor dem Hintergrund der abgeleiteten Anforderungen werden Ansätze vorgestellt, die die Thematik der vorliegenden Arbeit aufgreifen und sich für die Erfüllung der formulierten Anforderungen eignen. Zunächst werden ausgewählte Methoden zur Bedarfsanalyse untersucht, die die Ermittlung von Verbesserungspotentialen in der Entwicklung unterstützen. Die strukturierte Bereitstellung von relevanten Ansätzen und die Verknüpfung mit Problemstellungen der Unternehmen sind Grundlage für die erfolgreiche Anwendung, daher werden Ansätze zur Bereitstellung von Methoden und Prozessen im SE analysiert. Ferner werden Ansätze zur Planung und Verbesserung von Entwicklungsprozessen sowie zur Einführung von SE beleuchtet. Abschließend werden die dargestellten Ansätze hinsichtlich der in Kapitel 2 formulierten Anforderungen bewertet und der resultierende Handlungsbedarf skizziert.

Kapitel 4 umfasst die *Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau*. Dieses Kapitel bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Eingangs wird ein Überblick über die Systematik gegeben. In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Bestandteile der Systematik näher vorgestellt. Das Fundament der Systematik bilden die Nutzenpotentiale Systems Engineering. Nachfolgend werden im Vorgehensmodell Tätigkeiten zur Anwendung der Systematik und ihrer Bestandteile erläutert. Im Anschluss wird die Bedarfsanalyse sowie der Werkzeugkoffer Systems Engineering dargestellt.

Die Systematik wird in **Kapitel 5** an einem Validierungsbeispiel vorgestellt. Das Beispielprojekt wurde mit einem Anbieter für Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik durchgeführt, dessen Kunden sind vornehmlich Maschinen-

bauunternehmen. Das mittelständische Unternehmen ist mit der stetigen Weiterentwicklung seiner Marktleistung konfrontiert, insbesondere von einst mechanisch geprägten Produkten hin zu interdisziplinären Systemlösungen. Anhand des Validierungsbeispiels wird die Erfüllung der aufgestellten Anforderungen überprüft und die Anwendbarkeit der Resultate herausgestellt. 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.

Der **Anhang** stellt ergänzende Informationen zur Systematik bereit.

2 Problemanalyse

Ziel der Problemanalyse sind Anforderungen an eine Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau. Dazu werden in Abschnitt 2.1 wesentliche Begriffe der Arbeit definiert und abgegrenzt. In der vorliegenden Arbeit stehen mittelständische Unternehmen des deutschen Maschinenbaus sowie verwandte Branchen im Fokus der Betrachtung. Daher werden in Abschnitt 2.2 die Charakteristika des Maschinenbaus skizziert. In Abschnitt 2.3 werden fortgeschrittene mechatronische Systeme sowie deren Funktionsweise vorgestellt. Ergänzend wird aufgezeigt, welche Herausforderungen bei der Entwicklung derartiger Systeme existieren. Anschließend wird in Abschnitt 2.4 die interdisziplinäre Produktentwicklung erörtert und die Lücke zwischen dem Bedarf und der Leistungsfähigkeit etablierter Entwicklungsmethodiken aufgezeigt. Vor diesem Hintergrund wird in Abschnitt 2.5 das Thema Systems Engineering erläutert und das Spannungsfeld zwischen Nutzen und Hindernissen in der Anwendung thematisiert. In Abschnitt 2.6 wird die Produktentwicklung im Sinne der zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung eingeordnet. In Abschnitt 2.7 werden die wesentlichen Herausforderungen zur Ausarbeitung der Systematik erörtert, aus welchen in Abschnitt 2.8 die Anforderungen an die Systematik folgen.

2.1 Begriffsdefinitionen

Gegenstand dieser Arbeit ist eine *Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau*.

Der Begriff **Systematik** orientiert sich an der Definition einer Entwicklungssystematik nach DUMITRESCU, sie umfasst ein universelles Rahmenwerk, das ein Vorgehensmodell sowie geeignete Hilfsmittel zur erfolgreichen Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Entwicklungsleitfäden bereitstellt. Das Vorgehensmodell strukturiert den Prozess nach aufgabenspezifischen Gesichtspunkten. Hilfsmittel können bspw. Strukturierungsrahmen, Methoden oder Werkzeuge sein [Dum11, S. 6], [Han55, S. 36], [Hub76, S. 74].

Eine Methode bezeichnet die Beschreibung eines regelbasierten und planmäßigen Vorgehens, nach dessen Vorgabe bestimmte Aktivitäten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen. Methoden fokussieren zielorientiert die Lösung eines Problems oder einer Aufgabenstellung. Sie bieten Empfehlungen für die Abfolge bestimmter Aktivitäten an und die Art und Weise, in der diese durchzuführen sind [Pon07, S. 15], [Lin09, S. 57f.]. Methoden lassen sich nicht in klar definierte Klassen und Hierarchien strukturieren. Eine modular und vernetzte Zuordnung unterstützt eine flexible Auswahl, Anpassung und Kombination von Methoden [Lin09, S. 57f.].

Für viele Methoden stehen unterstützende Werkzeuge zur Verfügung, welche die Anwendung effektiver und effizienter machen sollen. Das Verständnis des Begriffs Werkzeug

reicht von einfachen Hilfsmitteln, wie z.B. Formblättern und Checklisten, bis hin zu komplexer Software, beispielsweise zur Simulation. Werkzeuge beeinflussen den Erfolg einer Methodenanwendung maßgeblich [Pon07, S. 15].

Der Begriff Entwicklungssystematik grenzt sich von der Entwicklungsmethodik in zwei Punkten ab: (1) In die Entwicklungsmethodik fließen denk- und arbeitspsychologische Untersuchungen ein und (2) betrachtet zusätzlich organisatorische Aspekte [PBF+07, S. 10f.]. Beide Aspekte werden in einer Entwicklungssystematik ausgespart [Dum11, S. 6].

Die Systematik soll den Bedarf der Unternehmen berücksichtigen, dieser wird als das in einer bestimmten Lage Benötigte oder Gewünschte definiert [Dud15]. **Bedarfsgerecht** bedeutet dem Bedarf entsprechend. Im Kontext der Arbeit gilt es die Potentiale des Systems Engineering im Hinblick auf den Bedarf eines Unternehmens zielorientiert zu nutzen. Nicht das grundsätzlich Mögliche, sondern das für die spezifische Situation Notwendige soll erkannt und praktikabel im Unternehmen eingesetzt werden.

Systems Engineering versteht sich als durchgängige, fachdisziplinübergreifende Disziplin zur Entwicklung technischer Systeme. Diese Disziplin hat den Anspruch alle relevanten Aspekte in die Betrachtung miteinzubeziehen und stellt das multidisziplinäre System in den Mittelpunkt. SE umfasst dabei die Gesamtheit aller Entwicklungsaktivitäten (vgl. Abschnitt 2.5) [GDS+13, S. 435]. Das INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE) definiert SE wie folgt:

„Systems Engineering ist ein interdisziplinärer Ansatz und soll die Entwicklung von Systemen methodisch ermöglichen. SE fokussiert ein ganzheitliches und zusammenwirkendes Verständnis der Stakeholder Anforderungen, der Entdeckung von Lösungsmöglichkeiten und der Dokumentation von Anforderungen sowie das Synthetisieren, Verifizieren, Validieren und die Entwicklung von Lösungen. Das gesamte Problem wird währenddessen von der Konzeptentwicklung bis zur Systementwicklung betrachtet. Das Systems Engineering stellt hierfür geeignete Methoden, Prozesse und Best Practices bereit“ [INC15, S. 11].³

Die **Entwicklung** umfasst die Gesamtheit aller Tätigkeiten zur Definition, Lösung und Realisierung einer technischen Aufgabe, deren Resultat ein technisches System ist [Sau06, S. 19] (vgl. Abschnitt 2.4). Unter (**Entwicklungs**)leitfäden wird unter Anlehnung an den Ariadnefaden⁴ für Vademekum eine

³ Aus dem Englischen übersetzt

⁴ Der Begriff leitet sich von der griechischen Sagengestalt Ariadne ab, die Theseus ein Wollknäuel gibt, das ihn aus dem Labyrinth wieder herausführt (*bildungssprachlich*): etwas, was jemanden durch Wirrnis hindurchleitet, ihm aus einer unüberschaubaren Situation heraushilft [Dud17-ol].

„kurz gefasste Darstellung zur Einführung in ein Wissensgebiet verstanden“ [Dud17-ol].

Im Kontext der Arbeit soll der Leitfaden die Entwickler bei der fachdisziplinübergreifenden Zusammenarbeit unterstützen und durch das komplexe Sachgebiet Systems Engineering weisen, so dass sie sich im Sachgebiet hindurchfinden und ihr Ziel erreichen können. Der Leitfaden geht über eine reine Prozessbeschreibung hinaus, indem wichtige Informationen und Zusammenhänge bereitgestellt und Handlungshinweise für typische Maßnahmen zur Implementierung und Hinweise zur Orientierung angeboten werden.

Im Fokus der Arbeit steht die Entwicklung mechatronischer Systeme im **Maschinenbau** und verwandter Branchen (vgl. Abschnitt 2.3). Als Grundlage soll die Definition des Statistischen Bundesamts dienen, die den Maschinenbau wie folgt definiert:

„[...] umfasst den Bau von Maschinen, die mechanisch oder durch Wärme auf Materialien einwirken oder an Materialien Vorgänge durchführen (wie Bearbeitung, Besprühen, Wiegen oder Verpacken), einschließlich ihrer mechanischen Bestandteile, die Kraft erzeugen und anwenden, sowie spezieller Teile dafür. Hierunter fallen feste, bewegliche oder handgeführte Vorrichtungen, ungeachtet, ob sie für Industrie und Gewerbe, den Bau, die Landwirtschaft oder für den Einsatz im Haushalt bestimmt sind. [...] umfasst ferner die Herstellung von Hebezeugen und Fördermitteln“ [Sta08-ol, S. 291].

Besonderes Augenmerk liegt dabei neben den Produkteigenschaften auf den organisatorischen Eigenschaften der Unternehmen, die durch den Begriff **Mittelstand** zum Ausdruck kommen. Der Begriff ist eine Besonderheit im deutschsprachigen Raum, zur Charakterisierung des Mittelstands können quantitative Kriterien und insbesondere besondere Strukturen genutzt werden (vgl. Abschnitt 2.2). Das INSTITUT FÜR MITTELSTANDSFORSCHUNG BONN (IfMB) legt folgende Definition zu Grunde:

„In einem mittelständischen Unternehmen

- *halten bis zu zwei natürliche Personen oder ihre Familienangehörigen (direkt oder indirekt) mindestens 50 % der Anteile eines Unternehmens,*
- *diese natürlichen Personen gehören der Geschäftsführung an.*

Die Begriffe Mittelstand, Familienunternehmen, Eigentümerunternehmen und familiengeführte Unternehmen sind nach Definition des IfM Bonn als Synonyme anzusehen.

Die Schnittmenge von mittelständischen Unternehmen/ Familienunternehmen und unabhängigen kleinen und mittleren Unternehmen

(KMU⁵) ist sehr groß. Zugleich zählen aber auch Unternehmen mit 500 und mehr Beschäftigten oder mehr als 50 Mio. € Jahresumsatz zum Mittelstand/Familienunternehmen, wenn sie die oben genannten Kriterien erfüllen“ [Ins16-ol].

2.2 Maschinenbau in Deutschland

Die zu erarbeitende Systematik soll maßgeblich den Maschinenbau und verwandte Branchen bei der Gestaltung ihrer interdisziplinären Entwicklung unterstützen. Vor diesem Hintergrund wird zunächst die Bedeutung des deutschen Maschinenbaus für die deutsche Wirtschaft vorgestellt. Anschließend werden der Wandel der Produkte und die damit einhergehenden Chancen und Herausforderungen erörtert.

Bedeutung für die deutsche Wirtschaft

Der **Maschinenbau** ist der Industriezweig mit den meisten Beschäftigten in Deutschland: Mit einer Zunahme von über 15.000 Stellen erreichte der Beschäftigtenstand der Branche 2013 ca. 986.000 Personen in der Stammbelegschaft. Diese Zahl ist 2016 nochmals auf 1.014 Tsd. Beschäftigte gestiegen. Gemessen am Branchenumsatz liegt der Maschinenbau mit rund 219 Milliarden Euro auf Rang zwei hinter dem Fahrzeugbau (297 Mrd. Euro) im Jahr 2016. Somit ist der Maschinenbau einer der wichtigsten Wachstumstreiber und Arbeitgeber in der deutschen Industrie [BMW15-ol], [VDM14, S. 5ff.], [VDM17, S. 7].

Darüber hinaus zeichnet sich der Maschinenbau durch seine hohe Innovationsfähigkeit aus [VDM14, S. 5f]. 2013 haben 52% der Unternehmen aus der Branche Produktinnovationen hervorgebracht (der Anteil der Unternehmen mit Produktinnovationen in der Gesamtwirtschaft lag 2013 hingegen bei 28%). Der Umsatzanteil mit Marktneuheiten lag 2012 bei 8%, 2013 bei 5,8% [ZWE15, S. 1ff.]. 97% der Unternehmen definieren sich als Innovationsführer oder frühe Innovationsfolger [VM14, S. 7]. Neben der hohen Innovationsfähigkeit und ihrer führenden Position im Export verstehen sich viele deutsche Maschinen- und Anlagenbauer als Technologieführer. Nach einer Studie von MCKINSEY & COMPANY und dem VDMA sehen sich 99% der 333 befragten Unternehmen als Premiumanbieter [VM14, S. 28]. Gleichzeitig sind deutsche Unternehmen einem wachsenden Wettbewerbsdruck ausgesetzt. Ein Grund dafür liegt in der steigenden Produktqualität und niedrigerer Preise ausländischer Wettbewerber [VM14, S. 44]. Nach der Studie wollen sich die deutschen Maschinenbauer aber auch in Zukunft vor allem von ihrem heimischen Standort aus der internationalen Konkurrenz stellen [VM14, S. 26f.].

Eigenschaften und Charakteristika – Mittelstand

⁵ Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) werden vom IfMB in Anlehnung an die Definition der EU Kommission, in drei Größenklassen differenziert: Kleinstunternehmen, kleine Unternehmen und mittlere Unternehmen. Kriterien sind die Zahl der Beschäftigten sowie der Umsatz in Euro pro Jahr.

Der deutsche Maschinenbau ist stark **mittelständisch** geprägt. Dies lässt sich zum einen aus der Anzahl der Beschäftigten und zum anderen insbesondere durch typische Merkmale ableiten. Rund 87 % der 6.400 Unternehmen haben weniger als 250 Beschäftigte. Ca. 67 % der Unternehmen haben weniger als 100 Beschäftigte; der Branchendurchschnitt liegt bei 175 Beschäftigten. Über 50 % der ca. 6.400 Unternehmen sind gründer- oder nachfolgergeführte Unternehmen, die häufig eine stark mittelständische oder sogar familiäre Unternehmenskultur aufweisen [EDB+15, S. 22], [BMW14, S. 4]. Neben hoher Qualität, Innovation und technologischem Führungsanspruch (Technologieführung), ist eine starke Identifikation mit dem Produkt ein charakterisierender Wert dieser Unternehmen [EDB+15, S. 22].

Folgende Merkmale verdeutlichen die Unternehmensstrukturen, die Unternehmen aus dem Mittelstand von großen Unternehmen unterscheiden [Heß06, S. 28ff.], [Hol09, S. 13ff.], [EM13, S. 166], [Ben13, S.11ff.], [EDB+15, S. 22]

- Unternehmertum: Mittelständische Unternehmen sind meist inhabergeführt. Die Geschäftsführung ist stark in die regulären Abläufe involviert und es herrscht ein personengebundenes Vertrauensverhältnis zwischen Mitarbeitern und Inhaber(n).
- Hohe Flexibilität: Im Allgemeinen weisen die Organisationsstrukturen flache Hierarchien auf. Die Informationswege sind kurz und es herrscht ein geringer Formalisierungsgrad. Entscheidungen können schnell getroffen und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden.
- Beschränkte Ressourcen: Die Unternehmen weisen eine geringe Eigenkapitalquote und geringe Kapitalintensität auf. Die eher geringe Beschäftigtenzahl führt zur Limitierung der Ressourcen im täglichen Entwicklungsgeschehen.
- Fachpersonal: Mittelständische Unternehmen verfügen über einen hohen Anteil an Fachkräften, beschäftigen aber auch einen vergleichsweise geringen Anteil Akademiker.
- Risikoavers: Die Unternehmen sind eher risikoavers, die Umsetzung von Unternehmensentwicklungen erfolgt eher in kleinen, verlässlichen Schritten.

Tabelle 2-1 stellt typische Unterschiede zwischen Klein- und Mittelunternehmen und Großunternehmen gegenüber.

Tabelle 2-1: Unterschiedliche Merkmale von Klein- und Mittelunternehmen im Vergleich zu Großunternehmen nach [EM13, S.166], [Heß06, S. 28ff.]

Bereich	Klein- und Mittelunternehmen	Großunternehmen
Unternehmensführung	<ul style="list-style-type: none"> • Eigentümer/Unternehmer • oft technisch orientierte Ausbildung • wenig Planung, viel Improvisation, schnelle Entscheidungen, nahe am Betriebsgeschehen • durch Funktionshäufung überlastet 	<ul style="list-style-type: none"> • Manager, oft Gruppenentscheidungen • fundierte Führungskenntnisse • gutes technisches Wissen in Fachabteilungen • umfangreiche Planung, oft träge Entscheidungswege z.T. fern vom Betriebsgeschehen • stark sachbezogene Arbeitsteilung
Personal	<ul style="list-style-type: none"> • überschaubare Zahl von Mitarbeitern mit geringem Akademiker-Anteil • meist breites Fachwissen und -können • Jeder kennt fast Jeden; meist hohe Arbeitszufriedenheit 	<ul style="list-style-type: none"> • große Zahl von Mitarbeitern • hoher Akademikeranteil • meist starke Spezialisierung • oft geringere Arbeitszufriedenheit
Organisation	<ul style="list-style-type: none"> • einfache Organisationsstruktur 	<ul style="list-style-type: none"> • komplexe, verzweigte Organisationsstruktur
Absatz	<ul style="list-style-type: none"> • spezialisiertes Angebot in schmalen Marktsegmenten 	<ul style="list-style-type: none"> • breites Angebot auch in breiten Marktsegmenten
F&E, Konstruktion	<ul style="list-style-type: none"> • bedarfsoorientiert bei Produkten und Verfahren, kaum oder keine Forschung • nach Erfindung schnelle Nutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • langfristige F&E-Abteilung, auch im Kontakt mit Grundlagenforschung • träge Umsetzung von Erfindungen, Neuerungen
Produktion	<ul style="list-style-type: none"> • arbeitsintensiv mit geringer Arbeitsteilung an Universalmaschinen • geringe Kostendegression bei steigendem Umsatz 	<ul style="list-style-type: none"> • kapitalintensiv mit hoher Arbeitsteilung an Spezialmaschinen • große Kostendegression bei steigendem Umsatz

Eigenschaften und Charakteristika – Wandel der Produkte

Die Marktleistung des Maschinenbaus setzt sich aus einer **Kombination von Produkten und Dienstleistungen** zusammen. Das Hauptaugenmerk liegt bisher aber auf dem Produkt. Hier handelt es sich typischerweise um Maschinen und Anlagen, die technologisch hochentwickelt und in einer engen Nische positioniert sind, z.B. Werkzeugmaschinen, Verpackungsmaschinen oder Nahrungsmittelmaschinen [Sim09, S. 86f.]. Es sind Investitionsgüter, bei denen Kundenwünsche und -nutzen im Vordergrund stehen; Kundenindividualität, veränderliche Rahmenbedingungen sowie vielfältige Stakeholder spielen dabei eine entscheidende Rolle. Der Maschinenbau differenziert sich dabei durch seine hohe Flexibilität. Ergänzend zum Produkt werden hauptsächlich klassische Dienstleistungen

wie Wartung und Montage angeboten [EDB+15, S. 23], [VM14, S. 31ff.]. Als **Schlüsselkompetenzen** gelten daher [EDB+15, S. 22]:

- die Produktentwicklung (technologisches Know-how),
- die Systemintegration (System- und Prozess-Know-how) inkl. Montage,
- Erfahrung mit der Kundenbranche (Nischenfokus).

Die Produkte des Maschinenbaus wurden lange durch die Mechanik dominiert. Erfolgsversprechende Produktinnovationen aus dieser Branche sind heute überwiegend mechatronische Systeme (vgl. Abschnitt 2.3). Hier lässt sich ein fortlaufender Wandel verzeichnen. Die zu beobachtende Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik ist ein wesentlicher Treiber einer stetigen Veränderung hin zu Systemen mit inhärenter Teilintelligenz [Dum10, S. 10ff.], [GAC+13, S. 17ff.], [EDB+15, S. 23], [BTW+15, S. 46], [AES+12, S. 7ff.]. Populäre Begriffe wie Intelligente Technische Systeme, Cyber-Physical Systems und Industrie 4.0 charakterisieren diesen Wandel [ASS+14, S. 21ff.]. Im Kontext der digitalen Transformation der Industrie setzen die Unternehmen des Maschinenbaus derzeit insbesondere auf die digitale Veredelung ihrer Nischenprodukte [EDB+15, S. 24]. Um aber auch zukünftig erfolgreich und wettbewerbsfähig zu bleiben gehen aus einer Studie des VERBANDS DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU und MCKINSEY von 2014 unter anderem aber weitere Handlungsempfehlungen an die Unternehmen hervor [VM14, S. 50ff.]:

- Ausbau des Aftersales-/Servicegeschäfts durch integrierte, innovative Lösungsangebote
- Standardisierung und Modularisierung unter Wahrung kundenspezifischer Angebote sowie neuer Geschäftsmodelle
- Kontinuierliche Optimierung des Produkt-/Portfoliowerts
- Exzellenz insbesondere in der heimischen Wertschöpfung
- Stringentes, risikodifferenziertes Projektmanagement vor allem im Lösungsgeschäft.

Eine besondere Bedeutung wird der **Produktentwicklung** zugesprochen. Laut einer ACATECH Studie von 2016 wird das Engineering⁶ zum zentralen Erfolgsfaktor für deutsche Unternehmen, um den Wandel im Kontext Industrie 4.0 erfolgreich zu gestalten. Engineering-Prozesse werden in diesem Zusammenhang als die technisch-orientierten Planungs-, Definitions-, Konzeptions-, Dokumentations- und Simulationsprozesse von Produkten und Services im gesamten Produkt- sowie Service-Lebenszyklus verstanden. Für

⁶ Die Befragten der Studie verstehen unter dem Begriff Engineering die Produktentwicklung, er wird in der Studie breiter ausgelegt und umfasst alle Phasen des Lebenszyklus.

das Engineering sogenannter smarter Produkte und Dienstleistungen sind neben methodischen Fertigkeiten auch Prozess-, Organisations- und IT-Werkzeug-Kompetenzen relevant [AH16, S. 22ff.].

Fazit: Der Maschinenbau spielt eine zentrale Rolle in der deutschen Wirtschaft. Er ist der wichtigste Wachstumstreiber und Arbeitgeber und zeichnet sich durch sein hohes Innovationspotential aus. Die Branche ist stark mittelständisch geprägt, daher unterscheidet sich der Maschinenbau organisatorisch wesentlich von anderen Branchen und Großunternehmen bzw. Konzernen. Die Produkte des Maschinenbaus zeichnen sich durch hohe Kundenindividualität aus, sie wurden lange durch die Mechanik dominiert. Es lässt sich ein fortlaufender Wandel der Erzeugnisse und Produktionssysteme über mechatronische Produkte hin zu Systemen mit inhärenter Teilintelligenz feststellen. Auch Markt- und Wettbewerbsbedingungen entwickeln sich dynamisch weiter; dies erfordert auch eine Weiterentwicklung der Unternehmen. Betroffen sind sowohl die angebotenen Marktleistungen als auch die Schlüsselkompetenzen, wie Produktentwicklung und Systemintegration. Bei der bedarfsgerechten Gestaltung neuer Entwicklungsleitfäden für den Maschinenbau sind sowohl die organisatorischen als auch die die Charakteristiken der Marktleistungen dieser Unternehmen zu berücksichtigen.

2.3 Fortschrittliche mechatronische Systeme

Erfolgsversprechende Produktinnovationen des Maschinenbaus lassen sich zunehmend durch den Begriff Mechatronik charakterisieren. Das Kunstwort aus der Kombination von Mechanik und Elektronik beschreibt das fachdisziplinübergreifende Zusammenwirken von Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik in den Erzeugnissen [VDI2206], [Ise07]. Die fortschreitende Weiterentwicklung und zunehmende Bedeutung der Informations- und Kommunikationstechnik führt zu einem fortschreitenden Wandel der Erzeugnisse hin zu Systemen mit inhärenter Teilintelligenz [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 eine Erläuterung mechatronischer Systeme und eine Charakterisierung der Weiterentwicklung dieser Systeme. Anschließend werden die mit dieser Weiterentwicklung einhergehenden Herausforderungen bei der Entwicklung dieser Systeme im Maschinenbau in Abschnitt 2.3.2 skizziert.

2.3.1 Von der Mechatronik zu fortschrittlichen mechatronischen Systemen

In der Literatur finden sich zahlreiche Definitionen des Begriffs „Mechatronik“ [Ise07, S. 3]. Als Grundlage dieser Arbeit dient die Definition der VDI-Richtlinie 2206

[VDI2206, S. 14], sie beruht auf den Arbeiten von HARASHIMA, TOMIZUKA und FUKUDA [HTF96, S. 1ff.] und definiert den Terminus wie folgt:

„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].

Trotz der großen Vielfalt mechatronischer Systeme, kann die Grundstruktur eines mechatronischen Systems auf vier Bestandteile zurückgeführt werden: Grundsystem, Sensorik, Aktorik und Informationsverarbeitung. Die Systeme sind in einer Umgebung eingebettet und können über entsprechende Schnittstellen mit dem Menschen sowie mit anderen Informationsverarbeitungen interagieren. Bild 2-1 zeigt die Grundstruktur eines mechatronischen Systems nach der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206, S. 14].

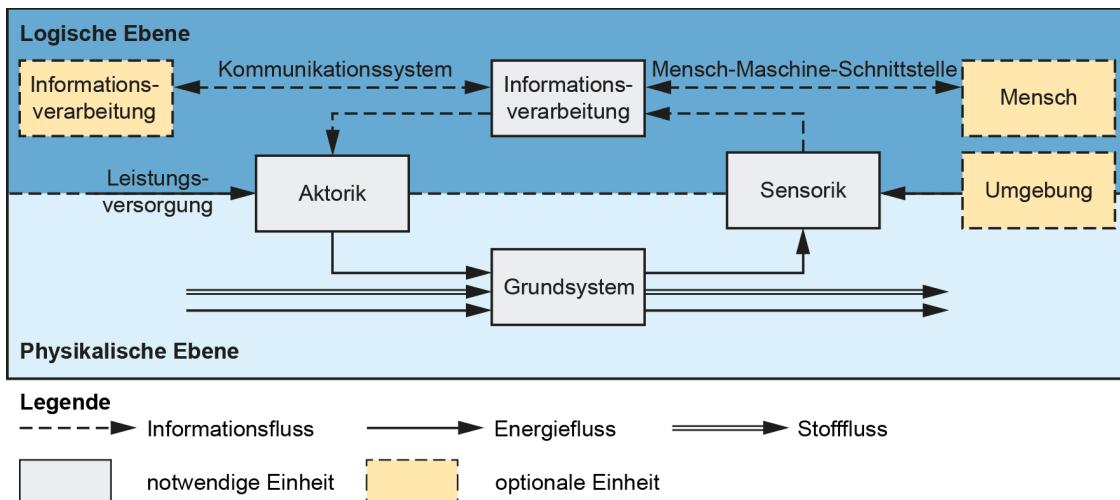


Bild 2-1: Grundstruktur eines mechatronischen Systems [VDI2206, S.14]

Das **Grundsystem** bildet das Kernelement der physikalischen Ebene. In der Regel handelt es sich um eine mechanische, elektromechanische, hydraulische oder pneumatische Struktur [GEK01, S. 27ff.], [GTS14, S. 27].

Sensoren erfassen sowohl ausgewählte Zustandsgrößen als auch äußere Einflüsse der Umgebung und übermitteln diese an die Informationsverarbeitung.

Die **Informationsverarbeitung** ermittelt darauf basierend erforderliche Reaktionsmaßnahmen, um den gewünschten Zustand des Grundsystems herzustellen.

Die ermittelten erforderlichen Einwirkungen werden durch **Aktoren** am Grundsystem umgesetzt [FGD+07, S. 935ff.], [GEK01, S. 28f.], [Kah13, S. 12ff.], [VDI2206, S. 14ff.].

Die beschriebenen Systemelemente sind über drei Flussarten miteinander verbunden [PBF+07]:

- **Stoffflüsse:** Der Austausch von Stoffen zwischen den Elementen mechatronischer Systeme wird als Stofffluss bezeichnet. Bsp.: Kühlflüssigkeit
- **Energieflüsse:** Energieflüsse stellen neben mechanischer und thermischer Energie auch elektrische Energie und Kenngrößen wie z.B. Kraft oder Strom dar.
- **Informationsflüsse:** Werden Informationen zwischen den Elementen mechatronischer Systeme ausgetauscht, ist die Verbindung als Signal- oder Informationsfluss zu beschreiben.

Die Art der **Informationsverarbeitung** prägt im Besonderen den Wandel von mechatronischen zu intelligenten technischen Systemen. Mechatronische Systeme verfügen nur über eine reaktive und relativ starre Informationsverarbeitung zwischen Sensorik und Aktorik. Fortschrittliche mechatronische System bis hin zu Intelligenten Technischen Systemen hingegen können diese gezielt modifizieren. Reaktive Wirkungsabläufe werden dabei nicht vollständig ersetzt, da die meisten existentiellen Systemmechanismen schon aus Gründen der Sicherheit reaktiv und reflexartig ablaufen müssen.

Diese abstrakte Sichtweise auf die Informationsverarbeitung intelligenter Systeme wird durch das aus der Kognitionswissenschaft stammende Dreischichtenmodell für die Verhaltenssteuerung veranschaulicht [Str98, S. 8ff.] (Bild 2-2): Die nicht-kognitive Regulierung enthält die kontinuierliche Steuerung und Regelung (motorischer Regelkreis) sowie Reflexe. Übertragen auf ein mechatronisches System wäre das beispielsweise die Sicherstellung des kontrollierten Bewegungsverhaltens eines Mehrkörpersystems, z.B. aktives Fahrwerk eines PKWs. Die assoziative Regulierung enthält u.a. Reiz-Reaktions-Mechanismen und Konditionierung. In einem technischen System würde die Reglerumschaltung – z.B. von einer Geschwindigkeits- auf eine Abstandsregelung – auf dieser Schicht veranlasst. Die kognitive Regulierung weist typische Funktionen der künstlichen Intelligenz wie Zielmanagement, Planung und Handlungssteuerung auf. Eine technische Realisierung auf dieser Schicht wäre die Selbstoptimierung, wonach ein System aufgrund geänderter Betriebsbedingungen automatisch seine Ziele modifiziert und dann sein Verhalten selbstständig an die veränderten Ziele anpasst [GSR14, S.10f], [GCD15, S. 4].

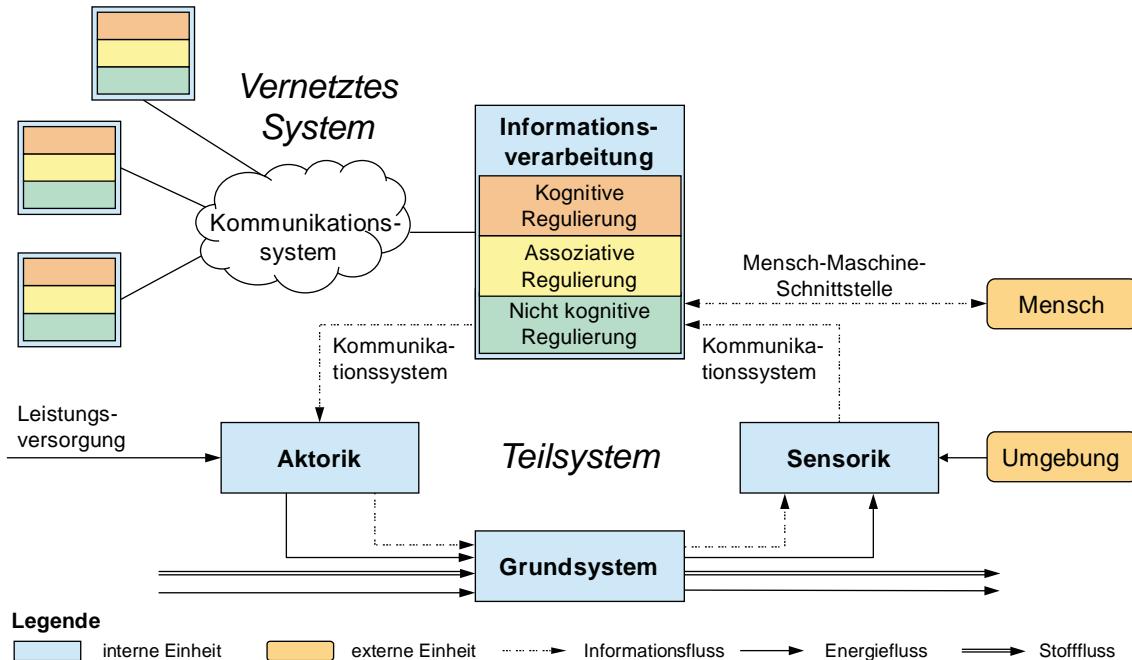


Bild 2-2: Von mechatronischen Systemen über intelligente Teilsysteme hin zum vernetzten, Cyber-physischen System [Gau11, S. 25], [DJG12, S. 25]

Die **Vernetzung** der Systeme ist ein weiterer zentraler Aspekt zur Beschreibung des Innovationssprungs. Vernetzung bedeutet, dass einzelne Systeme – die häufig geographisch verteilt sind – untereinander kommunizieren und kooperieren. Erst das Zusammenwirken der Einzelsysteme erschließt die Funktionalität des vernetzten Systems. Die Vernetzung sowie die Einzelsysteme des Systems sind dabei nicht starr, sondern dynamisch und veränderlich im Sinne der Gesamtfunktionalität. Die Verbindung der Konzepte mit der Bezeichnung Internet der Dinge und Internet der Daten und Dienste als ein entscheidender Treiber zum dargestellten Wandel der Systeme.

Das **Internet der Dinge** beschreibt die Kommunikation physischer Objekte, z.B. Werkstücke, Maschinen, Betriebsmittel, Lager- und Transportsysteme und Fertigungsleitstand, die inhärente Teilintelligenz aufweisen, über Internet oder andere Netze. Dies wird um internetbasierten Dienstleistungen und der Verfügbarkeit und Verarbeitung von großen Datenmengen ergänzt. Resultat ist neben dem Wandel der Sachleistungen die Veränderung zu einer virtuellen Geschäftswelt. Hieraus eröffnen sich vielfältige Möglichkeiten für neuartige Kombinationen aus innovativen Sach- und Dienstleistungen [ASS14], [GCD15, S. 4].

Fazit: Das enge Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik und Softwaretechnik ist zunehmend die Grundlage für erfolgsversprechende Produktinnovationen aus dem Maschinenbau. Der Begriff Mechatronik bringt dies zum Ausdruck. Durch die fortlaufende Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik zeichnet sich eine Weiterentwicklung der Erzeugnisse und Produktionssysteme des Maschinenbaus hin zu Systemen mit inhärenter Teilintelligenz. Diese fortgeschrittenen mechatronischen Sys-

teme zeichnen sich dadurch aus, dass sie adaptiv, robust, vorausschauend und benutzungsfreundlich sind. Sie können global über das Internet miteinander kommunizieren und im Verbund agieren. Für die Unternehmen ergeben sich hieraus mannigfaltige Chancen und gleichzeitig Handlungsbedarf, z.B. zur Weiterentwicklung ihrer Sachleistung oder für neuartige Kombinationen aus innovativen Sach- und Dienstleistungen.

2.3.2 Herausforderungen bei der Entwicklung von fortschrittlichen mechatronischen Systemen im Maschinenbau

Der dargestellte Wandel der Systeme zeigt, dass die Produkte eine zunehmende Komplexität aufweisen. Dies wirkt sich sowohl auf die Produkte als auch auf die zugehörigen Entwicklung- und Fertigungsprozesse, die Organisationsstrukturen, sowie das Unternehmensumfeld aus [EM13, S. 49], [GCD15, S. 13ff.], [VDI2206], [AH16, S. 22ff.].

Experten aus der Industrie heben in einer Studie insbesondere die wachsende Interdisziplinarität der Systeme, eine hohe Schnittstellenvielfalt zwischen den verschiedenen Systemen und Fachbereichen sowie die steigende Komplexität des Anforderungsmanagements und die Beherrschung der Produktvarianz als Herausforderungen hervor [GDC+13, S. 432ff.].

Wachsende Interdisziplinarität: Mechatronische Systeme müssen aus dem Blickwinkel mehrerer Fachdisziplinen betrachtet werden [VDI2206], [GDS+13]. Die Produktentwicklung ist eine gemeinschaftliche und multidisziplinäre Aufgabe, weshalb die Kommunikation und Kooperation über die Grenzen einzelner Fachdisziplinen hinweg ein entscheidender Erfolgsfaktor ist [AES+12, S. 7ff.]. Allerdings verfügen die verschiedenen Fachgebiete über spezifische Vorgehensweisen, Methoden und Denkmuster, dies erschwert die Zusammenarbeit erheblich. Um die Komplexität beherrschbar zu machen, ist ein einheitliches Verständnis über die Aufgaben und die Koordination der Entwicklungsaktivitäten essentiell [GDS+13, S. 16f.].

Hohe Schnittstellenvielfalt: Die arbeitsteilige Entwicklung komplexer Systeme führt zu einer hohen Anzahl vielfältiger Schnittstellen in den Produkten und in den entsprechenden Produktentstehungsprozessen. Die Herausforderung besteht darin, die Schnittstellen frühzeitig zu erkennen und zu definieren sowie transparent zu dokumentieren [GDS+13, S. 16f.].

Steigende Anforderungskomplexität: Der Umgang mit der Vielzahl, Vernetzung und Dynamik der Anforderungen an die Systeme stellt die Unternehmen vor Schwierigkeiten. Betroffen sind alle Prozesse von der Aufnahme der Anforderungen bis hin zur Absicherung der Produkteigenschaften [GDS+13, S. 16f.].

Zunehmende Produktvarianz: Kundenspezifische Lösungen oder individualisierte Produkte führen zu einer steigenden Produktvarianz. Zur Sicherung ihrer Wettbewerbsfähigkeit gilt es eine hohe Variantenvielfalt nach außen intern zu beherrschen [GDS+13, S. 16f.].

Für den mittelständisch geprägten Maschinenbau erfordern diese Herausforderungen eine Neugestaltung des Entwicklungsprozesses insbesondere in Bezug auf die interdisziplinäre Zusammenarbeit über Abteilungsgrenzen hinweg. Die Produktentwicklung ist traditionell vom Konstruktionsprozess dominiert. In diesem Bereich sind die Unternehmen sehr gut aufgestellt; die Prozesse, Methoden und Werkzeuge sind ihrem Bedarf entsprechend und ausgereift. Handlungsbedarf besteht allerdings bei Integration weiterer Entwicklungsspezialisten (z.B. aus der Elektronik und Softwaretechnik) besonderes in der frühen Phase der Konzipierung. Das Gesamtsystem wird bisher in der Regel nicht mit allen beteiligten Disziplinen spezifiziert [Bes09, S. 6]. Schnittstellen werden nicht ausreichend spezifiziert und dokumentiert, der Umgang mit Schnittstellen basiert oftmals auf Erfahrungen der Mitarbeiter. Auch Zwischenergebnisse werden nicht konsequent detailliert kommuniziert und gemeinsam vereinbart. Die fehlende systematische Synchronisation der Projektergebnisse führt zu Unstimmigkeiten, die nicht selten erst in der Systemintegration erkannt werden. Folge sind höhere Kosten sowie Einbußen in der Zeit und Budgetplanung. Es kann auch Qualitätsprobleme verursachen [Bes09, S. 6], [EM13, S. 191ff.].

Im Hinblick auf die steigende Anforderungskomplexität ist die Zusammenarbeit insbesondere mit dem Vertrieb und Produktmanagement nur schwach vorhanden und in der Regel unsystematisch. Dies führt zu Missverständnissen in der Interpretation der gestellten Anforderungen und zu Unklarheiten in der Ziel- bzw. Aufgabendefinition [EM13, S. 191ff.]

Fazit: Heutige und zukünftige Produkte bzw. Marktleistungen zeichnen sich durch eine wachsende Interdisziplinarität und Vernetzung aus. Für den Maschinenbau bedeutet dies konkret, dass sie ihren Entwicklungsprozess neu ausrichten müssen. Mehr Disziplinen als bisher müssen bereits ab den frühen Phasen in die Entwicklung eingebunden werden; Produktstrategien müssen neu durchdacht und Architekturen gemeinsam konzipiert und in enger Abstimmung entwickelt werden. Hier bedarf es einer Unterstützung bei der neuen Ausrichtung des Entwicklungsprozesses in den Unternehmen.

2.4 Interdisziplinäre Produktentwicklung

Der Wandel der Erzeugnisse des Maschinenbaus stellt besondere Herausforderungen an die Produktentwicklung der Unternehmen. Vor diesem Hintergrund wird die Produktentwicklung im Folgenden zunächst in das Referenzmodell der Strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen (Kombination aus Sach- und Dienstleistung) nach GAUSEMEIER eingeordnet (Abschnitt 2.4.1). Anschließend gibt Abschnitt 2.4.2 einen Überblick in etablierte Entwicklungsmethodiken, fachdisziplinspezifisch sowie fachdisziplinübergreifend.

2.4.1 Referenzmodell zur Entwicklung von Marktleistungen

Der Prozess der Produktentstehung spannt sich von Produkt- bzw. Geschäftsidee bis zum Serienanlauf auf (Start of Production – SOP) [GP14, S. 25]. Er weist dabei die Hauptaufgabenbereiche Strategische Produktplanung, Produktentwicklung, Dienstleistungsentwicklung und Produktionssystementwicklung auf. Er ist nicht als stringente Folge von Phasen und Meilensteinen zu betrachten, sondern vielmehr als ein Wechselspiel von Aufgaben, die sich in vier Zyklen⁷ gliedern lassen [GAD+14, S. 11ff.].

Erster Zyklus – Strategische Produktplanung

Dieser Zyklus beschreibt das Vorgehen vom Finden der Erfolgspotentiale der Zukunft bis zur Ableitung versprechender Produktkonzeptionen. Der Zyklus umfasst die Aufgabenbereiche Potentialfindung, Produktfindung, Geschäftsplanung und Produktkonzipierung. Im Rahmen der Potentialfindung gilt es, die Erfolgspotentiale der Zukunft zu erkennen und entsprechende Handlungsoptionen zu ermitteln. Die anschließende Produktfindung adressiert die Suche und Auswahl neuer Produkt- und Dienstleistungsideen zur Erschließung der erkannten Erfolgspotentiale. Gegenstand der Geschäftsplanung ist die Erstellung einer Geschäftsstrategie und damit verbunden die Entwicklung eines Geschäftsmodells sowie der Produktstrategie. Diese Aspekte münden in einen Geschäftsplan, der den Nachweis erbringt, ob ein attraktiver Return on Investment zu erzielen ist [GAD+14, S. 11f.], [GP14, S. 25].

Zweiter Zyklus – Produktentwicklung, Virtuelles Produkt

Zu den Aufgaben der Produktentwicklung gehören die Produktkonzipierung, Entwurf und Ausarbeitung sowie die Produktintegration. Die Produktkonzipierung bildet die Schnittstelle zwischen der strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung. Ziel der Produktkonzipierung ist die Prinzipiösung für das angestrebte Produkt. Diese bildet den Ausgangspunkt für den disziplinspezifischen Entwurf sowie die Ausarbeitung und Integration der Ergebnisse zu einer verifizierten Gesamtlösung (vgl. Abschnitt 2.4.2) [GP14, S. 25f.].

Dritter Zyklus – Dienstleistungsentwicklung

Gegenstand der Dienstleistungsentwicklung ist die Ausarbeitung einer Dienstleistungs-idee hin zu einer Marktleistung. Dies umfasst die Aufgaben Dienstleistungskonzipierung, Dienstleistungsplanung und Dienstleistungsintegration [GAD+14, S. 13f.], [GEA16, S. 14].

⁷ Das 3-Zyklen-Modell zur Beschreibung des Produktentstehungsprozesses wurde um den vierten Zyklus Dienstleistungsentwicklung erweitert. Damit wird der steigenden Bedeutung von Dienstleistungen im Kontext der industriellen Produktion Rechnung getragen [GAD+14, S. 11ff.], [GP14, S. 25ff.].

Vierter Zyklus – Produktionssystementwicklung

Ausgehend von der Konzipierung des Produktionssystems sind die vier Aspekte Arbeitsablaufplanung, Arbeitsmittelplanung, Arbeitsstättenplanung und Produktionslogistik (Schwerpunkt: Materialflussplanung) im Verlauf dieses vierten Zyklus weiter zu konkretisieren.

Produkt-, Dienstleistungs- und Produktionssystementwicklung sind, wie in Bild 2-3 visualisiert, parallel und eng aufeinander abgestimmt voranzutreiben. Nur so wird sichergestellt, dass auch alle Gestaltungsoptionen einer leistungsfähigen und innovativen Marktleistung ausgeschöpft werden [GCD15, S. 24].

Von der Geschäftsidee...

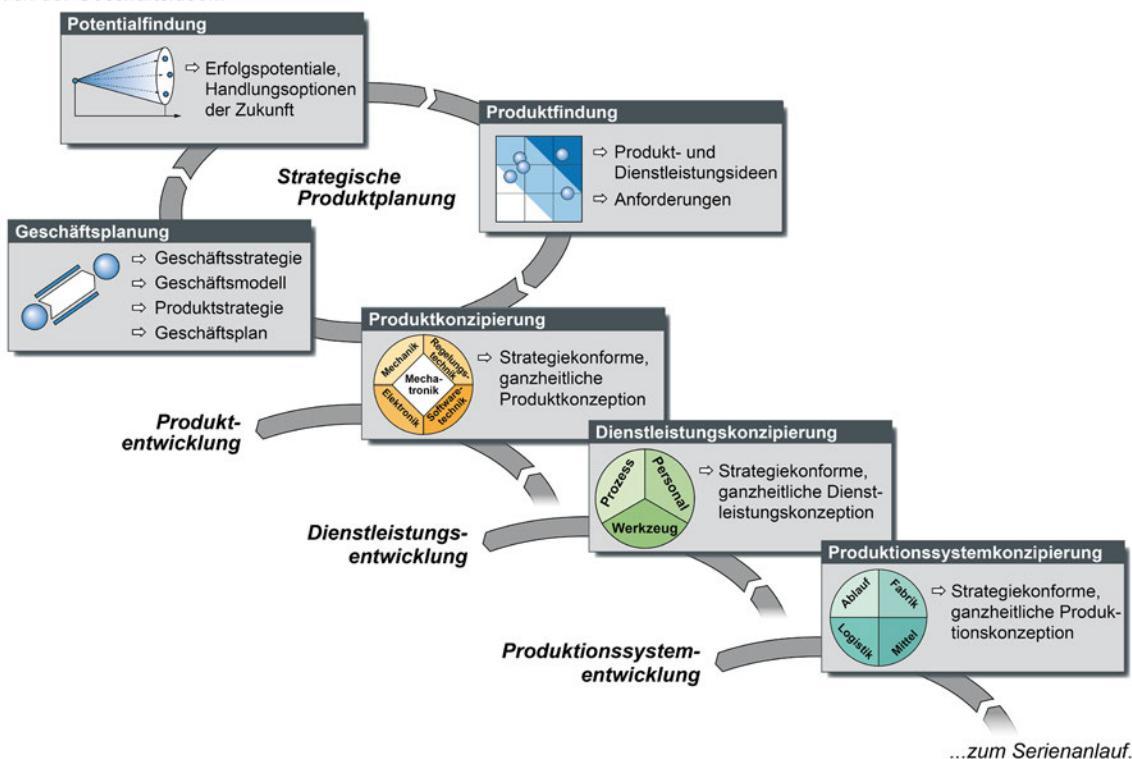


Bild 2-3: Referenzmodell der strategischen Planung und integrativen Entwicklung von Marktleistungen (die 3 Entwicklungszyklen sind nur angedeutet) [GEA16, S. 14f.]

Fazit und Einordnung: Der Wandel der Erzeugnisse beeinflusst die gesamte Produktentstehung. Die Notwendigkeit, das System als Ganzes zu betrachten, zu beherrschen, zu entwickeln und zu vermarkten ist derzeit größer denn je. Insbesondere Produkt-, Dienstleistungs- und Produktionssystementwicklung sind aufbauend auf der strategischen Produktplanung parallel und eng aufeinander abgestimmt voranzutreiben. Die Weichen hierfür werden in den frühen Phasen der Entwicklung in der Konzipierung gestellt. Die Systematik muss daher die gesamte Produktentstehung ins Kalkül ziehen. Im Fokus der Arbeit steht die Produktentwicklung, insbesondere die Konzipierung sowie die interdisziplinäre Abstimmung bis zum Serienanlauf.

2.4.2 Entwicklung mechatronischer Systeme

Mechatronische Systeme beruhen auf der Symbiose verschiedener Fachdisziplinen, deswegen müssen Fachexperten verschiedener Fachbereiche (z.B. Mechanik und Softwaretechnik) bei der Entwicklung dieser Systeme entsprechend zusammenarbeiten.

Eine Entwicklungsmethodik soll die beteiligten Akteure durch eine methodische Vorgehensweise unterstützen und bietet Hilfestellung für die kreative Arbeit, die Fehlervermeidung, die Planung von Entwicklungstätigkeiten und die Kommunikation aller am Entwicklungsvorhaben beteiligten Personen und Disziplinen [PBF+07, S. 10f.]. Sie unterteilen den Prozess meist in unterschiedliche Phasen und Aktivitäten, die in verschiedene Zwischenergebnisse resultieren.

Etablierte Entwicklungsmethodiken, wie die Konstruktionslehre nach PAHL/BEITZ [PBF+07] im klassischen Maschinenbau, fokussieren primär spezifische Fachgebiete und werden den Herausforderungen in der interdisziplinären Entwicklung fortschrittlicher mechatronischer Systeme nicht gerecht. Weitere Beispiele sind die VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221], die das Y-Modell der Schaltungstechnik [BGH+96] und das V-Modell XT der Softwareentwicklung [VM06].

Die VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ [VDI2206] adressiert explizit mechatronische Systeme und stellt einen Problemlösungszyklus auf der Mikroebene sowie das V-Modell (Bild 2-4) auf der Makroebene bereit.

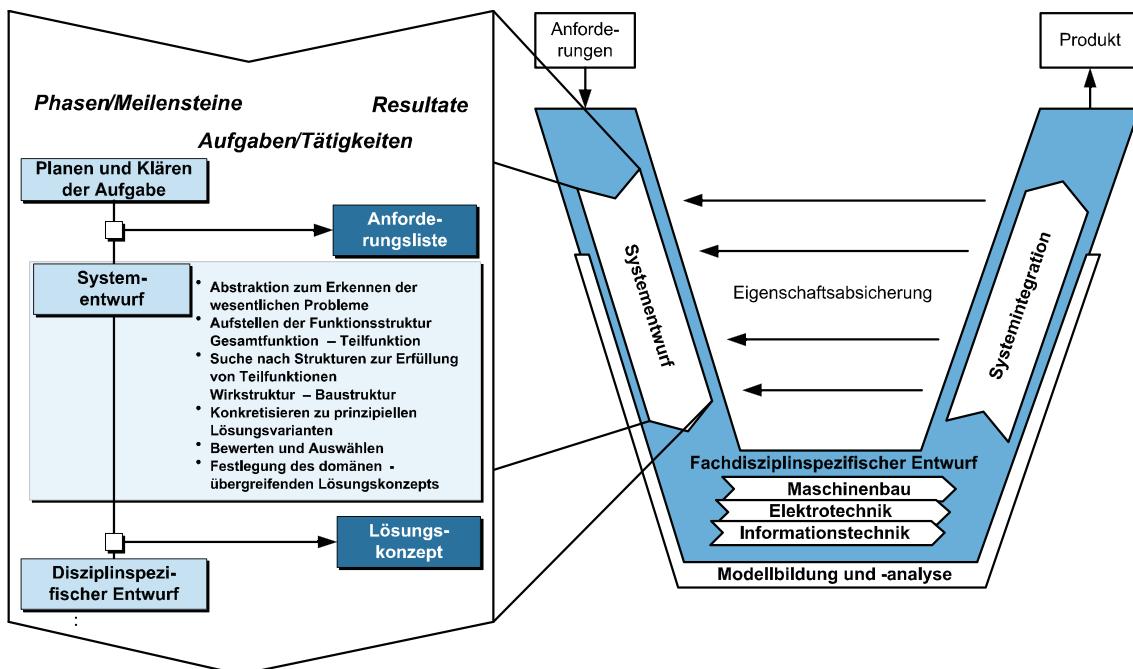


Bild 2-4: V-Modell der VDI-2206 [VDI2206, S. 29]

Problemlösungszyklus auf der Mikroebene

Der Problemlösungszyklus soll den Produktentwickler bei der Bewältigung unvorhersehbbarer oder unerwarteter Probleme unterstützen. Ausgehend von der Situationsanalyse/Zielformulierung (Ist-Zustand orientiertes Vorgehen) bzw. Zielübernahme/Situationsübernahme (Soll-Zustand orientiertes Vorgehen), folgt die Synthese und Analyse. Dabei werden Lösungsalternativen entwickelt und Lösungen geprüft, verbessert und verworfen. Anschließend erfolgt die Analyse und Bewertung sowie die Entscheidung für eine Lösung. Mit dem Planen des weiteren Vorgehens schließt der Zyklus [DH94], [VDI2006].

V-Modell auf der Makroebene

Ausgehend von Anforderungen wird das zu entwickelnde System zunächst fachdisziplinübergreifend spezifiziert und dann nachfolgend im disziplinspezifischen Entwurf ausgearbeitet. Anschließend erfolgt die Systemintegration, in der die Teilergebnisse zu einem Gesamtsystem integriert werden. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen detaillierter beschrieben, die disziplinübergreifende Zusammenarbeit wird dabei fokussiert.

Ansatzpunkt der Betrachtung ist ein konkreter Entwicklungsauftrag. Im Sinne des *Planen und Klärens der Aufgabe* wird die Aufgabestellung mit Hilfe von **Anforderungen** spezifiziert [VDI2206, S. 32], [VDI2221]. Diese dienen in den späteren Phasen als Bewertungsgrundlage für das erarbeitete Produkt [VDI2206, S. 29].

Im Rahmen des fachdisziplinübergreifenden **Systementwurfs** wird ein fachdisziplinübergreifendes Konzept erarbeitet, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des ausentwickelnden Systems beschreibt. Hierzu erfolgt zunächst eine Abstraktion der Aufgabe zum Erkennen der wesentlichen Problemstellungen. Aus der Problemspezifikation wird die zu realisierende Gesamtfunktion eines Systems abgeleitet und in Teilfunktionen zerlegt. Diesen Teilfunktionen werden geeignete Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente zugeordnet und zur Erfüllung der Gesamtfunktion zu einer Wirkstruktur verknüpft [VDI2206, S. 29f.], [GTS14, S. 11]. Die Wirkstruktur bildet die Systemelemente sowie deren Merkmale und Beziehungen zueinander ab und veranschaulicht somit den grundsätzlichen Aufbau und die prinzipielle Wirkungsweise des zu entwickelnden Systems. Zudem können bereits erste Analysen durchgeführt werden [GCD15, S. 38f.], um beispielsweise verschiedene Lösungskonzepte gegeneinander zu bewerten (z.B. im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Kosten) [VDI2206, S. 29].

Die disziplinübergreifende Spezifikation eines Lösungskonzepts bildet die Grundlage für den **fachdisziplinspezifischen Entwurf**. Das Lösungskonzept wird in den unterschiedlichen Fachdisziplinen weiter konkretisiert, dies erfolgt meist getrennt voneinander mit den entsprechenden fachdisziplinspezifischen Entwicklungsmethodiken [VDI2206, S. 29].

Im Rahmen der **Systemintegration** werden die ausgearbeiteten Lösungen sukzessiv zusammengeführt. Das Ergebnis ist der Gesamtentwurf des mechatronischen Systems. Dieser wird in der **Eigenschaftssicherung** anhand der spezifizierten Anforderungen überprüft [VDI2206, S. 29].

Das Resultat des V-Modells ist das Produkt. In der Regel ist es notwendig, das Vorgehensmodell wiederholt zu durchlaufen, um die Konkretisierung und den damit verbundenen Reifegrad des Endproduktes zu erhöhen, wie z.B. vom Labormuster über Funktionsmuster zum Serienprodukt [GTS14, S. 11].

Die Tätigkeiten in den beschriebenen Phasen werden durch die **Modellbildung und -analyse** begleitet und unterstützt. Durch die modellbasierte Beschreibung des Systems sowie die Durchführung entsprechender Analysen soll die Komplexität der Systeme beherrschbarer werden [VDI2206, S. 30].

Das V-Modell definiert ein generisches Vorgehen und ist je Anwendungsfall spezifisch auszuprägen. Durch diese Anpassung, Tailoring genannt, werden die durchzuführenden Aktivitäten auf die jeweiligen Unternehmens- und Projektbedingungen zu geschnitten (z.B. Projektgröße, Projektart) [VM06, S. 1-23], [INC15, S. 162ff.].

Neben dem V-Modell der VDI 2206 existieren noch zahlreiche weitere Vorgehensmodelle im Bereich der Mechatronikentwicklung. Das V- Modell wird oftmals als Grundlage verwendet und um spezifische Aspekte ergänzt bzw. abgewandelt. Beispielhaft seien das W-Modell nach NATTERMANN und ANDERL [NA10], das 3-Ebenen-Vorgehensmodell nach BENDER [Ben05] oder das erweiterte V-Modell des Model-Based Systems Engineering nach EIGNER ET AL [EGZ12], [ERZ14, S. 42ff.] genannt.

Fazit und Einordnung: Etablierte fachdisziplinspezifische Entwicklungsmethodiken werden den Herausforderungen der interdisziplinären Produktentwicklung im mittelständischen Maschinenbau nicht gerecht. Die VDI 2206 liefert einen Ansatz aus der Mechatronik. Der fachdisziplinübergreifende Systementwurf soll frühzeitig ein einheitliches Systemverständnis im Sinne einer disziplinübergreifenden Systembeschreibung schaffen. Es besteht aber eine Kluft zwischen der rasant ansteigenden Produktkomplexität fortgeschrittener mechatronischer Systeme und ihrer Beherrschung durch Entwicklungsmethodiken, wie der VDI 2206, die auch zukünftig weiter ansteigen wird [GDS13]. Die Auswirkungen auf die gesamte Produktentstehung sind enorm: Mehr Disziplinen als bisher müssen in die Entwicklung eingebunden werden (z.B. Experten zum Thema Sicherheit in global-verteilten Netzen). Die VDI 2206 stößt dabei an ihre Grenzen. Die Unternehmen müssen konkret dabei unterstützt werden die interdisziplinäre Zusammenarbeit in ihrem Unternehmen zu gestalten. Ein Ansatz, dem in diesem Zusammenhang eine erfolgversprechende Rolle zugesprochen wird, ist das sog. Systems Engineering.

2.5 Systems Engineering

Systems Engineering ist ein durchgängiger, fachgebietsübergreifender Ansatz zur Entwicklung technischer Systeme. Es stellt das multidisziplinäre System in den Mittelpunkt der Entwicklung und umfasst die Gesamtheit aller damit einhergehenden Aktivitäten. Die Interdisziplinarität und die zielgerichtete und ganzheitliche Problembetrachtung sind von besonderer Bedeutung [GDC+13, S. 435]. Neben der Definition des INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE) (vgl. Abschnitt 2.1) [INC12, S. 7], [INC16-01], [INC15, S.11] beschreibt HITCHINS die wesentliche Kernphilosophie des Systems Engineering genereller:

„Systems Engineering is the art and science of creating whole solutions to complex problems“ [Hit07, S. 91].

Für HABERFELLNER ET AL. ist Systems Engineering die methodische Komponente der Lösung eines Problems [HWF+12, S. 28]. Aus ihrer Sicht strukturiert sich Systems Engineering in zwei übergeordnete Bereiche: die **SE-Denkweise** und der **Problemlösungsprozess** [HWF+12, S. 28ff.] (Bild 2-5).

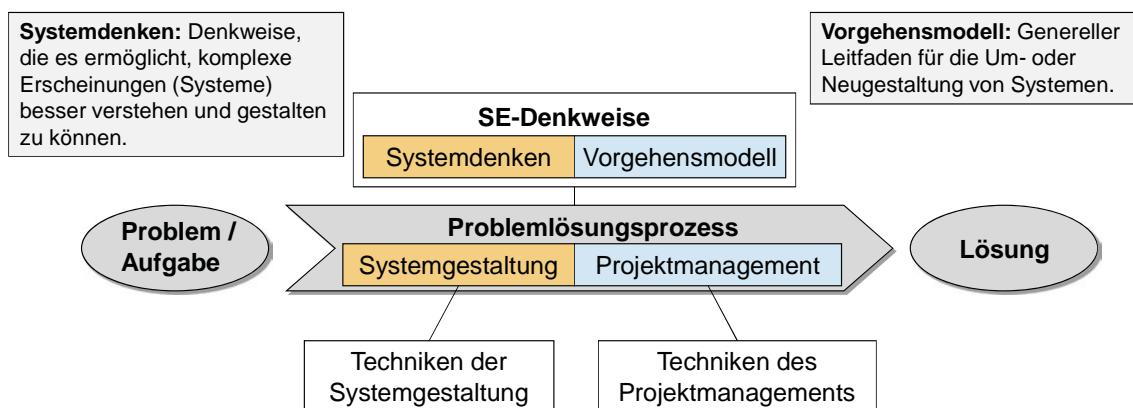


Bild 2-5: Konzept des Systems Engineering [vgl. HWF+12, S. 28]

Die **SE-Denkweise** bildet die Grundlage des Systems Engineering und beinhaltet das Systemdenken und ein SE-Vorgehensmodell. Das *Systemdenken* steht für eine spezielle Denkweise, um komplexe Situationen, Sachverhalte und Systeme ganzheitlich beschreiben, strukturieren und gestalten zu können. Dabei wird das System im Kontext einer spezifischen Problemstellung oder Situation analysiert und relevante Wechselwirkungen werden identifiziert. Das *Vorgehensmodell* ist als eine Art Leitfaden zu verstehen, um die gesamte Entwicklung in beherrschbare Teilprozesse zu zergliedern. Es beinhaltet eine Reihe von Vorgehensempfehlungen, die sich in der Praxis bewährt haben und stellt diese in Zusammenhang. Je nach Komplexität des zu entwickelnden Systems kann das SE-Vorgehensmodell aus einzelnen Komponenten aggregiert werden. Es basiert auf vier Grundgedanken [HWF+12, S. 57ff.]:

- Top-Down-Vorgehen: Ziel ist es, das Betrachtungsfeld vom Groben zum Detail schrittweise zu verfeinern, Lösungen zu finden und diese abschließend in der Synthese zusammenzuführen.
- Denken in Varianten: Durch diesen Denkansatz sollen verschiedene Lösungsmöglichkeiten bei der Systemsynthese ins Kalkül gezogen werden.
- Phasenablauf: Die Systementwicklung wird in eine zeitliche Reihenfolge gegliedert.
- Problemlösungszyklus: Der Problemlösungsprozess stellt eine Art Arbeitslogik im Sinne eines Mikroprozesses dar, der unabhängig von Problemart und Phase anzuwenden ist.

Der zweite Bestandteil des SE-Konzepts nach HABERFELLNER ET AL. ist der **Problemlösungsprozess**. Dieser gliedert sich in die **Systemgestaltung** und in das **Projektmanagement**. Die Systemgestaltung fokussiert die inhaltlichen Aktivitäten der Problemlösung. Es umfasst die Erarbeitung einer Systemarchitektur sowie die Ausgestaltung der Architektur zu einer konkreten Lösung. Das Projektmanagement hingegen stellt das Rahmenwerk für die Planung, Führung, Überwachung und Steuerung des Projekts bereit (z.B. Ressourcen- und Zeitplanung).

Auch wenn diese beispielhaften genannten Definitionen sich nicht widersprechen, zeigen sie dennoch, dass das Verständnis von Systems Engineering von unterschiedlichen Ausprägungen gezeichnet ist. Dies lässt sich durch die verschiedenen **Entwicklungslienien**, die das Systems Engineering geprägt haben erklären und spiegelt sich auch in den **Normen, Richtlinien und Standards des Systems Engineering** wider.

Entwicklungslienien des SE

Die Wurzeln des SE liegen in der Systemtheorie, Modelltheorie und der Kybernetik, die das ganzheitliche Systemdenken und das Modelldenken vorangetrieben haben [Rop09, S. 71 ff.], [HWF+12, S. 28], [INC15, S. 5ff.].

Als der Ursprung des industriell eingesetzten Systems Engineering gelten die Operations Research Anwendungen im zweiten Weltkrieg und die Arbeiten der Bell Laboratories in den 40er Jahre. Bei der Entwicklung der Telekommunikationssysteme beispielweise spielten ganzheitliches Systemdenken und ausführliche Analyse der Anforderungen eine wichtige Rolle. Die Konzepte wurden im späteren Verlauf im Wesentlichen im Bereich der Luft- und Raumfahrt sowie dem Militär eingesetzt und weiterentwickelt. Ein Beispiel ist das NASA Apollo Programm, es zeichnete sich nicht nur durch die Komplexität des Systems aus, sondern vor allem durch die Unkenntnis und Unvorhersehbarkeit des Start- und Landeprozesses [Hit07, S. 85ff.].

Durch diese Einsatzgebiete wird Systems Engineering oft mit „großen“ Projekten und Produkten assoziiert. Verschiedene Organisationen, wie die ELECTRONIC INDUSTRIES ALLIANCE und INCOSE, forcieren seit einigen Jahren die Verbreitung des Ansatzes. Sie sind

überzeugt, dass die Methoden und Prozesse auf Projekte und Produkte beliebiger Größenordnung übertragen werden können [INC14-ol, S. 25], [GAC+13, S. 40ff.].

Normen, Richtlinien und Standards im SE

Normen, Richtlinien und Standards sind eine wichtige Voraussetzung zur Verbreitung von Systems Engineering in der Praxis. Entsprechend der verschiedenen Entwicklungslinien des Systems Engineering sind im Laufe der Zeit eine Vielzahl an Normen, Standards und Richtlinien im Themenfeld Systems Engineering entstanden [She97, S. 1f.] [GDS+13, S. 25]. Auf Grund der vielen unterschiedlichen Organisationen, die bei der Entwicklung dieser Standards beteiligt waren, sind die Standards und ihre Zusammenhänge nur schwer zu durchschauen [CPJ08, S. 3f.]. Sie basieren meist auf Best Practises und wurden von den Vertretern/ Institutionen auf Grundlage ihrer Erfahrung verfasst. Das führt dazu, dass diese sich vielmals durch einen anderen Blickwinkel voneinander unterscheiden. Im Folgenden werden beispielhaft ausgewählte Normen genannt:

MIL-STD-499A – System Engineering Management: Der US Military Standard wurde 1974 vom US Department of Defense veröffentlicht und ist der erste offizielle Systems Engineering Standard [DoD74], [INC15, S. 13], [CPJ08, S. 3].

ANSI/EIA 632 – Processes for Engineering a System: Die MIL-STD 499A wurde mit Hilfe von Erfahrungen aus der Industrie zur ANSI/EIA 632 weiterentwickelt. In der Arbeitsgruppe Electronic Industries Alliance (EIA) waren unter anderem das INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE), sowie die INCOSE vertreten [ANSI/EIA 632], [CPJ08, S. 4]. Der Standard definiert 13 Prozesse zur Entwicklung eines Produktsystems auf einem hohen Abstraktionslevel; außerdem werden die Zusammenhänge der einzelnen Prozesse beschrieben. Daher finden sich in dem Standard keine Details zur Umsetzung der Prozesse sowie zu Methoden und Werkzeugen [HV06, S. 4ff.].

IEEE 1220 – Application and Management of the Systems Engineering Process: Ziel des Standards, der parallel zur ANSI/EIA 63 entstand, ist ein System über den gesamten Produktlebenszyklus zu managen. Dabei fokussiert der Standard primär auf die Entwicklung des Systems. Der Standard gliedert sich in 14 generelle Anforderungen, 6 Phasen und 8 Prozesse. Der Standard beschreibt die Prozesse detailliert und dient dem Entwickler als Orientierung. Durch die detaillierte Beschreibung erreicht der Standard eine höhere inhaltliche Tiefe, ist dadurch aber weniger anpassbar [IEEE1220], [HV06, S. 4ff.].

ISO/IEC 15288: Die letzte Version des Standards ISO 15288 wurde 2015 veröffentlicht und ist damit einer der neuesten Standards im Bereich des Systems Engineering [ISO 15288]. Er untergliedert sich in 30 Prozesse, die in vier Sichten zugeordnet werden: Technical Processes, Technical Management Processes, Agreement Processes und Organization Project Enabling Processes. Die beschriebenen Prozesse sind sehr umfangreich und ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtung des kompletten Lebenszyklus [INC15, S. 1ff.]. Die inhaltliche Tiefe der ISO/IEC 15288 ist jedoch begrenzt, was dazu führt, dass keine Zusammenhänge der Prozesse oder Details zur Umsetzung erklärt werden.

Dennoch hat sich der Standard in den letzten Jahren als ein zentraler Standard des Systems Engineering herauskristallisiert. Das ist unter anderem daran zu erkennen, dass das aktuellste Handbook of Systems Engineering der INCOSE und das Handbuch Systems Engineering Body of Knowledge [SEB15-ol] auf der ISO/IEC 15288 basiert [INC15], [ISO15288].

Die Prozesse werden in den Standards unabhängig von den Randbedingungen der Unternehmen oder der entsprechenden Branche definiert. Zwar adressiert beispielsweise die ISO/IEC 15288 Verfahren für das spezifische Tailoring der Prozesse (vgl. Abschnitt 2.4.2), jedoch sind diese nur sehr oberflächlich erläutert und unterstützen nicht die konkrete Umsetzung [ISO15288]. Zudem gibt es keine Aussagen über den Umfang und die Auswahl der einzusetzenden SE Prozesse [SEI10], [ISO15288].

ISO/IEC TR29110 – Systems and software engineering - Lifecycle profiles for Very Small Entities (VSEs): Sie hat den Anspruch den komplexen ISO 15288 Standard insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen zugänglich zu machen. Der Standard ISO/IEC TR29110 unterscheidet hierzu je nach Unternehmensprofil (entry, basic, intermediate und advanced) unterschiedliche Prozessumfänge. Deployment Packages sollen die Einführung der Ansätze unterstützen [ISO/IECTR29110]. Der Fokus der Richtlinie liegt auf Unternehmen im Bereich der Softwareentwicklung; ferner sind nur Teile der Richtlinie verfügbar [LCP15], daher kann der Standard aktuell noch nicht in der Praxis verwendet werden.

Fazit: Systems Engineering fokussiert die Interdisziplinarität und die zielgerichtete ganzheitliche Problembetrachtung. Der Ansatz adressiert die Herausforderungen denen der Maschinenbau auf Grund des fortlaufenden Wandels seiner Produkte ausgesetzt ist und könnte als Lösungsansatz dienen. Geprägt durch die verschiedenen Entwicklungslinien des Systems Engineering, ist allerdings das Begriffsverständnis vielfältig und nicht einheitlich definiert. Dies spiegelt sich auch in der Normen- und Richtlinienlandschaft wider. Die ISO/IEC TR29110 hat den Anspruch SE insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen zugänglich zu machen. Die Erwartung einen guten Zugang aus Sicht des mittelständisch geprägten Maschinenbaus zu erhalten, lässt sich nicht bestätigen.

2.5.1 Aufgabenbereiche

Durch die Vielfältigkeit der Standards und Definition ergeben sich auch unterschiedliche Sichtweisen, welche Aufgabenbereiche konkret dem Systems Engineering zugeordnet werden können. Eine mögliche Einordnung liefern HONOUR und VALERDI, sie haben die inhaltlichen Gemeinsamkeiten ausgewählter Systems Engineering Standards (MIL-STD-499C, ANSI/EIA-632, IEEE-1220, ISO/IEC 15288 und CMMI (vgl. Abschnitt 3.1.1)) herausgearbeitet und auf Basis einer Ontologie verglichen. Das Ergebnis der Analyse sind acht Aufgabenbereiche, welche im Folgenden erläutert werden [HV06, S. 6f.]:

Mission/ Purpose Definition: Kern dieser Aktivität ist das „Planen und Klären der Aufgabe“. Sie ist der Ausgangspunkt für die Erstellung des Systemkonzepts. Die Beschreibung der Aufgabe erfolgt in einer Sprache, die für den Nutzer/Kunden verständlich ist. Technische Details stehen dabei nicht im Fokus (Bsp.: Reichweite des Flugzeugs statt Kerosinverbrauch und Tankkapazität).

Requirements Engineering: Das Requirements Engineering (RE) befasst sich mit der Erfassung und dem Management von Anforderungen. Sie definieren die Fähigkeiten, Charakteristiken oder Qualitätsfaktoren des Systems. Neben der Definition umfasst das RE die Analyse und Validierung von Anforderungen.

System Architecting: In der Systemgestaltung müssen die Systemelemente und deren Beziehungen definiert werden. Systems Engineering verwendet dazu Architekturen, welche die Beziehungen des Systems darstellen. Dabei werden sowohl die Wechselwirkungen des Systems mit seinem Umfeld als auch die Beziehungen innerhalb des Systems, zwischen den Elementen, betrachtet. Die Systemarchitektur stellt das System vor Entwurf und Ausarbeitung auf einem ausgewählten Abstraktionslevel dar und dient zur Bewertung von Lösungsalternativen. Durch ein hierarchisches Vorgehen werden die Systemanforderungen schrittweise abgeleitet und den Systemelementen der Architektur zugeordnet (vgl. Abschnitt 2.5.2).

System Implementation: Nicht alle analysierten Standards betrachten diesen Aspekt. HONOUR und VALERDI empfehlen die Integration und Installation zu einem Gesamtsystem, z.B. in Form eines Prototyps, mit in die Betrachtung einzuschließen.

Technical Analysis: Dieser Aspekt beinhaltet technische Analysen auf Systemebene zur Absicherung der Eigenschaften des Systems anhand der zuvor definierten Anforderungen. Beispiele sind frühzeitige Kostenbewertungen alternativer Umsetzungskonzepte oder eine frühzeitige Absicherung der Zuverlässigkeit.

Technical Management/ Leadership: Das technische Management umfasst alle Aktivitäten zur Planung, Steuerung und Überwachung des Projekts. Alle Standards berücksichtigen den implizierten Bedarf an technischem Management, um Systems Engineering erfolgreich zu machen. Dennoch unterscheiden sich die Bestandteile des technischen Managements in den verschiedenen Standards teilweise sehr deutlich. Bestandteile des technischen Managements sind unter anderem das Projekt-, das Konfigurations- und das Risikomanagement.

Scope Management: Im Rahmen des Scope Management wird ein anderer Gesichtspunkt des technischen Managements, das Management von Beschaffungs- und Versorgungsprozessen, betrachtet. Gegenstand sind Vertrags- und Abstimmungsprozesse zwischen Zulieferer und Auftraggeber.

Verification and Validation: Die Verifikation ist die durchgängige Überprüfung der Systemeigenschaften gegenüber den definierten Anforderungen. Die Validierung beinhaltet den Vergleich der Anforderungen der Interessensgruppen mit der technischen Spezifikation.

In der Forschung und in der Praxis finden sich zahlreiche Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeuge, die dem Themenfeld Systems Engineering zugeordnet werden. Einige adressieren einzelne Aspekte (z.B. Requirements Engineering Methoden, Software Engineering), andere versprechen ganzheitliche Ansätze (z.B. Systems Modeling Process (SysMod), Integriertes Produktentstehungsmodell (iPeM)) [Wei14, S. 29ff.], [AB11] [Alb10, S. 6ff.], [Win13, S. 44ff.].

Fazit: Systems Engineering lässt sich in verschiedene Aufgabenbereiche gliedern. Es gibt jedoch keine klare Strukturierung und Zuordnung der zugehörigen Aufgabenbereiche. Dies spiegelt sich auch in den zahlreichen Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeugen, die im Themenfeld Systems Engineering verortet werden können, wider. Folglich fehlt es den Unternehmen, die sich mit Systems Engineering auseinandersetzen möchten, an einer einheitlichen Grundlage zur Orientierung.

2.5.2 Model-Based Systems Engineering

Ein wesentlicher Schwerpunkt des Systems Engineering ist das Model-Based Systems Engineering. Gegenstand ist die durchgängige und fachdisziplinübergreifende Beschreibung des zu entwickelnden Systems in einem **Systemmodell** über den gesamten Produktlebenszyklus. Das Systemmodell enthält sämtliche Informationen, um ein komplexes technisches System, wie z.B. ein mechatronisches System, ganzheitlich zu beschreiben. Drei Aspekte sind dabei wesentlich: Anforderungen, Systemarchitektur und Verhalten [Alt12, S. 9], [Ana15, S. 25f.]. Es ermöglicht frühzeitig erste Analysen (z.B. der Zuverlässigkeit oder des dynamischen Verhaltens) und bildet zudem den Ausgangspunkt für die fachdisziplinspezifische Entwurfs- und Ausarbeitungsphase (Bild 2-6). Es ist die Grundlage für die Kommunikation und Kooperation der involvierten Fachexperten über den gesamten Produktentwicklungsprozess und dient als Plattform für den Erhalt der Konsistenz aller im Zuge des Produktentwicklungsprozesses entstehenden Partialmodelle bzw. Dokumente. Das Systemmodell wird im Zusammenspiel aller beteiligten Disziplinen erstellt. Es dient zur Beherrschung der Komplexität auf Gesamtsystemebene [Alt12, S. 9ff.], [GCD15, S. 25]. Zur Beschreibung eines Systemmodells wird eine stimmige Kombination aus Methode, einer graphischer Modellierungssprache und einem Softwarewerkzeug benötigt [Kai13, S. 26], [FMS15, S. 17ff.].

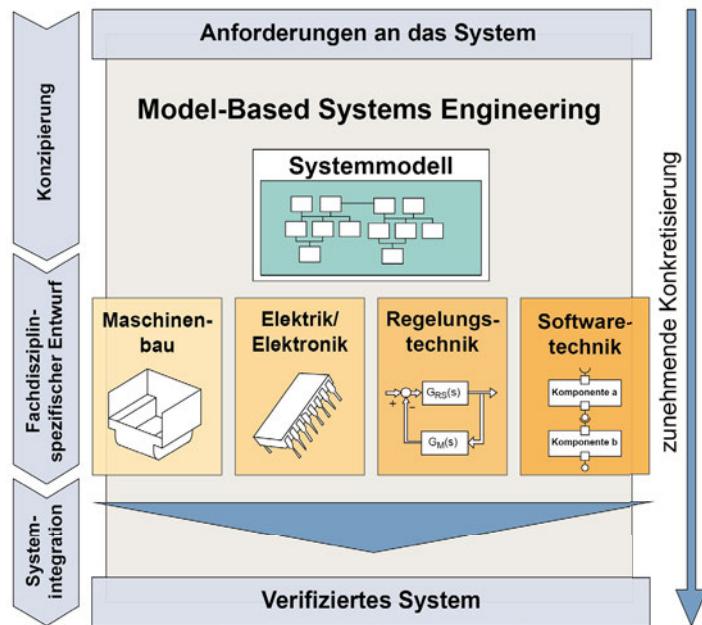


Bild 2-6: Das Systemmodell als Grundlage für den fachdisziplinspezifischen Entwurf [Ana15, S. 26]

Die Anwendung von Systems Engineering bedarf auch neuer **Rollen** in der Produktentstehung. Der Systems Engineer soll die Aufgaben und Aktivitäten der Produktentstehung orchestrieren [FMS15, S. 9f.], [She96, S. 1], [Wei14, S. 16ff.]. Nach SHEARD lässt sich das Tätigkeitsfeld des Systems Engineer in zwölf Rollen beschreiben [She96, S. 1ff.]. Es wird zwischen Life-Cycle und Program Management Rollen unterschieden.

Life-Cycle Rollen beschreiben die spezifischen Aufgaben entlang des Produktlebenszyklus, hierzu zählen die Rollen: Requirements Owner, System Designer, Validation and Verification Engineer, Logistics and Operations Engineer und System Analyst.

Die Program Management Rollen fokussieren die methodische Organisation der Entwicklung und umfassen den Technical Manager, Glue, Information Manager, Coordinator und Customer Interface [She96]. Je nach Konzept und Rahmenbedingungen (z.B. Unternehmensgröße) liegt diese Aufgabe in einer Person oder kann auf verschiedene bestehende Akteure verteilt werden [Möh12, S. 14ff.].

Fazit: Ein Kern des Systems Engineering ist das Model-Based Systems Engineering. Die durchgängige und fachdisziplinübergreifende Beschreibung des zu entwickelnden Systems im Systemmodell und die damit einhergehenden Methoden geben den Entwicklern Ausdrucksmittel an die Hand, die jede Disziplin gleichermaßen versteht. Die Unterschiede in den Denk- und Begriffswelten der einzelnen Disziplinen können somit umgangen und Missverständnisse verhindert werden. Dies bedarf allerdings auch Änderungen in den Rollen- und Aufgabenprofilen der einzelnen Fachexperten.

2.5.3 Systems Engineering im Maschinenbau

Im mittelständisch geprägten Maschinenbau konnte sich Systems Engineering bisher noch nicht etablieren [GDC+13, S. 437ff.], [SE12, S. 240]. Die Ergebnisse der Studie *Systems Engineering in der industriellen Praxis* zeigen, dass die Branche noch wenige Berührungspunkte mit dem Thema Systems Engineering hat und eine gewisse Unsicherheit besteht. Nach Einschätzung der befragten Experten ist ihr Leistungsstand in verschiedenen Handlungsfeldern⁸ des Systems Engineering als niedrig einzustufen. Gleichzeitig ordnen sie den Handlungsfeldern allerdings eine hohe Bedeutung zu [GDC+13, S. 439]. Bild 2-7 veranschaulicht die Bewertung aus Perspektive des Maschinen- und Anlagenbaus im Vergleich zur Fahrzeugindustrieindustrie und zur Luft- und Raumfahrttechnik. In der Fahrzeugindustrieindustrie wird das Themenfeld Systems Engineering bereits intensiv vorangetrieben. In der Luft- und Raumfahrttechnik gilt Systems Engineering schon als etablierter Kern der Entwicklung. Die Bewertung aus Sicht des Maschinen- und Anlagenbaus lässt sich dadurch begründen, dass den **Nutzenpotentialen**, die Systems Engineering zu geordnet werden, erhebliche **Hindernisse in der Anwendung** gegenüberstehen [GSS14, S. 351], [GDC+13, S. 441ff.].

Dennoch lässt sich beobachten, dass sich einige Unternehmen der Branche langsam dem Themenfeld Systems Engineering nähern, z.B. in Transferprojekten [GDE+16-ol, S. 18], [SE12, S. 242ff.], [Wei14, S. 20f.]. Dies geschieht allerdings hauptsächlich aus der Entwicklungsabteilung heraus und nur punktuell.

⁸ bewertet wurden die Handlungsfelder: Anforderungsmanagement, MBSE, Modellbasierte Entwicklung, Virtuelle Verifikation und Validierung, Integrative Planung des Produktionssystems, Berücksichtigung des gesamten Produktlebenszyklus, Projektspezifische Anpassung von Entwicklungsprozessen (Tailoring)

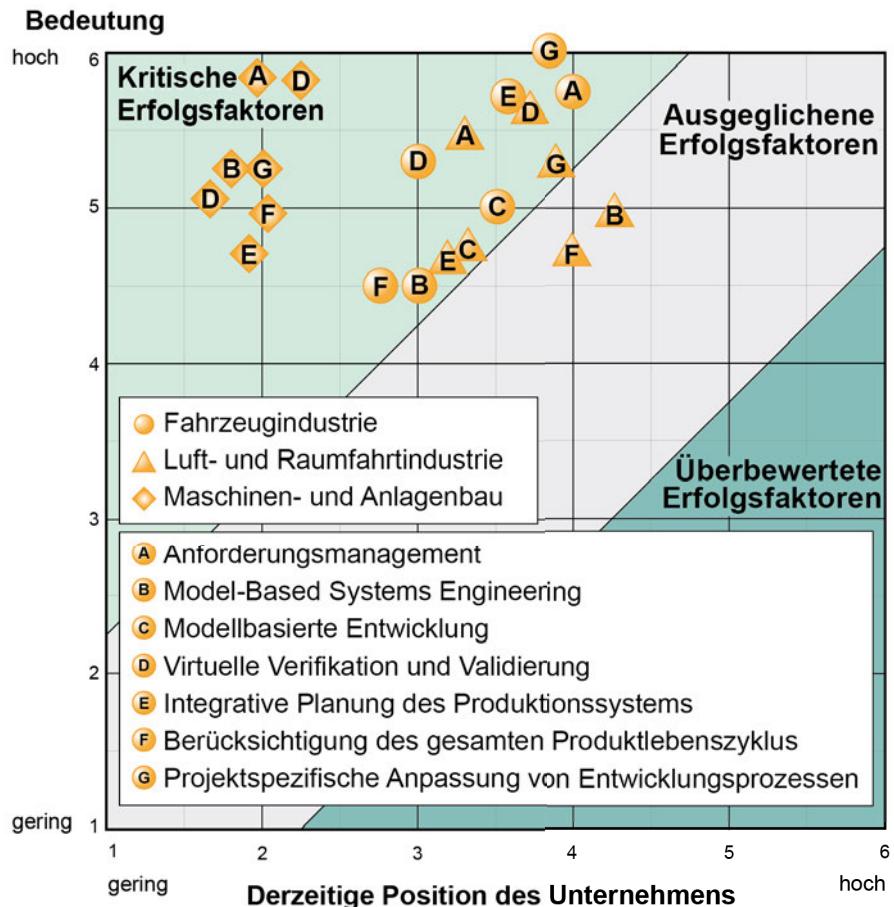


Bild 2-7: Branchenspezifische Beurteilung verschiedener Themenfelder im Kontext Systems Engineering [GDS+13, S. 48]

2.5.4 Nutzen von Systems Engineering

Der Nutzen von Systems Engineering ist nur schwer zu fassen oder gar mit Hilfe von Zahlen belegbar [Hon13], [Hon04]. Trotzdem werden der Anwendung von Systems Engineering generelle Nutzenpotentiale zugeordnet, die nachfolgend erläutert werden.

Potential des SE-Ansatzes wird insbesondere in den frühen Entwicklungsphasen gesehen [INC15, S 13f.]. Bild 2-8 veranschaulicht den Sachverhalt: In den frühen Phasen (Konzeption, Gestaltung und Entwicklung) entsteht in Relation zu den Gesamtkosten nur ein geringer Kostenanteil ($\sim 20\%$). Demgegenüber wird aber ein Großteil der Kosten bereits mit dem Produktkonzept festgelegt. Das vorhandene Wissen über das Produkt ist in der Konzeptphase meistens sehr gering und steigt erst im Verlauf. Demzufolge werden 70% der späteren Kosten bereits auf einer geringen Wissensgrundlage entschieden [INC15, S. 14], [EKL07, S. 9ff], [VDI2235]. Späte Änderungen durch spät erkannte Fehler sind meist aufwändig und kostenintensiv („rule of ten“) [RLH96, S. 260], [BGJ+09, S. 200], [Ehr09, S. 140]. Systems Engineering bietet hier großes Nutzenpotential, in dem die Me-

thoden des SE die **frühen Phasen unterstützen** und eine bessere **Entscheidungsgrundlage** bereitstellen [INC15, S. 14], [Gau10, S. 39ff.]. Der Begriff „Frontloading“ bringt dies zum Ausdruck.

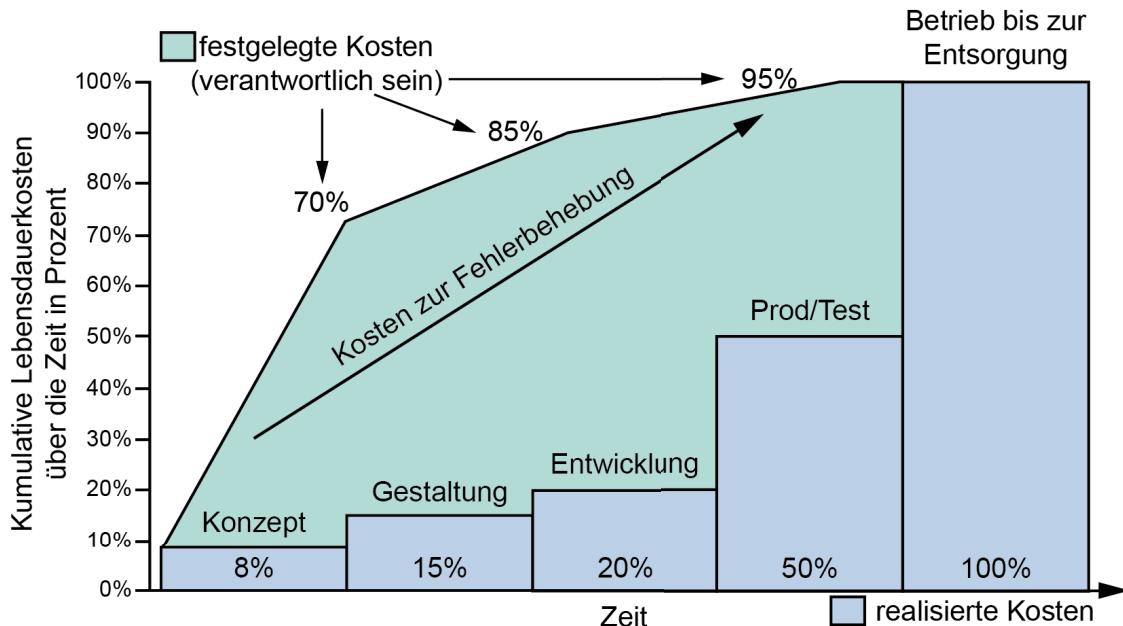


Bild 2-8: Kumulative Lebensdauer Kosten über die Zeit nach [INC15, S. 14]

Insbesondere der MBSE-Ansatz und das damit verbundene Systemmodell (vgl. Abschnitt 2.5.2) bieten Möglichkeiten. Das Systemmodell unterstützt eine **ganzheitliche interdisziplinäre Systembetrachtung** und fördert dadurch das **Systemdenken**. Außerdem kann es als Plattform zur **Kommunikation und Kooperation** der beteiligten Fachdisziplinen dienen. Ein im Projektteam gemeinsam erstelltes Systemmodells in der frühen Phase ist die **Grundlage für die Konkretisierung der Arbeiten** in den einzelnen Fachbereichen; ferner werden die **disziplinübergreifenden Informationen** auf dieser Basis transparent dokumentiert und können bei der **Verifikation und Validierung** unterstützend eingesetzt werden. [Kai13, S. 27ff.].

Vertreter aus der industriellen Praxis bestätigen die erheblichen Nutzenpotentiale in der Anwendung von Systems Engineering [GSS14, S. 351], [Kai13, S. 18ff.], [Alt12, S. 291]. In der Studie *Systems Engineering in der industriellen Praxis* heben die befragten Experten aus der Industrie insbesondere folgende Nutzenaspekte hervor [GDC+13, S. 30]:

- Orchestrierung der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit
- Berücksichtigung der Bedürfnisse aller relevanten Stakeholder
- verbesserte Planungs- und Steuerungssicherheit
- Qualitätssicherung und -steigerung
- Wiederverwendung von Lösungswissen [GDC+13, S. 30f.]

Vor dem Hintergrund komplexerer Produkte und Produktionssysteme (vgl. Abschnitt 2.3.2), kürzeren Entwicklungszeiten sowie hoher Kundenorientierung bei geringem Kosten Einsatz (vgl. Abschnitt 2.2) zeichnen sich für den **Maschinenbau** u.a. folgende **Nutzenpotentiale** durch die Anwendung von Systems Engineering ab:

1) Gemeinsames Systemverständnis aller beteiligten Fachexperten: Ein gemeinsames Systemverständnis ist die Grundlage für die interdisziplinäre Zusammenarbeit. Es ist die Basis für eine konsistente Konkretisierung durch die jeweiligen Fachabteilungen.

2) Verbesserung der Kommunikation und Kooperation zwischen den Fachabteilungen: Die an einer Produktentwicklung beteiligten Mitarbeiter kommen aus verschiedenen Fachbereichen, jeder dieser Bereiche zeichnet sich durch eigene Muster und Strukturen aus. Die Aufbauorganisation unterstützt diese Trennung zusätzlich, indem die Fachexperten in verschiedenen Abteilungen verortet sind und historisch bedingt von der Mechanik dominiert werden. Ein disziplinübergreifendes Systemmodell kann die Zusammenarbeit unterstützen, nicht nur zwischen Entwicklern, sondern auch mit anderen Fachabteilungen (z.B. Vertrieb oder Einkauf).

3) Berücksichtigung der Bedürfnisse aller relevanten Stakeholder: Als Lösungsanbieter ist eine ganzheitliche Systembetrachtung entscheidend. Systems Engineering kann das Verständnis über die Gesamtproblemstellung und eine ganzheitliche Sicht auf das System unterstützen. Hierzu zählen z.B. die Perspektiven der Kunden, der Nutzer, der Wartung sowie der Produktion.

4) Innovative Lösungen für Ihre Kunden durch eine interdisziplinäre Systembetrachtung: Die Kombination der fundierten Erfahrungen über die Kundenbranche und das langjährige aufgebaute technologische Know-hows mit neuen Technologien birgt besonderes Innovationspotential [EDB+15, S. 22]. SE bietet hier die Grundlage bereits in der Konzipierung, die Erfahrungen und Ideen verschiedener Fachexperten zu berücksichtigen. Die Expertise der Ingenieure aus der Mechanik muss mit Experten aus verschiedenen Fachbereichen kombiniert werden.

5) Verbesserte Planungssicherheit in Hinblick auf Kosten, Zeit und Qualität [Hon04, S. 14]: Der Schlüsselfaktor einer engen und guten Kundenbeziehung wird wesentlich von verlässlichen Absprachen in Bezug auf Zeit, Kosten und Qualität in der Projektierung geprägt. Fehlende Transparenz und Wissensgrundlage in der frühen Phase können allerdings zu Fehlplanungen führen. Mit der Unterstützung der frühen Phase kann auch die Planungssicherheit durch SE verbessert und eine Entscheidungsgrundlage geschaffen und dokumentiert werden. Außerdem wird die Aufwandsabschätzung bei Änderungen unterstützt.

Fazit: Systems Engineering werden seitens der Forschung und der Praxis erhebliche Nutzenpotentiale zugesprochen. Da der Nutzen quantitativ nur unzureichend zu erfassen ist, werden hauptsächlich qualitative Nutzenpotentiale erörtert. Die genannten Potentiale sind allgemein und insbesondere im Hinblick auf die konkrete Anwendung im mittelständisch

geprägten Unternehmen des Maschinenbaus nicht greifbar genug. Es fehlt eine individuelle Betrachtung des allgemeinen Ansatzes hinsichtlich der spezifischen produkt- und organisatorischen Herausforderungen aus dem Maschinenbau.

2.5.5 Hindernisse in der Anwendung von Systems Engineering

Aus den Ergebnissen der Studie *Systems Engineering in der industriellen Praxis* lassen sich erhebliche Gründe für die geringe Anwendung von Systems Engineering in der Praxis ableiten [GDS+13, S. 30ff.], [Gau13, S. 38]. Bild 2-9 zeigt, dass die Befragten den aus ihrer Sicht die nicht *quantifizierbare Aufwand-Nutzen-Relation*, die *unzureichende Bereitstellung von Einführungsmethoden* sowie die *fehlende SE Expertise* im Unternehmen u.a. als entscheidende Hindernisse in der Anwendung von SE sehen.

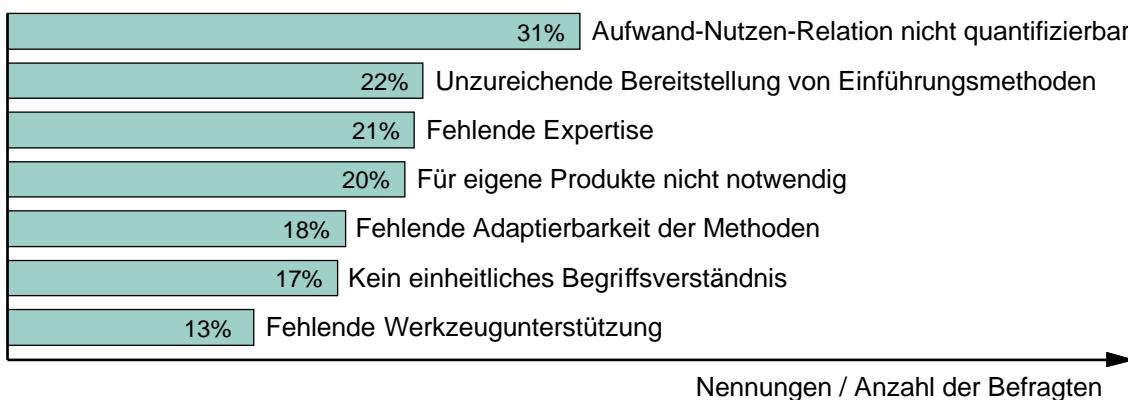


Bild 2-9: Hemmnisse in der Anwendung von Systems Engineering [GDS+13, S. 31]

Diese Ergebnisse werden durch die Befragung von 30 Teilnehmern einer Grundlagen-schulung „Systems Engineering“ aus Perspektive des Maschinenbaus geschräft. Die Schulung ist Teil einer Personalweiterbildungsmaßnahme für Mitarbeiter mit langjähriger Berufserfahrung für mittelständische Unternehmen im Rahmen des BMBF-Spitzen-clusters „Intelligente Technische Systeme Ostwestfalen-Lippe (it's OWL)“. Die Teilnehmer stammen aus verschiedenen Fach- und Aufgabenbereichen (z.B. Entwicklungsleiter, Konstrukteure, Produktmanager) von Unternehmen des Maschinenbaus bzw. verwandter Branchen. Ergänzt wird die Schulung durch konkrete Transferprojekte, in denen einzelne Aspekte des SE im Unternehmen zu Anwendung kommen (z.B. Projektierung einer Anlage). Zusammenfassend lassen sich folgende Hindernisse aus der Perspektive mittelstän-discher Unternehmen aus dem Maschinenbau hervorheben:

1) Unklarer Nutzen: Der Relation zwischen dem hocherscheinenden Aufwand und dem resultierenden Nutzen ist nur schwer greifbar. Die Umsetzung muss auf begrenzte perso-nelle Ressourcen aufgeteilt werden und dennoch Zuverlässigkeit und dauerhaften Erfolg in komplexen Entwicklungsprojekten sicherstellen [Möh12, S.13].

2) Unklare Begrifflichkeiten und undurchsichtige Normenvielfalt: Systems Enginee-ring ist für die Industrie schwer zu greifen, weil unterschiedliche Ansätze und unter-

schiedliche Begrifflichkeiten verwendet werden. Auch die vielfältige Normen- und Richtlinienlandschaft (vgl. Abschnitt 2.5) unterstreicht diesen Eindruck und bietet kaum Unterstützung [Arm05, S. 1426ff.], [LHM14]. Der Begriff ist nicht eindeutig und prägnant genug.

3) Fehlende Einführungs- und Entwicklungsmethoden: Die unzureichende Bereitstellung von Einführungs- und Entwicklungsmethoden blockiert die Anwendung in der Praxis. Die Unternehmen werden nicht ausreichend dabei unterstützt, zu identifizieren, welche Veränderungen und Aktivitäten wann, wo und wie zu implementieren sind. Die von der Mechanik geprägten Unternehmen müssen sich dem Thema darüber hinaus parallel zum Alltagsgeschäft nähern.

4) Fehlende Adaptierbarkeit: Der Mittelstand ist sehr facettenreich und stellt ganz spezifische Anforderungsprofile an SE. Die fehlende Adaptierbarkeit von Systems Engineering verhindert den Einsatz in den Unternehmen; das betrifft sowohl ganzheitliche SE-Ansätze, aber auch viele Teilespekte des SE (z.B. Model-Based Systems Engineering). Die existierenden Richtlinien unterstreichen dies. Sie bieten nur mangelhafte Anpassungsmöglichkeiten und nutzen teilweise abstrakte und komplexe Nomenklaturen. Diese wirken gerade für kleine und mittelständische Unternehmen eher abschreckend [SE12]. Hinzu kommt, dass viele Ansätze, insbesondere im Bereich MBSE, stark durch die Softwaretechnik geprägt sind, was häufig zu Problemen bei der **Akzeptanz** durch Ingenieure anderer Fachdisziplinen führt.

5) Mangelnde Expertise: Es fehlt an Systems Engineering-Expertise; zur erfolgreichen Einführung und Umsetzung von Systems Engineering bedarf es Fachwissen und neuer Rollen in der Produktentstehung. Bedingt durch ihre begrenzten Ressourcen ist der Zugang und der Aufbau von Systems Engineering Expertise besonders mühsam. Hier besteht besonders in der Ingenieursausbildung noch ein großer Unterschied zwischen dem aktuellen Lehrangebot und dem Bedarf in der Praxis [Gau13, S. 38], [GDS+13, S. 31f.].

Fazit: Systems Engineering konnte sich trotz großer Nutzenpotentiale bisher nicht im Maschinenbau etablieren. Die lässt sich an den wesentlichen Hindernissen festmachen: (1) Unklarer Nutzen, (2) eineindeutiges Begriffsverständnis, (3) unzureichende Bereitstellung von Einführungs- und Entwicklungsmethoden, (4) fehlende Adaptierbarkeit und (5) fehlende SE-Expertise. Gepaart mit den Eigenschaften des Maschinenbaus wiegen diese Punkte umso schwerer. Die von der Mechanik geprägten Unternehmen müssen sich dem Thema parallel zum Alltagsgeschäft nähern. Bedingt durch ihre begrenzten Ressourcen ist der Zugang und der Aufbau von Systems Engineering Expertise besonders mühsam. Wesentlich ist darüber hinaus eine Weiterentwicklung des allgemeinen SE-Ansatzes entsprechend der spezifischen Herausforderungen aus dem Maschinenbau, insbesondere im Hinblick auf die heutigen und zukünftigen Herausforderungen in der Produktentstehung. Es ist aber zu beobachten, dass sich einige Unternehmen der Branche langsam dem Themenfeld Systems Engineering nähern, dies geschieht allerdings hauptsächlich aus der Entwicklungsabteilung heraus (bottom up) und nur punktuell.

2.6 Produktentwicklung(sprozesse) im Kontext zukunftsorientierter Unternehmensgestaltung

Eine nachhaltig erfolgreiche Gestaltung eines Unternehmens lässt sich nach GAUSEMEIER auf ein einfaches und plausibles Grundmuster zurückführen: das 4-Ebenen-Modell [GPW09, S. 51]. Das 4-Ebenen-Modell umfasst die Betrachtungsebenen Vorausschau, Strategie, Prozesse und Systeme (Bild 2-10). Diese Betrachtungsebenen fungieren als übergeordneter Plan für die Gestaltung und Führung von zukunftsorientierten Unternehmen. Zu diesem Zweck werden die vier Ebenen von oben nach unten bearbeitet.

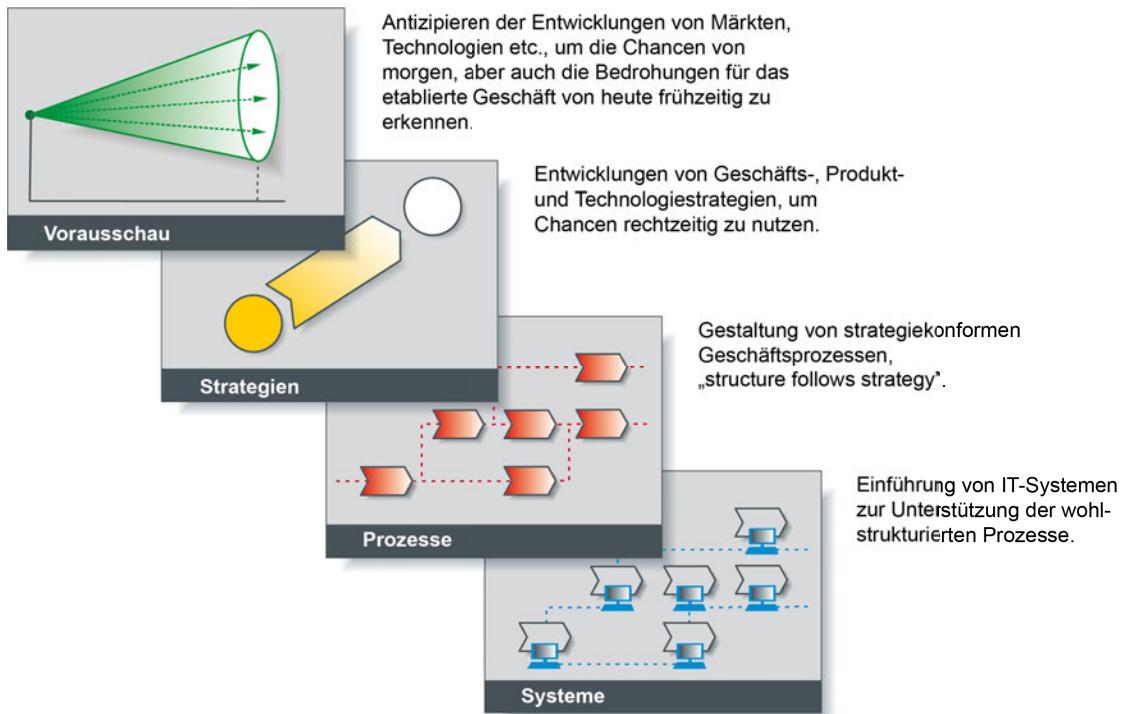


Bild 2-10: Das 4-Ebenen-Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung [GPW09, S. 51]

Vorausschau: Gegenstand der Vorausschau ist die Antizipation von Markt- und Technologieanforderungen, um künftige Chancen aufzuspüren und frühzeitig Risiken für das Unternehmensgeschäft zu erkennen [GPW09, S. 51].

Strategien: Auf dieser Ebene wird der Kurs des Unternehmens durch die Gestaltung von Unternehmens- und Geschäftsstrategien festgelegt. Basis hierfür sind die in der Vorausschau gewonnen Ergebnisse. Die hier festgelegte Strategie bildet wiederrum eine fundierte Vorgabe für die folgenden Ebenen [GPW09, S. 51].

Prozesse: Im Rahmen der Prozess-Ebene sind die Geschäftsprozesse (z.B. der Produktentwicklungsprozess) entsprechend der Strategie zu gestalten. Gut strukturierte Geschäftsprozesse sind die wesentliche Voraussetzung für eine effiziente Leistungserstellung. [GPW09, S. 52].

Systeme: Die Planung und Einführung von IT-Systemen steht auf der Systemebene im Fokus. Wesentlicher Aspekt dieser Ebene ist die enge Vernetzung der Geschäftserfordernisse und der IT-Möglichkeiten [GPW09, S. 52].

Produktentwicklungsprozesse haben zwei wesentliche Bezugspunkte: die Strategieebene und die Systemebene. Für die Gestaltung und Durchführung der Produktentwicklungsprozesse ist die Berücksichtigung der Strategievorgaben wesentlich. Dies umfasst z.B. die für die Produktentwicklung relevanten strategischen Ziele und Zukunftsbilder. Die Verknüpfung zur Systemebene bedeutet, dass die Produktentwicklungsprozesse optimal mit IT-Systemen unterstützt werden müssen. Es gilt, die richtigen Systeme auszuwählen, um die Produktentwicklungsprozesse zu unterstützen [GPW09, S. 366].

Fazit: Der Produktentwicklungsprozesse muss auf der Geschäftsstrategie basieren und durch IT-Systeme ideal unterstützt werden. Eine Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau muss demnach die Strategiekonformität der Prozesse beachten und eine nachfolgende Unterstützung mittels geeigneter IT-Systeme ermöglichen. Damit einher geht, dass neue Ansätze in der Produktentwicklung systematisch und gezielt in den Unternehmen des Maschinenbaus einzugliedern sind (top down).

2.7 Problemabgrenzung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Systems Engineering hohe Nutzenpotentiale für den mittelständisch geprägten Maschinenbau sowie verwandte Branchen birgt (vgl. Abschnitt 2.2 und 2.5.4). Die Produkte des Maschinenbaus zeichnen sich durch eine hohe Kundenindividualität aus; ihre Eigenschaften wurden lange durch die Mechanik dominiert. Heutige und zukünftige Produkte bzw. Marktleistungen werden aber durch eine wachsende Interdisziplinarität und Vernetzung bestimmt. Auf dem Weg zu diesen fortgeschrittenen mechatronischen Systemen (vgl. Abschnitt 2.3) ergeben sich neue Herausforderungen in der Produktentstehung (vgl. Abschnitt 2.4). Die Unternehmen müssen bei der Entwicklung dieser Systeme durch geeignete Ansätze unterstützt werden. Kern ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit und die Betrachtung des Gesamtsystems. Die Weichen hierfür werden in den frühen Phasen der Entwicklung in der Konzipierung gestellt. Das fachdisziplinübergreifende Denken und Handeln muss in die tägliche Entwicklungsarbeit integriert werden (inkl. Prozesse, Methoden, Rollen). Etablierte Entwicklungsmethodiken stoßen hier an ihre Grenzen (vgl. Abschnitt 2.4).

Systems Engineering adressiert die Herausforderungen des Maschinenbaus und könnte als Lösungsansatz dienen. Den Nutzenpotentialen des Systems Engineering stehen jedoch schwerwiegende Hindernisse in der Anwendung entgegen, die es zu überwinden gilt. Unkonkreter Nutzen, kein eindeutiges Begriffsverständnis, eine unzureichende Bereitstellung von Einführungs- und Entwicklungsmethoden sowie fehlende Adaptierbarkeit und noch mangelnde SE-Expertise sind Gründe, dass SE sich bisher nicht in mittelständischen Maschinenbau etablieren konnte. In Bezug auf die mittelständische Charakteristik des

Maschinenbaus wiegen diese Barrieren umso schwerer. Auch bestehende Normen und Richtlinien bieten keine hilfreiche Unterstützung. Die ISO/IEC TR29110 „Systems and Software Engineering — Lifecycle Profiles for Very Small Entities“ hat den Anspruch Systems Engineering für kleine und mittlere Unternehmen zugänglich zu machen. Der Fokus der Richtlinie liegt aber auf Unternehmen im Bereich der Softwareentwicklung; ferner sind nur Teile der Richtlinie verfügbar (vgl. Abschnitt 2.5). Hinzu kommt die Notwendigkeit die Grundlagen des SE entsprechend der Herausforderungen aus dem Maschinenbau weiterzuentwickeln.

Um eine Verbesserung der interdisziplinären Zusammenarbeit in der Produktentwicklung in den Unternehmen zu ermöglichen, müssen sie dabei unterstützt werden, die Potentiale des SE ihrem Bedarf und ihren Möglichkeiten entsprechend zu erschließen. Bisher ist unklar, welche Aspekte des Systems Engineering Nutzen in mittelständischen Unternehmen bringen. Es ist davon auszugehen, dass der Bedarf ebenso facettenreich wie der mittelständische Maschinenbau selbst ist. Aufbauend darauf muss ein Lösungskonzept inkl. konkreter Maßnahmen herausgearbeitet werden. Die neuen Ansätze in der Produktentwicklung müssen strategiekonform sein und schrittweise in das Unternehmen implementiert werden. Es besteht daher ein Bedarf für eine *Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau*. Hierfür sind **vier Handlungsfelder (HF)** hervorzuheben (Bild 2-11):

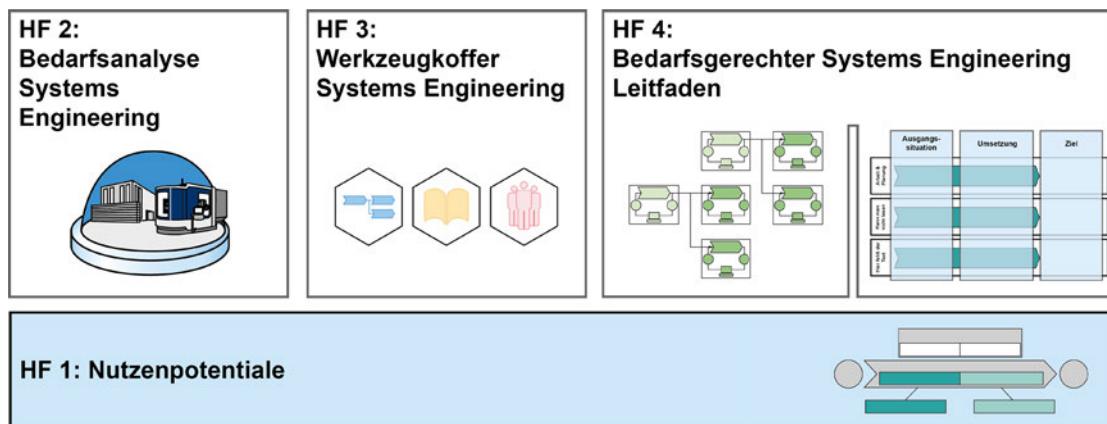


Bild 2-11: Handlungsfelder zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau

Handlungsfeld 1 – Nutzenpotentiale

Grundlage für die Systematik sind ein klar definierter Betrachtungsgegenstand und konkrete Nutzenpotentiale. Dies dient zur Sicherung eines einheitlichen Verständnisses und zur Reduktion der Komplexität des Themenfeld Systems Engineering. Das weite Feld an Themen und Handlungsbereichen, die dem Systems Engineering zugeordnet werden können, soll für die Zielgruppe strukturiert und abgegrenzt werden. Es stellt sich die Frage, welche konkreten Nutzenpotentiale sich aus der Anwendung von Systems Engineering im Hinblick auf die Herausforderungen in der Entwicklung von mittelständischen Unternehmen des Maschinenbaus ergeben (vgl. Abschnitt 2.3.2 und Abschnitt 2.5.4). Hierzu

bedarf es die Charakteristiken des Maschinenbaus (vgl. Abschnitt 2.2) und ihre spezifischen Herausforderungen (vgl. Abschnitt 2.3.2) mit verschiedenen Nutzenversprechen gegenüberzustellen, zu konkretisieren und zu strukturieren (vgl. Abschnitt 2.5.4).

Handlungsfeld 2 – Bedarfsanalyse Systems Engineering

Um eine bedarfsgerechte Betrachtung sicherzustellen, muss zunächst der SE Bedarf ermittelt werden. Dafür müssen die Unternehmen dabei unterstützt werden ihren aktuellen Stand im Bereich Systems Engineering zu bestimmen und Verbesserungspotentiale bzw. Schwachstellen zu identifizieren bei denen SE Prozessschritte und Methoden unterstützen könnten (vgl. Abschnitt 2.5.1 und Abschnitt 2.5.3). Die spezifischen Rahmenbedingungen aus den Perspektiven Unternehmen, Produkt und Projekt beeinflussen ebenfalls die Anwendung von SE und müssen in die Betrachtung miteinbezogen werden.

Handlungsfeld 3 – Werkzeugkoffer Systems Engineering

Die Ansätze des Systems Engineering sind vielfältig und unterschiedlich aufbereitet (vgl. Abschnitt 2.5.1 und Abschnitt 2.3.2). Für eine nutzenstiftende Anwendung müssen die Ansätze des Systems Engineering für den mittelständischen Maschinenbau aufbereitet und zur Verfügung gestellt werden. Die Verknüpfung der Ansätze aus dem Bereich Systems Engineering zum Maschinenbau muss aufgezeigt werden (vgl. Abschnitt 2.5.5 und Abschnitt 2.3.2). Es ist notwendig, Transparenz zum Zusammenhang von Problemstellungen aus dem Maschinenbau und der vielfältigen SE Lösungen zu schaffen. Die Unternehmen müssen dabei unterstützt werden gezielt nutzenstiftende Lösungen auszuwählen. Hierzu müssen relevante Prozessschritte, Methoden und Rollen des Systems Engineering zielgruppengerecht aufbereitet und bereitgestellt werden.

Handlungsfeld 4 – Bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfaden

Basierend auf dem Bedarf gilt es, nutzenstiftende Prozessschritte, Methoden und Rollen zu identifizieren und in ein Lösungskonzept zu überführen (vgl. Abschnitt 2.5.4). Die Prozessschritte und Methoden des SE müssen intentional in die Ablauf- sowie Aufbauorganisation des Unternehmens integriert werden. Dazu sind die Prozessschritte und Methoden an die spezifischen Eigenschaften des Unternehmens anzupassen. Um den begrenzten Ressourcen im Maschinenbau Rechnung zu tragen, muss dies schrittweise erfolgen (vgl. Abschnitt 2.2). Neben kurzfristigen Maßnahmen müssen insbesondere Schritte für langfristige Veränderungen aufgezeigt werden, um den erstrebten SE-Leitfaden zu erreichen. Es ist die Grundlage zur Ableitung und Umsetzung eines bedarfsgerechten Systems Engineering.

2.8 Anforderungen an die Systematik

Aus der Problemanalyse resultieren folgende Anforderungen an eine *Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau*:

A1) Betrachtungsgegenstand definieren/ Nutzenpotentiale aufzeigen

Systems Engineering ist nicht eindeutig definiert und von verschiedenen Entwicklungslinien geprägt. Es werden unterschiedliche Begrifflichkeiten verwendet (vgl. Abschnitt 2.5.1). Daher muss als Grundlage für die Bedarfsanalyse der Betrachtungsgegenstand für den mittelständischen Maschinenbau klar definiert werden. Die zu betrachtenden Aspekte (z.B. Phasen des Produktlebenszyklus, betroffene Funktionsbereiche des Unternehmens) müssen klar spezifiziert werden. Der Betrachtungsgegenstand soll auf die spezifischen Produkteigenschaften des Maschinenbaus sowie verwandter Branchen zugeschnitten sein und insbesondere den Wandel der Produkte berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.3). Zudem müssen die organisatorischen Charakteristika mittelständischer Unternehmen in die Betrachtung miteinbezogen werden (vgl. Abschnitt 2.2) (vgl. HF 1).

A2) Berücksichtigung der Charakteristika des Maschinenbaus in Deutschland – Produkteigenschaften

Die Systematik soll die Produkteigenschaften des Maschinenbaus fokussieren. Insbesondere der Wandel der Produkte und die damit einhergehenden Herausforderungen in der Produktentwicklung sollen Berücksichtigung finden (vgl. Abschnitt 2.2 und 2.3) (vgl. HF 1 und HF 2).

A3) Berücksichtigung der Charakteristika des Maschinenbaus in Deutschland – organisatorische Eigenschaften

Der Maschinenbau in Deutschland ist stark mittelständisch geprägt; die Systematik soll dem Rechnung tragen, indem die Durchführung der Systematik als auch die adressierten Themen auf mittelständischen Organisationsstrukturen zugeschnitten ist (vgl. Abschnitt 2.2) (vgl. HF 1 und HF 2).

A4) Verbesserungspotentiale ermitteln

Der Maschinenbau ist sehr facettenreich; auch das SE bietet vielfältige Ansätze. Um eine gezielte Umsetzung von Systems Engineering in einem Unternehmen sicher zu stellen, muss der Bedarf individuell ermittelt werden. Hierzu sind verschiedene Kontextfaktoren (z.B. Unternehmensstruktur, Produkteigenschaften und Projekteigenschaften) sowie der aktuelle Stand der interdisziplinären Zusammenarbeit in der Produktentwicklung zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.4.) Auf der Basis der Faktoren sind Verbesserungspotentiale und Schwachstellen zu identifizieren, die durch den Einsatz Systems Engineering adressiert werden sollten (vgl. HF 2).

A5) Prozessschritte und Methoden strukturieren und bereitstellen

Die vielfältigen Ansätze des Systems Engineering sind für die Unternehmen des mittelständischen Maschinenbaus nur schwer zugänglich. Daher gilt es zunächst in Bezug auf den definierten Betrachtungsgegenstand relevante Ansätze zu identifizieren (vgl. Abschnitt 2.5.1 und 2.5.2). Diese müssen nach Prozessen (Was), Methoden (Wie), Werkzeugen (Womit) und Rollenprofilen (Wer) strukturiert und zielgruppengerecht aufbereitet

werden. Eine einfache Bereitstellung dieser Informationen ist Grundlage für die Anwendung im Maschinenbau (vgl. HF 3).

A6) Identifikation und Auswahl geeigneter Prozessschritte und Methoden ermöglichen

Je nach Bedarf eignen sich andere Kombinationen von Ansätzen für ein Unternehmen (vgl. Abschnitt 2.5). Hier fehlt es an der notwendigen Transparenz. Die Systematik muss die Identifikation und Auswahl von Ansätzen gemäß dem identifizierten Bedarf unterstützen. Dazu muss die Verknüpfungen der Prozessschritte, Methoden und Rollen zu den erkannten Verbesserungspotentialen hergestellt werden (vgl. HF 3).

A7) Definition eines Soll-Prozesses unterstützen

Die ausgewählten Ansätze müssen bedarfsgerecht in den Produktentstehungsprozess integriert werden. Daher muss die Systematik die Unternehmen dabei unterstützen einen Soll- Prozess zu definieren, der die ausgewählten Ansätze in den Produktentstehungsprozess einbettet. Der Prozess muss die im SE durchzuführenden Prozessschritte beschreiben und diese mit den entsprechenden Methoden verknüpfen. Die Methoden sind hierzu auf die spezifischen Rahmenbedingungen des Unternehmens anzupassen (Tailoring) (vgl. Abschnitt 2.4) (vgl. HF 4).

A8) Schrittweise Umsetzung ermöglichen

Die Umsetzung des Soll-Prozesses erfordert verschiedene Veränderungen und Anpassungen im Unternehmen, die parallel zu den laufenden Entwicklungsaktivitäten umzusetzen sind. Dies betrifft beispielweise Änderungen in der Ablauf- und Aufbauorganisation, den Aufbau von neuen Kompetenzen⁹ sowie die Gestaltung der IT-Unterstützung (vgl. Abschnitt 2.5.2). Diese Veränderungen können und müssen nicht in einem Zug durchgeführt werden. Die Systematik soll die Unternehmen daher dabei unterstützen die notwendigen Maßnahmen zu erkennen und in eine sinnvolle Reihenfolge zu bringen (vgl. HF 4).

A9) Systematische Vorgehensweise bereitstellen

Das Ableiten eines bedarfsgerechten Systems Engineering Leitfadens bedarf einer systematischen Vorgehensweise. Die Systematik muss eine zielgerichtete und systematische Bedarfsanalyse im Themenfeld Systems Engineering ermöglichen. Darauf aufbauend soll sie aufzeigen, wie entsprechend des Bedarfs ein Systems Engineering Soll-Prozess inkl. Methoden abgeleitet wird. Ferner soll die Vorgehensweise eine Implementierung unterstützen, indem gezielte Maßnahmen zur Umsetzung des Prozesses extrahiert werden (vgl. Abschnitt 2.3.2) (vgl. HF 2 und HF 4).

⁹ Unter Kompetenzen wird die Kombination aus Fähigkeiten und die dafür erforderlichen materiellen und immateriellen Ressourcen verstanden [Rüb15, S. 18], [KH97].

A10) Einfache Anwendbarkeit sicherstellen

Mittelständische Unternehmen müssen mit begrenzten Ressourcen agieren, außerdem verfügen sie oft über wenig oder kaum Systems Engineering-Expertise (vgl. Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.5.5). Die Systematik muss eine wirtschaftliche Anwendung und einfache Handhabung ermöglichen. Die Tätigkeiten müssen mit einem vertretbaren Aufwand und ohne spezifisches Fachwissen durchgeführt werden können, sodass Aufwand und Nutzen stets in einem sinnvollen Verhältnis zueinanderstehen. Eine praktikable Ausführung der Systematik ist essentiell für die Akzeptanz im Maschinenbau (vgl. HF 2 und HF 4).

3 Stand der Technik

Die Problemanalyse hat gezeigt, dass eine Bedarfsanalyse für den mittelständischen Maschinenbau im Systems Engineering benötigt wird, die den Betrachtungsgegenstand zielgruppengerecht definiert und konkrete Verbesserungspotentiale ableitet sowie dabei die spezifischen Charakteristika des Maschinenbaus gleichermaßen berücksichtigt. Vor diesem Hintergrund werden im Stand der Technik ausgewählte Methoden zur **Bedarfsanalyse**, vornehmlich Reifegradmodelle, untersucht (vgl. Abschnitt 3.1).

Zudem geht aus der Problemanalyse hervor, dass der Bedarf für einen Werkzeugkoffer Systems Engineering für den Maschinenbau besteht, der die Ansätze des Systems Engineering strukturiert bereitstellt und mit den Handlungsfeldern des Maschinenbaus verknüpft. Daher werden im Stand der Technik bestehende **Ansätze zur Bereitstellung von Methoden und Prozessen im SE** analysiert (vgl. Abschnitt 3.2).

Ferner wird ein Vorgehen zur Ableitungen und Umsetzung eines bedarfsgerechten Systems Engineering benötigt. Zunächst erfolgt dafür eine Betrachtung existierender Ansätze zur **Planung und Verbesserung von Entwicklungsprozessen** (vgl. Abschnitt 3.3). Des Weiteren werden **Ansätze zur Einführung von Systems Engineering** beleuchtet (vgl. Abschnitt 3.4).

3.1 Ansätze zur Bedarfsanalyse Systems Engineering

Der Bedarf und konkrete Handlungsfelder bilden den Ausgangspunkt zu einer zielorientierten Leistungssteigerung durch neue Ansätze in der Produktentstehung. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Abschnitt Ansätze zur Analyse des Ist- und Ziel-Leistungsstands vorgestellt. Hierzu gehört der international bekannte Capability Maturity Model Integration for Development (vgl. Abschnitt 3.1.1), der VPS-Benchmark (vgl. Abschnitt 3.1.2) das Forschungsprojekt BESTVOR (vgl. Abschnitt 3.1.3) sowie Vorgehen zur Leistungsbewertung und -steigerung der Mechatronikentwicklung nach BALAZOVA (vgl. Abschnitt 3.1.4).

3.1.1 Capability Maturity Model Integration for Development (CMMI-DEV)

Das Capability Maturity Model Integration (CMMI) ist eine Familie von Referenzmodellen zur Bewertung und strukturierten Verbesserung verschiedener Unternehmensprozesse. Der Ursprung liegt im Software Capability Model (CMM), eine Methoden- und Werkzeugsammlung zur Bewertung und Verbesserung von Softwareentwicklungsprozessen. Es wurde 1980 auf Initiative des US-Verteidigungsministeriums vom Software Engineering Institute SEI entwickelt. Über die Zeit hinweg bildeten sich verschiedene Ausprägungen für neue Themenschwerpunkte, sodass 2000 das CMMI publiziert wurde, dass alle Derivate vereint. Es wird vom CMMI Institute betreut und weiterentwickelt. CMMI for Development (CMMI-DEV) ist ein Derivat des Capability Maturity Model

Integration (CMMI). Ziel ist die Beurteilung und Verbesserung von Produktentwicklungsprozessen [SEI10].

Es beschreibt 22 **Prozessgebiete**, die in vier **Kategorien** (Prozessmanagement, Projektmanagement, Ingenieurdisziplinen, Unterstützung) unterteilt sind. Für die Prozessgebiete sind Ziele und entsprechende Praktiken/Handlungselemente zum Erreichen dieser Ziele definiert. Zur Verbesserung eines Prozessgebietes gilt es entsprechend durch die Anwendung und Etablierung bestimmter Praktiken die erforderlichen Ziele zu erreichen. Es werden spezifische und generische Ziele unterschieden:

Spezifische Ziele gelten ausschließlich einem Prozessgebiet – sie adressieren die inhaltlichen Aufgaben des Prozessgebiets und sind Indikatoren für dessen Leistungsfähigkeit. Jedem spezifischen Ziel sind wiederum spezifische Praktiken zugeordnet, die es umzusetzen gilt, um die inhaltlichen Aufgaben zu erfüllen. Beispiele für spezifische Ziele im Prozessgebiet *Anforderungsentwicklung* sind *Produktanforderungen entwickeln* und *Anforderungen analysieren und etablieren*.

Generische Ziele sind für alle Prozessgebiete gleich, sie charakterisieren den Grad der Institutionalisierung der Prozesse eines Prozessgebiets. Es werden drei aufeinander aufbauende generische Ziele unterschieden: Durchgeföhrtes Prozess, Geföhrter Prozess und Definierter Prozess. Ein Prozess kann also erst als definiert eingestuft werden, wenn er vorher bereits als *geföhrt* eingestuft wurde.

Kategorie	Prozessgebiet
Prozess-management	Organisationsweite Prozessausrichtung Organisationsweite Prozessentwicklung Organisationsweite Aus- und Weiterbildung Organisationsweite Prozessleistung Organisationsweites Leistungsmanagement
Projekt-management	Projektplanung Projektverfolgung und -steuerung Zuliefererungsmanagement Fortgeschrittenes Projektmanagement Risikomanagement Quantitatives Projektmanagement
Ingenieur-disziplinen	Anforderungsmanagement Anforderungsentwicklung Technische Umsetzung Produktintegration Verifizierung Validierung
Unterstützung	Konfigurationsmanagement Prozess- und Produkt-Qualitätssicherung Messung und Analyse Entscheidungsfindung Ursachenanalyse und -beseitigung

Bild 3-1: Prozessgebiete von CMMI-DEV [SEI10]

CMMI ermöglicht zweit Ansätze zur Leistungsbewertung eines Unternehmens, eine kontinuierliche Bewertung und eine stufenweise Bewertung. Im Zuge der **kontinuierlichen Betrachtung** werden einzelne Prozessgebiete analysiert und mit Hilfe von 4 Fähigkeitstufen (von Fähigkeit 0 = unvollständig bis Fähigkeit 3 = definiert) bewertet. Die Ergebnisse werden dann in einem Fähigkeitsprofil visualisiert. Zusätzlich zu den vorhandenen Fähigkeiten wird ein Soll-Fähigkeitsprofil definiert. Dies kann für das Unternehmen individuell erfolgen oder sich an einer vorgegebenen Systematik orientieren. Diese Analyse erfordert allerdings ein hohes Maß an Expertenwissen und Erfahrung. Die Abweichung zwischen Ist- und Soll-Fähigkeitsgrade zeigt den entsprechenden Handlungsbedarf auf.

Die **stufenweise Bewertung** erfolgt mit Hilfe von Reifegraden und fokussiert die Bewertung und sukzessive Verbesserung der gesamten Organisation. Es werden fünf Reifegrade unterschieden (niedrigster Reifegrad 1 = initial bis zum höchsten Reifegrad 5 = prozess-optimierend). Ein bestimmter Reifegrad ist dann erreicht, wenn die einzelnen Prozessgebiete einem definierten Soll-Fähigkeitsprofil entsprechen. Die stufenweise Bewertung ermöglicht Unternehmen den Vergleich mit anderen Teilnehmern.

Die kontinuierliche und die stufenweise Bewertung ergänzen sich. Über ein Internetportal der CMMI Institute ist es möglich, die stufenweise Bewertung des eigenen Unternehmens mit anderen Unternehmen zu vergleichen. Um allerdings die Vergleichbarkeit zu gewährleisten gibt es verschiedene Bewertungsbedingungen, außerdem muss die Bewertung von autorisierten Personen vorgenommen werden [SEI10], [GP14, S. 317ff.].

Bewertung:

CMMI ist weltweit verbreitet und bietet eine umfangreiche Sammlung von Methoden und Werkzeugen. Die Bedarfserfassung erfolgt nach dem Prinzip der höchste Fähigkeitsgrad ist der erstrebenswerteste. Welcher Fähigkeitsgrad angestrebt werden soll, bleibt den Unternehmen überlassen. Spezifische Charakteristika des Unternehmens und des Produkts werden nicht explizit berücksichtigt. Zudem ist das Verfahren sehr komplex und erfordert intensive Schulungen des Personals und starkes Mitwirken aller betroffenen Bereiche. Die Themengebiete fokussieren SE nicht explizit, insbesondere werden die Fragestellungen des Maschinenbaus, sowie verwandter Branchen nicht ausreichend adressiert.

3.1.2 VPS-Benchmark

Der VPS-Benchmark unterstützt die Analyse und Optimierung des Einsatzes von Virtual Prototyping und Simulation (VPS) im Produktentwicklungsprozess. Zielgruppe sind kleine und mittlere Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus sowie verwandter Branchen, die komplexe technische Systeme entwickeln. Virtual Prototyping und Simulation fasst Techniken zusammen, die mit Hilfe von digitalen Modellen den Funktionsnachweis des zu entwickelnden Produkts unterstützen. Ziel ist den aktuellen Leistungsniveau in der Produktentwicklung zu erfassen und die Nutzenpotentiale von VPS zu erkennen und zu erschließen. Der Ansatz umfasst hierzu drei: Bereiche Leistungsbewertung, Zieldefinition und Leistungssteigerung (Bild 3-2) [Ben13, S. 76], [GP14, S. 327].

Die **Leistungsbewertung** orientiert sich am typischen Aufbau von Reifegradmodellen und untersucht mit Hilfe von ca. 200 strukturierten Fragen die Themengebiete Entwicklungsmanagement, Konstruktion, Datenmanagement, Weiterverwendung und Produktanalysen. Auf Basis von Handlungselementen wird für jedes Themengebiet die Leistung erfasst und ein Reifegrad ermittelt.

Die vom Unternehmen zu erreichende Leistungsstufe unterliegt verschiedener Einflüsse (z.B. Anzahl der Entwickler), daher wird auf Basis einer Unternehmensklassifikation in der **Zieldefinition** ein angemessener Zielreifgrad je Themengebiet definiert. Die Unternehmensklassifikation umfasst Unternehmenskennzahlen (z.B. Anzahl der Entwicklungsstandorte), Produktkennzahlen (z.B. Anzahl der Bauteile) sowie das Unternehmensumfeld (z.B. die Wettbewerbssituation). Die Einflüsse stehen in Beziehung zu den Handlungselementen und werden ebenfalls mit Hilfe von Fragen ausgeprägt.

Ausgehend von dem Vergleich zwischen Ist- und Zielreifgrad lassen sich konkrete Maßnahmen ableiten. Diese werden dann mit Hilfe einer Roadmap in eine zeitliche Reihenfolge gebracht und ermöglichen so eine schrittweise **Leistungssteigerung**. Ein Nutzen-Aufwand-Portfolio dient der Priorisierung der Maßnahmen.

Die Anwendung des VPS-Benchmarks erfolgt in Workshops in Zusammenarbeit von Experten und Unternehmensvertretern. Bereits durchgeführte Analysen werden in einer Datenbank gespeichert und ermöglichen einen **Benchmark** mit anderen Unternehmen derselben Klasse [Ben13, S. 76ff.], [GP14, S. 327ff.].

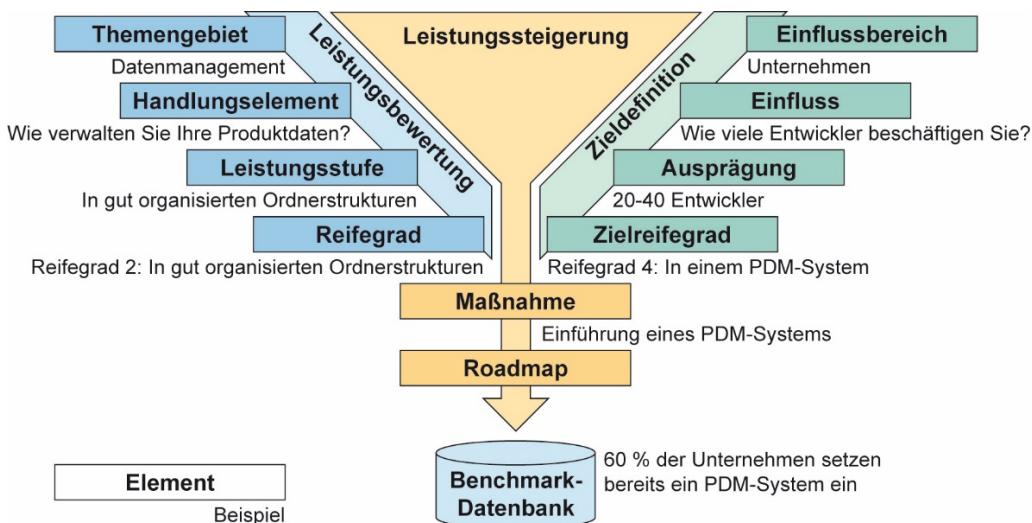


Bild 3-2: Struktur des VPS-Benchmark Verfahrens [GP14, S. 329], [Ben13, S. 80]

Bewertung:

Die Leistungsbewertung sowie die Zieldefinition basiert auf vorgegebenen Fragen und entsprechenden Antwortmöglichkeiten. Auf diese Weise wird eine objektive Erfassung des derzeitigen Leistungsstands und der Zielreifegrad möglich, aus denen sich wiederum der Bedarf ableiten lässt. Die Berücksichtigung von Einflüssen im Kontext Unternehmen,

Produkt und Unternehmensumfeld stellt sicher, dass bei der Zieldefinition nicht der maximal mögliche, sondern ein unternehmensadäquater Zielreifegrad erarbeitet wird. Resultat der Anwendung sind zeitlich sortierte Maßnahmen die eine schrittweise Umsetzung ermöglichen. Die Anwendung des Reifegradmodells ist ohne aufwändige Einarbeitung und tiefgehendes Expertenwissen möglich und somit für kleine und mittlere Unternehmen geeignet. Das Themengebiet Systems Engineering steht allerdings nicht im Fokus der Betrachtung, gleichwohl werden durch die Verknüpfung des VPS mit SE einzelne Aspekte adressiert. Entsprechend erfolgt keine Bereitstellung von relevanten methodischen Ansätzen des Systems Engineering und keine Hilfestellungen zur Auswahl jener im Kontext der Leistungssteigerung.

3.1.3 Betriebliche Einführungsstrategie für ein anwendungsorientiertes Vorgehensmodell (BESTVOR)

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts *betriebliche Einführungsstrategie für ein anwendungsorientiertes Vorgehensmodell für die Entwicklung zuverlässiger mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau* (BESTVOR) ist eine vereinfachte Form von CMMI (vgl. Abschnitt 3.1.1) und adressiert schwerpunktmäßig den Maschinen- und Anlagenbau sowie mechatronische Systeme. Der Ansatz setzt sich aus drei Bausteinen zusammen (Bild 3-3): Self-Assessment, ein anwendungsorientiertes Vorgehensmodell und konkrete Einführungsanleitung.

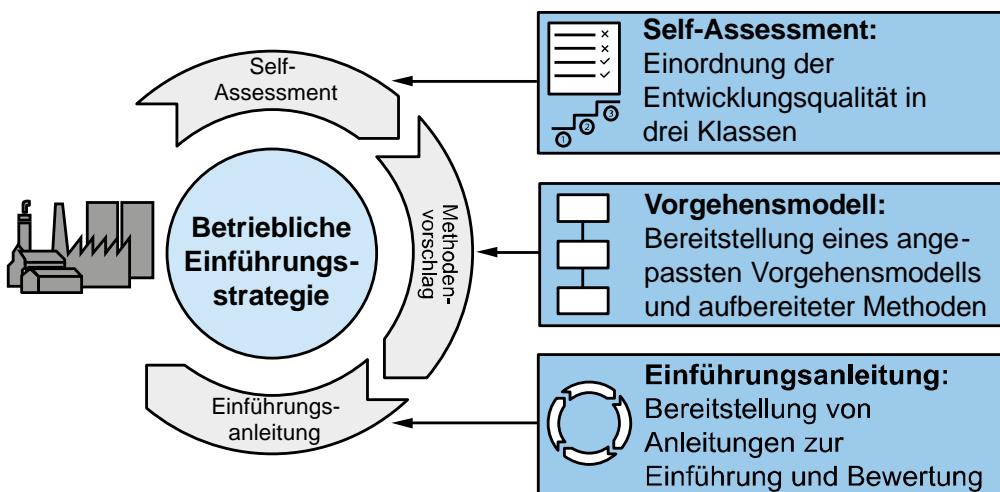


Bild 3-3: Aufbau und Zusammenhang der Bestandteile von BESTVOR [Bes09, S. 3]

Das **Self-Assessment** ist ein zwei stufiges Verfahren und dient Unternehmen zu einer eigenständigen Bewertung der Reife bzw. der Qualität ihrer Entwicklungsprozesse. In der ersten Stufe wird anhand von Leitfragen ein erster Eindruck der Reife eines Unternehmens in den definierten Prozessgebieten: Anforderungsmanagement, Projektplanung, Projektverfolgung, Qualitätssicherung und Konfigurationsmanagement erarbeitet. Die Leitfragen haben einen geringen Detailierungsgrad und adressieren eher Management- und Führungsebenen.

Jedem Prozessgebiete sind ein bis zwei Leitfragen zugeordnet, je Leitfrage müssen sechs bis sieben Aussagen (z.B. *Parallel zur Prüfung und Bewertung von Anforderungen entsteht ein Testplan*) (anhand trifft stets zu bis trifft nicht zu) bewertet werden. Den einzelnen Antworten sind wiederum vier Reifegrade zugeordnet. Das Ergebnis ist Anhaltspunkt über die Reife im Prozessgebiet. Der Reifegrad resultiert aus dem kleinsten erreichten Reifegrad eines Prozessgebiets. Außerdem ermöglicht ein Benchmark den Vergleich zu anderen Unternehmen, die an der Bewertung teilgenommen haben.

In der zweiten Stufe werden unter Berücksichtigung der ersten Analyseergebnisse Prozessgebiete identifiziert, die mit Hilfe von Detailfragen näher zu untersuchen sind. Hierzu sind jedem Prozessgebiet zwei bis zwölf Themengebiete zugeordnet, die mit Hilfe von detaillierten Fragen analysiert werden. *Beispiel: Prozessgebiet: Anforderungsmanagement, Themengebiet: Anforderungen ermitteln.*

Die Auswertung ergibt den Leistungstand, dieser wird softwareunterstützt direkt in Handlungsbedarfs (je Prozess- sowie Themengebiet von *kein* bis *sehr hoch*) übersetzt. Außerdem wird ein Zielreifegrad bereitgestellt, hierzu werden die Unternehmen nach Branche, Unternehmensgröße und Projekttyp klassifiziert und einer von drei Klassen zugeordnet. Aus diesen Klassen werden dann für das Unternehmen und seine aktuelle Situation passende Methoden und Vorgehensweisen zugeordnet. Grundlage dafür ist das **anwendungsorientierte Vorgehensmodell**. Es beinhaltet folgende Phasen: Initial Phase, Anforderungsspezifikation, Realisierung, Systemintegration, Abnahme und Nutzung. Die Detailfragen sind einer oder mehrere Phasen zugeordnet.

Die **Einführungsanleitung** unterstützt die Unternehmen dabei ihre Entwicklungsprozesse schnell und stufenweise zu Verbessern und eine permanente Optimierung zu erzielen. Die Anleitung besteht aus den vier Phasen Planen, Ausführen, Überprüfen und Standardisieren.

Die Anwendung der Systematik erfolgt in Workshops mit interdisziplinären Teilnehmern (z.B. Geschäftsführung, Projektleitung, Entwicklungsbereiche Mechanik, Software, Elektronik und Software, Service und Qualitätssicherung).

Bewertung:

Der beschriebene Ansatz ermöglicht mit Hilfe eines zweistufigen Verfahrens eine ressourcenschonende Bedarfsermittlung, die von den Unternehmen selbst durchgeführt werden kann. Den Rahmenbedingungen der Unternehmen des Maschinenbaus wird damit Rechnung getragen. Desweitern werden mechatronische Produkte fokussiert. Neben der Bedarfsanalyse wird ein allgemeines Vorgehensmodell zur Orientierung bereitgestellt. Die Einführungssystematik soll die Unternehmen bei der Implementierung unterstützen. Die Methoden und Ansätze des SE werden nicht explizit adressiert. Insbesondere die Herausforderungen im Zuge der Weiterentwicklung der Systeme wird nicht ausreichend berücksichtigt.

3.1.4 Methode zur Leistungsbewertung und -steigerung der Mechatronikentwicklung nach BALÁŽOVÁ

Ziel der Methode zur Leistungsbewertung und -steigerung der Mechatronikentwicklung nach BALÁŽOVÁ ist die Effizienzsteigerung im Produktentstehungsprozess mechatronischer Systeme. Im Rahmen der drei Handlungsfelder Mensch, Organisation und Technik unterstützt die Methode die Leistungsfähigkeit der aktuellen Entwicklungsarbeit zu erfassen und zu bewerten. Außerdem wird ein Weg für eine schrittweise Leistungssteigerung bis zu einem unternehmensindividuellen Idealzustand aufgezeigt [Bal04, S. 74].

Die Methode umfasst die drei Etappen Vorbereitung, Leistungsbewertung und Leistungssteigerung. Hierzu definiert der in Bild 3-4 veranschaulichte Ansatz das Vorgehen mit Phasen, Aufgaben und Resultaten. Außerdem werden folgende Werkzeuge zur Durchführung bereitgestellt: ein Handlungselemente-Katalog, ein Entwicklungsstufen-Katalog, ein Datenerhebungsbogen.

Der **Handlungselemente-Katalog** enthält und beschreibt Handlungselemente, die die Effizienz in der Produktentwicklung beeinflussen und ordnet diese den drei Handlungsfeldern zu. Exemplarische Handlungselemente für das Handlungsfeld Organisation sind *Aufbauorganisation* oder *Entwicklungssystematik*.

Der **Entwicklungsstufen-Katalog** beschreibt für jedes Handlungselement mögliche Entwicklungsstufen (z.B. *nicht definierte Entwicklungssystematik*, *teilweise definierte Entwicklungssystematik*, *definierte, aber flexibel ausgelegte Entwicklungssystematik* und *definierte und verfolgte Entwicklungssystematik* für das Handlungselement Entwicklungs- systematik).

Die objektive Erhebung der Ist-Situation wird mit Hilfe eines Befragungs- und Diskussionsleitfaden unterstützt, dem **Datenerhebungsbogen**.

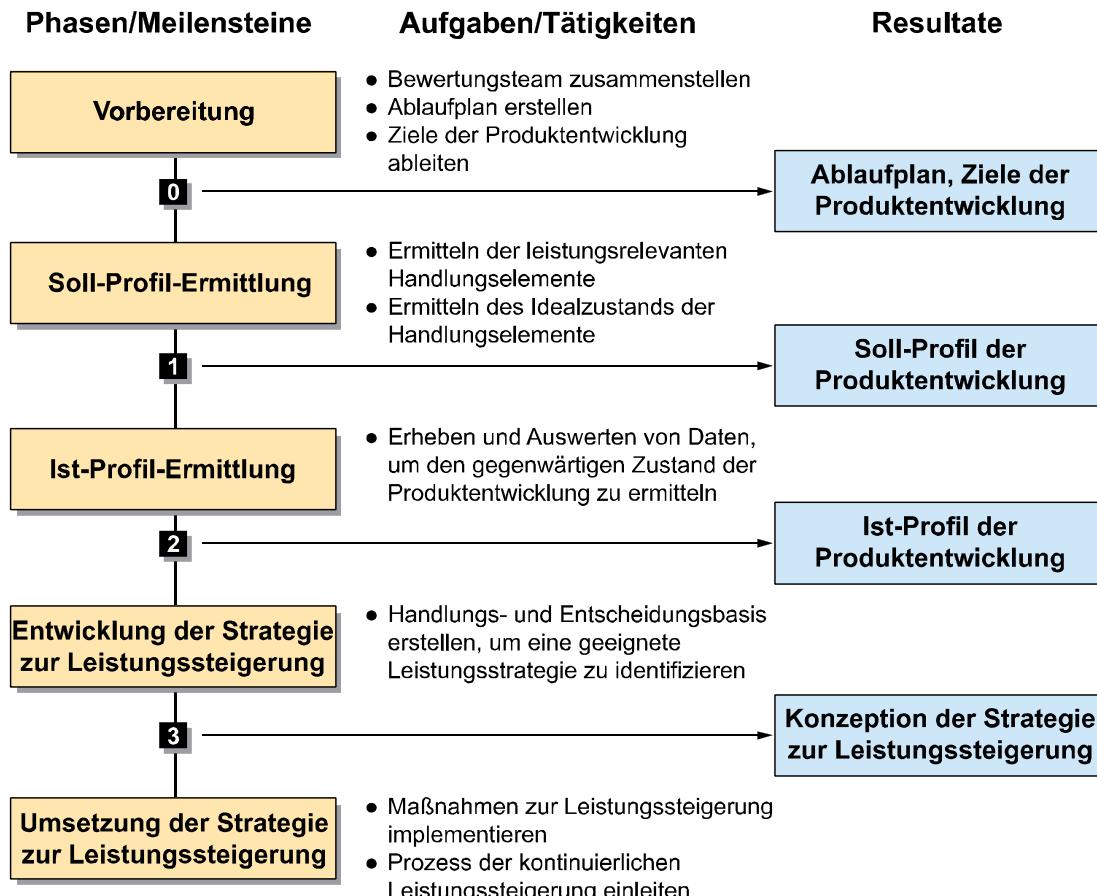


Bild 3-4: Vorgehen zur Leistungsbewertung und -steigerung der Mechatronikentwicklung nach BALÁŽOVÁ [Bal04, S. 77]

Vorbereitung: In der Vorbereitung werden die Rahmenbedingungen für das weitere Vorgehen geschaffen. Dies umfasst die Zusammenstellung der Bewertungsteams, die Festlegung des Ablaufplans und die Definition des Betrachtungsgegenstands. Der Ansatz kann sowohl auf ein spezifisches Projekt oder auf die gesamte Entwicklungseinheit angewendet werden. Zudem muss der Handlungselemente- sowie der Entwicklungsstufen-Katalog überprüft und ggf. an die Umstände des betrachteten Unternehmens angepasst werden. Ergänzend werden Ziele für die Entwicklungsabteilung bestimmt und in einem weiteren Katalog zusammengefasst, z.B. Entwicklungskosten senken.

Soll-Profil-Ermittlung: In der Phase Soll-Profil-Ermittlung werden zunächst die Handlungselemente der Produktentwicklung analysiert und diejenigen identifiziert, die für das betrachtete Unternehmen besonders leistungsrelevant sind. Grundlage ist die Analyse hinsichtlich zweier Aspekte. Der erste Aspekt ist die Vernetzung der Handlungselemente. Es wird geprüft, inwieweit die Veränderung eines Handlungselements andere Handlungselemente beeinflusst. Der zweite Aspekt ist der Zielbeitrag der Handlungselemente. Mit Hilfe einer sog. Zielbetragsmatrix wird untersucht, welchen Beitrag Handlungselemente und Entwicklungsstufen zur Erreichung der Entwicklungsziele leisten. Die Entwicklungsstufen mit dem höchsten Beitrag zu den Entwicklungszielen bilden das Soll-Profil.

Ist-Profil-Ermittlung: Um ein umfassendes Bild über den gegenwärtigen Zustand der Produktentwicklung des betrachteten Unternehmens zu erhalten, umfasst die Ist-Profil-Ermittlung die zwei Arbeitsschritte Datenerhebung und Datenauswertung. Die Datenerhebung erfolgt mit Hilfe des Datenerhebungsbogens, welcher Fragen zu jedem Handlungselement enthält. Für jedes Handlungselement wird so die derzeitige Entwicklungsstufe bestimmt. Anschließend werden die Daten ausgewertet und zu einem Ist-Profil überführt.

Entwicklung der Strategie zur Leistungssteigerung: In dieser Phase wird der Ist-Zustand dem gewünschten Soll-Zustand gegenübergestellt und Abweichungen identifiziert. Ergebnis ist der spezifische Handlungsbedarf. Anschließend wird eine Handlungsbasis erstellt, sie enthält konsistente Leistungsstufenbündel. Hierunter werden sinnvolle Kombination einzelner Entwicklungsstufen der Handlungselemente verstanden. Unter Berücksichtigung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses werden sinnvolle Entwicklungsstufen bestimmt.

Umsetzung der Strategie zur Leistungssteigerung: In der letzten Phase werden die erarbeiteten Maßnahmen zur Umsetzung der Strategie implementiert und ein Prozess zur kontinuierlichen Leistungssteigerung initiiert.

Bewertung:

Die Methode zur Leistungsbewertung und -steigerung der Mechatronikentwicklung nach BALÁŽOVÁ stellt ein Vorgehensmodell sowie unterstützende Werkzeuge zur Analyse der Ist-Situation und der Verbesserung von Entwicklungsprozessen bereit. Dem Betrachtungsgegenstand liegen die drei Handlungsfelder Mensch, Organisation und Technik zu Grunde, für die einzelne Handlungselemente und dazugehörige Entwicklungsstufen vorgeschlagen und detailliert beschrieben werden. Sowohl Handlungselemente als auch Entwicklungsstufen können an die Voraussetzungen im Unternehmen angepasst werden, allerdings wird dieser Schritt nicht weiter unterstützt. Ebenfalls wird die Berücksichtigung von produktspezifischen und organisatorischen Eigenschaften in der Soll-Profil Ermittlung nicht explizit adressiert. Aufeinander aufbauende Entwicklungsstufen ermöglichen die schrittweise Umsetzung des Idealzustands. Trotz komplexer Berechnungsvorschriften kann die Methode ohne geschultes Personal durchgeführt werden. Die Eignung für mittelständische Unternehmen ist somit gegeben. SE steht nicht im Fokus der Betrachtung, wodurch auch keine Bereitstellung von Ansätzen des SE vorgenommen wird.

3.2 Ansätze zur Bereitstellung von Methoden und Prozessen im SE

Die Problemanalyse hat den Bedarf nach der zielgruppengerechten Bereitstellung von Prozessen und Methoden im Systems Engineering für den mittelständischen Maschinenbau aufgezeigt. Vor diesem Hintergrund thematisiert der folgende Abschnitt Ansätze, die Methoden und Prozesse in der Produktentwicklung für den Anwender zu strukturieren und zur Verfügung zu stellen. Abschnitt 3.2.1 liefert dafür zunächst einen generellen Überblick über Methodenbeschreibung und -sammlungen in der Produktentwicklung.

Mit der Beschreibung der ISO/IEC TR29110 (vgl. Abschnitt 3.2.2) wird ein ganzheitlicher Ansatz aus der SE Community mit dem Fokus auf KMU erörtert. Abschließend erfolgt die Erläuterung des Ansatzes zur situativen Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte nach PONN (vgl. Abschnitt 3.2.3).

3.2.1 Methodenbeschreibung und -sammlungen in der Produktentwicklung

In der Produktentwicklung steht dem Anwender eine Vielzahl von Methoden zur Unterstützung seiner Aufgaben zur Verfügung. Zur Orientierung dienen Beschreibungsmodelle sowie Methodensammlungen.

Beschreibungsmodelle beschreiben und charakterisieren Entwicklungsmethoden in einer standardisierten und strukturierten Form anhand von Merkmalen und ermöglichen dadurch die Differenzierung der Methoden für den Anwender. Die vorhandenen Modelle unterscheiden sich in der Auswahl, Anzahl und Strukturierung der erhobenen Merkmale [Pon06, S. 92], [EM13, S. 145ff.], [Lin09, S. 57ff.]. Ein in der Produktentwicklung bekanntes Modell ist das Prozessorientierte Methoden-Modell (PoMM) nach BIRKHOFER ET AL. [BKB+02, S. 19], [BLA+01], [Pon06, S. 92]. Das Modell beschreibt eine Methode als Prozess, in welchem ein Anfangszustand (Input) in einen Endzustand (Output) überführt wird. Es stellt dem Nutzer eine prozessorientierte Methodenbeschreibung bereit, die neben In- und Output weitere Eigenschaften wie z.B. Benutzereigenschaften oder Hilfsmittel enthält (Bild 3-5).

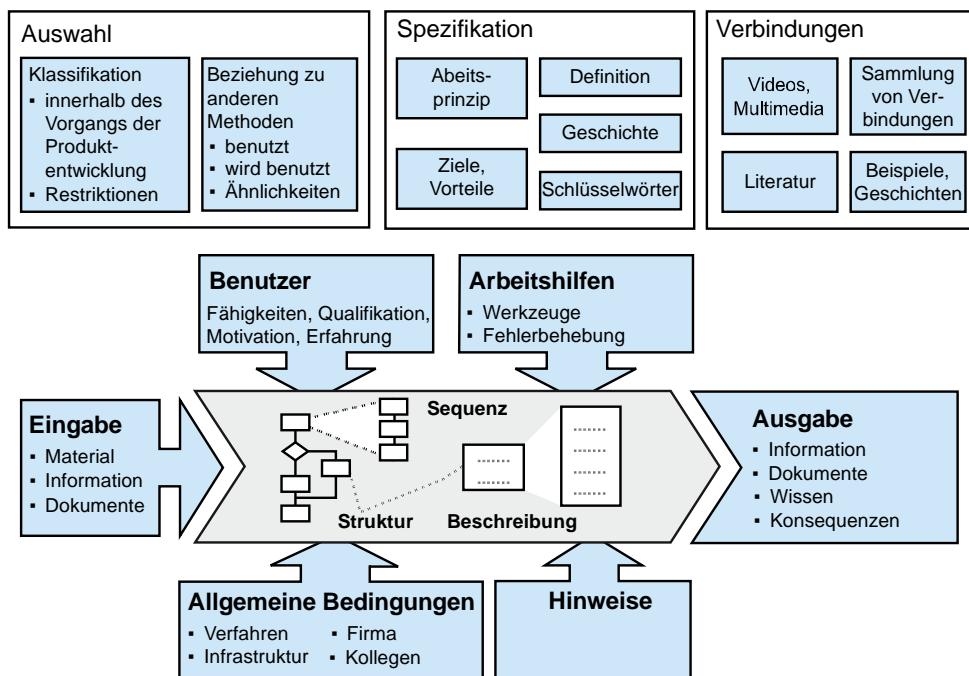


Bild 3-5: Prozessorientiertes Methoden-Modell (PoMM) nach BIRKHOFER ET AL. [BKB+02, S. 26]

Die Auswahl und Anzahl der Beschreibungsmerkmale beeinflusst den gezielten Methodeneinsatz. Um den Anwender zu unterstützen, ist die richtige Anzahl der Kriterien/ Informationen zu wählen. Zu viele Information machen die Methodenauswahl zu komplex – zu wenige unterstützen ebenfalls nicht [Zan99, S. 46], [AWG+14].

Methodensammlungen in der Produktentwicklung nutzen häufig die Beschreibungsmodelle, um eine Ansammlung verschiedener Methoden zu charakterisieren und ordnen die Methoden anhand verschiedener Aspekte, z.B. Phasen im Entwicklungsprozess, Organisationseinheit. Methodenordnungen bieten neben einem Überblick, Anhaltspunkte für die Auswahl von Methoden. In der Produktentwicklung steht eine Vielzahl derartiger Methodensammlung zu Verfügung [EM13], [PB77], [PBF+07], [Lin09], [DH94], [Str04]. Sie unterscheiden sich in ihren Themenschwerpunkten und die entsprechend aufgeführten Methoden. Zudem variiert die Methodenaufbereitung sowie die Existenz und Art einer Methodenordnung.

Ehrlein Spiel definiert einen **Methodenbaukasten** als eine systematisch geordnete Sammlung von Methoden, die für bestimmte Arbeitsschritte eines Prozesses alternativ eingesetzt werden können und für deren Auswahl Hilfen angegeben sind [EM13, S. 318]. Dieser muss neben der Verknüpfung zwischen Aufgaben und zweckmäßigen Bearbeitungsmethoden, Auswahlkriterien und Hinweisen für den Methodeneinsatz bereitstellen. Außerdem sollen Methodenbaukästen erweiterbar und aktualisierbar sein.

Neben klassischen papierbasierten Sammlungen stehen immer mehr digitale Methodenkataloge oder webbasierte Methodenportale im Internet zur Verfügung. Tabelle 3-10 gibt eine Übersicht ausgewählter Methodensammlungen in der Produktentwicklung. Hierzu wird zwischen Methodensammlungen aus dem deutschsprachigen Raum und internationalen Sammlungen, die der Systems Engineering Community zugeordnet werden können, unterschieden.

Tabelle 3-1: Übersicht ausgewählter Methodensammlungen in der Produktentwicklung

Methodensammlung	Schwerpunkt der Sammlung; Charakteristika	Methodenanzahl, -ordnung & -beschreibung
Deutschsprachiger Raum		
VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221]	Entwicklung & Konstruktion; Zugriff über Arbeitsschritte des Vorgehensmodells (Matrix)	77 Methoden; 5 Kategorien
PAHL/BEITZ Konstruktionslehre [PBF+07]	Fokus: Entwicklung technischer Systeme (Konzipieren, Entwerfen); Zugriff über Matrix	35 Methoden: uneinheitlich über das Buch verteilt

EHRLENSPIEL: Integrierte Produktentwicklung [EM13]	Integrierte Produktentwicklung; allgemeine, organisatorische, sachgebundene Methoden; Zugriff über Matrix	90 Methoden; 20 Kategorien; uneinheitlich, über das Buch verteilt
DAENZER & HUBER [DH94]	Systems Engineering (Systemgestaltung, Projektmanagement); Ordnung nach Problemlösungsprozess	107 Methoden; 10 Kategorien; uneinheitlich, zusammenhängend
EVERSHEIM [Eve03]	Planung von Produktinnovationen; Zuordnung zu Elementen des W-Modells	38 Methoden; standardisiert, Buchanhang
BRAUN: Method. Unterstützung der strat. Produktpflege in einem mittelst. geprägten Umfeld. [Bra05]	Strategische Produkt- und Prozessplanung; Zuordnung zu Phasen und einzelnen Prozessschritten	52 Methoden
LINDEMANN: Method. Entwicklung tech. Produkte [Lin09]	Produktentwicklung (Problemlösung) Methoden im Portal CiDaD enthalten	83 Methoden; standardisiert Buchanhang
Methodenbaukasten SFB 614 [GSR14]	Entwurfsmethodik für Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus	52 Methoden; 2 Ober- und 7 Unterarten, Buchkapitel
Portal Innovations-wissen.de [SPP17]	Katalog an Prozessschritten und Methoden für die Strategische Produkt- und Prozessplanung	50 Methoden
Virtuelle InnoFox [AS15]	App zur bedarfsgerechten Methodenempfehlung bzw. -kombination in der Produktentwicklung	105 Methoden; Applikation für mobile Endgeräte
Systems Engineering Community		
Methodensammlung MBSE [OMG17-ol]	Methoden des Model-Based, bzw. Model-Driven Systems Engineering	13 Methoden; 2 Kategorien
Studie „Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies“[Est08]	Methoden des Model-Based Systems Engineering	8 Methoden; 2 Kategorien

Im Folgenden werden beispielhaft die Methodenbaukästen von EHRLENSPIEL UND MEERKAMM, LINDEMANN, DAENZER und HUBER, das OMG MBSE Wiki und die Studie Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies vorgestellt.

Das Buch **Integrierte Produktentwicklung** von EHRLENSPIEL UND MEERKAMM führt ungefähr 90 Methoden auf, die sich grob in allgemein anwendbare, organisatorische und sachgebundene Methoden [EM13, S. 359ff.] untergliedern lassen. Die Methoden werden Arbeitsschritten der Entwicklung und Konstruktion mit Hilfe einer Matrix zugeordnet. Außerdem wird die Eignung der Methoden für die Funktionsbereiche Produktion, Vertrieb und Controlling angegeben. Eine Checkliste unterstützt den Anwender bei der Auswahl geeigneter Methoden, indem beispielsweise der Zweck und die Anwendbarkeit dem Bedarf gegenübergestellt wird.

LINDEMANN beschreibt ebenfalls im Buchanhang Arbeitsmethoden zur **Entwicklung technischer Produkte**. Die Methodenbeschreibung orientiert sich am prozessorientierten Münchener Methoden Modell. Im Hauptteil des Buchs erfolgt eine Orientierung an den Elementen des Münchener Vorgehensmodells [Lin09, S. 241ff.]. Die Methoden sind über das Methodenportal CiDaD (Competence in Design and Development) auch digital verfügbar [Pon06, S. 93], [CiD-ol].

Im Buch **Systems Engineering** werden Techniken und Hilfsmittel für die Unterstützung der Arbeiten bei der System-Gestaltung und beim Projekt-Management bereitgestellt [DH94, S. 426ff.]. Hier handelt es sich mehr um eine Übersicht, die auf die entsprechende Literatur verweist.

Auf der Website omgwiki.org befindet sich das **OMG MBSE Wiki**, welches die Aktivitäten der MBSE Initiative unterstützt. Gesponsert von INCOSE und OMG SE DSIG (OMG Systems Engineering DSIG) verfolgt das Wiki zwei Ziele. Zum einen soll die international Systems Engineering Gemeinschaft mit aktuellen Übersichten zu führenden MBSE-Prozessen und -Methoden aus der Industrie versorgt werden. Hierbei wird insbesondere die Methodik hervorgehoben. Zum anderen erarbeitet das Wiki nutzvolle Kennzahlen und Daten, welche in MBSE-bezogenen Programmen und Projekten genutzt werden können. Das Wiki enthält insgesamt dreizehn Methoden, welche für den Einsatz im MBSE-Umfeld beschrieben werden [OMG17-ol].

Die Studie „**Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies**“ von ESTEFAN für die INCOSE MBSE Initiative befasst sich mit der Betrachtung von einigen führenden und in der Industrie eingesetzten modellbasierten Systems Engineering Ansätzen. Der Beitrag gibt einen Überblick über einzelne Prozesse, Methoden, dem definierten Umfeld sowie Tools, welche die jeweiligen Ansätze im Kontext Model-Based Systems Engineering unterstützen. Die Studie umfasst folgende Methoden: Harmony-SE und Rational Unified Process for Systems Engineering (RUP SE), jeweils von IBM, Object-Oriented Systems Engineering Method (OOSEM) von INCOSE, die Model-Based System Engineering Methodology (MBSE) von Vitech, sowie die State Analysis (SA) von JPL und die Object-Process Methodology von Dori, MBSE Ansatz Model-Driven

Architecture (MDA) von OMG sowie den neueren Ansatz der Executable UML Foundation [Est08].

Ebenso wie für die Beschreibung von Methoden existieren Modelle, die den Einsatz von Methoden im Rahmen von Entwicklungsprozessen charakterisieren. Das Münchener Methodenmodell (Bild 3-4) beschreibt den Einsatz von Methoden, hierzu wird die Methodenauswahl, -anpassung und -anwendung betrachtet.

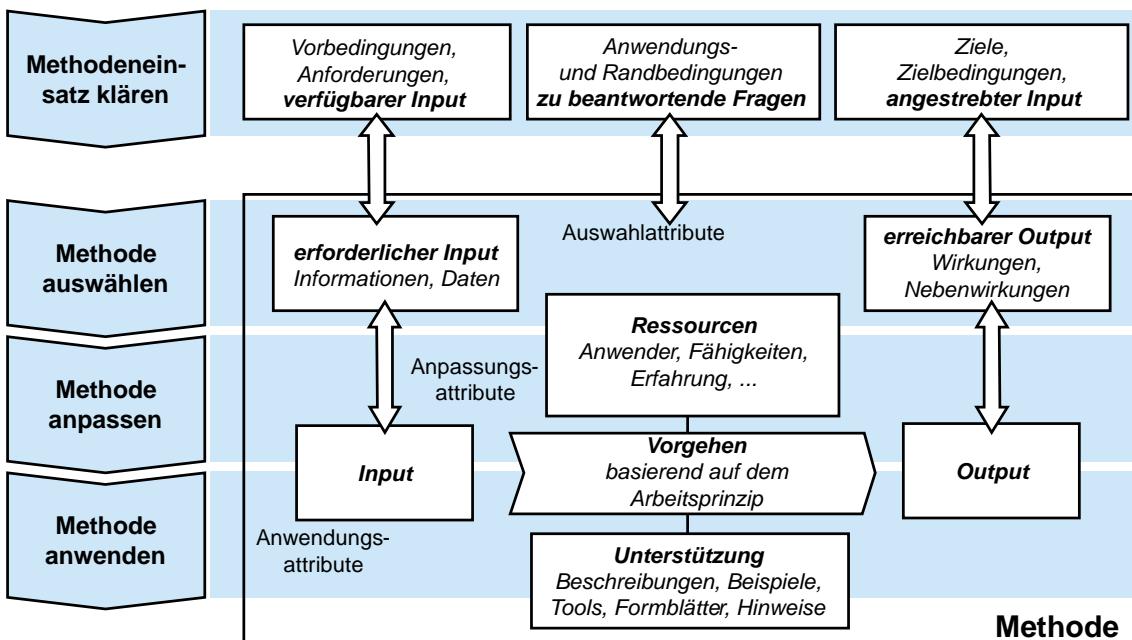


Bild 3-6: Münchener Methodenmodell [Lin09, S. 60]

Zunächst ist der Methodeneinsatz zu klären. Die Vorbedingungen, der verfügbare Input, Anwendungs- und Randbedingungen und Ziele, Zielbedingungen und den angestrebten Output werden hierzu bestimmt. Anschließend wird eine für die vorliegende Situation geeignete Methode ausgewählt. Sie muss die anstehende Aufgabe unterstützen und mit den angestrebten Zielen übereinstimmen. Zusätzlich wird der Einfluss der vorhandenen Ressourcen, z.B. die Qualifikation der Anwender, in die Betrachtung miteinbezogen. Entsprechend der Entwicklungssituation werden die Methoden nach der Auswahl an diese angepasst. Anschließend erfolgt die Methodenanwendung. Formblätter, Werkzeuge oder weitere Hilfsmittel unterstützen die Anwendung der Methode [Lin09, S. 60ff.].

Bewertung:

Die Ausführungen zeigen, dass bereits fundierte Ansätze zur Methodenbeschreibung und -auswahl existieren. Entsprechend sollte die Systematik diese Modelle aufgreifen und zur Orientierung nutzen. Die aufgeführten Sammlungen zeigen, dass es ebenfalls eine hohe Vielfalt an Methodensammlungen gibt. Sie haben unterschiedliche Themenschwerpunkte. Keine adressiert explizit die Herausforderungen des Maschinenbaus im Kontext Systems Engineering. Die Strukturierung und Aufbereitung der Sammlungen kann trotz dessen als Grundlage für die Ausgestaltung der Systematik dienen, um eine Integration neuer Methoden in den Entwicklungsprozess zu ermöglichen.

3.2.2 ISO/IEC TR29110 – Systems and software engineering - Lifecycle profiles for Very Small Entities

Der Internationale Standard ISO/IEC TR29110 „Systems and Software Engineering - Lifecycle Profiles for Very Small Entities“ wurde 2011 ursprünglich für Software-entwickelnde Unternehmen veröffentlicht. Anhand von vordefinierten Profilen soll die Anwendung von Systems Engineering bei Kleinstunternehmen und -projekten unterstützt werden. Grundlage hierfür ist die ISO15288 (vgl. Abschnitt 2.5). Das übergeordnete Ziel ist die Unterstützung und Ermutigung kleiner Unternehmen bei der Beurteilung und Verbesserung ihrer (Software)-Prozesse [LCP15, S. 2], [ISO/IEC TR29110].

Die ISO/IEC TR29110 ist in fünf Parts unterteilt: Part 1, Part 3 und Part 5 werden kostenlos von der internationalen Organisation für Standardisierung (ISO) zur Verfügung gestellt. Part 1 bietet dem Leser einen **Überblick** über die verschiedenen Bestandteile: Profile, Leitfäden und Deployment Packages (Bild 3-7).

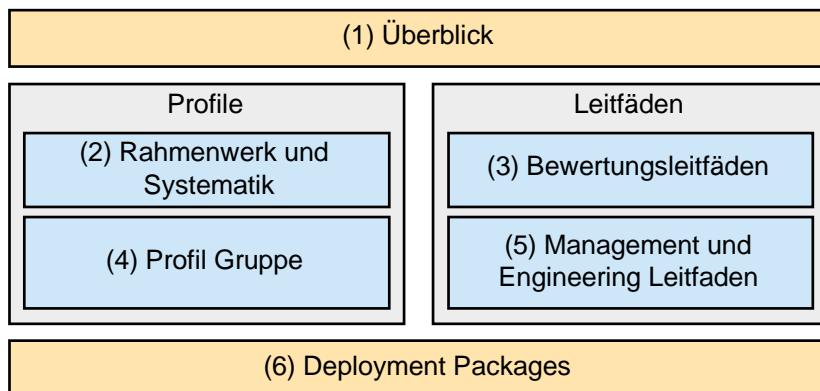


Bild 3-7: Bestandteile der ISO/IEC 29110 – Systems and Software Engineering – Lifecycle Profiles for Very Small Entities [ISO/IEC TR29110]

Die Norm ermöglicht über **Profile** und Profilgruppen die Beschreibung zielgruppenspezifischer Merkmale und Anforderungen. Mehrere Profile sind mit unterschiedlichen Ausprägungen jeweils einer Profilgruppe zugeordnet. Bisher ist die *Generic Profile Group* für „*non criticalsystems*“ beschrieben. Insgesamt sind vier Profile definiert („*entry*“, „*basic*“, „*intermediate*“ und „*advanced*“). Von diesen vier sind bisher lediglich Entry und Basic zugänglich. Das Entry-Profil legt hierbei seinen Fokus auf Start-Up Unternehmen, die weniger als drei Jahre existieren und/oder an kleinen Projekten arbeiten (weniger als 6 Personen-Monate). Das Basic-Profil richtet sich an Unternehmen mit bis zu 25 Mitarbeitern, welche keine Erfahrungen mit der Einführung von Systems-Engineering aus der ISO/IEC 15288 besitzen.

Der **Bewertungsleitfaden** ermöglicht eine Auditierung bzw. Selbstauditierung. Der **Management und Engineering Leitfaden** adaptiert die Prozesse aus der ISO 15288 für Kleinstunternehmen. Er beschreibt die wesentlichen Prozesse im Projektmanagement und

Systemdefinitions- und Realisierungsprozess. Die Prozesse werden entsprechend der Anforderungen in den Profilen zusammengefasst. Die Beschreibung der Prozesse erfolgt über einzelne Tasks in tabellarischer Form.

Zusätzlich sollen **Deployment Packages** die Implementierung der ISO vereinfachen. Sie enthalten neben allgemeinen themenspezifischen Informationen, detaillierte Prozessbeschreibungen, Rollenbeschreibungen, Vorlagen, Checklisten, Beispiele und Hilfsmittel.

Bewertung:

Die vorgestellte Norm hat den Anspruch SE Kleinstunternehmen zugänglich zu machen. Allerdings sind nicht alle Elemente verfügbar – derzeit werden nur Part 1, Part 3 und Part 5 von der internationalen Organisation für Standardisierung (ISO) zur Verfügung gestellt. Insbesondere der Systems Engineering Part ist noch mager. Der Fokus liegt auf Unternehmen im Bereich Software Entwicklung. Die Bedarfsermittlung erfolgt über Profile und einen Bewertungsleitfaden. Der Ansatz ermöglicht so eine einfache Herangehensweise zur Bestimmung der Ist-Situation sowie des Ziel-Leistungsstands. Die Bereitstellung der Deployment Packages unterstützt unterdessen eine Implementierung der Ansätze. Die Profile passen nicht zum Maschinenbau und machen die Norm daher für sie ungeeignet. Des Weiteren ist die Norm unübersichtlich und kompliziert.

3.2.3 Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte nach PONN

Die Systematik nach PONN bietet einen Lösungsansatz zur situativen Unterstützung von Produktentwicklungsingenieuren bei ihrer täglichen Arbeit. Auf Grundlage der vorliegenden Entwicklungssituation und der zu bearbeitende Entwicklungsaufgabe wird die Auswahl adäquater Arbeitsmethoden unterstützt und die Planung der nächsten Arbeitsschritte ermöglicht. Die Systematik fokussiert die Konzeptentwicklung technischer Produkte auf operativer Ebene und umfasst die drei Bestandteile Beschreibungsmodell, Informationssammlung und Anwendungsmethodik (Bild 3-8) [Pon06].

Das **Beschreibungsmodell** definiert wie die Aspekte Entwicklungssituation, Entwicklungsaufgabe und Methode anhand verschiedener Kriterien zu beschreiben sind und spezifiziert deren Verknüpfung. Die Beschreibung erfolgt mit Hilfe von standardisierten Rastern, die Entwicklungssituation wird anhand von Prozessbausteinen definiert, Methoden mit Hilfe von Steckbriefen.

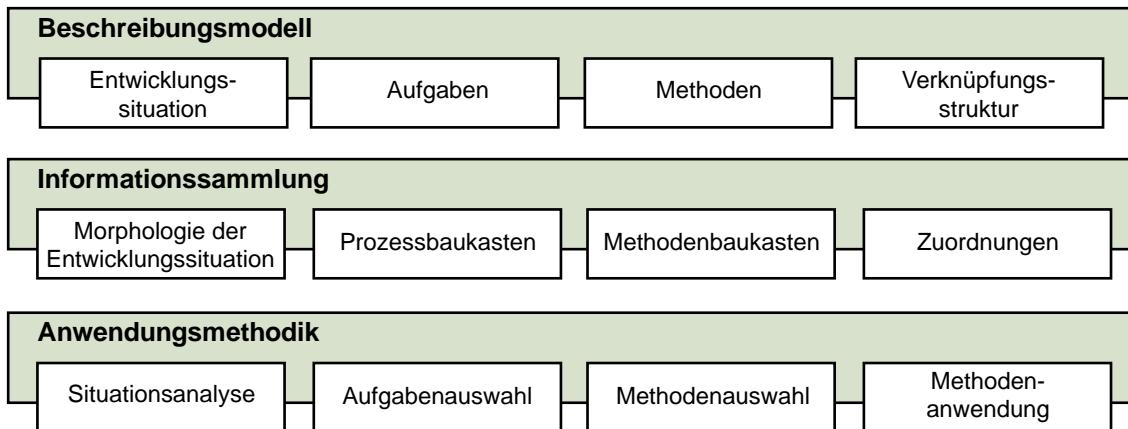


Bild 3-8: Struktur und Komponenten des Lösungsansatzes nach PONN [Pon06, S. 121]

Die **Analyse der Ausgangssituation** erfolgt mit Hilfe der Entwicklungssituation. Davon ausgehend werden Entwicklungsaufgabe und relevante Methoden ausgewählt.

Die Entwicklungssituation ist ein konkreter Zeitpunkt im Entwicklungsprozess, der sich durch den Zustand der vorhandenen Produktmodelle und des Entwicklungsprozesses sowie durch Einflussfaktoren auf Produkt und Prozess beschreiben lässt.

Zur Beschreibung der Entwicklungsaufgabe werden sowohl der direkte als auch der indirekte Kontext betrachtet. Der direkte Kontext wird durch Faktoren spezifiziert, die das gegenwärtige Betrachtungsobjekt des Entwicklungingenieurs und dessen Wissensstand charakterisieren, z.B. Prüfergebnisse, Ereignisse oder Erkenntnisse. Nach jeder Entwicklungsaufgabe wird für jeden Faktor der Ist- und der Soll-Zustand spezifiziert. Der indirekte Kontext betrachtet Faktoren, die primär die Auswahl in Frage kommender Methoden betreffen und keinen direkten Einfluss auf die Entwicklungsaufgabenauswahl haben. Die Faktoren des indirekten Kontexts werden den Bereichen Entwicklungsaufgabe/Produkt, Entwicklungsprozess, Entwickler/Team und Rahmenbedingungen zugeordnet. Diese Faktoren finden sich ebenfalls in der Methodenbeschreibung und ermöglichen so die Verknüpfung beider Aspekte.

Die **Informationssammlung** ist die Ausprägung die einzelnen Bestandteile des Beschreibungsmodells für die Konzeptentwicklung. PONN stellt 18 Prozessbausteine und 36 Methoden sowie deren Verknüpfungen anhand spezifischer Faktoren zur Beschreibung des direkten und indirekten Kontexts von Entwicklungssituationen bereit.

Die **Anwendungsmethodik** besteht aus vier Schritten: Situationsanalyse, Aufgabenauswahl, Methodenauswahl und Methodenanwendung. Sie beschreibt wie ausgehend von der gegenwärtigen Entwicklungssituation die als nächstes auszuführende Entwicklungsaufgabe und die hierzu anzuwendende Methode identifiziert werden.

Bewertung:

Die von PONN entwickelte situationsspezifische Entwicklungsaufgabe- und Methodenauswahl klassifiziert die vorliegende Entwicklungssituation und gibt dem Entwickler

konkrete Handlungsanweisung für die als nächstes auszuführende Tätigkeit sowie die dabei einzusetzenden Methoden. Auf diese Weise werden die Entwickler während der Konzipierung situationsangepasst zur Problemlösung befähigt. Allerdings wird kein Fokus auf das Thema interdisziplinäre Zusammenarbeit gelegt. Das Beschreibungsmodell ist sehr umfangreich und die bereitgestellte Informationssammlung kann beliebig erweitert werden. Das Verfahren ist allerdings reaktiv ausgerichtet und sieht nicht die Planung des Entwicklungsprozesses vor. Rollen und Umsetzungskonzepte werden nicht adressiert. Außerdem werden die besonderen Herausforderungen bei der Entwicklung fortschrittlicher mechatronischer Systeme nicht explizit adressiert.

3.3 Planung und Verbesserung von Entwicklungsprozessen

Basierend auf dem Bedarf gilt es nutzenstiftende Ansätze zu identifizieren und in ein Lösungskonzept zu überführen. Diese müssen in den bestehenden Prozess zusammengeführt werden. Hierzu müssen die Entwicklungsprozesse geplant und verändert werden. Hierzu werden die transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse nach HELLENBRAND (vgl. Abschnitt 3.3.1), das Rahmenwerk für einen selbstoptimierenden Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme nach KAHL (vgl. Abschnitt 3.3.2) und der Ansatz zur situationsspezifischen Planung von Produktentwicklungsprozessen nach ROELOFSEN (vgl. Abschnitt 3.3.3) vorgestellt.

3.3.1 Transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Entwicklungsprozesse nach HELLENBRAND

Der Ansatz nach HELLENBRAND bietet eine methodische Unterstützung der Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse unter Berücksichtigung von intra- und interdisziplinärer Abhängigkeit sowie heterogener Vorgehensweisen der beteiligten Akteure [Hel12].

Kern ist die integrative Betrachtung der Produktarchitektur (Produktperspektive) und dem zugehörigen Entwicklungsprozess (Prozessperspektive). Das Standardvorgehen gliedert sich in die drei Phasen Modellbildung, Prozessplanung sowie Prozessdurchführung. Als Hilfsmittel werden verschieden Module bereitgestellt (Modellierungs-, Planung-, Analyse- und Steuerungsmodul) (Bild 3-9).

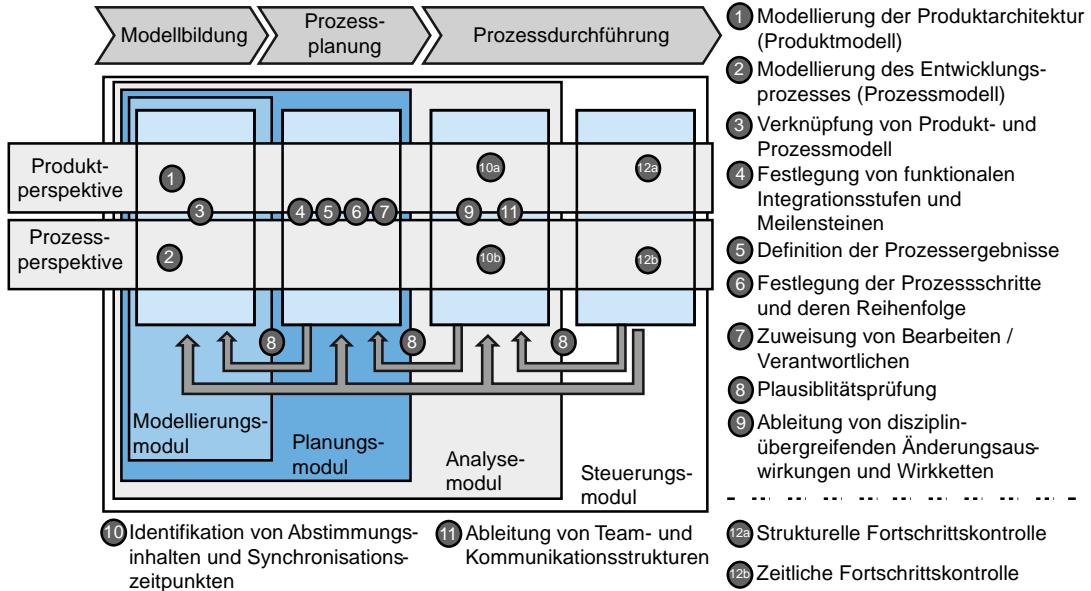


Bild 3-9: Vorgehensmodell nach HELLENBRAND [Hel12, S. 117]

Modellbildung: Ausgangspunkt ist das Produktmodell, mit Hilfe einer Multiple-Domain Matrix (MDM) werden die Komponenten und Funktionen in Beziehung gesetzt. Ergebnis ist die physikalische Funktionsstruktur wie auch die funktionale Komponentenstruktur. Das Prozessmodell stellt mit Hilfe von MDM Relation von Prozessschritten, Prozessergebnissen, Rollen und Meilensteinen her, welche anschließend mit den Funktionen und Komponenten des Produkts in Beziehung gesetzt werden.

Prozessplanung: Mit Hilfe der physikalischen Funktionsstruktur, der Wirkungs-Funktionsstruktur sowie die Funktionshierarchie wird die Grobstruktur (Phasen) des Entwicklungsprozesses abgeleitet und Meilensteine definiert. Anschließend werden über die Verknüpfung der Komponentenstruktur sowie dem erforderlichen Entwicklungsfortschritt die zur Erfüllung der Meilensteine notwendigen Prozessergebnisse sowie deren Ausprägung festgelegt. Nun können die notwendigen Prozessschritte deren Reihenfolge und die Zuordnung der Bearbeiter/Verantwortlichen bestimmt werden.

Prozessdurchführung: Auf Basis des Modells können anschließend verschiedenen Analysen zur Unterstützung der transdisziplinären Zusammenarbeit durchgeführt werden, z.B. Änderungsauswirkungen sowie die zugehörigen Wirkketten, Abstimmungsinhalte und Synchronisationszeitpunkte, Ableitung von Team und Kommunikationsstrukturen. Die Fortschrittkontrolle erfolgt über den Vergleich des aktuellen Entwicklungsstands mit dem Soll-Prozessplan.

Bewertung:

Der vorgestellte Ansatz unterstützt die integrative Betrachtung von Produkt und zugehörigem Entwicklungsprozess. Grundlage der Planung und Synchronisation ist die Produktarchitektur. Er greift somit die Eigenschaften mechatronischer Systeme in die Entwicklungsprozessplanung mit auf und adressiert die interdisziplinäre Zusammenarbeit. Der Fokus liegt auf dem Erkennen und Definieren wichtiger Synchronisationspunkte im

Prozess und einer entsprechenden Prozesssteuerung. Eine Unterstützung dieser Prozessschritte mit geeigneten Methoden wird allerdings nicht vorgenommen. Der Prozess wird für jedes Produkt neugeplant. Eine schrittweise Umsetzung der neuen Vorgehensweise wird nicht bereitgestellt.

3.3.2 Rahmenwerk für einen selbstoptimierenden Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme nach KAHL

Das Rahmenwerk für einen selbstoptimierenden Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme nach KAHL adressiert die Dynamik und Komplexität des Entwicklungsprozesses fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Ziel ist es den Entwicklungsprozess beherrschbar zu machen. Zu diesem Zweck wird das Paradigma der Selbstoptimierung auf die Planung, Ausführung, Überwachung und Steuerung des Entwicklungsprozesses übertragen. Der Ansatz stellt Werkzeuge zur Umsetzung des selbstoptimierenden Entwicklungsprozesses sowie ein Vorgehensmodell zur Initialisierung und Nachbereitung selbstoptimierender Entwicklungsprozesse bereit. Der Entwicklungsprozess wird als Gesamtmodell verstanden und enthält folgende Elemente: das Prozessmanagement und die Entwicklungstätigkeiten (Verhalten, Struktur und Parameter) [Kah12].

Die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Entwicklungstätigkeiten sind Entwicklungsobjekte. Sie werden in fachdisziplinübergreifende (z. Anforderungen) und fachdisziplinspezifische (z.B. Baustuktur) Entwicklungsobjekte unterteilt. Die Transformation der Entwicklungsobjekte durch die Entwicklungstätigkeiten erfolgt entsprechend durch das Prozessmanagement festgelegte Zielsystem. Die im Zielsystem des Entwicklungsprozesses zusammengefassten Ziele beschreiben das gewünschte, geforderte oder zu vermeidende Verhalten des Entwicklungsprozesses bezogen auf die Ausführung der aktuell durchgeföhrten oder noch durchzuführenden Entwicklungstätigkeiten, z.B. die geforderte Prozessgüte. Die Ziele werden durch das Prozessmanagement auf Basis der Vorgaben aus dem Unternehmensumfeld, den Vorgaben der unternehmensexternen Stakeholder und den Eigenschaften des Entwicklungsgegenstandes festgelegt.

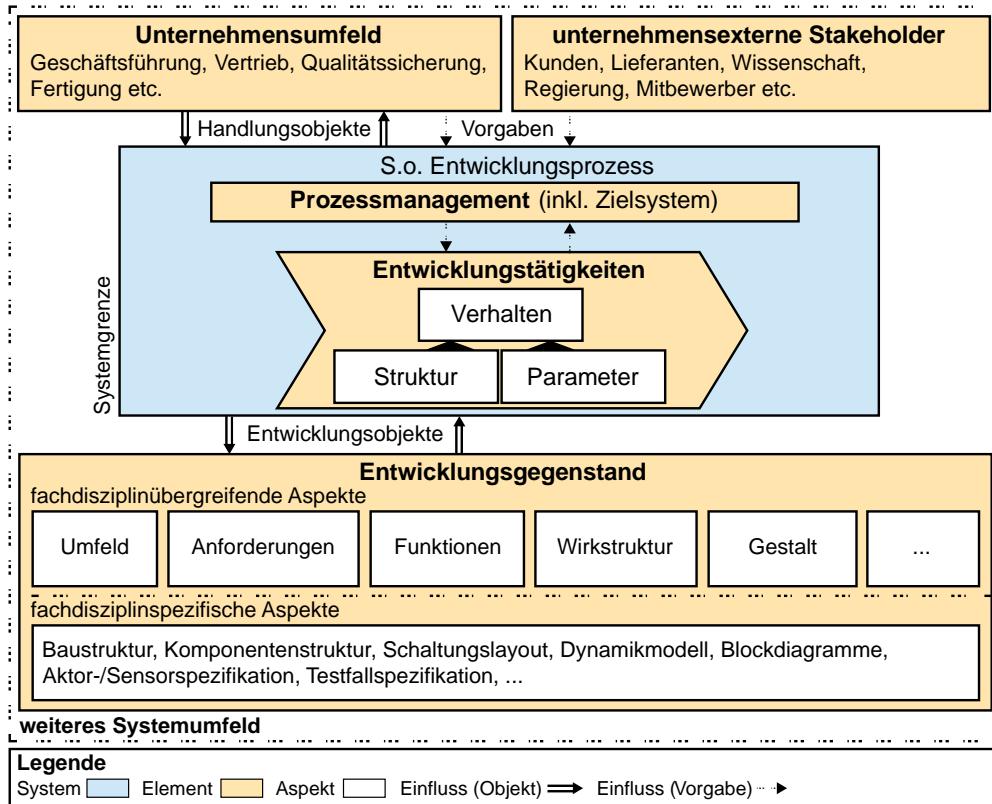


Bild 3-10: Systemisches Gesamtmodell des selbstoptimierenden Entwicklungsprozesses nach Kahl [Kah12, S. 100]

Die disziplinübergreifende Prinzipiösung des Produkts und Produktionssystems bildet die Grundlage für die Gestaltung des Entwicklungsprozesses. Die Aspekte Wirkstruktur und Funktionen werden als Hauptinformationsträger genutzt. In der Wirkstruktur werden die Systemelemente und ihre Beziehungen hinterlegt, diese können dann in Systemmodulen zusammengefasst werden. Sie dient zur Strukturierung der Entwicklungsaufgaben. Für die Systemelemente werden die verantwortlichen Fachdisziplinen und die dazugehörigen Entwicklungsobjekte (z.B. CAD-Modelle) hinterlegt. Aus diesen Informationen werden Zielentwicklungsobjekte und einer groben Prozessstruktur abgeleitet. Die Analyse von Modulverbindungen ermöglicht die Verfeinerung der Vorgangsfolge. Außerdem werden modulinterne Vorgangsfolgen bestimmt. Außerdem werden auf Basis der Prinzipiösung Hilfsmittel, Ressourcen und benötigten Fähigkeiten in der Entwicklung zugeordnet. [Kah12].

Bewertung:

Der Ansatz adressiert die Herausforderungen in der Entwicklung fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Auf Grundlage einer frühzeitigen Analyse der Prinzipiösung ermöglicht der Ansatz die Ableitung von Prozessplänen und das Zuordnen entsprechender Ressourcen und unterstützt somit die Gestaltung des Prozesses. Der Ansatz fokussiert neben der Planung die Ausführung, Überwachung und Steuerung des Entwicklungsprozesses in

einem konkreten Entwicklungsprojekt. Er adressiert allerdings nicht explizit die Herausforderungen des Maschinenbaus und ist sehr komplex. Die Ableitung von Prozessplänen und das Zuordnen entsprechender Ressourcen bietet die Möglichkeit diese Aspekte in die zu erarbeitende Systematik einzubeziehen.

3.3.3 Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen nach ROELOFSEN

Der Ansatz zur situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen nach ROELOFSEN entstand im Rahmen des durch die Bayrische Forschungsstiftung geförderten Forschungsverbunds FORFLOW. Ziel des Projekts war eine Prozess- und Workflowunterstützung zur Planung und Steuerung der Abläufe in der Produktentwicklung, [MHJ+09, S. 26]. ROELOFSEN unterstützt die situationsspezifische Auswahl und Konfiguration von Entwicklungsprozessen in Kombination mit adäquaten Methoden methodisch. Der Ansatz umfasst folgende Bestandteile: ein auf den spezifischen Anwendungsfall anpassbares Vorgehensmodell für die Entwicklung multidisziplinärer Produkte (FORFLOW-Prozessmodell), ein Ansatz für die produktmodellbasierte Planung und Ausführung von Entwicklungsprozessen, ein Schema zur Analyse von Entwicklungssituations sowie Methoden zur strategischen und operativen Planung von Entwicklungsprozessen. Diese sind prototypisch in einem Prozessnavigator umgesetzt [MHJ+09, S. 48ff.], [Roe11, S. 92ff.].

FORFLOW-Prozessmodell: Das FORFLOW-Prozessmodell ist die Grundlage der situationsspezifischen Auswahl und Konfiguration von Entwicklungsprozessen. Es ist in drei Hierarchieebenen unterteilt. Die erste Ebene unterscheidet sechs Hauptschritte eines Entwicklungsprozesses, wie z.B. „*Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung*“ oder „*Gesamtkonzept entwickeln*“. Die zweite und dritte Ebene detaillieren diese Hauptschritte jeweils. Auf der dritten Ebene werden insgesamt 86 Schritte beschrieben. Während für die ersten beiden Ebenen eine Bearbeitungsreihenfolge der Schritte empfohlen wird, wird die Reihenfolge in Ebene drei nicht spezifiziert. Die Reihenfolge soll bewusst situationsspezifisch ausgeprägt werden.

Produktmodellbasierte Planung und Ausführung von Entwicklungsprozessen: Der Ansatz beruht darauf den Entwicklungsprozess über die zu generierenden Produktmodelle zu steuern. Mit Hilfe des Product Model Driven Development wird die Entwicklungssituation analysiert und der Entwicklungsprozess geplant. Hierzu werden die Rahmenbedingungen der Entwicklung zur Projektsituation zusammengefasst und darauf aufbauend die Projektziele festgelegt. Auf dieser Grundlage kann der Entwicklungsprozess auf der ersten und zweiten Hierarchieebene des FORFLOW-Prozessmodells geplant werden. Anschließend folgt die operative Planung. Vorliegende und entsprechend dem bisherigen Prozessplan zu entwickelnde Produktmodelle, die Projektsituation und weitere Parameter werden zur Design Situation kombiniert. Diese wird zur Ausgestaltung des FORFLOW-Prozessmodells auf der

dritten Hierarchieebene hin zum auszuführenden Entwicklungsprozess genutzt. Zur kontinuierliche Anpassung des Entwicklungsprozesses erfolgt ein Vergleich des auszuführenden Entwicklungsprozesses mit der aktuellen Design-Situation sowie dem Status der Entwicklung.

Analyse von Entwicklungssituationen: Die Entwicklungssituationen wird an insgesamt 16 Parametern aus drei Kategorien (Projektebene, operativer Ebene, und Übergreifende Parameter) untersucht.

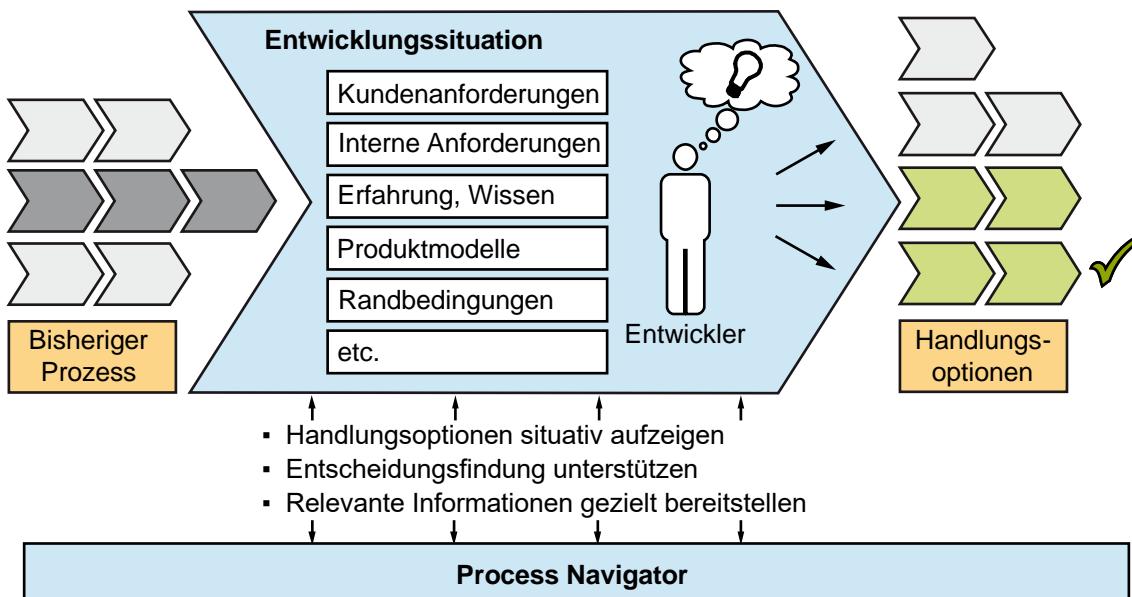


Bild 3-11: Entscheidungsgrundlagen für das Vorgehen im Entwicklungsprozess nach ROELOFSEN [Roe11, S. 115ff.]

Methoden zur strategischen und operativen Prozessplanung: Mit Hilfe dieser Parameter werden die auszuführenden Schritte der ersten und zweiten Hierarchieebene des FORFLOW-Prozessmodells ausgewählt und ein vorläufiger Projektplan erstellt. Auf der operativen Ebene bestimmt der projektausführende Entwickler die Reihenfolge der auszuführenden Schritte auf der dritten Hierarchieebene des FORFLOW-Prozessmodells. Hierzu werden zeitbasierte Design Structure Matrizen genutzt.

Bewertung:

Der von ROELOFSEN im Rahmen des Forschungsverbundes FORFLOW erarbeitete Ansatz ermöglicht die Planung des Entwicklungsprozesses auf Basis einer Klassifikation der aktuellen Entwicklungssituation. Darauf aufbauend wird ein Tayloring des vordefinierten FORFLOW-Prozessmodells ermöglicht und somit ein rationaler Einsatz der Prozesse und der verknüpften Methoden unterstützt. Der Ansatz adressiert die Entwicklung multidisziplinärer Produkte – das Themenfeld Systems Engineering und die damit verbundenen Vorgehensweisen stehen allerdings nicht im Vordergrund. Außerdem geht der Ansatz davon aus, dass alle Voraussetzungen zur direkten Umsetzung gegeben sind. Die schrittweise Umsetzung der Vorgehensweisen wird nicht adressiert.

3.4 Ansätze zur Einführung von Systems Engineering

Die Systematik hat das Ziel, die Grundlage zu schaffen, die relevanten Ansätze des SE schrittweise in die Ablauf- sowie Aufbauorganisation des Unternehmens zu implementieren. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden Ansätze zur Einführung von Systems Engineering untersucht. Hierzu gehören die Einführung von modellbasierter Systementwicklung nach ALT (vgl. Abschnitt 3.4.1) und der Guide for the Application of Systems Engineering in Large Infrastructure Projects nach INCOSE (vgl. Abschnitt 3.4.2).

3.4.1 Einführung von modellbasierter Systementwicklung nach ALT

In seinem Buch beschreibt ALT welche Faktoren es zu beachten gilt, wenn Unternehmen eine modellbasierte Entwicklung für ihre Projekte einführen möchten. Speziell fokussiert er dabei die nichttechnischen Anforderungen, die beim Einführungsprozess beachtet werden müssen. Die Berücksichtigung und Umsetzung dieser weichen Hauptfaktoren trägt ebenso zum erfolgreichen Gelingen bei: Managementunterstützung, Auswahl geeigneter Mitarbeiter, Schulung von Mitarbeitern, Unterstützung der Arbeit durch geeignete Werkzeuge, Praxiserfahrung. Sie werden im Folgenden erläutert [Alt12, S. 161ff.]. In Bezug auf die Durchführung eines **Pilotprojekts** lässt sich ein Vorgehen wie in Bild 3-10 darstellen aus den Ausführungen ableiten.

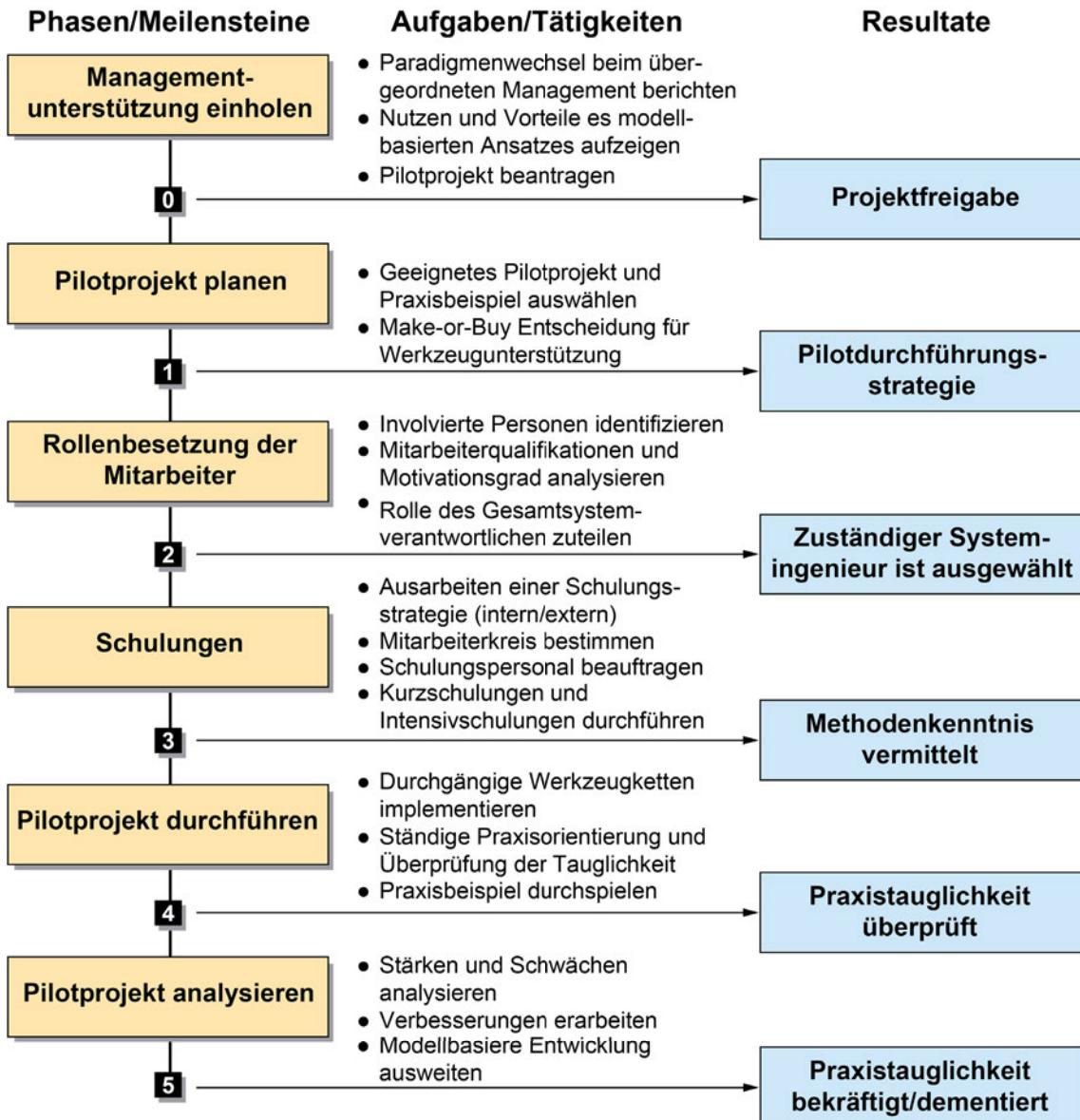


Bild 3-12: Vorgehen zur Einführung von MBSE nach ALT [Alt12]

Managementunterstützung: Entscheidend ist eine konsequente Unterstützung des Managements um Veränderungen bewirken zu können. Dies soll auch über Fachbereiche und Abteilungen hinweg geschehen.

Auswahl geeigneter Mitarbeiter: Bei der Einführung, insbesondere bei Pilotprojekten, sollen motivierte Mitarbeiter ausgewählt werden, die neue Arbeitsweisen annehmen und umsetzen.

Schulungen: Schulungen werden als Kernpunkt gesehen, um Berührungsängste mit neuen Ansätzen zu verringern und eine erfolgreiche Anwendung sicherzustellen. Hierzu müssen Schulungsstrategien ausgearbeitet und die Teilnehmerkreise definiert werden. Es wird zwischen Kurz- und Intensivschulungen unterschieden.

Unterstützung der Arbeit durch geeignete Werkzeuge: Akzeptanz von Methoden und Verfahren hängen von der Werkzeugunterstützung ab. Im Kontext der modellbasierten Systementwicklung werden Softwarewerkzeuge benötigt, die den Anwender dabei unterstützen, die Modelle einfach erstellen und Informationen daraus ableiten zu können. Ziel sollte eine durchgängige Werkzeugkette sein. Einmal eingegebene Daten sollen für nachfolgende Entwicklungsaktivitäten weiterverwendet werden können, ohne diese in einem nachgeschalteten Werkzeug erneut manuell eingeben zu müssen.

Praxiserfahrung: Eine ständige Praxisorientierung soll die Einführung unterstützen. Die Erkenntnisse aus der Anwendung sollen zurückgespielt, Stärken und Schwächen ausgearbeitet und Verbesserungen abgeleitet werden.

Bewertung:

Das Vorgehen nach ALT stellt eine einfach verständliche und grobe Richtlinie zur Einführung von MBSE in Projekte oder Unternehmen bereit. Es fokussiert die nichttechnischen Anforderungen, die beim Einführungsprozess beachtetet werden müssen. Das Vorgehen ist allgemeingültig und unspezifisch. Es werden keine Modelle/Methoden bereitgestellt. Insbesondere welche Ansätze von Interesse sind, wird nicht adressiert. Produkt- und unternehmensspezifische Rahmenbedingungen werden ebenfalls nicht in die Be trachtung mit einbezogen.

3.4.2 Guide for the Application of Systems Engineering in Large Infrastructure Projects nach INCOSE

Der Guide for the Application of Systems Engineering in Large Infrasctructe Projects ist ein Leitfaden für das Anwenden von Systems Engineering in der Praxis. Er wurde von der INCOSE herausgebracht und beschreibt die Verwendung von Systems Engineering in Großprojekten wie Highways, Railways, Elektro- und Industrieparks, Öl- und Gasplattformen, Raffinerien. Im Fokus steht dabei der Konstruktionsprozess bzw. die Transformation in die Nut zungssphase als Designphase der Produkte. Innerhalb des 55-seitigen Leitfadens werden die Vorteile aufgezeigt, die durch den Einsatz von SE in Großprojekten erzielt werden können. [INC12-ol]. Für die Einführung von SE Praktiken sind insbesondere die Process Controls and Enablers zu betrachten, hierzu zählen folgende Aktivitäten:

Risk Management: Aufgrund zunehmender Komplexität von Produkten ist die Betrachtung des Risikomanagements sehr wichtig. Ferner müssen Auftraggeber sowie -nehmer das gleiche Verständnis über das Risikomanagement haben (z.B. durch internationale Standards), bedingt durch international verteilte Verträge sowie Zusammenarbeiten.

Managing Change/ Configuration Control: Die Kontrolle von Änderungen ist einer der wichtigsten Prozesse während der Konstruktionsphase. Ein schlecht organisiertes Änderungsmanagement kann signifikant hohe Kostenauswirkungen sowie Terminver spätungen mit sich bringen.

Controlling the System Build Configuration: Der Auftragnehmer trägt eine hohe Verantwortung und muss gewährleisten, dass sein Produkt die Lebenszyklusphase übersteht sowie Randbedingungen (z.B. Politische Regularien) einhält.

Process Verification and Validation: Bereits zu frühen Phasen des Projektes werden Kriterien zur Validierung der Anforderungen bestimmt. Das wichtigste an diesem Ansatz ist die Messbarkeit von Faktoren für den Erfolg.

Regulatory Permits and Certification: Es muss sichergestellt werden, dass das Produktsystem und Prozesssystem Zustimmung findet und freigegeben wird. Fehler können hierbei zu unnötigen Zusatzarbeiten, Änderungen etc. führen.

Bewertung:

Der vorgestellte Ansatz adressiert die Einführung und Nutzenpotentiale von Systems Engineering. Jedoch werden überwiegend Großprojekte betrachtet. Der Guide stellt einen Leitfaden bereit und ist verständlich beschrieben, aber es fehlt eine vollständige Methodenbereitstellung. Ein ausführliches Vorgehensmodell, wie SE in das Unternehmen eingeführt wird, fehlt ebenfalls. Vielmehr kann diese Richtlinie als grobe Orientierung verstanden werden, worauf bei der Nutzung von SE zu achten ist.

3.5 Handlungsbedarf

Bild 3-13 zeigt die zusammenfassende Bewertung der vorgestellten Ansätze aus dem Stand der Technik hinsichtlich der gestellten Anforderungen an eine *Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau* (vgl. Abschnitt 2.8). Keiner der betrachteten Ansätze erfüllt alle Anforderungen. Aus diesem Grund wird nachfolgend der resultierende Handlungsbedarf aufgezeigt.

A1) Betrachtungsgegenstand definieren/ Nutzenpotentiale aufzeigen

Die betrachteten Ansätze aus dem Kontext SE definieren den Betrachtungsgegenstand von SE nur sehr grob und gehen nicht auf die Betrachtungsweise des Maschinenbaus ein. Die spezifischen Nutzenpotentiale von SE für die Branche werden z.B. in CMM-DEV oder ISO/IEC TR29110 nicht ausreichend aufgezeigt. Ansätze wie BESTVOR, BALÁŽOVÁ oder VPS-Benchmark definieren zwar den Betrachtungsgegenstand, aber nicht hinsichtlich Systems Engineering. Weitere Ansätze wiederum definieren den Betrachtungsgegenstand indem sie wie KAHL oder HELLENBRAND den Entwicklungsprozess auf Basis der Produktkonzeption betrachten.

A2) Berücksichtigung der Charakteristika des Maschinenbaus in Deutschland – Produkteigenschaften

Einige der vorstellen Ansätze ziehen die Produkteigenschaften in ihre Betrachtung mit ein, z.B. adressieren BESTVOR, BALÁŽOVÁ und HELLENBRAND mechatronische Systeme. Der Ansatz nach KAHL adressiert sogar den Entwicklungsprozess für fortschrittliche mechatronische Systeme. Aber insbesondere der Wandel der Produkte und die damit

einhergehenden Herausforderungen in der Produktentwicklung werden nicht ausreichend im Kontext SE miteinander verknüpft.

A3) Berücksichtigung der Charakteristika des Maschinenbaus in Deutschland – organisatorische Eigenschaften

Der Berücksichtigung der mittelständischen Charakteristik des Maschinenbaus tragen nur wenige Ansätze Rechnung. Während einige in der Anwendung sehr komplex (z.B. KAHL, Guide for the Application of Systems Engineering in Large Infrastructure Projects) sind, fokussiert die ISO/IEC TR29110 zwar Kleinstunternehmen, wird aber der Branchencharakteristik nicht gerecht. Der VPS-Benchmark wiederum berücksichtigt die organisatorischen Eigenschaften der fokussierten Branche und könnte unter Berücksichtigung anderer Anforderungen bei der Entwicklung einer Systematik unterstützen.

A4) Verbesserungspotentiale ermitteln

Die Ansätze aus dem Bereich *Bedarfsanalyse* erfüllen die gestellten Anforderung nur unzureichend. Keiner der Ansätze richtet sich primär an den Themenschwerpunkt SE. CMMI- DEV ist sehr umfangreich und international anerkannt. Allerdings wird neben dem Ist-Zustand kein spezifischer Ziel-Zustand bestimmt. Der Ansatz des VPS-Benchmark stellt eine individuelle Bedarfsermittlung mit Hilfe von Ist- und Ziel-Leistungsbeurteilung bereit, fokussiert allerdings nicht den Bedarf im Kontext SE. Die ISO/IEC TR29110 wiederum definiert den Ziel-Leistungstand über Unternehmensprofile und unterstützt mit einem Bewertungsleitfaden die Ist-Bewertung. Die Unternehmensprofile sind zum einen für Unternehmen des Maschinenbaus ungeeignet, zum anderen nur lückenhaft verfügbar. Es gilt die entsprechenden Vorgehensweisen bei der Entwicklung der Systematik zu prüfen und ggf. zu integrieren.

A5) Prozessschritte und Methoden strukturieren und bereitstellen

Im Bereich der Bereitstellung von Prozessen und Methoden gibt es vielfältige Ansätze. Methodenbeschreibungen und -sammlungen sind in der Produktentwicklung etabliert und strukturierter aufbereitet. Auch die Auswahl der Methoden z.B. nach PONN oder LINDEMANN bildet eine hervorragende Grundlage. Die Bereitstellung von Ansätzen des Systems Engineering wiederum ist nicht ausreichend, sie ist uneinheitlich und unübersichtlich.

A6) Identifikation und Auswahl geeigneter Prozessschritte und Methoden ermöglichen

Die Identifikation und Auswahl geeigneter Prozessschritte und Methoden des SE stellt keiner der Ansätze zufriedenstellend bereit. Einige Ansätze leiten auf Basis der Produktkonzeption und der Entwicklungssituation entsprechende Prozesse und Methoden aus (PONN, KAHL, HELLENBRAND, ROELFSEN). Transparenz von typischen Problemstellung und geeigneter Lösungsansatz wird nicht erzeugt.

A7) Definition eines Soll-Prozesses unterstützen

Die Ansätze aus dem Bereich *Planung und Verbesserung von Entwicklungsprozessen* bieten unterschiedliche Herangehensweisen. Die Gestaltung des Entwicklungsprozesses in den Ansätzen KAHL, HELLENBRAND und ROELOFSEN erfolgt auf Basis der Produkteigenschaften und der Entwicklungssituation. Die durchzuführenden Prozessschritte werden definiert. Der Ansatz nach ROELOFSEN ermöglicht diesen auf die spezifischen Rahmenbedingungen des Projekts anzupassen. Die ISO/IEC TR29110 definiert je nach Profil vorgegebene Soll-Prozesse.

A8) Schrittweise Umsetzung ermöglichen

Die schrittweise Umsetzung von Systems Engineering im Maschinenbau wird nicht unterstützt. Beide vorgestellten Ansätze sind unspezifisch und unterstützen die schrittweise Einführung nicht. Änderungen in der Ablauf- und Aufbauorganisation, den Aufbau von neuen Kompetenzen sowie die Gestaltung der IT-Unterstützung wird nicht ausreichend adressiert. Die Ansätze helfen nicht dabei notwendige Maßnahmen zu erkennen und in eine sinnvolle Reihenfolge zu bringen. Des Weiteren herrscht keine konkrete Verknüpfung mit einer vorherigen Auswahl geeigneter Ansätze.

A9) Systematische Vorgehensweise bereitstellen

Die zu erarbeitende Systematik soll ein durchgängiges Vorgehensmodell zur Ableitung eines bedarfsgerechten Systems Engineering Leitfadens bereitstellen, welches insbesondere die abstrakten Prozessschritte *Bedarf bestimmen, geeignete Ansätze identifizieren, auswählen und integrieren* adressiert. Diese Anforderung wird von vielen Ansätzen in Teilespekten erfüllt. Sinnvolle Aspekte der Ansätze sind für die zu entwickelnde Systematik auf Tauglichkeit zu prüfen und zu integrieren.

A10) Einfache Anwendbarkeit sicherstellen

Mehrere Ansätze werden der wirtschaftlichen Anwendung und einfachen Handhabung gerecht. Einige jedoch zeichnen sich durch ihre Komplexität aus. Sie scheiden im Hinblick auf die zu entwickelnde Systematik aus, da eine praktikable Anwendung essentiell für die Akzeptanz im Maschinenbau ist.

Keiner der untersuchten Ansätze, auch keine triviale Kombination erfüllt alle Anforderungen in vollem Umfang. Ein entscheidender Mangel ist die unzureichende Verknüpfung der Prozessschritte, Methoden, Rollen des Systems Engineering mit den Problemstellungen des Maschinenbaus. Ansätze zur Bedarfsanalyse und Einführung von Systems Engineering berücksichtigen die Charakteristik des Maschinenbaus nur unzureichend und sind vornehmlich auf große Unternehmen bzw. Projekte ausgelegt. Reifegradmodelle adressieren zwar die objektive Bewertung der Leistungsfähigkeit und eine darauffolgende Leistungssteigerung eines Unternehmens in einem bestimmten Themenfeld; es gibt allerdings keinen Ansatz der das aktuelle Systems Engineering analysiert. Des Weiteren werden die spezifischen Produkteigenschaften und der Wandel der Produkte sowie die damit

einhergehenden Herausforderungen in der Entwicklung nicht fokussiert. Zudem fehlt es an Ansätzen, die aufbauend auf einer Bedarfsermittlung und einer SE-Soll-Prozessgestaltung für die interdisziplinäre Zusammenarbeit bieten und eine praxisorientierte und bedarfsgerechte schrittweise Umsetzungsplanung ermöglichen; insbesondere ohne umfangreiche Systems Engineering Expertise und begrenzter Ressourcen. Es besteht demnach Handlungsbedarf nach einer *Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau*.

		Anforderungen (A)									
		Betrachtungsgegenstand definieren	Berücksichtigung der Produkteigenschaften	Berücksichtigung der organisatorischen Eigenschaften	Verbesserungspotentiale SE ermitteln	Ansätze strukturieren und bereitstellen	Identifikation und Auswahl geeigneter Ansätze ermöglichen	Definition eines Soll-Prozesses unterstützen	Schriftweise Umsetzung ermöglichen	Systematische Vorgehensweise bereitstellen	Einfache Anwendbarkeit sicherstellen
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Bedarfssystemanalyse Systems Engineering	Capability Maturity Model Integration for Development (CMMI-DEV)	●	○	○	○	○	○	○	○	●	○
	VPS-Benchmark	●	●	●	●	○	○	○	○	●	●
	Betriebliche Einführungsstrategie für ein anwendungsorientiertes Vorgehensmodell (BESTVOR)	●	●	○	●	○	●	●	●	●	●
	Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung nach BALÁŽOVA	●	○	○	●	○	○	●	●	●	●
Bereitstellung von Prozessen u. Methoden	ISO/IEC 29110 - Systems and Software Life Cycle Profiles and Guidelines for Very Small Entities	○	○	●	●	○	●	●	●	●	●
	Methodenbeschreibungen und -sammlungen in der Produktentwicklung	○	●	○	○	●	●	○	○	●	●
	Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte nach PONN	○	○	○	●	○	●	●	●	●	●
Planung und Verbesserung von PEP	Transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechat. Entwicklungsprozesse nach HELLENBRAND	○	●	○	○	●	○	●	●	●	●
	Rahmenwerk für einen s.o. Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme nach KAHL	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen nach ROELOFSEN	○	○	○	●	○	●	●	●	●	●
SE-Einführung	Einführung von modellbasierter Systementwicklung nach Ait	○	○	○	○	○	○	○	●	●	●
	The Application of MBSE at Jet Propulsion Laboratory through the Life Cycle	○	○	○	○	●	○	○	●	●	○

Bild 3-13: Bewertung des untersuchten Stands der Technik anhand der Anforderungen

4 Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden

Dieses Kapitel bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Es stellt eine *Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau* vor. Die Systematik hat den Anspruch den identifizierten Handlungsfeldern und Anforderungen der Problemanalyse (vgl. Abschnitt 2.7 und 2.8) sowie dem dargestellten Handlungsbedarf (vgl. Abschnitt 3.5) gerecht zu werden. Anfangs gibt Abschnitt 4.1 einen Überblick über die Systematik und ihre Bestandteile. Grundlage der Systematik bilden Nutzenpotentiale des Systems Engineering (vgl. Abschnitt 4.2), die spezifisch auf die Zielgruppe mittelständischer Unternehmen des Maschinenbaus ausgerichtet sind. Die Systematik umfasst darüber hinaus ein Vorgehensmodell, eine Methode zur Bedarfsanalyse sowie einen Werkzeugkoffer Systems Engineering. In Abschnitt 4.3 wird das Vorgehensmodell SE-Leitfaden zur Definition und Umsetzung eines bedarfsgerechten Systems Engineering Leitfadens beschrieben. Anschließend erfolgt in Abschnitt 4.4 die Erläuterung der Bedarfsanalyse. Aufbauend auf dem festgestellten Bedarf unterstützt der Werkzeugkoffer Systems Engineering die Auswahl geeigneter Systems Engineering Prozessschritte, Methoden und Rollen für das analysierte Unternehmen. Dieser wird in Abschnitt 4.5 vorgestellt. Die durchgängige Anwendung der Systematik, insb. des Vorgehensmodells, erfolgt im Anschluss in Kapitel 5.

4.1 Die Systematik im Überblick

Die Systematik befähigt Entwicklungsleiter und Entscheider aus dem Maschinenbau dabei, die Nutzenpotentiale des Systems Engineering für ihr Unternehmen zu erkennen und bedarfsgerechte Systems Engineering Entwicklungsleitfäden abzuleiten. Die Systematik unterstützt die Zusammenarbeit von SE-Experten mit Unternehmen. Sie gliedert sich in vier Bestandteile (Bild 4-1):

- **Nutzenpotentiale Systems Engineering:** Sie zeigen anschaulich Möglichkeiten auf, die sich aus der Anwendung von Systems Engineering im Hinblick auf die spezifischen Herausforderungen des Maschinenbaus widerspiegeln. Sie dienen als Leitbild zur gezielten Anwendung von Systems Engineering in mittelständischen Maschinenbauunternehmen und sind mit konkreten Problemstellungen der Unternehmen verknüpft. Außerdem umfassen sie Informationen zur Erschließung der Nutzenpotentiale, indem sie u.a. im Entwicklungsprozess verortet sind und relevante Prozessschritte, Methoden und Rollen zugeordnet werden.
- **Vorgehensmodell SE-Leitfaden:** Das Vorgehensmodell dient zur Definition und Umsetzung eines bedarfsgerechten Systems Engineering Leitfadens. Es unterstützt ausgehend von dem identifizierten Bedarf, über die Auswahl geeigneter Prozessschritte, Methoden und Rollen sowie die Definition eines Soll-Prozesses bis hin zur

Umsetzungsplanung. Das Vorgehensmodell beschreibt detailliert die durchzuführenden Tätigkeiten und steuert den Einsatz der Hilfsmittel.

- **Bedarfsanalyse:** Neben einer Unterstützung zur Erhebung der Unternehmensrahmenbedingungen, stellt die Methode zur Bedarfsanalyse ein zweistufiges Verfahren zur Identifikation von Verbesserungspotentialen in der interdisziplinären Produktentwicklung bereit. Die erste Stufe *Grobanalyse Nutzenpotentiale* basiert auf einem Interviewleitfaden. Dies wird durch die zweite Stufe einer detaillierteren *Entwicklungsprozessanalyse* ergänzt.
- **Werkzeugkoffer Systems Engineering:** Dieser stellt mit Hilfe einer Prozess- und Methodenlandkarte relevante Prozessschritte, Methoden und Rollen zielgruppengerecht für mittelständische Unternehmen im Maschinenbau sowie verwandter Branchen bereit und strukturiert diese. Sie sind über die Nutzenpotentiale mit den Problemstellungen der Unternehmen verknüpft.

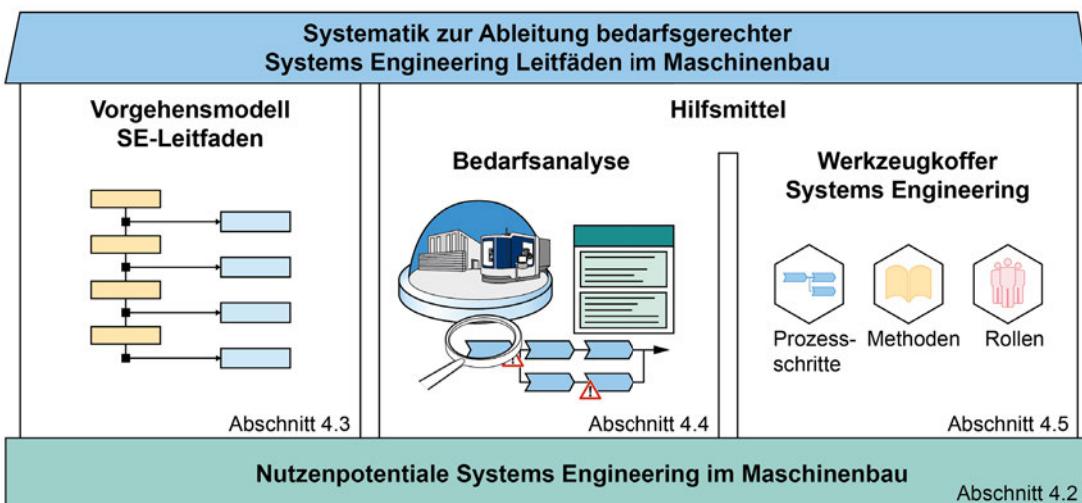


Bild 4-1: Bestandteile der Systematik

Resultat ist ein in den Gesamtgeschäftsprozess eingebetteter bedarfsgerechter SE-Leitfaden. Ein Umsetzungsplan bringt die notwendigen Maßnahmen zur schrittweisen Einführung des Soll-Prozesses zusätzlich in eine zeitliche Reihenfolge.

4.2 Nutzenpotentiale Systems Engineering im Maschinenbau

Die Problemanalyse hat gezeigt, dass Systems Engineering als geeigneter Lösungsansatz dienen kann, um den Herausforderungen in der Produktentstehung der zukünftigen Systeme des Maschinenbaus zu begegnen. Hinter dem Begriff Systems Engineering verbirgt sich allerdings ein weites und nur schwer durchschaubares Feld an Themen und Handlungsbereichen (vgl. 2.5). Die Unternehmen stehen daher vor der Herausforderung zu erkennen, bei welchen Problemstellungen Systems Engineering Nutzen für ihr Unternehmen stiften kann.

Der Nutzen von Systems Engineering für ein Unternehmen ergibt sich in Anlehnung an PÜMPIN aus Nutzenpotentialen, die durch Aktivitäten des Unternehmens erschlossen werden und somit Nutzen für das Unternehmen und seine Stakeholder stiften [Püm92, S. 50]. **Nutzenpotentiale** sind noch nicht ausgeschöpfte Möglichkeiten, die durch Aktivitäten des Unternehmens zum Vorteil aller Bezugsgruppen erschlossen werden können. PÜMPIN unterscheidet zwischen externen und internen Nutzenpotentialen. Interne Nutzenpotentiale liegen im Inneren des Unternehmens, z.B. in der Neugestaltung innerbetrieblicher Abläufe. Hier liegt der Fokus der Betrachtung.

Ziel der Darstellung der Nutzenpotentiale Systems Engineering im Maschinenbau ist die Strukturierung und Bereitstellung von konkreten Möglichkeiten. Diese ergeben sich aus der Anwendung von Systems Engineering im Hinblick auf die Herausforderungen in der Entwicklung von technischen Systemen des mittelständischen Maschinenbaus. Auf Grundlage verschiedener Analysequellen werden hierzu konkrete Problemstellungen, die sich aus der Entwicklung fortschrittlicher mechatronischer Systeme im Maschinenbau ergeben, ausgearbeitet. Ferner werden konkrete Nutzenpotentiale spezifiziert und mit den Problemstellungen der Unternehmen verknüpft und detailliert.

4.2.1 Analysemethode zur Identifikation von Nutzenpotentialen Systems Engineering

Zur Identifikation von Nutzenpotentialen SE für mittelständische Unternehmen des Maschinenbaus wurden verschiedene Quellen hinzugezogen (Bild 4-2). Ausgangspunkt für die Bereitstellung der Nutzenpotentiale SE ist die Analyse der allgemeinen Nutzendarstellungen aus der **Literatur** und sowie die Ergebnisse aus der **Studie Systems Engineering in der industriellen Praxis**. Diese Nutzenpotentiale beziehen sich jedoch überwiegend nicht spezifisch auf den mittelständisch geprägten Maschinenbau (vgl. Abschnitt 2.5.4).

Kern der Nutzenpotentiale für die **Anwendergruppe Maschinenbau** ist daher die Analyse von 40¹⁰ erfolgreich durchgeführten **Transferprojekten** im Themenfeld Systems Engineering im Rahmen des BMBF-Spitzenclusters „Intelligente Technische Systeme Ostwestfalen-Lippe (it's OWL)“. Ziel der fünf- bis zehnmonatigen Transferprojekte war es, mittelständische Unternehmen der Region zu einem höheren technischen Reifegrad zu verhelfen. Jedes Transferprojekt stellt eine enge Kooperation von einem Transfernehmer (Unternehmen) und einem Transfergeber (wissenschaftliche Einrichtung) dar. Unter Berücksichtigung der spezifischen Ausgangslage und den individuellen Rahmenbedingungen der Unternehmen, wurden im Projekt erste konkrete Schritte auf dem Weg zur Umsetzung von intelligenten technischen Systemen vollzogen. Die Projekte wurden in einem strengen Auswahlverfahren fachlich begutachtet. Grundlage waren Projektskizzen,

¹⁰ Liste der analysierten Projekte siehe Anhang A1.1

welche neben der Ausgangslage und den adressierten Herausforderungen bzw. Problemstellungen, eine klare Zielsetzung und eine angestrebte Vorgehensweise enthalten. Abschließende Abschlussberichte geben ebenfalls Aufschluss über die erzielten Ergebnisse¹¹.

Wie in Bild 4-2 veranschaulicht, sind die **konkreten Problemstellungen**, die **konkreten Vorgehensweisen** und die **konkrete Zielsetzung** sowie die **individuellen Rahmenbedingungen** jedes Transferprojekts Gegenstand der Untersuchung. Sie sind die Basis zur Ableitung für die Zielgruppe spezifischer **Problemstellungen** und **Stoßrichtungen** zur Initiierung von SE Projekten. Ferner werden allgemeingültige **Nutzenpotentiale**, die durch die Anwendung von SE erschlossen werden können, spezifiziert. Hierzu fließen insbesondere die Vorgehensweisen sowie die Zielsetzung in die Betrachtung mit ein.

Ergänzend zu den Transferprojekten werden die Ergebnisse von **Workshops** mit 30 Fachexperten aus dem Maschinenbau hinzugezogen. Die Workshopteilnehmer haben erfolgreich eine **Grundlagenschulung Systems Engineering** absolviert (vgl. Abschnitt 2.5.5). Auf dem Fundament ihrer Erkenntnisse aus der Schulung wurden insbesondere konkrete Problemstellungen aus den Unternehmen diskutiert, bei denen SE unterstützen kann. Darauf aufbauend wurden relevante Nutzenpotentiale erörtert.

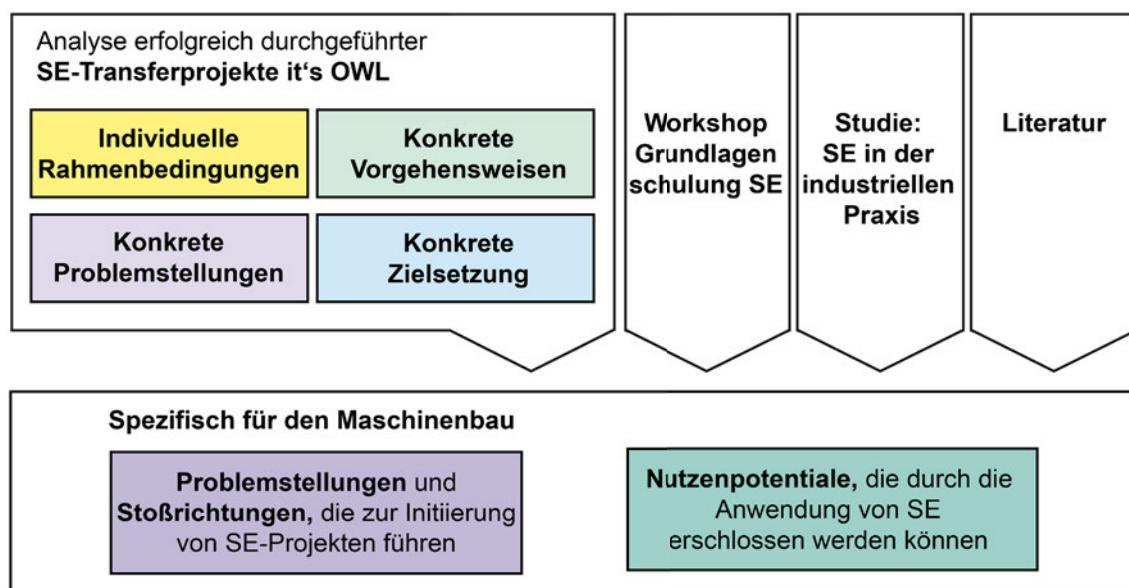


Bild 4-2: Analysemethode zur Identifikation von Nutzenpotentialen SE für mittelständische Unternehmen des Maschinenbaus

¹¹Neben dem Themenfeld Systems Engineering wurden Transferprojekte zu den Cluster Querschnittsthemen Selbstoptimierung, Intelligente Vernetzung, Energieeffizienz, Mensch-Maschine-Interaktion sowie in Bezug auf die Nachhaltigkeitsthemenfelder Marktorientierung, Vorausschau, Prävention gegen Produktpiraterie, Technologieakzeptanz und Arbeit 4.0 durchgeführt.

4.2.2 Problemstellungen des Maschinenbaus

Die Erarbeitung der Nutzenpotentiale beruht auf der Annahme, dass Unternehmen des Maschinenbaus und verwandter Branchen bei der Entwicklung von fortschrittlichen mechatronischen Systemen häufig vor ähnlichen Problemstellungen stehen (z.B. fachabteilungsorientierte Arbeitsweisen). Wenn sich die Probleme ähneln, können sich auch die angewandten Aktivitäten zur Behebung dieser Probleme entsprechen und Nutzenpotential für Unternehmen bieten. Daher wurden zunächst die **Problemstellungen** analysiert, die zur Initiierung der 40 **Transferprojekte** im Kontext Systems Engineering geführt haben. Wie in Bild 4-3 veranschaulicht lassen sich die Transferprojekte verschiedenen Problemstellungen, die im Projekt adressiert wurden, zuordnen. Bestimme Problemstellungen (z.B. die Analyse, Definition, Dokumentation und Beherrschung von Anforderungen und das Verstehen von Änderungsauswirkungen) treten häufig gemeinsam auf. Daher wurden typischen Kombinationen, die auch inhaltlich dieselbe Perspektive vertreten geclustert. Ergebnis sind drei wesentliche **Stoßrichtungen**, die die Unternehmen dazu bewegt haben, sich mit Systems Engineering auseinander zu setzen (Bild 4-3). Eine detaillierte Auflistung der zusammengefassten Problemstellungen (z.B. Projektierung) befindet sich im Anhang (A1.2).

Die erste Stoßrichtung adressiert die effektive und effiziente Entwicklung von kundenindividuellen Marktleistungen. Eine weitere Stoßrichtung ist das systematische Erarbeiten von Produkt- und/oder Dienstleistungsinnovationen. Die dritte Stoßrichtung fokussiert das Vollziehen von unternehmensinternen Veränderungen. Die drei Stoßrichtungen sind dabei nicht strikt voneinander getrennt zu betrachten, sondern ergänzen sich vielmehr.

Zuordnung der Transferprojekte it's owl zu den im Projekt adressierten (Haupt-)Problemstellungen		Adressierte Problemstellungen									
		Projektierung	Definition, Analyse u. Beherrschung von Anforderungen	Verstehen von Änderungsauswirkungen	Beherrschung von Variantenvielfalt	Wiederverwendung von Lösungswissen	Weiterentwicklung von Marktleistungen	Wandel vom Produktzum Systemanbieter	Zunehmende Interdisziplinarität	Unstrukturierte Kommunikation und Kooperation	
Nr.	Transferprojekte it's owl										
1	Disziplinübergreifendes Variantenmanagement zur Reduzierung der Entwicklungskosten	X	X	X	X	X			X		
2	Effizienzsteigerung im PEP durch transparente Anforderungen u. Systemstrukturmodellierung	X	X	X		X					
3	Mechatronischer Entwurf eines optimalen Versorgungsmoduls für Lebensmittelarbe		X	X					X		
4	Interdisziplinäre Projektierung von vernetzten Systemen	X	X	X		X			X	X	
5	Einführung der virtuellen Inbetriebnahme zur Effizienzsteigerung der Entwicklung	X	X								
6	Modellgetriebene Entwicklung von Schrittketten zur Steuerung von Anlagenmodulen	X	X		X	X					
7	Modularer Aufbau einer Verpackungsmaschine – Tray- und Wrap-Around-Packer		X	X		X					
8	Integrative Konzipierung einer Kolben-Kompressoren-Baureihekosten		X	X							
9	Intelligenter Baukasten für Werkzeugmaschinen	X	X	X	X	X					
10	Modellbasierter Entwurf eines neuartigen Operationstisches							X	X		
11	Systems Engineering einer Profilumantelungsanlage							X			
12	Zukunftsrobustes und innovatives Produkt-Service-Konzept							X	X		
13	Mechatronik Roadmap für intelligente Armaturen							X			
14	Mechatronische Optimierung einer Tangentialmaschine							X			
15	Technologie-Roadmap für das intelligente sensorüberwachte Pflegebett							X			
	...										
32	Durchgängige Werkzeugunterstützung für Modell- und Dokumentbasiertes Requirements Engineering		X						X	X	
33	Durchgängiger Entwicklungsprozess für den MuA am Beispiel einer Holzbearbeitungsmaschine	X	X						X	X	
34	Durchgängiges und bedarfsgerechtes Systems Engineering am Beispiel einer Nählanlage								X	X	
35	Entwicklung eines Methodenkoffers zur systematischen Anforderungserhebung für Systemarmaturen								X	X	
36	Systems Engineering für Fahrzeugverbundungs- und Transportlösungen								X	X	
37	Bedarfsgerechter Systems Engineering-Prozess								X	X	
38	Toolbenchmark MBSE-Modeller für den Mittelstand und Konzept zur Integration in den PEP		X	X					X	X	

Stoßrichtung = Stoßrichtung zur Initiierung der SE-Transferprojekte

Bild 4-3: Auswertung der Problemstellungen der Transferprojekte inkl. der abgeleiteten Stoßrichtungen zur Initiierung von Transferprojekten im Themenfeld Systems Engineering

Stoßrichtung 1: Effektive und effiziente Entwicklung von kundenindividuellen Markleistungen

Diese Stoßrichtung umfasst die Problemstellungen, mit denen die Unternehmen in ihrem Tagesgeschäft konfrontiert sind, um ihrem Kunden individuelle und qualitativ hochwertige Systeme profitabel bereitzustellen. Dies umfasst insbesondere die Projektierung von auftragsbezogenen Entwicklungsvorhaben. Außerdem stellt die Analyse, Definition, Dokumentation und Beherrschung von Anforderungen sowie von Änderungsauswirkungen eine Herausforderung dar. Hinzu kommt der Umgang mit einer Vielzahl von Varianten und die systematische Wiederverwendung von Lösungswissen.

- Eine strukturlose **Projektierung** stellt Unternehmen vor Herausforderungen. Sie sind oftmals mit einer hohen Anzahl von unterschiedlichen Auftrags- und Kleinserienfertigungsprojekten konfrontiert. Die Kundenstruktur ist dabei meist äußerst heterogen. Ein unstrukturierter Entwicklungsprozess führt zu zeitraubenden Iterationsschleifen und zur ungenauen Vorhersagbarkeit von Terminen der Fertigstellung. Außerdem stellt die frühzeitige Prüf- und Testspezifikation die Unternehmen vor Herausforderungen, da hier bereits die Weichen für erfolgreiche Prüf- und Testaktivitäten gestellt werden, bei gleichzeitig wenig konkreten Entwicklungsergebnissen.
- Die Analyse, Definition, Dokumentation und Beherrschung von **Anforderungen** an fortschrittliche mechatronische Systeme stellt die Unternehmen vor Schwierigkeiten. Sie müssen die komplexen Anforderungen des Kunden verstehen, aufnehmen und dokumentieren. Diese zeichnen sich durch eine hohe Vernetzung und Dynamik aus.
- Intransparente **Änderungsauswirkungen** bedeuten für die Unternehmen Risiken. Viele Transfernehmer müssen mit kontinuierlichen Anforderungsänderungen (z.B. durch den Kunden) umgehen. Der Umfang von Änderungsauswirkungen kann nur schwer nachvollzogen werden, insbesondere über die verschiedenen Fachdisziplinen hinweg. Dies führt zu Fehleinschätzungen in der Planung sowie Fehler bei der Umsetzung von Änderungen.
- Die Beherrschung der **Variantenvielfalt** über alle beteiligten Fachdisziplinen hinweg stellt die Unternehmen vor besondere Herausforderungen. Ziel ist eine hohe externe Komplexität (kundenindividuelle Maschinen) zu ermöglichen und dabei gleichzeitig eine geringe interne Komplexität sicherzustellen, z.B. indem weitestgehend auf Standard-Lösungen und Baukastenstrukturen zurückgegriffen wird. Die Planung und Konzipierung beschränkt sich bisher allerdings meist auf mechanische Elemente. Mechatronische Betrachtungen werden überwiegend ausgespart, beispielsweise durch eine Modularisierung und (Schnittstellen-) Standardisierung.
- Die **Wiederverwendbarkeit von Lösungswissen** ist in den meisten Unternehmen nur unzureichend gegeben. Die damit verbundenen Potentiale zur Effizienzsteigerung werden daher nicht genutzt, z.B. Wiederverwendung von Lösungen und deren Kombination zu kundenindividuellen Maschinen.

Stoßrichtung 2: Systematisches Erarbeiten von Produkt- und/oder Dienstleistungsinnovationen

Einige Transferprojekte fokussieren die systematische Weiterentwicklung von Produkten/ Marktleistungen eines Unternehmens mit Hilfe der Ansätze des SE. Die Lösung der folgenden Problemstellungen/ Herausforderungen werden dabei beabsichtigt.

Ziel der zweiten Stoßrichtung ist die systematische **Weiterentwicklung von Produkten** und damit einher der Wandel zu fortschrittlichen mechatronischen Systemen. Dabei wird zum einen die Perspektive betrachtet bestehende Produkte/ Fertigungsprozesse weiterzuentwickeln. Zum anderen neue Produktideen zu konzipieren und dabei beispielsweise das Systemumfeld und Anwendungsszenarien zu bedenken. Die Unternehmen müssen neue Aspekte ins Kalkül ziehen und ihre bisherigen Erfahrungen neu einsetzen. Hierzu benötigen sie systematische Vorgehensweisen. Ein weiterer Aspekt ist der Wandel der Marktleistung, z.B. der Wandel **vom Produktanbieter zum Systemanbieter** oder zum Lösungsanbieter. Die Auswirkungen auf das Produkt und den gesamten Entwicklungsprozess müssen frühzeitig erkannt und in die Betrachtung mit einbezogen werden. Hier fehlt es an fachbereichsübergreifenden Herangehensweisen.

Stoßrichtung 3: Unternehmensinterne Veränderungen vollziehen

Ein weiterer Ausgangspunkt, sich in konkreten Transferprojekten mit dem SE auseinanderzusetzen liegt in dem Bedarf, unternehmensinterne Abläufe und Strukturen zu verändern. Dies liegt in der **zunehmenden Interdisziplinarität** und den damit einhergehenden Herausforderungen in der **Kommunikation und Kooperation** von verschiedenen Fachexperten und Perspektiven begründet. Der Wandel der Produkte erfordert auch einen Wandel des Entwicklungsteams. Neue Fachexperten müssen mit etablierten Experten zusammenarbeiten. Hier stellt sich die Frage, wie die interne Zusammenarbeit unterstützt werden kann und wie die Handhabung der vielfältigen disziplinübergreifenden Abhängigkeiten organisiert werden kann. Dies betrifft sowohl die Zusammenarbeit über Abteilungs- sowie Unternehmensgrenzen (z.B. mit Kunden oder Zuliefern) hinweg.

4.2.3 Nutzenpotentiale

Die Analyse der konkreten Projektzielsetzungen und der gewählten Vorgehensweisen der Transferprojekte ermöglicht die Ableitung von Nutzenpotentialen. Hierzu wurden die Problemstellungen, Zielsetzungen und Vorgehensweisen analysiert und thematisch geclustert. Ergebnis sind in sechs wesentliche Nutzenpotentiale für die Anwendung von Systems Engineering in mittelständischen Unternehmen des Maschinenbaus: **Modellbasierte Produktinnovationen, transparente Anforderungsdokumentation, fachdisziplinübergreife Produktkonzipierung, frühzeitige Analysen, fachabteilungsübergreifendes Projektmanagement, unternehmensübergreifende Zusammenarbeit**. Die sechs Nutzenpotentiale werden in Bild 4-4 kurz erläutert. Die Nutzenpotentiale beziehen sich dabei auf das Produkt bzw. die Marktleistung, das Unternehmen (z.B. Ablauf- und

Aufbauorganisation) und das Unternehmensumfeld (z.B. Kunden, Wertschöpfungspartner). Die ersten vier Nutzenpotentiale lassen sich entlang des V-Modells der VDI-Richtlinie 2206 verorten und fokussieren die frühen Phasen der **Systemgestaltung**. Die weiteren Nutzenpotentiale beziehen sich auf die Organisation der Zusammenarbeit, unternehmensintern sowie unternehmensübergreifend. Sie fokussieren den Aspekt des **Projektmanagements**. Die einzelnen Nutzenpotentiale werden im Folgenden kurz beschrieben.

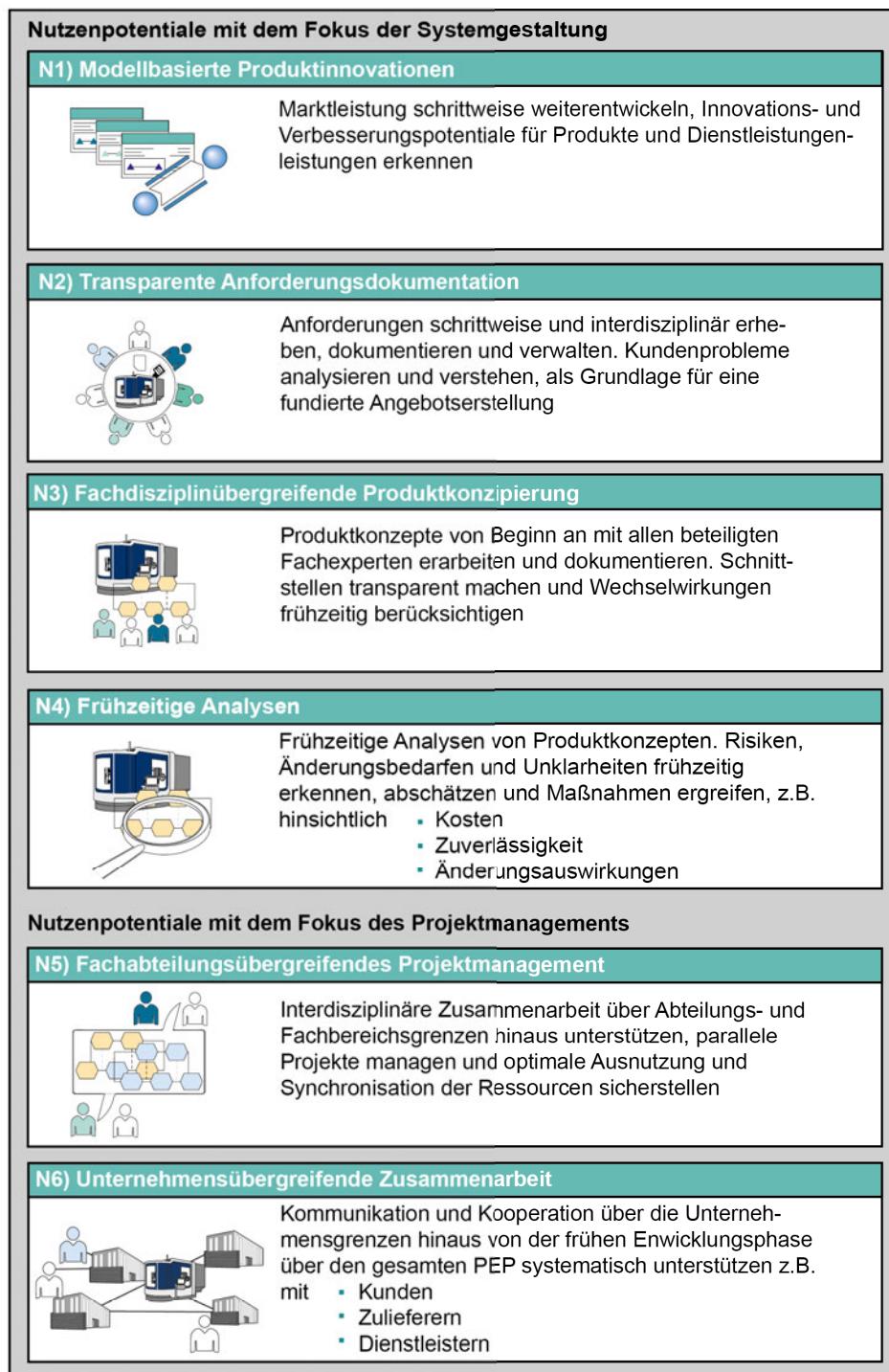


Bild 4-4: Nutzenpotentiale SE für den Maschinenbau, Fokus Systemgestaltung

Verknüpfung der Nutzenpotentiale mit den Stoßrichtungen zur Initiierung von Transferprojekten

Die transparente Verknüpfung der identifizierten Nutzenpotentiale mit den Problemstellungen aus der Praxis ist die Grundlage für Unternehmen, für sie interessante Nutzenpotentiale SE zu identifizieren. Bild 4-5 zeigt den Zusammenhang zwischen den Stoßrichtungen zur Initiierung von Transferprojekten und den damit geclusterten Problemstellungen aus der Praxis und den Nutzenpotentialen. Dient ein Nutzenpotential dazu eine Problemstellung zu lösen, ist es im entsprechenden Feld aufgelistet. Die Problemstellung der *Projektierung* der ersten Stoßrichtung wird beispielsweise durch das Nutzenpotential *fachabteilungsübergreifendes Projektmanagement* (N5) behandelt.

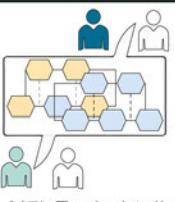
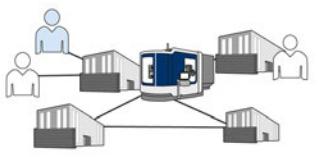
Stoßrichtung 1 – Effektive und effiziente Entwicklung von kundenindividuellen Marktleistungen		
Nutzenpotentiale		Problemstellungen aus der Praxis
 N2) Transparente Anforderungsdokumentation	 N3) Fachbereichsübergreifende Produktkonzeption	<ul style="list-style-type: none"> ■ Projektierung ■ Definition, Analyse und Beherrschung von Anforderungen ■ Verstehen von Änderungsauswirkungen ■ Beherrschung von Variantenvielfalt ■ Wiederverwendung von Lösungswissen
Stoßrichtung 2 – Systematisches Erarbeiten von Produkt und/ oder Dienstleistungsinnovationen		
Nutzenpotentiale		Problemstellungen aus der Praxis
 N1) Modellbasierte Produktinnovationen		<ul style="list-style-type: none"> ■ Weiterentwicklung von Marktleistungen ■ Wandel vom Produkt- zum Systemanbieter
Stoßrichtung 3 – Unternehmensinterne Veränderungen vollziehen		
Nutzenpotentiale		Problemstellungen aus der Praxis
 N5) Fachabteilungsübergreifendes Projektmanagement	 N6) Unternehmensübergreifende Zusammenarbeit	<ul style="list-style-type: none"> ■ Zunehmende Interdisziplinarität ■ Unstrukturierte Kommunikation und Kooperation

Bild 4-5: Verknüpfung der Nutzenpotentiale mit den identifizierten Stoßrichtungen

4.2.4 Erschließung der Nutzenpotentiale

Ziel des Abschnitts ist eine detaillierte Aufbereitung der Nutzenpotentiale, um dokumentierte und zusammengefasste Umsetzungselemente zur Erschließung eines Nutzenpotentials bereitzustellen. Hierzu liegt für jedes Nutzenpotential ein Nutzenpotentialsteckbrief vor (vgl. Abschnitt A1.3). In Bild 4-6 ist dies für das Nutzenpotential *fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung (N3)* beispielhaft dargestellt.

Der Steckbrief umfasst verschiedene Charakterisierungselemente, die zur konkreten Umsetzung im Unternehmen von entscheidender Bedeutung sind. Daher werden z.B. eine detaillierte Auflistung der Nutzenpotentiale, die Einordnung in das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 und in die Aufgabenbereiche des Systems Engineering (vgl. Abschnitt 2.5.1) bereitgestellt. Zudem werden beteiligte Entwicklungsteamrollen, involvierte Funktionsbereiche und konkrete Prozessschritte sowie zugehörige Methoden zur Umsetzung genannt. Der Steckbrief beinhaltet außerdem Angaben zu typischen Randbedingungen der Unternehmen, die das Nutzenpotential verstärken (z.B. der Grad der Vernetzung der Produkte). Ferner wird der Einsatz eines Systemmodells (vgl. Abschnitt 2.5.2) anhand der zu verwendenden Partialmodelle, des Modellierungszwecks sowie der Formalisierungsgrads charakterisiert.

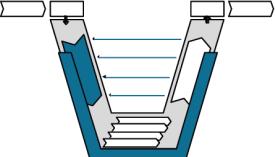
Nutzenpotentialesteckbrief N3 Produktkonzepte							
 <p>Produktkonzepte von Beginn an mit allen beteiligten Fachexperten erarbeiten und dokumentieren. Schnittstellen transparent machen und Wechselwirkungen frühzeitig berücksichtigen.</p>							
Nutzenpotentialliste: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktkonzepte von Beginn an interdisziplinär erarbeiten und dokumentieren ▪ Optimales Zusammenspiel von Produkt und Serviceleistungen durch eine integrative Entwicklung sicherstellen. Anforderungen, Restriktionen und Wechselspiel analysieren, konzipieren und dokumentieren ▪ Produktkonzept und Produktionssystem integrativ entwickeln/ planen und frühzeitig Restriktionen und Wechselwirkungen erkennen ▪ Schnittstellen im Produkt eindeutig definieren und erkennen, transparent dokumentieren und kommunizieren ▪ Variantenplanung schon frühzeitig bei der Konzeptentwicklung berücksichtigen und Chancen sowie Restriktionen aus verschiedenen Fachbereichen erkennen und berücksichtigen ▪ Übergang in die Fachabteilungsspezifische Ausarbeitung schaffen 	Anwendungsbereich/Aufgabenbereich SE: <ul style="list-style-type: none"> ▪ System Architecting 						
Maßgeblich relevante Rollen/ Funktionsbereiche: <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px; vertical-align: top;"> Rollen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anforderungsmanagement ▪ Customer Interface / Kundensicht ▪ Systementwickler ▪ Process Engineer / Gesamtsystem-verantwortlicher </td> <td style="padding: 5px; vertical-align: top;"> Funktionsbereiche: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwicklung ▪ Produktionsplanung ▪ Vertrieb ▪ Fertigung ▪ Arbeitsvorbereitung </td> </tr> </table> 	Rollen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anforderungsmanagement ▪ Customer Interface / Kundensicht ▪ Systementwickler ▪ Process Engineer / Gesamtsystem-verantwortlicher 	Funktionsbereiche: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwicklung ▪ Produktionsplanung ▪ Vertrieb ▪ Fertigung ▪ Arbeitsvorbereitung 	Systemmodell: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Partialmodelle: Umfeldmodell, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur ▪ Modellierungszweck: Problemverständnis sicherstellen, Kommunikation befähigen, Kooperation unterstützen, Interdisziplinäre Systembetrachtung, Architektur beschreiben, Lösungen kommunizieren, Produktkomplexität beherrschen, Dokumentation bereitstellen, Übergang in die Konkretisierung 				
Rollen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anforderungsmanagement ▪ Customer Interface / Kundensicht ▪ Systementwickler ▪ Process Engineer / Gesamtsystem-verantwortlicher 	Funktionsbereiche: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwicklung ▪ Produktionsplanung ▪ Vertrieb ▪ Fertigung ▪ Arbeitsvorbereitung 						
Verstärkende Randbedingungen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ mittlere u. große Entwicklungsabteilungen ▪ verteilte Entwicklungsstandorte ▪ Differenzierung, Technologie-/ Innovationsführerschaft, Qualitätsführer ▪ Individual-, Modul- und Plattformstrategie ▪ Serien-, Varianten-, Einzelfertigung ▪ mittlere und hohe Produktkomplexität ▪ Vernetztes System, System of System ▪ Verschiedene Entwicklungsdisciplinen, neue ▪ Entwicklungsdisciplinen ▪ Neuentwicklung 	Formalisierungsgrad <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; text-align: center; padding: 5px;">nicht formal</td> <td style="width: 33%; text-align: center; padding: 5px;">semi formal</td> <td style="width: 33%; text-align: center; padding: 5px;">formal</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; padding: 5px;"> </td> <td style="text-align: center; padding: 5px;"> </td> <td style="text-align: center; padding: 5px;"> </td> </tr> </table>	nicht formal	semi formal	formal			
nicht formal	semi formal	formal					
Beispielprojekte: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwurf eines automatisierten Prüf- und Wartungssystems für ein Seitenradar-Verkehrsmesssystem in Leitposten ▪ Mechatronischer Entwurf eines optimalen Versorgungsmoduls für Lebensmittelfarbe 	Relevante Prozesse und Methoden: <p>Zum Beispiel:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; background-color: #cccccc; text-align: left; padding: 5px;"> Phase: Produktkonzipierung </td> <td style="width: 90%; background-color: #ffffcc; text-align: left; padding: 5px;"> Prozessschritt: Funktionen definieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Funktionshierarchie FAS Methode </td> </tr> <tr> <td style="background-color: #cccccc; text-align: left; padding: 5px;"> Prozessschritt: Lösungsidee erarbeiten </td> <td style="background-color: #ffffcc; text-align: left; padding: 5px;"> Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Morphologischer Kasten Design for Variety Axiomatic Design LITHE Methode </td> </tr> <tr> <td style="background-color: #cccccc; text-align: left; padding: 5px;"> Prozessschritt: Lösungsideen bewerten </td> <td style="background-color: #ffffcc; text-align: left; padding: 5px;"> Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Nutzwertanalyse </td> </tr> </table> <p>(siehe Prozess- und Methodenlandkarte)</p>  	Phase: Produktkonzipierung	Prozessschritt: Funktionen definieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Funktionshierarchie FAS Methode	Prozessschritt: Lösungsidee erarbeiten	Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Morphologischer Kasten Design for Variety Axiomatic Design LITHE Methode	Prozessschritt: Lösungsideen bewerten	Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Nutzwertanalyse
Phase: Produktkonzipierung	Prozessschritt: Funktionen definieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Funktionshierarchie FAS Methode						
Prozessschritt: Lösungsidee erarbeiten	Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Morphologischer Kasten Design for Variety Axiomatic Design LITHE Methode						
Prozessschritt: Lösungsideen bewerten	Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Nutzwertanalyse						

Bild 4-6: Steckbrief Nutzenpotential fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung (N3)

Nutzenpotentialliste

Durch die Strukturierung werden je Nutzenpotential die zusammengehörigen Nutzenaspekte zusammengefasst. Die Liste stellt dem Anwender die einzelnen Aspekte bereit und ermöglicht so einen differenzierten Blick auf das Nutzenpotential.

Anwendungsbereich/ Aufgabenbereich SE

Die Einordnung in das V-Modell der VDI- Richtlinie 2206 stellt eine Verortung des Nutzenpotentials in dem Entwicklungsprozess bereit. Durch die grafische Darstellung ist diese auf einen Blick erkennbar. Das V-Modell ist zudem ein in der Praxis bekannter Ansatz zur Entwicklung mechatronischer Produkte und eignet sich daher als Grundlage. Ferner ermöglicht der Detaillierungsgrad des V-Modells die Einordnung in spezifische Unternehmensprozesse ohne zu abstrakt oder zu spezifisch zu sein [VDI2206].

Die Verknüpfung mit den Aufgabenbereichen des SE nach HONOUR und VALERDI veranschaulicht die Positionierung des Nutzenpotentials in der Normen- und Richtlinienlandschaft des SE [HV06].

Systemmodell

Wie in der Problemanalyse deutlich wird, ist das Model-Based Systems Engineering ein wesentlicher Schwerpunkt im Systems Engineering. Dies spiegelt sich auch in der Analyse der Transferprojekte wider. Kern ist das Systemmodell, welches mit Hilfe kohärenter Partialmodelle ein komplexes technisches System abbildet. Je nach Nutzenpotential unterscheiden sich die abzubildenden Artefakte, der Modellierungszweck und damit der zu empfehlende Formalisierungsgrad.

Die Unterscheidung der abzubildenden **Artefakte** orientiert sich an den Partialmodellen der Spezifikationstechnik CONSENS – „CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems“. Sie bietet dem Anwender eine Kombination aus Modellierungssprache und Methode und dient der Beschreibung von relevanten Systemaspekten. Die entsprechenden Partialmodelle sind in Bild 4-7 dargestellt. Diese Beschreibungen werden jeweils rechnerintern als Partialmodelle repräsentiert, sie bilden ein System kohärenter Partialmodelle. Die Aspekte Umfeld, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur und Verhalten beschreiben das Produktkonzept. Es wird zwischen Partialmodellen zur Systemanalyse und -synthese unterschieden. Umfeld, Anwendungsszenarien und Anforderungen unterstützen die Systemanalyse. Während die Modellierung von Funktionen, Wirkstruktur und Verhalten zur Systemsynthese dient [GFD+8], [GD16].

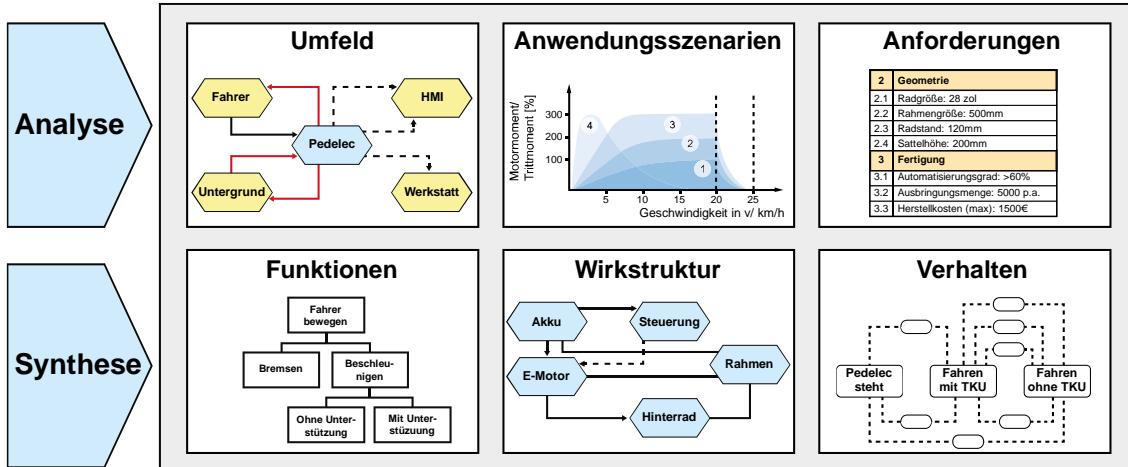


Bild 4-7: Aspekte zur fachgebietsübergreifenden Beschreibung der Konzeption eines multidisziplinären Produkts [GD16]

Bild 4-8 veranschaulicht den Zusammenhang der Partialmodelle mit den definierten Nutzenpotentialen. Kommt ein Partialmodell häufig in Zusammenhang mit einem Nutzenpotential zum Einsatz, ist das Feld markiert.

● Verknüpfung der Nutzenpotentiale mit den in den entsprechenden Projekten verwendeten Partialmodellen

Partialmodelle (CONSENS)					
Umfeldmodell	Anwendungsszenarien	Anforderungen	Funktionen	Wirkstruktur	Verhalten
●	●	●	●		
●	●	●			
●			●	●	●
			●	●	●
	●	●		●	
	●	●		●	

Bild 4-8: Verknüpfung der verwendeten Partialmodelle (CONSENS) mit den Nutzenpotentialen

Die Festlegung eines geeigneten **Modellierungszwecks** ist nach TSCHIRNER die Grundlage einer zieltgerechten Modellierung. Die bereitgestellte Sammlung von Modellierungsbzw. Verwendungszwecken eines Systemmodells bildet die Ausgangslage zur Beschreibung der wesentlichen Zwecke in Bezug auf ein Nutzenpotential [Tsc16, S. 94ff.]. Bild 4-9 verknüpft hierzu die Modellierungszwecke nach TSCHIRNER mit den Nutzenpotentialen Systems Engineering für den Maschinenbau.

	Modellierungszwecke nach TSCHIRNER																			
	Systemgrenzen definieren	Problemverständnis sicherstellen	Kommunikation befähigen	Kooperation unterstützen	Innovation befähigen	Interdisziplinäre Systembetrachtung	Architektur beschreiben	Lösungen kommunizieren	Produktkomplexität beherrschen	Dokumentation bereitstellen	Impactanalysen durchführen	Traceability ermöglichen	Übergang in die Konkretisierung	Verifikation und Validierung	Analysen unterstützen	Simulation unterstützen	Qualität verbessern	Risiko verringern	Entscheidungsunterstützung (Techn.)	Entscheidungsunterstützung (Techn. Mngt.)
N1)	●	●	●	●	●	●														
N2)		●	●			●				●	●	●								
N3)	●	●	●	●		●	●	●	●			●	●							
N4)										●			●	●	●	●	●	●		
N5)		●	●	●		●		●	●	●							●	●	●	
N6)		●				●		●	●	●							●	●	●	

● Prinzipielle harmonierende Vernüpfung zwischen Nutzenpotential und Modellierungszweck

Bild 4-9: Verknüpfung der Nutzenpotentiale mit harmonierenden Modellierungszwecken in Anlehnung an [Tsc16]

Der Formalisierungsgrad beschreibt die Genauigkeit der Definition (Sprachsyntax und -semantik) der Sprache, die zur Anwendung von MBSE verwendet wird. Der Formalisierungsgrad hat Einfluss auf die Anwendung der Sprache. Mit steigendem Formalisierungsgrad nimmt die Möglichkeit zu, die Sprache für einen Rechner interpretierbar zu machen. Es werden drei Ausprägungen unterschieden nicht-formale Sprache – semi-formale Sprache – formale Sprache. Formale Sprachen erfordern allerdings eine detaillierte und komplexe Modellierung und Dateneingabe und überfordern daher häufig den Anwender. Dies gilt insbesondere für Fachexperten, die keine SE Expertise aufweisen und/oder mit formalen Modellierungssprachen nicht vertraut sind. Die Sprachen des modellbasierten Systems Engineering werden in der Regel als sog. semi-formale Sprachen bezeichnet. Sie liegen zwischen *formal – nicht-formal* und verfügen über eine definierte, eindeutige abstrakte und konkrete Syntax. Das kann bspw. eine grafische Notation sein, die mit präzisen Regeln zur Spezifikation anzuwenden ist oder eine rein textuelle Notation mit ähnlichen Regeln. Jede Ausprägung bietet **Vor- und Nachteile** in der Anwendung eines Systemmodells. Im Nutzenpotential *fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung* (N3) ist der Vorteil einer nicht-formalen Sprache die *einfache und schnelle Skizzierung des Produktkonzepts auf Brownpaper*. Der Nachteil liegt darin, dass das *Modell im Rechner nicht interpretierbar und weiterverarbeitbar* ist. Je Nutzenpotential ist der empfohlene Formalisierungsgrad in den Steckbriefen vermerkt [Tsc16, S. 94ff.]. Bild 4-10 veranschaulicht den in den einzelnen Nutzenpotentialen empfohlenen Formalisierungsgrad, zeigt Vor- und Nachteile des Formalisierungsgrads auf und verortet typische **in den Projekten verwendete unterstützende Werkzeuge**.

Formalisierungsgrad	nicht formal	semi formal	formal	
N1) Modellbasierte Produktinnovationen				
N2) Transparente Anforderungsdokumentation				
N3) Fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung				
N4) Frühzeitige Analysen				
N5) Fachabteilungsübergreifendes Projektmanagement				
N6) Unternehmensübergreifende Zusammenarbeit				
Typische (Unterstützungs-) werkzeuge in den Projekten	Workshop-techniken (Flipchart, brownpaper etc.)	Diagrammtool (z.B. MS Office, Visio und PPT)	Commercial off the Shelf (COTS) (z.B. PTC Integrity, Papirus)	Simulationswerkzeuge (z.B. Matlab, Simulink)
Vorteile	Einfache Anwendbarkeit ohne spezifische Werkzeuge und strikte Modellierungsregeln, begrenzter Aufwand, Diskussion und Abstimmung stehen im Vordergrund, Kreativität wird unterstützt		Im rechnerinterpretierbare und weiterverwendbare Modelle, mit geringem Interpretationsspielraum	
Nachteile	Rechnergestützte Weiterverarbeitung und Konsistenzsicherung der Modelle nicht möglich		Hoher Aufwand durch komplexe und detaillierte Modellierung und Dateneingabe.	

= der in den Projekten vornehmlich verwendetet Formalisierungsgrad

Bild 4-10: Beziehung des Formalisierungsgrad in der Systemmodellanwendung zu den Nutzenpotentialen

Maßgeblich relevante Rollen/ Funktionsbereiche

Hinter den Nutzenpotentialen verbergen sich Tätigkeiten und Verantwortlichkeiten (z.B. Systemverantwortlicher), die in einem Projektteam einzunehmen sind. In Anlehnung an MÖHRINGER (vgl. Abschnitt 2.5.2/4.5) werden in den Nutzenpotentialsteckbriefen die beteiligten Rollen in einem SE Entwicklungsteam bereitgestellt. Die Untersuchung der Transferprojekte zeigt, dass die Systems Engineering Aktivitäten nicht nur in der Entwicklung greifen, sondern darüber hinaus die Kooperation verschiedener Funktionsbereiche unterstützen. Ein produzierendes Industrieunternehmen, wie die hier betrachtete Zielgruppe des Maschinenbaus, lässt sich durch wesentliche Funktionsbereiche charakterisieren [GP14, S. 16ff.]; beispielhaft sind hier der Vertrieb, die Produktplanung, der Service, die Arbeitsplanung und die Fertigung zu nennen (Bild 4-11). Am Beispiel des Nutzenpotentials *fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung* (N3) wird dies kurz erläutert

und in Bild 4-11 veranschaulicht. Neben der Abstimmung zwischen den Fachexperten aus Mechanik und Elektronik ist u.a. der Vertrieb und die Produktplanung in die Konzipierung miteinzubeziehen. Hierdurch wird beispielsweise die Kundensicht integriert und der Produktstrategie in der Konzipierung berücksichtigt.

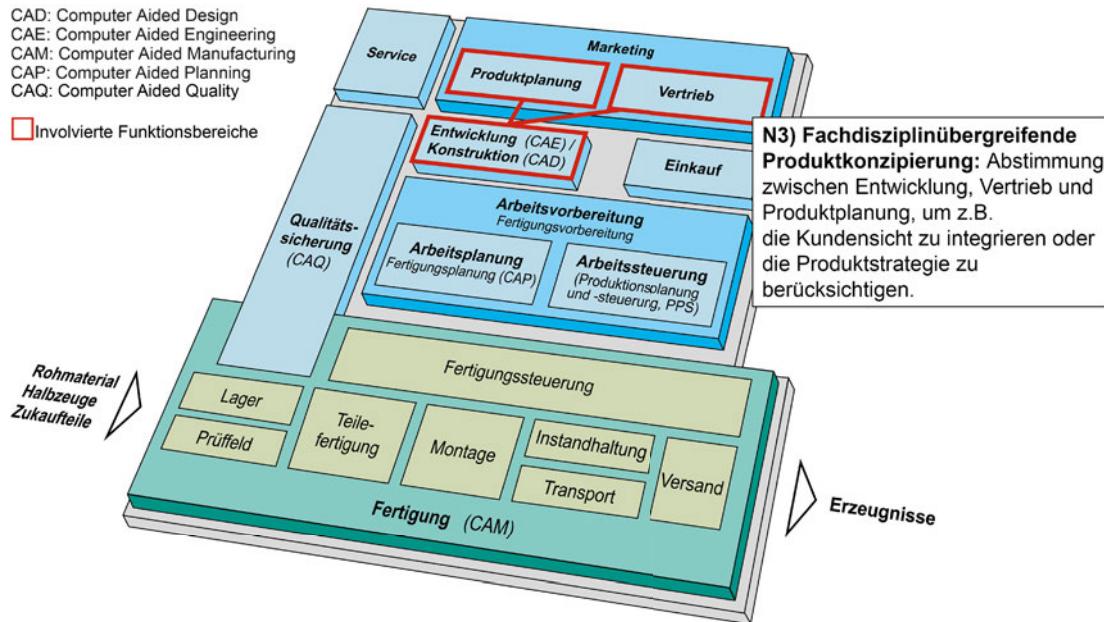


Bild 4-11: Kooperation zwischen verschiedenen Funktionsbereichen eines Unternehmens am Beispiel fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung (N3) in Anlehnung an [GP14, S. 17]

Verstärkende Randbedingungen

Die Analyse der Transferprojekte hat gezeigt, dass bestimmte Ausprägungen von Unternehmens-, Produkt- und Projektmerkmalen ein Nutzenpotential verstärken. Hierzu wurden verschiedene Merkmale aus den Bereichen Unternehmen, Produkt und Projekt untersucht. Jedem Bereich sind **Merkmale** zugeordnet, die die Auswahl der Nutzenpotentiale und die zur Erschließung dieser verbundenen Aktivitäten beeinflussen. Jedem Merkmal sind mind. zwei (überwiegend drei) unterschiedliche **Ausprägungen** zugeordnet.

Ein Beispiel für ein Merkmal aus dem Bereich Unternehmen ist die Größe der Entwicklungsabteilung („Wie viele Fachexperten arbeiten bei Ihnen in der Entwicklung?“). Hierdurch wird bspw. der Formalisierungsgrad in der Kommunikation und Kooperation der beteiligen Fachexperten beeinflusst. Mögliche Ausprägungen sind *klein* (<10), *mittel* (10 bis 50), *groß* (>50). In kleinen Entwicklungsabteilungen, die an einem Standort sind, sind die Kommunikationswege kurz und persönliche Abstimmungen sind einfacher möglich.

Aus dem Bereich Projekt beeinflusst die Projektgröße sowie der Projekttyp die Relevanz eines Nutzenpotentials. Für das Merkmal Projekttyp werden beispielweise die Ausprägungen *Neuentwicklung*, *Anpassungsentwicklung* und *Variantenentwicklung* unterschieden.

Eine Zusammenhangsmatrix stellt die Zusammenhänge von Merkmalsausprägungen und Nutzenpotentialen dar. Die Matrix ist in Bild 4-12 abgebildet und zeigt den Zusammenhang der Ausprägungen (Zeile) auf die Nutzenpotentiale (Spalte). Hierbei steht die Beantwortung der Frage im Vordergrund: „Verstärkt die Ausprägung eines Merkmals i (Zeile) die Bedeutung eines Nutzenpotentials j (Spalte)?“ Wenn ein Einfluss besteht, wird die entsprechende Zelle farblich hervorgehoben und bewertet („0 = kein erheblicher Einfluss“ oder „1 = erheblicher Einfluss“).

		Zusammenhangsmatrix Ausprägungen und Nutzenpotentiale						Nutzenpotentiale											
								M. Produktinnovationen	T. Anforderungsdokumentation	F. Produktkonzipierung	F. Analysenn	F. Projektmanagement	U. Zusammenarbeit						
		Merkmale		Ausprägungen						Nr.	N1	N2	N3	N4	N5	N6			
Unternehmensmerkmale	Größe der Entwicklungsabteilung	klein <10		AO1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
		mittel (10-50)			0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0				
		groß >50			0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0				
	Entwicklungsstandorte	lokal		BO1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
		national			0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0				
		international			0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0				
	Kernmärkte	regional		CO1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
		überregional			0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0				
		global			0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0				
				DO1										0	1	0	1	0	0

Bild 4-12: Zusammenhangsmatrix von Merkmalsausprägungen und Nutzenpotentialen (Auszug)

Relevante Prozesse und Methoden

Aus den Vorgehensweisen in den einzelnen Projekten lassen sich einzelne Tätigkeiten und unterstützende Methoden herausfiltern. Die durchgeführten Vorgehensweisen wurden um Prozessschritte aus den Referenzprozessen der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206], dem Sonderforschungsbereich 614 [GSR14] und dem SE Handbook (ISO/IEC 15288) [INC15] ergänzt und strukturiert. Ergebnis ist eine sortierte Sammlung aus Prozessschritten und zugehörigen Methoden, die im Kontext des Nutzenpotentials von hoher Bedeutung sind.

4.3 Vorgehensmodell SE-Leitfaden

Gegenstand dieses Abschnitts ist ein *Vorgehensmodell SE-Leitfaden* zur Definition und Umsetzung eines bedarfsgerechten Systems Engineering Leitfadens. Ziel ist ein konkreter Plan für die Umsetzung einer bedarfsorientierten Auswahl von Systems Engineering Prozessschritten, Methoden und Rollen für ein Unternehmen, ausgehend von dem bestehenden Bedarf schrittweise hin zu einem definierten Soll-Prozess. Das Vorgehensmodell beschreibt detailliert die durchzuführenden Tätigkeiten und steuert den Einsatz der Hilfsmittel.

Das Vorgehensmodell gliedert sich in vier aufeinanderfolgende Phasen, in denen die Nutzenpotentiale SE für den Maschinenbau, die Hilfsmittel zur Bedarfsanalyse und der Werkzeugkoffer SE unterstützend eingesetzt werden. Bild 4-13 verdeutlicht den Ablauf der Phasen, Aufgaben und Resultate, die nachfolgend beschrieben werden.

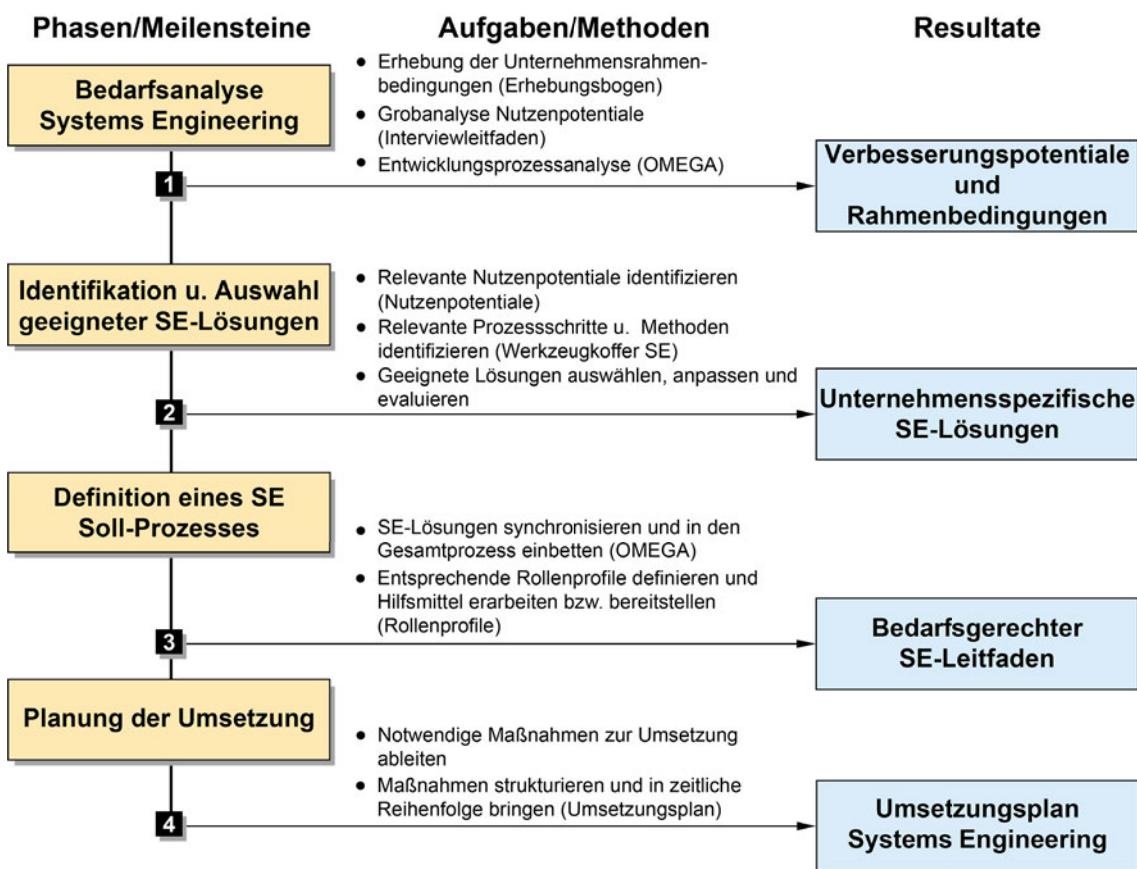


Bild 4-13: Vorgehensmodell SE-Leitfaden

4.3.1 Phase 1: Bedarfsanalyse Systems Engineering

Im Rahmen der ersten Phase erfolgt die **Bedarfsanalyse Systems Engineering** für ein Unternehmen. Hierdurch wird die Grundlage gelegt, um einen bedarfsgerechten Prozess für ein Unternehmen zu definieren.

Zunächst gilt es ein interdisziplinäres Team aus verschiedenen Fachbereichen aus der Entwicklung (z.B. Konstruktion und Elektronik) sowie angrenzender Funktionsbereiche (z.B. Produkt- und Produktionssystemplanung) des Unternehmens für die Bedarfsanalyse zusammenzustellen. Hauptadressat ist die Leitung der Entwicklungsabteilung.

Ausgangspunkt ist die **Erhebung der Unternehmensrahmenbedingungen**. Auf Grundlage von Unternehmens-, Produkt- und Projektmerkmalen sowie deren Ausprägungen wird das Unternehmen analysiert. Hierzu dient ein Erhebungsbogen (vgl. Abschnitt 4.4.1). Über die Verknüpfung der Merkmalsausprägungen mit den Nutzenpotentialen lassen sich bereits erste relevante Nutzenpotentiale identifizieren, die durch eine Ausprägung verstärkt werden. Die Erhebung erfolgt anhand der aktuellen sowie der zukünftigen Ausprägung, um geplanter Veränderungen im Unternehmen Rechnung zu tragen. Des Weiteren erfolgt im Fall eines breit gefächerten Produktpportfolios eine Fokussierung der betrachteten Produkte und ihrer entsprechenden Entwicklungsprozesse. Analog wird ebenfalls die Auswahl besonderes relevanter Projekttypen im Kontext der SE-Implementierung vorgenommen. Ergebnis sind die individuellen Rahmenbedingungen sowie fokussierte Produkte und Projekttypen.

Zur Identifikation relevanter Nutzenpotentiale SE wird die interdisziplinäre Zusammenarbeit in der **Grobanalyse Nutzenpotentiale** anhand eines Interviewleitfadens analysiert. Auf diese Weise wird mit Hilfe des interdisziplinären Projektteams der Entwicklungsprozess des Unternehmens anhand gezielter Fragestellungen entlang der Problemstellungen und Nutzenpotentiale SE untersucht. Es werden Schwachstellen bzw. Verbesserungspotentiale im Hinblick auf die Nutzenpotentiale identifiziert und dokumentiert.

Im Wechselspiel zur Grobanalyse Nutzenpotentiale erfolgt eine ausführliche **Entwicklungsprozessaufnahme und -analyse** mit Fokus auf die interdisziplinäre Zusammenarbeit in der Entwicklung. Die vorab identifizierten Schwachstellen und Verbesserungspotentiale werden auf diese Weise detailliert betrachtet. Neben den einzelnen Tätigkeiten sollen die verwendeten Methoden und Werkzeuge dokumentiert werden. Außerdem werden der Informationsfluss und die Entwicklungsobjekte sowie deren Weiterentwicklung und Austausch erfasst. Vor diesem Hintergrund wird die Methode OMEGA zur Aufnahme und Analyse des Entwicklungsprozesses verwendet (vgl. Abschnitt 4.4.3). Das Projektteam erhält so eine einfache und prägnante Darstellung der Ist-Situation und kann die bereits erkannten Verbesserungspotentiale im Prozess verorten sowie weitere identifizieren. Dies geschieht, in dem der Prozess nach Unstimmigkeiten, Informationsbrüchen oder ungenügender interdisziplinären Zusammenarbeit untersucht wird. Besonderes Augenmerk sollte auf der Analyse der Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Fachdisziplinen (z.B. Restriktionen zwischen Mechanik und Elektronik) liegen. Die Aufnahme und Erörterung des Prozesses erfolgt in Form von Workshops mit dem definierten Projektteam. Dies stellt sicher, dass verschiedene Perspektiven einfließen und die Ist-Situation möglichst realitätsgerecht erfasst wird.

Folgende **Hilfsmittel** unterstützen die Phase Bedarfsanalyse Systems Engineering:

- Ergebungsbogen zur Bestimmung der individuellen Rahmenbedingungen des Unternehmens (vgl. Abschnitt 4.4.1)
- Interviewleitfaden der Grobanalyse Nutzenpotentiale zur Analyse des bestehenden Entwicklungsprozesses hinsichtlich der Problemstellungen und Nutzenpotentiale (vgl. Abschnitt 4.4.2)
- Methode OMEGA zur Abbildung des Ist-Entwicklungsprozesses sowie zur Analyse der interdisziplinären Zusammenarbeit (vgl. Abschnitt 4.4.3)

Resultat dieser Phase sind die individuellen *Rahmenbedingungen*, die es bei der Gestaltung des SE Soll-Prozesses zu beachten gibt, sowie konkret im Ist-Entwicklungsprozess des Unternehmens verortete *Verbesserungspotentiale* und Schwachstellen, die durch die Integration von SE-Ansätzen adressiert werden sollen.

4.3.2 Phase 2: Identifikation und Auswahl geeigneter SE-Lösungen

Ziel der Phase *Identifikation und Auswahl geeigneter SE-Lösungen* sind unternehmensspezifische sinnvolle Kombination von Prozessschritten und zugehörigen Methoden im Kontext Systems Engineering, die im Unternehmen zum Einsatz kommen sollen. Hierzu wird der **Werkzeugkoffer Systems Engineering** (vgl. Abschnitt 4.5) verwendet. Zur Identifikation geeigneter Prozessschritte und Methoden werden die bereits erarbeiteten Verbesserungspotentiale und Schwachstellen aufgegriffen. Es werden **relevante Nutzenpotentiale** ermittelt (z.B. *fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung (N3)*). Grundlage sind die Verknüpfung der Nutzenpotentiale mit den typischen Problemstellungen (vgl. Abschnitt 4.2.3) sowie die Ergebnisse aus der Grobanalyse Nutzenpotentiale. Im Anschluss werden für alle relevanten Nutzenpotentiale die entsprechenden Prozessschritte betrachtet und ausgewählt. Die **Prozess- und Methodenlandkarte** (vgl. Abschnitt 4.5.4) stellt die relevanten Prozessschritte in einer logischen zeitlichen Reihenfolge je Nutzenpotential bereit und unterstützt so die Auswahl dieser. Für das Nutzenpotential *fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung (N3)* werden beispielsweise folgende Prozessschritte ausgegeben: *Funktionshierarchie aufstellen; Lösungsideen erstellen; Lösungsideen bewerten und validieren; Wirkstruktur aufstellen*. Je Prozessschritt gilt es dann, geeignete Methoden auszusuchen (z.B. *Funktionshierarchie nach CONSENS; Morphologischer Kasten; Wirkstruktur nach CONSENS*). Diese werden mit Hilfe der Prozess- und Methodenlandkarte intuitiv bereitgestellt. Je Prozessschritt werden entsprechend geeignete Methoden ausgewählt. Ein **Methodensteckbrief** (vgl. Abschnitt 4.5.4) stellt die wichtigsten Informationen über den Einsatz der Methode bereit und unterstützt die Auswahl. Dabei ist neben dem Zweck jeder Methode auch auf den Zusammenhang mit anderen Methoden zu achten. Wird eine Methode durch eine andere ergänzt, sollte diese ebenfalls ins Kalkül gezogen werden z.B. *Funktionshierarchie nach CONSENS* und

Morphologischer Kasten). Hierzu ist die **Methodenmatrix** hinzuzuziehen (vgl. Abschnitt 4.5.2). Ähnlich verhält es sich, wenn eine Methode Ergebnisse voraussetzt, die durch eine andere Methode erweitert werden können. Sind zwei Methoden ähnlich, sollte abgewogen werden, ob wirklich beide zum Einsatz kommen sollten oder der Einsatz einer Methode ausreichend ist.

In Anlehnung an das *Münchener Methodenmodell* [Lin09] (vgl. Abschnitt 3.2.1) gilt es nachfolgend, geeignete Kombinationen aus Prozessen und Methoden auszuwählen und an die Bedürfnisse des Unternehmens anzupassen. Hierzu werden die Methoden innerhalb des Projektteams an einem konkreten Beispiel aus dem Unternehmen **evaluiert**. Hierzu werden die benötigten Ressourcen (z.B. Anwender, notwendige Fähigkeiten), das Vorgehen, das Ergebnis sowie die zum Einsatz kommenden Hilfsmittel (z.B. Vorlagen, IT-Unterstützung) betrachtet. Die Methode wird entsprechend der für das Unternehmen relevanten Aspekte angepasst.

In der Phase Identifikation und Auswahl geeigneter Ansätze unterstützen folgende **Hilfsmittel**:

- Nutzenpotentiale Systems Engineering für den Maschinenbau sowie die Verknüpfung der Nutzenpotentiale mit den Problemstellungen der Unternehmen (vgl. Abschnitt 4.2.3)
- Werkzeugkoffer Systems Engineering inkl. Methoden- und Prozesslandkarte, Methodensteckbriefe und Methodenmatrix (vgl. Abschnitt 4.5.4)

Resultat der Phase *Identifikation und Auswahl geeigneter SE-Lösungen* sind den Verbesserungspotentialen und Schwachstellen entsprechende Bündel aus Prozessschritten und zugehörigen Methoden, diese ergeben *unternehmensspezifische SE-Lösungen*.

4.3.3 Phase 3: Definition eines SE Soll-Prozesses

Aufbauend auf Phase 2 erfolgt die *Definition des SE Soll-Prozesses*. Hierzu werden die unternehmensspezifischen **SE-Lösungen synchronisiert** und **in den Gesamtprozess eingebettet**. Als Hilfsmittel für die Einbettung dient der in Phase 1 modellierte Entwicklungsprozess. Die ausgewählten und angepassten Ansätze werden entsprechend der vororteten Verbesserungspotentiale und Schwachstellen in den Prozess eingebracht. Dabei ist bei der Positionierung der Input und der Output der Prozessschritte zu beachten. Der Prozess wird dann um entsprechend geeignete Prozessschritte ergänzt bzw. umstrukturiert. Unter dem Begriff Synchronisation der SE-Lösungen verbirgt sich das Aufeinanderabstimmen der ausgewählten Prozessschritte und Methoden (z.B. *Systemumfeld analysieren: Umfeldanalyse nach CONSENS; Wirkstruktur aufstellen: Wirkstruktur nach CONSENS*). Kommt in den Methoden beispielsweise der Einsatz eines Systemmodells vor, ist die Erarbeitung der Partialmodelle, die gewählte Modellierungssprache (z.B.

CONSENS), der Formalisierungsgrad (z.B. *nicht formal*) und das zu verwendende Werkzeug (z.B. *MS Visio*) aufeinander abzustimmen. Hierzu können die Nutzenpotentialsteckbriefe (vgl. Abschnitt 4.2.4) zur Orientierung hinzugezogen werden. Zur Schaffung eines einheitlichen Verständnisses wird der SE Soll-Prozess abschließend mit Hilfe der Methode OMEGA visualisiert und mit dem interdisziplinären Projektteam geprüft.

Im Zuge der neuen Entwicklungsprozessgestaltung müssen die Verantwortlichkeiten in einem Entwicklungsprojektteam überprüft und ggf. entsprechend angepasst werden. Die Rollenprofile des Werkzeugkoffers Systems Engineering (vgl. Abschnitt 4.5.3) unterstützen diesen Vorgang. Sie beschreiben die Aufgabenbereiche verschiedener Rollen in einem SE Team und sind über die Methodensteckbriefe mit den ausgewählten SE-Lösungen verknüpft. Für das Unternehmen muss geprüft werden, inwieweit die bestehenden Rollen die Aufgabenbereiche erfüllen und ob gegebenenfalls neue bzw. andere **Rollen** in einem Entwicklungsteam (z.B. *die Rolle des Systementwicklers*) zu **definieren** sind. Die Rollen werden abschließend in Prosa spezifiziert und in der Entwicklungsprozessmodellierung aufgegriffen.

Zusätzlich zu der Geschäftsprozess- und Rollendefinition müssen die notwendigen **Hilfsmittel** (z.B. Hilfsdokumente, wie Vorlagen und Informationsunterlagen) zur Anwendung des SE Soll-Entwicklungsprozesses **erarbeitet** und **bereitgestellt werden**. Die bereitgestellten Hilfsmittel, wie Methodenvorlagen aus dem Werkzeugkoffer Systems Engineering, dienen als Grundlage (vgl. Abschnitt 4.5).

Folgende **Hilfsmittel** werden in dieser Phase eingesetzt:

- Methode OMEGA zur Modellierung des Soll SE Entwicklungsprozesses (vgl. Abschnitt 4.4.3)
- Rollenprofile des Werkzeugkoffers Systems Engineering (vgl. Abschnitt 4.5.3)
- Hilfsmittel aus den Methodensteckbriefen aus dem Werkzeugkoffer Systems Engineering (vgl. Abschnitt 4.5)

Resultat der dritten Phase ist eine *bedarfsgerechte SE-Leitfaden*, der aus einem dokumentierten SE Soll-Entwicklungsprozess, unternehmensspezifischen Rollenprofilen sowie den notwendigen Hilfsmitteln zur Umsetzung besteht.

4.3.4 Phase 4: Planung der Umsetzung

In einer abschließenden Phase *Planung der Umsetzung* wird die schrittweise Umsetzung des SE-Leitfadens ausgearbeitet. Die Umsetzung erfordert oftmals verschiedene Veränderungen und Anpassungen im Unternehmen, die parallel zu den laufenden Entwicklungsaktivitäten zu verwirklichen sind. Daher werden in dieser Phase zunächst grob die **notwendigen Maßnahmen zur Umsetzung abgeleitet**. Zentrales Hilfsmittel dafür ist der Umsetzungsplan. Er bildet die Informationen zur Umsetzung plakativ ab und kann

dadurch auch als Kommunikationsmittel über alle betroffenen Fachbereiche dienen. Es werden drei Perspektiven betrachtet: Methoden und Prozesse, Organisation und IT-Unterstützung.

Der Umsetzungsplan stellt der Ausgangssituation die Zielsetzung gegenüber und weist einzelne Umsetzungsschritte zur Realisierung des Zielbilds auf (Bild 4-14). Die Strukturierung des Umsetzungsplans basiert auf einem *Master Plan of Action* in Anlehnung an [GP14, S. 213]. Der Umsetzungsplan umfasst drei Hauptspalten und ist in drei Ebenen (Zeilen) unterteilt. Die Spalten gliedern den Umsetzungsplan in Ausgangssituation, Umsetzung und das Ziel. Die Ebenen unterscheiden die Bereiche Methoden und Prozesse, Organisation und IT-Unterstützung.

Um Maßnahmen zu definieren, wird zunächst die Ausgangssituation und das Ziel je Ebene beschrieben. Anschließend erfolgt das Ableiten von einzelnen Maßnahmen. Die Ebenen Methoden und Prozesse umfasst alle Maßnahmen, die zum Einsatz und der Validierung der neuen Prozessschritte und Methoden benötigt werden (z.B. die Planung eines Pilotprojekts). Auf der Ebene Organisation werden hauptsächlich Veränderungen in der Aufbauorganisation (z.B. Entwicklungsprojektteamstrukturen und Rollen) sowie notwendige Sensibilisierungs- und Schulungsmaßnahmen verordnet. Die dritte Ebene adressiert die IT-Unterstützung in der Entwicklung. Gemäß des 4-Ebenen-Modells zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung werden IT-Systeme im Anschluss an die Prozessplanung zur Unterstützung dieser geplant [GP14, S. 37ff.]. Die Erfahrungen aus den Industrieprojekten (z.B. Transferprojekte) zeigen, dass die Werkzeuglandschaft oftmals die interdisziplinäre Zusammenarbeit nicht ausreichend unterstützt. Es gibt viele System- und Medienbrüche. Außerdem ist die Ausstattung der Unternehmen in den verschiedenen Fachbereichen oft ungleich. Während die Konstruktion verschiedene und durchaus vernetzte Werkzeuge zur Virtualisierung der Entwicklungsobjekte nutzt, ist eine Durchgängigkeit in der Elektronik in vielen mittelständischen Unternehmen noch nicht gegeben. Gerade der Mehrwert eines Systemmodells wird jedoch durch eine digitale Durchgängigkeit gesteigert (vgl. Abschnitt 2.5.2). Insbesondere der mittelständisch geprägte Maschinenbau hat dabei besondere Anforderungen an die Werkzeugunterstützung im Model-Based Systems Engineering [vgl. HBR+16]. Die entsprechenden Maßnahmen zur schrittweisen Anpassung der IT-Systemlandschaft im Unternehmen werden daher grob auf dieser Ebene dokumentiert, stehen aber nicht im Fokus der Arbeit. Für die Auswahl eines bedarfsgerechten Model-Based Systems Engineering Werkzeugs wird auf eine Methode aus dem Cluster-Querschnittsprojekts „Systems Engineering“ im BMBF-Spitzencluster „Intelligente Technische Systeme OstWestfalen-Lippe“ (it's OWL) verwiesen (vgl. A2).

Die Ausgangssituation ist eine Kurzbeschreibung der Ist-Situation je Ebene in einem Unternehmen. Bild 4-14 veranschaulicht einen Umsetzungsplan am **Beispiel** eines bisher stark mechanisch geprägten Unternehmens aus dem Maschinenbau. Das Beispielunternehmen verfolgt das Ziel die fachdisziplinübergreifende Zusammenarbeit deutlich zu stärken.

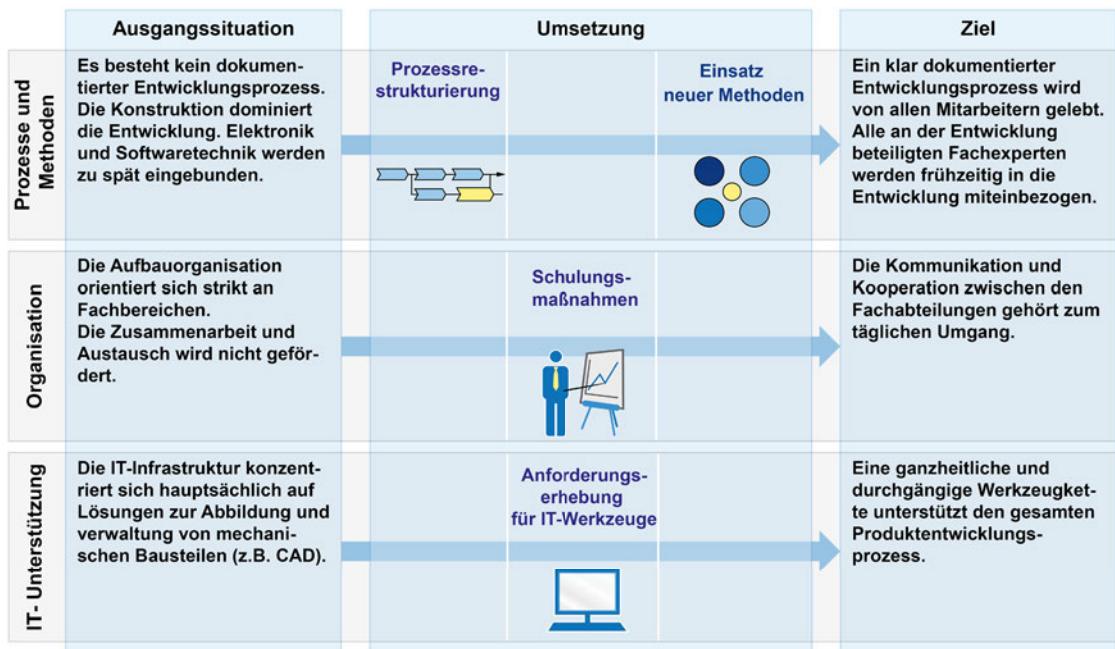


Bild 4-14: Umsetzungsplan SE beispielhaft erläutert an einem stark mechanisch geprägten mittelständischen Maschinenbauunternehmen

Der Umsetzungsplan dient so zur systematischen Planung der Umsetzung und ist Grundlage für eine detaillierte Maßnahmendefinition. Alle **Maßnahmen** werden in eine **zeitliche Reihenfolge** gebracht und entsprechend im Umsetzungsplan angeordnet. Dabei ist es wichtig, auf mögliche Abhängigkeiten zwischen den Maßnahmen zu achten und diese im Umsetzungsplan zu kennzeichnen. Abhängigkeiten bestehen insbesondere bei der Umsetzung von bestimmten Methoden oder Prozessen, da für diese in der Regel bestimmte Kompetenzen notwendig sind und ggf. notwendige Schulungen absolviert werden müssen. Hier sei auf das Vorgehen zur schrittweisen Einführung von Systems Engineering aus der Schulungsperspektive verwiesen (vgl. A3)

Das erforderliche Hilfsmittel zur Durchführung dieser Phase 4 ist der Umsetzungsplan.

Resultat der vierten Phase ist ein *Umsetzungsplan Systems Engineering*. Damit liegt zum Abschluss des Vorgehensmodells ein Handlungsplan für die Umsetzung der bedarfsgerechten SE-Leitfadens für das Unternehmen vor.

4.4 Bedarfsanalyse

Ziel der Bedarfsanalyse ist die objektive Identifikation von Handlungsbedarf zur Anwendung von Systems Engineering Ansätzen im zu betrachtenden Unternehmen. Dazu müssen zunächst die unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen mit Hilfe einer **Erhebung der Unternehmensrahmenbedingungen** erfasst werden (Abschnitt 4.4.1). Außerdem ist der Ausgangszustand der Entwicklung des Unternehmens hinsichtlich der fach-

disziplinübergreifenden Zusammenarbeit zu betrachten und Schwachstellen zu identifizieren. Dies soll im Sinne der Ressourcenschonung zweistufig erfolgen. Zunächst werden die Bedarfe hinsichtlich der bestehenden Nutzenpotentiale in einer **Grobanalyse Nutzenpotentiale** interviewbasiert überprüft und der aktuelle Zustand erfasst (Abschnitt 4.4.2) (Bild 4-15). In der zweiten Stufe erfolgt eine Detaillierung mit Hilfe einer **Entwicklungsprozessmodellierung und -analyse**. Ergebnis sind im Entwicklungsprozess verortete Schwachstellen und Verbesserungspotentiale im Kontext Systems Engineering (Abschnitt 4.4.3).

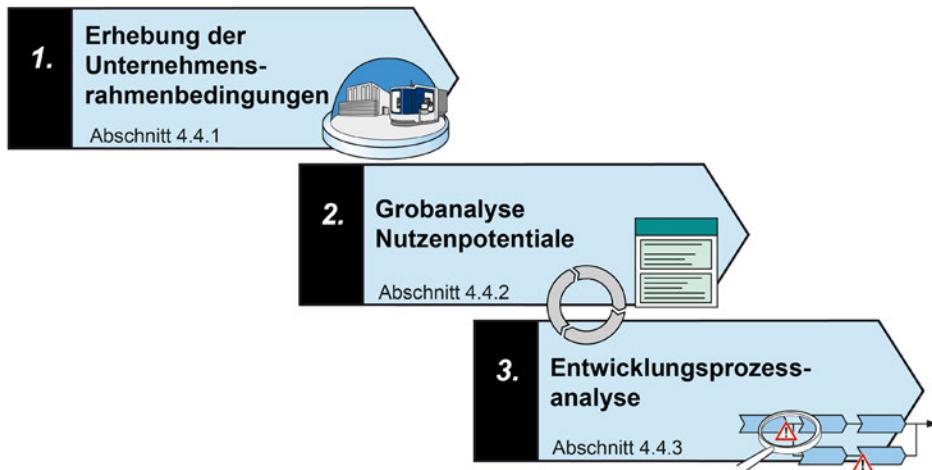


Bild 4-15: Vorgehen der Bedarfsanalyse

4.4.1 Erhebung der Unternehmensrahmenbedingungen

Ziel der Erhebung der Unternehmensrahmenbedingungen sind zum einen erfassste Ausprägungen verschiedener Merkmale eines Unternehmens. Sie bestimmen die individuellen Rahmenbedingungen eines Unternehmens, die Einfluss auf die Identifikation relevanter Nutzenpotentiale und die Auswahl geeigneter Systems Engineering Lösungen haben. Hierzu umfasst die Erhebung die Bereiche Unternehmen, Produkt und Projekt.

Um die Erhebung zu erleichtern, stellt die Systematik einen Erhebungsbogen bereit. Grundlage sind die identifizierten Randbedingungen aus Nutzenpotentialsteckbriefen (vgl. Abschnitt 4.2.4). Jedem Bereich sind Merkmale zugeordnet, die die Auswahl der Nutzenpotentiale und die Erschließung der verbundenen Aktivitäten beeinflussen. Jedem Merkmal sind mind. zwei (überwiegend drei) unterschiedliche Ausprägungen zugeordnet. Der Erhebungsbogen enthält 14 Merkmale. Bild 4-16 zeigt einen Auszug des Bogens, der in Bild 5-1 vollständig abgebildet ist.

Aus der Problemanalyse geht hervor, dass die Einführung von Systems Engineering häufig mit Veränderung z.B. der Produktmerkmale verbunden ist. Um diese Motivation der Unternehmen im Vorgehen abbilden zu können, stellt der Erhebungsbogen neben einer Spalte zur **aktuellen Merkmalsausprägung** zusätzlich eine Spalte mit **zukünftigen Ausprägungen** bereit. Anhand eines Vergleichs der aktuellen Ausprägungen und der

Entwicklung des Unternehmens zu den zukünftigen Ausprägungen können wichtige Nutzenpotentiale für das Unternehmen identifiziert werden.

Innerhalb eines Unternehmens können die Ausprägungen im Bereich Projekt und Produkt variieren, z.B. aufgrund eines breitgefächerten Produktpportfolios mit rein mechanischen Produkten und vernetzten mechatronischen Produkten. Oder durch die Unterscheidung des Projekttyps. Der Erhebungsbogen dient somit auch zur Fokussierung von interessanten Projekttypen oder dringlichen Produktbereichen im Kontext SE.

Über die Zusammenhangsmatrix von Merkmalsausprägungen und Nutzenpotentialen (vgl. Abschnitt 4.2.4, Bild 4-12 und A1.4) lassen sich so erste relevante Nutzenpotentiale identifizieren, die im weiteren Verlauf zu überprüfen und zu konkretisieren sind. Verstärkt die Ausprägung eines Merkmals die Bedeutung eines Nutzenpotentials ist dies in den nächsten Schritten der Bedarfsanalyse zu analysieren.

Erhebungsbogen		aktuelle Ausprägung	zukünftige Ausprägungen
Unternehmensmerkmale	Merkmale	Ausprägungen	Ausprägungen
Größe der Entwicklungsabteilung	klein <10	klein <10	
	mittel (10-50)	mittel (10-50)	
	groß >50	groß >50	
Entwicklungsstandorte	lokal	lokal	
	national	national	
	international	international	
Kernmärkte	regional	regional	
	überregional	überregional	
	global	global	

Bild 4-16: Erhebungsbogen (Auszug)

4.4.2 Grobanalyse Nutzenpotentiale

Die Grobanalyse Nutzenpotentiale unterstützt eine einfache und strukturierte Analyse des bestehenden Entwicklungsprozesses eines Unternehmens hinsichtlich grundsätzlicher Problemstellungen und der definierten Nutzenpotentiale. Anhand gezielter Fragestellungen entlang der Nutzenpotentiale SE für den Maschinenbau werden Schwachstellen bzw. Verbesserungspotentiale identifiziert und dokumentiert.

Hierzu ist die Grobanalyse Nutzenpotentiale in Form eines Interviewleitfadens aufgebaut, der nach den *Problemstellungen* und den sechs identifizierten *Nutzenpotentialen Systems Engineering* strukturiert ist.

Bild 4-17 zeigt in einem Auszug den Aufbau und die Fragen des Interviewleitfadens entlang der Problemstellungen aus der Praxis. Grundlage sind die Problemstellungen aus der Analyse der Transferprojekte it's OWL (vgl. Abschnitt 4.2.2.). Der vollständige Interviewleitfaden ist in Bild 5-3 und Bild 5-4 abgebildet. Er enthält 38 Fragen, die sich an den Stoßrichtungen und Problemstellungen zur Initiierung von SE orientieren. Ein Beispiel für eine Frage zur Stoßrichtung 1 ist: „*Müssen Sie mit einer hohen Anzahl von unterschiedlichen Auftrags- und Kleinserienfertigungsprojekten umgehen?*“. Alle Fragen sind so formuliert, dass sie mit „ja“ oder „nein“ beantwortet werden können. Fragen, die mit „ja“ beantwortet werden weisen darauf hin, dass diese Problemstellung grundsätzlich im Unternehmen vorhanden ist und im Kontext SE adressiert werden sollte. Über die Zuordnung der Fragen und Problemstellungen zu den Nutzenpotentialen lassen sich entsprechende Verknüpfungen identifizieren (Bild 4-18, Bild 4-19).

Problemstellungen	Fragen	Ja	Nein
Stoßrichtung 1 Projektierung	Müssen Sie mit einer hohen Anzahl von unterschiedlichen Auftrags- und Kleinserienfertigungsprojekten umgehen?		
	Ist Ihr Entwicklungsprozess nicht definiert?		
	Kommen zeitraubende Iterationsschleifen häufig in Ihren Projekten vor?		
	Nutzen Sie überwiegend teure und zeitraubende physikalische Prototypen bei der Optimierung der Systeme?		
	Ist die ungenaue Vorhersagbarkeit von Terminen der Fertigstellung ein Problem für Sie?		
	Verfügen Sie über heterogene Kundenstrukturen?		
	Bieten Sie komplexe kundenindividuelle Entwicklungsaufträge (Sonderanfertigungen mit Losgröße 1) an?		
	Haben Sie Probleme im Umgang mit komplexen Prüfzusammenhängen?		

Einschätzung eines befragten Unternehmens (Interviewergebnisse)

Bild 4-17: Interviewleitfaden Problemstellungen (Auszug) inkl. einer beispielhaften Interviewdokumentation

Problemstellungen	Fragen	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Stoßrichtung 1 Projektierung	Müssen Sie mit einer hohen Anzahl von unterschiedlichen Auftrags- und Kleinserienfertigungsprojekten umgehen?						
	Ist Ihr Entwicklungsprozess definiert?						
	Kommen zeitraubende Iterationsschleifen häufig in Ihren Projekten vor?						
	Nutzen Sie überwiegend teure und zeitraubende physikalische Prototypen bei der Optimierung der Systeme?						
	Ist die ungenaue Vorhersagbarkeit von Terminen der Auftragsfertigstellung ein Problem für Sie?						
	Verfügen Sie über heterogene Kundenstrukturen?						
	Bieten Sie komplexe kundenindividuelle Entwicklungsaufträge (Sonderanfertigungen mit Losgröße 1) an?						
	Haben Sie Probleme im Umgang mit komplexen Prüfzusammenhängen?						
	Benötigen Sie frühzeitige Testspezifikationen?						
	Haben Sie Schwierigkeiten die komplexen Anforderungen des Kunden zu verstehen?						
Definition, Analyse und Beherrschung von Anforderungen	Bereitet Ihnen die Dokumentation der Kundenanforderungen Probleme?						
	Bereitet Ihnen die systematische Aufnahme von Anforderungen Probleme?						
	Müssen Sie mit häufigen Anforderungsänderungen umgehen?						
	Haben Sie Schwierigkeiten in der Handhabung von Änderungsauswirkungen?						
Verstehen von Änderungs- auswirkungen	Kommt es häufig zu Fehleinschätzungen in der Planung sowie Fehler in der Entwicklung oder in der Umsetzung von Änderungen?						
	Kommt es häufig zu Fehleinschätzungen in der Bewertung von Änderungen?						
	Kommt es in Ihren Projekten häufig zu kontinuierlichen Anforderungsänderungen (z.B. durch den Kunden)?						
Variantenvielfalt beherrschen	Bereitet Ihnen eine fehlende Nachverfolgbarkeit der Entwicklung (Traceability) Probleme?						
	Verfügen Sie über eine geringe Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit der Teilkomponenten?						
 Verknüpfung der Problemstellungen und den zugehörigen Fragen mit den Nutzenpotentialen							

Bild 4-18: Verknüpfung der Problemstellungen und den zugehörigen Fragen mit den Nutzenpotentialen (Teil 1)

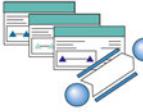
Problemstellungen	Fragen	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Stoßrichtung 2	Möchten Sie bestehende Produkte/ Fertigungsprozesse verbessern/effizienter gestalten?						
	Durchlaufen Ihre Produkte einen Wandel von mechanischen Produkten zu mechatronischen Produkten?						
	Möchten Sie Einsatzszenarien für neue Produktideen analysieren?						
	Möchten Sie ihre Produkte systematisch weiterentwickeln?						
	Durchlaufen oder planen Sie einen Wandel vom Produktanbieter zum Systemanbieter oder zum Lösungsanbieter?						
	Durchlaufen oder planen Sie einen Wandel vom Produktanbieter zum Anbieter von Marktleistungen (Produkt und Service)?						
	Ist Ihnen ein möglichst schneller Markteintritt wichtig (time to market)?						
	Möchten Sie neue Technologien nutzen?						
	Möchten Sie neue, Ihnen unbekannte Märkte erschließen?						
	Möchten Sie neue Geschäftsmodelle umsetzen?						
Stoßrichtung 3	Zunehmende Interdisziplinarität	Hat die Zusammenarbeit in interdisziplinären Entwicklungsteams eine hohe Bedeutung in Ihren Projekten?					
		Müssen bei Ihnen neuen Fachexperten müssen mit etablierten Experten zusammenarbeiten?					
		Lässt sich ein Wandel Ihrer Entwicklungsteams abzeichnen?					
		Verzeichnen Sie eine steigende Vernetzung Ihrer Produkte?					
		Bereitet Ihnen die Handhabung der vielfältigen disziplin-, tool- und stakeholderübergreifenden Abhängigkeiten Schwierigkeiten?					
		Bereitet Ihnen die Systemintegration Probleme?					
		Ist eine enge Abstimmung zwischen der Kundensicht (Kunde/Vertrieb) und Entwicklung von entscheidender Bedeutung?					
	Unstrukturierte Kommunikation und Kooperation	Arbeiten Sie mit externen Zulieferer bzw. Dienstleister zusammen?					

 Verknüpfung der Problemstellungen und den zugehörigen Fragen mit den Nutzenpotentialen

Bild 4-19: Verknüpfung der Problemstellungen und den zugehörigen Fragen mit den Nutzenpotentialen (Teil 2)

Darüber hinaus werden wird das bisherige Vorgehen in der Entwicklung entlang der Nutzenpotentiale abgefragt. Bild 4-20, Bild 4-21 und Bild 4-22 zeigen den Aufbau und die Fragen des Interviewleitfadens entlang der Nutzenpotentiale. Je Nutzenpotential wird eine prägnante Kurzbeschreibung sowie Fragen zu den aktuellen Gegebenheiten im Entwicklungsprozess bezüglich des Nutzenpotentials bereitgestellt. Die Fragen adressieren gezielt Schwachstellen in der multidisziplinären Produktentstehung. Ein Beispiel für eine Frage zu dem Nutzenpotential *fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung* (N3) ist: „Erarbeiten Sie Ihre Produktkonzepte von Anfang an interdisziplinär?“. Alle Fragen sind

so formuliert, dass für die Antworten jeweils diese vier Möglichkeiten zur Verfügung stehen „(1) *Nein, das machen wir nicht*, (2) *Wir machen das nur selten*, (3) *Wir machen das in jedem Projekt unterschiedlich*, (4) *Wir machen das standardisiert in allen Projekten*“. Wird eine Frage mit „1“ beantwortet lässt sich hier eine Schwachstelle vermuten, die dann in der detaillierten Prozessanalyse (vgl. Abschnitt 4.4.3) zu konkretisieren ist. Der Abgleich mit dem Ergebnis aus der Zusammenhangsmatrix von Merkmalsausprägungen und Nutzenpotentialen schafft weitere Klarheit, ob der Bedarf nach einer fachdisziplinübergreifenden Produktkonzipierung überhaupt gegeben ist. Wird die Frage mit den Antwortmöglichkeiten „2“ oder „3“ beantwortet, sind die Gründe für die unregelmäßige Anwendung zu durchleuchten. Die Antwort „4“ hingegen weist darauf hin, dass hier keine akute Schwachstelle zu finden ist.

N1) Modellbasierte Produktinnovationen		1	2	3	4
	Marktleistung schrittweise weiterentwickeln, Innovations- und Verbesserungspotentiale für Produkte und Dienstleistungen erkennen				
Werden Innovationspotentiale für bestehende Produkte systematisch und disziplinübergreifend identifiziert?	<input checked="" type="radio"/>				
Werden Umfeld und Einsatzszenarien neuer Produkte systematisch erhoben bzw. analysiert?	<input checked="" type="radio"/>				
Werden Einsatzszenarien für neue Technologien im Unternehmen analysiert und bewertet?			<input checked="" type="radio"/>		
Werden bestehende Produkte durch systematische, disziplinübergreifende Analysen optimiert, Verbesserungspotentiale erkannt und werden neue Technologien und Funktionen integriert?	<input checked="" type="radio"/>				
Wird die Weiterentwicklung von Produkten systematisch geplant und bereits frühzeitig in Produktkonzepten berücksichtigt?		<input checked="" type="radio"/>			
Werden konsequent und systematisch aus Änderungen des Geschäftsmodells neue Anforderungen an das Produkt und die Dienstleistungen ermittelt und in der Konzipierung berücksichtigt?	<input checked="" type="radio"/>				
N2) Transparente Anforderungsdokumentation		1	2	3	4
	Anforderungen schrittweise und interdisziplinär erheben, dokumentieren und verwalten. Kundenprobleme analysieren und verstehen, als Grundlage für eine fundierte Angebotserstellung				
Werden Anforderungen systematisch und interdisziplinär erhoben, dokumentiert und verwaltet?		<input checked="" type="radio"/>			
Wird die Kommunikation und Kooperation mit dem Kunden systematisch unterstützt, werden Problemstellungen und Anforderungen an Systemlösungen vollständig erfasst?	<input checked="" type="radio"/>				
Werden Kundenanfragen effizient und belastbar durch eine systematische Aufnahme und Analyse der Kundenanforderungen inkl. der Analyse der Systemumgebung bearbeitet?		<input checked="" type="radio"/>			
Werden Angebote unter Einbeziehung der beteiligten Fachexperten erstellt und so Kundenzufriedenheit und Termintreue sichergestellt?		<input checked="" type="radio"/>			
Werden die Anforderungen neuer Kundenbranchen systematisch erschlossen?			<input checked="" type="radio"/>		
Werden zu beachtende Gesetze und Standards bei der Anforderungsaufnahme berücksichtigt?				<input checked="" type="radio"/>	

 Einschätzung eines befragten Unternehmens (Interviewergebnisse)

- (1) Nein, das machen wir nicht. (3) Wir machen das in jedem Projekt unterschiedlich.
- (2) Wir machen das nur selten. (4) Wir machen das standardisiert in allen Projekten.

Bild 4-20: Interviewleitfaden zur Grobanalyse Nutzenpotentiale Teil N1 und N2 inkl. einer beispielhaften Interviewdokumentation

N3) Fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung		1	2	3	4
	Produktkonzepte von Beginn an mit allen beteiligten Fachexperten erarbeiten und dokumentieren. Schnittstellen transparent machen und Wechselwirkungen frühzeitig berücksichtigen				
Erarbeiten Sie Ihre Produktkonzepte von Beginn an interdisziplinär?		<input checked="" type="radio"/>			
Analysieren, konzipieren und dokumentieren Sie Anforderungen, Restriktionen und Wechselspiele, sodass ein optimales Zusammenspiel von Produkt und Serviceleistung durch eine integrative Entwicklung sichergestellt wird?			<input checked="" type="radio"/>		
Entwickeln sie das Produktkonzept und das Produktionssystem integrativ, um frühzeitig Restriktionen und Wechselwirkungen zu erkennen?	<input checked="" type="radio"/>				
Nutzen Sie Ihr Lösungswissen, um die Projektierung neuer Produkte effizient zu gestalten?				<input checked="" type="radio"/>	
Erkennen und definieren Sie Schnittstellen im Produkt eindeutig und werden diese transparent dokumentiert und kommuniziert?		<input checked="" type="radio"/>			
Wird die Variantenplanung schon frühzeitig bei der Konzeptentwicklung berücksichtigt und werden zusätzlich Chancen sowie Restriktionen aus versch. Fachbereichen erkannt und ebenfalls berücksichtigt?			<input checked="" type="radio"/>		
Werden Ihre Produkte systematisch (mechatronisch) modularisiert? Beziehungsweise gibt es eine mechatronische Systembaukastenkonzipierung?	<input checked="" type="radio"/>				
Wird ein Übergang in die fachabteilungsspezifische Ausarbeitung geschaffen?			<input checked="" type="radio"/>		
N4) Frühzeitige Analysen		1	2	3	4
	Frühzeitige Analysen von Produktkonzepten. Risiken, Änderungsbedarfe und Unklarheiten frühzeitig erkennen, abschätzen und Maßnahmen ergreifen, z.B. hinsichtlich Kosten, Zuverlässigkeit und Änderungsauswirkungen				
Werden die Produktkonzepte und Projektpläne frühzeitig hinsichtlich versch. Aspekte analysiert und werden Risiken, Änderungsbedarfe und Unklarheiten frühzeitig erkannt, abgeschätzt und geeignete Maßnahmen ergriffen?	<input checked="" type="radio"/>				
Werden Änderungsauswirkungen systematisch erkannt, analysiert, transparent dargestellt und fachbereichsübergreifend bewertet?	<input checked="" type="radio"/>				
Werden zeit- und kostenintensive Iterationsschleifen in der Inbetriebnahme mit Hilfe der frühzeitigen virtuellen Inbetriebnahme reduziert?	<input checked="" type="radio"/>				

 Einschätzung eines befragten Unternehmens (Interviewergebnisse)

- (1) Nein, das machen wir nicht. (3) Wir machen das in jedem Projekt unterschiedlich.
- (2) Wir machen das nur selten. (4) Wir machen das standardisiert in allen Projekten.

Bild 4-21: Interviewleitfaden zur Grobanalyse Nutzenpotentiale Teil N3 und N4 inkl. einer beispielhaften Interviewdokumentation

N5) Fachabteilungsübergreifendes Projektmanagement					
		Interdisziplinäre Zusammenarbeit über Abteilungs- und Fachbereichsgrenzen hinaus unterstützen, parallele Projekte managen und optimale Ausnutzung und Synchronisation der Ressourcen sicherstellen			
		1	2	3	4
Werden Ihr Produktkonzept und Ihr Projektplan im Wechselspiel geplant und so eine optimale Ausnutzung und Synchronisation der Ressourcen sichergestellt?	<input checked="" type="radio"/>				
Wird die Zusammenarbeit von Fachexperten mit langjähriger Berufs- und Produkterfahrung mit „neuen“ Experten systematisch unterstützt und wird eine Grundlage für Kommunikation und Kooperation bereitgestellt?	<input checked="" type="radio"/>				
Wird die interdisziplinäre Zusammenarbeit über Abteilungs- und Fachbereichsgrenzen hinaus unterstützt?	<input checked="" type="radio"/>				
Wird Multiprojektmanagement durch eine transparente Projektierung unterstützt?			<input checked="" type="radio"/>		
Werden multidisziplinäre Entwicklungsprozesse und Wechselwirkungen im Prozess mit Hilfe von Modellen transparent dargestellt und somit Kommunikation und Kooperation gefördert?	<input checked="" type="radio"/>				
Wird die Nachverfolgbarkeit in der Entwicklung (traceability) für alle beteiligten Fachexperten sichergestellt?	<input checked="" type="radio"/>				
Werden Inkonsistenzen in der Projektdokumentierung aktiv vorgebeugt?			<input checked="" type="radio"/>		

N6) Unternehmensübergreifende Zusammenarbeit					
		Kommunikation und Kooperation über die Unternehmensgrenzen hinaus von der frühen Entwicklungsphase über den gesamten PEP systematisch unterstützen, z.B. mit Kunden, Zulieferern oder Dienstleistern			
		1	2	3	4
Wird die Kommunikation und Kooperation mit Kunden über den gesamten PEP systematisch unterstützt?	<input checked="" type="radio"/>				
Wird die Kommunikation und Kooperation mit Zulieferern in der frühen Entwicklungsphase systematisch unterstützt?	<input checked="" type="radio"/>				
Wird die Kommunikation und Kooperation mit Dienstleistern in der frühen Entwicklungsphase systematisch unterstützt?			<input checked="" type="radio"/>		
Werden Schulungsunterlagen für Vertriebs- und Servicemitarbeiter systematisch erarbeitet?	<input checked="" type="radio"/>				

 Einschätzung eines befragten Unternehmens (Interviewergebnisse)

- (1) Nein, das machen wir nicht. (3) Wir machen das in jedem Projekt unterschiedlich.
 (2) Wir machen das nur selten. (4) Wir machen das standardisiert in allen Projekten.

Bild 4-22: Interviewleitfaden zur Grobanalyse Nutzenpotentiale Teil N5 und N6 inkl. einer beispielhaften Interviewdokumentation

Für die Grobanalyse Nutzenpotentiale werden die Fragen Schritt für Schritt bearbeitet. Die Reihenfolge der Befragung ist dabei nicht strikt an die Nummerierung der Nutzenpotentiale gebunden, sollten beispielsweise bestimmte Nutzenpotentiale bereits von dem Unternehmen präferiert werden. Gleichwohl wird empfohlen alle Fragen zu jedem Nutzenpotential zu betrachten, um so ein umfangreicheres Bild über den Handlungsbedarf zu erhalten. Der Interviewleitfaden dient vornehmlich zu einer ersten Einschätzung und stellt

34 Fragen bereit. Die einzelnen Fragen leiten sich sowohl aus der detaillierten Analyse der Nutzenpotentiale zur Unterstützung der Erschließung dieser (vgl. Abschnitt 4.2.4) sowie aus der ISO/IEC 15288 und dem SE Handbook ab [ISO15288], [INC15]. Die grafische Darstellung ermöglicht es, die Schwachstellen visuell zu erfassen. Ergebnis der Grobanalyse Nutzenpotentiale sind prägnant dokumentierte Schwachstellen in der interdisziplinären Zusammenarbeit des betrachteten Unternehmens. Im Wechselspiel zu der Grobanalyse Nutzenpotentiale erfolgt die Entwicklungsprozessanalyse (vgl. Abschnitt 4.4.3). Die Ergebnisse der Grobanalyse Nutzenpotentiale dienen als Grundlage für die Entwicklungsprozessmodellierung und -analyse.

Die Dokumentation des Interviewleitfadens ist am **Beispiel** eines mittelständischen Maschinenbauunternehmens dargestellt (Bild 4-17, Bild 4-20, Bild 4-21, Bild 4-22). Das Unternehmen ist stark durch die Konstruktion dominiert und dementsprechend werden die Möglichkeiten einer fachdisziplinübergreifenden Zusammenarbeit und Systemgestaltung bisher nicht genutzt. Insbesondere die Nutzenpotentiale der modellbasierten Produktinnovationen, die fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung und die frühzeitige Analyse sind bisher nicht erschlossen. Darüber hinaus wird das Projektmanagement nicht fachabteilungsübergreifend organisiert und die unternehmensübergreifende Zusammenarbeit basiert hauptsächlich auf dokumentenbasierten Anforderungslisten. Gleichwohl zeigt die Analyse der Problemstellungen, dass das Unternehmen mit einer hohen Anzahl von unterschiedlichen Auftrags- und Kleinserienfertigungsprojekten muss und beispielsweise sie ungenaue Vorhersagbarkeit von Terminen der Fertigstellung ein Problem darstellt.

4.4.3 Entwicklungsprozessanalyse

Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Grobanalyse Nutzenpotentiale wird der Entwicklungsprozess mit Hilfe der Methode OMEGA (Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse) untersucht [GP14, S. 254ff.]. Die zwischen 1 und 3 bewerteten Aspekte gelten als Schwachstellen bzw. Verbesserungspotentiale. Diese werden in dieser Analysestufe detailliert betrachtet und im Entwicklungsprozess lokalisiert. Ziel sind konkrete und verortete Schwachstellen bzw. Verbesserungspotentiale im bestehenden Entwicklungsprozess des Unternehmens, die mit Hilfe von Ansätzen des SE adressiert werden sollen.

Die Spezifikation von Prozessen ermöglicht es, komplexe Geschäfts- bzw. Leistungserstellungsprozesse in einer standardisierten Form abzubilden und auf die für den Anwendungsbereich wesentlichen Inhalte zu konzentrieren. Selektive Wahrnehmungen von einzelnen Personen werden vermieden. Die Prozessmodellierung ermöglicht die Bildung von Modellen der Ablauforganisation sowie die anschauliche Darstellung und Analyse. Es wird deutlich, welche Prozesse von wem in welcher Reihenfolge durchlaufen werden und wann welche Informationen anhand welcher Dokumente ausgetauscht werden. Dies bildet die Grundlage, um die interdisziplinäre Zusammenarbeit in der Produktentstehung

zu verstehen und Schwachstellen bzw. Verbesserungspotentiale im Sinne des Systems Engineering zu identifizieren und im Prozess anschaulich zu lokalisieren.

Für die Modellierung von Geschäftsprozessen eignen sich verschiedene Ansätze (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 [GP14, S. 254ff.], [Fah95]. OMEGA ermöglicht eine vollständige Modellierung einer Ablauforganisation und zeichnet sich durch eine einfache und prägnante Visualisierung als Instrument zur anschaulichen Analyse und Planung des Produktentwicklungsprozesses aus [GP14, S. 254]. Bild 4-23 zeigt die Konstrukte der Methode OMEGA.

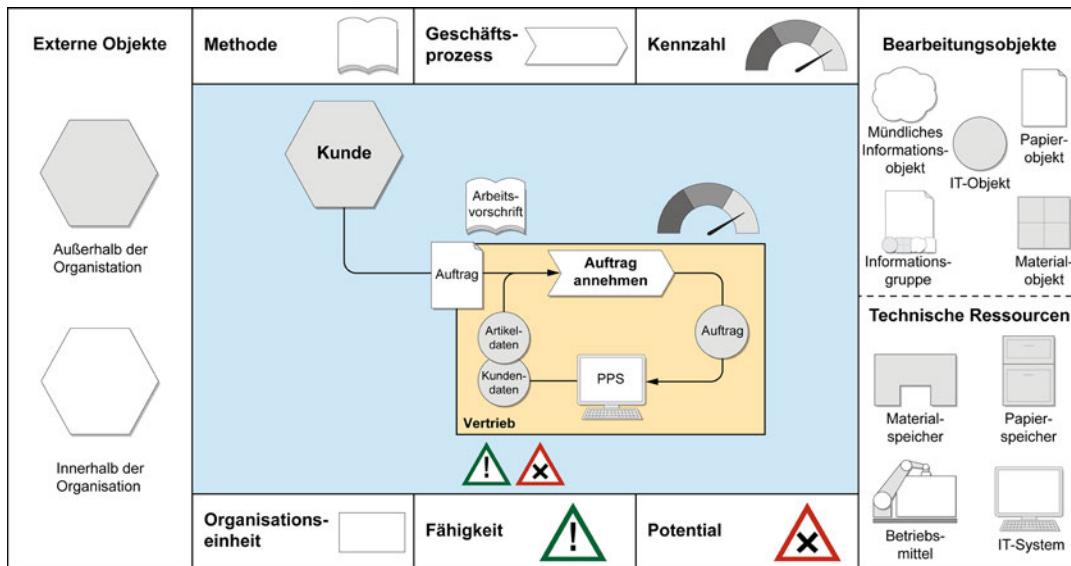


Bild 4-23: Überblick über die Konstrukte der Methode OMEGA nach [GP14, S. 254]

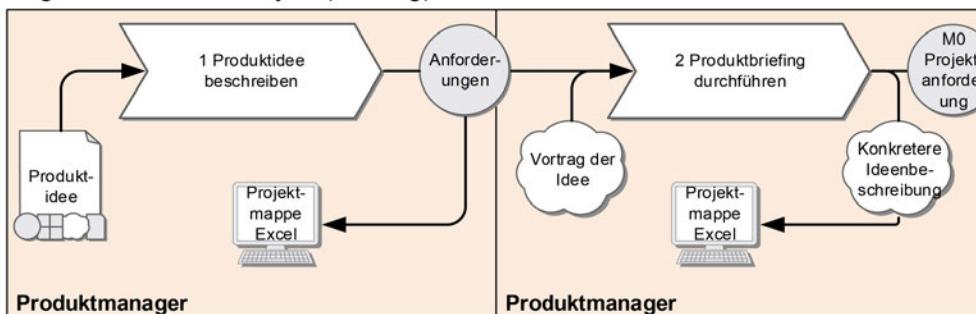
Die Prozessschritte werden über Eingangs- und Ausgangsgrößen (Bearbeitungsobjekte), Methoden, IT System sowie die ausführende Organisationseinheit konkretisiert. Im Rahmen der Systematik erfüllt die Methode OMEGA drei Aufgaben, welche nachfolgend beschrieben werden.

- **Abilden des aktuellen Entwicklungsprozesses** und bei allen beteiligten Fachexperten das Verständnis über die Zusammenarbeit fördern, indem die Abläufe und Wechselwirkungen veranschaulicht werden.
- **Diskussionsgrundlage zur Analyse** der interdisziplinären Produktentwicklung in einem fachbereichsübergreifenden Entwicklungsteam. Auf diese Weise sollen konkrete Verbesserungspotentiale und Schwachstellen identifiziert und im Entwicklungsprozess verortet werden z.B., wenn Informationen nicht rechtzeitig weitergegeben werden oder keine interdisziplinären Abstimmungen im Prozess verankert sind. Hierzu werden die Verbesserungspotentiale mit Hilfe eines roten Warndreiecks am Prozess gekennzeichnet und beschrieben.

- Darüber hinaus dient die Prozessspezifikation als **Grundlage für die Neugestaltung des Entwicklungsprozesses** und kann über die Bedarfsanalyse hinaus zur Definition eines Soll-Prozesses genutzt werden. Prozesse, Methoden und Rollen werden so direkt in den Gesamtgeschäftsprozess eingebettet.

Bild 4-24 zeigt beispielhaft einen mit OMEGA modellierten Prozess (*Produktidee beschreiben* und *Produktbriefing durchführen*), die Prozessaufbereitung und die Verortung von Verbesserungspotentialen.

Ergebnis Prozessanalyse (Auszug):



Produktidee/ Kundenwunsch wird nicht klar genug geschildert, eine detaillierte Beschreibung der Anwendung und des Umfelds fehlt
(keine ausreichende Vorlage vorhanden, nur Freitextfeld)

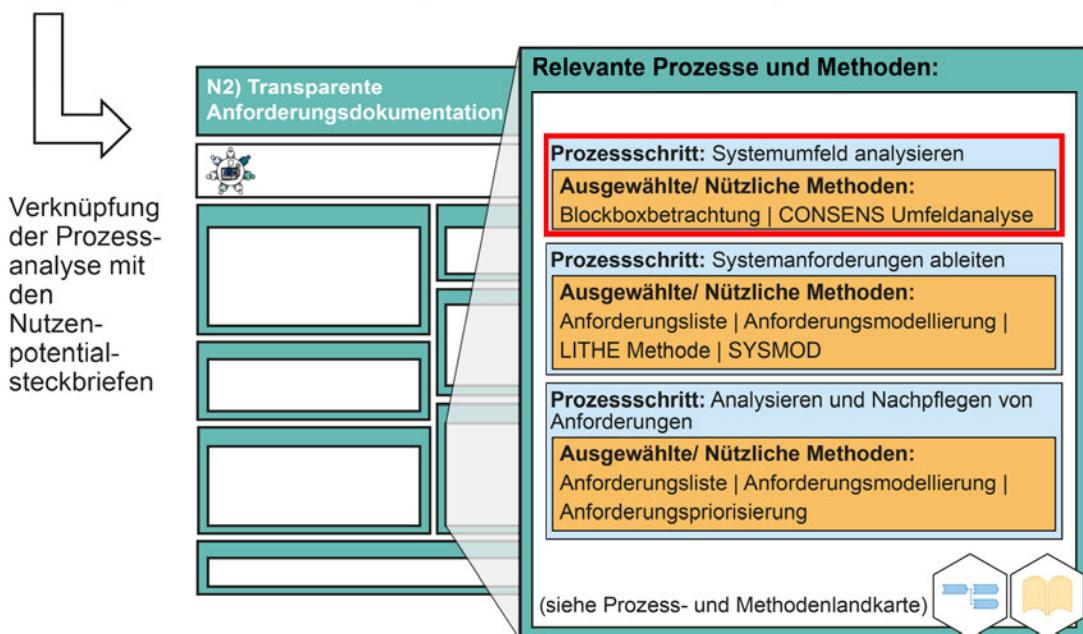


Bild 4-24: Auszug aus dem Ergebnis einer Prozessanalyse inkl. Verbesserungspotential sowie beispielhalte Verknüpfung mit den Nutzenpotentialen

Im gezeigten **Beispiel** hat die Entwicklungsprozessanalyse ergeben, dass es ein erhebliches Verbesserungspotential in der Kommunikation und Darstellung einer Produktidee und dem damit verbundenen Kundenwunsch bis hin zur Definition der zugehörigen Projektanforderungen gibt. Die Beschreibung der Anwendungsszenarien eines neuen Produktes sowie das Systemumfeld werden nicht systematisch erarbeitet und dokumentiert.

Die hinter dem Verbesserungspotentiale verborgene Problemstellung der Analyse und Definition von Anforderungen wird durch das Nutzenpotential *transparente Anforderungsdokumentation (N2)* adressiert. Die im Nutzenpotentialsteckbrief hinterlegten Nutzenpotentialiste unterstützt die Verknüpfung der Problemstellung mit dem Nutzenpotential. Die hinterlegten relevanten Prozesse und Methoden liefern Lösungsansätze. Diese sind im Werkzeugkoffer Systems Engineering strukturiert aufbereitet (vgl. Abschnitt 4.5). Beispielhaft kann der Prozessschritt *Systemumfeld analysieren* mit der Methode *CONSENS Umfeldmodellierung* im Prozess ergänzt und als Grundlage für die Soll-Prozessgestaltung dienen.

4.5 Werkzeugkoffer Systems Engineering

Der Werkzeugkoffer SE stellt Ansätze des Systems Engineering zielgruppengerecht für mittelständische Unternehmen im Maschinenbau sowie verwandter Branchen bereit. Hierzu enthält der Werkzeugkoffer drei wesentliche Elemente: **Prozessschritte, Methoden und Rollen**. Prozessschritte beschreiben relevante Tätigkeiten im Systems Engineering (*Was ist zu tun?*) (Abschnitt 4.5.1). Methoden beschreiben ein planmäßiges Vorgehen innerhalb eines oder mehrerer Prozessschritte (*Wie ist es zu tun?*) (Abschnitt 4.5.2). Rollen definieren die Zuordnung von Verantwortlichkeiten für die Tätigkeiten im Systems Engineering (*Wer tut es?*) (Abschnitt 4.5.3). Eine **Prozess- und Methodenlandkarte** verknüpft einzelne Prozessschritte mit nützlichen Methoden (Abschnitt 4.5.4). Die Methoden sind in Steckbriefen einheitlich und leichtverständlich aufbereitet, dies stellt die einfache Orientierung und Auswahl geeigneter Methoden sicher. Die Methoden- und Prozesslandkarte resultiert aus den in Abschnitt 4.2.4 erarbeiteten Nutzenpotentialen Systems Engineering. Sie bietet eine transparente Verknüpfung zwischen Nutzenpotentialen und relevanten Prozessen und Methoden zur Erschließung der Nutzenpotentiale.

4.5.1 Prozessschritte

Zur Erschließung der Nutzenpotentiale Systems Engineering ist es erforderlich bestimmte Prozessschritte im Produktentstehungsprozess umzusetzen. Unter Prozessschritten werden Entwicklungsaktivitäten zur Erbringung eines Ergebnisses oder der Veränderung eines Objekts (Transformation) verstanden. Eine Aktivität ist durch ein definiertes Eingangsobjekt und ein definiertes Ausgangsobjekt charakterisiert. Die relevanten Prozessschritte im Systems Engineering werden in unterschiedlichen Quellen (z.B. ISO/IEC 15288 [INC15], dem Sonderforschungsbereich 614 [GSR14]) in unterschiedlicher Ausprägung, Granularität und Fokussierung definiert. Der Werkzeugkoffer SE stellt daher zielgruppengerecht relevante Prozessschritte im Kontext der Nutzenpotentiale SE bereit.

Bei den Prozessschritten handelt es sich um Tätigkeiten, die aus der Analyse der Vorgehensweisen bereits durchgeführter Transferprojekte identifiziert wurden (vgl. Abschnitt 4.2.4). Die durchgeführten Vorgehensweisen wurden um Prozessschritte aus Referenzprozessen aus der VDI-Richtlinie 2206 [VDI2006], dem Sonderforschungsbereich 614

[GSR14], dem SE Handbook (ISO/IEC 15288) [INC15] ergänzt und strukturiert. Hierzu wurden die verschiedenen Referenzprozesse miteinander verglichen und hinsichtlich der Granularität synchronisiert. Die Prozessschritte folgen einer logischen Reihenfolge und lassen sich grob an den Phasen des V-Modells der VDI-Richtlinie 2206 verorten. Die einzelnen Prozessschritte und ihre logische Reihenfolge lassen sich mit der Modellierungstechnik OMEGA darstellen (vgl. Abschnitt 4.4.3). Im Werkzeugkoffer werden 46 Prozessschritte bereitgestellt.

4.5.2 Methoden

Methoden werden innerhalb des Vorgehens im Produktentstehungsprozess eingesetzt, um einzelne Prozessschritte zielgerichtet und effizient durchzuführen (vgl. Abschnitt 2.1). Sie beschreiben ein regelbasiertes und planmäßiges Vorgehen um ein gewisses Ziel zu erreichen. Im Themenfeld Systems Engineering steht dem Anwender eine Vielzahl von Methoden bereit, die nur schwer zu überblicken ist (vgl. Abschnitt 2.5.1). Die Analyse der Transferprojekte bestätigt die Fülle an verschiedenen Methoden, die in Kontext Systems Engineering unterstützen (vgl. Abschnitt 4.2.4). Um dennoch eine gezielte Anwendung und Auswahl von nützlichen Methoden zu ermöglichen, stellt der Werkzeugkoffer SE ausgewählte Methoden einheitlichen und zielgruppengerechten bereit. Hierzu werden die Methoden in Methodensteckbriefen beschrieben.

Die Vielfalt möglicher Kriterien für die Beschreibung und Charakterisierung von Methoden wurde in Kapitel 3.2.1 deutlich. Die Methodenbeschreibung soll sich an den Anforderungen der Zielgruppe des Maschinenbaus mit wenig SE Expertise orientieren, z.B. übersichtliche Darstellung über wesentliche Aspekte einer Methode und Hinweise über den notwendigen Aufwand. Bild 4-25 zeigt die Struktur eines Methodensteckbriefs inkl. der definierten Beschreibungskriterien und ihrer Erläuterung. Die Steckbriefe geben u.a. einen Überblick zur **Zielsetzung** der Methode, eine **Kurzbeschreibung** zur Durchführung der Methode sowie Hinweise über den erforderlichen **Initial- und Pflegeaufwand**. Als weiteres Hilfsmittel stehen **Hilfsdokumente**, wie Vorlagen und Unterlagen mit beispielhaften Anwendungen zur Verfügung. Sie erleichtern einen Methodeneinsatz. Den Methoden sind Rollenprofile zugeordnet, welche die einzelnen Rollen und ihre Aufgaben innerhalb eines Systems Engineering Teams skizzieren. Ein Beispiel eines Methodensteckbriefs ist anhand der Methode System Footprint in Bild 4-26 dargestellt. Aufbauend auf der dargestellten Beschreibungsform stehen 75 Methodensteckbriefe zur Verfügung.

Name der Methode	
Zielsetzung	Initialaufwand Pflegeaufwand
Prägnante Beschreibung des Anwendungszwecks, -ziels	 gering  hoch
Kurzbeschreibung	Wer führt die Methode durch? Welches Know-How wird benötigt? Rolle im SE Team, die diese Methoden anwendet
Knappe, prägnante Übersicht über die Inhalte der Methode; enthält wesentliche Details zur Vorgehensweise, Voraussetzungen und Wirkung	
Vorteile	Einordnung in den Systementwicklungsprozess
Vorteile, die die Anwendung der Methode mit sich bringt	Verortung der Methoden im Systementwicklungsprozess anhand des V-Modells der VDI-Richtlinie 2206
Nachteile	
Nachteile der Methode im Sinne der Zielgruppe	
Literatur/Verweis/Norm	Werkzeuge
Quellen mit weiterführenden Informationen (Bücher, Normen, Weblinks etc.)	Unterstützende Werkzeuge oder Hilfsmittel (Formblätter, Checklisten etc.)
Verwandte Methoden	Ergänzend zur textuellen Beschreibung: visuelle Darstellung der Methodeneinbettung von Prozessschritten mittels OMEGA-Modellierung
Verknüpfung zu anderen Methoden	
Hilfsdokumente zur Methode	
 Phasen-/Meilensteine  Methodenbeschreibung  Beispieleinsatz der Methode  Vorlage zum Methodeneinsatz	

Bild 4-25: Methodensteckbrief Aufbau und Erläuterung der Beschreibungselemente

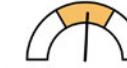
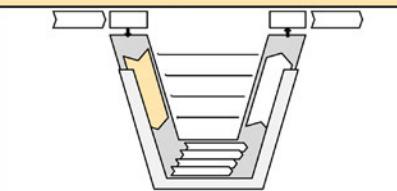
System Footprint	
Zielsetzung	Initialaufwand Pflegeaufwand
Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt aus Sicht des Produktmanagements.	 gering  hoch
Kurzbeschreibung	Wer führt die Methode durch? Welches Know-How wird benötigt? Customer Interface inkl Entwicklungskersteam
<ul style="list-style-type: none"> Der System Footprint beschreibt die Produktanforderungen für das System. Der System Footprint liegt auf der gleichen Ebene wie andere Spezifikationen der Kundenanforderungen und dient somit als technisches Lastenheft. Es dient als Eingangsinformation für die Spezifikation der Systemanforderungen in der Entwicklung. Es handelt sich hierbei um eine Workshoptechnik, die auf Basis einer Vorlage folgende Aspekte erfassst: Benutzer des Systems, Hauptnutzungsfälle, Haupt-Lieferreihen, Nutzenversprechen, Haupt-Komponenten, Haupt-Funktionen, Schnittstellen, technische Einschränkungen, Stakeholder Einschränkungen, die technologischen Chancen, die technologischen Risiken. 	
Vorteile	Einordnung in den Systementwicklungsprozess
<ul style="list-style-type: none"> Einfache intuitive Vorgehensweise Einfache Vorlage Keine besonderen Werkzeuge notwendig 	
Nachteile	
<ul style="list-style-type: none"> Betrachtungstiefe ist schwierig zu vereinheitlichen 	
Literatur/Verweis/Norm	Werkzeuge
<ul style="list-style-type: none"> Pfingsten, M.: http://zukunftsarchitekten-podcast.de/2014/01/za077-the-systems-footprint-3-0/ http://www.system-footprint.de/System_Footprint.html 	<ul style="list-style-type: none"> Workshop-Karten Vorlage
Verwandte Methoden	
Hilfsdokumente zur Methode	
 Phasen-/Meilensteine  Methodenbeschreibung  Beispieleinsatz der Methode  Vorlage zum Methodeneinsatz	

Bild 4-26: Methodensteckbrief System Footprint

In den Methodensteckbriefen werden zusätzlich verwandte Methoden aufgeführt. Ergänzend betrachtet die Methodenmatrix (Bild 4-27) den Zusammenhang zwischen allen bereitgestellten Methoden, um eine konsistente Auswahl zu unterstützen. In der Matrix werden die einzelnen Methoden jeweils gegenübergestellt. Je Methodenpaar wird bewertet, in welchem Zusammenhang die Methoden zueinanderstehen. Die Bewertung erfolgt anhand vier Ausprägungen (X= kein direkter Zusammenhang, E= die Methode Mi (Zeile) ergänzt die Methode Mj (Spalte), Ä= die Methode Mi (Zeile) ist ähnlich zu der Methode Mj (Spalte), V= die Methode Mi (Zeile) ist Voraussetzung zur Anwendung der Methode Mj (Spalte)).

Paarweiser Vergleich der Methoden „In welchem Zusammenhang steht die Methode i (Zeile) mit der Methode j (Spalte)?“		Methoden	CONSENS Wirkstruktur	Analyse der Änderungssen.	Analyse der Herstellkost.	Analyse der Robustheit	Analyse der Zuverlässigkeit	Analyse des dyn. Verhaltens
Methoden	Nr.		MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6
CONSENS Wirkstruktur	MO1		V	V	V	V	V	
Analyse der Änderungssensitivität	MO2	X		X	X	X	X	
Analyse der Herstellkosten	MO3	X	X		X	X	X	
Analyse der Robustheit	MO4	X	X	X		X	X	
Analyse der Zuverlässigkeit	MO5	X	X	X	X		X	
Analyse des dynamischen Verhaltens	MO6	X	X	X	X	X		
Anforderungspriorisierung	MO7	X	X	X	X	X	X	
	MO8							

Bild 4-27: Methodenmatrix – Methodenzusammenhänge mit Hilfe einer paarweisen Gegenüberstellung

4.5.3 Rollen

Wie aus der Problemanalyse hervorgeht, führen neue Prozesse und Methoden des Systems Engineering dazu, dass auch neue Rollen in den Unternehmen erforderlich sind. Aufgaben- und Verantwortungsbereiche verändern sich oder es kommen neue hinzu. Der Werkzeugkoffer SE stellt daher zwölf Rollen inkl. einer Beschreibung ihrer Aufgabenprofile bereit. Sie sind über die Methodensteckbriefe mit den Methoden und Prozessschritten verknüpft. Die Rollenprofile entsprechen den von MÖHRINGER definierten Rollen eines Systems Engineering Teams im Maschinen- und Anlagenbau. MÖHRINGER hat in Anlehnung an SHEARD (vgl. 2.5.2) zwölf Rollen spezifiziert, die auf die Charakteristik von mittelständischen Unternehmen im Maschinenbau ausgelegt sind [She96], [Möh12]. Tabelle 4-1 stellt die Rollen im Systems Engineering im Maschinenbau nach MÖHRINGER in Anlehnung an SHEARD bereit [Möh12], [She96].

Tabelle 4-1: Rollen im Systems Engineering im Maschinenbau nach Möhringer in Anlehnung nach SHEARD [Möh12], [She96]

Rollen nach MÖHRINGER/ SHEARD	Beschreibung	
Anforderungsmanagement	Aufgabe des Anforderungsmanagements ist es, die Kundenbedürfnisse in klar spezifizierte und beschriebene Anforderungen zu überführen. Dazu gehört auch das Verständnis aller externen Schnittstellen. Der Anforderungsmanager ist dafür verantwortlich, ggf. sich ändernde Anforderungen im Laufe des Projektes zu kommunizieren und deren Auswirkungen auf Teilsysteme und das Gesamtsystem zu verfolgen.	
Customer Interface/ Kundensicht	Die Kundensicht soll sicherstellen, dass die Kundenwünsche umgesetzt werden und Ausführungsdetails so kundenfreundlich wie möglich gestaltet werden. Dabei beinhaltet die Rolle nur das Erschaffen eines Endproduktes für den Kunden, und nicht den Marketingprozess des Geschäfts sowie dessen Organisation.	
Glue/Verbinder	Diese Rolle widmet sich insbesondere potentiellen Schnittstellenproblemen, da diese erfahrungsgemäß gehäuft auftreten. Abhängigkeiten und Unverträglichkeiten werden frühzeitig erkannt und gelöst. Er stellt sicher, dass Subsysteme der einzelnen Rollen sich nicht behindern.	
Informationsmanager	Information Management beinhaltet neben dem Daten- und Informationsmanagement auch das Konfigurationsmanagement. Mit zunehmend größer werdenden Informationssystemen nimmt auch diese Rolle einen wichtigeren Standpunkt ein, welcher die gesamten Informationen des Systems und des Betriebs vereint.	
Logistik und Betrieb	Diese Rolle kümmert sich um den späteren Betrieb und den Service des Systems. Die Sicht des späteren Anwenders hinsichtlich Bedienung und Wartung wird eingebracht, Bedienungs- und Schulungsanleitungen erstellt.	
Process Engineer	Diese Rolle kümmert sich um das Vorgehen im Systems Engineering, d.h. die Dokumentation, die Verfolgung und Verbesserung der Abläufe.	
Systemanalytiker	Systemanalytiker bestätigen, dass das System die Anforderungen erfüllt. Analysen betrachten typischerweise Gewicht, Leistung oder Durchsatz. In der Regel müssen komplexe Komponenten modelliert werden, um deren Funktionsweise und Schnittstellen zu verifizieren. Diese Modelle erzeugen darüber hinaus ein Verständnis für die Gestaltung der Nutzung des Systems.	
Systementwickler	In dieser Rolle setzt sich der SE mit dem Entwurf der Systemarchitektur auseinander. In diesem Zusammenhang konzipiert er Hauptkomponenten und stellt dessen Verfügbarkeit sicher. Darüber hinaus plant er die Systemintegration der Subsysteme. Für diese erstellt er detaillierte Anforderungen, die von den Fachdisziplinen zu erfüllen sind.	

Technisches Management	<p>Der Technische Leiter ist Teil des Program-Management und kümmert sich um technische Abläufe und Aufgaben innerhalb des Projekts.</p> <p>Zu den Aufgaben zählen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung der Kosten ▪ Einplanen der Ressourcen ▪ Kontaktpflege mit diversen Support Teams: dem Konfigurationsmanagement, der Computervernetzung oder dem Finanzwesen
Validierung/Verifizierung	<p>Aufgabe der Validierung/Verifikation ist, die Systemeigenschaften abzusichern. Hierzu werden Testverfahren und -routinen erstellt. Sie muss in der Lage sein, Ergebnisse in Echtzeit auszuwerten und auf Anomalien zu reagieren.</p>

4.5.4 Prozess- und Methodenlandkarte

Die Prozess- und Methodenlandkarte verknüpft die einzelnen Prozessschritte mit nützlichen Methoden. Sie basiert auf dem Prinzip eines morphologischen Kastens (Bild 4-28). Dieser enthält in den Zeilen **Prozessschritte** und in den Spalten diejenigen **Methoden** und Hilfsmittel, die einen Prozessschritt geeignet unterstützen. Der morphologische Kasten ermöglicht die unternehmensspezifische Auswahl eines Methodenbündels, das für ein Unternehmen zur Erschließung eines ausgewählten Nutzenpotentials im Kontext SE geeignet ist. Die Prozess- und Methodenlandkarte stellt den Zusammenhang zwischen Nutzenpotentialen, Prozessschritten und Methoden bereit.

Die Prozessschritte sind den Nutzenpotentialen SE zugeordnet. Innerhalb eines Nutzenpotentials sind die Prozessschritte einer logischen zeitlichen Reihenfolge nach angeordnet, die aber nicht streng sequenziell zu betrachten ist und nicht zwingend einzuhalten gilt.

Die Prozess- und Methodenlandkarte ist initial für alle sechs Nutzenpotentiale (vgl. Abschnitt 4.2) ausgeprägt und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie beinhaltet 46 unterschiedliche Prozessschritte und 75 Methoden. Einige Prozessschritte und Methoden sind nicht strikt einem Nutzenpotential zuzuordnen. Daher ergeben sich Mehrfachnennungen. Durch die einfache Strukturierung ist die Prozess- und Methodenlandkarte beliebig erweiterbar. Dies trägt dem stetig wachsenden Stand der Technik Rechnung. Die Erweiterung kann durch die Ergänzung einer Methode, das Hinzufügen von Prozessschritten oder die Erweiterung um ein neues Nutzenpotential erfolgen. Bild 4-28 zeigt einen Auszug der Prozess- und Methodenlandkarte, die im Anhang A1.5 vollständig abgebildet ist.

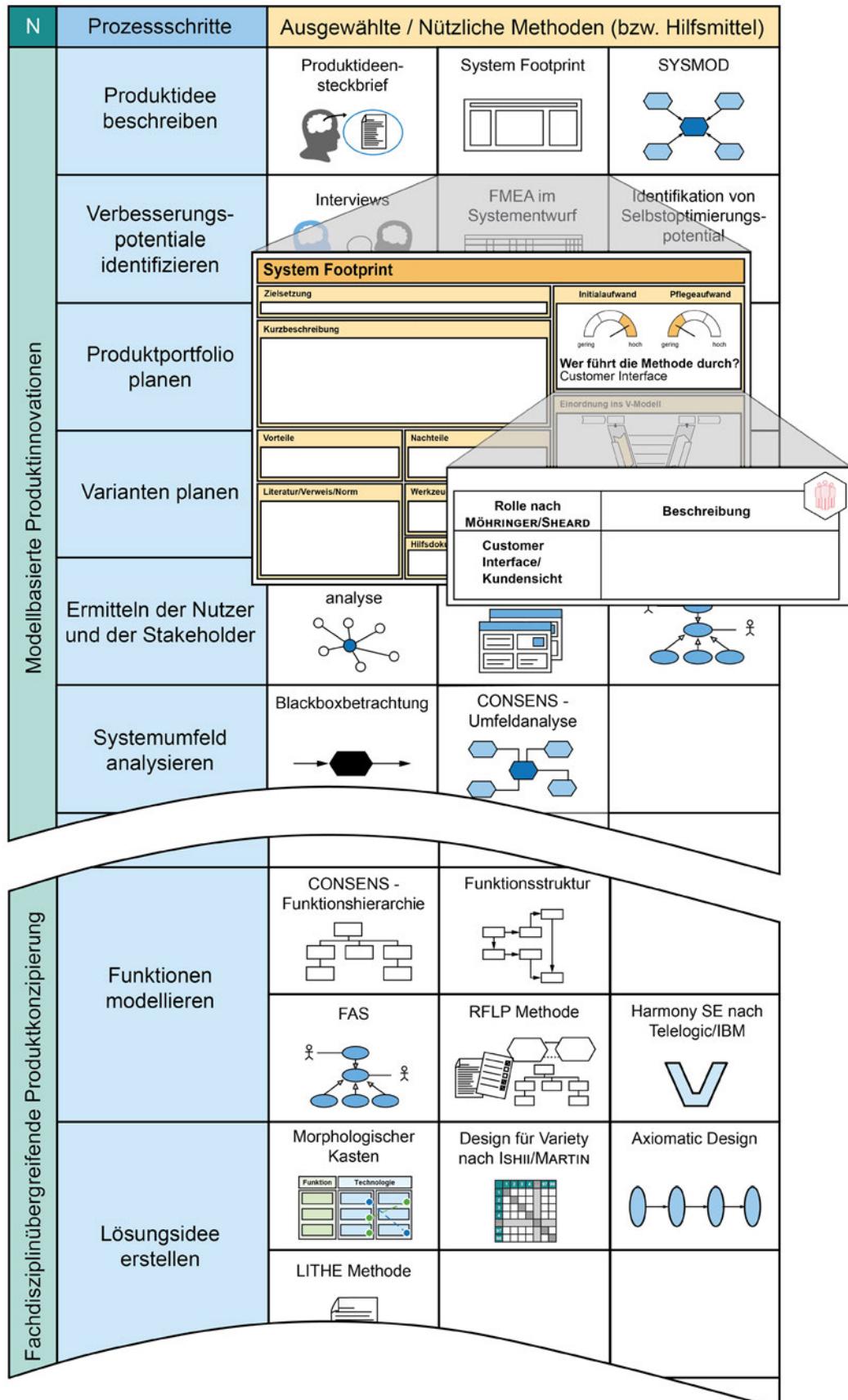


Bild 4-28: Prozess- und Methodenlandkarte inkl. Verknüpfung der Methodensteckbriefe sowie der Rollenprofile (Auszug)

5 Anwendung und Bewertung

In diesem Kapitel wird *die Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau*. Die einzelnen Bestandteile der Systematik kommen im Rahmen des Vorgehensmodells SE-Leitfaden zum Einsatz, daher erfolgt die Validierung gemäß den Phasen des Vorgehensmodells (vgl. Abschnitt 4.3). Die Validierung wird anhand eines mittelständischen Anbieters von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik in Abschnitt 5.1 durchgeführt. Abschließend werden in Abschnitt 5.2 die erarbeiteten und validierten Inhalte der Systematik anhand der Anforderungen aus der Problemanalyse (vgl. Abschnitt 2.7) bewertet.

5.1 Anwendung der Systematik am Beispiel eines Herstellers von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik

Die Validierung des in Abschnitt 4.3 vorgestellten Vorgehensmodells SE- Leitfaden erfolgt beispielhaft an dem Entwicklungsprozess eines mittelständischen Herstellers von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik (Jahresumsatz: ca. 70 Mio. €, Mitarbeiter: ca. 210 am Standort OWL und ca. 560 weltweit). Die Produktauswahl umfasst Systeme aus der Lineartechnik, Profil-Montagetechnik, Verbindungs- und Modultechnik. Das Leistungsspektrum erstreckt sich von der individuellen Beratung und Entwicklung bis hin zur Fertigung und Lieferung. Das Unternehmen bietet neben Kata-logartikeln und modifizierten Standards auch kundenspezifische Entwicklungen an. Im Bereich der Lineartechnik werden drei Anwendungsfälle unterschieden: (1) einfache und gelegentliche Positionieraufgaben (Breiten-, Längen-, Höhenverstellung), (2) Positionierungen mit kurzen Zykluszeiten, hohen Taktraten und einer hohen Wiederholungsgenauigkeit (Be- und Entladen, Palettieren, Pick & Place), (3) hohe Positioniergenauigkeit, gleichförmiger Bewegungsablauf und hohe Antriebssteifigkeit (numerisch gesteuerte Verfahraufgaben).

Die zunehmende Vernetzung und der steigende Elektronik- und Softwareanteil in den Produkten führen zu einer stetig wachsenden Systemkomplexität. Das Unternehmen verfügt bislang über wenig Erfahrung mit den Methoden und Werkzeugen des SE. Dennoch müssen auch sie über SE Instrumente verfügen, um die steigende Komplexität ihrer Systeme zu beherrschen. Das Unternehmen hat diese Herausforderung für sich erkannt und möchte neue Methoden und Werkzeuge in die bestehenden Abläufe integrieren. Im Fokus steht hierbei die Neugestaltung der disziplinübergreifenden Zusammenarbeit im Systementwurf.

5.1.1 Phase 1: Bedarfsanalyse Systems Engineering

Im Rahmen der ersten Phase wird zunächst das Team für die Ableitung einer bedarfsgerechten Systems Engineering Leitfaden zusammengestellt. Dieses besteht im Kern aus der Entwicklungsleitung sowie Experten der Fachbereiche Produktmanagement, Konstruktion, Elektronik- und Softwareentwicklung. Die Zusammenstellung bündelt Prozesswissen über die Vorgehensweisen in den einzelnen Fachbereichen wie Mechanik, Elektrotechnik und Softwaretechnik sowie deren Zusammenarbeit und das Projektmanagement. Des Weiteren verfügen die Experten über Produktwissen (z.B. mechanische Komponenten, Software, Schnittstellen und Produktvarianten) über das gesamte Produktpotential. In der Bedarfsanalyse werden weitere Experten aus den Fachbereichen Vertrieb, Service, Arbeitsvorbereitung und Fertigung hinzugezogen.

Für die Bedarfsanalyse erfolgt zunächst die **Erhebung der Unternehmensrahmenbedingungen** in Form eines Interviews mit der Entwicklungsleitung. Der **Erhebungsbogen** unterstützt die strukturierte Aufnahme der Unternehmens-, Produkt- und Projektmerkmale des Herstellers von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungs-technik sowie die Erfassung von Problemstellungen, die durch das Systems Engineering adressiert werden. Bild 5-1 zeigt den ausgefüllten Erhebungsbogen für das Anwendungsunternehmen. Das Unternehmen verfügt mit ca. 15 Entwicklern über eine mittlere *Größe der Entwicklungsabteilung*, die in einem Gebäude sitzt (*Entwicklungsstandorte: lokal*) und dessen *Kernmärkte überregional* sind. Das Unternehmen hat eine eigene Entwicklung und Fertigung. Teile der Fertigung werden mit Hilfe von Partnerunternehmen im europäischen Ausland ausgelagert. Das Produktpotential ist sehr facettenreich. Es reicht von rein mechanischen Komponenten bis hin zu mechatronischen *vernetzten Systemen*, z.B. *vertikal und horizontal verfahrbare Systeme mit hoher Positioniergenauigkeit für numerisch gesteuerte Verfahraufgaben*. Es werden sowohl Einzelfertigungen als auch Kleinserien sowie Varianten angeboten. Die Komplexität in Bezug auf die Interdisziplinarität eines Systems variiert entsprechend dem breiten Produktpotential. Im Schnitt werden vier *Entwicklungsprojekte parallel* bearbeitet, dabei sind verschiedene *Projekttypen* zu finden: *komplexe Neuentwicklungen* als auch *einfache kundenindividuelle oder generelle Anpassungsentwicklungen*.

Erhebungsbogen		aktuelle Ausprägung	zukünftige Ausprägungen
Unternehmensmerkmale	Unternehmen: Hersteller von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik		
	Datum: September 2016		
	Merkmale	Ausprägungen	Ausprägungen
	Größe der Entwicklungsabteilung	klein <10 mittel (10-50) groß >50	klein <10 mittel (10-50) groß >50
	Entwicklungsstandorte	lokal national international	lokal national international
	Kernmärkte	regional überregional global	regional überregional global
	Marktsegment	Preisführerschaft Differenzierung Technologie-/Innovationsführerschaft Qualitätsführer	Preisführerschaft Differenzierung Technologie-/Innovationsführerschaft Qualitätsführer
	Zertifizierungsaufwand/Nachweispflicht	gering mittel hoch	gering mittel hoch
	Wertschöpfungstyp	Vergabe von Entwicklungsaufgaben Eigenentw. u. Vergabe d. Fertigung Eig. Entwicklung und Fertigung	Vergabe von Entwicklungsaufgaben Eigenentw. u. Vergabe d. Fertigung Eig. Entwicklung und Fertigung
	Produktportfolio	Individualstrategie Modulstrategie Plattformstrategie	Individualstrategie Modulstrategie Plattformstrategie
Produktmerkmale	Losgröße	Serienfertigung Variantenfertigung Einzelfertigung	Serienfertigung Variantenfertigung Einzelfertigung
	Produktkomplexität	gering mittel hoch	gering mittel hoch
	Vernetzung des Produkts	eigenständiges System Vernetztes System System of System	eigenständiges System Vernetztes System System of System
	Wie viele Projekte laufen parallel?	1-5 6-15 mehr als 15	1-5 6-15 mehr als 15
	Dauer des Projekts	< 3 Monate 3 bis 12 Monate > 12 Monate	< 3 Monate 3 bis 12 Monate > 12 Monate
Projektmerkmale	Verschiedene Entwicklungsdisziplinen	nein ja (Mechanik,Elektronik,Software) ja neue	nein ja (Mechanik,Elektronik,Software) ja neue
	Projekttyp	Neuentwicklung Anpassungsentwicklung Variantenentwicklung	Neuentwicklung Anpassungsentwicklung Variantenentwicklung

Bild 5-1: Ausgefüllter Erhebungsbogen für das Beispielunternehmen

Im Zuge der Erhebung kann ebenfalls eine Produkt- und Projekttyp-Priorisierung des SE-Leitfadens definiert werden. Im Fokus der weiteren Betrachtung steht die komplexe Neuentwicklung von mechatronisch vernetzten Systemen. Ergebnis der Erhebung ist zum einen, dass die verschiedenen Merkmale, die sich auf die Auswahl und Relevanz geeigneter SE Prozesse und Methoden auswirkt, schrittweise besprochen und eingeordnet werden. Zum anderen können über die **Zusammenhangsmatrix von Merkmalsausprägungen und Nutzenpotentialen** (vgl. Abschnitt 4.2.4) erste Rückschlüsse über relevante Nutzenpotentiale getroffen werden. Bild 5-2 zeigt, dass die folgenden Nutzenpotentiale *Modellbasierte Produktinnovationen (N1)*, *transparente Anforderungsdokumentation (N2)*, *fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung (N3)*, *frühzeitige Analysen (N4)* aus der Ausprägung *Differenzierung* und *Technologie-/Innovationsführerschaft* bei der weiteren Analyse zu beachten sind.

		Zusammenhangsmatrix Ausprägungen und Nutzenpotentiale						
		Nutzenpotentiale	M. Produktinnovationen	T. Anforderungsdokumentation	F. Produktkonzipierung	F. Analysen	F. Projektmanagement	U. Zusammenarbeit
		Nr.	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Merkmale		A01	0	0	0	0	0	0
Unternehmensmerkmale	Kernmarkte	A02	0	1	1	1	1	0
	Marktsegment	D01	0	1	0	1	0	0
Zertifizierungs-aufwand	D02	1	1	1	1	0	0	0
	D03	1	1	1	1	0	0	0
	D04	0	1	1	0	0	0	0
Zertifizierungs-aufwand	E01	0	0	0	0	0	0	0
	E02	0	1	1	1	0	0	0
	E03	1	1	1	1	0	0	0

Bild 5-2: Relevante Nutzenpotentiale aus der Differenzierungsstrategie bzw. Technologie und Innovationsführerschaft

Anschließend werden mit Hilfe der **Grobanalyse Nutzenpotentiale** (vgl. Abschnitt 4.4.2) die interdisziplinäre Produktentwicklung untersucht und Schwachstellen identifiziert. Dies erfolgt im Wechselspiel zur **Entwicklungsprozessmodellierung und -analyse** mit der Methode **OMEGA** (vgl. Abschnitt 4.4.3). In Form von Interviews werden die einzelnen Projektteam Mitglieder zu grundsätzlichen Problemstellungen und den einzelnen Nutzenpotentialen befragt. Dies erfolgt sowohl in Einzelgesprächen als auch in kleinen Gruppen. Schritt für Schritt werden die einzelnen Fragen, die der Interviewleitfaden der Grobanalyse Nutzenpotentiale bereitstellt, erörtert und die Antworten dokumentiert. Der beantwortete Interviewleitfaden Problemstellungen sowie für das Nutzenpotential *fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung (N3)* wird in Bild 5-5 dargestellt. Produktkonzepte werden im Unternehmen *nicht interdisziplinär erarbeitet* und entspre-

chend nicht dokumentiert. Bild 5-5 zeigt auch, dass es bezüglich der Schnittstellendokumentation unterschiedliche Wahrnehmungen im Projektteam gibt. Abweichende Antworten müssen im Gesamtteam besprochen und geklärt werden. Im untersuchten Unternehmen herrscht eine Abweichung zwischen der Leitung und dem Entwicklungsteam. Grund ist, dass die Schnittstellendokumentation im Pflichtenheft zwar vorgesehen, aber für die praktische Arbeit im Projekt unzureichend ist.

Problemstellungen	Fragen	Ja	Nein
Stoßrichtung 1	Müssen Sie mit einer hohen Anzahl von unterschiedlichen Auftrags- und Kleinserienfertigungsprojekten umgehen?	X	
	Ist Ihr Entwicklungsprozess nicht definiert?		X
	Kommen zeitraubende Iterationsschleifen häufig in Ihren Projekten vor?	X	
	Nutzen Sie überwiegend teure und zeitraubende physikalische Prototypen bei der Optimierung der Systeme?	X	
	Ist die ungenaue Vorhersagbarkeit von Terminen der Fertigstellung ein Problem für Sie?	X	
	Verfügen Sie über heterogene Kundenstrukturen?	X	
	Bieten Sie komplexe kundenindividuelle Entwicklungsaufträge (Sonderanfertigungen mit Losgröße 1) an?		X
	Haben Sie Probleme im Umgang mit komplexen Prüfzusammenhängen?		X
	Benötigen Sie frühzeitige Testspezifikationen?		X
	Haben Sie Schwierigkeiten die komplexen Anforderungen des Kunden zu verstehen?	X	
Definition, Analyse und Beherrschung von Anforderungen	Bereitet Ihnen die Dokumentation der Kundenanforderungen Probleme?	X	
	Bereitet Ihnen die systematische Aufnahme von Anforderungen Probleme?	X	
	Müssen Sie mit häufigen Anforderungsänderungen umgehen?	X	
	Haben Sie Schwierigkeiten in der Handhabung von Änderungsauswirkungen?	X	
Verstehen von Änderungsauswirkungen	Kommt es häufig zu Fehleinschätzungen in der Planung sowie Fehler in der Entwicklung oder in der Umsetzung von Änderungen?		X
	Kommt es häufig zu Fehleinschätzungen in der Bewertung von Änderungen?	X	
	Kommt es in Ihren Projekten häufig zu kontinuierlichen Anforderungsänderungen (z.B. durch den Kunden)?	X	
Variantenvielfalt beherrschen	Bereitet Ihnen eine fehlende Nachverfolgbarkeit der Entwicklung (Traceability) Probleme?	X	
	Verfügen Sie über eine geringe Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit der Teilkomponenten?		X

X = Einschätzung des Unternehmens (Interviewergebnisse)

Bild 5-3: Ausgefüllter Interviewleitfaden Problemstellungen (1)

Problemstellungen	Fragen	Ja	Nein
Stoßrichtung 2 Weiter-entwicklung von Marktleistungen	Möchten Sie bestehende Produkte/ Fertigungsprozesse verbessern/ effizienter gestalten?	X	
	Durchlaufen Ihre Produkte einen Wandel von mechanischen Produkten zu mechatronischen Produkten?	X	
	Möchten Sie Einsatzszenarien für neue Produktideen analysieren?	X	
	Möchten Sie ihre Produkte systematisch weiterentwickeln?	X	
	Durchlaufen oder planen Sie einen Wandel vom Produktanbieter zum Systemanbieter oder zum Lösungsanbieter?	X	
	Durchlaufen oder planen Sie einen Wandel vom Produktanbieter zum Anbieter von Marktleistungen (Produkt und Service)?	X	
	Ist Ihnen ein möglichst schneller Markteintritt wichtig (time to market)?	X	
	Möchten Sie neue Technologien nutzen?	X	
	Möchten Sie neue, Ihnen unbekannte Märkte erschließen?	X	
	Möchten Sie neue Geschäftsmodelle umsetzen?	X	
Stoßrichtung 3 Zunehmende Inter-disziplinarität	Hat die Zusammenarbeit in interdisziplinären Entwicklungsteams eine hohe Bedeutung in Ihren Projekten?	X	
	Müssen bei Ihnen neuen Fachexperten müssen mit etablierten Experten zusammenarbeiten?	X	
	Lässt sich ein Wandel Ihrer Entwicklungsteams abzeichnen?	X	
	Verzeichnen Sie eine steigende Vernetzung Ihrer Produkte?	X	
	Bereitet Ihnen die Handhabung der vielfältigen disziplin-, tool- und stakeholderübergreifenden Abhängigkeiten Schwierigkeiten?	X	
	Bereitet Ihnen die Systemintegration Probleme?	X	
	Ist eine enge Abstimmung zwischen der Kundensicht (Kunde/ Vertrieb) und Entwicklung von entscheidender Bedeutung?	X	
Unstrukturierte Kommunikation und Kooperation	Arbeiten Sie mit externen Zulieferer bzw. Dienstleister zusammen?	X	

X = Einschätzung des Unternehmens (Interviewergebnisse)

Bild 5-4: Ausgefüllter Interviewleitfaden Problemstellungen (2)

N3) Fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung		1	2	3	4
	Produktkonzepte von Beginn an mit allen beteiligten Fachexperten erarbeiten und dokumentieren. Schnittstellen transparent machen und Wechselwirkungen frühzeitig berücksichtigen.				
Erarbeiten Sie Ihre Produktkonzepte von Beginn an interdisziplinär?	X X				
Analysieren, konzipieren und dokumentieren Sie Anforderungen, Restriktionen und Wechselspiele, sodass ein optimales Zusammenspiel von Produkt und Serviceleistung durch eine integrative Entwicklung sichergestellt wird?	X X				
Entwickeln sie das Produktkonzept und das Produktionssystem integrativ um frühzeitig Restriktionen und Wechselwirkungen zu erkennen?	X X				
Nutzen Sie Ihr Lösungswissen um die Projektierung neuer Produkte effizient zu gestalten?		X X			
Erkennen und definieren Sie Schnittstellen im Produkt eindeutig und werden diese transparent dokumentiert und kommuniziert?	X			X	
Wird die Variantenplanung schon frühzeitig bei der Konzeptentwicklung berücksichtigt und werden zusätzlich Chancen sowie Restriktionen aus versch. Fachbereichen erkannt und ebenfalls berücksichtigt?		X X			
Werden Ihre Produkte systematisch (mechatronisch) modularisiert? Beziehungsweise gibt es eine mechatronische Systembaukastenkonzipierung?	X X				
Wird ein Übergang in die fachabteilungsspezifische Ausarbeitung geschaffen?	X X				

X= Antworten Entwickler

X= Antworten Entwicklungsleitung

- (1) Nein, das machen wir nicht
 (2) Wir machen das nur selten

- (3) Wir machen das in jedem Projekt unterschiedlich
 (4) Wir machen das standardisiert in allen Projekten

Bild 5-5: Ausgefüllter Interviewleitfaden für das Nutzenpotential fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung (N3)

Ergebnis der Befragung sind Schwachstellen bzw. Verbesserungspotentiale für die Nutzenpotentiale *transparente Anforderungsdokumentation* (N2), *fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung* (N3) und *fachabteilungsübergreifendes Projektmanagement* (N5). In der Entwicklungsprozessmodellierung und -analyse werden diese detailliert betrachtet und im Entwicklungsprozess lokalisiert. Grundlage ist die Analyse bestehender Entwicklungsprozessdokumente. Im Fall des betrachteten Unternehmens ist ein meilensteinorientierter Soll-Entwicklungsprozess im Qualitätsmanagement Handbuch dokumentiert. Die Projektdurchführung wird mit Hilfe eines selbsterstellten Excel-Werkzeugs unterstützt. Aufbauend auf diesen Unterlagen wird in Workshops der Entwicklungsprozess mit Fokus auf die interdisziplinäre Zusammenarbeit dokumentiert. D.h. fachbereichsspezifische Tätigkeiten (wie die mechanischen Auslegungen) werden nur, wenn notwendig detailliert betrachtet. Die einzelnen Tätigkeiten, von der *Anfrage* bis zur *Produktionsfreigabe*, werden systematisch dokumentiert. Je Prozessschritt werden Eingangs- und Ausgangsgrößen (Bearbeitungsobjekte), Methoden, genutzte IT-Systeme sowie die ausführende Organisationseinheit mit Hilfe von Workshop Karten dokumentiert. Der im Workshop modellierte Prozess wird anschließend rechnerintern übersichtlich aufbereitet und nochmals im Projektteam gespiegelt. Sowohl während als auch im Anschluss der Modellierung werden Schwachstellen und Verbesserungspotentiale im Prozess verortet.

Grundlage ist das Ergebnis der Grobanalyse Nutzenpotentiale. Die schrittweise Modellierung kann aber auch zu weiteren Schwachstellen führen, die ggf. im Fragebogen nachzutragen sind. Bild 5-6 bildet einen Ausschnitt des dokumentierten Prozesses inkl. der verorteten Schwachstellen (stark vereinfacht) ab.

Resultat der ersten Phase sind die individuellen Rahmenbedingungen des Unternehmens, die es bei der Gestaltung des SE Soll-Prozesses zu beachten gibt. Die mittelgroße Entwicklungsabteilung des Unternehmens bearbeitet an einem Standort vielfältige Entwicklungsprojekte (Neu- sowie Anpassungs- und Variantenentwicklungen), die insbesondere durch ein interdisziplinäres Entwicklungsteam geprägt sind. Der Ist-Entwicklungsprozess des Unternehmens ist bisher meilensteinorientiert strukturiert und unterstützt die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Mechanik, Elektronik und Softwaretechnik nicht. Dies ergibt konkret im Ist-Entwicklungsprozess verortete Verbesserungspotentiale und Schwachstellen, die durch die Integration von SE-Ansätzen adressiert werden sollen.

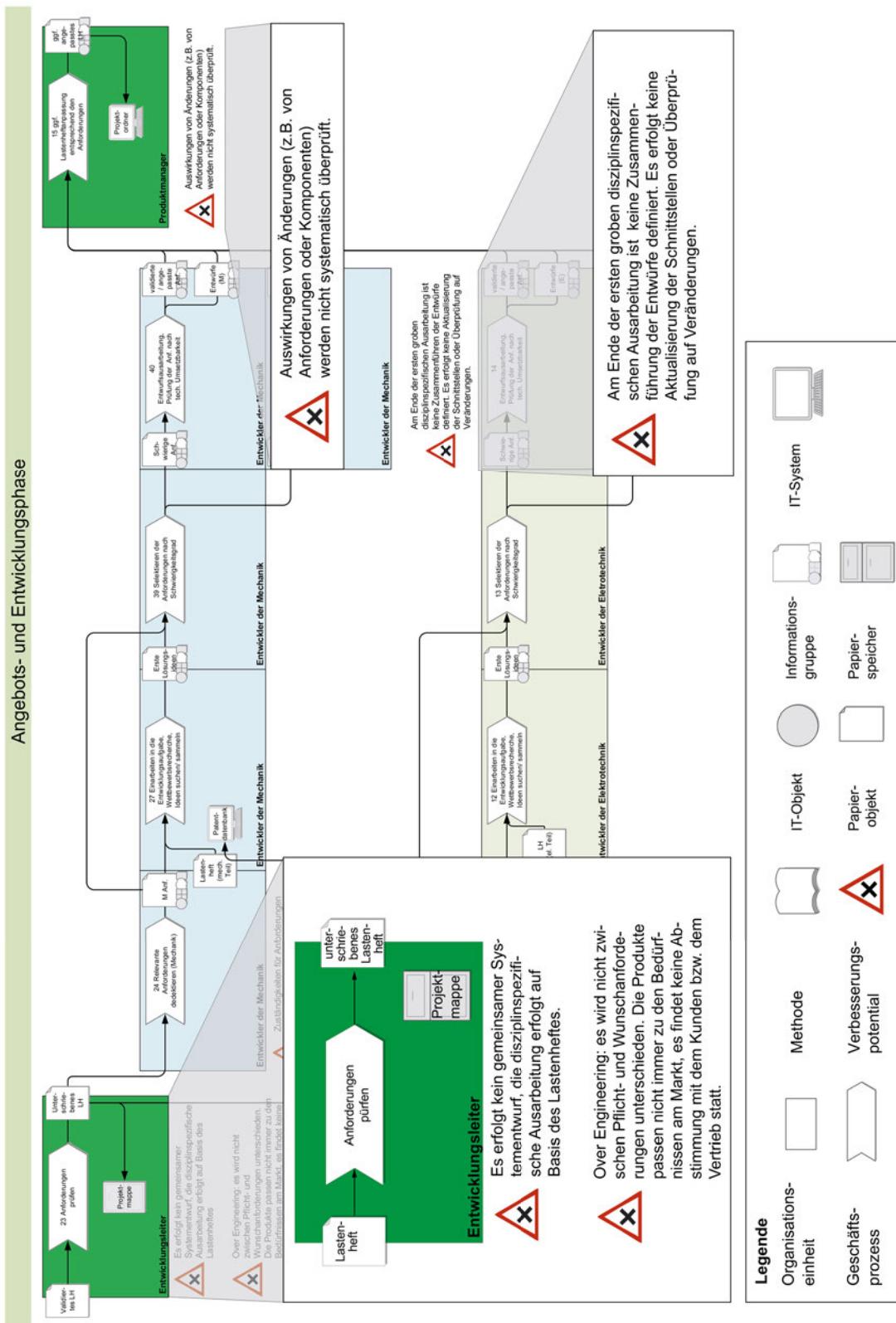


Bild 5-6: Ausschnitt des dokumentierten Entwicklungsprozesses inkl. der verorteten Schwachstellen (stark vereinfacht)

5.1.2 Phase 2: Identifikation und Auswahl geeigneter SE-Lösungen

In der Phase *Identifikation und Auswahl geeigneter Ansätze* werden unternehmensspezifische sinnvolle Kombinationen von Prozessschritten und zugehörigen Methoden, die im Unternehmen zum Einsatz kommen sollen, schrittweise identifiziert und erarbeitet. Ausgehend von den im Prozess verorteten Verbesserungspotentialen und Schwachstellen werden **relevante Nutzenpotentiale** lokalisiert. Grundlage ist die Verknüpfung der Nutzenpotentiale mit den typischen Problemstellungen (vgl. Abschnitt 4.2.3) sowie die Ergebnisse aus der Grobanalyse Nutzenpotentiale. Im betrachteten Unternehmen werden insbesondere die Nutzenpotentiale *transparente Anforderungsdokumentation (N2)*, *fachdisziplinübergreife Produktkonzipierung (N3)* und *fachabteilungsübergreifendes Projektmanagement (N5)* als vornehmlich relevant herausgearbeitet.

Anschließend werden mit Hilfe der **Prozess- und Methodenlandkarte** (vgl. Abschnitt 4.5.4) für alle drei relevanten Nutzenpotentiale die entsprechenden Prozessschritte betrachtet und ausgewählt. Für das Nutzenpotential *transparente Anforderungsdokumentation (N2)* ergibt sich aus den Erkenntnissen der Entwicklungsprozessanalyse, dass der Prozess der Pflichtenheftdefinition um die Prozessschritte *Systemumfeld analysieren* und *Use Cases betrachten* in der Phase ergänzt werden soll.

Im Zusammenhang des Nutzenpotentials *fachdisziplinübergreife Produktkonzipierung (N3)* wird der Entwicklungsprozess um einen disziplinübergreifenden Systementwurf inkl. *Funktionen modellieren* und *Wirkstruktur modellieren* erweitert.

Die Auswahl der Prozessschritte erfolgt in Workshops mit dem gesamten Projektteam. Bild 5-5 veranschaulicht das Ergebnis der schrittweisen Identifikation der Prozessschritte relevanter Nutzenpotentiale. Anschließend bzw. parallel erfolgt die Auswahl unterstützender Methoden je Prozessschritt. Im Workshop werden die geeigneten Methoden mit Hilfe der **Methodensteckbriefe** (vgl. Abschnitt 4.5.4) betrachtet und interessante Methoden ausgewählt. Grundlage ist der Nutzen der Methode hinsichtlich der erkannten Verbesserungspotentiale und Schwachstellen sowie die Eignung für das Unternehmen. Bild 5-7 zeigt die für das Unternehmen ausgewählten Methoden am Beispiel des Nutzenpotentials *transparente Anforderungsdokumentation (N2)* und dem Prozessschritten *Nutzer und Stakeholder ermitteln* und *Systemumfeld analysieren*. Hier wurden die Methoden *System Footprint* und *CONSENS Umfeldanalyse* ausgewählt. Beide Methoden sind mit Workshoptechniken zu bewältigen und unterstützen unterschiedliche Aspekte sowie DetAILlierungsstufen der Systemumfeldanalyse.

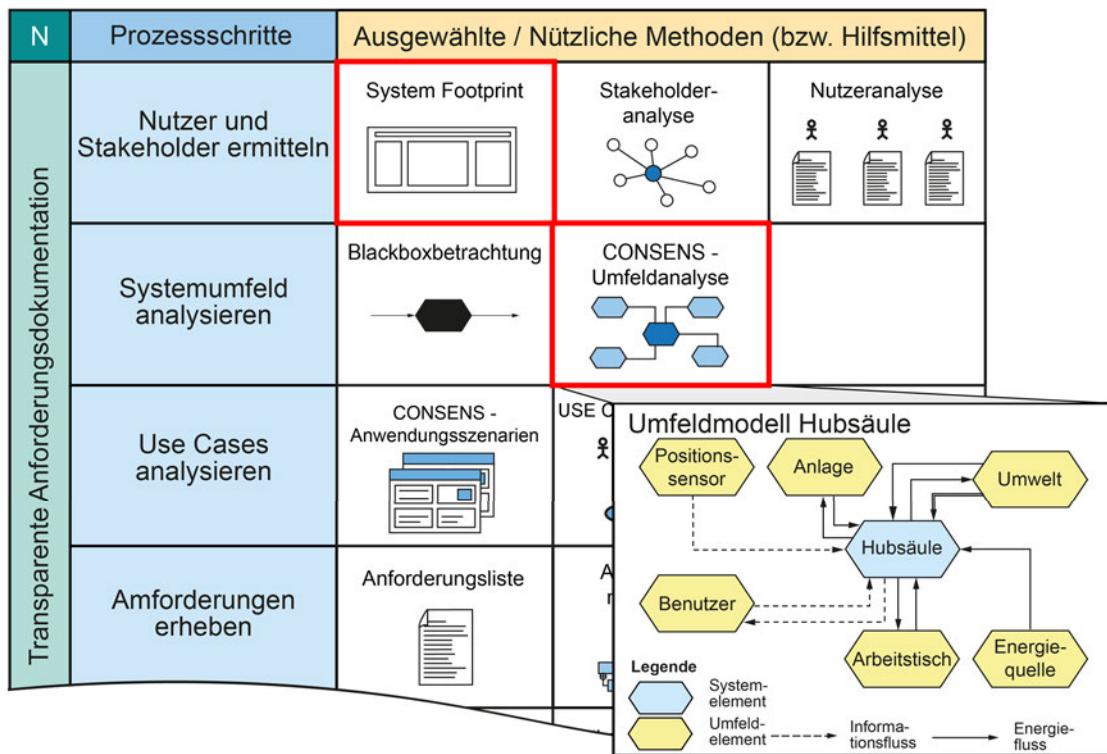


Bild 5-7: Auswahl relevanter Prozessschritte und Methoden anhand der Prozess- und Methodenlandkarte inkl. beispielhafte Anwendung der Umfeldanalyse

Die Methode *Umfeldanalyse* wird durch die Methode CONSENS Wirkstruktur ergänzt und wird deshalb im Kontext des Nutzenpotentials *fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung* (N3) vorgemerkt.

Dieser Vorgang wird für alle Nutzenpotentiale durchgeführt. Ergebnis sind ausgewählte Kombinationen aus Prozessschritten und Methoden, welche im Unternehmen implementiert werden sollen. Für das mittelständische Unternehmen in der Automatisierungstechnik ergeben sich 12 Prozessschritte und 8 Methoden. Die Methoden werden anschließend mit dem Projektteam an einem konkreten Beispiel einer neuen Hubsäule aus dem Unternehmen **evaluiert**. Das Team lernt unter Anleitung die Methoden kennen und gewinnt Klarheit über die benötigten Ressourcen (z.B. Anwender, notwendige Fähigkeiten), das Vorgehen, das Ergebnis sowie die zum Einsatz kommenden Hilfsmittel (z.B. Vorlagen, IT-Unterstützung). Die Methode wird entsprechend der für das Unternehmen relevanten Aspekte angepasst. Nach der Erprobung wird die Methode in einer Gruppendiskussion bewertet und nach dem Vorbild des Münchener Methodenmodells unternehmensspezifisch angepasst. Im Fall der Umfeldmodellierung entstehen unternehmenseigene Vorlagen. Außerdem wird der Detaillierungsgrad der Modellierung mit Hilfe eines Beispiels definiert.

Resultat der Phase *Identifikation und Auswahl geeigneter SE-Lösungen* sind den Verbesserungspotentialen und Schwachstellen entsprechende Bündel aus Prozessschritten und

zugehörigen Methoden, die im Projektteam ausgewählt, erprobt und spezifisch angepasst worden sind.

5.1.3 Phase 3: Definition eines SE Soll-Prozesses

Aufbauend auf den ausgewählten Prozessschritten und Methoden erfolgt die Definition des SE-Prozesses für das Unternehmen. Hierzu werden die unternehmensspezifischen **SE-Lösungen synchronisiert und in den Gesamtprozess eingebettet**.

Für die Synchronisierung der Lösungen werden alle ausgewählten Prozessschritte und Methoden nochmals hinsichtlich des In- und Outputs, ausgewählter Werkzeuge und Formalisierungsgrads überprüft. Die Synchronisierung erfolgt im Projekt zweistufig. Vorbereitend betrachten der Entwicklungsleiter und der SE Experte die Lösungen gemeinsam und decken Unterschiede bzw. Unstimmigkeiten auf, z.B. die Wahl von unterschiedlichen Modellierungswerkzeugen. Diese Unstimmigkeiten werden dokumentiert und Verbesserungsvorschläge vorbereitet. Im Anschluss werden die herausgearbeiteten Unstimmigkeiten inkl. der konkreten Verbesserungsvorschläge im gesamten Projektteam vorgestellt und eine gemeinsame Lösung ausgewählt. Im vorliegenden Anwendungsfall werden beispielsweise verschiedene Artefakte eines Systemmodells in verschiedenen Prozessschritten erzeugt: *Umfeldmodell*, *Funktionshierarchie* und *Wirkstruktur*. Während das Umfeldmodell nur auf *Brownpaper* erzeugt werden soll, sollen Funktionshierarchie und Wirkstruktur mit Hilfe von *MS Visio* dokumentiert werden. Die Modellierung mit *MS Visio* erfolgt mit der Perspektive auf die Umstellung auf ein Werkzeug, welches rechnerinterpretierbare und weiterverarbeitbare Modelle ermöglicht. Im Zuge der Synchronisation wird festgelegt, auch das *Umfeldmodell* mit *MS Visio* zu dokumentieren, da insbesondere *Wirkstruktur* und *Umfeldmodell* sehr eng zusammenhängen und eine einheitliche Werkzeugnutzung und Dokumentation sinnvoll ist.

Die synchronisierten Ansätze werden anschließend in Workshops in den Gesamtprozess eingebettet. Grundlage ist der zuvor in Phase 1 modellierte Ist-Entwicklungsprozess. Die Ansätze werden entsprechend der verorteten Verbesserungspotentiale und Schwachstellen in den Prozess eingebracht. Der Entwicklungsprozess des Herstellers von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik wird hierzu um neue Prozessschritte ergänzt, vorliegende Prozessschritte werden um neue Methoden oder Werkzeuge abgewandelt und bestimmte Tätigkeitsreihenfolgen werden verändert.

Neue Prozessschritte: In der Phase zwischen Lasten- und Pflichtenhefterstellung wird beispielsweise die Phase *Aufgabe analysieren* inkl. *Systemumfeld analysieren* und *Anforderungen entlang des Produktlebenszyklus erfassen* hinzugefügt (Bild 5-8 und Bild 5-9). Die Prozessschritte werden von der Spezifikationstechnik CONSENS unterstützt und mit *MS Visio* dokumentiert. Verantwortlich ist der Systementwickler. Er führt die Schritte mit Hilfe eines Kernprojektteams durch.

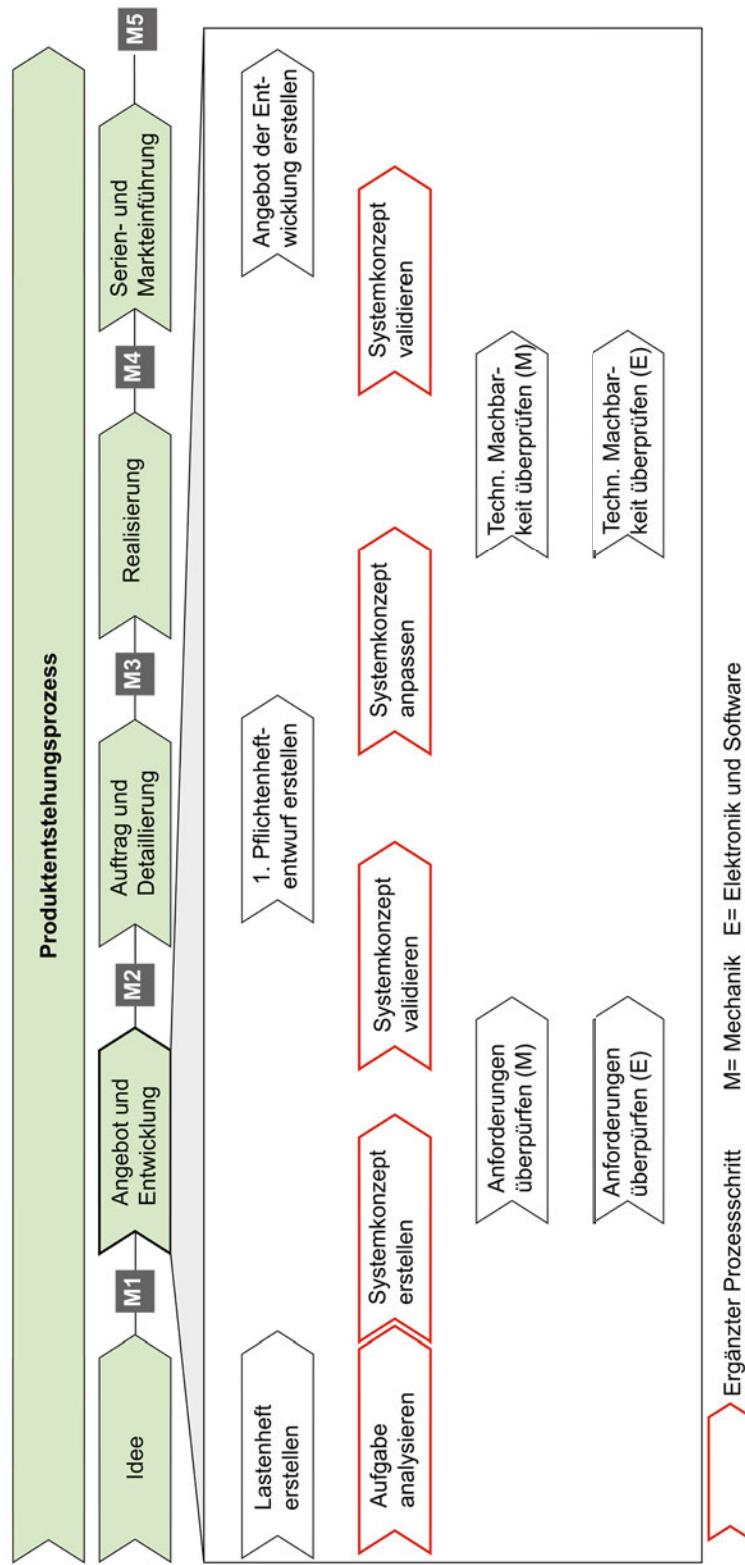


Bild 5-8: SE Soll-Prozess, Phase – Angebot und Entwicklung (Ausschnitt, stark vereinfacht)

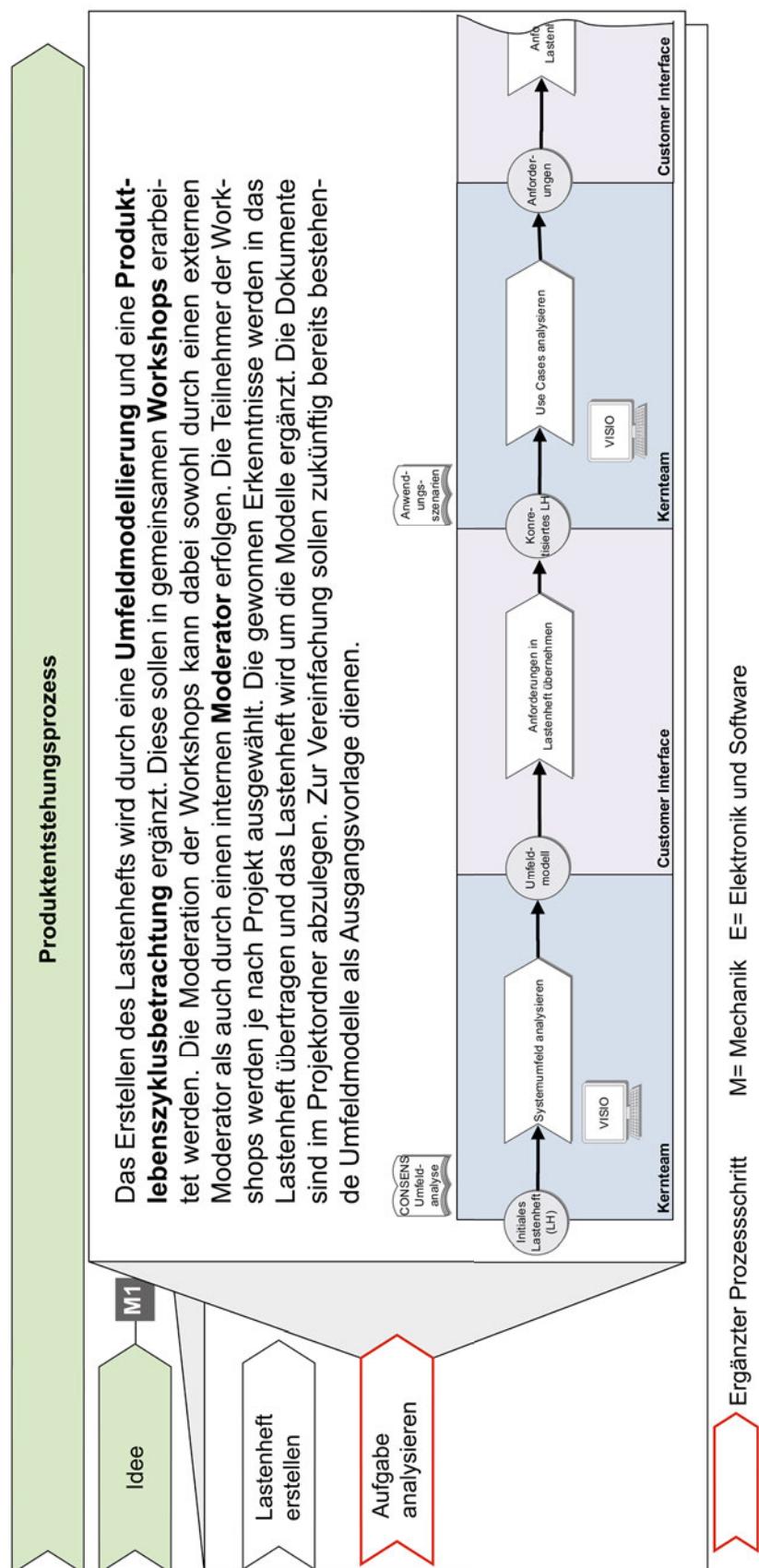


Bild 5-9: Ergänzter Prozessschritt „Aufgabe analysieren“

Abgewandelte Prozessschritte: In der Phase der Produktidee wird der Prozess *Produktbriefing erstellen* um die Workshopmethode *System Footprint* ergänzt (Bild 5-10). Der Prozess dient dazu, das Entwicklungskernteam am Anfang eines Projekts über die grundlegende Produkt- und Projektidee zu informieren. Verantwortlich ist das Produktmanagement, welches die Markt- und Kundensicht verdeutlichen soll. Aufgrund der fehlenden methodischen Grundlage für die gemeinsame Kommunikation und Kooperation im interdisziplinären Projektteam blieben diese Abstimmungen bisher ohne den gewünschten Effekt. Durch die methodische Unterstützung wird dem nun entgegengewirkt.

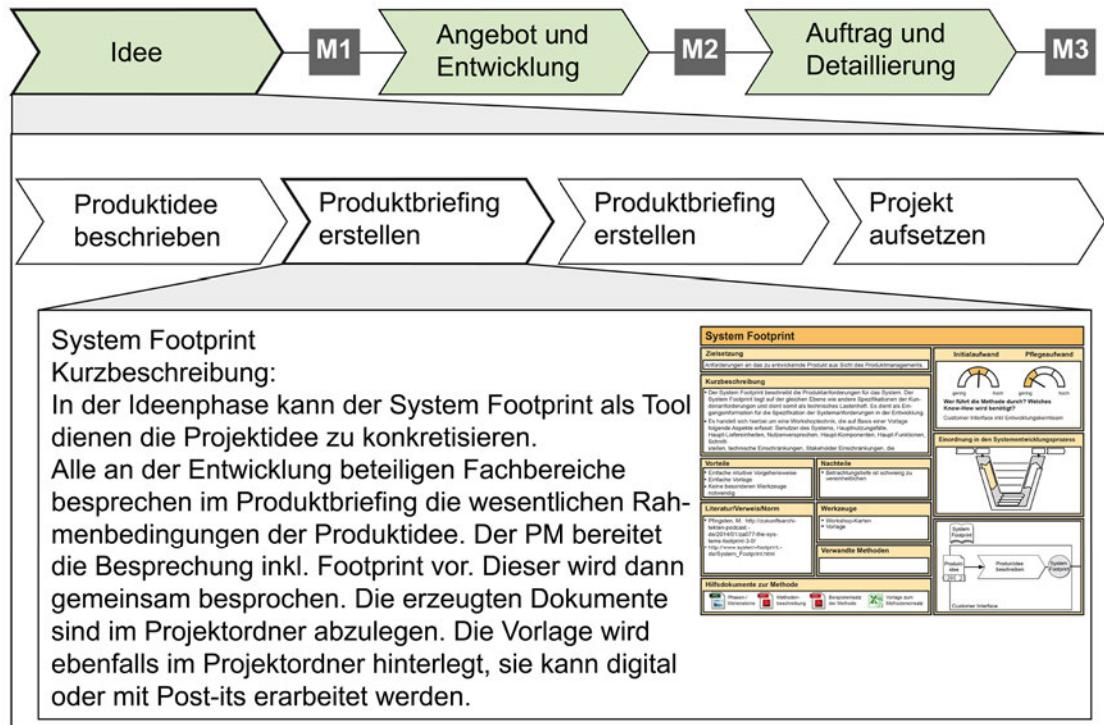


Bild 5-10: Abgewandelter Prozessschritt am Beispiel „Produktbriefing erstellen“

Veränderte Tätigkeitsreihenfolgen: Während im Unternehmen die verschiedenen Produktentwicklungsabteilungen bereits zeitlich parallel arbeiten, wird die Fertigungsplanung erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt in das Produktenwicklungsprojekt eingebunden. Zu diesem Zeitpunkt sind alle wesentlichen Produkteigenschaften bereits festgelegt. Hier kommt es aufgrund der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionsystem häufig zu notwendigen und teuren Anpassungen. Nicht berücksichtigte Restriktionen sind auf eine zu späte Kommunikation und Kooperation mit der Fertigungsplanung zurückzuführen. Daher wird beispielsweise das Entwicklungskernteam um einen Vertreter aus der Fertigung ergänzt und so bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung miteinbezogen.

Der im Projektteam definierte SE Soll-Prozess wird anschließend mit der Methode OMEGA modelliert. Die anschauliche Visualisierung ermöglicht zum einen die Prüfung des Prozesses durch das Projektteam. Zum anderen ist es Grundlage zur Kommunikation der Veränderungen im Entwicklungsprozess mit allen beteiligten Mitarbeitern.

Im Zuge der Entwicklungsprozessgestaltung ergeben sich für das Unternehmen neue Rollen bzw. Aufgabenbereiche in der Produktentwicklung. Es ist beispielsweise die Rolle des *Systementwicklers* hinzugekommen. Für das Unternehmen ist diese Rolle in Anlehnung an MÖHRINGER wie folgt definiert [Möh12] (vgl. Abschnitt 4.5.3): *Es ist der Gesamtsystemverantwortliche und verantwortet die Konzipierung auf der Gesamtsystemebene sowie den Übergang, die Synchronisation und Systemintegration mit den einzelnen Fachabteilungen.*

Übergangsweise soll der Projektleiter, der bereits fachlich in die Entwicklung involviert ist, diese Rolle zusätzlich ausfüllen. Perspektivisch wird beschlossen, die Rolle neu zu besetzen und ausgewählte Mitarbeiter in den dafür notwendigen Kompetenzen weiterzubilden. Die Rollenanpassung erfolgt durch die Entwicklungsleitung. Die Rollenprofile des Werkzeugkoffers Systems Engineering (vgl. Abschnitt 4.5.3) unterstützen diesen Vorgang.

Abschließend werden alle erstellten Hilfsmittel, z.B. die entstandenen Methodenvorlagen, der dokumentierte SE-Prozess und die neuen Rollenschreibungen, konsolidiert. Zusätzlich werden alle notwendigen Veränderungen im Qualitätsmanagementhandbuch des Unternehmens dokumentiert. Auf dieser Grundlage wird der ausgearbeitete SE-Prozess der Führungsebene vorgestellt und verabschiedet.

Resultat der Phase ist eine verabschiedete und dokumentierte bedarfsgerechte Systems Engineering Leitfaden für den Hersteller von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik.

5.1.4 Phase 4: Planung der Umsetzung

Die Systems Engineering Leitfaden soll schrittweise und parallel zum Tagesgeschäft möglichst rasch in den Entwicklungsalltag des Unternehmens integriert werden. In einer abschließenden Phase *Planung der Umsetzung* wird daher diese schrittweise Umsetzung ausgearbeitet.

Im Projektteam werden hierzu erste **notwendige Maßnahmen zur Umsetzung abgeleitet**. Der Workshop orientiert sich am bereitgestellten Umsetzungsplan (vgl. Abschnitt 4.3.4). Es werden drei Ebenen unterschieden: Prozesse und Methoden, Organisation und IT-Unterstützung. Um die notwendigen Maßnahmen zu identifizieren und zu definieren, werden zunächst die Ausgangssituation und das Ziel je Ebene im Team diskutiert und beschrieben. Bild 5-11 zeigt (vereinfacht) den ausgearbeiteten Umsetzungsplan für das Unternehmen.

Die **Ausgangssituation** fasst die wesentlichen Schwachstellen des bisherigen Entwicklungsprozesses im Hinblick auf die interdisziplinäre Zusammenarbeit zusammen. Für die Ebene **Prozesse und Methoden** ergibt sich folgende Kurzbeschreibung: *Es liegt ein meinleinsteinerorientierter Entwicklungsprozess vor, der die interdisziplinäre Zusammenarbeit außer Acht lässt und fachabteilungsorientiertes Denken bekräftigt.*

Das **Ziel** definiert den zu erreichenden Zustand, den das Unternehmen mit Hilfe der Implementierung der ausgearbeiteten SE-Ansätze erreichen möchte. Aus der Perspektive Prozesse und Methoden wird das Ziel wie folgt vom Team definiert: *Der Entwicklungsprozess unterstützt eine Gesamtsystembetrachtung, d.h. alle an der Entwicklung beteiligten Fachexperten werden frühzeitig und durchgängig einbezogen. Geeignete Methoden stellen die frühzeitige, fachabteilungsübergreifende Kommunikation und Kooperation der Experten sicher.*

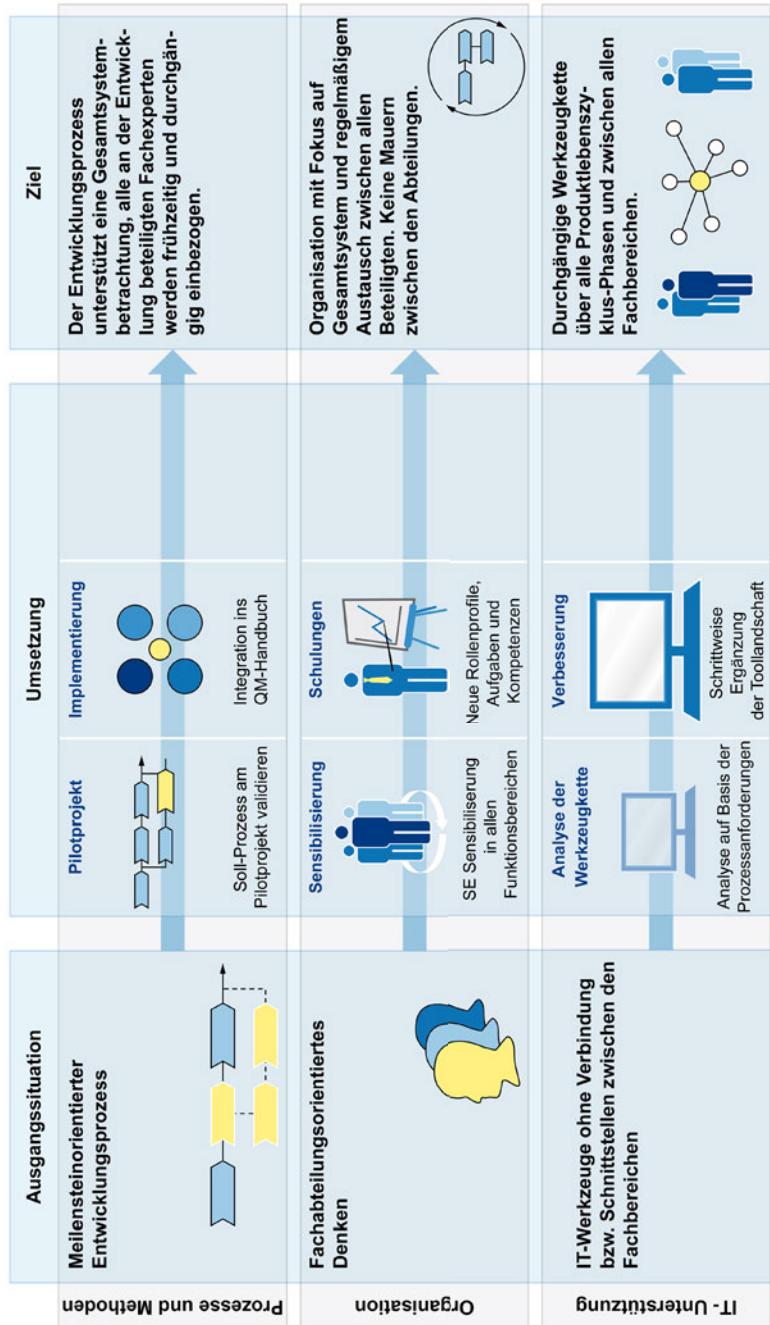


Bild 5-11: Umsetzungsplan SE-Leitfaden für den mittelständischen Hersteller von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik Struktur in Anlehnung an [GP14, S. 213]

Darauf aufbauend werden grob einzelne Maßnahmen definiert, die zur Erreichung der Zielsetzung und zur Umsetzung des SE-Leitfadens umzusetzen sind. Für die Ebene Prozesse und Methoden werden die *Planung und Durchführung eines Pilotprojekts* sowie die offizielle *Integration ins QM Handbuch* als Maßnahmen festgehalten. Auf der Ebene Organisation wird die *Sensibilisierung auf Führungs- und Mitarbeiterebene* für das Themenfeld SE festgehalten. Außerdem werden anschließende *Schulungen* für unterschiedliche Zielgruppen (z.B. Anwenden und Beherrschen sowie Verstehen) empfohlen.

Mit Hilfe des Umsetzungsplans werden alle **Maßnahmen** in eine **zeitliche Reihenfolge** gebracht und anschaulich visualisiert. Abhängigkeiten zwischen den Maßnahmen werden im Umsetzungsplan gekennzeichnet. Die Schulungsmaßnahmen sind beispielsweise zwingend vor der Umsetzung von bestimmten Prozessen oder Methoden zu absolvieren. Der Umsetzungsplan dient einer systematischen Erarbeitung sowie der anschaulichen Darstellung der SE Aktivitäten im Unternehmen. Er wird den betroffenen Führungspersonen und Mitarbeitern vorgestellt. Jeder kann nun die zukünftigen Aktivitäten einordnen und aus seiner Perspektive unterstützen. Des Weiteren dient der Umsetzungsplan als Grundlage für eine detaillierte Planung von Maßnahmen inkl. Verantwortlichkeiten und Zielvorgaben.

Als **Resultat** liegt ein Umsetzungsplan Systems Engineering vor, der das Unternehmen bei der schrittweisen Umsetzung des Systems Engineering Leitfadens im Unternehmen unterstützt und Grundlage für eine detailliertere Maßnahmenplanung bietet.

5.2 Bewertung der Systematik anhand der Anforderungen

In diesem Abschnitt wird die entwickelte *Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau* anhand der in Abschnitt 2.9 aufgestellten Anforderungen bewertet. Einen Überblick über die Anforderungen und ihren Bezug zur erarbeiteten Systematik zeigt Bild 5-12.

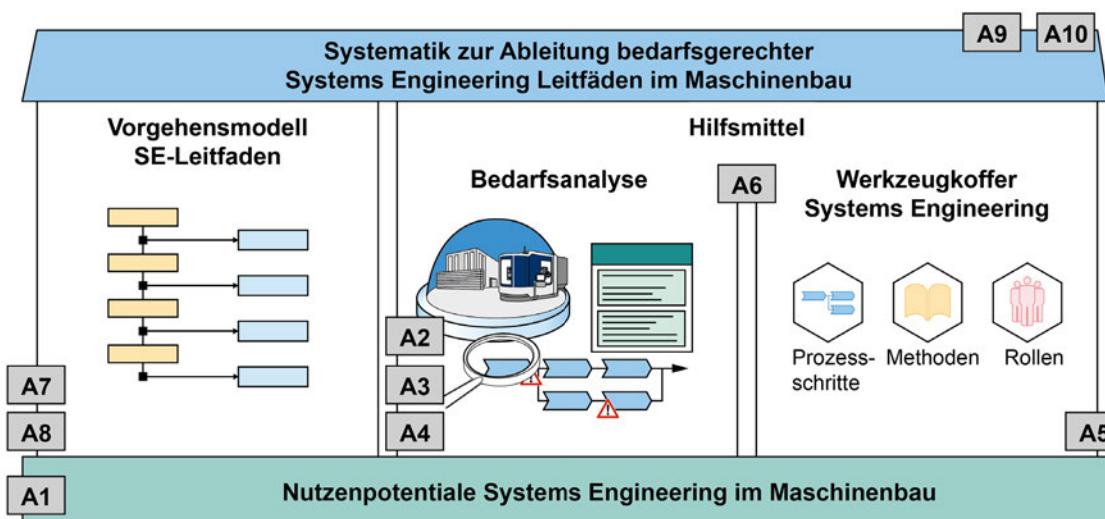


Bild 5-12: Erfüllung der Anforderungen durch die Systematik

A1) Betrachtungsgegenstand definieren/ Nutzenpotentiale aufzeigen

Grundlage für die Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden ist ein für den mittelständischen Maschinenbau klar definierter Betrachtungsgegenstand. Hierzu wurden unter Einbeziehung verschiedener Analysequellen konkrete *Nutzenpotentiale SE für den Maschinenbau* herausgearbeitet. Diese bieten zum einen eine grobe Einordnung vordergründig relevanter Aspekte und Nutzenpotentiale. Zum anderen wird durch die Nutzenpotentialsteckbriefe (z.B. die Einordnung in das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206; die Aufgabenbereiche des Systems Engineering; beteiligte Entwicklungsteamrollen; involvierte Funktionsbereiche) der Betrachtungsgegenstand charakterisiert (vgl. Abschnitt 4.2).

A2) Berücksichtigung der Charakteristika des Maschinenbaus in Deutschland – Produkteigenschaften

Die erarbeitete Systematik hat den Anspruch, für die Unternehmen im Maschinenbau im Zuge des Wandels ihrer Marktleistung – insbesondere die Weiterentwicklung ihrer Produkte hin zu fortschrittlichen mechatronischen Systemen – geeignete Entwicklungsansätze zu definieren und diese schrittweise umzusetzen (vgl. Abschnitt 2.2 und 2.3.2.). Dies unterstützt die Systematik, indem sie den interdisziplinären Entwicklungsansatz Systems Engineering mittels konkreter *Nutzenpotentiale SE* für den Maschinenbau strukturiert (vgl. Abschnitt 4.2) und im *Werkzeugkoffer Systems Engineering* geeignete Prozessschritte, Methoden und Rollenprofile bereitstellt (vgl. Abschnitt 4.5). In der Bedarfsanalyse werden zusätzlich die spezifischen Produktmerkmale im *Erhebungsbogen* analysiert und mit den Nutzenpotentialen in Beziehung gesetzt (vgl. Abschnitt 4.4.1). So werden die für die Produkte des Maschinenbaus benötigen interdisziplinären Prozesse und Methoden zugänglich gemacht.

A3) Berücksichtigung der Charakteristika des Maschinenbaus in Deutschland – organisatorische Eigenschaften

Neben den Produkteigenschaften trägt die Systematik auch den organisatorischen Eigenarten der mittelständisch geprägten Unternehmen Rechnung. Die Systematik unterstützt in der Bedarfsanalyse die systematische Erfassung der Unternehmenseigenschaften mit Hilfe des *Erhebungsbogens* (vgl. Abschnitt 4.4.1). Des Weiteren ist die *Bedarfsanalyse* durch das zweistufige Verfahren darauf bedacht, den Anwendungsaufwand möglichst gering zu halten. Die Prozess-, Methoden- und Rollenprofilbereitstellung im Rahmen des *Werkzeugkoffers SE* sowie die Inhalte sind leichtverständlich und ohne spezifische Systems Engineering Expertise erfassbar (vgl. Abschnitt 4.5). Die Berücksichtigung der schrittweisen Umsetzung unterstützt zusätzlich dem Umgang mit limitierten Ressourcen (vgl. Abschnitt 4.3.4).

A4) Verbesserungspotentiale ermitteln

Die bereitgestellte *Bedarfsanalyse* unterstützt in einem zweistufigen Vorgehen das Identifizieren von konkreten Verbesserungspotentialen in der interdisziplinären Produktentwicklung eines Unternehmens. In der *Grobanalyse Nutzenpotentiale* werden hierzu durch gezielte Interviewfragen Schwachstellen bezüglich der einzelnen Nutzenpotentiale SE herausgearbeitet. In der ergänzenden detaillierteren *Produktentwicklungsprozessanalyse* werden weitere Verbesserungspotentiale erkennbar sowie die bereits herausgearbeiteten Schwachstellen verfeinert und im Produktentwicklungsprozess verortet. Gepaart mit der *Erhebung der Unternehmensrahmenbedingungen* wird so der individuelle SE-Bedarf eines Unternehmens herausgearbeitet (vgl. Abschnitt 4.4).

A5) Prozessschritte und Methoden strukturieren und bereitstellen

Die entwickelte Systematik strukturiert die vielfältigen Prozessschritte und Methoden des Systems Engineering und stellt ausgewählte Kombinationen mit Fokus auf mittelständische Unternehmen des Maschinenbaus bereit. Im Werkzeugkoffer Systems Engineering werden hierzu in der *Prozess- und Methodenlandkarte*, orientiert an den Nutzenpotentialen, relevante Prozessschritte und zugehörige Methoden strukturiert und zur Verfügung gestellt. Die Methoden werden mit Hilfe von *Methodensteckbriefen* leichtverständlich bereitgestellt und entsprechenden um *Rollenprofilen* eines SE Entwicklungsteams ergänzt (vgl. Abschnitt 4.5). Dies stellt eine zielgruppengerechte Strukturierung und Bereitstellung sicher.

A6) Identifikation und Auswahl geeigneter Prozessschritte und Methoden ermöglichen

Die Systematik soll Unternehmen dabei unterstützen, für ihre Situation sinnvolle SE Prozessschritte und zugehörige Methoden zu identifizieren und auszuwählen. Die Verknüpfung der *Nutzenpotentiale Systems Engineering* mit den *Problemstellungen der Unternehmen* sowie der Bezug zwischen *Bedarfsanalyse*, *Nutzenpotentialen* und *Werkzeugkoffer SE* unterstützen das schrittweise Bestimmen, der für das Unternehmen nutzenstiftenden Kombinationen aus Prozessschritten, Methoden und Rollen. Die *Prozess- und Methodenlandkarte* stellt die notwendige Transparenz zwischen Nutzenpotentialen und Prozessen mit zugehörigen Methoden sicher (vgl. Abschnitt 4.3).

A7) Definition eines Soll-Prozesses unterstützen

Die Anforderung wird durch die Phase 3 im *Vorgehensmodell* erfüllt. Ausgehend vom Ist-Prozess und den identifizierten Verbesserungspotentialen werden geeignete Ansätze in den Prozess integriert und dieser so neugestaltet. Der Soll-Prozess orientiert sich dabei nicht an einem idealtypischen generischen Prozess, sondernbettet sich direkt in die Gesamtgeschäftsprozesse mit ein. Mit Hilfe der Methode OMGEA beschreibt der Prozess die im SE durchzuführenden Prozessschritte und die entsprechenden Methoden. Außerdem werden die Methoden an die spezifischen Rahmenbedingungen des Unternehmens angepasst (vgl. Abschnitt 5.1.3).

A8) Schrittweise Umsetzung ermöglichen

Um die verschiedenen Veränderungen und Anpassungen, die mit der Einführung von Systems Engineering notwendig sind, im Unternehmen parallel zu den laufenden Entwicklungsaktivitäten umzusetzen, leitet die Systematik eine Umsetzungsplanung an. Der *Umsetzungsplan* unterstützt die methodische Erarbeitung von groben Maßnahmen (vgl. Abschnitt 4.3.4). Diese werden in eine sinnvolle zeitliche Reihenfolge gebracht. Dies betrifft Änderungen in den Ebenen Prozesse und Methoden, Organisation und IT-Unterstützung. Die Abhängigkeiten der Maßnahmen werden auch über die Ebenen hinweg betrachtet. Der bereitgestellte Umsetzungsplan legt die Grundlage für eine detaillierte Planung einer schrittweisen Umsetzung im Unternehmen.

A9) Systematische Vorgehensweise bereitstellen

Das entwickelte *Vorgehensmodell* ermöglicht eine systematische Vorgehensweise. Ausgehend von der Bedarfsanalyse SE wird die Definition und die Planung der schrittweisen Umsetzung eines SE- Leitfadens unterstützt. Das Vorgehensmodell beschreibt die durchzuführenden Aufgaben und verknüpft diese mit den erarbeiteten Hilfsmitteln z.B. *dem Erhebungsbogen, der Prozess- und Methodenlandkarte sowie dem Umsetzungsplan* (vgl. Abschnitt 4.3).

A10) Einfache Anwendbarkeit sicherstellen

Die Anwendbarkeit der Systematik wurde anhand eines Anwendungsbeispiels – ein Hersteller von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik – belegt (vgl. Abschnitt 5.1). Die bereitgestellten Hilfsmittel sind ohne Schulungen und lange Einarbeitszeit einsetzbar.

Die entwickelte *Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau* erfüllt somit die gestellten Anforderungen in vollem Umfang. Sie ist geeignet, um den Systems Engineering Bedarf eines mittelständischen Unternehmens zu identifizieren, geeignete Prozessschritte, Methoden sowie Rollenprofile zu definieren und in den Gesamtprozess zu integrieren und die schrittweise Umsetzung zu planen. Die Systematik wurde mit Erfolg am Anwendungsbeispiel des *Entwicklungsprozesses eines Herstellers von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik* validiert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mehr denn je zeichnen sich die Produktinnovationen des **deutschen Maschinenbaus** durch das synergetische Zusammenwirken unterschiedlicher Fachdisziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik, Software- und Regelungstechnik aus. Die zu beobachtende Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik ist ein wesentlicher Treiber für diesen fortlaufenden Wandel der Erzeugnisse hin zu **fortschrittlichen mechatronischen Systemen** [VM14], [Dum10], [GAC+13]. Die **Entwicklung** derartiger Systeme stellt die Unternehmen vor neue Herausforderungen, es wird ein interdisziplinärer Entwicklungsansatz benötigt. Bisherige Ansätze sind fachdisziplinorientiert und werden dem Anspruch nicht gerecht. Aber auch fachdisziplinübergreifende Entwicklungsmethodiken, wie die VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ [VDI2206], greifen nicht weit genug. Folglich muss ein neuer Entwicklungsansatz gewählt werden.

Systems Engineering hat den Anspruch Disziplinen und vielfältige Aspekte zu integrieren, und kann somit als Grundlage für eine Weiterentwicklung der Entwicklungsmethodik dienen [HFW+12], [GDS+13]. SE ist kein neuer Ansatz, jedoch ist er trotz der Nutzenpotentiale insbesondere im mittelständisch geprägten Maschinenbau bisher nicht in der breiten Anwendung zu finden [GDS+13]. Grund sind vielschichtige Hindernisse in der Anwendung, z.B. die unzureichende Bereitstellung von Einführungsmethoden, die noch fehlende SE-Expertise in den Unternehmen sowie die Fokussierung auf Großunternehmen und -projekte [Arm05], [FH14], [Gau13], [GDS+13]. Die Unternehmen stehen daher vor der Herausforderung die Nutzenpotentiale des Systems Engineering für ihr Unternehmen zu erschließen. Dabei soll allerdings nicht das prinzipiell mögliche, sondern das für das spezifische Unternehmen notwendige herausgearbeitet werden.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, müssen vier **Handlungsfelder** erschlossen werden. Grundlage sind ein klar definierter Betrachtungsgegenstand und konkrete *Nutzenpotentiale*, die aufzeigen, welche Vorteile sich aus der Anwendung und Weiterentwicklung von Systems Engineering im Hinblick auf die Herausforderungen in der Entwicklung von mittelständischen Unternehmen des Maschinenbaus ergeben. Zudem wird eine *Bedarfsanalyse Systems Engineering* benötigt, die die Unternehmen dabei unterstützt, ihren spezifischen SE-Bedarf zu identifizieren. Des Weiteren wird ein Werkzeugkoffer SE benötigt, der die vielfältigen Prozessschritte und Methoden im SE strukturiert und zielgruppengerecht bereitstellt. Im Zuge der Umsetzung bedarf es eines *bedarfsgerechten Systems Engineering Leitfadens*, der ausgewählte SE-Lösungen in die Ablauf- und Aufbauorganisation des Unternehmens integriert.

Eine Analyse des Stands der Technik verdeutlicht, dass keiner der untersuchten Ansätze alle Anforderungen erfüllt, ausgewählte Ansätze und Methoden können jedoch einen Beitrag leisten. Aus diesen Gründen besteht ein Handlungsbedarf für eine *Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau*.

Die entwickelte Systematik greift einzelne Überlegungen der untersuchten Ansätze aus dem Stand der Technik auf, überträgt sie auf die dargestellten Handlungsfelder und ergänzt sie um neu entwickelte Hilfsmittel. Die **resultierende Systematik** setzt sich aus vier übergeordneten Bestandteilen zusammen:

- **Nutzenpotentiale Systems Engineering:** Eine Übersicht strukturiert mit Hilfe sechs konkreter Nutzenpotentiale Systems Engineering, die Möglichkeiten, die sich aus der Anwendung von Systems Engineering im Hinblick auf die spezifischen Herausforderungen des Maschinenbaus ergeben. Sie basieren auf der Analyse verschiedener Quellen: Literatur, Studie Systems Engineering in der industriellen Praxis, it's OWL Transferprojekte SE und Workshops mit Anwendern aus der Praxis.
- **Vorgehensmodell SE-Leitfaden:** Das Vorgehensmodell SE-Leitfaden unterstützt die Definition und Umsetzung eines bedarfsgerechten Systems Engineering Leitfadens. Es besteht aus vier Phasen ((1) *Bedarfsanalyse Systems Engineering*, (2) *Identifikation und Auswahl geeigneter SE-Lösungen*, (3) *Definition eines SE Soll-Prozesses*, (4) *Planung der Umsetzung*) und beschreibt detailliert die durchzuführenden Tätigkeiten und den Einsatz der erarbeiteten Hilfsmittel (*Bedarfsanalyse*, *Werkzeugkoffer SE* und *Umsetzungsplan*).
- **Bedarfsanalyse:** Die Bedarfsanalyse unterstützt mit Hilfe von 14 Merkmalen und je drei Ausprägungen die Erhebung der Unternehmensrahmenbedingungen, die Einfluss auf die Identifikation relevanter Nutzenpotentiale und die Auswahl geeigneter Systems Engineering Lösungen haben. Außerdem wird ein zweistufiges Verfahren zur Identifikation von Verbesserungspotentialen in der interdisziplinären Produktentwicklung unterstützt: eine Grobanalyse Nutzenpotentiale (1) und eine detaillierte Entwicklungsprozessanalyse (2). Ein Interviewleitfaden, der nach den Problemstellungen und den sechs identifizierten Nutzenpotentialen Systems Engineering strukturiert ist, unterstützt die Analyse. Er enthält 72 Fragen.
- **Werkzeugkoffer Systems Engineering:** Basierend auf dem Prinzip eines morphologischen Kastens werden in einer Prozess- und Methodenlandkarte Prozessschritte, und nützliche Methoden sowie Rollenprofile zielgruppengerecht für mittelständische Unternehmen im Maschinenbau sowie verwandter Branchen bereitgestellt. Grundlage ist eine Sammlung relevanter Prozessschritte, Methoden und Rollen. Sie basiert auf der Analyse der Transferprojekte it's OWL sowie verschiedener Referenzprozesse. Methodensteckbriefe und Rollenbeschreibungen stellen relevante Informationen leichtverständlich bereit.

Die **Validierung** der Systematik erfolgte anhand des Anwendungsbeispiels eines Herstellers von Komponenten und Systemlösungen für die Automatisierungstechnik. Im Rahmen der Validierung wurde das Vorgehensmodell der Systematik vollständig durchlaufen. Die Validierung zeigt, dass die *Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems*

Engineering Leitfäden im Maschinenbau die aufgestellten Anforderungen in vollem Umfang erfüllt.

Dennoch ergibt sich für die zielorientierte Anwendung von Systems Engineering in mittelständischen Unternehmen **zukünftiger Forschungsbedarf**. Dieser lässt sich in kurzfristigen, mittelfristigen sowie langfristigen Forschungsbedarf unterteilen.

Kurzfristiger Forschungsbedarf ergibt sich im Hinblick auf eine durchgängige Werkzeugunterstützung über alle Phasen des *Vorgehensmodells SE-Leitfaden* zur Definition und Umsetzung eines bedarfsgerechten Systems Engineering Leitfadens. Zum einen könnte die workshopbasierte Bedarfsanalyse durch automatisierte Auswertung zusätzlich vereinfacht werden. Zum anderen wäre die Verknüpfung der werkzeuggestützten Prozessmodellierung mit dem Werkzeugkoffer sinnvoll. Hierzu könnte beispielsweise eine Schnittstelle zwischen dem Software-Werkzeug *OMEGA Process Modeller®* zur Abbildung von Prozessen und einer intelligenten Prozess-, Methoden- und Rollendatenbank geschaffen werden. Zukünftige Arbeiten sollten darüber hinaus die Verzahnung der Kompetenzen und Fähigkeiten der Mitarbeiter mit der Einführung neuer Ansätze des Systems Engineering berücksichtigen. In diesem Zusammenhang ist auch die methodische Grundlage zur Definition und Planung von Schulungs- und Qualifizierungsprogrammen mit einzubeziehen. Die in der Systematik bereitgestellte Planung der Umsetzung bietet hier eine potentielle Basis. Um eine ganzheitliche Betrachtung sicherzustellen, gilt es in weiterführenden Arbeiten die Systematik über die Produktentwicklung hinaus, um die Dienstleistungs- und Produktionssystementwicklung zu erweitern. Mittelfristiger und langfristiger Forschungsbedarf besteht in der Bereitstellung und Auswahl mittelstandsgerechter Software-Werkzeuge zur Anwendung von Systems Engineering im Unternehmen. Weiterer Forschungsbedarf liegt in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der neu gestalteten interdisziplinären Zusammenarbeit. Die transparente Auswertung der Wirtschaftlichkeit (qualitative und quantitative Merkmale) ist essentiell für Unternehmen, um weitere Schritte und Investitionen zu tätigen.

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CONSENS	Conceptual design Specification technique for the Engineering of complex Systems
d.h.	das heißt
et al.	et alii
etc.	et cetera
f.	folgende
FAS	Functional Architectures for Systems
ff.	fortfolgende
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
ggf.	gegebenenfalls
HF	Handlungsfeld
Hrsg.	Herausgeber
i.d.R.	in der Regel
INCOSE	International Council on Systems Engineering
insb.	insbesondere
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
MBSE	Model-Based Systems Engineering
OMEGA	Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse
OPM	OMEGA Process Modeller®
PEP	Produktentstehungsprozess

RFLP	Requirement – Functional – Logical – Physical
RUP SE	Rational Unified Process – Systems Engineering
S.	Seite
SE	Systems Engineering
SFB 614	Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende System des Maschinenbaus“ der Universität Paderborn
sog.	sogenannte
SysML	Systems Modeling Language
SYSMOD	Systems Modeling Process
u.a.	unter anderem
VAMOS	Methode Variantenmodellierung mit SysML
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
vgl.	vergleiche
VRML	Virtual Reality Modeling Language
z.B.	zum Beispiel

Literaturverzeichnis

- [AB11] ALBERS, A.; BRAUN, A.: A generalized framework to compass and to support complex product engineering processes. *International Journal of Product Development*, 1/2/3, 2011
- [AES+12] ANDERL, R.; EIGNER, M.; SENDLER, U.; STARK, R.: *Smart Engineering*. Springer Verlag, Heidelberg, Acatech Disskusion, 2012
- [AH16] ABRAMOVICI, M.; HERZOG, O. (Hrsg.): *Engineering im Umfeld von Industrie 4.0 – Einschätzungen und Handlungsbedarf*. Herbert Utz Verlag, München, 2016
- [Alb10] ALBERS, A.: *Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences*. Ancona, 2010
- [Alt12] ALT, O.: *Modellbasierte Systementwicklung mit SysML*. Hanser, München, 2012
- [Ana15] ANACKER, H.: *Instrumentarium für einen lösungsmusterbasierten Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 354, Paderborn, 2015
- [ANSI/632] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI) AND ELECTRONICS INDUSTRIES ASSOCIATION (EIA): *Processes for Engineering a System*, Philadelphia, 1999
- [Arm05] ARMSTRONG, J. R.: *A Systems Approach to Process Infrastructure*. INCOSE Symposium, Virginia, 2005
- [AS15] ALBERS, A.; SEITER, M. (Hrsg.): *Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes IN² -Von der INformation zur INnovation- – Innovationen systematisch entwickeln durch Methoden- und Wissensmanagement*. 1. Auflage, epubli GmbH, Berlin, 2015
- [ASS14] ARBEITSKREIS SMART SERVICE WELT: *Smart Service Welt – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internet-basierte Dienste für die Wirtschaft*, 2014
- [AWG+14] ALBERS, A.; WALTER, B.; GLADYSZ, B.; REIB, N.; DÖRR, M.; HINKELMANN, M.: Ansatz zur situations- und bedarfsgerechten Methodenauswahl in der Produktentstehung basierend auf dem Systemtripel aus Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem. 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 2014
- [Bal04] BALÁŽOVÁ, M.: *Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 174, Paderborn, 2004
- [Ben05] BENDER, K.: *Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung*. Springer Verlag, Heidelberg, 2005
- [Ben13] BENSIEK, T.: *Systematik zur reifegradbasierten Leistungsbewertung und -steigerung von Geschäftsprozessen im Mittelstand*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 312, Paderborn, 2013
- [Bes09] BESTVOR: Projektabschlussbericht des Forschungsprojektes BestVor. Projekt BestVor, 2009
- [BGH+96] BLECK, A.; GOEDECKE, M.; HUSS, S. A.; WALDSCHMIDT, K.: *Praktikum des modernen VLSI-Entwurfs – Eine Einführung in die Entwurfsprinzipien und -beschreibungen, unter besonderer Berücksichtigung von VHDL; mit einer umfangreichen Anleitung zum Praktikum*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1996
- [BGJ+09] BERTSCHE, B.; GÖHER, P.; JENSEN, U.; SCHINKÖTHE, W.; WUNDERLICH, H.-J.: *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme*. Springer Verlag, Heidelberg, 2009
- [BLA+01] BIRKHOFER, H.; LINDEMANN, U.; ALBERS, A.; MEIER, M.: *Product Development as a Structured and Interactive Network of Knowledge - A Revolutionary Approach*. Proceedings of the ICED 2001, Glasgow, 21.-23.08.2001, 2001

- [BMW14] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND FORSCHUNG: German Mittelstand; Motor der deutschen Wirtschaft. BMWi, 2014
- [BMW15-ol] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND FORSCHUNG (Hrsg.) Branchenfokus.
unter: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Wirtschaft/branchenfokus,did=196364.html>,
1. Dezember 2015
- [Brö93] BRÖHL, A.-P. (Hrsg.): Das V-Modell – Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, Wien, 1993
- [BTW+15] BISCHOFF, J.; TAPHORN, C.; WOLTER, D.; BRAUN, N.; FELLBAUM, M.; GOLOVEROV, A.; LUDWIG, S.; HEGEMANNS, T.; PRASSE, C.; HENKE, M.; HOMPEL, M. ten; DÖBBELER, F.; FUSS, E.; KIRSCH, C.; MÄTTIG, B.; BRAUN, S.; GUTH, M.; KASPERS, M.; SCHEFFLER, D.: Erschließen der Potenziale der Anwendung von Industrie 4.0 im Mittelstand. BMWi, 2015
- [Chr09] CHRISTIANSEN, S.-K.: Methode zur Klassifikation und Entwicklung reifegradbasierter Leistungsbewertungs- und Leistungssteigerungsmodelle. Dissertation, HNI-Verlagsschriftenreihe, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, Band 264, Paderborn, 2009
- [CiD-ol] LEHRSTUHL FÜR PRODUKTENTWICKLUNG DER TU MÜNCHEN: Methodenportal Competence in Design and Development CiDaD. Unter: <http://www.cidat.de/portal>, 15. November 2017
- [CPJ08] CHANG, G.-S.; PERNG, H.-L.; JUANG, J.-N.: A review of systems engineering standards andprocesses. Journal of Biomechatronics Engineering, 2008
- [DH94] DAENZER, W. F.; HUBER, F.: Systems engineering – Methodik und Praxis. 8., durchges. Auflage, Verl. Industrielle Organisation, Zürich, 1994
- [DJG12] DUMITRESCU, R.; JÜRGENHAKE, C.; GAUSEMEIER, J.: Intelligent Technical Systems Ost-WestfalenLippe. Proceedings of 1st Joint International Symposium on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering, 2012
- [DoD74] U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE (DoD): Engineering Management MIL-STD-499A, Washington, D. C. 1974
- [Dud15] DUDEN: Duden deutsches Universalwörterbuch. 8. überarbeitete und erweiterte Auflage, Dudenverlag, Berlin, 2015
- [Dud17-ol] DUDEN: Leitfaden. Unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Leitfaden>, 28. September 2017
- [Dum10] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2010
- [EDB+15] EMMRICH, D. M. V.; DÖBELE, D.-I. M.; BAUERNHANSL, U.-P. D.-I. T.; PAULUS-ROHMER, M. S. D.; SCHATZ, D. O. S. A.; WESKAMP, D.-W.-I. M.: Studie: Geschäftsmodell-Innovation durch Industrie 4.0 – Chancen und Risiken für den Maschinen- und Anlagenbau. Fraunhofer IPA; Dr. Wieselhuber & Partner GmbH, 2015
- [EGZ12] EIGNER, M.; GILZ, T.; ZAFIROV, R.: Proposal for functional product description as part of a PLM solution in interdisciplinary product development. Proceedings of DESIGN 2012, the 12. International design conference, Design Society, Dubrovnik, 2012
- [Ehr09] EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Carl Hanser Verlag, München, 4. aktualisierte Auflage, 2009
- [EKL07] EHRENSPIEL, K.; KIEWERT, A.; LINDEMANN, U.: Kosten günstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 6. bearbeitete und ergänzte Auflage, 2007
- [EM13] EHRENSPIEL, K.; MEERKAMM, H.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarb. und erw. Auflage, Hanser Verlag, München, 2013

- [ERZ14] EIGNER, M.; ROUBANOV, D.; ZAFIROV, R.: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Springer Verlag, Heidelberg, 2014
- [Est08] ESTEFAN, J. A.: Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies, In: INCOSE MBSE Initiative, California, 2008
- [FA13] FORSCHUNGSUNION WIRTSCHAFT-WISSENSCHAFT; ACATECH – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN (Hrsg.): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, 2013
- [Fah95] FAHRWINKEL, U.: Methode zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 1, Paderborn, 1995
- [FMS15] FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A.; STEINER, R.: A practical guide to SysML – The systems modeling language. Morgan Kaufmann, Waltham, 3. Auflage, 2015
- [GAC+13] GAUSEMEIER, J.; ANACKER, H.; CZAJA, A.; WASSMANN, H.: Auf dem Weg zu intelligenten technischen Systemen. 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013
- [GAD+14] GAUSEMEIER, J.; AMSHOFF, B.; DÜLME, C.; KAGE, M.: Strategische Planung von Marktleistungen im Kontext Industrie 4.0. In: GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung 10. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, 20.-21. November 2014, Berlin. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 334, Paderborn, 2014
- [Gau10] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitssanalyse mechatronischer Systeme. Hanser, München, Wien, 2010
- [Gau11] GAUSEMEIER, J.: Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe – Strategie. Paderborn, OstWestfalenLippe Marketing GmbH, 2011
- [Gau13] GAUSEMEIER, J.: Strategische Planung und integrative Entwicklung der technischen Systeme von morgen. Schriftenreihe der Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften, Verlag Ferdinand Schöningh, Paderborn, 2013
- [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.): 10. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 343, Paderborn, 2015
- [GD16] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.: Intelligente techn. Systeme und Systems Engineering. In: ACATECH UND HASO-PLATTNER-INSTITUT: Onlinekurs: Hands on Industrie 4.0. MOOC.House, 2016
- [GDC+13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; CZAJA, A.; STEFFEN, D.; TSCHIRNER, C.; WIEDERKEHR, O.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. In: GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013
- [GDE+16-ol] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; EBBESMEYER, P.; FECHTELPETER, C.; HOBSCHEIDT, D.; KÜHN, A.: Auf dem Weg zu Industrie 4.0 – Technologietransfer in den Mittelstand. Unter: http://www.its-owl.de/fileadmin/PDF/Informationsmaterialien/2016-Auf_dem_Weg_zu_Industrie_4.0_Technologietransfer_in_den_Mittelstand.pdf, 2016
- [GDS+13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; STEFFEN, D.; CZAJA, A.; TSCHIRNER, C.; WIEDERKEHR, O.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. Paderborn, 2013
- [GEA16] GAUSEMEIER, J.; ECHTERFELD, J.; AMSHOFF, B.: Strategische Produkt- und Prozessplanung. In: LINDEMANN, U. (Hrsg.): Handbuch der Produktentwicklung. Carl Hanser Verlag, München, 2016

- [GFD+8] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus. In Konstruktion: Teil 1 in 7/8 – 2008, Teil 2 in 9 – 2008, VDI Verlag, Berlin, 2008
- [GFM00] GAUSEMEIER, J.; FLATH, M.; MÖHRINGER, S.: Entwicklungsumgebung Mechatronik. In: 11. Symposium Design for X, Erlangen, 2000
- [GMP13] GERICKE, K.; MEIßNER, M.; PAETZOLD, K.: Understanding the Context of Product development. In Proceedings of the 19th International Conference on Engineering, Design ICED 13 Seoul Korea. The Design Society Glasgow, 2013
- [GP14] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. 2. überarb. Auflage, Hanser Verlag, München, 2014
- [GPW09] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.; WENZELMANN, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [GSR14] GAUSEMEIER, J.; SCHÄFER, W.; RAMMIG, F. J.: Design Methodology for Intelligent Technical Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future. Springer Verlag, Heidelberg, 2014
- [GSS14] GAUPP, F.; SCHULZE, S.-O.; STEFFEN, D.: ISO29100-Chancen und Möglichkeiten für den Mittelstand. In: MAURER, M.; SCHULZE, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering 2014, Bremen, 2014
- [Han55] HANSEN, F.: Konstruktionssystematik – Eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure. VEB Verlag Technik, Berlin, 2. Auflage, 1955
- [HBR+16] HEIHOFF-SCHWEDE, J.; BREMER, C.; RABE, M.; TSCHIRNER, C.: Werkzeuge für den Mittelstand – MBSE leicht. In: MAURER, M.; SCHULZE, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering 2016, Herzogenaurach, 2016
- [Hel12] HELLENBRAND, D.: Transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung, TU München, Deutschland, 2012
- [HFW+12] HABERFELLNER, R.; FRICKE, E.; WECK, O. DE; VÖSSNER, S.: Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung. Orell Füssli Verlag, Zürich, 12. Auflage, 2012
- [Hit07] HITCHINS, D. K.: Systems engineering – A 21st century systems methodology. John Wiley, Chichester, 2007
- [Hon04] HONOUR, E.: Understanding the Value of Systems Engineering. NCOSE (Hrsg.): Proceedings of the 14th Annual INCOSE International Symposium, 2004
- [Hon13] HONOUR, E.: Systems engineering return on investment. Dissertation, University of South Australia, 2013
- [Hub76] Hubka, V.: Theorie der Konstruktionsprozesse – Analyse der Konstruktionstätigkeiten. Springer Verlag, Berlin, 1976
- [HV06] HONOUR, E.; VALERDI, R.: Advancing an Ontology for Systems Engineering to Allow Consistent Measurement. Conference on Systems Engineering Research, 2006
- [IEEE1220] IEEE STANDARDS ASSOCIATION: 1220-2005 - IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process, 2005
- [INC12-ol] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE): Guide for the Application of Systems Engineering in Large Infrastructure Projects. Developed by the INCOSE Infrastructure Working Group. Unter: http://www.incose.org/docs/default-source/Working-Groups/infrastructure-wg-documents/guide_for_the_application_of_se_in_large-infrastructure-projects-2012-0625-to-approved-update-2013-0417.pdf?sfvrsn=10, 17. Juli 2017

- [INC14-ol] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE): Systems Engineering Vision 2025. Unter: <http://www.incose.org/docs/default-source/aboutse/se-vision-2025.pdf?sfvrsn=4>, 13. Oktober 2014
- [INC15] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE): Systems Engineering Handbook – A guide for system life cycle processes and activities. 4th edition, Wiley John, New Jersey, 2015
- [INC16-ol] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE): What is Systems Engineering? Unter: <http://www.incose.org/AboutSE/WhatIsSE>, 20. März 2017
- [Ins16-ol] INSTITUT FÜR MITTELSTANDSFORSCHUNG BONN: Definitionen. Unter: <http://www.ifm-bonn.org/definitionen/>, 10. April 2017
- [Ise07] ISERMANN, R.: Mechatronische Systeme – Grundlagen. 2. vollständig neu bearb. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [ISO/IECTR29110] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION/ INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: ISO/IEC TR 29110-6-5-2:2014, Systems and software Engineering – Systems Engineering lifecycle profiles for very small Entities, Switzerland, 2014
- [ISO15288] INTERNATIONAL STANDARDISATION ORGANISATION (ISO) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC): Systems and software engineering – System life cycle processes. ISO/IEC 15288:2008(E), ISO copyright office, Genf, 2008
- [ISO15288] ISO/IEC 15288: ISO/IEC 15288 – Systems and Software Engineering - System Life Cycle Processes, 2008
- [Kah12] KAHL, S. M.: Rahmenwerk für einen selbstoptimierenden Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 308, Paderborn, 2012
- [Kai13] KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlags-schriftenreihe, Band 327, Paderborn, 2013
- [KH97] KRÜGER, W.; HOMP, C.: Kernkompetenz-Management – Steigerung von Flexibilität und Schlagkraft im Wettbewerb. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1997
- [LCP15] LAPORTE, C. Y.; O'CONNOR, R.; PAUCAR, L.: Software Engineering Standards and Guides for Very Small Entities – Implementation in two start-ups. 10th International Conference on Evolution of Novel Approaches to Software Engineering (ENASE 2015), Barcelona, 2015
- [LHM14] LAPORTE, C. Y.; HOUDE, R.; MARVIN, J.: Systems Engineering International Standards and Support Tools for Very Small Enterprises. 24th Annual International Symposium of INCOSE, Las Vegas, USA, 2014
- [Lin09] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3., korrigierte Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2009
- [Lin16] LINDEMANN, U.: Handbuch Produktentwicklung. Hanser Verlag, München, 2016
- [MHJ+09] MEERKAMM, H.; HENRICH, A.; JABLOWSKI, S.; KRCHMAR, H.; LINDEMANN, U.; RIEG, F. (Hrsg.): Flexible Prozessunterstützung in der Produktentwicklung: Prozesse - Daten - Navigation – Abschlussbericht 01.10.2006 - 30.09.2009. Shaker, Aachen, 2009
- [Möh12] MÖHRINGER, S.: Systems Engineering im Mittelstand. In: MAURER, M.; SCHULZE, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineerings 2012, Paderborn, 2012
- [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

- [OMG11-ol] OBJECT MANAGEMENT GROUP (OMG): Business Process Model and Notation (BPMN) – Version 2.0. Unter: www.omg.org, 2011
- [OMG17-ol] OBJECT MANAGEMENT GROUP (OMG): Model-Based Systems Engineering (MBSE) Wiki Unter: <http://www.omgwiki.org/MBSE/doku.php>, 22. Mai 2017
- [PB77] PAHL, G.; BEITZ, W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung. Springer Verlag, Berlin, 1977
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung. Springer Verlag, Berlin, 2007
- [Pon06] PONN, J. C.: Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung, TU München, München, 2006
- [Püm92] PÜMPIN, C.: Strategische Erfolgspositionen – Methodik der dynamischen strategischen Unternehmensführung. Haupt, Bern, 1992
- [RLH96] REINHART, G.; LINDEMANN, U.; HEINZL, J.: Qualitätsmanagement – Ein Kurs für Studium und Praxis. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1996
- [Roe11] ROELOFSEN, J. M. K.: Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen. Verlag Dr. Hut, München, 2011
- [Rop09] ROPOHL, G.: Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik. 3., überarb. Auflage, Univ.-Verl. Karlsruhe, Karlsruhe, 2009
- [Rüb16] RÜBBELKE, R.: Systematik zur innovationsorientierten Kompetenzplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 350, Paderborn, 2016
- [Sch01] SCHEER, A.-W.: ARIS - Modellierungsmethoden, Metamodelle, Anwendungen. 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2001
- [SE12] STEFFEN, D.; EBBESMEYER, P.: Bewertung und Aufbau von Systems Engineering Kompetenz in mittelständischen Entwicklungsnetzwerken. In: MAURER, M.; SCHULZE, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering 2012, Paderborn, 2012
- [SEB15-ol] GUIDE TO THE SYSTEMS ENGINEERING BODY OF KNOWLEDGE (SEBoK): Systems Engineering - Effectiveness Analysis. SEBoK, 2015 Unter: http://sebokwiki.org/wiki/System_Analysis, 22. April 2017
- [SEB16] BODY OF KNOWLEDGE AND CURRICULUM TO ADVANCE SYSTEMS ENGINEERING (BKCASE): Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK). Version 1.6, 2016
- [SEI10] SOFTWARE ENGINEERING INSTITUTE: CMMI for Development – Improving processes for developing better products and services. Carnegie Mellon University, 2010
- [She96] SHEARD, S. A.: Twelve Systems Engineering Roles. In: International Council on Systems Engineering (INCOSE) (Hrsg.): Proceedings of the 6th INCOSE Annual International Symposium, Boston, Massachusetts, USA, 1996
- [She97] SHEARD, S. A.: The Frameworks Quagmire, A Brief Look. INCOSE International Symposium, Los Angles, 1997
- [Sim09] SIMON, H.: Hidden Champions of the Twenty-First Century – Success Strategies of Unknown World Market Leaders. Springer Verlag, Dordrecht, 2009
- [SPP17] SPP GMBH: innovations-wissen.de. Das Fachportal für Strategie- und Innovationswissen. Unter: www.innovations-wissen.de, 13. November 2017
- [Sta08-ol] STATISTISCHES BUNDESAMT: Klassifikation der Wirtschaftszweige. Unter: https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/GueterWirtschaftsklassifikationen/klassifikationwz2008_erl.pdf?__blob=publicationFile, 21. März 2017

- [Str04] STRASSER, C.: Einsatz von Methoden in der Produktentwicklung - Ein Beitrag zur praxisgerechten Auswahl und Anwendung. Dissertation, Technische Universität Wien, Fakultät Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, Wien, 2004
- [Str98] STRUBE, G.: Modelling Motivation and Action Control in Cognitive Systems. In: SCHMID, U.; KREMS, J. F.; WYSOCKI, F.: Mind Modelling, Pabst, Berlin, 1998
- [Tsc16] 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
- [VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206, Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [VDI2221] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technische Systeme und Produkte. VDI-Richtlinie 2221, Beuth Verlag, Düsseldorf, 1993
- [VDI2235] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren; Methoden und Hilfen. VDI-Richtlinie 2235, Beuth Verlag, Düsseldorf, 1987
- [VDM14] VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU (HRSG.): Maschinenbau in Zahl und Bild. Frankfurt am Main, 2014
- [VDM17] VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU (HRSG.): Maschinenbau in Zahl und Bild. Frankfurt am Main, 2017
- [VM06] V-Modell-XT: V-Modell-XT-Gesamt-Deutsch-V1.4 (1), 2006
- [VM14] VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU; MCKINSEY & COMPANY (HRSG.): Zukunftsperspektive deutscher Maschinenbau Erfolgreich in einem dynamischen Umfeld agieren. 2014
- [Wei14] WEILKENS, T.: Systems Engineering mit SysML/UML – Modellierung, Analyse, Design. 3. Auflage, dpunkt, Heidelberg, 2014
- [Win13] WINZER, P.: Generic Systems Engineering – Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung. Springer Verlag, Heidelberg, 2013
- [Zan99] ZANKER, W.: Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München. Shaker Verlag, Band 36, Aachen, 1999
- [ZWE15] ZENTRUM FÜR EUROPÄISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG GMBH (ZEW) Mannheim: Innovationspanel Branchenreport Innovation 2014 Maschinenbau, Mannheim 2015

Anhang

	Inhaltsverzeichnis	Seite
A1	Ergänzende Hilfsmittel.....	A-1
A1.1	Liste der Transferprojekte	A-1
A1.2	Adressierte Problemstellungen der Unternehmen aus den Transferprojekten.....	A-3
A1.3	Nutzenpotentialsteckbriefe	A-5
A1.4	Nutzenpotentiale/ Unternehmensausprägungen	A-10
A1.5	Prozess- und Methodenlandkarte	A-11
A2	Methode zum Vergleich von verschiedenen MBSE-Werkzeugen....	A-19
A3	Vorgehen zur schrittweisen Einführung von Systems Engineering aus der Schulungsperspektive.....	A-21

A1 Ergänzende Hilfsmittel

A1.1 Liste der Transferprojekte

Tabelle A-1: Auswertung der Problemstellungen der Transferprojekte anhand der drei vorgestellten Stoßrichtungen

	Zuordnung der Transferprojekte mit den Stoßrichtungen zur Initiierung eines SE Transferprojekts X = Die Ausgangslage des Transferprojekts lässt sich der Stoßrichtung zuordnen	Stoßrichtung 1	Stoßrichtung 2	Stoßrichtung 3
Nr.	Transferprojekte			
1	Disziplinübergreifendes Variantenmanagement zur Reduzierung der Entwicklungskosten	X		
2	Effizienzsteigerung in der Produktentstehung durch transparente Anforderungen und Systemstrukturmodellierung	X		
3	Mechatronischer Entwurf eines optimalen Versorgungsmoduls für Lebensmittelfarbe	X		
4	Interdisziplinäre Projektierung von vernetzten Systemen	X		
5	Einführung der virtuellen Inbetriebnahme zur Effizienzsteigerung der Entwicklung in der Automatisierungs-technik	X		
6	Modellgetriebene Entwicklung von Schrittketten zur Steuerung von Anlagenmodulen	X		
7	Modularer Aufbau einer Verpackungsmaschine – Tray- und Wrap-Around-Packer	X		
8	Integrative Konzipierung einer Kolben-Kompressoren-Baureihe	X	X	
9	Intelligenter Baukasten für Werkzeugmaschinen	X	X	
10	Modellbasierter Entwurf eines neuartigen Operationstisches	X	X	
11	Systems Engineering einer Profilumantelungsanlage		X	
12	Zukunftsrobustes und innovatives Produkt-Service-Konzept		X	
13	Mechatronik Roadmap für intelligente Armaturen		X	
14	Mechatronische Optimierung einer Tangentialmaschine		X	
15	Technologie-Roadmap für das intelligente sensorüber-wachte Pflegebett		X	
16	Integration additiver Produktionstechnologien in den Produktentstehungsprozess	X	X	
17	Systematische Synthese einer Produktionslinie für Dämmrohren	X	X	

18	Systems Engineering einer intelligenten Zeilenkamera	X	X	
19	Mechatronischer Entwurf eines adaptiven Prüfstands für Variatorriemen		X	
20	Konzeptionierung eines Lösungs-Musterbaukastens für den Einsatz von Robotersystemen im Holzbearbeitungsbereich	X	X	
21	Schweißen von Mischwellen mittels hybridkinematischer Roboter	X		
22	Spezifikation und Analyse von 3D-Constraints im E-Commerce für den Anlagen- und Maschinenbau	X		
23	Virtuelle Inbetriebnahme eines Fertigungszentrums	X		
24	Virtuelle Inbetriebnahme in der Automatisierungstechnik	X		
25	Modellbasierte Verträglichkeitsanalyse der Interaktion des menschlichen Körpers mit kraftassistierenden Unterstützungssystemen	X		
26	Effiziente Softwareentwicklung für Stanznietsysteme	X		
27	Selbstoptimierende Scanpfad-Regelung für modulare Laser-Scanning-Mikroskope		X	
28	Entwurf eines automatisierten Prüf- und Wartungssystems für ein Seitenradar-Verkehrsmesssystem in Leitpfosten		X	
29	Aktivierung der Potentiale additiver Fertigungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau		X	
30	Charakterisierung und Analyse der Einsatzmöglichkeiten von AM-MID-Applikationen im Maschinen- und Anlagenbau		X	
31	Aktivierung der Potentiale additiver Fertigungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau		X	
32	Durchgängige Werkzeugunterstützung für Modell- und Dokumentbasiertes Requirements Engineering	X		X
33	Durchgängiger Entwicklungsprozess für den Maschinen- und Anlagenbau am Beispiel einer Holzbearbeitungsmaschine	X		X
34	Durchgängiges und bedarfsgerechtes SE am Beispiel einer Nähanlage zur automatisierten Fertigung von Hosenteilen	X		X
35	Entwicklung eines Methodenkoffers zur systematischen und lösungsneutralen Anforderungserhebung für Systemmaturen	X		X
36	Systems Engineering für Fahrzeugverbindungs- und Transportlösungen	X		X
37	Bedarfsgerechter Systems Engineering-Prozess			X
38	Toolbenchmark MBSE-Modeller für den Mittelstand und Konzept zur Integration in den Entwicklungsprozess			X
39	Prozessoptimierung von Neuanläufen in der mechatronischen Verbindungstechnik			X
40	Management von Systemmodellen mit SYNECT			X

A1.2 Adressierte Problemstellungen der Unternehmen aus den Transferprojekten

Tabelle A-2: Herausforderungen der Unternehmen (Stoßrichtung Effektive und effiziente Entwicklung von kundenindividuellen Marktleistungen)

Stoßrichtung 1:
Projektierung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe Anzahl von unterschiedlichen Auftrags- und Kleinserienfertigungsprojekten ▪ Unstrukturierter Entwicklungsprozess ▪ Zeitraubenden Iterationsschleifen ▪ Teure und zeitraubende physikalische Prototypen bei der Optimierung der Systeme ▪ Ungenaue Vorhersagbarkeit von Terminen der Fertigstellung ▪ Heterogene Kundenstrukturen: Projektierung, Konstruktion, Fertigung und den Service für Lösungen für die äußerst unterschiedlichen Kunden ▪ Kundenindividuelle Entwicklungsaufträge (Sonderanfertigungen mit Losgröße 1) ▪ Komplexe Prüfzusammenhänge führen zu Problemen ▪ Frühzeitige Testspezifikation
Definition, Analyse und Beherrschung v. Anforderungen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Komplexe Anforderungen des Kunden verstehen ▪ Dokumentation der Kundenanforderungen ▪ Systematische und lösungsübergreifende Aufnahme von Anforderungen
Verstehen von Änderungsauswirkungen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anforderungsänderungen ▪ Intransparente Änderungsauswirkungen ▪ Fehleinschätzungen in der Planung sowie Fehler in der Entwicklung oder in der Umsetzung von Änderungen ▪ Fehleinschätzungen in der Bewertung von Änderungen ▪ Kontinuierlichen Anforderungsänderungen (durch den Kunden) ▪ Änderungsaufwand entsteht erst in der Endmontage und Inbetriebnahme der Sondermaschinen ▪ Fehlende Nachverfolgbarkeit der Entwicklung (Traceability)
Beherrschung von Variantenvielfalt
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe Variantenvielfalt beherrschen ▪ Kundenindividuelle Maschinen anbieten, aber weitestgehend auf Standard-Lösungen zurückzugreifen ▪ Hohe Externe Komplexität ermöglichen bei gleichzeitig geringer internen Komplexität
Wiederverwendbarkeit von Lösungswissen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wiederverwendung von Lösungen und deren Kombination zu kundenindividuellen Maschinen ▪ Geringe Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit der Teilkomponenten ▪ Fehlende Wiederverwendung von Lösungen verlangsamt die Projektabwicklung

Tabelle A-3: Herausforderungen der Unternehmen (Systematisches Erarbeiten von Produkt- und/oder Dienstleistungsinnovationen)

Stoßrichtung 2:
<p>Weiterentwicklung von Marktleistungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestehende Produkte/ Fertigungsprozesse verbessern/ effizienter gestalten ▪ Von mechanischen Produkten zu mechatronischen Produkten ▪ Einsatzszenarien für neue Produktideen analysieren ▪ Produkte systematisch weiterentwickeln <p>Wandel vom Produktanbieter zum Systemanbieter</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wandel vom Produktanbieter zum Anbieter von Marktleistungen (Produkt und Service) ▪ Möglichst schneller Markteintritt wichtig (time to market) ▪ Neue (unbekannte) Technologien nutzen ▪ Neue Märkte systematisch erschließen ▪ Neue Geschäftsmodelle umsetzen ▪ Und wie entscheide ich, welche Funktionen ich wann und wie umsetze?

Tabelle A-4: Herausforderungen der Unternehmen (Stoßrichtung Unternehmensinterne Veränderungen vollziehen)

Stoßrichtung 3:
<p>Zunehmende Interdisziplinarität Kommunikation und Kooperation</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusammenarbeit in interdisziplinären Entwicklungsteams ▪ Neuen Fachexperten müssen mit etablierten Experten zusammenarbeiten ▪ Wandel der Produkte erfordert Wandel des Entwicklungsteams ▪ Steigende Vernetzung der Produkte ▪ Handhabung der vielfältigen disziplin-, tool- und stakeholderübergreifenden Abhängigkeiten ▪ Fachdisziplinübergreifende Modularisierung und (Schnittstellen-) Standardisierung ▪ Systemintegration <p>Unstrukturierte Kommunikation und Kooperation</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Abstimmung zwischen Kundensicht (Kunde/ Vertrieb) und Entwicklung verbessern ▪ mit externen Zulieferer bzw. Dienstleister ▪ zwischen Produkt- und Produktionsplanung/systementwicklung ▪ zwischen verschiedenen Abteilungen (Bisheriges Denken in geistigen Mauern)

A1.3 Nutzenpotentialsteckbriefe

Nutzenpotentialesteckbrief N1 Modellbasierte Produktinnovationen



Marktleistung schrittweise weiterentwickeln, Innovations- und Verbesserungspotentiale für Produkte und Serviceleistungen erkennen.

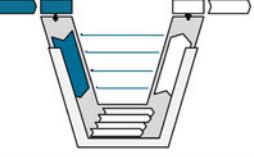
Nutzenpotentialliste:	Anwendungsbereich/ Aufgabenbereich SE:						
<ul style="list-style-type: none"> Identifikation von Innovationspotentialen Einsatzszenarien neuer Produkte systematisch analysieren und Anforderungen erheben Einsatzszenarien neuer Technologie im Unternehmen analysieren und bewerten Bestehende Produkte durch systematische disziplinübergreifende Analysen optimieren, Verbesserungspotentiale erkennen, neue Technologien, Funktionen integrieren Produktgenerationen – Weiterentwicklungen systematisch planen und bereits frühzeitig in Produktkonzepten berücksichtigen Aus Änderungen des Geschäftsmodells konsequent und systematisch neue Anforderungen an das Produkt und Service ermitteln und in die Gestaltung überführen 	<ul style="list-style-type: none"> Mission/Purpose Definition Requirements Engineering 						
Systemmodell:							
	<ul style="list-style-type: none"> Partialmodelle: Umfeldmodell, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktionen Modellierungszweck: Systemgrenzen definieren, Problemverständnis sicherstellen, Kommunikation befähigen, Kooperation unterstützen, Innovation befähigen, Interdisziplinäre Systembetrachtung 						
Maßgeblich relevante Rollen/ Funktionsbereiche:	Formalisierungsgrad						
<ul style="list-style-type: none"> Anforderungsmanagement Customer Interface / Kundensicht Kunde Systementwickler Verbinder Produktplaner Vertrieb Entwicklung Service 	<table border="1"> <tr> <td>nicht formal</td> <td>semi formal</td> <td>formal</td> </tr> <tr> <td>██████████</td> <td>██████████</td> <td>██████████</td> </tr> </table>	nicht formal	semi formal	formal	██████████	██████████	██████████
nicht formal	semi formal	formal					
██████████	██████████	██████████					
Relevante Prozesse und Methoden:							
Zum Beispiel:							
	Prozessschritt: Produktidee beschreiben Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Produktideensteckbrief System Footprint						
	Prozessschritt: Use Cases analysieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Anwendungsszenarien Use Cases FAS Methode						
	Prozessschritt: Ermitteln der Nutzer und der Stakeholder Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Stakeholderanalyse Anwendungsszenarien Use Cases						
	(siehe Prozess- und Methodenlandkarte)						
Beispielprojekte:							
<ul style="list-style-type: none"> Charakterisierung und Analyse der Einsatzmöglichkeiten von generativ erzeugten MID-Applikationen im Maschinen- und Anlagenbau 	<ul style="list-style-type: none"> Konzeptionierung eines Lösungsmusterbaukastens für den Einsatz von Robotersystemen im Holzbearbeitungsbereich 						

Bild A-1: Steckbrief Nutzenpotential modellbasierte Produktinnovationen (N1)

Nutzenpotentialesteckbrief N2 Transparente Anforderungsdokumentation

 <p>Anforderungen systematisch und interdisziplinär erheben, dokumentieren und verwalten. Kundenprobleme analysieren und verstehen, als Grundlage für eine fundierte Angebotserstellung.</p>								
Nutzenpotentialliste: <ul style="list-style-type: none"> Anforderungen systematisch und interdisziplinär erheben, dokumentieren und verwalten Kommunikation und Kooperation mit dem Kunden systematisch unterstützen, Problemstellungen und Anforderungen an Systemlösungen vollständig erfassen Kundenanfragen effizient und belastbar bearbeiten durch eine systematische Aufnahme und Analyse der Kundenanforderungen inkl. der Analyse der Systemumgebung Angebote unter Einbeziehung der beteiligten Fachexperten erstellen und so Kundenzufriedenheit und Termintreue sicherstellen Anforderungen neuer Kundenbranchen systematisch erschließen Zubeachtenden Gesetze, Standard, Nachweise frühzeitig in die Anforderungsaufnahme mit einschließen 	Anwendungsbereich/ Aufgabenbereich SE: <ul style="list-style-type: none"> Mission/Purpose Definition Requirements Engineering 							
Systemmodell: <ul style="list-style-type: none"> Partialmodelle: Umfeldmodell, Anwendungsszenarien, Anforderungen Modellierungszweck: Problemverständnis sicherstellen, Kommunikation befähigen, interdisziplinäre Systembetrachtung, Dokumentation bereitstellen, Traceability ermöglichen 								
Formalisierungsgrad <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 33%;">nicht formal</td> <td style="width: 33%;">semi formal</td> <td style="width: 33%;">formal</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>			nicht formal	semi formal	formal			
nicht formal	semi formal	formal						
Relevante Prozesse und Methoden: <p>Zum Beispiel:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; padding: 5px;"> Prozessschritt: Systemumfeld analysieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Blockboxbetrachtung CONSENS Umfeldanalyse </td> <td style="width: 33%; padding: 5px;"> Prozessschritt: Systemanforderungen ableiten Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Anforderungsliste Anforderungsmodellierung LITHE Methode SYSMOD </td> <td style="width: 33%; padding: 5px;"> Prozessschritt: Analysieren und Nachpflegen von Anforderungen Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Anforderungsliste Anforderungsmodellierung Anforderungspriorisierung </td> </tr> </table> <p>(siehe Prozess- und Methodenlandkarte) </p>			Prozessschritt: Systemumfeld analysieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Blockboxbetrachtung CONSENS Umfeldanalyse	Prozessschritt: Systemanforderungen ableiten Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Anforderungsliste Anforderungsmodellierung LITHE Methode SYSMOD	Prozessschritt: Analysieren und Nachpflegen von Anforderungen Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Anforderungsliste Anforderungsmodellierung Anforderungspriorisierung			
Prozessschritt: Systemumfeld analysieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Blockboxbetrachtung CONSENS Umfeldanalyse	Prozessschritt: Systemanforderungen ableiten Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Anforderungsliste Anforderungsmodellierung LITHE Methode SYSMOD	Prozessschritt: Analysieren und Nachpflegen von Anforderungen Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Anforderungsliste Anforderungsmodellierung Anforderungspriorisierung						
Beispielprojekte: <ul style="list-style-type: none"> Durchgängige Werkzeugunterstützung für modell- und dokumentbasiertes Requirements Engineering Entwicklung eines Methodenkoffers zur systematischen und lösungsneutralen Anforderungs-erhebung für Systemarmaturen 								

Bild A-2: Steckbrief Nutzenpotential transparente Anforderungsdokumentation (N2)

Nutzenpotentialesteckbrief N4 Frühzeitige Analysen

 <p>Frühzeitige Analysen von Produktkonzepten und Projektplänen, Risiken, Änderungsbedarfen und Unklarheiten frühzeitig erkennen, abschätzen und Maßnahmen ergreifen, z.B. hinsichtlich Kosten, Zuverlässigkeit und Änderungsauswirkungen.</p>								
<p>Nutzenpotentialiste:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produktkonzepte und Projektpläne systematisch und frühzeitig hinsichtlich verschiedener Aspekte analysieren und Risiken, Änderungsbedarfe und Unklarheiten frühzeitig erkennen, abschätzen und Maßnahmen ergreifen • Änderungsauswirkungen systematisch erkennen und analysieren, transparent darstellen und bewerten (fachbereichsübergreifend) • Zeit- und kostenintensive Iterationsschleifen in der Inbetriebnahme reduzieren mit Hilfe frühzeitiger virtueller Inbetriebnahme 	<p>Anwendungsbereich/Aufgabenbereich SE:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technical Analysis 							
<p>Systemmodell:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Partialmodelle: Funktionen, Wirkstruktur, Verhalten • Modellierungszweck: Impactanalysen durchführen, Verifikation und Validierung, Analysen unterstützen, Simulation unterstützen, Qualität verbessern, Risiko verringern, Entscheidungsunterstützung (Techn.) 								
<p>Formalisierungsgrad</p> <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 33%;">nicht formal</td> <td style="width: 33%;">semi formal</td> <td style="width: 33%;">formal</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>			nicht formal	semi formal	formal			
nicht formal	semi formal	formal						
<p>Relevante Prozesse und Methoden:</p> <p>Zum Beispiel:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; padding: 5px;"> Prozessschritt: Analyse des dyn. Verhaltens Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Methode zur Analyse des dynamischen Verhaltens </td> <td style="width: 33%; padding: 5px;"> Prozessschritt: Analyse des Risikomanagements Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Architecture Trade-Off Analysis Method Gefahren- und Risikoanalyse (PHA) </td> <td style="width: 33%; padding: 5px;"> Prozessschritt: Analyse der Robustheit des Produktkonzepts Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Methode zur Analyse der Robustheit </td> </tr> </table> <p>(siehe Prozess- und Methodenlandkarte)</p> 			Prozessschritt: Analyse des dyn. Verhaltens Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Methode zur Analyse des dynamischen Verhaltens	Prozessschritt: Analyse des Risikomanagements Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Architecture Trade-Off Analysis Method Gefahren- und Risikoanalyse (PHA)	Prozessschritt: Analyse der Robustheit des Produktkonzepts Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Methode zur Analyse der Robustheit			
Prozessschritt: Analyse des dyn. Verhaltens Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Methode zur Analyse des dynamischen Verhaltens	Prozessschritt: Analyse des Risikomanagements Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Architecture Trade-Off Analysis Method Gefahren- und Risikoanalyse (PHA)	Prozessschritt: Analyse der Robustheit des Produktkonzepts Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Methode zur Analyse der Robustheit						
<p>Beispielprojekte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modellbasierte Verträglichkeitsanalyse der Interaktion des menschlichen Körpers mit kraftassistierenden Unterstützungssystemen • Virtuelle Inbetriebnahme eines Fertigungszentrums • Virtuelle Inbetriebnahme in der Automatisierungstechnik 								

Bild A-3: Steckbrief Nutzenpotential frühzeitige Analysen (N4)

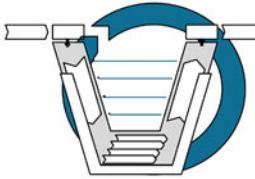
Nutzenpotentialesteckbrief N5 Fachabteilungsübergreifendes Projektmanagement							
	Interdisziplinäre Zusammenarbeit über Abteilungs- und Fachbereichsgrenzen hinaus unterstützen, parallele Projekte managen und optimale Ausnutzung und Synchronisation der Ressourcen sicherstellen.						
Nutzenpotentialiste:	Anwendungsbereich/Aufgabenbereich SE:						
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktkonzept und Projektplan im Wechselspiel planen und so eine optimale Ausnutzung und Synchronisation der Ressourcen sicherstellen ▪ Zusammenarbeit von Fachexperten mit langjähriger Berufs- und Produkterfahrung mit „neuen“ Experten systematisch unterstützen, Grundlage für Kommunikation und Kooperation bereitstellen ▪ Interdisziplinäre Zusammenarbeit über Abteilungs- und Fachbereichsgrenzen hinaus unterstützen ▪ Multiprojektmanagement unterstützen, durch transparente Projektierung ▪ Interdisziplinäre Entwicklungsprozesse und Wechselwirkungen im Prozess mit Hilfe von Modellen transparent darstellen und Kommunikation und Kooperation fördern ▪ Nachverfolgbarkeit in der Entwicklung (traceability) für alle an der Entwicklung beteiligten Fachexperten sicherstellen ▪ Inkonsistenzen in der Projektdokumentation vorbeugen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technical Management/Leadership 						
Systemmodell:							
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Partialmodelle: Anwendungsszenarien, Anforderungen, Wirkstruktur ▪ Modellierungszweck: Problemverständnis sicherstellen, Kommunikation befähigen, Kommunikation unterstützen, interdisziplinäre Systembetrachtung, Lösungen kommunizieren, Produktkomplexität beherrschen, Dokumentation bereitstellen, Entscheidungsunterstützung (Techn.), Zusammenhänge aufzeigen, Entscheidungsunterstützung (Technisches Management) 						
Formalisierungsgrad							
nicht formal <input type="checkbox"/>	semi formal <input type="checkbox"/>	formal <input type="checkbox"/>					
Maßgeblich relevante Rollen/ Funktionsbereiche:	Relevante Prozesse und Methoden:						
Rollen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ alle 	<p>Zum Beispiel:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Prozessschritt: Systemverständis sicherstellen</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #FFD700; padding: 5px;">Ausgewählte/ Nützliche Methoden: CONSENS Kommunikationsplanung</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Prozessschritt: Ressourcen planen</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #FFD700; padding: 5px;">Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Mitarbeiterplanung Strukturplanung</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Prozessschritt: Termine planen</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #FFD700; padding: 5px;">Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Ablaufplanung Netzplantechnik Balken-Kapazitätsplanung</td> </tr> </table> <p>(siehe Prozess- und Methodenlandkarte)</p> 	Prozessschritt: Systemverständis sicherstellen	Ausgewählte/ Nützliche Methoden: CONSENS Kommunikationsplanung	Prozessschritt: Ressourcen planen	Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Mitarbeiterplanung Strukturplanung	Prozessschritt: Termine planen	Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Ablaufplanung Netzplantechnik Balken-Kapazitätsplanung
Prozessschritt: Systemverständis sicherstellen							
Ausgewählte/ Nützliche Methoden: CONSENS Kommunikationsplanung							
Prozessschritt: Ressourcen planen							
Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Mitarbeiterplanung Strukturplanung							
Prozessschritt: Termine planen							
Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Ablaufplanung Netzplantechnik Balken-Kapazitätsplanung							
Verstärkende Randbedingungen:							
<ul style="list-style-type: none"> ▪ mittlere und große Entwicklungsabteilungen ▪ nationale und intern. Entwicklungsstandorte ▪ Eigentwicklung u. Vergabe der Fertigung, ▪ Serien-, Varianten-, Einzelfertigung ▪ mittlere und hohe Produktkomplexität ▪ parallel laufende Projekte ▪ lange Entwicklungsdauer ▪ Verschiedene Entwicklungsdisziplinen, neue Entwicklungsdisziplinen ▪ Neuentwicklung 							
Beispielprojekte:							
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Durchgängiger Entwicklungsprozess für den Maschinen- und Anlagenbau am Beispiel einer Holzbearbeitungsmaschine 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Durchgängiges und bedarfsgerechtes Systems Engineering am Beispiel einer Nählanlage zur automatisierten Fertigung von Hosenteilen 						

Bild A-4: Steckbrief Nutzenpotential fachabteilungsübergreifendes Projektmanagement (N5)

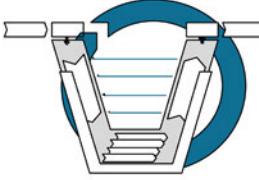
Nutzenpotentialesteckbrief N6 Unternehmensübergreifende Zusammenarbeit							
	Kommunikation und Kooperation über die Unternehmensgrenzen hinaus von der frühen Entwicklungsphase über den gesamten PEP systematisch unterstützen, z.B. mit Kunden, Zulieferern oder Dienstleistern.						
Nutzenpotentialiste:	Anwendungsbereich/ Aufgabenbereich SE:						
<ul style="list-style-type: none"> Kommunikation und Kooperation mit Kunden über den gesamten PEP systematisch unterstützen Kommunikation und Kooperation mit Zulieferern in der frühen Entwicklungsphase systematisch unterstützen Kommunikation und Kooperation mit Dienstleistern in der frühen Entwicklungsphase systematisch unterstützen Schulungsunterlagen für Vertriebs- und Servicemitarbeiter systematisch erarbeiten 	<ul style="list-style-type: none"> Scope Management 						
Maßgeblich relevante Rollen/ Funktionsbereiche:	Systemmodell:						
Rollen: <ul style="list-style-type: none"> Anforderungsmanagement Customer Interface / Kundensicht Systemverantwortlicher Process Engineer / Gesamtsystem-verantwortlicher 	Funktionsbereiche: <ul style="list-style-type: none"> Zulieferer Dienstleister Vertrieb und Service Entwicklung 						
	<ul style="list-style-type: none"> Partialmodelle: Anwendungsszenarien, Anforderungen, Wirkstruktur Modellierungszweck: Problemverständnis sicherstellen, interdisziplinäre Systembetrachtung, Lösungen kommunizieren, Produktkomplexität beherrschen, Dokumentation bereitstellen, Entscheidungsunterstützung (Techn.) , Entscheidungsunterstützung (technisches Management) 						
Verstärkende Randbedingungen:	Formalisierungsgrad						
<ul style="list-style-type: none"> überreg. und globale Kermärkte Vergabe von Entwicklungsaufgaben, Eigentwicklung u. Vergabe der Fertigung Plattformstrategie Einzelfertigung Vernetztes System, System of System Neuentwicklung 	<table border="1"> <tr> <td>nicht formal</td> <td>semi formal</td> <td>formal</td> </tr> <tr> <td>■</td> <td>■</td> <td>■</td> </tr> </table>	nicht formal	semi formal	formal	■	■	■
nicht formal	semi formal	formal					
■	■	■					
Beispielprojekte:	Relevante Prozesse und Methoden:						
<ul style="list-style-type: none"> Entwicklung eines Methodenkoffers zur systematischen und lösungsneutralen Anforderungserhebung für Systemarmaturen 	<p>Zum Beispiel:</p> <table border="1"> <tr> <td>Prozessschritt: Systemumfeld dokumentieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: CONSENS Umfeldmodellierung</td> </tr> <tr> <td>Prozessschritt: Schnittstellen spezifizieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Wirkstruktur erstellen</td> </tr> <tr> <td>Prozessschritt: Auftragsabstimmung Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Methode zur Erstellung eines Lastenheftes</td> </tr> </table> <p>(siehe Prozess- und Methodenlandkarte)</p> 	Prozessschritt: Systemumfeld dokumentieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: CONSENS Umfeldmodellierung	Prozessschritt: Schnittstellen spezifizieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Wirkstruktur erstellen	Prozessschritt: Auftragsabstimmung Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Methode zur Erstellung eines Lastenheftes			
Prozessschritt: Systemumfeld dokumentieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: CONSENS Umfeldmodellierung							
Prozessschritt: Schnittstellen spezifizieren Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Wirkstruktur erstellen							
Prozessschritt: Auftragsabstimmung Ausgewählte/ Nützliche Methoden: Methode zur Erstellung eines Lastenheftes							

Bild A-5: Steckbrief Nutzenpotential unternehmensübergreifende Zusammenarbeit (N6)

A1.4 Nutzenpotentiale/ Unternehmensausprägungen

		Zusammenhangsmatrix Ausprägungen und Nutzenpotentiale					
		Fragestellung: „Verstärkt die Ausprägung eines Merkmals i (Zeile) die Bedeutung eines Nutzenpotentials j (Spalte)?“					
		Bewertungsskala: 0 = kein erheblicher Einfluss 1 = erheblicher Einfluss					
Merkmale		Ausprägungen					
		Nr.	N1	N2	N3	N4	N5
Unternehmensmerkmale	Größe der Entwicklungsabteilung	klein <10	A01	0	0	0	0
		mittel (10-50)	A02	0	1	1	0
		groß >50	A03	0	1	1	0
	Entwicklungsstandorte	lokal	B01	0	0	0	0
		national	B02	0	1	1	0
		international	B03	0	1	1	0
	Kernmärkte	regional	C01	0	0	0	0
		überregional	C02	0	1	0	0
		global	C03	0	1	0	0
	Marktsegment	Preisführerschaft	D01	0	1	0	1
		Differenzierung	D02	1	1	1	0
		Technologie-/Innovationsführerschaft	D03	1	1	1	0
		Qualitätsführer	D04	0	1	1	0
Produktmerkmale	Zertifizierungsaufwand/Nachweispflicht	gering	E01	0	0	0	0
		mittel	E02	0	1	1	1
		hoch	E03	1	1	1	1
	Wertschöpfungstyp	Vergabe von Entwicklungsaufgaben	F01	0	1	0	0
		Eigenentw. u. Vergabe d. Fertigung	F02	1	1	1	1
		Eig. Entwicklung und Fertigung	F03	1	1	1	0
	Produktportfolio	Individualstrategie	G01	0	1	1	1
		Modulstrategie	G02	1	1	1	0
		Plattformstrategie	G03	1	1	1	1
	Losgröße	Serienfertigung	H01	1	1	1	1
		Variantenfertigung	H02	0	1	1	1
		Einzelfertigung	H03	0	1	1	1
Projektmerkmale	Produktkomplexität	gering	I01	0	0	0	0
		mittel	I02	0	0	1	1
		hoch	I03	0	1	1	1
	Vernetzung des Produkts	eigenständiges System	J01	0	0	0	0
		Vernetztes System	J02	0	1	1	1
		System of System	J03	0	1	1	1
	Wie viele Projekte laufen parallel?	1-5	K01	0	0	0	0
		6-15	K02	0	0	0	1
		mehr als 15	K03	0	0	0	1
	Dauer des Projekts	< 3 Monate	L01	0	0	0	0
		3 bis 12 Monate	L02	0	1	1	1
		> 12 Monate	L03	0	1	1	1
	Verschiedene Entwicklungsdisziplinen	nein	M01	0	0	0	0
		ja (M,E,S)	M02	1	1	1	1
		ja neue	M03	1	1	1	1
	Projekttyp	Neuentwicklung	N01	1	1	1	1
		Anpassungsentwicklung	N02	0	1	0	1
		Variantenentwicklung	N03	0	1	0	1

Bild A-6: Zusammenhangsmatrix von Merkmalsausprägungen und Nutzenpotentialen

A1.5 Prozess- und Methodenlandkarte

N	Prozessschritte	Ausgewählte / Nützliche Methoden (bzw. Hilfsmittel)		
Modellbasierte Produktinnovationen	Produktidee beschreiben	Produktideensteckbrief 	System Footprint 	SYSMOD
	Verbesserungspotentiale identifizieren	Interviews 	FMEA im Systementwurf 	Identifikation von Selbstoptimierungspotential
	Produktportfolio planen	Design für Variety nach ISHII/MARTIN 	Product feature matrix 	Vamos
	Varianten planen	Feature Modellierung 	Vamos 	
	Ermitteln der Nutzer und der Stakeholder	Stakeholderanalyse 	CONSENS - Anwendungsszenarien 	USE Case (SysML)
	Systemumfeld analysieren	Blackboxbetrachtung 	CONSENS - Umfeldanalyse 	
	Use Cases analysieren	CONSENS - Anwendungsszenarien 	USE Case (SysML) 	FAS
	Anforderungen erheben	Anforderungsliste 	Anforderungsmodellierung 	RUP SE
		Harmony SE nach Telelogic/IBM 	RFLP Methode 	

Bild A-7: Prozess- und Methodenlandkarte modellbasierte Produktinnovationen (Teil I)

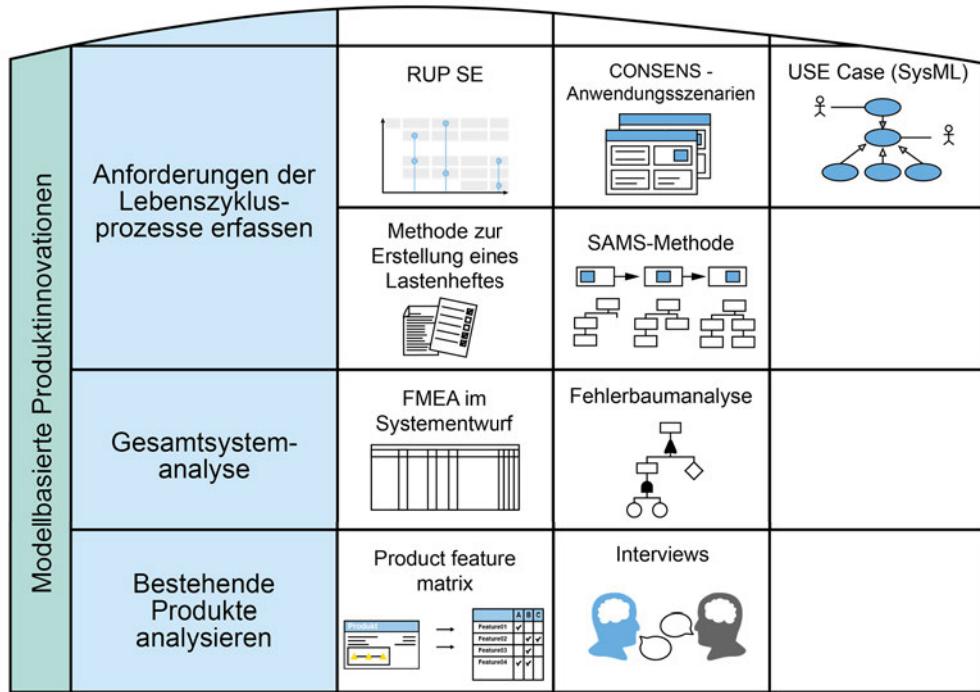


Bild A-8: Prozess- und Methodenlandkarte modellbasierte Produktinnovationen (Teil 2)

N	Prozessschritte	Ausgewählte / Nützliche Methoden (bzw. Hilfsmittel)		
Transparente Anforderungsdokumentation	Nutzer und Stakeholder ermitteln	System Footprint 	Stakeholder-analyse 	Nutzeranalyse
	Systemumfeld analysieren	Blackboxbetrachtung 	CONSENS - Umfeldanalyse 	
	Use Cases analysieren	CONSENS - Anwendungsszenarien 	USE Case (SysML) 	FAS
	Anforderungen erheben	Anforderungsliste 	Anforderungsmodellierung 	Harmony SE nach Telelogic/IBM
		RFLP Methode 	Methode zur Erstellung eines Lastenheftes 	
	Anforderungen der Lebenszyklusprozesse erfassen	CONSENS - Anwendungsszenarien 	USE Case (SysML) 	Methode zur Erstellung eines Lastenheftes
	System-anforderungen ableiten	Anforderungsliste 	Anforderungsmodellierung 	LITHE Methode
		SYSMOD 		

Bild A-9: Prozess- und Methodenlandkarte transparente Anforderungsdokumentation

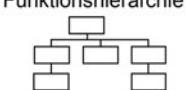
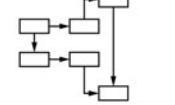
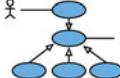
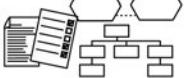
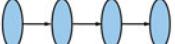
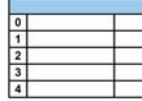
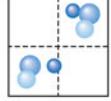
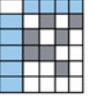
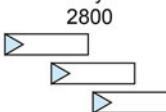
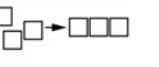
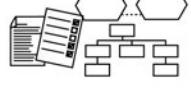
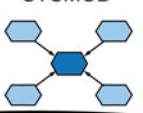
N	Prozessschritte	Ausgewählte / Nützliche Methoden (bzw. Hilfsmittel)		
Fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung	Funktionen modellieren	CONSENS - Funktionshierarchie 	Funktionsstruktur 	Harmony SE nach Telelogic/IBM 
	Lösungsidee erstellen	FAS 	RFLP Methode 	
		Morphologischer Kasten 	Design für Variety nach ISHII/MARTIN 	Axiomatic Design 
	Lösungsidee bewerten und validieren	LITHE Methode 		
		Nutzwertanalyse 	Portfolio 	Paarweiser Vergleich 
	Wirkstruktur aufstellen	Wertanalyse VDI 2800 		
		CONSENS - Wirkstruktur 	Produktstrukturierung nach STEFFEN 	Harmony SE nach Telelogic/IBM 
		LITHE Methode 	RFLP Methode 	RUP SE 
		SYSMOD 		

Bild A-10: Prozess- und Methodenlandkarte fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung (Teil 1)

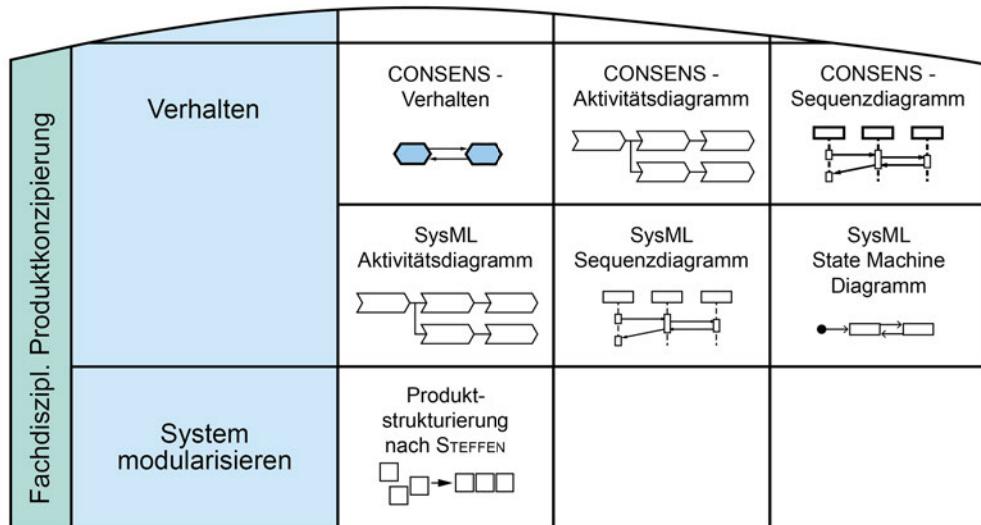


Bild A-11: Prozess- und Methodenlandkarte fachdisziplinübergreifende Produktkonzipierung (Teil 2)

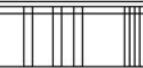
NP	Prozessschritte	Ausgewählte / Nützliche Methoden (bzw. Hilfsmittel)		
Frühzeitige Analysen	Frühzeitige Analyse der Änderungsaufwände	Änderungsnachverfolgung am Systemmodell 	Impactanalysen 	
	Frühzeitige Analyse des Risikomanagement	Architecture Trade-Off Analysis Method 	Risikoanalyse 	
	Frühzeitige Analyse der Zuverlässigkeit	Analyse der Zuverlässigkeit 	Fehlerbaumanalyse 	FMEA im Systementwurf 
	Frühzeitige Analyse der Kosten	Analyse der Herstellkosten 	Zielkostenmanagement 	
	Frühzeitige Analyse der Robustheit des Produktkonzepts	Analyse der Robustheit 		
	Frühzeitige Analyse des dynamischen Verhaltens	Analyse des dynamischen Verhaltens 		

Bild A-12: Prozess- und Methodenlandkarte frühzeitige Analysen

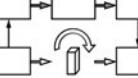
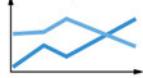
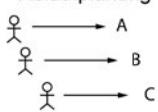
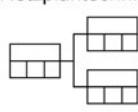
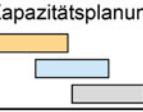
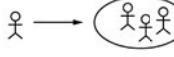
N	Prozessschritte	Ausgewählte / Nützliche Methoden (bzw. Hilfsmittel)		
Fachabteilungsübergreifendes Projektmanagement	Rollen und Befugnisse festlegen	Verantwortlichkeitsmatrix 	Kommunikationsplanung 	
	Entwicklungsprozess steuern	Selbstoptimierende Entwicklungsprozessgestaltung 	Analogiemethode 	Aufwandstrendanalyse 
		Meilensteintrendanalyse 		
	Termine planen	Ablaufplanung 	Netzplantechnik 	Balken und Kapazitätsplanung 
		Terminierung 		
	Ressourcen planen	Mitarbeiterplanung 	Strukturplanung Bottom up 	Strukturplanung Top down 
	Frühzeitige Risikoanalyse anhand des Systemmodells	Architecture Trade-Off Analysis Method 	Gefährdungs- und Risikoanalyse (PHA) 	
	Einheitliches Gesamtverständnis sicherstellen	CONSENS 	Kommunikationsplanung 	

Bild A-13: Prozess- und Methodenlandkarte fachabteilungsübergreifendes Projektmanagement

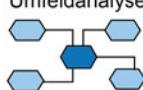
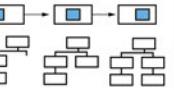
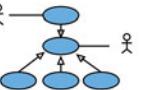
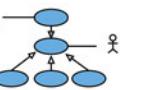
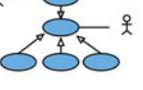
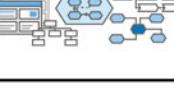
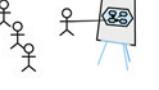
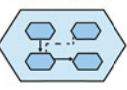
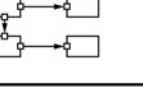
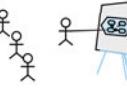
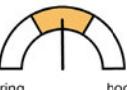
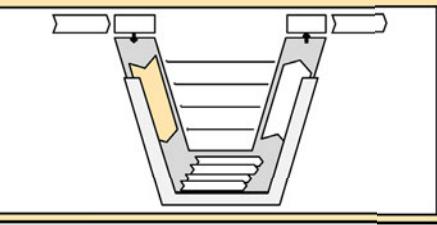
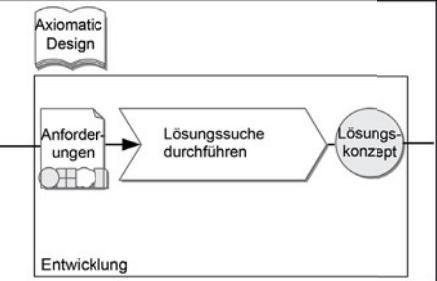
N	Prozessschritte	Ausgewählte / Nützliche Methoden (bzw. Hilfsmittel)		
Unternehmensübergreifende Zusammenarbeit	Systemumfeld dokumentieren	CONSENS - Umfeldanalyse 	SAMS-Methode  	
	Use Cases prüfen	CONSENS - Anwendungsszenarien 	USE Case (SysML) 	FAS 
	Produktlebenszyklus analysieren	CONSENS - Anwendungsszenarien 	USE Case (SysML) 	Interviews 
	Anforderungen abstimmen	Anforderungsmodellierung 	Anforderungsliste 	
	Aufträge abstimmen	Methode zur Erstellung eines Lastenheftes 	CONSENS 	Workshops 
	Schnittstellen spezifizieren	CONSENS - Wirkstruktur 	SysML Internes Blockdiagramm 	
	Status besprechen	Workshops 		

Bild A-14: Prozess- und Methodenlandkarte unternehmensübergreifende Zusammenarbeit

A1.6 Ausgewählte Methodensteckbriefe zur Prozess- und Methodenlandkarte N2

Axiomatic Design

Zielsetzung Methode zum strukturiertem Entwurf (Modellierung) (mechatronischer) Systeme	Initialaufwand  gering	Pflegeaufwand  hoch
Kurzbeschreibung <ul style="list-style-type: none"> Grundprinzip: Strukturierte Suche und Zuordnung geeigneter Lösungen für zuvor festgelegte Anforderungen Konzept der Domänenauflösung (Kundendomäne, Funktionale Domäne, physische Domäne und Prozessdomäne) soll die Modellierung unterstützen Zuordnung zwischen den Domänen ist mit einem hierarchischem Top-down-Verfahren verknüpft Ergebnis des Zuordnungsprozesses = Entwurf Beschreibung welche Anforderungen durch welche Lösungen erfüllt werden 	Wer führt die Methode durch? Welches Know-How wird benötigt? Systementwickler	
Vorteile <ul style="list-style-type: none"> Strukturierung der Modellierung Reduzierung der Komplexität 	Nachteile <ul style="list-style-type: none"> Hoher Aufwand 	Einordnung in den Systementwicklungsprozess 
Literatur/Verweis/Norm Fiege, R.: Axiomatic Design – Eine Methode zur serviceorientierten Modellierung, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2009	Werkzeuge <ul style="list-style-type: none"> Entwurfsmatrix 	Verwandte Methoden <ul style="list-style-type: none"> [Ä] Morphologischer Kasten
Hilfsdokumente zur Methode 	 Entwicklung	

A2 Methode zum Vergleich von verschiedenen MBSE-Werkzeugen

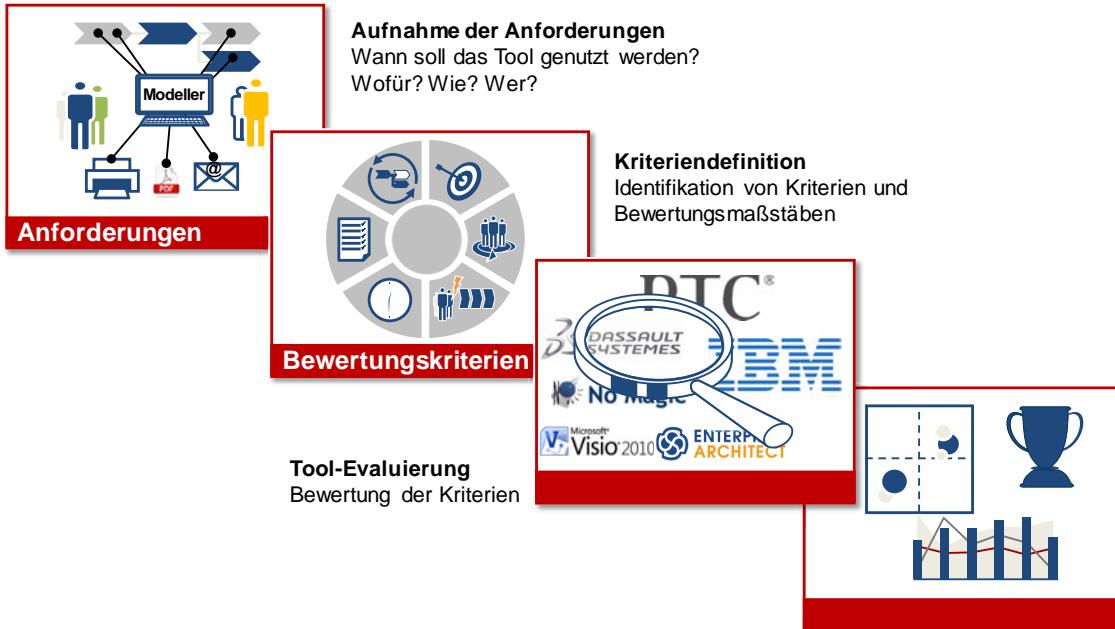


Bild A-15: Vorgehensweise zum Vergleich von verschiedenen MBSE-Werkzeugen

Unter Zusammenarbeit von DR.-ING. CHRISTIAN TSCHIRNER, JÖRG HOLTMANN, CHRISTIAN BREMER und ALEXANDER ALBERS ist innerhalb des Cluster-Querschnittsprojekts „Systems Engineering“ im BMBF-Spitzencluster „Intelligente Technische Systeme Ost-Westfalen-Lippe“ (it's OWL) eine Vorgehensweise entstanden, die den Vergleich verschiedener MBSE Werkzeuge ermöglicht. Ausgehend von den Anforderungen, die sich aus dem Rahmenbedingungen des Unternehmens sowie der Use Cases zur Anwendung ergeben, werden Bewertungskriterien und -maßstäbe definiert. Anschließend erfolgt eine parallele Analyse verschiedener Werkzeuge anhand der definierten Bewertungskriterien. Abschließend werden die Ergebnisse ausgewertet und dienen als Grundlage für eine Entscheidung.

A3 Vorgehen zur schrittweisen Einführung von Systems Engineering aus der Schulungsperspektive

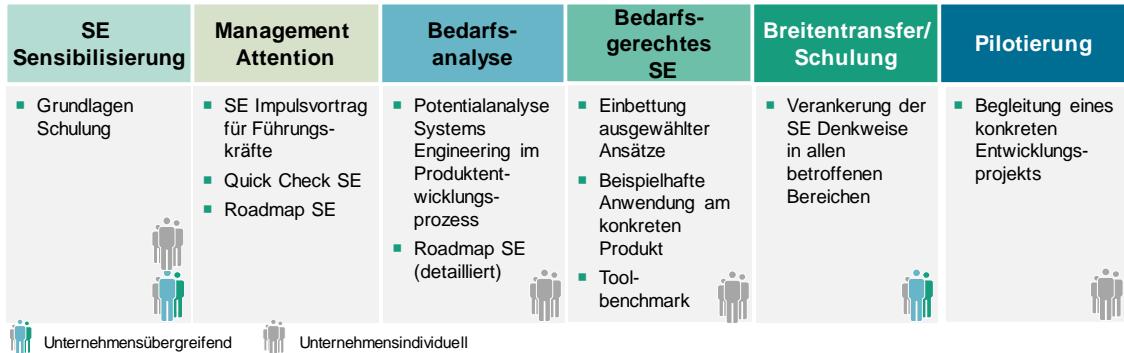


Bild A-16: Vorgehen zur schrittweisen Einführung von Systems Engineering aus der Schulungsperspektive

In Zusammenarbeit mit DANIELA HOBSCHIEDT ist im Rahmen einer Grundlagenschulung „Systems Engineering“ ein Vorgehen zur Schrittweisen Einführung von Systems Engineering aus Schulungsperspektive entstanden. Die Schulung ist Teil einer Personalweiterbildungsmaßnahme für Mitarbeiter mit langjähriger Berufserfahrung für mittelständische Unternehmen im Rahmen des BMBF-Spitzenclusters „Intelligente Technische Systeme Ostwestfalen-Lippe (it's OWL)“. Aufbauend auf der Grundlagenschulung empfiehlt sich eine Schulung auf Managementebene, um die Führungskräfte für die Notwendigkeit von SE zu sensibilisieren. Aufbauend auf einer Bedarfsanalyse und einem bedarfsgerechten SE (hier ist der Anknüpfungspunkt zu der vorliegenden Systematik) wird ein Breitentransfer zur Verankerung der SE Denkweisen im Unternehmen empfohlen. Die Begleitung eines Pilotprojekts durch erfahrene SE Experten rundet das Konzept ab.

